

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การلاميเนชันระหว่างพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูง  
และพอลิไวนิลบิวทีรัลที่นำกลับมาใช้ใหม่



นางสาวเพชรารัตน์ ทิพย์เดช  
นางสาวพรรณนภา เขมะปัญญา

โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เลขหมู่เอกสารนี้.....

เลขทะเบียน..... 55566

วัน,เดือน,ปี 19 พ.ค. 2548

ได้แก่เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
.....  
.....  
.....

**Lamination between Recycled High density Polyethylene  
and Poly (vinyl butyral)**



**Miss Pacharavalee Tipdech  
Miss Parnnapa Khaymapanya**

**A Special Project Submitted in Partial Fullfillment of the  
Requirement for the Degree of Bachelor of Science**

**Department of Chemistry**

**Faculty of Science**

**King Monkut's Institute of Technology Ladkrabang**

**Academic Year 2003**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษ เรื่อง การลามีเนชันระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและพอลิไวนิลบิวทิลที่นำกลับมาใช้ใหม่

นักศึกษา นางสาวพชรารัตน์ ทิพย์เดช  
นางสาวพรรณนภา เขมะปัญญา

ภาควิชา เคมี

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย

ภาควิชา เคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ อาจารย์มนตรี ทองคำ	
กรรมการ ผศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร	
กรรมการ ดร.นุกูล เอื้อพันธ์เศรษฐ์	

  
(ผศ.ดร.ประยงค์ ดวงดี)

หัวหน้าภาควิชา

ลิขสิทธิ์ของภาควิชา เคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษ เรื่อง	การลามีเนชันระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและพอลิไวนิลบิวทิลที่นำกลับมาใช้ใหม่
นักศึกษา	นางสาวพรรณาวดี ทิพย์เดช นางสาวพรรณนภา เขมะปัญญา
ภาควิชา	เคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2546
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาผลของปริมาณสารเพิ่มการยึดติดที่มีต่อสมบัติต่างๆของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ และวัสดุลามีเนทระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและพอลิไวนิลบิวทิลที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยสารเพิ่มการยึดติดที่ใช้คือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงค็อกกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในอัตราส่วน 0 20 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นำมาผสมด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยว จากนั้นทำการศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และทำการอัดวัสดุลามีเนทระหว่างพอลิไวนิลบิวทิลและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่มีการเติมสารเพิ่มการยึดติดที่เตรียมได้ ด้วยเครื่องอัดแบบ และทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุลามีเนท จากการศึกษาพบว่า ความแข็งแรงดึง มอดูลัส ร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก ความแข็งแรงโค้งงอ มอดูลัสโค้งงอ ความแข็งกด มีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง สำหรับค่าความแข็งแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารเพิ่มการยึดติดเพิ่มขึ้น และจากการศึกษาค่าความแข็งแรงยึดติดของวัสดุลามีเนทพบว่า มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณสารเพิ่มการยึดติดมากขึ้น จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่า อุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิเกิดผลึก และ เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก มีแนวโน้มลดลงเมื่อสารเพิ่มการยึดติดมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Special Project Title</b>	Lamination between Recycled High Density Polyethylene and Poly (vinyl butyral)
<b>Name</b>	Pacharavalee Thipdech Parnnapa Khaymapanya
<b>Department</b>	Chemistry, Faculty of Science King Monkut's Institute of Technology Ladkrabang
<b>Program</b>	Industrial Chemistry
<b>Academic Year</b>	2003
<b>Special Project Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Somsak Woramongkolchai

### ABSTRACT

This project aimed to study the appropriate amount of adhesion promoter on recycled high density polyethylene and laminated material between recycled high density polyethylene with a adhesion promoter maleic anhydride grafted polyethylene and Poly (vinyl butyral). Recycled high density polyethylene with maleic anhydride grafted polyethylene were prepared by varied amount of adhesion promoter as 0 20 40 60 80 and 100 %by weight of recycled high density polyethylene. The materials were mixed by using a single-screw extruder, and then compressed by compression machine. The samples were characterized for mechanical and thermal properties. From studies, it was found that tensile strength, Young's modulus, %elongation at yield, flexural strength, flexural modulus and hardness were no insignificantly changed. Impact strength was slightly increased by the unfilled recycled high density polyethylene and was higher when adhesion promoter increased. For thermal properties  $T_m$  and  $T_g$  and %crystallinity were decreased when adhesion promoter increased .The laminated materials were prepared by using compression moulding machine and were characterized for mechanical properties, it was found that peel strength was increased when adhesion promoter increased.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย ทางผู้จัดทำโครงการพิเศษจึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำปรึกษา ความรู้ ความห่วงใยเอาใจใส่ และคำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนความช่วยเหลือในการดำเนินงานโครงการพิเศษนี้มาตลอด

ขอขอบพระคุณ อาจารย์มนตรี ทองคำ ผศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร และ ดร. นุภูต เอื้อพันธเศรษฐ อาจารย์คณะกรรมการโครงการพิเศษที่กรุณาตรวจสอบและแก้ไขพร้อมทั้งให้คำแนะนำเพิ่มเติมเพื่อให้โครงการพิเศษฉบับนี้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาเคมีทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำปรึกษาจนโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณะ เกษประคิษฐ์ และคุณสุคดี สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานพอลิเมอร์สำหรับคำแนะนำและช่วยเหลือต่างๆ

ขอขอบพระคุณ คุณสังกะชัย สังกะธนะสกุล ที่ให้คำปรึกษาและให้ข้อมูลในการทำโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณ นักวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ภาคเคมีทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในด้านอุปกรณ์เครื่องมือและสารเคมีตลอดในการทำโครงการพิเศษ

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง เพื่อนๆ รุ่นพี่รุ่นน้องทุกท่านและบุคคลที่นอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้วที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้โดยตลอด

พชราวลี ทิพย์เดช

พรรณนภา เขมะปัญญา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	3
2.2 พอลิไวนิลปิวิทีล	5
2.3 สารยึคติด	8
2.4 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์	10
2.5 กระบวนการลามิเนท	10
2.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	12
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	17
3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการวิจัย	17
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	17
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน	18
3.4 วิธีการทดสอบ	23
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	28
4.1 สมบัติเชิงกล	28
4.2 สมบัติทางความร้อน	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	39
5.1 สรุป	39
5.2 ข้อเสนอแนะ	40
เอกสารอ้างอิง	41
ภาคผนวก	43



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	สมบัติโดยทั่วไปของ พอลิไวนิลบิวทิล	7
ตารางที่ 3.1	มาตรฐานการทดสอบสมบัติต่างๆ	23
ตารางที่ 4.1	สมบัติความร้อนที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC	37



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า	
รูปที่ 2.1	สูตร โครงสร้างอย่างง่ายของ HDPE	4
รูปที่ 2.2	สูตร โครงสร้างอย่างง่ายของ พอลิ(ไวนิล บิวทิล)	5
รูปที่ 2.3	ปฏิกิริยาการเตรียม พอลิ(ไวนิล บิวทิล)	6
รูปที่ 2.4	การทำวัสดุประเภทกระจกด้วยพอลิไวนิล บิวทิล	7
รูปที่ 2.5	การยึดติดทางเชิงกล	8
รูปที่ 2.6	การยึดติดทางไฟฟ้า	8
รูปที่ 2.7	การแพร่ซึมของสารยึดติด	9
รูปที่ 2.8	การดูดซึมของสารยึดติด	9
รูปที่ 2.9	ลักษณะ โครงสร้างของ HDPE-g-MA	10
รูปที่ 2.10	เครื่องอัดแบบไฮดรอลิกที่มีแผ่นอัดหลายชุด	11
รูปที่ 3.1	วิธีการทำแผ่นลามิเนตระหว่าง PVB และ HDPE-g-MA	19
รูปที่ 3.2	วิธีการทำแผ่นลามิเนตระหว่าง PVB และ HDPE ผสม HDPE-g-MA	20
รูปที่ 3.3	ผังไหลแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน	21
รูปที่ 3.4	การทดสอบสมบัติความโค้งงอ	25
รูปที่ 3.5	การทดสอบสมบัติการยึดติด	26
รูปที่ 4.1	ความแข็งแรงดึงของอัตราส่วนระหว่าง HDPE-g-MA/HDPE ในปริมาณที่ต่าง ๆ กัน	29
รูปที่ 4.2	ความแข็งแรงดึงของพอลิไวนิลบิวทิล	29
รูปที่ 4.3	ร้อยละการดึงยึด ณ จุดครากของอัตราส่วนระหว่าง HDPE-g-MA/HDPE ในปริมาณที่ต่าง ๆ กัน	30
รูปที่ 4.4	ร้อยละการดึงยึด ณ จุดครากของพอลิไวนิลบิวทิล	30
รูปที่ 4.5	มอดุลัสของอัตราส่วนระหว่าง HDPE-g-MA/HDPE ในปริมาณที่ต่าง ๆ กัน	31
รูปที่ 4.6	มอดุลัสของพอลิไวนิลบิวทิล	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ 4.7	ความแข็งแรงโค้งงอของอัตราส่วนระหว่าง HDPE-g-MA/HDPE ในปริมาณที่ต่าง ๆ กัน	32
รูปที่ 4.8	มอดุลัสโค้งงอของอัตราส่วนระหว่าง HDPE-g-MA/HDPE ในปริมาณที่ต่าง ๆ กัน	33
รูปที่ 4.9	ความแข็งแรงกระแทกของอัตราส่วนระหว่าง HDPE-g-MA/HDPE ในปริมาณที่ต่าง ๆ กัน	34
รูปที่ 4.10	ความแข็งกดของอัตราส่วนระหว่าง HDPE-g-MA/HDPE ในปริมาณที่ต่าง ๆ กัน	35
รูปที่ 4.11	ความแข็งกดของพอลิไวนิลบิวทีรัล	35
รูปที่ 4.12	ความแข็งแรงยึดติดของวัสดุลามิเนตระหว่าง PVB กับอัตราส่วนระหว่าง HDPE-g-MA/HDPE ในปริมาณที่ต่าง ๆ กัน	36
รูปที่ 4.13	เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของอัตราส่วนระหว่าง HDPE-g-MA/HDPE ในปริมาณที่ต่าง ๆ กัน	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ

พลาสติกที่นำกลับมาใช้ใหม่ในปัจจุบันจะมีคุณสมบัติด้อยลงและก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม ทำให้มีการคิดค้นวิธีการนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ในหลายรูปแบบ เพื่อเป็นการลดปัญหาสิ่งแวดล้อม ซึ่งในปัจจุบันมีเทคโนโลยีเป็นจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงพลาสติกที่นำกลับมาใช้ใหม่เพื่อช่วยให้พลาสติกมีสมบัติที่ดีขึ้น

ในอดีตวัสดุส่วนใหญ่ที่นำมาใช้ทำจากโลหะ แก้ว และกระดาษ ต่อมาในกลางทศวรรษที่ 20 ได้ค้นพบวัสดุใหม่คือ พอลิเมอร์ และได้พัฒนามาใช้แทนวัสดุดังกล่าวมาแล้ว เพราะน้ำหนักเบา ปรับปรุงคุณภาพได้ ขึ้นรูปได้ง่าย และผสมสีเข้าไปได้ไม่ยุ่งยาก โดยในการขึ้นรูปและการผลิตใช้พลังงานน้อย โดยใช้เป็นพอลิเมอร์บริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสม พอลิเมอร์อัลลอยด์ และ พอลิเมอร์คอมโพสิต เป็นต้น

วัสดุและบรรจุภัณฑ์จำนวนมากมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ เช่น กระดาษ หนังสือพิมพ์ กระจก เหล็ก กระจกดีบุก ขวดแก้ว ขวด PET ขวด HDPE สำหรับอะลูมิเนียมและ PET มีการนำกลับมาใช้ใหม่เป็นจำนวนมาก ส่วน HDPE เพิ่งเริ่มมีการนำกลับมาใช้ใหม่ไม่มากนัก โดยการนำมาใช้ใหม่นี้ช่วยประหยัดทรัพยากรและช่วยเหลือเศรษฐกิจให้ดีขึ้น

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE) เป็นเทอร์โมพลาสติกที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งทำขวดบรรจุภัณฑ์ที่เรียกว่า ขวดน้ำชนิดขุ่น ขวดบรรจุภัณฑ์เหล่านี้จะถูกทิ้งเป็นขยะพลาสติกอยู่ตามสถานที่ต่างๆ สำหรับพอลิไวนิลคลอไรด์ จัดเป็นเทอร์โมพลาสติกที่นิยมใช้ในการทำฟิล์มประกบวัสดุแก้ว (Safety glass laminates) ในอุตสาหกรรมแก้ว กระจก ที่ใช้ในรถยนต์ ยานอวกาศ จากกระบวนการผลิตนี้ทำให้มีเศษเหลือ (Scrap) เป็นจำนวนมากที่ไม่ได้นำมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด จึงมีความสนใจในการนำพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดนี้มาทำเป็นวัสดุลามิเนตเพื่อเป็นการลดปริมาณขยะ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานที่เหมาะสมต่อไป

วัสดุลามิเนตเกิดจากการเชื่อมพันธะระหว่างสองชั้นหรือมากกว่ารวมเป็นชั้นเดียว ซึ่งการเชื่อมติดระหว่างชั้นจะใช้สารยึดติดหรือการหลอมติดกัน ผลลัพธ์ของวัสดุลามิเนตจะเป็นพวกแผ่นที่ใช้ทำชั้นวางของ โต๊ะทำงาน การลามิเนตจะใช้ในการตกแต่งกระดาษ ผ้าใบ แก้ว ซึ่งแผ่นลามิเนตจะรวมกันโดยใช้เรซินฟีนอลิกและอีพอกซี ส่วนวัสดุลามิเนตคอมโพสิตที่มีความแข็งแรง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงจะใช้ทำแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ก่อ่ง ในขณะที่แผ่นลามิเนทอาจใช้ตกแต่งผนัง เพดาน และ  
ชั้นวางของ

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อนำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและพอลิไวนิลบิวทิลที่มียูกลีบมาใช้ใหม่ เพื่อให้เกิดประโยชน์มากที่สุด
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลของการเติมสารเพิ่มการยึดติด (adhesion promoter) ที่มีต่อสมบัติต่างๆของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่
- 1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุลามิเนทระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและพอลิไวนิลบิวทิลที่นำกลับมาใช้ใหม่

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาปริมาณสารเพิ่มการยึดติดที่มีต่อสมบัติต่างๆของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่
- 1.3.2 ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่และสารเพิ่มการยึดติด
- 1.3.3 ศึกษาความเป็นไปได้ในการทำวัสดุลามิเนทระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและพอลิไวนิลบิวทิลที่นำกลับมาใช้ใหม่

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ลดปริมาณขยะจากเศษเหลือทิ้งของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและพอลิไวนิลบิวทิล
- 1.4.2 ทราบถึงปริมาณที่เหมาะสมของสารเพิ่มการยึดติดที่จะทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
- 1.4.3 ทราบถึงสมบัติต่างๆของวัสดุลามิเนทระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและพอลิไวนิลบิวทิลที่นำกลับมาใช้ใหม่
- 1.4.4 เป็นแนวทางในการคิดค้นการปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆของพอลิเมอร์ในการวัสดุลามิเนทเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE)

##### 2.1.1 ความเป็นมา

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจัดเป็นเทอร์โมพลาสติกประเภทพอลิโอเลฟิน ซึ่งได้มาจากการะบวนการเกิดพอลิเมอร์ของเอทิลีน โดยเริ่มมีมาตั้งแต่ปี ค.ศ.1956 และได้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก HDPE อย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน [1]

##### 2.1.2 กระบวนการผลิต และตัวเร่งปฏิกิริยา

พอลิเอทิลีนส่วนใหญ่ผลิตได้จาก Slurry process หรือ Gas phase process แต่ยังคงมีการใช้ Solution phase process อยู่บ้างเล็กน้อยซึ่งในกระบวนการทั้งหมดนี้เป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน โดยขึ้นกับส่วนประกอบหลัก คือ เอทิลีนมอนอเมอร์  $\alpha$ -โอเลฟินส์ โคมอนอเมอร์ ตัวเร่งปฏิกิริยา (อาจมีมากกว่าหนึ่งองค์ประกอบ) และสารละลายไฮโดรคาร์บอนบางชนิดโดยใช้ไฮโดรเจนกับตัวเร่งปฏิกิริยาในการควบคุมน้ำหนักโมเลกุล

