

การนำพอลิเอทิลีนกลับมาใช้ใหม่ โดยมีจีทีเอชจากไม้เต็งและไม้สักเป็นสารตัวเติม



T 0 4 9 2 4 8



นางสาว นพวรรณ พันธุ์นา

นางสาว สุตินา ฉัตรภูติ

นางสาว อุษณีย์ คอนสกุล

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 49248
วัน, เดือน, ปี 18 ก.พ. 2547

b.....
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Recycling of High-Density Polyethylene using Meranti and Teak Sawdusts as Fillers



Noppawan Phunna

Sutima Chatrabhuti

Usanee Donsakul

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the

Degree of Bachelor of Science

Department of Chemistry

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic year 2002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษ เรื่อง การนำพอลิเอทิลีนกลับมาใช้ใหม่โดยมีชี้อ้อยจากไม้เต็ง และไม้สักเป็นสารตัวเติม




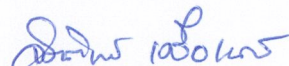
นักศึกษา นางสาว นพวรรณ พันธุ์นา รหัส 42050085
นางสาว สุธิมา ฉัตรภูติ รหัส 42050127
นางสาว อุษณีย์ ดอนสกุล รหัส 42050138

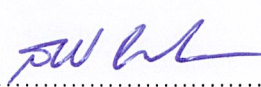
ภาควิชา เคมี
สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา 2545

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.จิตติพร เครือเนตร

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สมศักดิ์ วรรณกุลชัย ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด กรรมการ	
ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ กรรมการ	
ดร.จิตติพร เครือเนตร กรรมการ	


.....
(รศ.ดร.สมศักดิ์ วรรณกุลชัย)

หัวหน้าภาควิชา

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษ เรื่อง การนำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกลับมาใช้ใหม่โดยมีซีลี้อย
จากไม้เต็งและไม้สักเป็นสารตัวเติม

นักศึกษา	นางสาว นพวรรณ พันธุ์นา	รหัส 42050085
	นางสาว สุกิมา ฉัตรภูติ	รหัส 42050127
	นางสาว อุษณีย์ คอนสกุล	รหัส 42050138
ภาควิชา	เคมี	คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม	
ปีการศึกษา	2545	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร	
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.จิตติพร เครือเนตร	

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการนำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) กลับมาใช้ใหม่โดยมีซีลี้อยจากไม้เต็งหรือไม้สักเป็นสารตัวเติม การผสมทำได้โดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่แล้วนำมาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป จากนั้นนำไปศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติการไหล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงผลของชนิด ปริมาณ และขนาดของซีลี้อยที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุที่ได้ จากการศึกษาพบว่า ค่าความแข็งแรงโค้งงอและความแข็งกคมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากเปื่อยเช่นต์การดึงยึด ณ จุดครากมีค่าลดลง ส่วนค่ามอดูลัส มอดูลัสโค้งงอ และความแข็งแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้นจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ไม่มีการเติมซีลี้อยเป็นสารตัวเติม และมีแนวโน้มว่าเมื่อปริมาณซีลี้อยเพิ่มมากขึ้น วัสดุแสดงสมบัติแข็งแรงเปราะเพิ่มมากขึ้น สำหรับขนาดของซีลี้อยมีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุเพียงเล็กน้อย จากผลของชนิดของซีลี้อยพบว่า การใช้ซีลี้อยจากไม้เต็งส่งผลให้วัสดุมีค่ามอดูลัสโค้งงอสูงกว่าการใช้ซีลี้อยจากไม้สักอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำมีค่าสูงสุดเมื่อใช้ซีลี้อยขนาด 12-34 เมช ในปริมาณ 40% จากผลการทดสอบสมบัติการไหลพบว่า แม้จะมีการเพิ่มปริมาณของซีลี้อยเป็น 10% และ 30% ความหนืดไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่า เมื่อมีการเติมซีลี้อยลงในพอลิเมอร์ ค่า T_m และ T_c ไม่มีการเปลี่ยนแปลง และจากผลของสัณฐานวิทยาพบว่า ซีลี้อยมีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารตัวในพอลิเมอร์ แต่พบว่ามีการยึดเกาะระหว่างสองวัสดุกันไม่ดีนัก
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Recycling of High-Density Polyethylene using Meranti
and Teak Sawdusts as Fillers

Name Noppawan Phunna 42050085
Sutima Chattrabhuti 42050127
Usanee Donsakul 42050138

Department Chemistry

Program Industrial Chemistry

Academic Year 2002

Special Project Advisor Dr. Jutarat Prachayawarakorn

Special Project Co-advisor Dr. Jittiporn Krue-nate

ABSTRACT

This research work concerned about recycling High Density Polyethylene (HDPE), using either Meranti or Teak sawdusts as fillers. The materials were mixed by using a twin-screw extruder, and then compressed into samples by a compression machine. The samples were characterized for mechanical, physical, rheological, thermal and morphological properties. Some factors affecting the material properties were investigated including types, contents and sizes of the sawdusts. From the study, it was found that flexural strength and hardness tended to be insignificantly changed. Tensile strength at yield and %elongation at yield were slightly decreased, whereas Young's modulus, flexural modulus and impact strength were increased from the unfilled HDPE. In addition, the more the sawdust loading, the more the brittleness of the materials. Size of the sawdust presented a minor effect to the material properties. From the types of the sawdusts, it was found that the Meranti sawdust obviously led to higher flexural modulus than that of the Teak sawdust. Besides, the maximum value of % water absorption was obtained when 12-34 mesh and 40% sawdust were used. From the rheological study, even if sawdust content increased to 10% and 30%, melt viscosity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

was not depended on sawdust loadings. For thermal properties of the sawdust filled polymer, T_m and T_c remained unchanged. And from the result of morphology test, it was found that the sawdusts were dispersed within the polymer matrix, however, poor interfacial adhesion between the two phases could be observed.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการพิเศษนี้สำเร็จลงได้เนื่องจากได้รับความร่วมมือ ความช่วยเหลือ ตลอดจนคำแนะนำที่เป็นประโยชน์จากบุคคลและองค์กรต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณ ดร. จุฑารัตน์ ปรีชญาวรากร และดร.จิตติพร เครือเนตร ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำปรึกษา และความช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษนี้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย และ ผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด อาจารย์ คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษที่กรุณาตรวจสอบและแก้ไขพร้อมทั้งให้คำแนะนำเพิ่มเติม เพื่อให้โครงการพิเศษฉบับนี้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาคีวิชาเคมีทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำปรึกษาจนโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณะ เกษประสิทธิ์ และคุณสุคดี สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคาร ฝึกงานพอลิเมอร์ สำหรับคำแนะนำและความช่วยเหลือต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณ นักวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในด้านอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีตลอดในการทำโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องทดสอบการไหล

ขอขอบพระคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM)

ขอขอบพระคุณร้าน ส. สหชัยช่างที่กรุณาเอื้อเฟื้อขี้เถื่อในการทำโครงการพิเศษนี้

สุดท้ายนี้ ขอกราบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง และขอบคุณเพื่อน รุ่นพี่ รุ่นน้องทุกท่านที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้มาโดยตลอด

นอกจากนี้ ยังมีบุคคลอีกมากมายซึ่งยังมิได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ที่มีส่วนช่วยเหลือให้โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จ ทางผู้จัดทำก็ขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

นางสาวนพวรรณ พันธุ์นา

นางสาวสุติมา ฉัตรภูติ

นางสาวอุษณีย์ คอนสกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 พอลิเอทิลีน	3
2.2 สารเคมีแต่ง	6
2.3 ไม้และเส้นใยไม้	8
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	18
3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	18
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	18
3.3 วิธีการทดลอง	19
3.4 วิธีการทดสอบ	22
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	30
4.1 สมบัติเชิงกล	30
4.2 สมบัติทางกายภาพ	45
4.3 สมบัติการไหล	49
4.4 สมบัติทางความร้อน	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5	สัณฐานวิทยา	52
-----	-------------	----

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 5	สรุปและข้อเสนอแนะ	55
5.1	สรุป	55
5.2	ข้อเสนอแนะ	56
	เอกสารอ้างอิง	57
	ภาคผนวก	60



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 2.1	สมบัติของพอลิเอทิลีน	5
ตารางที่ 2.2	สมบัติเชิงกลของเส้นใยชนิดต่าง ๆ ที่ใช้เป็นสารเสริมแรงในพอลิเมอร์	8
ตารางที่ 2.3	สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของไม้เต็งและไม้สัก	10
ตารางที่ 2.3	องค์ประกอบต่าง ๆ ของไม้เต็งและไม้สัก	14
ตารางที่ 3.1	ส่วนผสมต่าง ๆ ที่ใช้ในการเตรียมวัสดุ	20
ตารางที่ 3.2	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบวัสดุ	22
ตารางที่ 4.1	อุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่นำกลับมาใช้ใหม่โดยมีขี้เลื่อยจากไม้เต็งและไม้สักเป็นสารตัวเติม	50
ตารางที่ 4.2	อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่นำกลับมาใช้ใหม่โดยมีขี้เลื่อยจากไม้เต็งและไม้สักเป็นสารตัวเติม	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1	สูตรโครงสร้างของเซลลูโลส 11
รูปที่ 2.2	แบบจำลองการจัดเรียงตัวของผลึกอสัณฐานของเซลลูโลส 11
รูปที่ 2.3	โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส 12
รูปที่ 2.4	หน่วยซ้ำของลิกนิน 13
รูปที่ 2.5	การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน 13
รูปที่ 3.1	ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบแรงดึง 23
รูปที่ 3.2	ส่วนประกอบของเครื่องมือทดสอบแรงดึง 24
รูปที่ 3.3	ขนาดและลักษณะของตัวอย่างทดสอบการกระแทกแบบ ไอซอด 25
รูปที่ 3.4	เครื่องมือทดสอบความแข็งแรงกระแทกแบบ ไอซอด 26
รูปที่ 3.5	เครื่องมือทดสอบความแข็งกดแบบคูโรมิเตอร์ 27
รูปที่ 3.6	การทดสอบสมบัติความโค้งงอ 27
รูปที่ 4.1	ความแข็งแรงดึง ณ จุดครากของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีจีเสื่อยเป็นสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ 31
รูปที่ 4.2	ความแข็งแรงดึง ณ จุดครากของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีจีเสื่อยเป็นสารตัวเติมที่ขนาดต่าง ๆ 32
รูปที่ 4.3	มอดูลัสของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีจีเสื่อยเป็นสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ 33
รูปที่ 4.4	มอดูลัสของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีจีเสื่อยเป็นสารตัวเติมที่ขนาดต่าง ๆ 34
รูปที่ 4.5	ร้อยละการดึงยืด ณ จุดครากของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีจีเสื่อยเป็นสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ 35
รูปที่ 4.6	ร้อยละการดึงยืด ณ จุดครากของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีจีเสื่อยเป็นสารตัวเติมที่ขนาดต่าง ๆ 36
รูปที่ 4.7	ความแข็งแรงโค้งงอของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีจีเสื่อยเป็นสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ 37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.9	มอดุลัสโค้งงอของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีจีลีส้อยเป็นสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ	39
รูปที่ 4.10	มอดุลัสโค้งงอของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีจีลีส้อยเป็นสารตัวเติมที่ขนาดต่าง ๆ	40
รูปที่ 4.11	ความแข็งแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีจีลีส้อยเป็นสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ	41
รูปที่ 4.12	ความแข็งแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีจีลีส้อยเป็นสารตัวเติมที่ขนาดต่าง ๆ	42
รูปที่ 4.13	ความแข็งกดของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีจีลีส้อยเป็นสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ	43
รูปที่ 4.14	ความแข็งกดของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีจีลีส้อยเป็นสารตัวเติมที่ขนาดต่าง ๆ	44
รูปที่ 4.15	ร้อยละการดูดซับน้ำของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีจีลีส้อยเป็นสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ เมื่อเวลาผ่านไป	46
รูปที่ 4.16	ร้อยละการดูดซับน้ำของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีจีลีส้อยเป็นสารตัวเติมที่ขนาดต่าง ๆ เมื่อเวลาผ่านไป	47
รูปที่ 4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือน (Shear viscosity) กับอัตราความเครียดเฉือน (Shear rate) ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีจีลีส้อยเป็นสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ กัน	49
รูปที่ 4.18	การกระจายตัวของจีลีส้อยในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่	53
รูปที่ 4.19	การยึดเกาะระหว่างวัฏภาคของพอลิเอทิลีนและจีลีส้อย	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ในปัจจุบันความนิยมในการใช้พลาสติกเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากพลาสติกมีราคาถูก น้ำหนักเบา สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายและยังสามารถผลิตเป็นชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้จากปริมาณการใช้พลาสติกที่เพิ่มขึ้นทำให้แนวโน้มของปัญหาขยะพลาสติกเพิ่มขึ้น เนื่องจากการย่อยสลายพลาสติกตามธรรมชาติต้องใช้เวลา นาน นอกจากนี้พลาสติกบางชนิดเมื่อเผาไหม้จะทำให้เกิดก๊าซที่เป็นอันตรายต่อร่างกายและสิ่งแวดล้อม ดังนั้นแนวทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว คือการนำพลาสติกที่ใช้แล้วมาผ่านกระบวนการขึ้นรูปใหม่อีกครั้งเพื่อเป็นการลดปริมาณขยะและนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ให้เกิดประโยชน์คุ้มค่ามากที่สุด และเพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิตทำให้ใช้พลาสติกในปริมาณที่น้อยลง ซึ่งสามารถทำได้โดยการใส่สารเติมแต่ง (Additives) ชนิดที่เป็นสารตัวเติม (Fillers) ซึ่งอาจเป็นสารตัวเติมที่ช่วยเสริมแรง (Reinforcing fillers) หรือสารตัวเติมที่ไม่ช่วยเสริมแรง (Non-reinforcing fillers) เพื่อให้ได้เนื้อพลาสติกจำนวนมากขึ้น

การประยุกต์ใช้เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers) มาใช้ประโยชน์เป็นสารตัวเติมในพลาสติกได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากเส้นใยสังเคราะห์มีราคาแพง แต่เส้นใยธรรมชาติมีมากมายในประเทศไทย บางชนิดเป็นเศษเหลือทิ้งจากภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม เช่น เส้นใยชานอ้อยจากอุตสาหกรรมน้ำตาล เส้นใยกาบมะพร้าวจากอุตสาหกรรมกะทิ ขี้เถ้าจากอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ และเกล็ดจากการสีข้าว เป็นต้น สำหรับพลาสติกที่มีเส้นใยจากไม้เป็นสารตัวเติมสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น ทำประตู กระดาษต้นไม้ สำหรับหมักปุ๋ย ม้านั่ง โต๊ะปิกนิก เป็นต้น

สำหรับโครงการพิเศษนี้เกี่ยวข้องกับการนำขวดบรรจุน้ำดื่มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกลับมาใช้ใหม่ และใช้ขี้เถ้าที่ได้จากไม้เต็งและไม้สักเป็นสารตัวเติม โดยทำการศึกษาถึงการผสม การขึ้นรูปชิ้นงานและการทดสอบสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ที่ได้

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อนำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) กลับมาใช้ใหม่ให้เกิดประโยชน์มากที่สุด และเป็นแนวทางหนึ่งในการลดปัญหาขยะพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.2 เพื่อนำซีลี้อยซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับไม้มาใช้ประโยชน์ในรูปแบบอื่น คือ นำมาใช้เป็นสารตัวเติมในพลาสติก

1.2.3 ศึกษาการเตรียมและทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีซีลี้อยเป็นสารตัวเติม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาการเตรียมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่โดยมีซีลี้อยเป็นสารตัวเติม

1.3.2 ศึกษาถึงขนาด ปริมาณและชนิดของซีลี้อยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุ

1.3.3 ศึกษาถึงสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ได้แก่ ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก มอดุลัส เฟอร์เซนต์การดึงยืด ณ จุดคราก ความแข็งแรงโค้งงอ มอดุลัสโค้งงอ ความแข็งแรงกระแทก ความแข็งกด สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ การดูดซับน้ำ สมบัติการไหล ได้แก่ ผลของอัตราการไหล (Shear rate) ที่มีต่อความหนืด สมบัติทางความร้อน ได้แก่ อุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิการเกิดผลึก เฟอร์เซนต์ความเป็ผลึก และสัณฐานวิทยา

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ลดปริมาณขยะจากขวดพอลิเอทิลีนและเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับซีลี้อย

1.4.2 สามารถเตรียมวัสดุที่มีสมบัติที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้

1.4.3 สามารถใช้ความรู้ที่ได้เป็นพื้นฐานความรู้การวิจัยในการประยุกต์ใช้กับพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกับเส้นใยธรรมชาติชนิดอื่นได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

พอลิเมอร์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) และเทอร์โมเซต (Thermosets) เทอร์โมพลาสติกเป็นพอลิเมอร์สายโซ่ตรงหรือกึ่งที่สามารถหลอมเหลวเมื่อให้ความร้อนและขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างตามต้องการได้มากกว่าหนึ่งครั้ง เช่น พอลิเอทิลีน (Polyethylene) พอลิพรอพิลีน (Polypropylene) พอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly(vinyl-chloride)) เป็นต้น สำหรับเทอร์โมเซตเป็นพอลิเมอร์ที่เกิดการเชื่อมโยง มีโครงสร้างเป็นร่างแหสามมิติเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง เมื่อทำการขึ้นรูปและเกิดการเชื่อมโยงของสายโซ่แล้วจะไม่สามารถให้ความร้อนและนำมาขึ้นรูปได้ใหม่ [อิทธิพล, 2543]

2.1 พอลิเอทิลีน (Polyethylene) [ชัยวัฒน์, 2542]