สำหรับ Slurry process กระบวนการเริ่มจากเอทิลีนมอนอเมอร์กับโคมอนอเมอร์ (ถ้ามี) ทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาในถังปั่นกวนทำให้อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนก่อตัวขึ้นเป็นพอลิเมอร์ จากนั้นนำมาทำให้แห้งแล้วนำมาเข้าเครื่อง Twin-screw extruder ขนาดใหญ่จากนั้นทำให้เป็นเม็ด (Pellets)

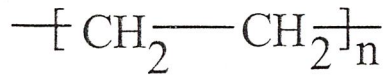
ในปัจจุบันได้มีเทคโนโลยีเพื่อที่จะพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กับ HDPE โดยแบ่งตามประเภทการใช้เป็น 2 ประเภท คือ Phillips-type chromium oxide-based catalysts จะได้ HDPE ที่มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล (MWD) ในช่วงขนาดปานกลาง-กว้าง ขณะที่ Titanate/aluminium alkyl catalysts จะใช้ในการผลิต HDPE ที่มี MWD ในช่วงที่แคบ [1]

##### 2.1.3 สมบัติทั่วไป

HDPE มีความเป็นผลึกสูง เนื่องจาก มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรง และมีโซ่กิ่งน้อยมาก ไม่มีขั้ว มีสมบัติต้านทานทางเคมีสูง และไม่ดูดซึมของผสมซึ่งจัดว่าเป็นสารที่ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor barrier) ที่ดี โดยทำการประยุกต์ใช้ในเรื่องของบรรจุภัณฑ์ มีสมบัติทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ดี HDPE ที่มีช่วงของน้ำหนักโมเลกุลปานกลาง-สูง จะมีสมบัติด้านความทนทานต่อแรงกระแทกได้ดีมาก ซึ่งมีสูตรโครงสร้างอย่างง่ายแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างอย่างง่ายของ HDPE [1]

สมบัติเฉพาะของ HDPE แต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับ 4 ตัวแปร คือ ความหนาแน่น น้ำหนักโมเลกุล (MW) การกระจายน้ำหนักโมเลกุล (MWD) และสารเติมแต่ง ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- ความหนาแน่น

ความหนาแน่นเป็นตัวแปรสำคัญในการหาสมบัติของ HDPE โดย HDPE จะมีความหนาแน่นมากกว่า  $0.940 \text{ g/cm}^3$  ส่วนพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นปานกลาง (MDPE) จะอยู่ในช่วง  $0.926\text{-}0.940$  และโฮโมพอลิเมอร์มีความหนาแน่นสูงสุด มีความเหนียว (Stiffness) และสมบัติป้องกันการซึมผ่าน (Barrier properties) ที่ดีมาก แต่โดยทั่วไปจะให้ค่า Environmental Stress Crack Resistant (ESCR) ที่ต่ำ (ESCR คือ ความสามารถในการต้านทานการแตก ซึ่งมาจาก Mechanical หรือ Chemical stress) โดยปกติความหนาแน่นที่สูงกว่า จะปรับปรุงสมบัติเชิงกล เช่น ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ความเหนียว (Stiffness) และความแข็ง (Hardness) และสมบัติทางความร้อน เช่น จุดอ่อนตัว (Heat distortion temperature) และสมบัติการป้องกันการซึมผ่าน (Barrier properties) เช่น ก๊าซ หรือ ไอน้ำ (Water vapor transmission ) ส่วนที่มีความหนาแน่นที่ต่ำกว่า จะปรับปรุงสมบัติทางด้านความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) และความสามารถในการต้านทานการแตก (ESCR) [1]

- น้ำหนักโมเลกุล (MW)

ปกติ HDPE จะมี MW อยู่ในช่วง  $40,000\text{-}300,000$  ซึ่งมีค่า Melt flow index (MI) อยู่ในช่วง  $0.02\text{-}100 \text{ g/10 min}$  โดยค่า MW จะมีผลต่อค่า MI เนื่องจากความหนืดที่แตกต่างกันคือ ถ้าค่า MW สูงแล้วความหนืดจะสูง ทำให้ MI ต่ำ และถ้า MW ต่ำ แล้วความหนืดจะต่ำ ทำให้ MI สูง ค่า MW ที่สูงกว่า (MI ต่ำกว่า) จะปรับปรุงความทนทานต่อการหลอมเหลว (Melt strength) ให้ความเหนียว (Toughness) ดีกว่า และความสามารถในการต้านทานการแตก (ESCR) ที่สูงกว่าจะทำให้เวลานำไปใช้งานต้องใช้อุณหภูมิหรือความดันสูงตามด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### - การกระจายของน้ำหนักโมเลกุล (MWD)

MWD ของพอลิเอทิลีนจะอยู่ในช่วงแคบ- กว้าง ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวเร่งปฏิกิริยา และกระบวนการที่ใช้ HDPE ที่มี MWD ที่แคบจะให้การโค้งงอ (Warpage) ที่ต่ำและค่าความทนทานต่อแรงกระแทกสูง ส่วน HDPE ที่มี MWD อยู่ในช่วงปานกลาง- กว้าง จะทำให้ processability ที่ดีกว่าใน extrusion process สำหรับ HDPE ที่มี MWD อยู่ในช่วงกว้างจะปรับปรุง melt strength และความทนทานต่อการคืบได้ดี [1]

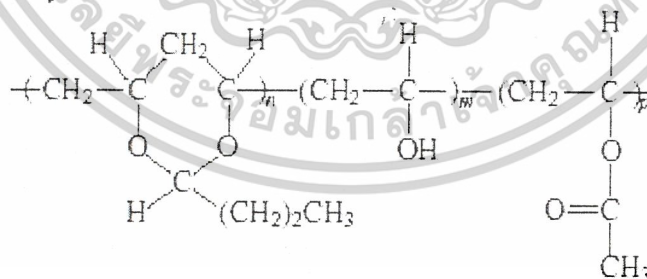
### - สารเติมแต่ง

สารเติมแต่งที่ใช้ อาจใช้ Antioxidants เพื่อป้องกันการสลายตัวของพอลิเมอร์ในระหว่างการใช้งาน หรือใช้ UV stabilizer เพื่อป้องกันการสลายตัวเนื่องจากแสงอุลตราไวโอเล็ต นอกจากนี้ยังมีสารเติมแต่งชนิดอื่น เช่น สารตัวเติม (Fillers) เพื่อลดต้นทุนการผลิต สารเสริมแรง (Reinforcement) ปรับปรุงสมบัติเชิงกล สารช่วยให้พอง (Blowing agents) สารหน่วงการติดไฟ (Flame retardants)

## 2.2 พอลิไวนิลบิวทริล (Poly vinyl butyral)

มีชื่อทางการค้าดังนี้ PVB, Butvar<sup>®</sup> (Monsanto), Butacite<sup>®</sup> (Dupont), VinyliteXYHL<sup>®</sup> (Union carbide), Rhovinal<sup>®</sup> B (Rhone-Poulenc), Movital<sup>®</sup> (Hoechst), S'Lec<sup>®</sup> (Shekisu), Saflex<sup>®</sup> (Monsanto), Trosofoi (Hüls)

โดยมีหน่วยซ้ำของพอลิไวนิลบิวทริล ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างอย่างง่ายของ พอลิ (ไวนิล บิวทริล) [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

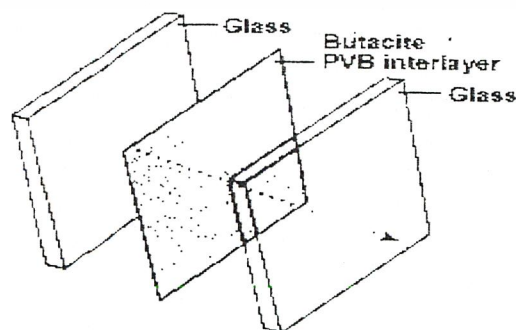


ตาราง 2.1 สมบัติโดยทั่วไปของ พอลิไวนิลบิวทิริล [2]

สมบัติ	พอลิไวนิลบิวทิริล
ความถ่วงจำเพาะ	1.0-1.1
อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (°C)	70-80
ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (MPa)	3.3-20
ดัชนีหักเหแสง ( $n_D^{25}$ )	1.49
มอดุลัสยืดหยุ่น ( $\text{MPa} \times 10^3$ )	1.93-2.34
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด	70-450
ความแข็งแรงโค้งงอ (MPa)	72-90
ความทนต่อแรงกระแทก (J/m)	40-50
ความร้อนจำเพาะ (J/gK)	1.36
ค่าการนำความร้อน (W/mK)	0.236
ค่าแรงดึงผิว (mN/m)	38
การดูดซับน้ำ (%)	1.0-2.0

การนำไปใช้งานของพอลิไวนิลบิวทิริลส่วนใหญ่จะใช้ในการทำเป็นวัสดุประกบกับกระจก เพื่อทำเป็นกระจกหน้ารถกำลังลม กระจกที่สร้างบ้านและอาคาร โดยพอลิไวนิลบิวทิริลจะช่วยป้องกันการแตกละเอียดของแก้ว พอลิไวนิลบิวทิริลยังสามารถใช้เป็นสารยึดติด เป็นสารยึดประสานในเซรามิก เคลือบแผ่นแม่พิมพ์ลิโธกราฟและออฟเซตเพื่อช่วยยึดเกาะน้ำหมึก เป็นสารเคลือบในการป้องกันพื้นผิวของโลหะ และใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอเพื่อเพิ่มความต้านทานการขูดฉีก ดังรูปที่ 2.4

Laminated glass construction with Butacite



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นสำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 สารยึดติด (Adhesive) [5]

### วิทยาศาสตร์การยึดติด (Adhesion Science)

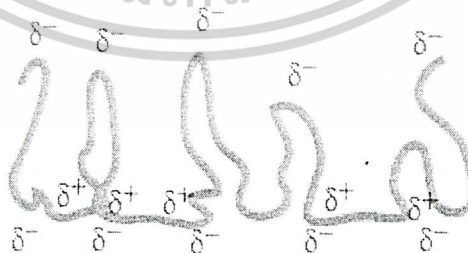
การศึกษาเกี่ยวกับวิทยาศาสตร์ของการยึดติดเป็นเรื่องที่ใหม่และมีความยากลำบาก ได้มีการศึกษาค้นคว้าใช้ประโยชน์ในการอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นในการยึดติดวัสดุต่างๆ ของกาว ซึ่งสามารถสรุปเป็นทฤษฎีได้ดังนี้

1. ทฤษฎีเชิงกลของการยึดติด (Mechanical theory of adhesion) เป็นทฤษฎีแบบง่ายๆ เพื่อช่วยให้เข้าใจเกี่ยวกับการยึดติด เมื่อใช้กาวทาลงบนพื้นวัสดุกาวจะไหลเข้าไปตามรอยแตกของพื้นผิวที่ขรุขระ ซึ่งจะแห้งกลายเป็นของแข็งยึดเกาะกับวัสดุตรงรอยต่ออย่างแข็งแรง



รูปที่ 2.5 การยึดติดทางเชิงกล [6]

2. ทฤษฎีประจุไฟฟ้าของการยึดติด (Electrostatic theory of adhesion) เสนอโดย Deryagin และ Krotova มีพื้นฐานจากประจุไฟฟ้าของชั้นคู่ที่เกิดขึ้นตรงรอยต่อของวัสดุที่ต่างกัน 2 ชนิดเมื่อใช้กาวซึ่งเปรียบได้เหมือนกับแผ่นเก็บประจุ การลอกกาวออกจากวัสดุก็เหมือนกับการแยกแผ่นเก็บประจุออกจากกัน ความแข็งแรงของการยึดติดที่เกิดขึ้นจากกาวจะเพิ่มขึ้นเมื่อช่องว่างระหว่างผิววัสดุที่กาวยึดเกาะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.6 การยึดติดทางไฟฟ้า [6]

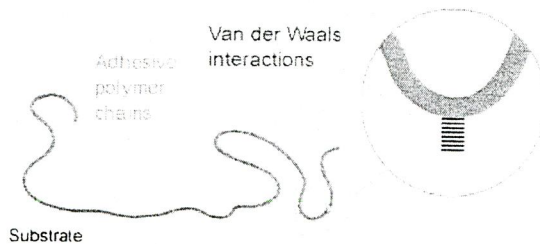
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทฤษฎีการแพร่ซึมของกาว (Diffusion theory of adhesive) ทฤษฎีนี้แสดงถึงความสามารถในการยึดติดของกาวกับวัสดุประเภทต่างๆ จะมีความเกี่ยวเนื่องกับการแพร่ซึมของกาวซึ่งเป็นสารพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลใหญ่กับวัสดุ เมื่อใช้กาวทาลงบนวัสดุ หลังจากกาวแห้งตัว จะทำให้เกิดแถบที่แข็งแรงยึดเกาะกับวัสดุ ทฤษฎีนี้จะเป็นจริงก็ต่อเมื่อกาวและวัสดุจะต้องสามารถละลายซึ่งกันและกันได้ จะทำให้มีการแพร่ซึมของกาวบนวัสดุเพิ่มมากขึ้น ความแข็งแรงของการยึดติด(adhesion strength) ของกาวจะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับจำนวน โมเลกุลของกาวที่ซึ่อกันระหว่างชั้นวัสดุ และความลึกของการแพร่ซึมของกาวบนชั้นวัสดุ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของการยึดติดเกี่ยวข้องกับน้ำหนักโมเลกุลของกาว เวลาที่ใช้ในการอัดวัสดุให้ติดกัน แรงและอุณหภูมิที่ใช้ในการอัด



รูปที่ 2.7 การแพร่ซึมของสารยึดติด [6]

4. ทฤษฎีการดูดซับของเหลวของกาว (Adsorption theory of adhesive) ทฤษฎีนี้ใช้อธิบายการยึดติดวัสดุต่างชนิดกัน ซึ่งอาจจะเป็นกาวและวัสดุก็ได้ โมเลกุลของกาวและวัสดุทำให้มีผลต่อความแข็งแรงในการยึดติดของกาว พบว่าการใช้กาวในรูปหลอมเหลวหรือสารละลายนั้นจะเกิดการดูดซับกาวบนวัสดุ ซึ่งเป็นกระบวนการต่อเนื่องที่มีความสัมพันธ์กับการปลดปล่อย การแทนที่โมเลกุลอื่นและการจัดเรียงตัวของโมเลกุลของกาวที่ถูกดูดซับ เมื่อตัวทำละลายถูกกำจัดออกหรือเมื่อกาวแข็งตัว จะเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลชนิดต่างๆ ของกาวและวัสดุ เป็นแรงรวมที่เกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) และแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของกาวและวัสดุ ซึ่งเกิดจากโครงสร้างของโมเลกุลเชื่อมติดกัน



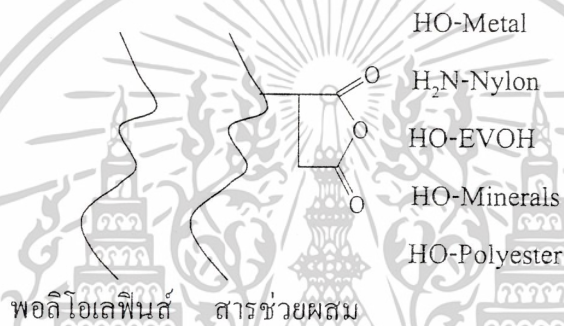
รูปที่ 2.8 การดูดซึมของสารยึดติด [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. 4 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ [7]

### (Maleic anhydride grafted high density polyethylene, HDPE-g-MA)

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง(HDPE) เป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง แต่พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงไม่มีขั้วทำให้ไม่สามารถเข้ากับวัสดุที่มีขั้วได้จึงมีการเติมสารช่วยผสม(Compatibilizer) ลงไป สำหรับพอลิโอฟีนส์ที่มีการปรับปรุงด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA) ได้มีการใช้กันอย่างกว้างขวางในรูปของสารช่วยผสมจะประกอบด้วยสองส่วนโดยส่วนที่เป็นพอลิโอฟีนส์สามารถผสมเข้ากันได้กับส่วนที่ไม่มีขั้วและอีกส่วนที่เป็นหมู่มาเลอิกแอนไฮไดรด์สามารถทำปฏิกิริยากับส่วนที่มีขั้วได้ดังนี้