พอลิเอทิลีนเป็นเทอร์โมพลาสติกชนิดหนึ่งที่เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีน ซึ่งหน่วยซ้ำของพอลิเอทิลีน คือ $\text{CH}_2\text{-CH}_2$ พอลิเอทิลีนแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ดังนี้

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene, HDPE)
2. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low-Density Polyethylene, LDPE)

2.1.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene, HDPE)

พอลิเมอร์ชนิดนี้อาจเรียกว่าพอลิเอทิลีนเชิงเส้นตรง เพราะพอลิเมอร์มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงเกือบตลอด กล่าวคือมีกิ่งสาขาบ้างแต่น้อยมาก หรืออาจเรียกว่าพอลิเอทิลีนความดันต่ำ (Low-pressure polyethylene) เพราะกระบวนการเตรียมพอลิเมอร์นี้โดยทั่วไปใช้ความดันต่ำมาก พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงนี้ผลิตขึ้นใช้ในทางการค้าตั้งแต่ปี ค.ศ. 1955

2.1.1.1 พอลิเมอไรเซชัน

สารตั้งต้นหรือวัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง คือ เอทิลีนมอนอเมอร์และ ไวนิลมอนอเมอร์อื่น ๆ ซึ่งมอนอเมอร์เหล่านี้ส่วนใหญ่ได้มาจากน้ำมันดิบหรือปิโตรเลียม และก๊าซธรรมชาติ

วิธีการเตรียมพอลิเมอร์ชนิดนี้ที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีหลายวิธี ที่สำคัญ ได้แก่

ก. กระบวนการซีเกลอร์ (Ziegler process) กระบวนการนี้ใช้ตัวเร่งของซีเกลอร์-เนตตา (Ziegler-Natta catalysts) ซึ่งโดยทั่วไปตัวเร่งที่ใช้ ได้แก่ ไททาเนียมเตตระคลอไรด์-อะลูมิเนียมอัลคิล ($\text{TiCl}_4\text{-R}_3\text{Al}$) ณ ความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศเพียงเล็กน้อย (2-4 บรรยากาศ) และอุณหภูมิ 50-75 °C ในตัวกลางที่เฉื่อย เช่น น้ำมันดีเซล เฮปเทน หรือโทลูอีน และในบรรยากาศที่เฉื่อย เช่น บรรยากาศของไนโตรเจน เนื่องจากพอลิเอทิลีนไม่ละลายในตัวกลางที่เฉื่อย ดังนั้นเมื่อเกิดเป็นพอลิเมอร์แล้วจะตกตะกอนออกมา แล้วจึงนำพอลิเมอร์ที่ได้ไปกรองและทำให้แห้ง

พอลิเมอร์ที่ได้จะต่างกับพอลิเมอร์ที่เตรียมจากวิธีการที่ใช้ความดันสูงมาก คือ มีกิ่งสาขาเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ข. กระบวนการฟิลลิปส์ (Phillips process) กระบวนการนี้ใช้โครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ที่มีตัวพุง (Supporter) เช่น ซิลิกาหรืออะลูมินา เป็นตัวเร่งในตัวกลางเฉื่อย เช่น ไซโคลเฮกเซน สภาพของปฏิกิริยาโดยทั่วไป ได้แก่ ความดันประมาณ 30-40 บรรยากาศและอุณหภูมิประมาณ 90-160 °C พอลิเอทิลีนที่ได้มีโครงสร้างเชิงเส้นตรงเกือบสมบูรณ์

ค. กระบวนการสแตนดาร์ด ออยล์ (Standard oil process) กระบวนการนี้คล้ายคลึงกับกระบวนการฟิลลิปส์มาก ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ได้แก่ ออกไซด์ของโลหะ เช่น โมลิบดีนัมไดออกไซด์ (MoO_3) บนตัวพุง เช่น อะลูมินา (Al_2O_3) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) หรือเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO_2) ความดันที่ใช้ประมาณ 40-100 บรรยากาศและอุณหภูมิของปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 200-300 °C พอลิเมอร์ที่ได้มีโครงสร้างเช่นเดียวกับกระบวนการฟิลลิปส์ กล่าวคือ มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงเกือบสมบูรณ์

2.1.1.2 สมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์

เนื่องจากพอลิเมอร์ที่ได้มีโครงสร้างเชิงเส้นตรงเกือบตลอด โพลีเมอร์จึงมีความเป็นระเบียบมากทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้มีความเป็นผลึกสูงมาก (มากกว่า 90%) ความหนาแน่นและจุดหลอมตัวสูงกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยทั่วไปจะมีความหนาแน่น 0.95-0.97 g/cm^3 และจุดหลอมตัว 135 °C ความเหนียว ความแข็งและความทนต่อแรงดึงก็สูงกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำด้วย ปริมาณมากกว่าร้อยละ 40 ของพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นสูงใช้ในการผลิตขวดพลาสติกและภาชนะบรรจุของอื่นๆ เช่น ภาชนะบรรจุกรดและเบส เคมีภัณฑ์ สารชำระล้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีกประมาณร้อยละ 20 ใช้ทำของใช้ในครัวและของเด็กเล่น ส่วนที่เหลือใช้ทำฟิล์มเพื่อห่อหุ้มของและอาหาร ถุงพลาสติก (ถุงร้อน) สายหุ้มสายไฟฟ้า สายยาง และอื่นๆ

ตารางที่ 2.1 สมบัติของพอลิเอทิลีน [Brydson, 1995]

Properties	Polyethylene Density=0.92 g/cm ³	Polyethylene Density=0.96 g/cm ³
Tensile strength (MPa)	12.5	27.5
Elongation at break (%)	600	500
Izod impact strength (J/m ²)	13.5	6.8
Crystalline melting point (°C)	108	136

2.1.3 ข้อดีและข้อจำกัดของพอลิเอทิลีน

เนื่องจากในปัจจุบันนี้พอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถนำมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมายที่พบในชีวิตประจำวัน ซึ่งข้อดีและข้อจำกัดของพอลิเอทิลีนสามารถสรุปได้ดังนี้

2.1.3.1 ข้อดีของพอลิเอทิลีน

1. ราคาถูก
2. สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้ง่าย
3. มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี
4. ทนทานต่อสารเคมี
5. มีความเหนียวและยืดหยุ่นได้แม้ที่อุณหภูมิต่ำ ๆ
6. สามารถทำเป็นฟิล์มที่มีความใสได้
7. ไม่มีกลิ่นและไม่เป็นพิษ
8. มีการซึมผ่านของน้ำต่ำ จึงนำไปใช้ในงานบรรจุภัณฑ์และอุปกรณ์ที่ใช้ในการเกษตร

2.1.3.2 ข้อจำกัดของพอลิเอทิลีน

1. มีพอลิเอทิลีนที่มีมวลโมเลกุลต่ำ ๆ จะเกิดการเสียสภาพเนื่องจากสิ่งแวดล้อมได้
2. มีความแข็งแรงการดึงยึด (Tensile strength) ต่ำ
3. มีการซึมผ่านของก๊าซได้ดี
4. ติดไฟได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 สารเติมแต่ง (Additives) [มาลินี, 2540]

ก่อนการนำพอลิเมอร์มาใช้งานในรูปผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ต้องนำพอลิเมอร์มาผ่านขั้นตอนหลายขั้นตอน เริ่มตั้งแต่การเลือกกระบวนการทำให้มอนอเมอร์เกิดเป็นพอลิเมอร์ การควบคุมน้ำหนักโมเลกุลพอลิเมอร์และการใส่สารเติมแต่งเพื่อตัดแปลง ปรับปรุงให้สมบัติของพอลิเมอร์เหมาะสมต่อการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ลักษณะต่าง ๆ และเพิ่มความทนทานต่อการใช้งาน โดยทั่วไปสารเติมแต่งมีหลายชนิด เช่น สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน (Heat stabilisers) สารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน (Oxidative stabilisers) สารให้สี (Colourants) สารตัวเติม (Fillers) สารคู่ควบ (Coupling agents) พลาสติไซเซอร์ (Plasticisers) สารหล่อลื่น (Lubricants) เป็นต้น

2.2.1 สารตัวเติม (Fillers)

สารตัวเติมมีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ทำหน้าที่ช่วยเพิ่มความหนืดและลดต้นทุน ลดการหดตัวในแม่พิมพ์และปรับปรุงสมบัติอีกหลายด้าน ขนาดและรูปร่างของสารตัวเติมมีอิทธิพลต่อสมบัติของพลาสติกอย่างมาก ปริมาณสารตัวเติมในพอลิเมอร์มักเติมลงไปไม่เกิน 40% สารตัวเติมที่นิยมมาก คือ เศษไม้บดละเอียดเพื่อลดต้นทุน สารตัวเติมพวกโลหะหนักเพื่อปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าให้ดีขึ้น

สารตัวเติมแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ สารตัวเติมเฉื่อย (Inert fillers) ตัวอย่างเช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ดินเหนียว แทลคัม แมเรียมซิลเฟต สารพวกนี้ช่วยเพิ่มความอดุลล์ ความแข็งแรงและทำให้พอลิเมอร์มีสีขาว ปรับปรุงการเป็นฉนวนไฟฟ้า ลดต้นทุน และช่วยให้กระบวนการผลิตทำได้ง่ายขึ้น สำหรับสารตัวเติมอีกประเภทหนึ่ง คือ สารตัวเติมเสริมแรง (Reinforcing fillers) (ตารางที่ 2.2) สารพวกนี้ช่วยเพิ่มความแข็งแรง ความทนทานต่อแรงกระแทก และความแข็งแรงดึงให้กับพอลิเมอร์ได้ ซึ่งสารตัวเติมเสริมแรงนี้มักอยู่ในรูปของเส้นใย ตัวอย่างของสารตัวเติมเสริมแรง ได้แก่

ก. เส้นใยแก้ว (Glass fibers)

ใช้ได้กับพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซต เส้นใยแก้วจัดเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่สำคัญที่สุด เส้นใยแก้วมีองค์ประกอบหลักคือซิลิกา รวมถึงออกไซด์ของโลหะอื่น ๆ องค์ประกอบที่แตกต่างกันในเส้นใยแก้วนี้ จึงทำให้มีเส้นใยแก้วหลายชนิดที่เหมาะสมกับการใช้งานประเภทต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. เส้นใยคาร์บอน (Carbon fibers)

ผลิตจากการเผาเส้นใยอินทรีย์ในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อยที่อุณหภูมิสูงกว่า 980 °C ในขณะที่เผาออกซิเจนนั้น ไนโตรเจนและไฮโดรเจนถูกขจัดออกเหลือแต่คาร์บอน เส้นใยคาร์บอนจึงมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมากกว่า 90% [Mukhopadhyay, 1993]

ค. เส้นใยพอลิเมอร์ (Polymer fibers)

มีทั้งเส้นใยธรรมชาติ ได้แก่ เส้นใยฝ้ายและเส้นใยไหม นำมาใช้เสริมแรงในยางรถ เกียร์ สายพาน และเส้นใยพอลิเมอร์สังเคราะห์เสริมแรง ได้แก่ พอลิเอสเตอร์ พอลิอะคริไลไนไตรด์ เป็นต้น

ง. เส้นใยอนินทรีย์ (Inorganic fibers)

เป็นผลึกของเส้นใยสั้น เกิดจากออกไซด์ของอลูมิเนียม เบอริเรียม แมกนีเซียม หรือ โพแทสเซียม ที่ทาเนต ซิลิคอนคาร์ไบด์ เส้นใยอนินทรีย์มีราคาแพงเพราะเทคโนโลยีการผลิตในปัจจุบันยังไม่ได้พอ

จ. เส้นใยโลหะ (Metal fibers)

เตรียมโดยการดึงเหล็กกล้าหรืออะลูมิเนียมให้เป็นเส้นต่อเนื่อง เส้นใยประเภทนี้ช่วยเสริมให้วัสดุมีความแข็งแรง การนำไฟฟ้าและความร้อนที่ดี

ฉ. เส้นใยผสม (Hybrid fibers)

เป็นการนำเอาเส้นใยเสริมแรง 2 ชนิดหรือมากกว่ามาใช้ร่วมกัน ส่งผลให้สมบัติของพอลิเมอร์ดีขึ้น เช่น เส้นใยที่ประกอบด้วยเส้นใยแก้วและเส้นใยคาร์บอน จะช่วยเพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทก และทำให้พอลิเมอร์เหนียวขึ้น เป็นต้น

ตารางที่ 2.2 สมบัติเชิงกลของเส้นใยชนิดต่างๆ ที่ใช้เป็นสารเสริมแรงในพอลิเมอร์[Bledzki และ Gassan, 1999]

เส้นใย	ความหนาแน่น (g/cm ³)	เปอร์เซ็นต์การยืด ออก (% Elongation)	ความแข็งแรงดึง (MPa)	ค้ำยังมอดุลัส (Young's modulus, GPa)
ฝ้าย	1.5-1.6	7.0-8.0	287-597	5.5-12.6
ปอกระเจา	1.3	1.5-1.8	393-773	26.5
ป่าน	1.5	2.7-3.2	345-1035	27.6
ปอ (Hemp)	-	1.6	690	-
รามี่(Ramie)	-	3.6-3.8	400-938	61.4-128
ป่านศรนารายณ์ (Sisal)	1.5	2.0-2.5	511-635	9.4-22.0
เส้นใยไม้เนื้ออ่อน	1.5	-	1000	40.0
เส้นใยแก้วชนิด E (E-glass)	2.5	2.5	2000-3500	70.0
เส้นใยแก้วชนิด S (S-glass)	2.5	2.8	4570	86.0
เส้นใยอะรามิด	1.4	3.3-3.7	3000-3150	63.0-67.0
เส้นใยคาร์บอน	1.4	1.4-1.8	4000	230.0-240.0

2.3 ไม้และเส้นใยไม้ (Wood and wood fibers) [Bledzki และ Gassan, 1999]

ไม้เป็นวัสดุที่มีความสำคัญมากสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับทำอาหารให้ความร้อน และผลิตไอน้ำ ซึ่งอาจใช้เป็นแหล่งพลังงานได้ด้วย นอกจากนี้ยังนำไม้มาใช้เป็นเฟอร์นิเจอร์ เครื่องตกแต่งได้อีกมากมายหลายรูปแบบ ซึ่งการผลิตผลิตภัณฑ์เหล่านี้ก่อให้เกิดเศษไม้ (Wood flake) หรือขี้เลื่อย (Sawdust) ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นเส้นใยไม้ (Wood fibers)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 ชนิดของไม้

โดยทั่วไปไม้แบ่งได้ 2 ประเภทหลัก ๆ คือ ไม้เนื้อแข็ง (Hardwood) และไม้เนื้ออ่อน (Softwood)

แต่สำหรับงานก่อสร้างแล้วไม้ แบ่งได้เป็น 3 ประเภท ซึ่งกำหนดตามมาตรฐานกรมป่าไม้ [สุชาติ, 2541] คือ

- ไม้เนื้ออ่อน (Softwood) มีค่าแรงดัดสถิตย์ (Static bending) ต่ำกว่า 600 กก./ซม² และมีค่าความทนทานตามธรรมชาติต่ำกว่า 2 ปี
- ไม้เนื้อแข็งปานกลาง (Medium Hardwood) มีค่าแรงดัดสถิตย์ (Static bending) ระหว่าง 600-1000 กก./ซม² และมีความทนทานตามธรรมชาติ 2-6 ปี
- ไม้เนื้อแข็ง (Hardwood) มีค่าแรงดัดสถิตย์ (Static bending) สูงกว่า 1000 กก./ซม² และมีความทนทานสูงกว่า 6 ปี

ไม้ที่นำมาใช้ในโครงการพิเศษนี้มี 2 ชนิด คือ ไม้เต็งซึ่งจัดเป็นไม้เนื้อแข็งและไม้สักซึ่งจัดเป็นไม้เนื้อแข็งปานกลาง

2.3.1.1 ไม้เต็ง (*Shorea obtusa*) (Meranti)

<u>ชื่อ</u>	กะเจ๊ก พะเจ๊ก แจะจิก เอื้อ ประจิด เน่าใน ชันตก
<u>ชื่อการค้า</u>	Siamese sal, Burma sal, Thitya, Meranti
<u>ลักษณะต้น</u>	ไม้ยืนต้นขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ สูง 10-20 เมตร ผลัดใบ ลำต้นตรง (ส่วนมาก) เปลือกสีน้ำตาลปนเทาแตกเป็นร่อง สีน้ำตาลเข้ม เลียนสน เนื้อไม้หยาบ แข็ง ตกแต่งยาก
<u>เนื้อไม้</u>	
<u>สมบัติเชิงกล</u>	ค่าแรงดัดสถิตย์ (Static bending) 1,732 กก./ตร.ซม. จัดเป็นไม้เนื้อแข็ง ค่าความแข็งเฉลี่ย (Hardness) 964 กก.
<u>ความทนทาน</u>	11-18 ปี เฉลี่ย 17.7 ปี
<u>ประโยชน์</u>	ทำได้หมอน เสาคาน ทำโครงสร้างที่ต้องการค่าแรง เสาค้ำ เสาหลัก

2.3.1.2 ไม้สัก (*Tectona grandis*)

<u>ชื่อ</u>	สัก ปายี่ เคาะเยียว โป ยี่ฮี้
<u>ชื่อการค้า</u>	Teak
<u>ลักษณะต้น</u>	ไม้ขนาดเล็ก-กลาง ไม่ผลัดใบ ลำต้นตรง เปลือกสีน้ำตาลอ่อน เทา สูง ประมาณ 5-15 เมตร
<u>เนื้อไม้</u>	สีขาว เหลืองอ่อน เลียนละเอียด ตกแต่งง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติเชิงกล ค่าแรงดัดสถิตย์ (Static bending) 900 กก./ตร.ซม.จัดเป็นไม้เนื้อแข็งปานกลาง
ค่าความแข็งเฉลี่ย (Hardness) 400 กก.