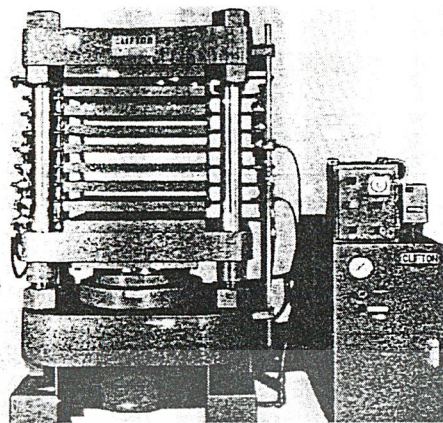


รูปที่ 2.9 ลักษณะ โครงสร้างของ HDPE-g-MA [7]

ซึ่งนอกจากจะทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสมแล้วพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ยังสามารถทำหน้าที่เป็นสารช่วยเพิ่มการยึดติดได้อีกด้วย

## 2.5 การลามิเนทพลาสติก (Laminating Plastics) [8]

วัสดุลามิเนทเกิดจากการเชื่อมพันธะระหว่างสองชั้นหรือมากกว่ารวมเป็นชั้นเดียว ซึ่งการเชื่อมติดระหว่างชั้นจะใช้สารยึดติดหรือการหลอมติดกัน โดยกระบวนการลามิเนทส่วนใหญ่ทำโดยใช้เครื่องอัดแบบไฮดรอลิกที่มีแผ่นอัดหลายชุด ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 เครื่องอัดแบบไฮดรอลิกที่มีแผ่นอัดหลายชุด [8]

โดยทั่วไปชั้นของวัสดุจะถูกจุ่มด้วยเรซินเทอร์โมเซตแล้วทำให้แห้ง เรซินที่ใช้กันส่วนมากคือ ฟีนอลิก เมลามีน ซิลิโคน อีพอกซี และพอลิเอสเตอร์ โดยทำการให้ความร้อนและความดัน เพื่อให้เรซินไหลทั่วชั้นวัสดุจากนั้นทำให้เกิดเป็นชั้นแข็ง

กระบวนการลามิเนตเทอร์โมพลาสติกจะคล้ายกับการลามิเนตเทอร์โมเซตแต่จะต่างกันตรงที่จะหลอมติดกัน โดยการให้ความร้อนและความดันจากนั้นแผ่นแม่พิมพ์จะถูกทำให้เย็นเพื่อนำเอาวัสดุออกมา ซึ่งช่วงเวลาของระยะกระบวนการจะนานกว่าและก่อนการนำไปทำการลามิเนตครั้งต่อไปต้องทำการให้ความร้อนใหม่อีกครั้งหนึ่ง

ผลิตภัณฑ์ของวัสดุลามิเนตจะเป็นพวกแผ่นที่ใช้ทำชั้นวางของ โต๊ะทำงาน การลามิเนตจะใช้ในการตกแต่งกระดาด ฝ้าใบ แก้ว ซึ่งแผ่นลามิเนตจะรวมกันโดยใช้เรซินฟีนอลิกและอีพอกซี โดยวัสดุลามิเนตคอมโพสิตที่มีความแข็งแรงสูงจะใช้ทำแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ กล่อง หรือแผ่นลามิเนตอาจใช้ตกแต่งผนัง เพดาน ชั้นวางของ

ตัวอย่างขั้นตอนการลามิเนตพลาสติกสามารถทำได้ดังนี้

1. เลือกแผ่นพอลิไวนิลที่จะให้นำไปแทรกระหว่างชั้น ตัดให้ได้ขนาด
2. ตั้งอุณหภูมิที่ต้องการจะใช้ในการกดอัด
3. ใส่วัสดุที่ต้องการจะทำลามิเนตเข้าไประหว่างแท่นกดอัด
4. ให้ความดันในการกดอัด โดยในการทำวัสดุประเภทแบบแซนวิชควรถือจะให้ความร้อนก่อนเป็นเวลา 1 นาที
5. หลังจากทำการให้ความร้อนก่อนแล้วจึงเพิ่มความดันทำให้แท่นกดอัดเป็นเวลา 2 นาที
6. หลังจาก 2 นาทีผ่านไปจึงทำการลดอุณหภูมิ และทำการเปิดระบบหล่อเย็น
7. เมื่ออุณหภูมิลดลงตามที่กำหนดจึงนำแผ่นชิ้นงานออกจากแท่นกดอัด
8. ทำการแยกชิ้นงานออกจากแผ่นแม่พิมพ์ตัดแต่งให้ได้ขนาดตามต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เทคนิคการอัด (Compression molding) เป็นเทคนิคการแปรรูปพอลิเมอร์ที่เก่าแก่ที่สุด เทคนิคหนึ่ง แต่ยังคงมีการใช้การแปรรูปพลาสติกอย่างกว้างขวาง ในปัจจุบันนิยมใช้เทคนิคนี้ในการอัดเข้าพลาสติกกลุ่มเทอร์โมเซต และยาง นอกจากนี้ยังนิยมในการแปรรูปเทอร์โมพลาสติกที่ทำการแปรรูปด้วยเทคนิคอื่นได้ยาก เช่น การแปรรูปเทอร์โมพลาสติกที่มีการผสมไฟเบอร์ชนิดต่างๆ เช่น เส้นใยแก้ว (Fiber glass) และเส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) เป็นต้นนอกจากนี้ การแปรรูปพอลิเมอร์ในกลุ่มเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic elastomer) ก็นิยมใช้การอัดในการแปรรูป [9]

การใช้การอัดในการแปรรูปพอลิเมอร์เริ่มประมาณตอนเริ่มต้นศตวรรษที่ 19 โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ Thomas Hancock ใช้ในการอัดเข้ายาง กระบวนการแปรรูปพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคการอัดจดลิขสิทธิ์ครั้งแรกในประเทศสหรัฐอเมริกา ในปี ค.ศ.1870 โดยนักวิทยาศาสตร์ 2 คน ชื่อ John Hyatt และ S.Haytt กระบวนการแปรรูปในการอัดประยุกต์ใช้กับพลาสติกเป็นครั้งแรก หลังจาก Bakeland ค้นพบวิธีการสังเคราะห์เรซินฟีนอลฟอรัลมาลดีไฮด์ ในปี 1908 ในปัจจุบันกระบวนการแปรรูปแบบนี้ ยังคงใช้กับการแปรรูปพลาสติก โดยเฉพาะเทอร์โมเซตอย่างกว้างขวาง [9]

ในเทคนิคการอัด ใช้เครื่องอัดเข้าที่ไม่มี ความซับซ้อนส่วนประกอบหลักของเครื่อง คือ แผ่นเหล็กอัด (Platens) จำนวนสองชุด ซึ่งแผ่นหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ อีกแผ่นจะถูกยึดติดอยู่กับที่ ทำให้สามารถทำการเปิดปิดเข้าได้เนื่องจากเข้าถูกยึดติดกับแผ่นเหล็กทั้งสองแผ่นนี้ ส่วนประกอบอื่นๆ คือ อุปกรณ์ให้ความร้อน ระบบไฮดรอลิก และอาจมีอุปกรณ์หล่อเย็น [9]

### ข้อดีและข้อเสียของการแปรรูปพลาสติกโดยการอัด [9]

การอัดเข้าเป็นเทคนิคที่ใช้กันมานาน แต่ยังคงมีการใช้ผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกอย่างกว้างขวาง ในปัจจุบัน แม้ว่าจะมีการพัฒนาเทคนิคใหม่ๆ เช่น การฉีดเข้าเข้า เข้ามาแทนที่ แต่เทคนิคการอัดยังมีความสำคัญในการแปรรูปพลาสติก ทั้งนี้เนื่องจากข้อได้เปรียบจากการใช้เทคนิคการอัดหลายประการ ดังสรุปได้ต่อไปนี้

- เบื้องต้นราคาถูกผลิตได้ง่าย
- มีการสูญเสียวัสดุุน้อยมาก กล่าวคือมีส่วนที่เป็น flash จากการอัดเพียงเล็กน้อย (ประมาณ 2-5 % เท่านั้น)
- โมเลกุลของพลาสติกเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ (orientation) น้อยมาก เนื่องในระหว่างการอัด เกิดการไหลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น การจัดเรียงตัวของโมเลกุลมีอิทธิพลต่อสมบัติ

ของพลาสติกบางชนิดมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เครื่องอัดมีราคาสูงกว่า เครื่องแปรรูปพลาสติกชนิดอื่นๆ
- ไม่เกิดเส้นรอยเชื่อม (weld lines) บนชิ้นงาน เช่นเดียวกับการเกิดในการแปรรูปโดยการฉีดพลาสติกเข้าเบ้า (injection molding) เส้นรอยเชื่อมเป็นจุดอ่อนที่ทำให้ชิ้นงานแตกหักได้ง่าย
- เบ้าที่ใช้ในการอัดไม่มีท่อวิ่ง (runners) ท่อนำ (sprue) และทาง (gates) จึงทำให้ไม่มีรอยตำหนิ (scars) บนชิ้นงาน ในตำแหน่งที่ต้องตัดส่วนประตูเข้า หลังจากถอดชิ้นงานออกจากเบ้า เช่นเดียวกับกรณีการฉีดเข้าเบ้า

แม้ว่าการอัดแบบจะมีข้อได้เปรียบดังได้กล่าวมาแล้ว แต่เทคนิคก็มีข้อเสียเปรียบหลายประการสรุปได้ดังนี้

- คอมปาวด์ในช่องว่างของเบ้ามีลักษณะเป็นของแข็งหรือกึ่งของแข็ง ดังนั้นในขณะทำการอัด ทำให้เกิดความเครียดภายในเบ้าสูงมาก จึงไม่สามารถสอดใส่วัสดุใดๆ เช่น โลหะ ลงในเบ้าได้จึงทำให้ไม่สามารถทำผลิตภัณฑ์แบบหุ้ม โดยใช้เทคนิคนี้ได้ ทั้งนี้เนื่องจากจะทำให้โลหะที่ใส่ลงไปบิดเบี้ยว และเบ้าเกิดการเสียหายในขณะทำการอัด
- ไม่สามารถผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้ ตัวอย่างชิ้นงานที่กล่าวถึง เช่น ชิ้นงานที่มีลักษณะแท่งเหลี่ยมยาวและมีขนาดเล็ก และแท่งทรงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางน้อย เป็นต้น ดังนั้นเทคนิคการอัด ใช้กับการผลิตชิ้นงานที่มีรูปทรงง่ายเท่านั้น
- เวลาของวัฏจักรการผลิต (cycle time) ค่อนข้างยาว
- การผลิตชิ้นงานที่หนา ต้องใช้เวลานาน เนื่องจากคอมปาวด์มีสมบัติเป็นฉนวนความร้อน จึงต้องใช้เวลาในการแปรรูปเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์จำเป็นต้องมีการตัด flash ที่เสมอ [9]

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

H.G. Henry [10] ได้ศึกษากระบวนการเปลี่ยนเศษพอลิไวนิลบิวทิล (PVB scrap) ให้อยู่ในรูปเม็ดเล็กๆที่สามารถนำไปใช้ได้ ในกระบวนการเตรียมพอลิเมอร์ผสมที่มี PVB เป็นองค์ประกอบ

PVB จัดเป็นวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกที่นำไปใช้ประโยชน์ในการทำเป็นฟิล์มอยู่ระหว่างกระจก เพื่อต้านทานการแตกกระจายของแก้ว ของกระจกหน้ารถ และกระจกตามบ้านเรือน (Safety glass laminate) มีชื่อทางการค้าว่า Butacite® ของบริษัท Dupont จากกระบวนการผลิตทำให้มีเศษเหลือของ PVB เป็นจำนวนมาก ซึ่งในสมัยก่อนทำการกำจัดโดยนำไปเผา ทำให้เสียค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมาก โดยไม่เกิดประโยชน์ใดๆ จึงได้มีการนำ PVB ผสม กับพอลิเมอร์ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่จะอิงตามค่า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อื่นๆ เช่น PVB/PP blends PVB/Polyamide blends โดย PVB จะช่วยเพิ่มความยืดหยุ่น ความมีขั้ว และความเหนียวของพอลิโอเลฟินส์ พอลิเอไมด์ แต่อย่างไรก็ตามการนำ PVB มาใช้ในพอลิเมอร์ผสม มักมีปัญหาเกิดขึ้น [10]

PVB เป็นวัสดุที่สามารถนำไปใช้ในกระบวนการได้ยาก เนื่องจาก มีแนวโน้มที่จะยึดติดกันเอง และสามารถแยกออกจากกันได้ยาก ซึ่งโดยส่วนใหญ่ PVB จะถูกเก็บไว้ในที่เย็น เพื่อลดการยึดติดกัน ซึ่งการยึดติดกันนี้ทำให้กระบวนการผลิต PVB ทำได้ยาก โดยเฉพาะในกระบวนการที่ต่อเนื่อง นอกจากนี้ PVB ยังสามารถยึดติดกับวัสดุอื่นๆ ได้ จึงทำให้การผสม PVB กับพอลิเมอร์อื่นทำได้ยาก แต่เนื่องจากความต้องการในการลดปริมาณของเศษ PVB ที่ต้องนำไปเผาทิ้ง จึงได้มีการคิดค้น ปรับปรุง PVB ให้อยู่ในรูปที่สามารถนำไปผ่านกระบวนการได้ง่ายขึ้น คือ เปลี่ยนให้อยู่ในรูปเม็ดเล็กๆ (Pellet) ที่ไม่สามารถกลับมายึดติดกันได้อีก เพื่อเป็นประโยชน์ในการนำ PVB ผสมกับพอลิเมอร์อื่นๆ [10]

สำหรับการปรับปรุง PVB นั้น ทำการปรับปรุงด้วยสารเคมี โดยเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของ PVB กับองค์ประกอบอื่น ที่สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของ PVB ได้ โดยมีเป็นประเภท กรดคาร์บอกซิลิก เอสเทอร์ แอนไฮไดรด์ ไอโซไซยาเนต สำหรับ PVB ที่ยังไม่ได้ทำการปรับปรุง สามารถยึดติดกันในลักษณะกลุ่มก้อนเหนียว ที่อุณหภูมิมากกว่า 4 องศาเซลเซียส แต่เมื่อทำการปรับปรุงแล้ว จะสามารถไหลได้อย่างอิสระ ไม่ยึดติดกันที่อุณหภูมิมากกว่า 4 องศาเซลเซียส และมากกว่า 20 50 60 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ในการนำ PVB มาผสมกับพอลิเมอร์อื่น ในกระบวนการที่ต่อเนื่อง [10]

ในการทดลอง ใช้ fusabond® 2 เกรดในการปรับปรุง PVB คือ fusabond® A MG-423D (1% maleic anhydride graft) fusabond® P MD-353D (PP with 1.4% maleic anhydride) โดยทำการผสม PVB 100.0 phr fusabond® 10.5 phr และ Irgonox® 1010 (antioxidant) 1.0 phr ที่ 230 องศาเซลเซียส ผสมกันใน Single Screw extruder หรือ Twin Screw extruder แล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำแข็งแห้ง (dry ice) และทำให้แห้งใน vacuum oven ที่อุณหภูมิปกติ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้ fusabond® P MD-353D (PP with 1.4% maleic anhydride) จะให้ผลดีที่สุดคือสามารถแยก PVB ออกจากกันได้ดีมาก [10]

P. A. Järvelä และ คณะ [11] ได้ทำการศึกษา สมบัติเชิงกลแบบไดนามิกส์และสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตที่ประกอบด้วย พอลิพรอพิลีนเป็นวัสดุหลักและมีการปรับปรุงโดยการเติมพอลิไวนิลบิวทิล และไมก้าเป็นสารตัวเติม โดยพอลิไวนิลบิวทิลที่ใช้มี 2 แบบ คือ แบบที่ไม่มีพลาสติกไซเซอร์ กับแบบที่มีพลาสติกไซเซอร์ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก งานวิจัยนี้ใช้ เครื่องอัดรีด

ชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวในการผสม จากผลการทดลองเมื่อทำการเปรียบเทียบ วัสดุคอมโพสิตสองเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบ คือ พอลิพรอพิลีนกับไมก้า กับ วัสดุคอมโพสิตสามองค์ประกอบ พอลิพรอพิลีน พอลิไวนิล-บิวทิลเรตแบบที่ไม่มีพลาสติกไซเซอร์และไมก้า พบว่า พอลิไวนิลบิวทิลเรต ไม่สามารถเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตสององค์ประกอบที่มีพอลิพรอพิลีนกับไมก้าได้ทั้งนี้โดยสังเกตได้จากค่าความแข็งแรงกระแทกที่ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิไวนิลบิวทิลเรตลงไปและพบว่าค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิพรอพิลีนไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อปริมาณพอลิไวนิลบิวทิลเรตเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากพอลิพรอพิลีนไม่สามารถเข้ากันได้กับพอลิไวนิลบิวทิลเรต เมื่อใช้พอลิไวนิลบิวทิลเรตแบบที่มีพลาสติกไซเซอร์ ในปริมาณที่เหมาะสมคือ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า สามารถปรับปรุงความทนต่อแรงกระแทกได้ แต่ความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิตลดลง เมื่อทำการเติมพอลิพรอพิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในปริมาณเล็กน้อยลงในวัสดุคอมโพสิตสามองค์ประกอบคือ พอลิพรอพิลีน พอลิไวนิลบิวทิลเรตแบบมีพลาสติกไซเซอร์และไมก้าในอัตราส่วน 63:7:30 ตามลำดับ สามารถเพิ่มความสามารถในการผสมเข้ากันได้ ปรับปรุงค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัสและความแข็ง แต่ความทนต่อแรงกระแทกลดลง

T. F. Sincock และ D.I. David [12] ได้ทำการศึกษาสมบัติและความเข้ากันได้ของพอลิไวนิลบิวทิลเรตกับพอลิยูรีเทน เนื่องจากพอลิไวนิลบิวทิลเรตที่อุณหภูมิห้องจะเปราะ ที่อุณหภูมิสูงจะอ่อนนุ่มจึงทำการผสมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนเพื่อเพิ่มความเหนียวและสมบัติที่อุณหภูมิห้องให้ยังคงความสามารถในการยึดติดที่ดีและยังคงความใสอยู่ ทำการทดลองโดยผสมพอลิไวนิลบิวทิลเรตกับ พอลิยูรีเทนซึ่งเตรียมได้จากเมทิลีน บิส ไคไซโคลเฮกซิล ไดไอโซไซยาเนต (methylene bis dicyclohexyl diisocyanate, MBDCI) ผสมกับพอลิเตตระเอทิลีน อีเทอร์ ไกลคอล (polytetramethylene ether glycol, PTMEG) โดยทำการผสมพอลิไวนิลบิวทิลเรตกับพอลิยูรีเทนในเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ จากนั้นทำเป็นแผ่นหนา 0.762 มิลลิเมตร เพื่อทำการประกบกับแก้วและทำการทดสอบความสามารถในการยึดติด จากผลการทดลองพบว่า พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีความสามารถในการยึดติดและสามารถทนต่อแรงกระแทกดีขึ้น

W. Chen และคณะ [13] ได้ทำการศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิ(3-ไฮดรอกซีบิวทิเรต)(Poly(3-hydroxybutyrate, -PHB) กับ พอลิไวนิลบิวทิลเรต (Poly(vinyl butyral), PVB) เพื่อพิจารณาพื้นฐานวิทยาและความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม โดย PHB เป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึกที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่สูง แต่มีราคาแพงและมีอุณหภูมิขึ้นรูปอยู่ในช่วงที่จำกัด จึงทำการผสม PVB เพื่อลดต้นทุนและเพิ่มสมบัติเชิงกล โดยทำการผสมในอัตราส่วน 50:50 ผสมใน Mini-Max molder ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส นาน 6 นาที ทำให้แห้งในสุญญากาศ 24 ชั่วโมง เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC ) พบว่า ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว( $T_g$ ) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ PHB ขึ้นกับปริมาณหมู่ไวนิลแอลกอฮอล์ในพอลิไวนิลบิวทิริล โดยค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว( $T_g$ ) ของ PHBจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีหมู่ไวนิลแอลกอฮอล์ 25-36 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

H. K. Jeong และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไวนิลบิวทิริลกับ ไนลอน 6 ทำการผสมโดยใช้เครื่องบดที่ทำขณะเย็น (Freeze milling) โดยการทำให้แข็งด้วยการแช่ในไนโตรเจนเหลวแล้วทำการบดเป็นผงแล้วนำมาอบลดความดันที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อเตรียมผสมพอลิเมอร์หลอมเหลวที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ใน Mini-Max Molder จากการทดลองเมื่อทำการทดสอบด้วย Dynamic Mechanical Thermal Analysis (DMTA) พบว่าเมื่อผสม พอลิไวนิลบิวทิริล กับ ไนลอน 6 ในอัตราส่วน 50:50 ถ้าพอลิไวนิลบิวทิริลมีปริมาณหมู่ไวนิลแอลกอฮอล์ น้อยกว่า 55 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก การผสมไม่เข้ากันเกิดเป็นสองวัฏภาค ถ้าปริมาณหมู่ไวนิลแอลกอฮอล์ในพอลิไวนิลบิวทิริลมีประมาณ 55-70 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักจะเกิดการผสมเป็นวัฏภาคเดียว เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) พบว่าการผสมเข้ากันได้ดีเมื่อมีหมู่ไวนิลแอลกอฮอล์ ประมาณ 69 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก

M.G. Taunusstein และคณะ [14] ได้ทำการศึกษากการผลิตชิ้นงานที่ทำมาจากเทอร์โมพลาสติกซึ่งประกอบด้วยพอลิพรอพิลีนหรือโคพอลิเมอร์ของเอทิลีน พรอพิลีน และพอลิไวนิลบิวทิริล โดยชิ้นงานที่ได้มีข้อดีเหนือกว่าชิ้นงานที่ทำจากพอลิพรอพิลีนที่ไม่มีองค์ประกอบของพอลิไวนิลบิวทิริลเนื่องจากพอลิไวนิลบิวทิริลมีแรงดึงผิวที่สูงกว่า สามารถเคลือบ พิมพ์ และประกบโดยไม่ต้องทำการปรับปรุงพื้นผิวก่อน ซึ่งชิ้นงานนี้สามารถใช้เกี่ยวกับอุปกรณ์รถยนต์ เช่น กันชนหน้า กันชนหลัง ขอบกระจก บังโคลน ใช้ทำแผ่นกรอง หรือเส้นใยที่สามารถพิมพ์ตัดสีหรือประกบติดง่าย โดยในการทดลองทำการผสมส่วนประกอบต่างๆ ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ ในงานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบ โพลิพรอพิลีน ไอโซแทกติกพอลิพรอพิลีนที่ผสมด้วยพอลิไวนิลบิวทิริล กับ โพลิพรอพิลีนของเอทิลีน พรอพิลีนที่ผสมด้วยพอลิไวนิลบิวทิริลและมีการใช้สารช่วยผสมคือมาเลอิกแอนไฮไดรด์ช่วยให้เกิดการผสมเข้ากันดียิ่งขึ้นซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบเพิ่ม โดยทำการเติมส่วนที่เป็นยางลงไปในโคพอลิเมอร์เพื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติ และยังมีการใส่สารเติมแต่งต่างๆ เช่น สารต้านการถูกออกซิไดซ์ สารป้องกันยูวี สารหล่อลื่น เป็นต้น โดยชิ้นงานที่มีแรงดึงผิวที่สูงจะประกอบด้วย 1-99 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ ไอโซแทกติกพอลิพรอพิลีน 0.01-99 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิไวนิลบิวทิริล 0-60 เปอร์เซ็นต์ของ น้ำหนักยาง ที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วน้อยกว่า - 20 องศาเซลเซียสและ 0-10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของสารช่วยผสมทำให้ได้ชิ้นงานที่มีค่าแรงดึงผิวของพอลิพรอพิลีนเพิ่มจาก 33 มิลลินิวตันต่อเมตร เป็น 39 มิลลินิวตันต่อเมตร เมื่อทำการผสมพอลิไวนิลบิวทิริลลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

1. พอลิไวนิลบิวทีรัล (Polyvinylbutyral, PVB) ที่นำกลับมาใช้ใหม่ : ค่าอัตราการไหล (Melt flow rate , ASTM D1238[15] ) เท่ากับ 3.98 g/10min (190°C/2.16kg)
2. เม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (high density polyethylene, HDPE) ที่นำกลับมาใช้ใหม่ : ค่าอัตราการไหล (Melt flow rate, ASTM D1238[15]) เท่ากับ 0.26 g/10 min (190°C/2.16kg)
3. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงตอกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (High density polyethylene-graft-maleic anhydride, HDPE-g-MA): ค่าอัตราการไหล (Melt flow rate) เท่ากับ 2.00 g/10min (190°C/2.16Kg) บริษัท อินโนเวชั่น กรุ๊ป

#### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder): axon ab plastmaskiner
2. เครื่องอัดแบบชนค็อคแรง (Compression Molding): บริษัท Lab Tech จำกัด
3. เครื่องบดพลาสติก (Grinder) รุ่น A600 : Bosco Engineering
4. เครื่องตัดชิ้นงาน : CEAST ST6052
5. เครื่องวัดอัตราการไหล (Melt flow rate tester) : CEAST6841.000
6. เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง (Universal testing machine) รุ่น LR 30 K : Llyod Instrument Ltd.
7. เครื่องทดสอบความแข็งแรงกระแทก (Izod impact tester): Yasuda Seiki Seisakusho Ltd.
8. เครื่องทดสอบความแข็งกดแบบชอร์ดี (Hardness tester, shore D): Yasuda Seiki Seisakusho Ltd.
9. เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Differential scanning calorimeter, DSC) รุ่น Pyris Diamond DSC : Perkin Elmer
10. เครื่องมือทดสอบความแข็งแรงในการยึดติด (Peel strength): Universal testing machine รุ่น LR 30 K : Llyod Instrument Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 11. ตู้อบ (oven)

## 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

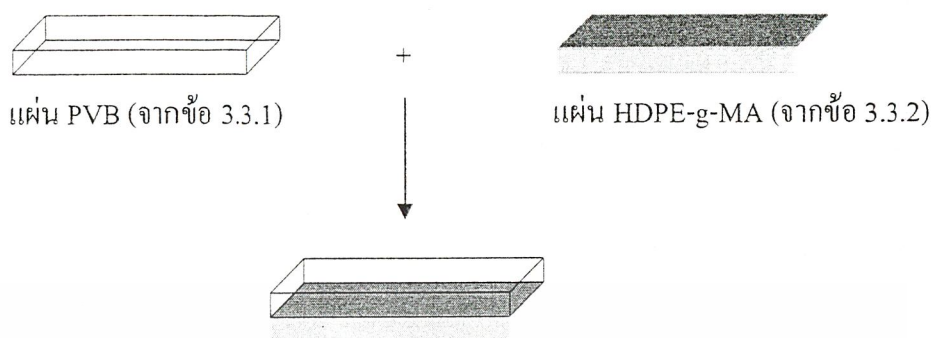
### 3.3.1 การเตรียมแผ่นพอลิไวนิล บิวทิล (PVB)

1. นำเม็ดพอลิไวนิลบิวทิล(PVB) มาทำการบดด้วยเครื่องบดพลาสติก (Grinder)
2. อบ PVB ที่ได้จากการบด ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง
3. นำเม็ด PVB มาทำการอัดแบบเป็นแผ่น โดยใช้แผ่นแม่พิมพ์หนา 2 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องอัดแบบชนิดอัดแรง ทำการอัดร้อนที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที จากนั้นทำการอัดเย็นอีก 7 นาที
4. อบแผ่น PVB ที่ได้ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสนาน 24 ชั่วโมงเพื่อทำการเตรียมประกบกับแผ่น HDPE-g-MA

### 3.3.2 การเตรียมแผ่นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงตอกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (HDPE-g-MA)

1. นำเม็ดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงตอกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (HDPE-g-MA) มาทำการอัดแบบเป็นแผ่น โดยใช้แผ่นแม่พิมพ์หนา 2 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องอัดแบบชนิดอัดแรง ทำการอัดร้อนที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที จากนั้นทำการอัดเย็นอีก 7 นาที
2. ทำการตัดชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน
3. อบแผ่น HDPE-g-MA ที่ได้ใน ข้อ 1 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสนาน 24 ชั่วโมง
4. นำแผ่น PVB ที่ได้จากข้อ 3.3.1 มาทำการอัดประกบกับแผ่น HDPE-g-MA ที่ได้ในข้อ 3 โดยใช้แผ่นแม่พิมพ์หนา 3 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องอัดแบบชนิดอัดแรง ทำการอัดร้อนที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที จากนั้นทำการอัดเย็นอีก 7 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แผ่นลามิเนตระหว่าง PVB และ HDPE-g-MA

รูปที่ 3.1 วิธีการทำแผ่นลามิเนตระหว่าง PVB และ HDPE-g-MA

5. ทำการตัดชิ้นงานแผ่นลามิเนตเพื่อทดสอบความแข็งแรงการยึดติด (Peel Strength) และทดสอบค่า

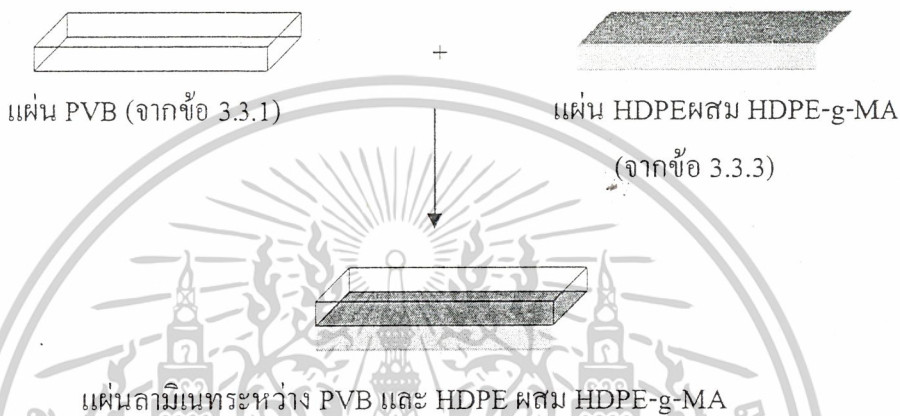
### 3.3.3 การเตรียมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (Recycled HDPE)

#### ที่มีการเติมสารเพิ่มการยึดติด (HDPE-g-MA)

1. นำเม็ดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (HDPE-g-MA) มาทำการผสมกับเม็ดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (high density polyethylene, HDPE) ที่นำกลับมาใช้ใหม่ ในปริมาณ 20 40 60 80 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว (Single Screw Extruder) อุณหภูมิ 160 170 180 และ 190 องศาเซลเซียสตามลำดับ ใช้ความเร็วรอบ 30 รอบต่อนาที
2. นำเม็ดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (HDPE-g-MA) ที่ทำการผสมกับเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเรียบร้อยแล้วมาทำการบดด้วยเครื่องบดพลาสติก (Grinder)
3. นำเม็ดที่ทำการบดแล้วในข้อ 2 มาทำการอัดแบบเป็นแผ่นโดยใช้แผ่นแม่พิมพ์หนา 2 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องอัดแบบชนิดอัดแรง ทำการอัดร้อนที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที จากนั้นทำการอัดเย็นอีก 7 นาที
4. ทำการตัดชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน
5. อบแผ่นที่ได้ในข้อ 3 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสนาน 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

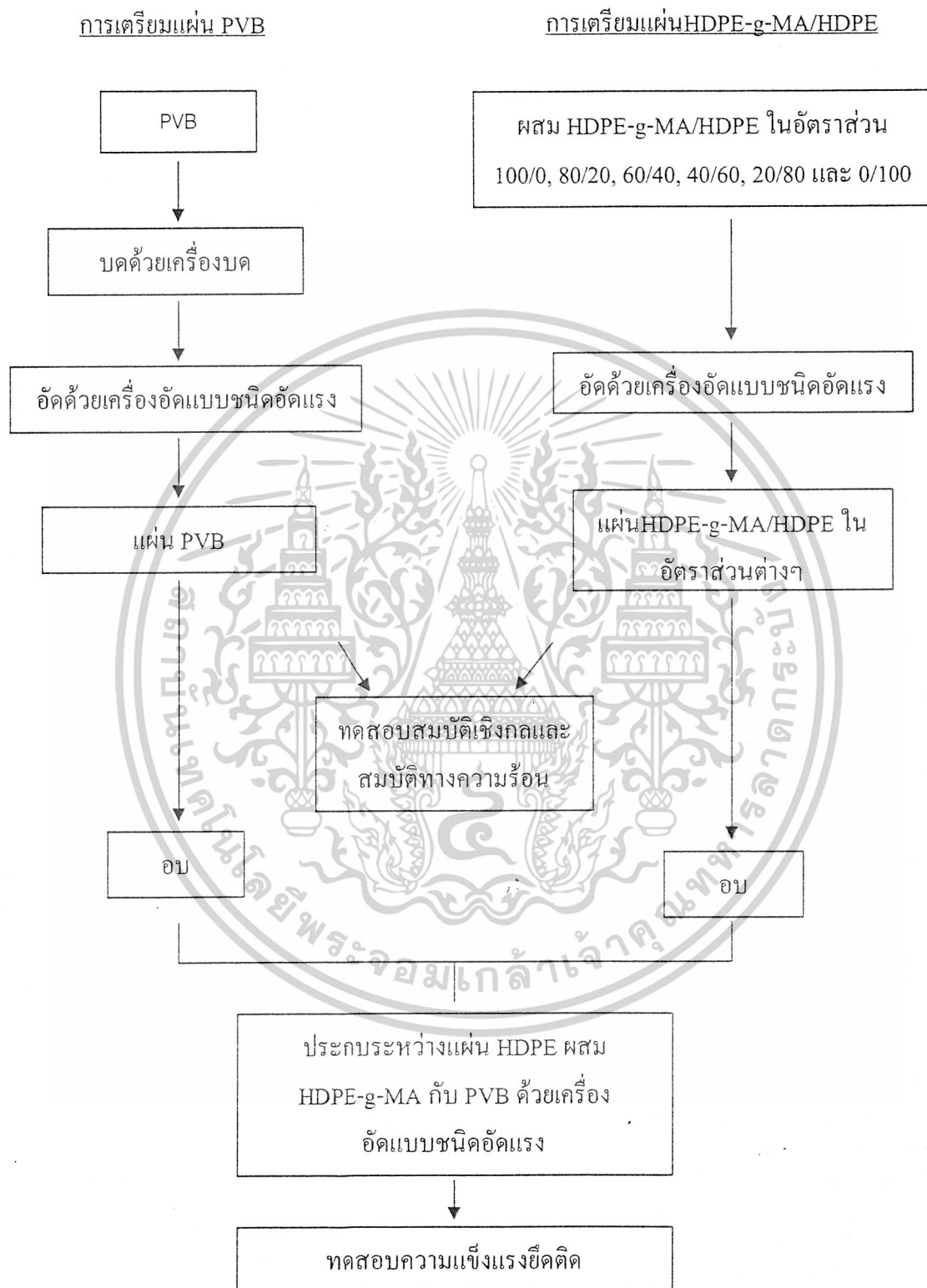
6. นำแผ่นพอลิไวนิลบิวทิริลที่ได้ใน 3.3.1 มาทำการอัดประกบกับแผ่นที่ได้ในข้อ 5 โดยใช้แผ่นแม่พิมพ์หนา 3 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องอัดแบบชนิดอัดแรง ทำการอัดร้อนที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที จากนั้นทำการอัดเย็นอีก 7 นาที



รูปที่ 3.2 วิธีการทำแผ่นลามิเนตระหว่าง PVB และ HDPE ผสม HDPE-g-MA

7. ทำการตัดชิ้นงานเพื่อทดสอบความแข็งแรงการยึดติด (Peel Strength)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ผังไหลแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.4 การทดสอบ

นำชิ้นงานทดสอบที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่

#### 1. ทดสอบสมบัติเชิงกล

- สมบัติทางแรงดึง สำหรับค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัส และร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก
- สมบัติความโค้งงอ สำหรับค่าความแข็งแรงโค้งงอ และค่ามอดุลัสโค้งงอ
- ความแข็งแรงกระแทก
- ความแข็งกด
- ความแข็งแรงในการยึดติด

#### 2. ศึกษาสมบัติทางความร้อน

- ดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC )



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 วิธีการทดสอบ

การทดสอบสมบัติต่างๆของวัสดุประเภทที่ได้ทำการทดสอบตามมาตรฐานต่างๆดังนี้  
ตารางที่ 3.1 มาตรฐานการทดสอบสมบัติต่างๆ

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยที่รายงาน
ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)	ASTM D638	MPa
มอดุลัส (Modulus)	ASTM D638	MPa
ร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก (%Elongation at yield)	ASTM D638	%
ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength)	ASTM D256	$\text{kJ/m}^2$
ความแข็งกด (Hardness)	ASTM D2240	Shore D
ความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength)	ASTM D790	MPa
มอดุลัส โค้งงอ (Flexural modulus)	ASTM D790	MPa
ความแข็งแรงในการยึดติด (Peel strength)	ASTM D1876	N/mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.1 สมบัติเชิงกล

#### 3.4.1.1 สมบัติทางแรงดึง (Tensile properties)

สมบัติที่ทำการศึกษาได้แก่ ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก(Tensile strength at yield) ค่ามอดูลัส(Young's Modulus) และค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก(% Elongation at yield) ตามมาตรฐาน ASTM D638 [16] โดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Testing Machine) และโปรแกรม WINDAP ในการคำนวณโดยชิ้นงานทดสอบอยู่ในรูปคัมเบลล์ ใช้ชิ้นงานทดสอบจำนวน 10 ชิ้นในแต่ละสูตร และใช้สภาวะในการทดสอบดังนี้

- โหลดเซลล์ (Load cell)	5	กิโลนิวตัน (kN)
- ความเร็วในการดึง (Test speed)	100	มิลลิเมตร/นาที
- ความยาวของเกจ (Gauge length)	70	มิลลิเมตร
- Grammage	1.0	กรัม/ตารางเมตร
- ระดับเซลล์ (Cell class)	0.5	

ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัส และค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\text{ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)} = \frac{F}{A}$$

$$\text{มอดูลัส (Modulus)} = \frac{\text{ความเค้น(stress)}}{\text{ความเครียด(strain)}}$$

$$\text{ร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก (%Elongation at yield)} = \left( \frac{l - l_0}{l_0} \right)$$

เมื่อ F คือ แรงที่ใช้ในการดึงยืดชิ้นงานตัวอย่าง (หน่วยเป็นนิวตัน; N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (หน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร; mm<sup>2</sup>)

l คือ ระยะระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงชิ้นงานตัวอย่าง(หน่วยเป็นมิลลิเมตร ; mm)

l<sub>0</sub> คือ ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดก่อนทำการดึงชิ้นงานเป็นระยะที่แคบที่สุด และมีพื้นที่ขนานกัน (Gauge length หน่วยเป็นมิลลิเมตร; mm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.1.2 สมบัติความโค้งงอ (Flexural properties)

สมบัติที่ทำการศึกษาได้แก่ ค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) และค่ามอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus) ตามมาตรฐาน ASTM D790 [17] โดยใช้ชิ้นงานทดสอบอย่างน้อย 5 ชิ้น ในแต่ละสูตรและใช้สภาวะทดสอบดังนี้

- |  |                    |
|--|--------------------|
| - โหลดเซลล์ (Load cell)                    | 5 กิโลนิวตัน (kN)  |
| - ความเร็วในการกด (Compression speed)      | 1 มิลลิเมตร/นาที   |
| - ระยะห่างของขารองรับชิ้นงาน (Span length) | 40 มิลลิเมตร       |
| - Grammage                                 | 1.0 กรัม/ตารางเมตร |
| - ระดับเซลล์ (Cell class)                  | 0.5                |



รูปที่ 3.4 การทดสอบสมบัติความโค้งงอ [17]

สูตรที่ใช้ในการคำนวณค่าความแข็งแรงโค้งงอและค่ามอดุลัสโค้งงอมีดังนี้

$$\text{ค่าความแข็งแรงโค้งงอ: } \sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2}$$

$$\text{ค่ามอดุลัสโค้งงอ: } E_b = \left( \frac{L}{4bh^3} \right) \left( \frac{\Delta F}{\Delta d} \right)$$

เมื่อ F คือ แรงกด (หน่วยเป็นนิวตัน; N)

L คือ Span length (หน่วยเป็นมิลลิเมตร; mm)

b คือ ความกว้างของตัวอย่าง (หน่วยเป็นมิลลิเมตร; mm)

h คือ ความหนาของตัวอย่าง (หน่วยเป็นมิลลิเมตร; mm)

$\Delta F$  คือ ผลต่างของแรงดึง (หน่วยเป็นนิวตัน; N)

$\Delta d$  คือ ระยะกดโค้งงอ (หน่วยเป็นมิลลิเมตร; mm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.1.3 ความแข็งแรงกระแทก

การทดสอบความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D256 [18] โดยในการทดสอบจะใช้มาตรฐานไอซอด (Izod type) ใช้ชิ้นงานทดสอบ 10 ชิ้นในแต่ละสูตร ค่าความแข็งแรงกระแทกสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ความแข็งแรงกระแทก (IS)} = W/A$$

เมื่อ IS คือ ค่าความแข็งแรงกระแทก (หน่วยเป็นกิโลจูลต่อตารางเมตร;  $\text{kJ/m}^2$ )

W คือ ค่าพลังงานกระแทก (หน่วยเป็นกิโลจูล; kJ)

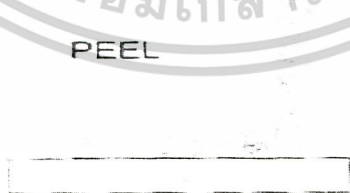
A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (หน่วยเป็นตารางเมตร;  $\text{m}^2$ )

### 3.4.1.4 ความแข็งกด (Hardness)

การทดสอบความแข็งกด (Hardness) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D2240 [19] ในการทดสอบจะใช้มาตรฐาน Shore D ลักษณะพื้นผิวของวัสดุที่นำมาทดสอบต้องมีความเรียบมีความหนาไม่ต่ำกว่า 6 มิลลิเมตร ใช้เวลากด 15 วินาทีจึงอ่านค่าได้ ใช้ชิ้นงานทดสอบจำนวน 5 ชิ้นในแต่ละสูตร โดยทำการทดสอบ 5 ครั้งต่อหนึ่งชิ้นงานทดสอบ

### 3.4.1.5 ความแข็งแรงในการยึดติด (Peel Strength)

ตัดชิ้นงาน กว้าง 1 นิ้ว ยาว 4 นิ้ว การยึดติดจะเว้นระยะหัวจับไว้ประมาณ 1 นิ้วหลังจากประกบชิ้นงานและอัด โดยใช้ความเร็วในการดึง 1 นิ้วต่อนาที ทำการทดสอบจำนวน 10 ชิ้น โดยความแข็งแรงในการยึดติดสามารถคำนวณได้ดังนี้ [20]



รูปที่ 3.5 การทดสอบสมบัติการยึดติด [20]

$$\text{ความแข็งแรงในการยึดติด} = \frac{\text{แรงที่ใช้ (นิวตัน)}}{\text{ความกว้างของวัสดุ (มิลลิเมตร)}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2 สมบัติทางความร้อน

#### 3.4.2.1 ดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC)

ชั่งสารใส่อะลูมิเนียมแพนจำนวน 5 มิลลิกรัม ให้ทราบปริมาณสารที่แน่นอนแล้ว  
วิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC โดย

- อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) ที่  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$
- อัตราการเย็นตัว (Cooling rate) ที่  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$
- ศึกษาอุณหภูมิหลอมเหลว ( $T_m$ ) อุณหภูมิตกผลึก ( $T_c$ ) และความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) ของชิ้นงาน

การคำนวณหา Heat of melting ( $\Delta H_m$ ) และความเป็นผลึกสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\Delta H = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟ (mJ)}}{\text{น้ำหนักสารตัวอย่าง (mg)}}$$

การหาปริมาณความเป็นผลึก (% crystallinity)

$$\text{Degree of crystallinity (HDPE)} = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^{\circ}} \times 100$$

เมื่อ  $\Delta H_f$  คือ เอนทาลปีที่ใช้ในการหลอมเหลวพอลิเมอร์ หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของอุณหภูมิหลอมเหลว ( $\Delta H$ ) หารด้วยน้ำหนักพอลิเมอร์ตัวอย่าง

$\Delta H_f^{\circ}$  คือ Heat of fusion ของ 100% HDPE เท่ากับ 293 จูล/กรัม [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

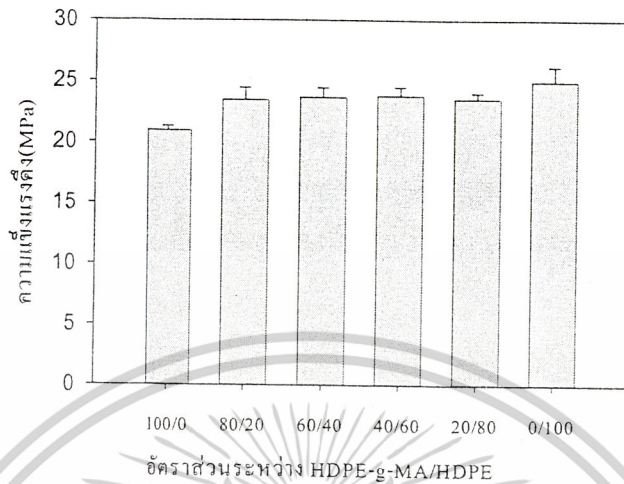
โครงการพิเศษนี้เกี่ยวข้องกับการเตรียมและการทดสอบสมบัติต่างๆของวัสดุลามิเนตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและพอลิไวนิลบิวทิลที่นำกลับมาใช้ใหม่ทำการทดลองโดยการผสมสารเพิ่มการยึดติด(HDPE-g-MA) ลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ในปริมาณ 100% 80% 60% 40% 20% และ 0% ตามลำดับโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว(Single-screw extruder) เพื่อศึกษาผลของปริมาณสารเพิ่มการยึดติด(HDPE-g-MA) ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)และสมบัติทางความร้อน(Thermal properties) จากนั้นทำการประกบด้วยพอลิไวนิลบิวทิลแล้วทำการทดสอบสมบัติการยึดติด

#### 4.1 สมบัติเชิงกล

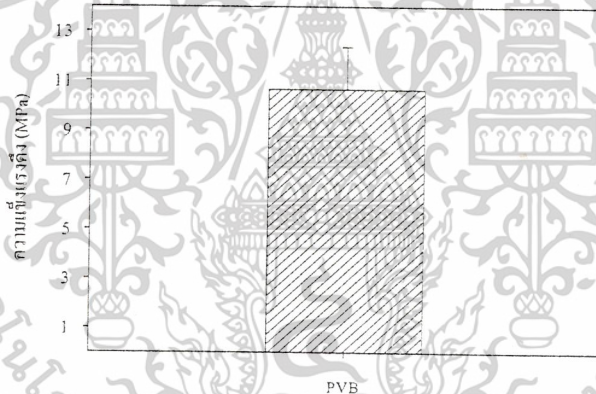
สมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่โดยมีพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์(HDPE-g-MA)เป็นสารเพิ่มการยึดติด โดยศึกษาถึงตัวแปรต่างๆดังนี้ ความแข็งแรงดึง(Tensile strength) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก (%Elongation at yield) มอดุลัส(Young's Modulus) ความแข็งแรงโค้งงอ(Flexural strength) มอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus) ความแข็งแรงกระแทก(Impact strength) ความแข็งแรงกด(Hardness)ซึ่งปรับเปลี่ยนปริมาณสารเพิ่มการยึดติด(HDPE-g-MA)ได้แก่ 0% 20% 40% 60% 80% และ 100% และความแข็งแรงยึดติด(Peel strength) ของวัสดุลามิเนตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีการเพิ่มสารยึดติดกับพอลิไวนิลบิวทิลที่นำกลับมาใช้ใหม่ จากสมบัติเชิงกลต่างๆที่ศึกษาได้ผลการทดลองดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.1 ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)



รูปที่ 4.1 ความแข็งแรงดึงของอัตราส่วนระหว่าง HDPE-g-MA/HDPE ในปริมาณที่ต่าง ๆ กัน