ความทนทาน เฉลี่ย 1.9 ปี

ประโยชน์ ใช้ทำเฟอร์นิเจอร์ เครื่องใช้ในครัว เครื่องมือต่างๆ ด้ามมีด ของเล่นเด็ก ไม้ทนทาน
ต่อแมลง (มอด ปลวก)

โครงสร้างทางเคมีและทางกายภาพของไม้ มีผลกระทบต่อความแข็งแรง ลักษณะรูปร่าง (Appearance) ความต้านทานต่อการแทรกผ่าน (Penetration) ของน้ำ สารเคมี และการเสียดสภาพของไม้

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของไม้เต็งและไม้สัก [วิทยา, 2541]

สมบัติ	ไม้เต็ง	ไม้สัก
ความชื้น (%)	12	12
ความถ่วงจำเพาะ	1.05	0.65
ความแข็งแรงการตัด (kg/cm^3)	1732	1045
ความแข็งแรงการบีบ (kg/cm^3)	723	533
ความแข็งแรงการฉีก (kg/cm^3)	143	169

2.3.2 องค์ประกอบทางเคมีของไม้ (Chemical compositions of woods) [Kroschwitz, 1990]

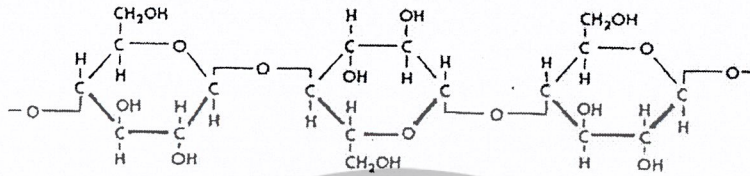
องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของไม้ที่มีองค์ประกอบย่อยเป็นเส้นใยไม้ ได้แก่ คาร์บอน (C) 49-50% ไฮโดรเจน (H) 6% และออกซิเจน (O) 44-45% นอกจากนี้ยังมีไนโตรเจน (N) 0.1-1% และแร่ธาตุในปริมาณเล็กน้อย เช่น แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) และโพแทสเซียม (K) ที่พบในเนื้อไม้อีกด้วย ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้อยู่ในรูปโมเลกุล ได้แก่ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) นอกจากนี้ยังมีสารเพคติน (Pectin) และสารประกอบอื่น ๆ ในปริมาณเล็กน้อยอีกด้วย

2.3.2.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสเป็นสารประกอบโพลีแซคคาไรด์ (Polysaccharides) ที่ประกอบด้วยหน่วยซ้ำ ๆ กันของกลูโคสที่มีสูตรเคมี $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ซึ่งเป็นโมโนแซคคาไรด์ (monosaccharides) ที่เกิดผ่านการ

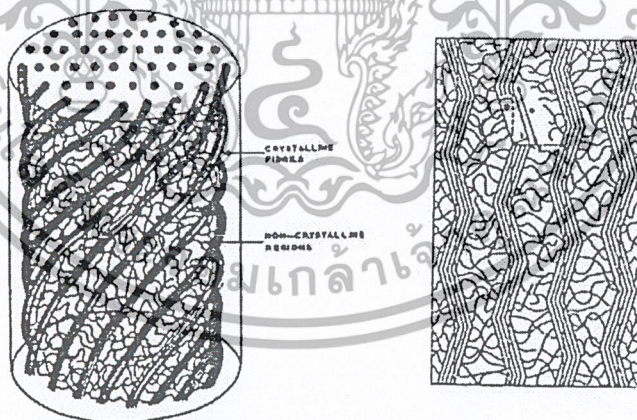
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สังเคราะห์แสง (Photosynthesis) ในบรรยากาศของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กลูโคสเป็นโครงสร้างในเนื้อเยื่อพืช โดยพบร่วมกับกลีโคลิน เพนโตแซนแกม (Pentosangum) แทนนิน ฯลฯ



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของเซลลูโลส [Bledzki และ Gassan, 1999]

เซลลูโลสสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ จึงทำให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูงมาก จุดหลอมเหลวสูงจึงมักเกิดการสลายตัวก่อนถึงจุดหลอมเหลว และเซลลูโลสมีความสามารถในการละลายต่ำ แต่ละลายในกรดเข้มข้น เช่น กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟูริก เป็นต้น รูปที่ 2.2 แสดงการจัดเรียงตัวของผลึกและอสัณฐานในโครงสร้างของเซลลูโลส



รูปที่ 2.2 แบบจำลองการจัดเรียงตัวของผลึกและอสัณฐานของเซลลูโลส

[Bledzki และ Gassan, 1999]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

โครงสร้างเฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยโพลีแซคคาไรด์คล้ายกับเซลลูโลส แต่อย่างไรก็ตาม เฮมิเซลลูโลสยังมีข้อแตกต่างจากเซลลูโลส 3 ข้อด้วยกัน คือ ประการที่หนึ่ง เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด เช่น กลูโคส กาแลกโตส แมนโนส ไซโลส รวมทั้งกรดกลูโคนิก และกาแลกทูโรนิก ในขณะที่เซลลูโลสประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสชนิดเดียวเป็นส่วนใหญ่ ประการที่สอง สายโซ่พอลิเมอร์ของเฮมิเซลลูโลสส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นสายโซ่กิ่ง ในขณะที่สายโซ่พอลิเมอร์ของเซลลูโลสจะมีลักษณะเป็นสายโซ่ตรง และประการที่สาม ระดับการเกิดโพลีแซคคาไรด์จากน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (Degree of polymerization) ของเซลลูโลสจะสูงกว่าเฮมิเซลลูโลส

สูตรเคมีของเฮมิเซลลูโลส คือ $(C_6H_{12}O_5)_{2n}$ โดย n คือ จำนวนหน่วยซ้ำของเฮมิเซลลูโลส โครงสร้างสารเคมีของเฮมิเซลลูโลส แสดงดังรูปที่ 2.3



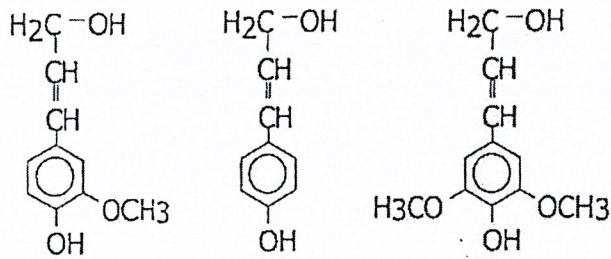
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส [Bledzki และ Gassan, 1999]

เฮมิเซลลูโลสพบในเนื้อเยื่อของพืชโดยรวมอยู่กับสารอื่น ๆ เช่น ลิกนิน เซลลูโลสเป็นโครงสร้างของผนังเซลล์พบมากในแกลบ ชังข้าวโพด

2.3.2.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเชิงซ้อน มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ โครงสร้างของลิกนินประกอบด้วยสารอะลิฟาติกและอะโรมาติกอยู่รวมกัน สารอะโรมาติกในโครงสร้างของลิกนินทำให้ลิกนินมีเสถียรภาพสูงและไม่ละลายน้ำ นอกจากนี้ลิกนินยังเป็นส่วนสำคัญที่ทำหน้าที่ยึดเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเข้าไว้ด้วยกัน ทำให้พืชที่มีปริมาณลิกนินอยู่มากมีความแข็งแรง ทนทานต่อดินฟ้าอากาศสูงมากด้วย ซึ่งไม่ต่างชนิดกันจะมีลิกนินอยู่ในโครงสร้างในรูปที่แตกต่างกันด้วย ตัวอย่างหน่วยซ้ำของลิกนินแสดงดังรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 หน่วยซ้ำของลิกนิน [Bledzki และ Gassan, 1999]

ไม้แต่ละชนิดจะมีอัตราส่วนระหว่างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับชนิดและอายุของไม้ สำหรับไม้ชนิดเดียวกันนั้น ไม้ที่มีอายุมากจะมีปริมาณลิกนินมาก



รูปที่ 2.5 การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน [Bledzki และ Gassan, 1999]

2.3.2.4 เพคติน (Pectin)

เพคตินเป็นคาร์โบไฮเดรตที่รู้จักกันในชื่อของเฮเทอโรพอลิแซคคาไรด์ (Heteropolysaccharides) ซึ่งมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ กรดโพลีแลคทูรอน (Polygalacturon acid) โดยปกติเพคตินจะละลายในน้ำ หลังจากการทำให้เป็นกลางบางส่วน (Partial neutralization) ด้วยด่างหรือแอมโมเนียม ไฮดรอกไซด์

สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อนไม่แตกต่างกันมากนัก นอกจากจะพบในปริมาณที่แตกต่างกันบ้าง องค์ประกอบทางเคมีของไม้เนื้อเต็งและไม้เนื้อสักแสดงดังตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบต่าง ๆ ของ ไม้เต็งและไม้สัก [ทัศนีย์, 2530]

องค์ประกอบ (%)	ไม้เต็ง	ไม้สัก
เซลลูโลส (Cellulose)	52.27	43.68
เพนโตซาน (Pentosan)	12.98	14.26
ลิกนิน (Lignin)	29.71	35.17
ขี้เถ้า (Ash)	0.73	3.24



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Angles, M. N. และคณะ (1999) ทำการศึกษาซีลี้อยที่ได้จากไม้เนื้ออ่อนของต้นสน 2 สปีชีส์ (*Abies alba* และ *Pinus insisnis*) ที่ถูกปรับสภาพพื้นผิวด้วยเทคนิคการระเบิดด้วยไอน้ำ (Steam-explosion technics) และเคลือบผิวซีลี้อยด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์-กราฟท์-พอลิพรอพิลีน (MAPP) ก่อนการผลิตเป็นคอมโพสิตกับพอลิพรอพิลีนเมตริกซ์ จากนั้นทำการวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของคอมโพสิต เมื่อวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและการวิเคราะห์พลังงานพื้นผิว (Surface Energy) ของซีลี้อย พบว่าความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างเส้นใยที่เคลือบด้วย MAPP กับพอลิพรอพิลีนดีกว่าคอมโพสิตที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว โดยเป็นการเพิ่มการยึดเกาะกันระหว่างพื้นผิวขององค์ประกอบทั้งสอง นอกจากนี้เมื่อเพิ่มความรุนแรงของเทคนิคการระเบิดด้วยไอน้ำ ทำให้พลังงานพื้นผิวของคอมโพสิตเพิ่มขึ้น แต่พบว่าค่าความแข็งแรงดึงที่ได้โดยเทคนิคนี้มีค่าต่ำกว่าคอมโพสิตที่ไม่ได้ปรับสภาพพื้นผิว และเมื่อเพิ่มปริมาณซีลี้อยทำให้คอมโพสิตดูดซับน้ำมากขึ้นและค่าความแข็งแรงดึงต่ำลงกว่า

Kokta, B. V. และ Maldas, D. (1994) ได้ศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้ คือ ปริมาณซีลี้อย และชนิดของสารคู่ควบ (Coupling agents) ได้แก่ พอลิเอทิลีน คลอรีเนต (Chlorinated PE), พอลิเอทิลีน คลอโรซัลโฟเนต (Chlorosulfonated PE) และ พอลิเอทิลีน มาเลอเตด (Maleated PE) ปริมาณของสารคู่ควบที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) และเสถียรภาพทางรูปร่าง (Dimensional stability) ของคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนที่นำกลับมาใช้ใหม่ (Recycled PE) และซีลี้อยจากไม้ชนิด Peat moss โดยหลอมสารคู่ควบพร้อมกับพอลิเอทิลีน แล้วนำซีลี้อยลงไปผสมที่อุณหภูมิ 165 °C โดยใช้เครื่องผสมชนิด 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll mill) หลังจากผสมแล้วตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้วนำไปขึ้นรูปแบบกดอัด จากการทดลองพบว่าพอลิเอทิลีน มาเลอเตดเป็นสารคู่ควบที่ดีที่สุด ส่วนสมบัติของปริมาณของซีลี้อยและปริมาณของสารคู่ควบขึ้นกับสภาวะที่ใช้ในการทดลอง

Fermada, M. B. และคณะ (1999) ได้นำพอลิพรอพิลีน (Polypropylene) มาผสมกับเส้นใยไม้ (Wood fiber) ที่มีขนาด 60 เมช ในปริมาณ 10% 20% 30% และมีการเคลือบผิวซีลี้อยด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์-กราฟท์-พอลิพรอพิลีน (MAPP) ในปริมาณต่าง ๆ คือ 2% และ 10% โดยเมตริกซ์ที่ใช้ คือ พอลิพรอพิลีนและ MAPP จากนั้นทำการผสมและขึ้นรูปขึ้นงานโดยเครื่องกดอัด พบว่าคอมโพสิตให้สมบัติต่าง ๆ ดีกว่าพอลิเมอร์ที่ไม่มีการเติมซีลี้อย เนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซีล้อยช่วยดูดซับพลังงาน นอกจากนี้ยังพบว่าการเกิดผลึกมักเกิดบริเวณพื้นผิวของซีล้อย ทำให้สมบัติเชิงกล ความต้านทานต่อความชื้น และเสถียรภาพทางความร้อนดีขึ้น

Li, T. Q. และคณะ (2001) ได้ทำการศึกษาสมบัติการแตกหักของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับเส้นใยไม้ (Polypropylene/Wood flour blend) โดยพอลิพรอพิลีน (PP) ที่ใช้มีทั้งแบบที่ยังไม่เคยผ่านกระบวนการขึ้นรูป (Virgin) และที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้ว (Recycled) โดยทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) จากนั้นนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกด้วยการฉีดขึ้นรูป จากการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณของซีล้อยเพิ่มขึ้น ทำให้ความแข็งแรงกระแทกเพิ่มขึ้นด้วย และการเติม MAPP เป็นการปรับปรุงความสามารถในการยึดติดระหว่างวัฏภาคของพอลิพรอพิลีนและเส้นใยไม้ให้ดีขึ้นอีกด้วย

Myers, G. E. และคณะ (1993) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับปริมาณของมาลิกแอนไฮไดรด์-กราฟท์-พอลิพรอพิลีน (MAPP) และอุณหภูมิในการอัดรีดที่มีผลต่อชิ้นงานที่มีองค์ประกอบของซีล้อยกับพอลิพรอพิลีน (PP) และซีล้อยกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เมื่อใช้องค์ประกอบของซีล้อยและพอลิเมอร์ในปริมาณที่เท่า ๆ กัน ทำการผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) แล้วขึ้นรูปเป็นชิ้นงานเพื่อทดสอบ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อทำการอัดรีดที่อุณหภูมิสูง ทำให้ซีล้อยเกิดการเสียดสีภาพ นอกจากนี้การปรับปรุงพื้นผิวของซีล้อยด้วย MAPP ทำให้ความเป็นขั้วบริเวณพื้นผิวของซีล้อยลดลง สำหรับสภาวะที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการอัดรีด 200-210 °C และเติม MAPP ลงไปในปริมาณ 1-2% ซึ่งทำให้วัสดุที่ได้มีความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัส และสมบัติการทนทานต่อความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างมาก

Selke, S. E. และ Childress, J. (1993) ทำการวิจัยการพัฒนาสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตที่ประกอบด้วยซีล้อยที่ได้จากไม้เนื้อแข็งกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยให้ปริมาณของซีล้อยคงที่ คือ 40% โดยน้ำหนัก ตัวแปรที่ทำการเปลี่ยนแปลง คือ ชนิดของสารเติมแต่ง ซึ่งได้แก่ พอลิเอทิลีนที่มีการปรับปรุงให้มีไอโอโนเมอร์ (Ionomer modified polyethylene, ION) มาลิกแอนไฮไดรด์-กราฟท์-พอลิพรอพิลีน (Maleic anhydride modified polypropylene, MAPP) และพอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (Low molecular weight polypropylene, LMWPP) และการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารเติมแต่งบางตัว โดยทำการผสมสารเติมแต่งกับซีล้อยและพอลิเอทิลีนที่นำกลับมาใช้ใหม่ (Recycled HDPE) ในเครื่องอัดรีดชนิด

เกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) และใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression moulding) ในการทำชิ้นงานสำหรับทดสอบการคืบ (Creep) การดูดซับน้ำ (Water Absorption) สมบัติการดึงยืด (Tensile properties) และความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) จากการศึกษาพบว่า การเติม MAPP เป็นการปรับปรุงให้สมบัติเชิงกลทุกอย่างให้ดีขึ้น เนื่องจาก MAPP ช่วยให้การยึดติดระหว่างวัฏภาคของ HDPE และซีลียอดีขึ้น ส่วนการเติม ION และ LMWPP ให้ผลการทดลองที่ไม่แน่นอน

Yam, K. L. และคณะ (1990) ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) จากขบวนการกับเส้นใยไม้สน โดยศึกษาเส้นใยที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวและปรับปรุงพื้นผิวด้วยความร้อนและอะเซทิลีน (Acetylene) จากการผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) พบว่าสามารถผสมได้ถึงร้อยละ 60 โดยน้ำหนักของไม้สน และเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยทำให้ค่าความแข็งแรงดิ่งลดลง และเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยความร้อนและอะเซทิลีนให้ค่าความแข็งแรงดิ่งที่ต่ำกว่าเส้นใยที่ปรับปรุงด้วยความร้อนและอะเซทิลีน สำหรับค่ามอดุลัส ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกและความสามารถในการยึดเกาะระหว่างพื้นผิวเส้นใยและ HDPE ไม่ขึ้นอยู่กับการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใย นอกจากนี้ค่ามอดุลัสมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาดลดลง

Patil, Y. P. และคณะ (2000) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการใช้มาลิก แอนไฮดรายด์ เป็นสารคู่ควบที่มีผลต่อการดูดซับน้ำของคอมโพสิตที่มีโนโวลาค (Novolac) เป็นเมตริกซ์ และใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร คือ ฟางข้าวสาลี ชานอ้อย และซีลียอดีเป็นเส้นใยเสริมแรง โดยอัตราส่วนระหว่างโนโวลาคเรซินต่อเส้นใยเป็น 50:50 โดยใช้เส้นใยขนาดเท่ากัน คือ 425 μm ทำการทดสอบการดูดซับน้ำและความแข็งแรง พบว่าความแข็งแรงของคอมโพสิตที่ทำการปรับปรุงเส้นใยโดยการจุ่มเส้นใยในสารละลายที่มี 2% มาลิก แอนไฮดรายด์ในไซลีน พบว่าคอมโพสิตที่ไม่มีการปรับปรุงเส้นใยมีความแข็งแรงมากกว่า แต่คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยแล้วมีการดูดซับน้ำที่ต่ำกว่า และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยทั้งสามประเภท พบว่าซีลียอดีให้สมบัติต่าง ๆ ดีกว่าชานอ้อยและฟางข้าวสาลี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

1. ขวดพลาสติกสำหรับใส่น้ำดื่ม พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene , HDPE) เกรดการค้า
2. ขี้เลื่อยจากไม้เต็งและไม้สัก จากโรงงานเฟอร์นิเจอร์ ส. สหชัยการช่าง

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin Screw Extruder) : BRABENDER
2. เครื่องบด (Grinder) : Bosco Engineering
3. เครื่องร่อนแยกขนาด : Retsch
4. ตะแกรงร่อนมาตรฐานขนาด 12 35 และ 100 เมช
5. เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด (Compression Molding) : Lab Tech Engineering Company LTD.
6. เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง (Universal Testing Machine) : LLYOD Instrument.
7. เครื่องทดสอบความแข็งแรงกระแทก (Izod Impact Tester) : Yasuda Seiki Seisakusho LTD.
8. เครื่องทดสอบความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์ชนิด D (Durometer, Shore D) : Yasuda Seiki Seisakusho LTD.
9. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน (Differential Scanning Calorimeter, DSC) : Perkin Elmer รุ่น Pyris DIAMOND DSC
10. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) : EDAX รุ่น LEO 1455 VP
11. เครื่องทดสอบสมบัติการไหลแบบคาพิลลารี (Capillary Rheometer) : ROSAND รุ่น Rh-2000 Advanced Rheometer System
12. ตู้อบ
13. เกรียง
14. ถาดอะลูมิเนียม
15. เครื่องชั่ง
16. ถังมือกั้นความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นที่มีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17. เวอร์เนีย
18. ไมโครมิเตอร์ (Micrometer)
19. เดซิเคเตอร์ (Dessicater)
20. เครื่องตัดชิ้นงานแบบใช้กำลังลมสำหรับการขึ้นรูปแบบกดอัด
21. เครื่องเจียรรอยบากชิ้นงานสำหรับการทดสอบความแข็งแรงกระแทก
22. เครื่องแกวชชนิดต่างๆ เช่น ปีกเกอร์ แท่งแก้วคนสาร

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมพลาสติก

1. นำขวดพลาสติกที่ได้ไปทำความสะอาด ตัดส่วนหัวและทำออก แล้วนำไปปิดด้วยเครื่องบด จนได้พลาสติกที่มีขนาดประมาณ 0.5×0.5 ตารางเซนติเมตร
2. นำพลาสติกที่บดแล้วไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วเก็บในเดซิเคเตอร์

3.3.2 การเตรียมขี้เลื่อย

1. นำขี้เลื่อยทั้งสองชนิดไปบดด้วยเครื่องบด
2. นำขี้เลื่อยที่ได้เข้าเครื่องร่อนแยกขนาดเพื่อแยกขี้เลื่อยให้ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 12 เมช 35 เมช และ 100 เมช
3. นำขี้เลื่อยที่คัดแยกขนาดแล้วไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วเก็บในเดซิเคเตอร์ ก่อนนำไปผสมในหัวข้อ 3.3.3 ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 ขั้นตอนการผสม

1. ทำการผสมส่วนผสมต่างๆ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมต่างๆ ที่ใช้ในการเตรียมวัสดุ

สูตรที่	HDPE (กรัม)	ซีเมนต์จากไม้เต็ง		ซีเมนต์จากไม้สัก	
		ปริมาณ (กรัม)	ขนาด (เมซ)	ปริมาณ (กรัม)	ขนาด (เมซ)
1	100	-	-	-	-
2	90	10	12-34	-	-
3	90	10	35-99	-	-
4	90	10	≥100	-	-
5	80	20	12-34	-	-
6	80	20	35-99	-	-
7	80	20	≥100	-	-
8	70	30	12-34	-	-
9	70	30	35-99	-	-
10	70	30	≥100	-	-
11	60	40	12-34	-	-
12	60	40	35-99	-	-
13	60	40	≥100	-	-
14	90	-	-	10	12-34
15	90	-	-	10	35-99
16	90	-	-	10	≥100
17	80	-	-	20	12-34
18	80	-	-	20	35-99
19	80	-	-	20	≥100
20	70	-	-	30	12-34
21	70	-	-	30	35-99
22	70	-	-	30	≥100
23	60	-	-	40	12-34
24	60	-	-	40	35-99
25	60	-	-	40	≥100

2. ผสมสูตรต่างๆ ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw Extruder) โดยใช้ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที อุณหภูมิที่หัวตาย $160\text{ }^{\circ}\text{C}$
3. นำของผสมที่ได้ไปบดด้วยเครื่องบด
4. นำของผสมที่ได้ไปขึ้นรูปโดยใช้เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด (Compression Molding) โดยใช้อุณหภูมิ $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ใช้เวลาในการอัดร้อน 5 นาที และเวลาในการอัดเย็น 5 นาที
5. ตัดเป็นชิ้นงานเพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติต่างๆ
6. นำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ดังนี้

1) สมบัติเชิงกล

- สมบัติแรงดึง ได้แก่ ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก ค่ามอดุลัส และร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก
- ความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอ
- ความแข็งแรงกระแทก

- ความแข็งกด

2) สมบัติทางกายภาพ

- สมบัติการดูดซับน้ำ

3) สมบัติการไหล โดยใช้เครื่องทดสอบการไหลแบบคาพิลลารี (Capillary Rheometer) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดเฉือน (Shear rate) กับความหนืดเฉือน (Shear viscosity)

4) สมบัติทางความร้อน โดยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry, DSC เพื่อหาอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crystallinity) ของพอลิเมอร์

5) สันฐานวิทยา โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) เพื่อศึกษาสันฐานวิทยาของชิ้นงานที่ได้ โดยศึกษาลักษณะการกระจายตัวของซีลี้อยในพอลิเอทิลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 วิธีการทดสอบ

ทดสอบสมบัติต่างๆของวัสดุที่เตรียมได้ ตามมาตรฐานดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 มาตรฐานที่ใช้ทดสอบวัสดุ

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยที่รายงาน
ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield)	ASTM D 638	MPa
มอดุลัสที่ 5 % การดึงยืด (Young's modulus at 5 % strain)	ASTM D 638	MPa
ร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก (%Elongation at yield)	ASTM D 638	%
ความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength)	ASTM D 790	MPa
มอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus)	ASTM D 790	MPa
ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength)	ASTM D 256	kJ/m ²
ความแข็งกด (Hardness, Shore D)	ASTM D 785	-
สมบัติการดูดซับน้ำ (Water absorption)	ASTM D 570-81	%
สมบัติการไหล (Rheology)	ASTM D 1238	-
สมบัติทางความร้อน (DSC)	ASTM D 3418	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 สมบัติเชิงกล

3.4.1.1 ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก มอดุลัส และร้อยละการดึงยึด ณ จุดคราก

ใช้การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638 โดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine) และโปรแกรม WINDAP ในการคำนวณค่าต่างๆ โดยใช้ชิ้นงานทดสอบเป็นรูปดัมเบลล์ โดยสภาวะที่ใช้ทดสอบ คือ

Test speed : 5.00 mm/min

Gauge length : 25.00 mm

Load cell : 1.00 kN

Cell class : 0.5



(ก)

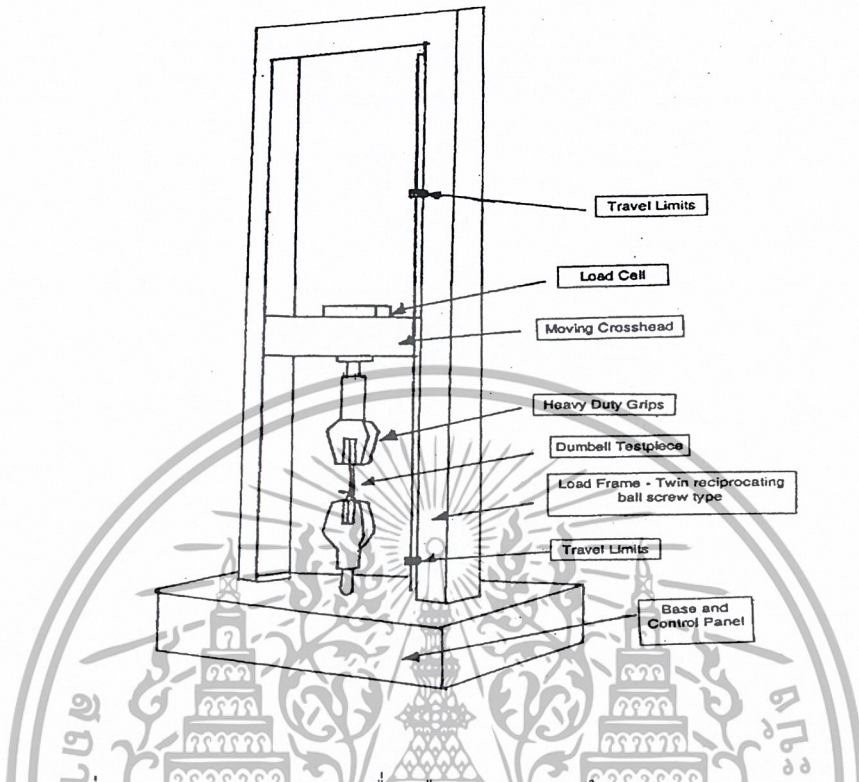
(ข)

รูปที่ 3.1 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบแรงดึง [ASTM D 638, 1992]

(ก) ดัมเบลล์ใหญ่ ชิ้นงานจากการขึ้นรูปแบบฉีด

(ข) ดัมเบลล์เล็ก ชิ้นงานจากการขึ้นรูปแบบกดอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบของเครื่องมือทดสอบแรงดึง [Hunt และ James, 1993]

ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก ค่ามอดุลัส และค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก สามารถหาได้จาก สมการดังต่อไปนี้

ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield) = F / A

มอดุลัสที่ความเครียด 5 % (Young's modulus at 5 % strain , E) = $\frac{F / A}{5/100}$

ร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก (%Elongation at yield) = $(L - L_0) / L_0 * 100$

เมื่อ F คือ แรงที่ใช้ในการดึงยืดชิ้นงานตัวอย่าง (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (mm^2)

L คือ ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงชิ้นงานตัวอย่าง (mm)

L_0 คือ ระยะที่ชิ้นงานตัวอย่างแคบที่สุดและมีพื้นที่หน้าตัดขนานกัน,

Gauge length (mm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1.2 ความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอ

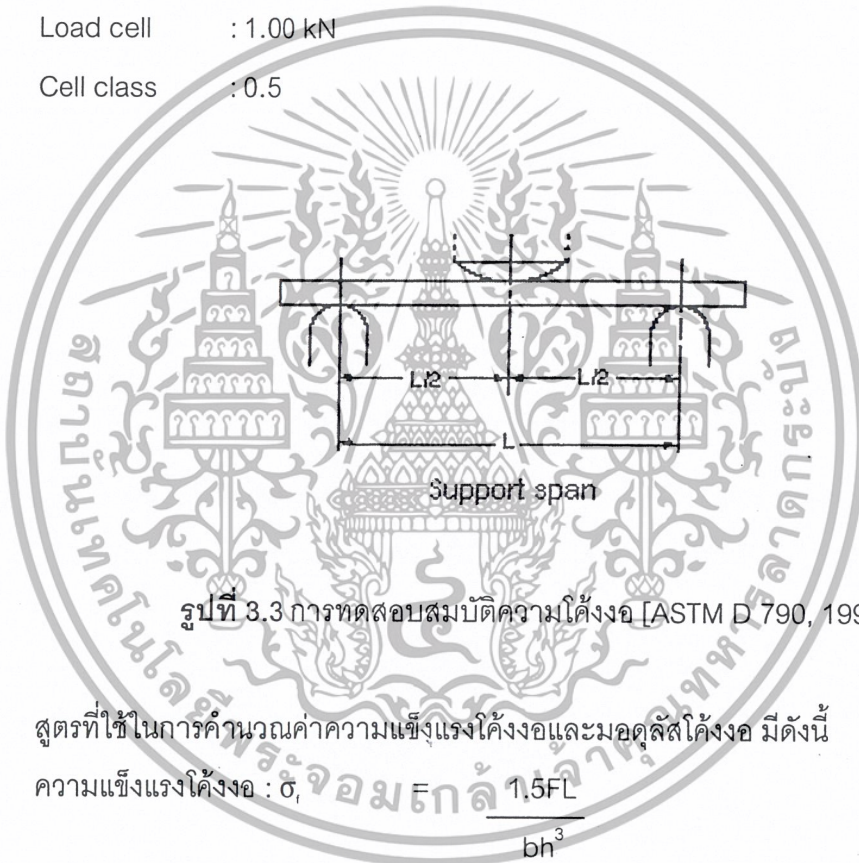
การทดสอบหาค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) และมอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D790 ทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal testing machine) และใช้โปรแกรม WINDAP ในการคำนวณ ใช้ชิ้นงานทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สภาวะที่ใช้ทดสอบคือ

Test speed : 10.00 mm/min

Span length : 40.00 mm

Load cell : 1.00 kN

Cell class : 0.5



รูปที่ 3.3 การทดสอบสมบัติความโค้งงอ [ASTM D 790, 1992]

สูตรที่ใช้ในการคำนวณค่าความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอ มีดังนี้

$$\text{ความแข็งแรงโค้งงอ : } \sigma_f = \frac{1.5FL}{bh^3}$$

$$\text{มอดุลัสโค้งงอ : } E_b = \frac{L^3}{4bh^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta d}$$

เมื่อ F คือ แรงกด (หน่วยเป็นนิวตัน, N)

L คือ Span length (หน่วยเป็นมิลลิเมตร, mm)

b คือ ความกว้างของตัวอย่าง (หน่วยเป็นมิลลิเมตร, mm)

h คือ ความหนาของตัวอย่าง (หน่วยเป็นมิลลิเมตร, mm)

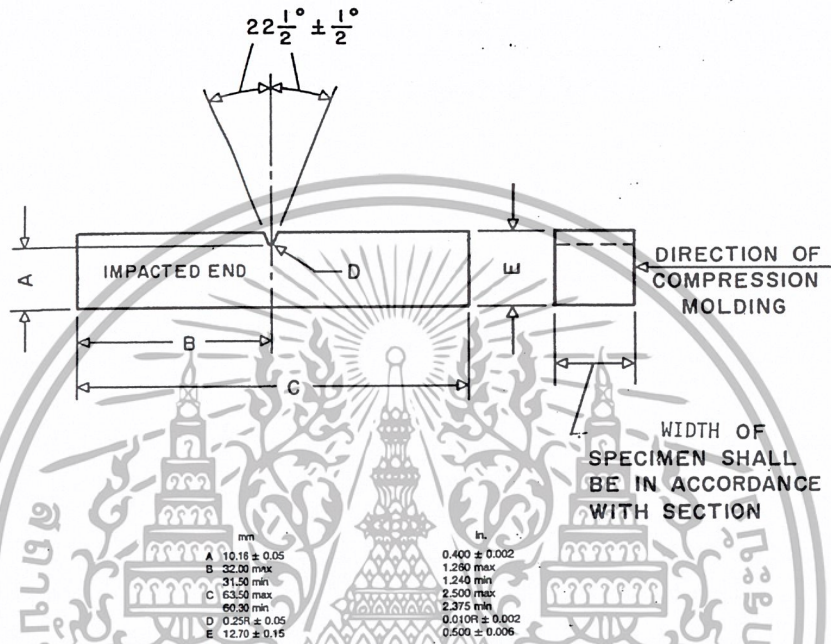
ΔF คือ ผลต่างของแรงดึง (หน่วยเป็นนิวตัน, N)

Δd คือ ระยะกดโค้งงอ (หน่วยเป็นมิลลิเมตร, mm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1.3 ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength)

ทดสอบโดยใช้มาตรฐานการทดสอบการกระแทกแบบไอซอด (Izod type) ซึ่งเป็นการทดสอบแรงกระแทกเหวี่ยง ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 256 โดยใช้เครื่อง Izod Impact Tester



รูปที่ 3.4 ขนาดและลักษณะของตัวอย่างทดสอบการกระแทกแบบไอซอด [ASTM D 256, 1992]

ค่าความแข็งแรงกระแทกของตัวอย่างที่มีตำหนิ (Notched samples) คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

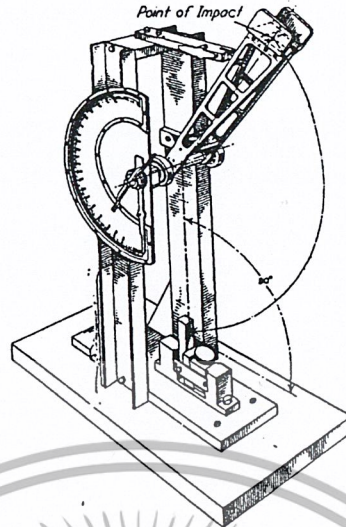
$$W_k = W / A_k$$

เมื่อ W_k คือ ค่าความแข็งแรงกระแทกของตัวอย่างที่มีตำหนิ (kJ/m^2)

W คือ ค่าพลังงานกระแทกที่วัดได้ (kJ)

A_k คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างที่หักรอยตำหนิแล้ว (m^2)

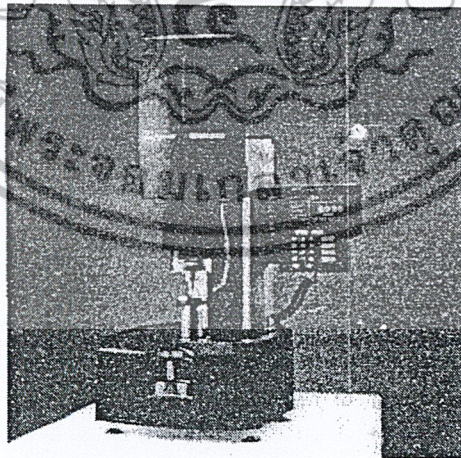
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 เครื่องมือทดสอบความแข็งแรงกระแทกแบบไอซอด [ASTM D 256, 1992]

3.4.1.4 ความแข็งกด (Hardness Tests)

ใช้การทดสอบความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์ (Durometer) ชนิด Shore D ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2240 ลักษณะพื้นผิวของวัสดุที่นำมาทดสอบต้องมีความเรียบ มีความหนาไม่ต่ำกว่า 6 มิลลิเมตร อ่านค่าหลังจากกดไป 15 วินาที



รูปที่ 3.6 เครื่องมือทดสอบความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์ [อิทธิพล, 2544]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 สมบัติการดูดซับน้ำ

การทดสอบการดูดซับน้ำ (Water absorption) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D570-81, 1992 โดยนำชิ้นงานตัวอย่าง อย่างละ 3 ชิ้น ไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักโดยละเอียด แล้วนำไปแช่น้ำ หลังจากเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมงแรก นำชิ้นงานมาชั่งน้ำหนัก และต้องทำการชั่งน้ำหนักอยู่เสมอทุก ๆ 1 สัปดาห์จนกว่าน้ำหนักที่ได้คงที่แล้วนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ จากสมการดังต่อไปนี้

$$\% \text{ การดูดซับน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างเปียก} - \text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100$$

3.4.3 สมบัติการไหล

ใช้เครื่องมือทดสอบสมบัติการไหลแบบคาปิลลารี (Capillary rheometer) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 1238, 1992 ใช้อุณหภูมิ 160 °C ตัวอย่างที่ใช้ต้องแห้ง มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ ใช้ตัวอย่างประมาณ 200 กรัม โดยทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราแรงเฉือน (Shear rate) กับความหนืดเฉือน (Shear viscosity) ของชิ้นงานที่เตรียมได้ ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้มีความสำคัญในกระบวนการผลิต ทำให้สามารถคาดการณ์ความหนืดของวัสดุที่เกิดขึ้นในระหว่างการผลิตได้เมื่อทราบอัตราการให้ความเครียดเฉือน

3.4.4 สมบัติทางความร้อน

ใช้เทคนิค Differential Scanning Calorimetry, DSC ในการศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความร้อน (Enthalpy) และความไม่เป็นระเบียบ (Entropy) โดยทำการหาอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิเกิดผลึก (T_c) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crystallinity) ของพอลิเมอร์ ใช้อัตราการให้ความร้อน 10 °C / นาที การเตรียมตัวอย่างต้องเตรียมชิ้นงานให้มีความเรียบ มีพื้นที่ผิวมาก และมีการอัดตัวที่แน่น ใช้ปริมาณตัวอย่างประมาณ 5 มิลลิกรัม

การหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Crystallinity) สามารถหาได้โดย

$$\% \text{Crystallinity} = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ ΔH_f คือ เอนทาลปีที่ใช้ในการหลอมเหลวพอลิเมอร์ หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของ
 อุณหภูมิหลอมเหลว (ΔH) หารด้วยน้ำหนักพอลิเมอร์ตัวอย่าง
 ΔH_f^0 คือ เอนทาลปีที่ใช้ในการหลอมเหลวพอลิเอทิลีนที่มีความเป็นผลึก 100% มี
 ค่า 293 J/g

3.4.5 สัณฐานวิทยา

ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของวัสดุที่ได้จากตัวอย่างที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) เพื่อดูการกระจายตัวของขี้เลื่อยในพอลิเมอร์ การเตรียมตัวอย่างทำโดยนำชิ้นงานตัวอย่างมาแช่ไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 10 นาที และทำการหักทันที หลังจากนั้นนำมาเคลือบด้วยทองและนำไปวิเคราะห์โดยเทคนิค SEM ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

โครงการพิเศษนี้เกี่ยวข้องกับการเตรียมและการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่โดยมีขี้เลื่อย 2 ชนิด คือ ไม้เต็งซึ่งเป็นไม้เนื้อแข็ง และ ไม้สักซึ่งเป็นไม้เนื้อแข็งปานกลาง เป็นสารตัวเติม โดยศึกษาถึงผลของขนาด และปริมาณขี้เลื่อยที่มีต่อสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) สมบัติทางกายภาพ (Physical properties) สมบัติการไหล (Rheological properties) สมบัติทางความร้อน (Thermal properties) และสัณฐานวิทยา (Morphology)

4.1 สมบัติเชิงกล

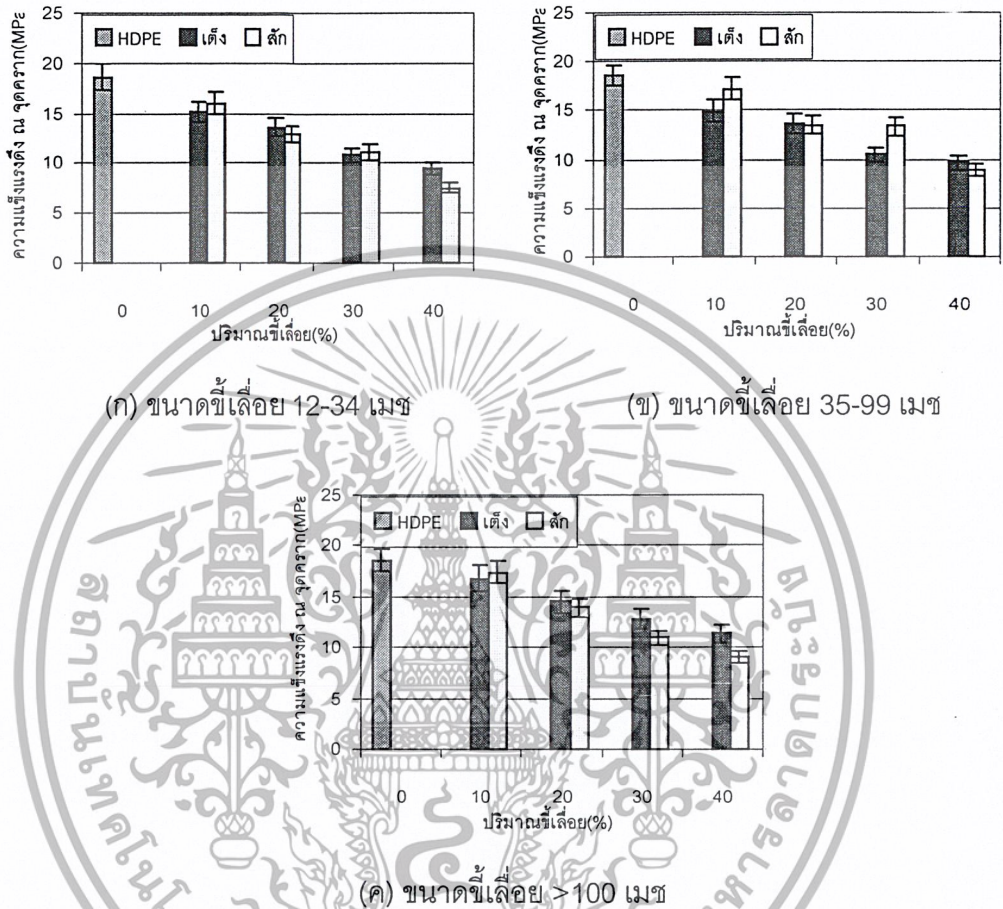
สมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่โดยมีขี้เลื่อยจาก ไม้เต็งและไม้สักเป็นสารตัวเติม ได้ศึกษาถึงตัวแปรต่างๆ ดังนี้ ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield) มอดุลัส (Modulus) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดที่ได้รับแรงสูงสุด (% Elongation at yield) ความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) มอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus) ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) และความแข็งกด (Hardness) และทำการเปลี่ยนปริมาณขี้เลื่อย ได้แก่ 0% 10% 20% 30% และ 40% รวมถึงขนาดอนุภาคของขี้เลื่อย ได้แก่ 12-34 เมช 35-99 เมช และมากกว่า 100 เมช จากสมบัติเชิงกลต่างๆ ที่ศึกษาให้ผลการทดลอง ดังนี้

4.1.1 ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield)

จากรูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง ณ จุดครากกับปริมาณของ ขี้เลื่อยพบว่า การใช้ขี้เลื่อยทั้งจากไม้เต็งและไม้สักให้ผลการทดลองในทำนองเดียวกัน กล่าวคือ ค่าความเค้นแข็งแรงดึง ณ จุดครากมีค่าลดลงเมื่อมีการเติมขี้เลื่อยลงในพอลิเมอร์เนื่องจากความไม่สามารถเข้ากันได้ระหว่างวัฏภาค (Phase incompatibility) ระหว่างขี้เลื่อยกับพอลิเมอร์ ทำให้เกิดรอยต่อระหว่างพื้นผิวของขี้เลื่อยกับพอลิเมอร์ ทำให้มีการยึดเกาะกันต่ำจึงเปรียบเสมือนเป็นจุดบกพร่องของวัสดุเป็นสาเหตุให้ความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุลดลง ดังนั้นเมื่อเติมขี้เลื่อย

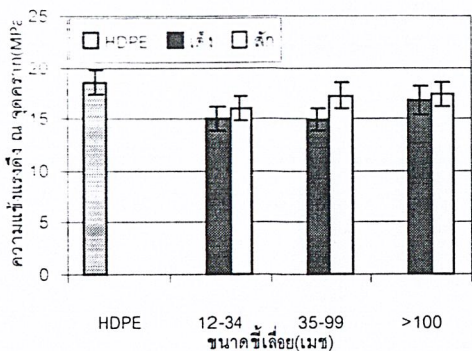
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปริมาณที่มากขึ้น นั่นคือ เกิดจุดบกพร่องในวัสดุเพิ่มมากขึ้นด้วย จึงส่งผลให้ค่าความเค้นดึงสูงสุดลดลง

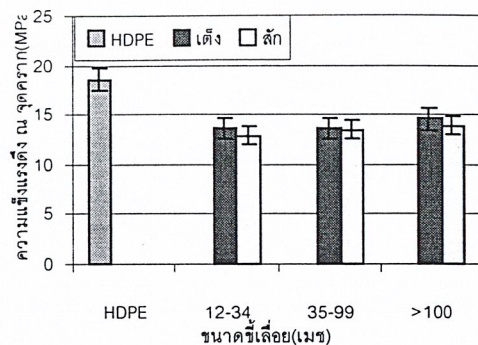


รูปที่ 4.1 ความแข็งแรงดึง ณ จุดครากของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีขี้เลื่อยเป็นสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ

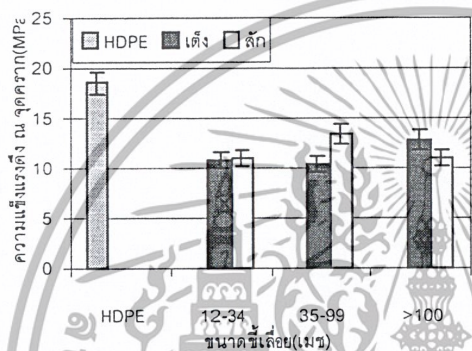
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



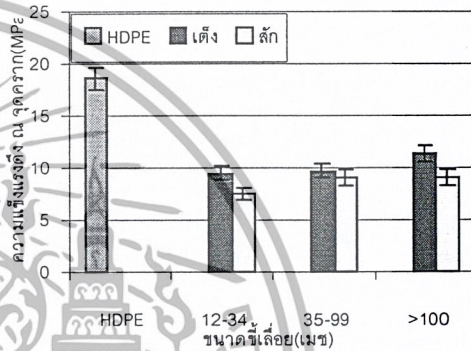
(ก) ปริมาณซีล้อย 10%



(ข) ปริมาณซีล้อย 20%



(ค) ปริมาณซีล้อย 30%



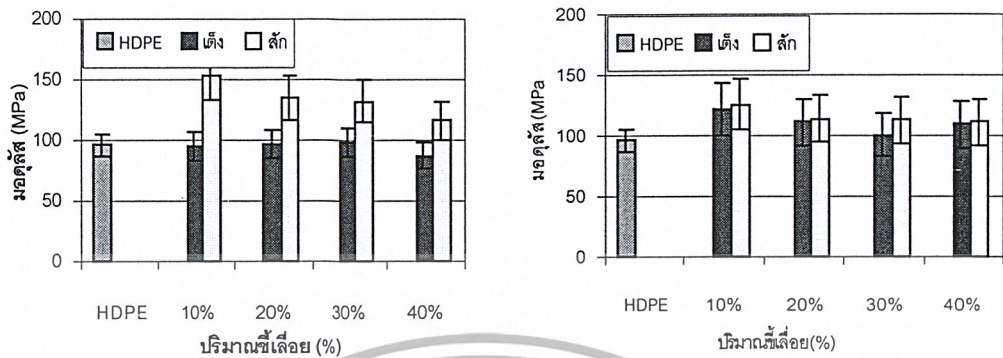
(ง) ปริมาณซีล้อย 40%

รูปที่ 4.2 ความแข็งแรงดึง ณ จุดครากของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีซีล้อยเป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง ณ จุดครากและซีล้อยขนาดต่างๆ แสดงได้ในรูปที่ 4.2 พบว่า ขนาดซีล้อยไม่มีผลต่อความแข็งแรงดึง ณ จุดครากมากนักและซีล้อยขนาดมากกว่า 100 เมท ให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากสูงกว่าซีล้อยขนาด 12-34 เมทและ 35-99 เมท เนื่องจากซีล้อยขนาดมากกว่า 100 เมท มีพื้นที่ผิวสัมผัส (Surface area) มากกว่าซีล้อยขนาด 12-34 เมทและ 35-99 เมท ทำให้แรงยึดเกาะระหว่างซีล้อยกับพอลิเมอร์มีมากกว่า [Cowie, 1991] ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากของซีล้อยขนาดมากกว่า 100 เมท มีค่าสูงกว่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากของซีล้อยของ 12-34 เมทและ 35-99 เมท เล็กน้อย นอกจากนี้ซีล้อยขนาด 12-34 เมท และ 35-99 เมท มีการกระจายขนาดในช่วงกว้าง คือ มีซีล้อยทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ปะปนกันอยู่ จึงทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากมีค่าต่ำกว่าการใช้ซีล้อยขนาดมากกว่า 100 เมท

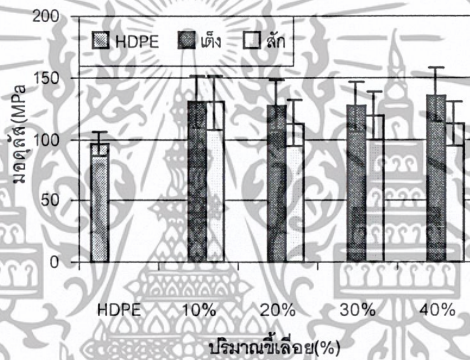
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 มอดุลัส (Young's modulus)



(ก) ขนาดขี้เลื่อย 12-34 เมช

(ข) ขนาดขี้เลื่อย 35-99 เมช

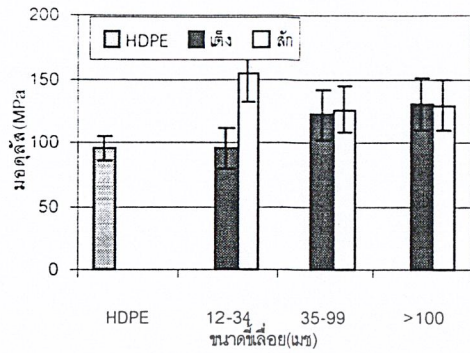


(ค) ขนาดขี้เลื่อย >100 เมช

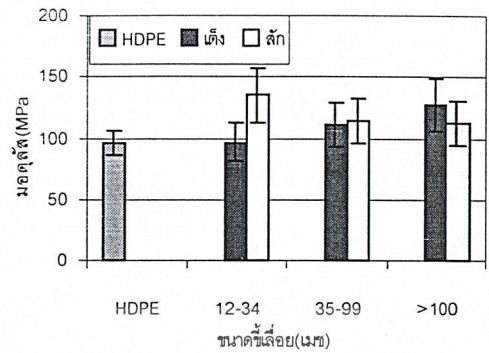
รูปที่ 4.3 มอดุลัสของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีขี้เลื่อยเป็นสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ กัน

จากรูปที่ 4.3 พบว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีขี้เลื่อยทั้งสองชนิดเป็นสารตัวเติม มีค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ไม่มีการเติมขี้เลื่อยเป็นสารตัวเติม เนื่องจากขี้เลื่อยเป็นวัสดุที่มีความแข็งมากกว่าพอลิเอทิลีนจึงเปรียบเสมือนเป็นส่วนช่วยเพิ่มความแข็งให้กับวัสดุ แต่เมื่อปริมาณขี้เลื่อยมากขึ้นเปรียบเสมือนการเพิ่มจุดบกพร่องให้กับวัสดุ ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้ค่ามอดุลัสมีแนวโน้มลดลงเมื่อเติมขี้เลื่อยในปริมาณมากขึ้นที่ขนาดเท่ากันทั้งจากไม้ติ่งและไม้ลัก