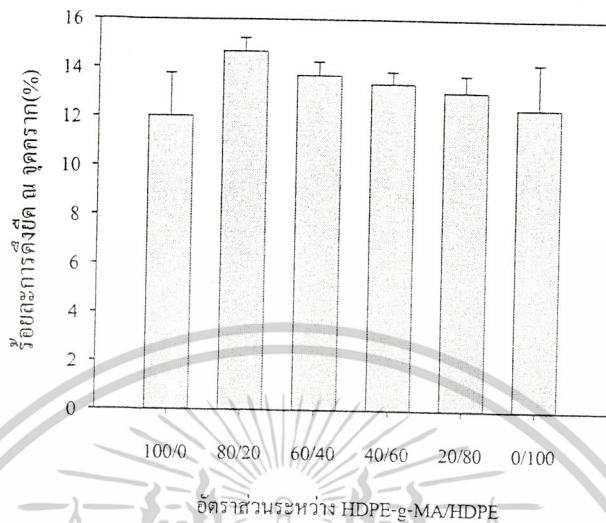


รูปที่ 4.2 ความแข็งแรงดึงของพอลิไวนิลบิวทิล

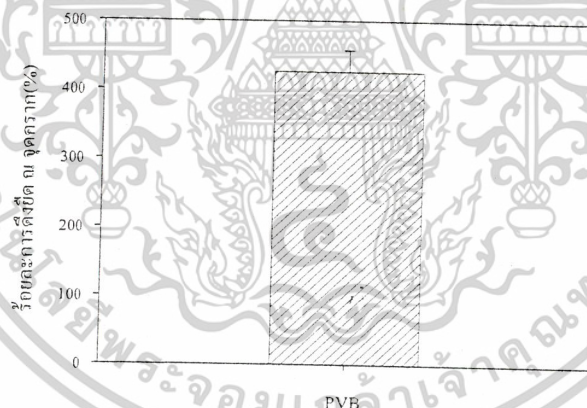
จากรูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของอัตราส่วนระหว่าง HDPE-g-MA/HDPE ในปริมาณที่ต่าง ๆ กันพบว่า เมื่อปริมาณ HDPE-g-MA ที่เติมลงใน HDPE เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่มากนักเนื่องจากสายโซ่หลักเป็นพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันคือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ดังนั้นการปรับเปลี่ยนปริมาณจึงไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 ร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก (%Elongation at yield)



รูปที่ 4.3 ร้อยละการดึงยืด ณ จุดครากของอัตราส่วนระหว่าง HDPE-g-MA/HDPE ในปริมาณที่ต่าง ๆ กัน

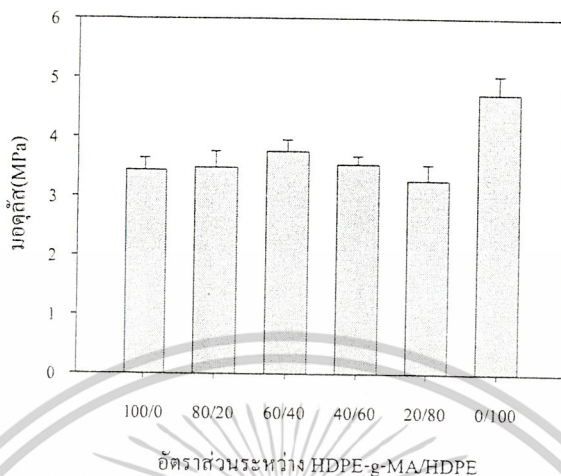


รูปที่ 4.4 ร้อยละการดึงยืด ณ จุดครากของพอลิไวนิลบิวทิล

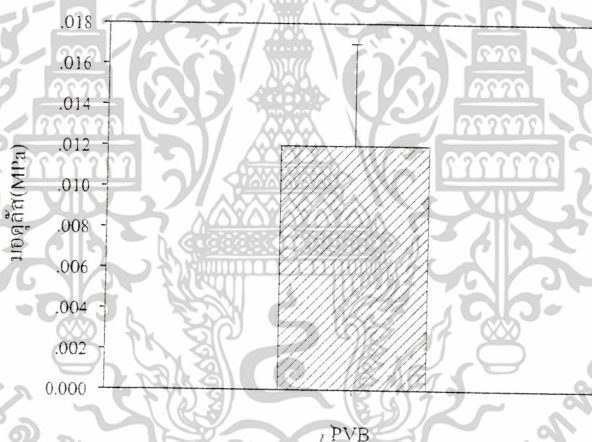
จากรูปที่ 4.3 แสดงผลของ HDPE-g-MA ที่มีต่อร้อยละการดึงยืด ณ จุดครากพบว่า เมื่อมีการเติม HDPE-g-MA ลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ทำให้ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก เปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่ไม่มีการเติม HDPE-g-MA เนื่องจากสายโซ่หลักเป็นพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันคือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงดังนั้นการปรับเปลี่ยนปริมาณจึงไม่มีผลต่อค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดครากของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.3 มอดูลัส (Young's modulus)



รูปที่ 4.5 มอดูลัสของอัตราส่วนระหว่าง HDPE-g-MA/HDPE ในปริมาณที่ต่าง ๆ กัน

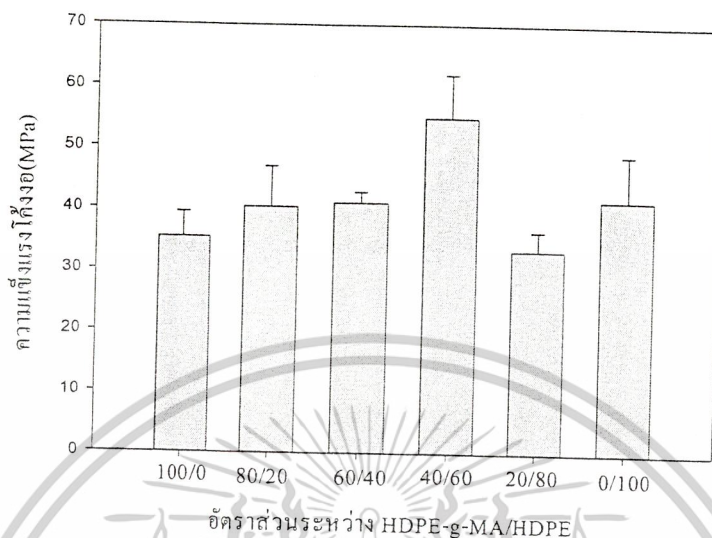


รูปที่ 4.6 มอดูลัสของพอลิไวนิลบิวทิล

จากรูปที่ 4.5 แสดงผลของ HDPE-g-MA ที่มีต่อค่ามอดูลัสพบว่า เมื่อมีการเติม HDPE-g-MA ลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ทำให้ค่ามอดูลัสลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่ไม่มีการเติม HDPE-g-MA และเมื่อเพิ่มปริมาณ HDPE-g-MA ค่าที่ได้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมากนักเนื่องจากสายโซ่หลักเป็นพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันคือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงดังนั้นการปรับเปลี่ยนปริมาณจึงไม่มีผลต่อค่ามอดูลัสของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

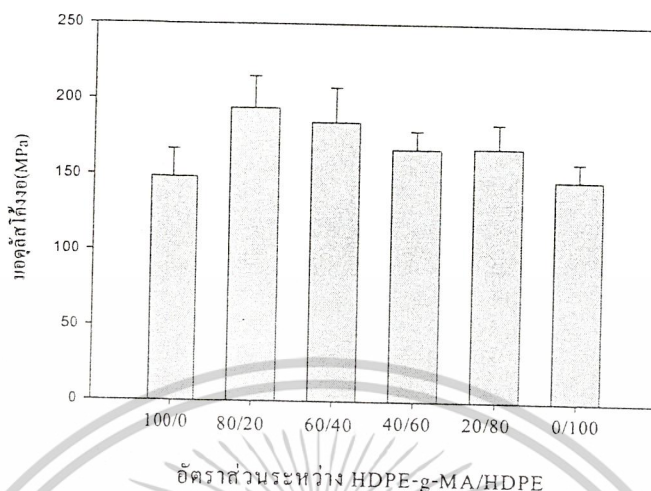
#### 4.1.4 ความแข็งแรงโค้งงอ(Flexural strength)



รูปที่ 4.7 ความแข็งแรงโค้งงอของอัตราส่วนระหว่าง HDPE-g-MA/HDPE ในปริมาณที่ต่างกัน

จากรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความแข็งแรงโค้งงอกับอัตราส่วนระหว่าง HDPE-g-MA/HDPE ในปริมาณที่ต่างกันพบว่า ค่าความแข็งแรงโค้งงอของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่มีการเติม HDPE-g-MA เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ไม่มีการเติม HDPE-g-MA ค่าที่ได้ไม่เกิดความเปลี่ยนแปลงมากนักและเมื่อเพิ่มปริมาณ HDPE-g-MA ค่าความแข็งแรงโค้งงอยังคงมีแนวโน้มคงที่ไม่เกิดความเปลี่ยนแปลงเนื่องจากสายโซ่หลักของพอลิเมอร์เป็นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเหมือนกันดังนั้นเมื่อทำการเติมลงไปและเพิ่มปริมาณขึ้นจึงไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง

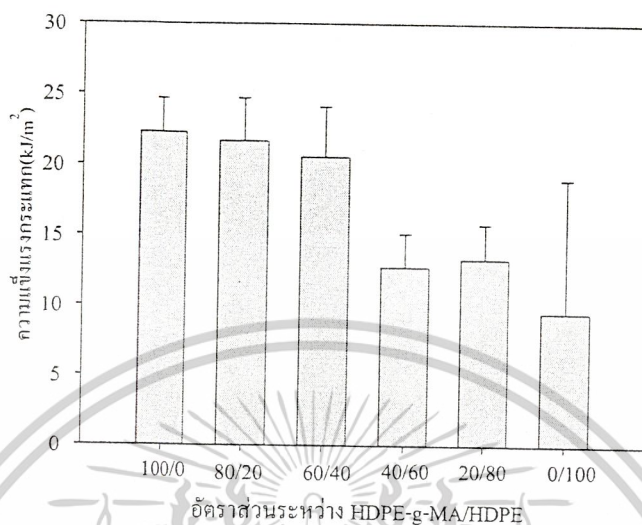
#### 4.1.5 มอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus)



รูปที่ 4.8 มอดุลัสโค้งงอของอัตราส่วนระหว่าง HDPE-g-MA/HDPE ในปริมาณที่ต่าง ๆ กัน

จากรูปที่ 4.8 แสดงผลของ HDPE-g-MA ที่มีต่อค่ามอดุลัสโค้งงอพบว่า เมื่อมีการเติม HDPE-g-MA ลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ทำให้ค่ามอดุลัสโค้งงอเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่ไม่มีการเติม HDPE-g-MA และเมื่อเพิ่มปริมาณ HDPE-g-MA พบว่า ค่ามอดุลัสโค้งงอไม่เกิดความเปลี่ยนแปลงเนื่องจากสายโซ่หลักเป็นพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันคือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ดังนั้นการปรับเปลี่ยนปริมาณจึงไม่มีผลต่อค่ามอดุลัสโค้งงอของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่

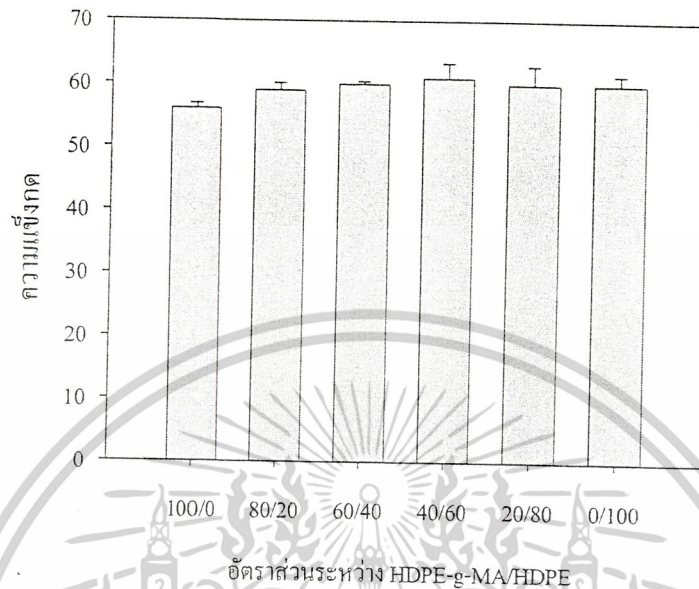
#### 4.1.6 ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength)



รูปที่ 4.9 ความแข็งแรงกระแทกของอัตราส่วนระหว่าง HDPE-g-MA/HDPE ในปริมาณที่ต่าง ๆ กัน

จากรูปที่ 4.9 แสดงผลของ HDPE-g-MA ที่มีต่อค่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่พบว่า ค่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติม HDPE-g-MA และพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ HDPE-g-MA มากขึ้นค่าความแข็งแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจาก HDPE-g-MA มีความเป็นอสัณฐานซึ่งจะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่รับแรงและกระจายแรงมากกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่จึงทำให้สามารถรับแรงกระแทกได้ดีกว่าและเมื่อเพิ่มปริมาณ HDPE-g-MA พบว่า ค่าความแข็งแรงกระแทกมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น [7]

#### 4.1.7 ความแข็งกด (Hardness)



รูปที่ 4.10 ความแข็งกดของอัตราส่วนระหว่าง HDPE-g-MA/HDPE ในปริมาณที่ต่าง ๆ กัน

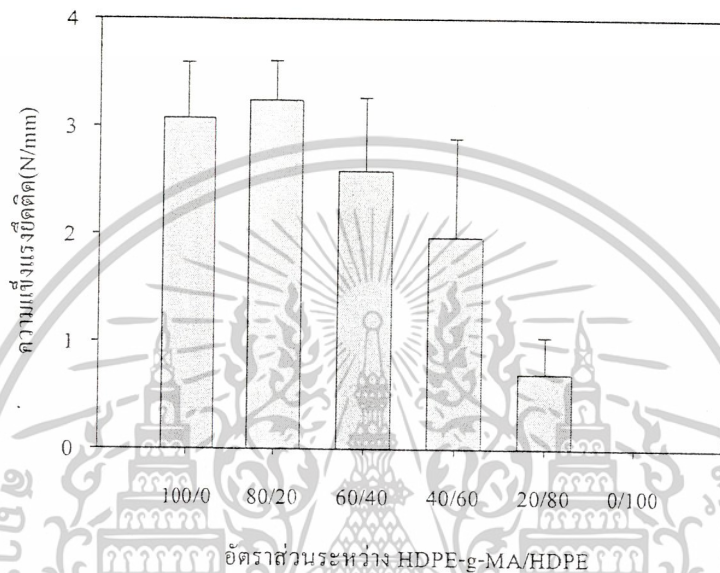


รูปที่ 4.11 ความแข็งกดของพอลิไวนิลบิวทิลรีด

จากรูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดกับอัตราส่วนระหว่าง HDPE-g-MA/HDPE ในปริมาณที่ต่าง ๆ กัน พบว่าเมื่อเติม HDPE-g-MA ลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ค่าความแข็งกดลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่ไม่มีการเติม HDPE-g-MA และที่อัตราส่วนของปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่มากขึ้นพบว่าค่าความแข็งกดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำมาใช้ในการทดลองเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็น พอลิเมอร์ที่นำจากการนำกลับมาใช้ใหม่ซึ่งอาจมีสารเติมแต่งหรือสารตัวเติมต่างๆที่ทำให้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงมีค่าความแข็งแรงมากขึ้น

#### 4.1.8 ความแข็งแรงยึดติด(Peel strength)



รูปที่ 4.12 ความแข็งแรงยึดติดของวัสดุลามิเนตระหว่าง PVBกับอัตราส่วนระหว่าง HDPE-g-MA/HDPE ในปริมาณที่ต่างๆกัน