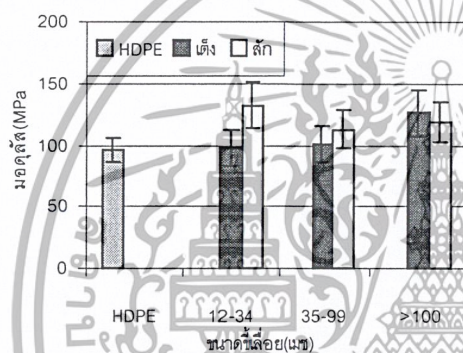
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



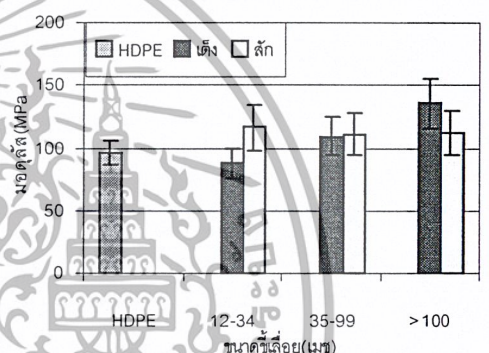
(ก) ปริมาณขี้เลื่อย 10 %



(ข) ปริมาณขี้เลื่อย 20 %



(ค) ปริมาณขี้เลื่อย 30 %



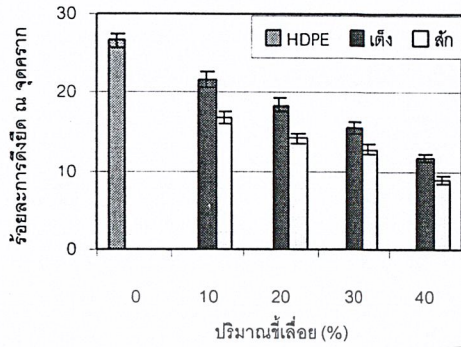
(ง) ปริมาณขี้เลื่อย 40 %

รูปที่ 4.4 มอดุลัสของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีขี้เลื่อยเป็นสารตัวเติมที่ขนาดต่างๆ

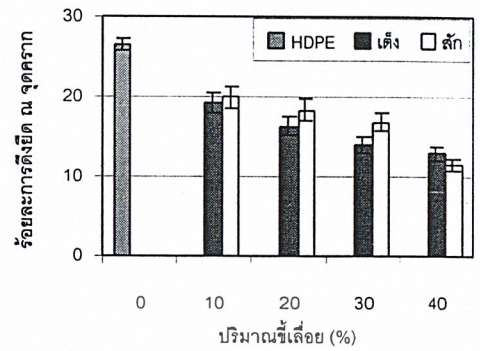
จากรูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสกับขนาดของขี้เลื่อย พบว่า พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีการเติมขี้เลื่อยทั้งจากไม้เต็งและไม้สักมีค่ามอดุลัสเพิ่มสูงขึ้นจากพอลิเอทิลีนที่ไม่มีการเติมขี้เลื่อย และเมื่อพิจารณาที่ขี้เลื่อยขนาดมากกว่า 100 เมช พบว่าค่ามอดุลัสมีแนวโน้มสูงกว่าค่ามอดุลัสของขี้เลื่อยขนาด 12-34 เมชและ 35-99 เมช ที่ปริมาณเท่ากันของไม้เต็งและไม้สัก เนื่องจากเหตุผลของพื้นที่ผิวสัมผัสที่เป็นการเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างวัสดุ ดังที่กล่าวมาแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

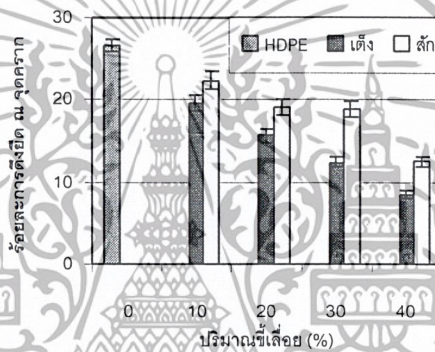
4.1.3 ร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก (% Elongation at yield)



(ก) ขนาดซีลี้อย 12-35 เมช



(ข) ขนาดซีลี้อย 35-100 เมช



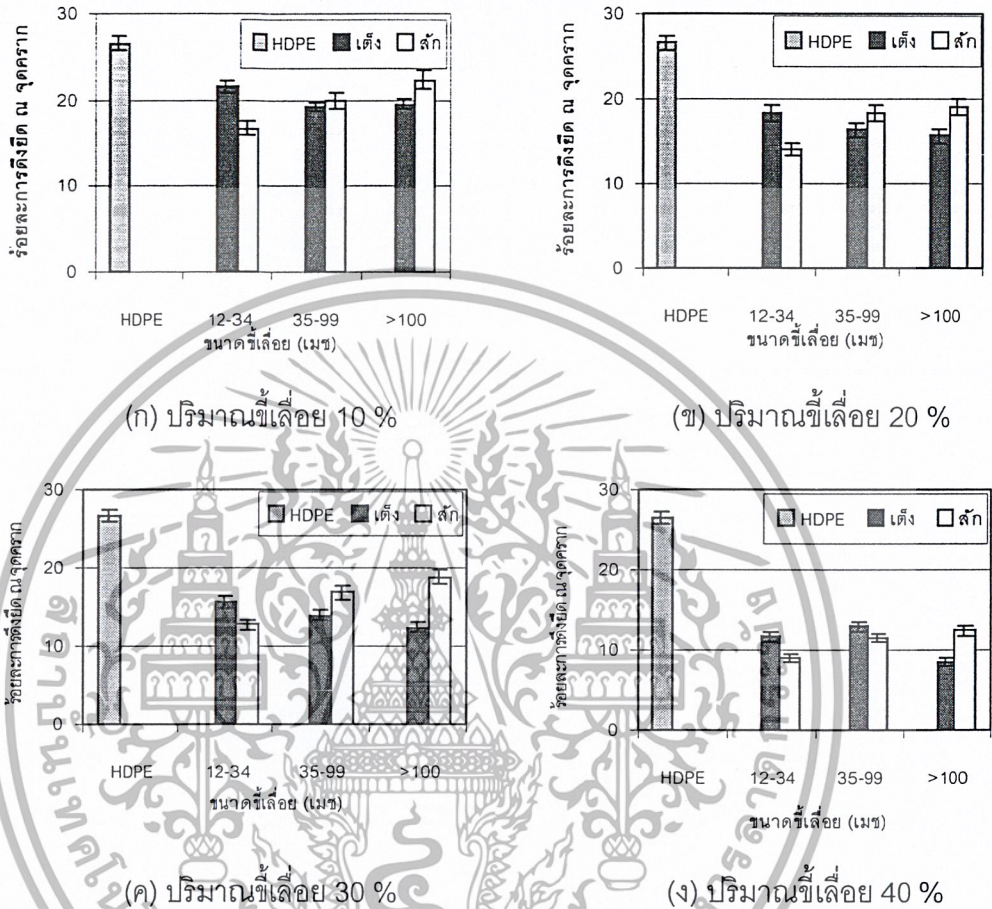
(ค) ขนาดซีลี้อย >100 เมช

รูปที่ 4.5 ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดครากของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผสมซีลี้อยสองชนิดที่ปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 4.5 แสดงผลของปริมาณซีลี้อยทั้งสองชนิดที่มีต่อร้อยละการดึงยืด ณ จุดครากพบว่า เมื่อมีการเติมซีลี้อยลงในพอลิเมอร์ ทำให้ร้อยละการดึงยืด ณ จุดครากลดลงจากพอลิเมอร์ที่ไม่มีการใช้ซีลี้อยเป็นสารตัวเติม เนื่องจากซีลี้อยเป็นส่วนที่มีความแข็งมากกว่าพอลิเอทิลีน จึงมีความสามารถในการเปลี่ยนรูปร่างได้ยากกว่าพอลิเอทิลีน ดังนั้นเมื่อผสมซีลี้อยลงในพอลิเอทิลีนจึงทำให้วัสดุที่ได้มีค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดครากน้อยกว่าพอลิเอทิลีนที่ไม่มีการเติมซีลี้อย และนอกจากนี้เมื่อมีการเติมซีลี้อยในปริมาณเพิ่มมากขึ้น ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดครากมีแนวโน้มลดลงในพอลิเอทิลีนที่ใช้ซีลี้อยจากไม้เต็งและไม้สักที่ขนาดเดียวกัน เนื่องจากความไม่สามารถเข้ากันได้ (Incompatibility) ระหว่างซีลี้อยกับพอลิเมอร์ ทำให้เกิดจุดบกพร่อง (Weak point) บริเวณรอยต่อระหว่างพื้นผิวของซีลี้อยกับพอลิเมอร์ [อิทธิพล, 2545] ซึ่งจุดบกพร่องนี้เอง เป็นจุดริเริ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การขาดหรือแยกออกจากกันระหว่างบริเวณที่เป็นพื้นผิวของทั้งสองวัสดุภาคเมื่อได้รับแรงดึงยืด จึงทำให้ร้อยละการดึงยืด ณ จุดครากมีค่าลดลง

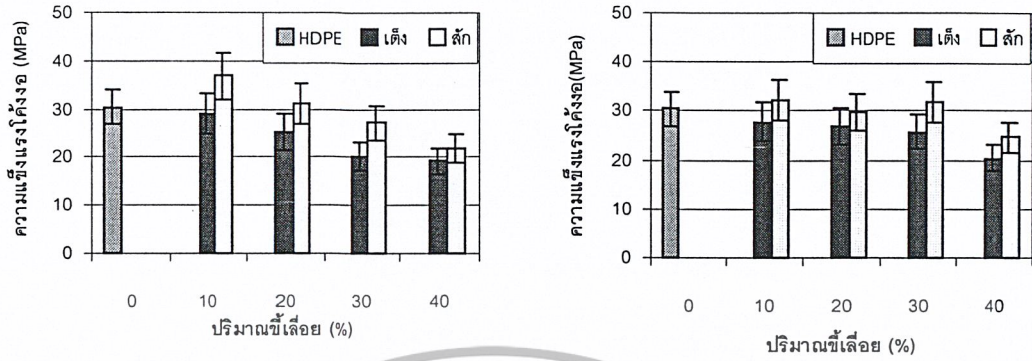


รูปที่ 4.6 ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดครากของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผสมขี้เลื่อยสองชนิดที่ขนาดต่างๆ กัน

จากรูปที่ 4.6 แสดงผลของขนาดขี้เลื่อยที่มีต่อร้อยละการดึงยืด ณ จุดครากพบว่าขนาดของขี้เลื่อยมีผลไม่มากนักต่อค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดครากอย่างไรก็ตามใน ขี้เลื่อยจากไม้เต็งเมื่อขนาดขี้เลื่อยเล็กลงทำให้ร้อยละการดึงยืด ณ จุดครากลดลง ส่วนในขี้เลื่อยจากไม้สักเมื่อขนาดขี้เลื่อยเล็กลงทำให้ร้อยละการดึงยืด ณ จุดครากเพิ่มขึ้น

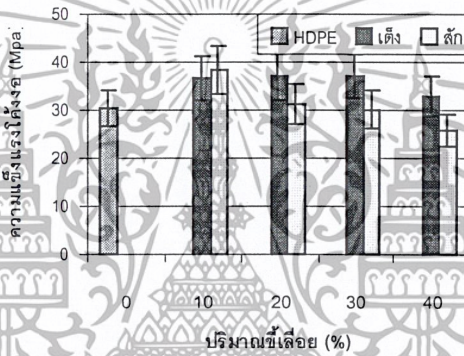
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 ความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength)



(ก) ขนาดขี้เลื่อย 12-34 เมช

(ข) ขนาดขี้เลื่อย 35-99 เมช

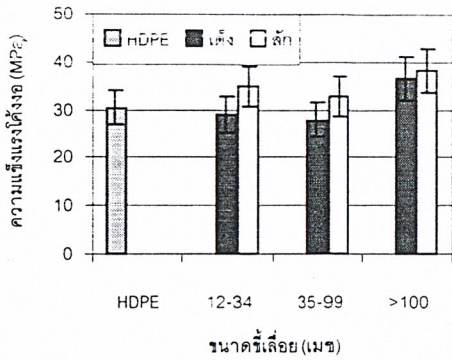


(ค) ขนาดขี้เลื่อย >100 เมช

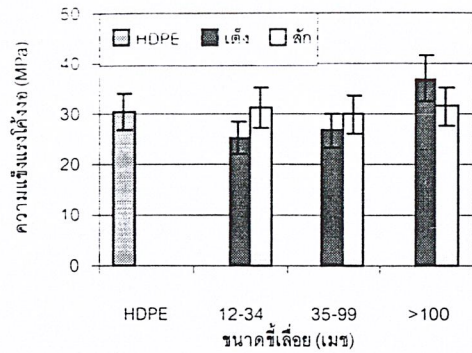
รูปที่ 4.7 ความแข็งแรงโค้งงอของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่โดยผสมขี้เลื่อยสองชนิดที่ปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงโค้งงอกับปริมาณของขี้เลื่อยพบว่า ค่าความแข็งแรงโค้งงอของพอลิเอทิลีนที่มีการผสมขี้เลื่อยมีค่าไม่แตกต่างจากพอลิเอทิลีนที่ไม่มีการผสมขี้เลื่อยมากนัก และเมื่อปริมาณขี้เลื่อยในพอลิเอทิลีนเพิ่มมากขึ้น มีแนวโน้มทำให้ความแข็งแรงโค้งงอลดลง เนื่องจากขี้เลื่อยเป็นส่วนที่มีความแข็งแรงมากกว่าพอลิเอทิลีน จึงมีความสามารถในการโค้งงอได้น้อยกว่าพอลิเอทิลีน ดังนั้นเมื่อมีการเติมขี้เลื่อยลงในพอลิเอทิลีนจึงมีแนวโน้มทำให้วัสดุที่ได้มีค่าความแข็งแรงโค้งงอลดลงกว่าพอลิเอทิลีนที่ไม่มีการเติมขี้เลื่อย และเมื่อปริมาณขี้เลื่อยเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอลดลงด้วยเช่นกัน

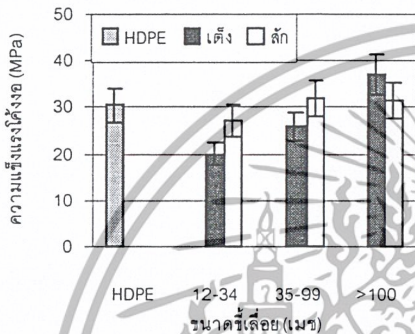
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



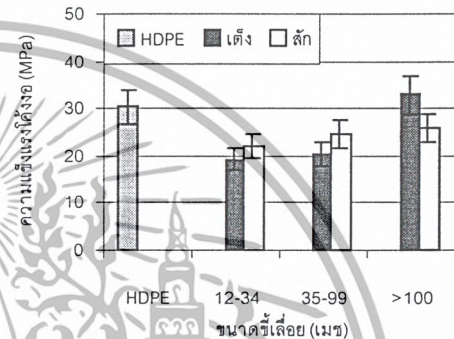
(ก) ปริมาณซีลี้อย 10%



(ข) ปริมาณซีลี้อย 20 %



(ค) ปริมาณซีลี้อย 30 %

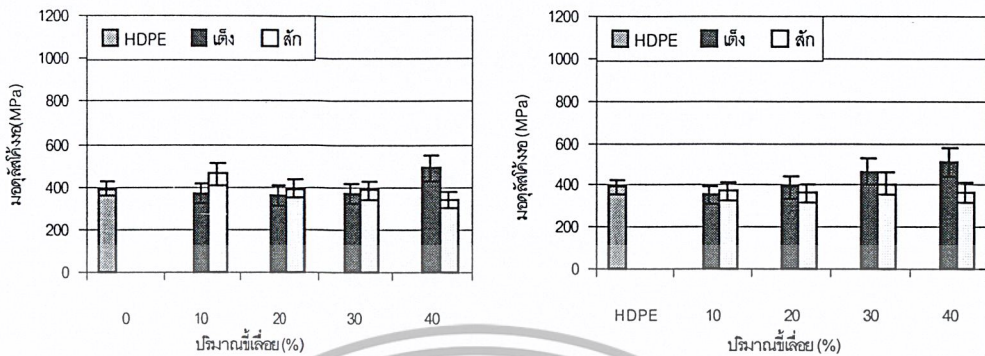


(ง) ปริมาณซีลี้อย 40 %

รูปที่ 4.8 ค่าความแข็งแรงโค้งงอของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่โดยผสมซีลี้อยจากไม้สองชนิดที่ขนาดต่างๆกัน

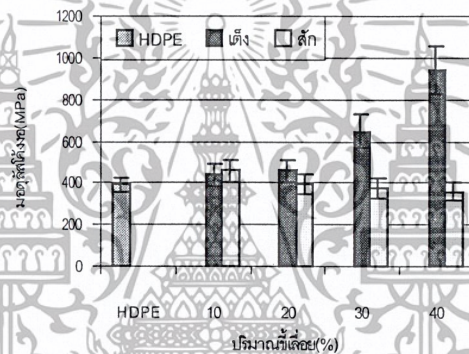
จากความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงโค้งงอกับขนาดของซีลี้อย (รูปที่ 4.8) พบว่า ในพอลิเอทิลีนที่มีการเติมซีลี้อยจากไม้เต็งและไม้สักเป็นสารตัวเติม เมื่อขนาดซีลี้อยเล็กลงมีแนวโน้มทำให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากเมื่อซีลี้อยมีขนาดเล็กลงทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์กับซีลี้อยเพิ่มสูงขึ้นทำให้ซีลี้อยกับพอลิเมอร์สามารถผสมเข้ากันได้ดีขึ้นจึงสามารถรับแรงที่ทำให้วัสดุโค้งงอได้มากขึ้น

4.1.5 มอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus)