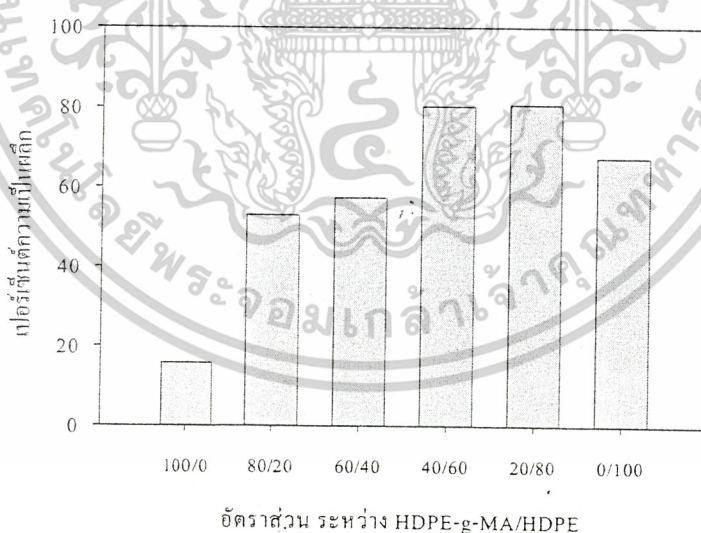
จากการทดลองพบว่า พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ไม่สามารถประกบติดกับพอลิไวนิลบิวทิลได้ แต่เมื่อทำการเติม HDPE-g-MA ลงพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากรูปที่ 4.12 พบว่า สามารถประกบติดกับพอลิไวนิลบิวทิลได้และเมื่อเพิ่มปริมาณ HDPE-g-MAพบว่า มีแนวโน้มเพิ่มค่าความแข็งแรงยึดติดมากขึ้นเนื่องจาก HDPE-g-MA มีความเป็นขั้วในส่วนของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ซึ่งสามารถสร้างพันธะยึดติดกับพอลิไวนิลบิวทิลที่มีขั้วเหมือนกันได้ โดยหมู่แอนไฮไดรด์จะสามารถสร้างพันธะกับหมู่ไฮดรอกซีของพอลิไวนิลบิวทิลทำให้เกิดการเชื่อมโยงยึดติดกันได้ [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 สมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

ตารางที่ 4.1 ค่าสมบัติความร้อนที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC

อัตราส่วนระหว่าง HDPE-g-MA/HDPE	$T_m$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta H$ (J/g)	%Crys	$T_c$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
100/0	120.625	46.102	15.734	108.594
80/20	121.439	155.191	52.966	110.363
60/40	129.635	167.877	57.296	117.280
40/60	122.170	235.278	80.300	110.507
20/80	130.081	236.513	80.721	118.471
0/100	130.171	197.561	67.427	118.198



รูปที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของอัตราส่วนระหว่าง  
HDPE-g-MA/HDPE ในปริมาณที่ต่างๆกัน

จากตารางที่ 4.1 เมื่อทำการเติม HDPE-g-MA ลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่พบว่า ทำให้ค่าอุณหภูมิการหลอมเหลว ( $T_m$ ) ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำกลับมาใช้ใหม่ลดลงเล็กน้อยและมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ HDPE-g-MA เนื่องจาก HDPE-g-MA มีความเป็นผลึกน้อยกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่เมื่อเติมลงไปจึงทำให้ความเป็นผลึกของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงลดลงส่งผลให้อุณหภูมิการหลอมเหลวลดลง ส่วนค่าอุณหภูมิการก่อผลึก( $T_c$ ) ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อเติม HDPE-g-MA โดยมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณ HDPE-g-MA เพิ่มขึ้น และจากรูปที่ 4.13 เปรอ์เซ็นต์ความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ HDPE-g-MA เพิ่มมากขึ้นเนื่องจาก HDPE-g-MA มีความเป็นอสัณฐานมากกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ ดังนั้นการจัดเรียงตัวเป็นผลึกน้อยลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ HDPE-g-MA



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุป

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาวัสดุลามิเนตที่เกิดจากการประกบกันระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับพอลิไวนิลบิวทิลที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยทำการปรับปรุงพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงด้วยการเติมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (HDPE-g-MA) โดยทำการศึกษาในอัตราส่วนต่างๆดังนี้คือ 100% 80% 60% 40% 20% และ 0% โดยทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหอนเดี่ยว (Single-screw extruder) จากนั้นทำเป็นชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติต่างๆด้วยเครื่องอัดรูป (Compression) แล้วทำการทดสอบสมบัติต่างๆของวัสดุที่เตรียมได้ ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน จากนั้นทำการประกบติดกับพอลิไวนิลบิวทิลที่นำกลับมาใช้ใหม่แล้วทำการทดสอบสมบัติการยึดติด

จากการทดสอบสมบัติต่างๆพอสรุปได้ว่า

- พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่ทำการเติม HDPE-g-MA แล้วเพิ่มปริมาณ HDPE-g-MA ให้มากขึ้นเมื่อทดสอบสมบัติการดึงยึดพบว่า ค่าความแข็งแรงดึง ค่าร้อยละการดึงยึด ณ จุดครากและ ค่ามอดุลัสค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก
- พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่ทำการเติม HDPE-g-MA แล้วเพิ่มปริมาณ HDPE-g-MA ให้มากขึ้นเมื่อทดสอบสมบัติการโค้งงอพบว่า ค่าความแข็งแรง โค้งงอและค่ามอดุลัส โค้งงอค่าไม่เปลี่ยนแปลง
- พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่ทำการเติม HDPE-g-MA แล้วเพิ่มปริมาณ HDPE-g-MA ให้มากขึ้นเมื่อทดสอบความแข็งแรงกระแทกพบว่า ค่าความแข็งแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณ HDPE-g-MA เพิ่มมากขึ้น
- พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่ทำการเติม HDPE-g-MA แล้วเพิ่มปริมาณ HDPE-g-MA ให้มากขึ้นเมื่อทดสอบความแข็งแรงกดพบว่า ค่าความแข็งแรงกดมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณ HDPE-g-MA มากขึ้น
- พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่ทำการเติม HDPE-g-MA แล้วเพิ่มปริมาณ HDPE-g-MA ให้มากขึ้นเมื่อทดสอบความแข็งแรงยึดติดของวัสดุลามิเนตระหว่าง PVB กับ HDPE ที่ผสมด้วย HDPE-g-MA พบว่า ค่าความแข็งแรงยึดติดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณ HDPE-g-MA เพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อุณหภูมิการหลอมเหลวและอุณหภูมิการก่อผลึกของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณ HDPE-g-MA ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์ความ เป็นผลึกมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ HDPE-g-MA เพิ่มมากขึ้น

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าการเติม HDPE-g-MA มีไม่มีผลต่อผลต่อ ค่าความแข็งแรง ดึง ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก ค่ามอดุลัส ค่าความแข็งแรงโค้งงอ ค่ามอดุลัสโค้งงอและค่าความ แข็งกคเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติมHDPE-g-MA แต่การเติม HDPE-g-MA จะมีผลต่อความ แข็งแรงยึดติด ความแข็งแรงกระแทก และสมบัติทางความร้อนมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี ไม่เติม HDPE-g-MA

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การนำวัสดุ ไปใช้งานอาจจะต้องประกบติดกับวัสดุอื่นดังนั้นจึงควรศึกษาสมบัติการ ยึดติดกับวัสดุอื่นของวัสดุประเภทที่ได้ด้วย
2. ควรทำการผสมพอลิเมอร์ชนิดอื่นลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำ กลับมาใช้ใหม่ที่มีการผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลือก แอนไฮไดรด์เพื่อช่วยลดต้นทุนและช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลของวัสดุลามิเนท
3. ควรมีระบบจัดการในการเก็บรักษาพอลิไวนิลบิวทิลเนื่องจากพอลิไวนิลบิวทิลรัล ุดความชื้นสูงและสามารถยึดติดกันดีมาก
4. ควรทำการศึกษาภาวะการขึ้นรูปของวัสดุประเภทเพื่อทำให้ได้สมบัติดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก

### ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆของสารตัวอย่าง

#### 1.1 ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength)

ชั้นที่	ค่าความแข็งแรงดึง (MPa)						
	อัตราส่วนระหว่าง HDPE-g-MA : HDPE						PVB
	100 : 0	80 : 20	60 : 40	40 : 60	20 : 80	0 : 100	
1	20.900	23.570	22.070	23.520	23.650	23.810	12.280
2	21.030	24.670	23.260	25.020	23.080	24.970	9.911
3	20.460	24.650	22.960	23.470	22.630	26.150	11.170
4	20.550	22.740	24.620	24.260	23.950	23.000	9.255
5	20.650	22.030	24.110	24.110	24.040	24.940	11.550
6	21.060	22.040	23.900	24.340	23.960	27.470	6.635
7	21.620	23.560	24.650	23.830	24.180	25.170	12.170
8	21.230	24.500	23.980	22.470	23.610	24.790	11.710
9	21.140	23.650	23.560	23.400	23.370	24.650	11.400
10	20.980	23.610	23.840	24.050	23.110	25.120	10.560
ค่าเฉลี่ย	20.962	23.502	23.695	23.847	23.558	25.007	10.664
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.345	0.978	0.780	0.687	0.502	1.204	1.711

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.2 ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก (%Elongation at yield)

ชั้นที่	ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดคราก (%)						
	อัตราส่วนระหว่าง HDPE-g-MA : HDPE						PVB
	100 : 0	80 : 20	60 : 40	40 : 60	20 : 80	0 : 100	
1	9.922	14.050	14.480	13.610	13.110	9.922	430.600
2	10.510	14.220	13.520	14.200	12.410	10.510	413.000
3	13.340	15.430	13.180	12.730	11.840	13.340	405.900
4	9.400	14.060	14.560	13.300	12.700	9.400	408.800
5	14.290	14.800	13.730	13.900	13.370	14.290	442.800
6	11.650	14.880	13.020	13.370	13.800	11.650	392.900
7	13.370	15.010	13.890	13.490	13.440	13.370	475.800
8	13.870	15.560	14.230	13.660	12.650	13.870	480.800
9	11.230	14.550	13.150	12.680	14.090	14.020	410.450
10	12.850	14.210	13.400	12.950	13.180	13.410	403.120
ค่าเฉลี่ย	12.043	14.677	13.716	13.389	13.059	12.378	426.417
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.736	0.551	0.560	0.493	0.673	1.840	30.758

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ค่ามอดูลัส (Young's Modulus)

ชั้นที่	ค่ามอดูลัส(MPa)						
	อัตราส่วนระหว่าง HDPE-g-MA : HDPE						PVB
	100 : 0	80 : 20	60 : 40	40 : 60	20 : 80	0 : 100	
1	3.484	3.827	3.896	3.358	3.441	4.172	0.020
2	3.344	3.884	3.635	3.515	3.212	4.820	0.007
3	3.240	3.201	3.442	3.440	3.285	4.779	0.007
4	3.588	3.537	3.762	3.586	3.276	4.637	0.011
5	3.163	3.256	3.732	3.594	3.564	4.839	0.014
6	3.662	3.300	3.510	3.825	3.396	5.385	0.009
7	3.526	3.450	3.797	3.470	3.454	4.674	0.020
8	3.801	3.200	3.937	3.410	3.298	4.555	0.013
9	3.450	3.460	3.997	3.696	2.598	4.870	0.008
10	3.240	3.840	3.961	3.557	3.210	4.580	0.009
ค่าเฉลี่ย	3.450	3.495	3.767	3.545	3.273	4.731	0.012
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.204	0.270	0.191	0.140	0.263	0.307	0.005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 ค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength)

ชนิด ชั้นที่	ค่าความแข็งแรงโค้งงอ (MPa)						
	อัตราส่วนระหว่าง HDPE-g-MA : HDPE						PVB
	100 : 0	80 : 20	60 : 40	40 : 60	20 : 80	0 : 100	
1	39.996	45.365	42.829	51.622	36.772	34.612	-
2	36.916	40.213	41.120	63.628	31.358	47.419	-
3	31.186	35.468	42.822	50.221	29.015	49.564	-
4	30.851	32.458	39.168	48.126	33.399	43.076	-
5	37.733	48.214	39.132	61.225	35.922	33.255	-
ค่าเฉลี่ย	35.336	40.343	41.014	54.964	33.2932	41.585	-
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	4.101	6.578	1.838	6.976	3.204	7.381	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5 ค่ามอดูลัสโค้งงอ (Flexural modulus)

ชนิดที่	ค่ามอดูลัสโค้งงอ (MPa)						
	อัตราส่วนระหว่าง HDPE-g-MA : HDPE						PVB
	100 : 0	80 : 20	60 : 40	40 : 60	20 : 80	0 : 100	
1	168.568	175.318	200.956	158.805	153.067	166.445	-
2	150.927	191.299	175.660	163.317	150.309	139.052	-
3	127.396	182.892	214.582	154.910	180.583	136.986	-
4	132.787	229.232	178.738	181.619	174.295	144.969	-
5	164.456	193.393	156.302	179.308	184.729	150.095	-
ค่าเฉลี่ย	148.827	194.427	185.248	167.592	168.597	147.509	-
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	18.404	20.739	22.800	12.148	15.906	11.768	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.6 ความแข็งแรงกระแทก(Impact strength)

ชั้นที่	ค่าความแข็งแรงกระแทก (kJ/m <sup>2</sup> )						
	อัตราส่วนระหว่าง HDPE-g-MA : HDPE						PVB
	100 : 0	80 : 20	60 : 40	40 : 60	20 : 80	0 : 100	
1	21.65	21.56	26.12	12.42	16.18	10.32	-
2	22.54	25.04	25.85	16.39	16.17	9.10	-
3	24.56	23.22	22.27	10.80	15.87	10.04	-
4	22.24	21.56	15.41	10.08	12.08	10.07	-
5	23.54	25.31	19.39	11.59	13.09	9.16	-
6	19.50	19.88	18.90	16.80	13.72	10.60	-
7	17.86	18.45	15.97	14.10	9.44	6.91	-
8	20.87	16.29	20.67	13.20	11.07	12.57	-
9	25.65	20.44	20.54	10.50	15.03	7.83	-
10	24.32	25.04	20.41	11.40	10.55	8.34	-
ค่าเฉลี่ย	22.27	21.67	20.55	12.73	13.31	9.49	
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	2.404	3.03	3.55	2.38	2.48	9.49	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.7 ค่าความแข็งกด (Hardness)

ชั้นที่	ค่าความแข็งกด (Hardness)						
	อัตราส่วนระหว่าง HDPE-g-MA : HDPE						PVB
	100 : 0	80 : 20	60 : 40	40 : 60	20 : 80	0 : 100	
1	55	57	59	58	62	61	18
2	57	58	60	64	61	61	15
3	56	59	60	59	62	58	17
4	56	60	60	62	55	62	15
5	55	59	60	61	59	60	15
ค่าเฉลี่ย	56	59	60	61	60	60	16
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.84	1.14	0.45	2.39	2.95	1.52	1.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.8 ค่าความแข็งแรงยึดติด (Peel strength)

ชั้นที่	ค่าความแข็งแรงยึดติด (N/mm)					
	อัตราส่วนระหว่าง HDPE-g-MA : HDPE					
	100 : 0	80 : 20	60 : 40	40 : 60	20 : 80	0 : 100
1	3.144	2.631	1.964	2.211	0.667	-
2	2.714	3.365	1.657	2.259	1.530	-
3	2.799	3.919	3.530	1.289	0.826	-
4	3.824	2.726	2.428	1.957	0.868	-
5	2.960	3.379	1.724	4.031	0.481	-
6	2.291	3.140	3.253	1.030	0.460	-
7	3.373	3.358	2.192	1.275	0.847	-
8	2.694	3.424	2.845	0.929	0.482	-
9	3.938	3.139	3.190	2.533	0.391	-
10	3.012	3.338	3.079	2.183	0.451	-
ค่าเฉลี่ย	3.075	3.242	2.586	1.970	0.700	-
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.488	0.366	0.682	0.923	0.344	-