(ก) ขนาดขี้เลื่อย 12-34 เมช

(ข) ขนาดขี้เลื่อย 35-99 เมช



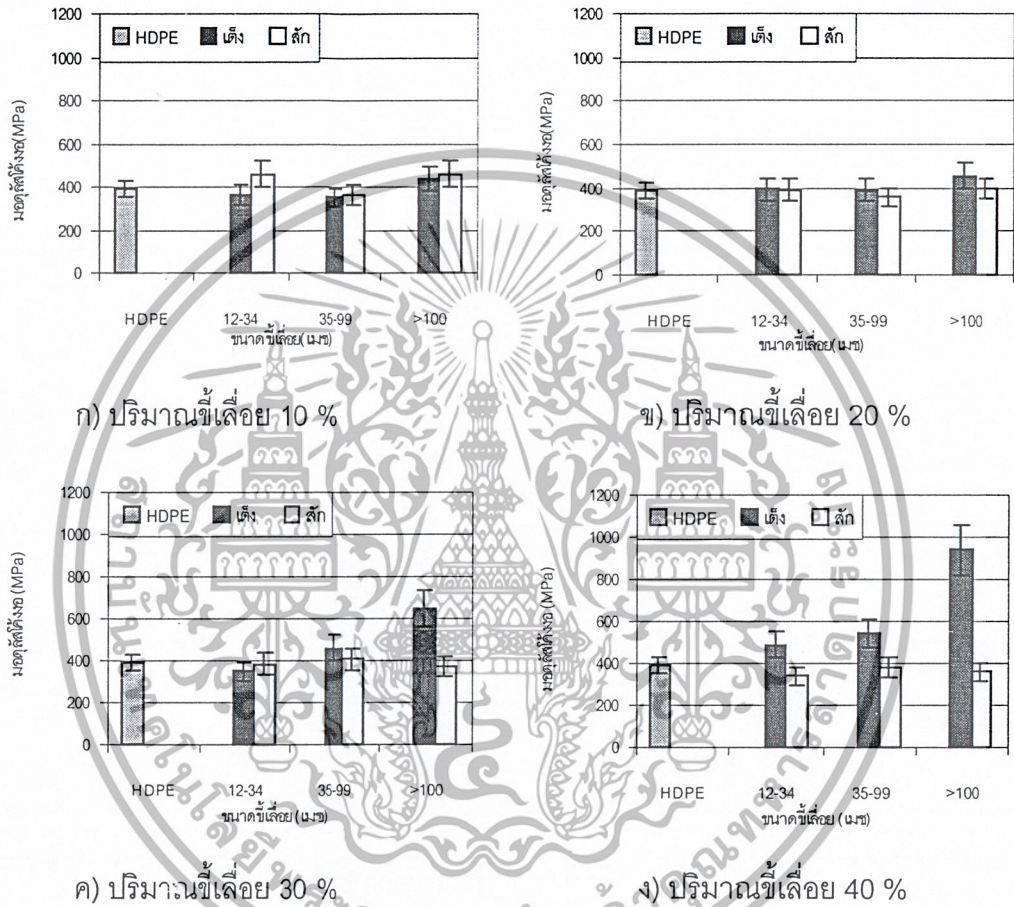
(ค) ขนาดขี้เลื่อย >100 เมช

รูปที่ 4.9 มอดุลัสโค้งงอของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีขี้เลื่อยเป็นสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ

รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ของมอดุลัสโค้งงอกับปริมาณของขี้เลื่อย เมื่อพิจารณาพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่โดยมีการเติมขี้เลื่อยขนาด 12-34 เมช 35-99 เมช และ มากกว่า 100 เมช (รูปที่ 4.9) พบว่า เมื่อปริมาณของขี้เลื่อยเพิ่มมากขึ้นค่ามอดุลัสโค้งงอของวัสดุที่มีการเติมขี้เลื่อยจากไม้สัก มีค่ามอดุลัสโค้งงอไม่เปลี่ยนแปลงไปจากพอลิเมอร์ที่ไม่มีการเติมขี้เลื่อยเป็นสารตัวเติมมากนัก แต่สำหรับวัสดุที่มีการเติมขี้เลื่อยจากไม้เต็งมีแนวโน้มให้ค่ามอดุลัสโค้งงอมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณของขี้เลื่อยเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีการเติมขี้เลื่อยจากไม้เต็งในปริมาณ 40% ขนาด มากกว่า 100 เมช โดยวัสดุดังกล่าวมีค่ามอดุลัสโค้งงอเพิ่มสูงขึ้นเป็นสองเท่าของพอลิเมอร์ที่ไม่มีการเติมขี้เลื่อยเป็นสารตัวเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องจากไม้เต็งเป็นไม้เนื้อแข็งมีค่าแรงดัดสถิตย์ (Static bending) มากกว่าไม้สัก ซึ่งเป็นไม้เนื้อแข็งปานกลาง [สุชาติ, 2541] จึงทำให้ค่ามอดุลัสโค้งงอของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่ใช้ซีลื้อยจากไม้เต็งเป็นสารตัวเติมมีค่ามากกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่ใช้ซีลื้อยจากไม้สักเป็นสารตัวเติม

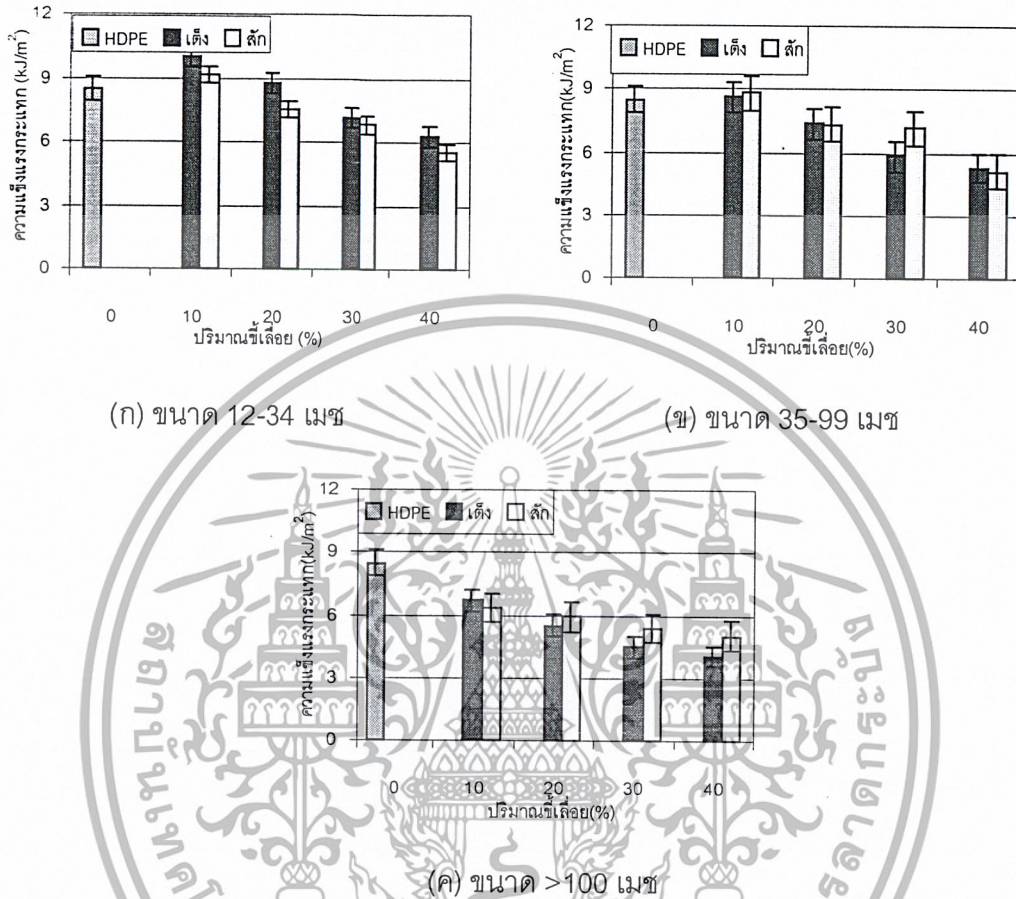


รูปที่ 4.10 มอดุลัสโค้งงอของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีซีลื้อยเป็นสารตัวเติมที่ขนาดต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.10 เมื่อพิจารณาที่ปริมาณการเติมซีลื้อยที่เท่ากัน ขนาดของซีลื้อยมีผลต่อค่ามอดุลัสโค้งงอ กล่าวคือ เมื่อซีลื้อยมีขนาดเล็กส่งผลให้ค่ามอดุลัสโค้งงอมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้ซีลื้อยขนาด มากกว่า 100 เมช ค่ามอดุลัสโค้งงอมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ไม่มีการเติมซีลื้อยเป็นสารตัวเติมเป็นอย่างมาก เนื่องจากเหตุผลของพื้นที่ผิวสัมผัส ค่ามอดุลัสโค้งงอจึงมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้ซีลื้อยที่มีขนาดเล็กเป็นสารตัวเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

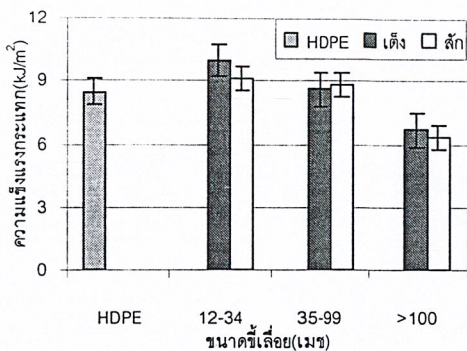
4.1.6 ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength)



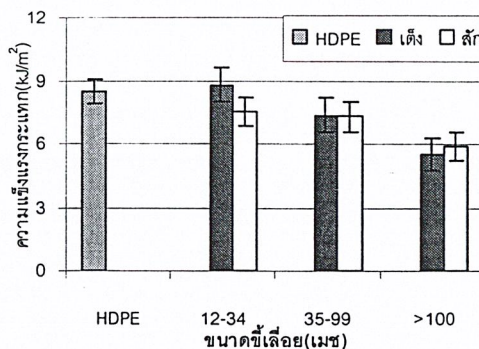
รูปที่ 4.11 ความแข็งแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีขี้เลื่อยเป็นสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.11 แสดงผลของปริมาณขี้เลื่อยที่มีผลต่อความแข็งแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนที่ผสมขี้เลื่อยจากไม้สองชนิด พบว่า ความแข็งแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนที่ผสมขี้เลื่อยในปริมาณ 10% ขนาด 12-34 ไมครอนและ 35-99 ไมครอนมีค่าสูงกว่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนที่ไม่มีการเติมขี้เลื่อย แต่เมื่อปริมาณขี้เลื่อยเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้ความแข็งแรงกระแทกลดลง เนื่องจากขี้เลื่อยเป็นวัสดุภาคที่ช่วยรับและกระจายแรงให้แก่พอลิเมอร์ได้ ทำให้พอลิเอทิลีนที่มีการผสมขี้เลื่อยมีความแข็งแรงกระแทกสูงกว่าพอลิเอทิลีนที่ไม่มีการเติมขี้เลื่อย แต่เมื่อขี้เลื่อยมีปริมาณมากขึ้นทำให้จุดบกพร่องของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น ค่าความแข็งแรงกระแทกจึงมีแนวโน้มลดลง

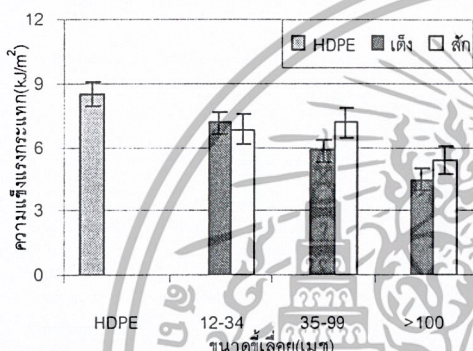
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



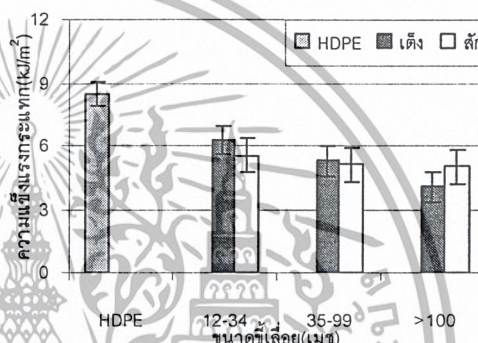
(ก) ปริมาณขี้เลื่อย 10%



(ข) ปริมาณขี้เลื่อย 20%



(ค) ปริมาณขี้เลื่อย 30 %

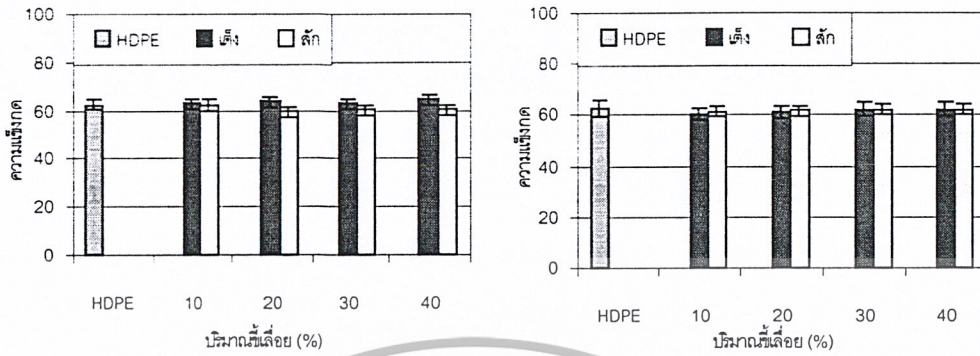


(ง) ปริมาณขี้เลื่อย 40%

รูปที่ 4.12 ความแข็งแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่โดยมีขี้เลื่อยเป็นสารตัวเติมที่ขนาดต่างๆ กัน

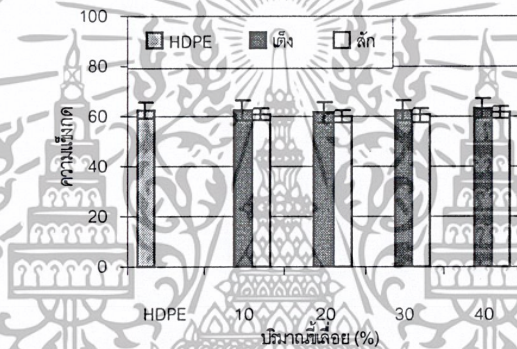
ผลของขนาดขี้เลื่อยที่มีต่อความแข็งแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนที่ผสมขี้เลื่อยจากไม้สองชนิดแสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่า ความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลงเมื่อขี้เลื่อยมีขนาดเล็กลง เนื่องจากเมื่อขี้เลื่อยมีขนาดเล็กลง ทำให้มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (Aspect ratio) ลดลง ขี้เลื่อยมีความสามารถในการรับและส่งผ่านแรงน้อยลง [Hill และ Clyne, 1996] ทำให้ความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลงเมื่อขี้เลื่อยมีขนาดเล็กลง

4.1.7 ความแข็งกด (Hardness)



(ก) ขนาดขี้เลื่อย 12-34 ไมครอน

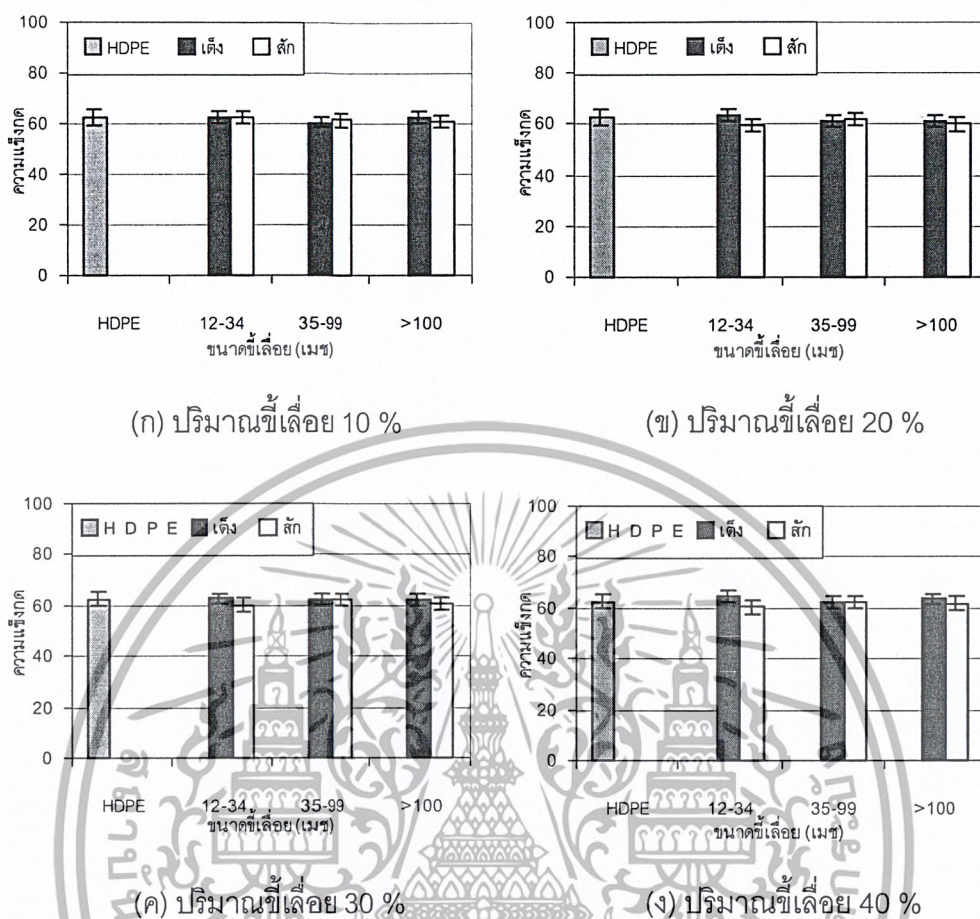
(ข) ขนาดขี้เลื่อย 35-99 ไมครอน



(ค) ขนาดขี้เลื่อย >100 ไมครอน

รูปที่ 4.13 ความแข็งกดของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีขี้เลื่อยเป็นสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ความแข็งกวดของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีขี้เลื่อยเป็นสารตัวเติมที่ขนาดต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกวดกับปริมาณขี้เลื่อย และรูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกวดกับขนาดขี้เลื่อย พบว่า ค่าความแข็งกวดมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงไปจากค่าความแข็งกวดของพอลิเมอร์ที่ไม่มีการเติมขี้เลื่อยมากนัก ทั้งที่ปริมาณและขนาดขี้เลื่อยที่แตกต่างกัน โดยผลการทดลองที่ได้เป็นไปในทำนองเดียวกันทั้งพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีการใช้ขี้เลื่อยจากไม้เต็งและไม้สักเป็นสารตัวเติม ซึ่งแสดงว่าความแตกต่างของความแข็ง (Hardness) เฉลี่ยของไม้เต็งซึ่งเป็นไม้เนื้อแข็งและไม้สักซึ่งเป็นไม้เนื้อแข็งปานกลาง [สุชาติ, 2541] ไม่มีผลต่อค่าความแข็งของชิ้นงานที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