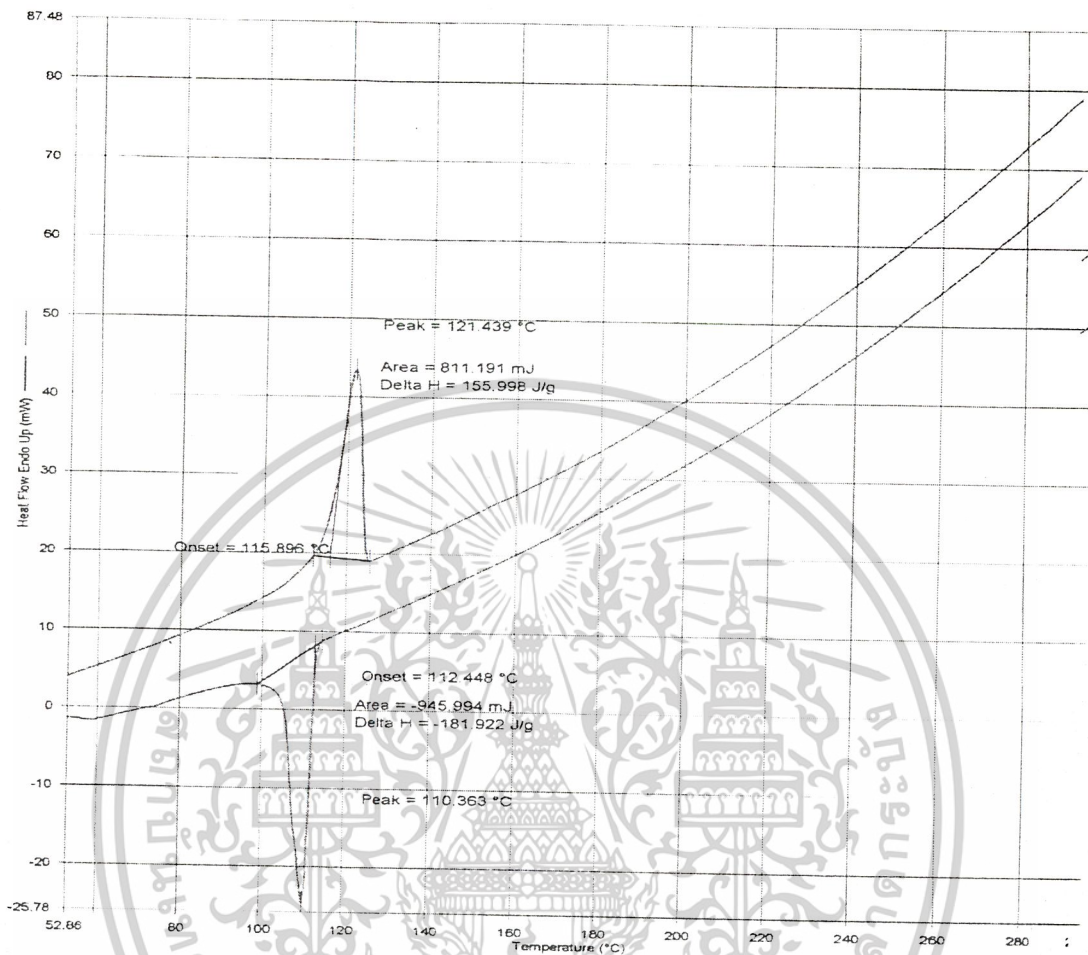
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข. การทดสอบสมบัติทางความร้อน



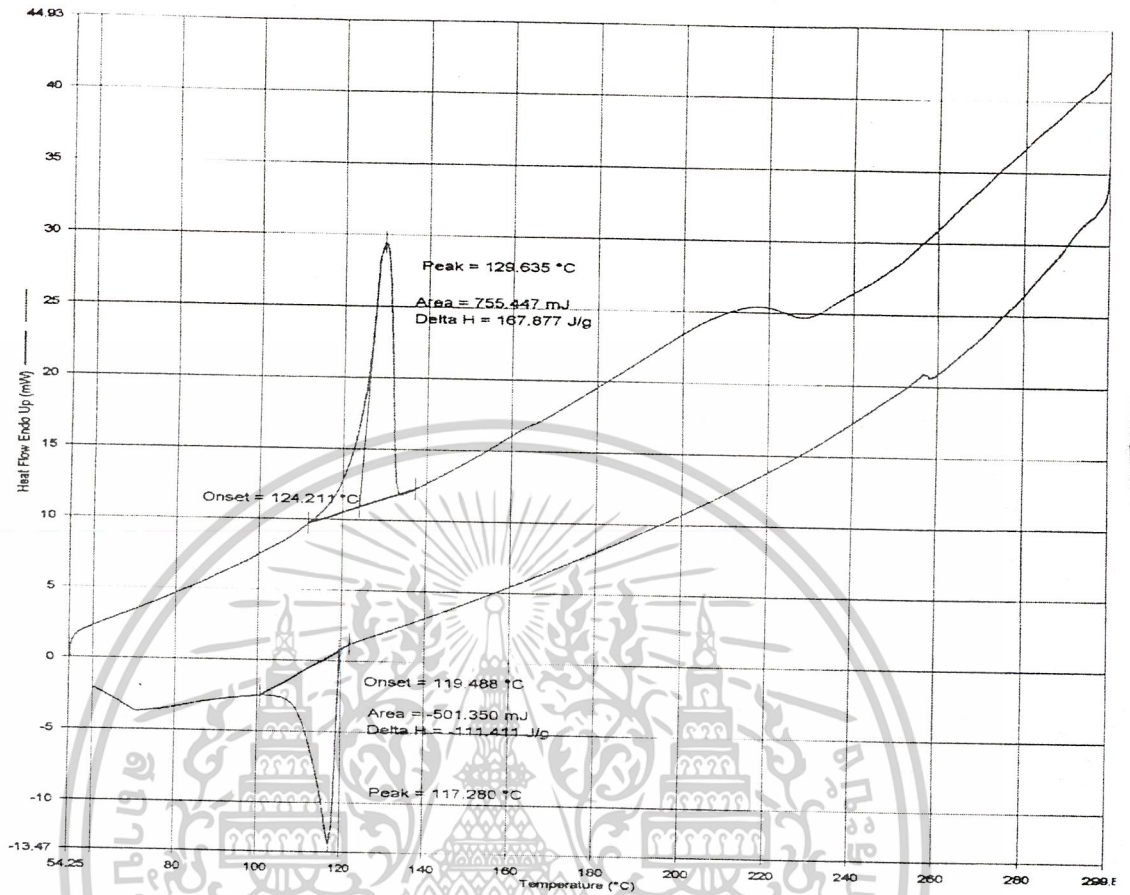
รูปที่ 1 สมบัติทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (HDPE-g-MA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



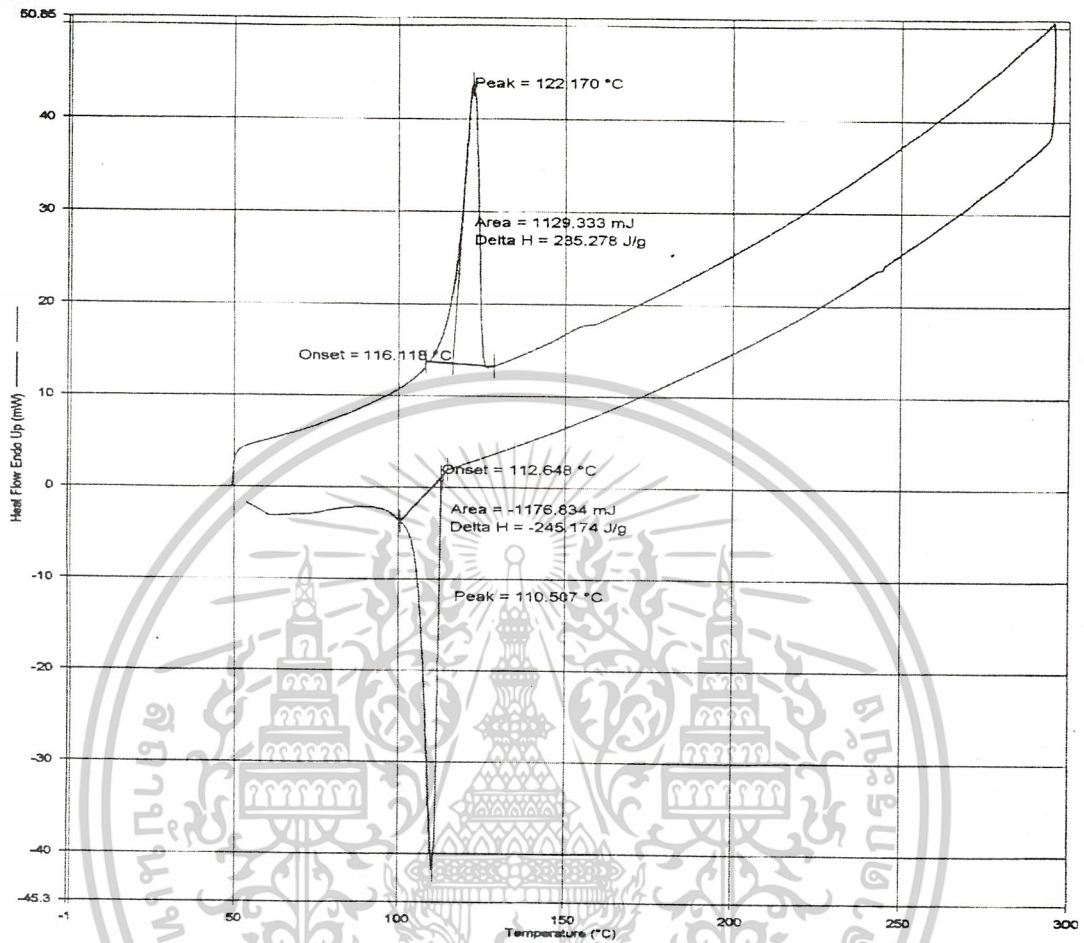
รูปที่ 2 สมบัติทางความร้อนของ HDPE-g-MA/HDPE ในอัตราส่วน 80/20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



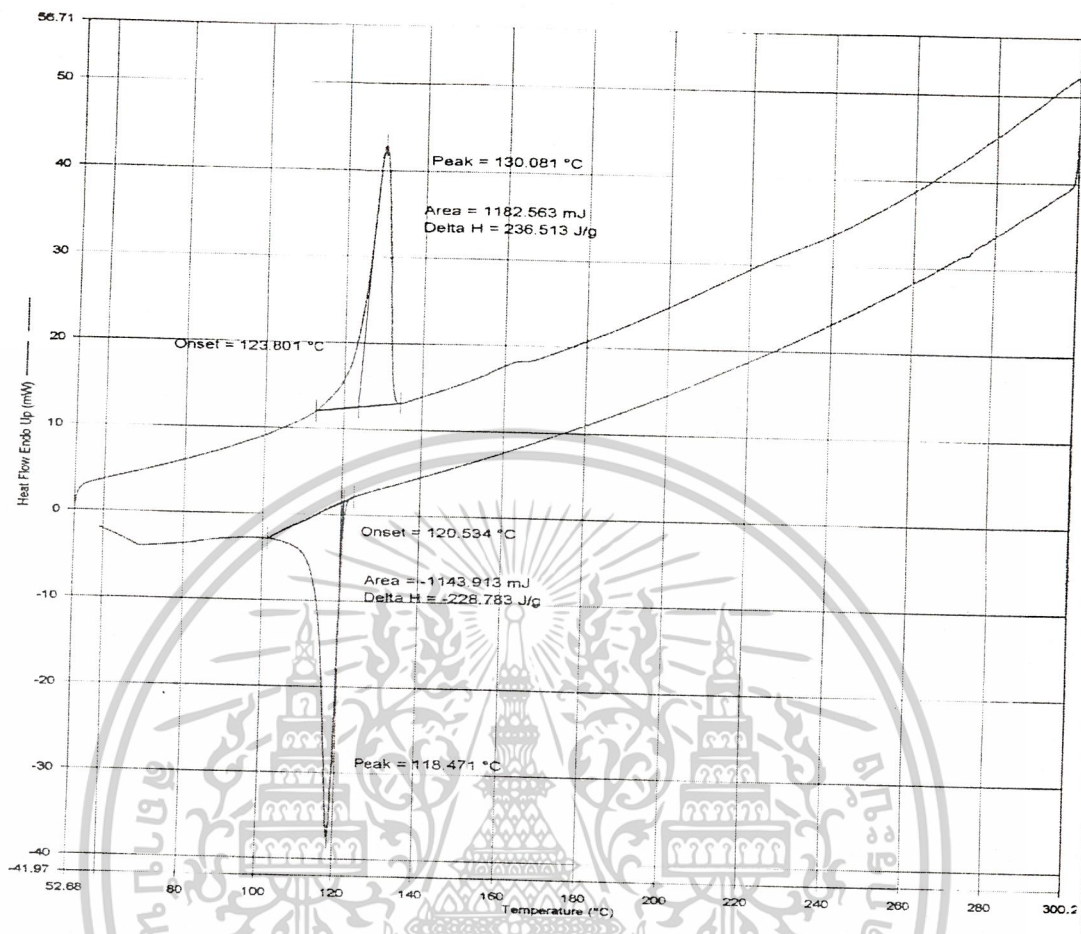
รูปที่ 3 สมบัติทางความร้อนของ HDPE-g-MA/HDPE ในอัตราส่วน 60/40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



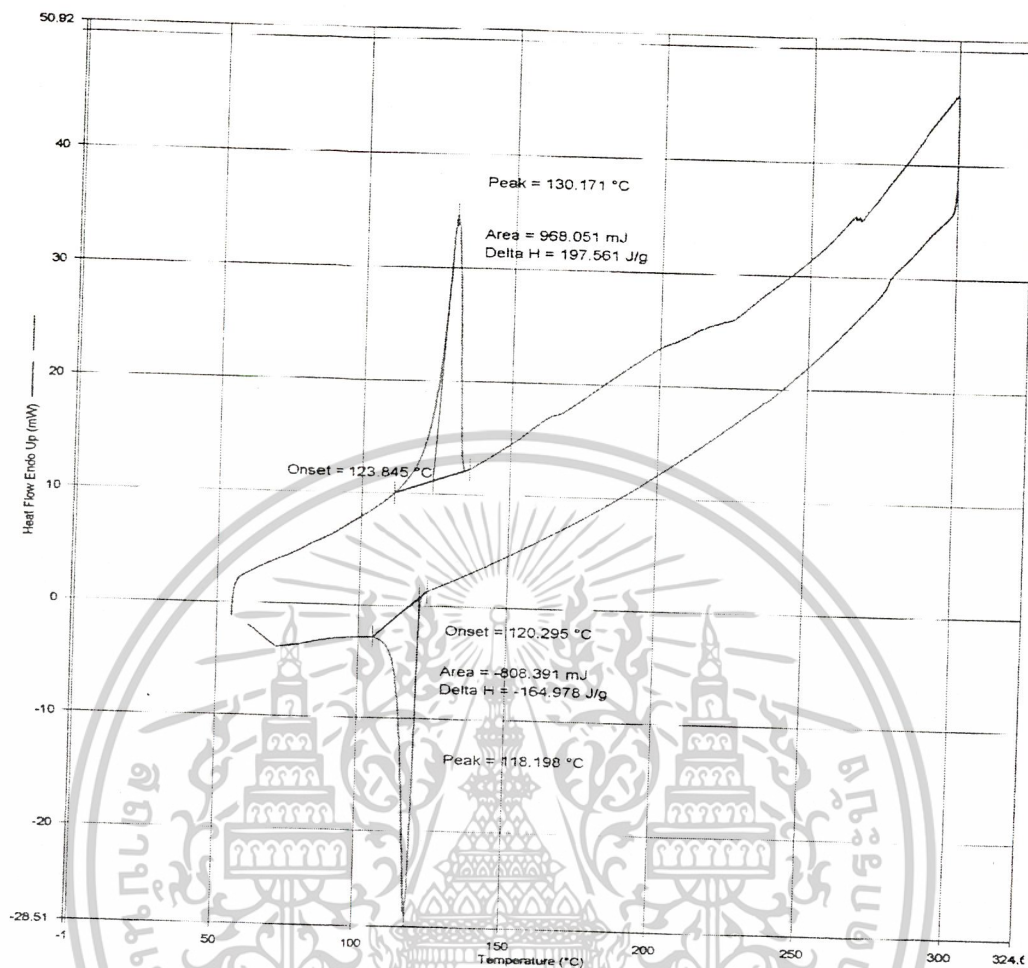
รูปที่ 4 สมบัติทางความร้อนของของ HDPE-g-MA/HDPE ในอัตราส่วน 40/60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 สมบัติทางความร้อนของของ HDPE-g-MA/HDPE ในอัตราส่วน 20/80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6 สมบัติทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 สมบัติทางความร้อนของพอลิไวนิล บิวทิลที่นำกลับมาใช้ใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้