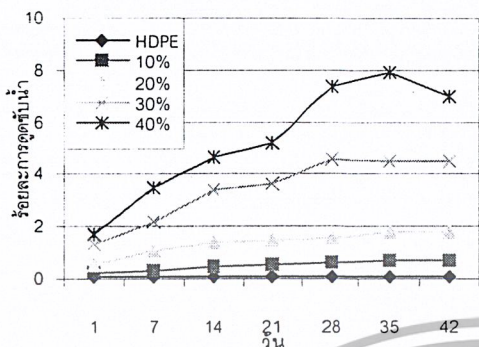
จากการทดสอบสมบัติเชิงกลทั้งหมด ได้แก่ ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก มอดุลัส ร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก ความแข็งแรงโค้งงอ มอดุลัสโค้งงอ ความแข็งแรงกระแทก ความแข็งกด พบว่าเมื่อใช้ซีลี้อย่างไม่เต็มขนาด มากกว่า 100 เมช ในปริมาณ 10% เป็นสารตัวเติมในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ วัสดุที่ได้มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด กล่าวคือ ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก มอดุลัส ความแข็งกด มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงไปจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ไม่มีการเติมซีลี้อย่างเป็นสารตัวเติม สำหรับความแข็งแรงโค้งงอ มอดุลัสโค้งงอ และความแข็งแรงกระแทก มีค่าเพิ่มสูงขึ้น และค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดได้รับแรงสูงสุดมีค่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

4.2 สมบัติทางกายภาพ

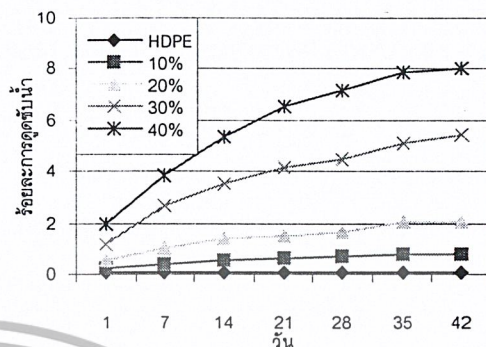
4.2.1 ร้อยละการดูดซับน้ำ (%Water absorption)

สมบัติการดูดซับน้ำ แสดงถึงความสามารถของวัสดุในการดูดซับน้ำจากสิ่งแวดล้อมเข้าไปในช่องว่างภายใน เมื่อพิจารณารูปที่ 4.15 ซึ่งแสดงค่าร้อยละการดูดซับน้ำของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่โดยมีการเติมซีลี้อย่างไม่เต็มและไม้สักเป็นสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ ที่เวลาต่าง ๆ พบว่าเมื่อปริมาณซีลี้อย่างเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าร้อยละการดูดซับน้ำของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีการเติมซีลี้อย่างเป็นสารตัวเติมเพิ่มมากขึ้นไปด้วย เนื่องจากซีลี้อย่างมีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลส [Kroschwitz, 1990] ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซีจำนวนมาก พื้นผิวของเส้นใยมีขีดทำให้เกิดการดูดซับน้ำได้ดี เมื่อพิจารณาถึงโครงสร้างทางกายภาพของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีซีลี้อย่างเป็นสารตัวเติมแล้วพบว่า น้ำถูกดูดซับเข้าไปภายในชิ้นงานได้ถึง 3 บริเวณ ได้แก่ ลูเมน (Lumen) ผนังเซลล์ (Cell wall) [Tsoumis, 1991] และบริเวณรอยต่อหรือช่องว่างระหว่างสารตัวเติมและพอลิเอทิลีน เมื่อปริมาณซีลี้อย่างเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้การดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีการเติมซีลี้อย่างไม่เต็มขนาด 12-34 เมช (รูปที่ 4.15(ก)) มีค่าร้อยละการดูดซับน้ำสูงที่สุดเมื่อมีการเติมซีลี้อย่างในปริมาณ 40% โดยมีแนวโน้มว่าค่าร้อยละการดูดซับน้ำเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 35 วัน และเมื่อปริมาณซีลี้อย่างเป็น 30% ค่าร้อยละการดูดซับน้ำเริ่มมีค่าคงที่ตั้งแต่วันที่ 28 แต่สำหรับการเติมซีลี้อย่างในปริมาณ 10% และ 20% พบว่าค่าร้อยละการดูดซับน้ำเริ่มคงที่ตั้งแต่วันที่ 14 สำหรับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่มีการเติมซีลี้อย่างไม่เต็มขนาด 35-99 เมช (รูปที่ 4.15(ข)) และขนาดมากกว่า 100 เมช (รูปที่ 4.15(ค)) พบว่าค่าร้อยละการดูดซับน้ำมีค่าไม่มากนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเติมซีลี้อย่างในปริมาณ 10% และ 20% มีค่าร้อยละการดูดซับน้ำต่ำกว่าร้อยละ 2

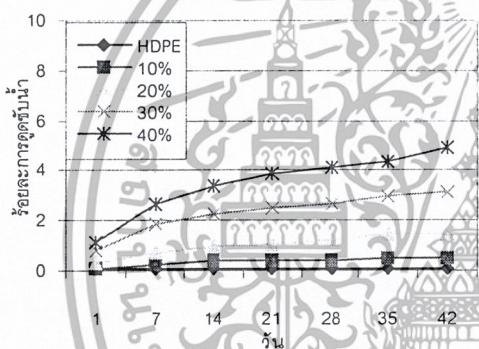
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



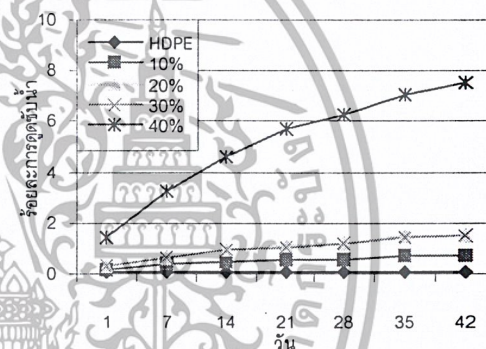
(ก) ไม้เต็งขนาด 12-34 เมท



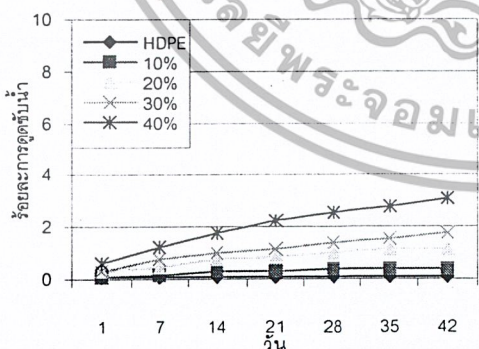
(ง) ไม้สักขนาด 12-34 เมท



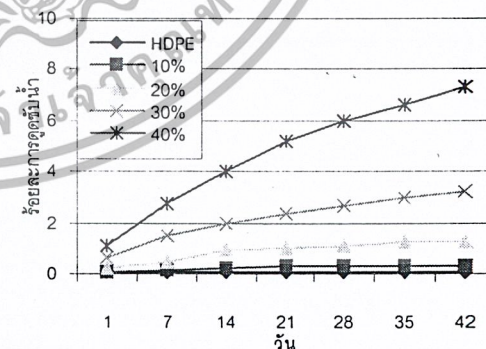
(ข) ไม้เต็งขนาด 35-99 เมท



(จ) ไม้สักขนาด 35-99 เมท



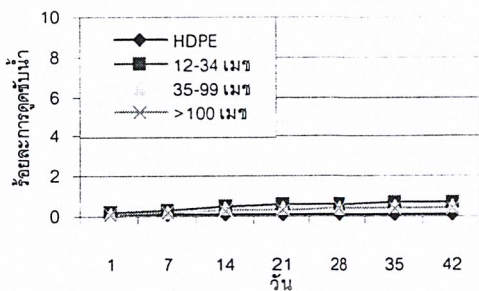
(ค) ไม้เต็งขนาด >100 เมท



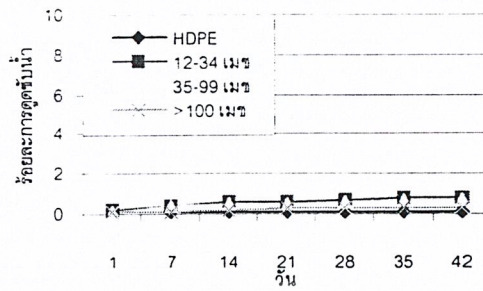
(ฉ) ไม้สักขนาด >100 เมท

รูปที่ 4.15 ร้อยละการดูดซับน้ำของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยมียี่สิบเปอร์เซ็นต์เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ เมื่อเวลาผ่านไป

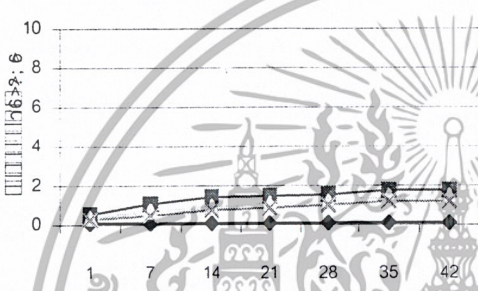
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



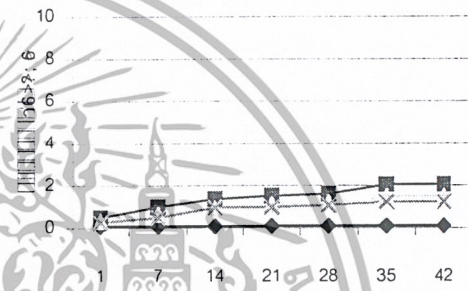
(ก) ไม้เต็ง ปริมาณ 10%



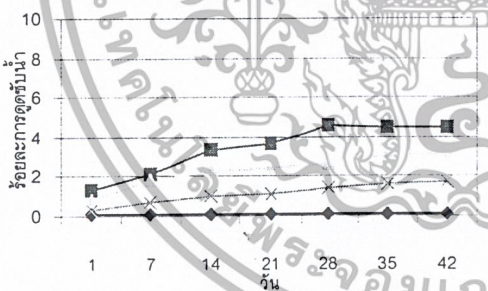
(จ) ไม้สัก ปริมาณ 10%



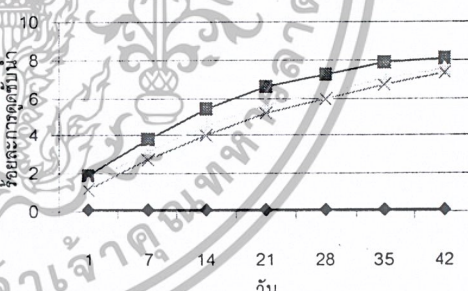
(ข) ไม้เต็ง ปริมาณ 20%



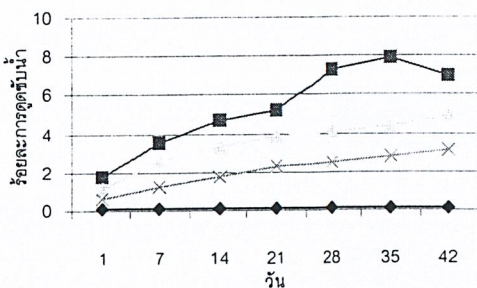
(ค) ไม้สัก ปริมาณ 20%



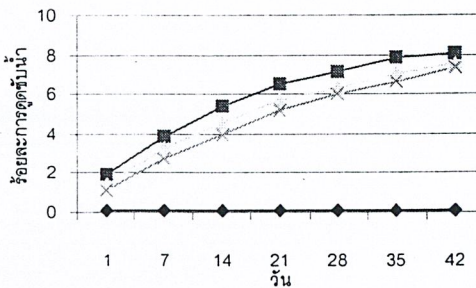
(ง) ไม้เต็ง ปริมาณ 30%



(ฉ) ไม้สัก ปริมาณ 30%



(ฉ) ไม้เต็ง ปริมาณ 40%



(ช) ไม้สัก ปริมาณ 40%

รูปที่ 4.16 ร้อยละการดูดซับน้ำของของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้โดยมีข้อยกเว้นเป็นสารตัวเติมที่ขนาดต่าง ๆ เมื่อเวลาผ่านไป ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.15(ง) ซึ่งเป็นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีการเติมซีลีเยอ จากไม้สักเป็นสารตัวเติม พบว่าการเติมซีลีเยอในปริมาณ 10% และ 20% ทำให้ค่าร้อยละการดูดซับน้ำมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 2 และการเติมซีลีเยอปริมาณ 30% และ 40% ค่าร้อยละการดูดซับน้ำมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นและเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 42 วัน เมื่อใช้ซีลีเยอขนาด 35-99 เมช (รูปที่ 4.15(จ)) ที่ปริมาณ 10% และ 20% ค่าร้อยละการดูดซับน้ำมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 2 เช่นกัน เมื่อเติมซีลีเยอในปริมาณ 30% ค่าร้อยละการดูดซับน้ำเริ่มมีค่าคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 14 วัน แต่สำหรับการเติมซีลีเยอในปริมาณ 40% ค่าร้อยละการดูดซับน้ำมีค่าสูงสุด และสำหรับการใช้ซีลีเยอขนาดมากกว่า 100 เมช (รูปที่ 4.15(ฉ)) ในปริมาณ 10% และ 20% ให้ผลการทดสอบคล้ายกับรูปที่ 4.15(จ) คือ ค่าร้อยละการดูดซับน้ำมีค่าไม่มากนัก และเมื่อใช้ซีลีเยอในปริมาณ 40% พบว่าค่าร้อยละการดูดซับน้ำมีค่าสูงสุดเช่นกัน

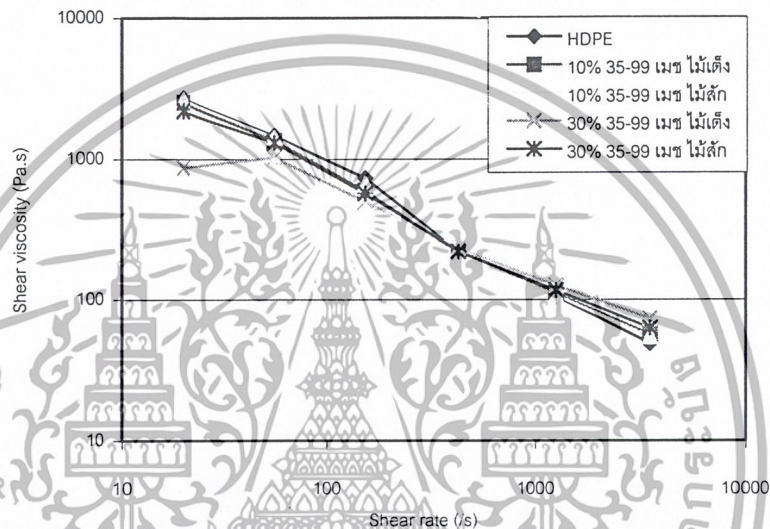
สำหรับรูปที่ 4.16 ซึ่งแสดงถึงค่าร้อยละการดูดซับน้ำของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีการเติมซีลีเยอจากไม้เต็งและไม้สักเป็นสารตัวเติม สามารถเห็นได้ว่า ที่ปริมาณซีลีเยอเท่ากัน ขนาดของซีลีเยอมีผลต่อค่าร้อยละการดูดซับน้ำ โดยพบว่าเมื่อขนาดของซีลีเยอเล็กลง ค่าร้อยละการดูดซับน้ำมีค่าลดลงตามไปด้วย ในทำนองเดียวกัน เมื่อซีลีเยอมีขนาดใหญ่ ค่าร้อยละการดูดซับน้ำมีค่ามากด้วยเช่นกัน เนื่องจากซีลีเยอที่มีขนาดใหญ่สามารถอุ้มน้ำได้ดีกว่าซีลีเยอที่มีขนาดเล็ก นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าร้อยละการดูดซับน้ำของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีการเติมซีลีเยอทั้งจากไม้เต็งและไม้สักเป็นสารตัวเติมให้ผลการทดลองสอดคล้องไปในทางเดียวกัน

จากผลการทดสอบค่าร้อยละการดูดซับน้ำของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีซีลีเยอเป็นสารตัวเติมซึ่งมีการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อค่าร้อยละการดูดซับน้ำ ได้แก่ ปริมาณ ขนาด และชนิดของซีลีเยอ พบว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าร้อยละการดูดซับน้ำ คือ ปริมาณของซีลีเยอ โดยส่งผลให้ค่าร้อยละการดูดซับน้ำเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณซีลีเยอเพิ่มมากขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่อค่าร้อยละการดูดซับน้ำรองลงมา คือ ขนาดของซีลีเยอ พบว่าขนาดของซีลีเยอมีผลต่อค่าร้อยละการดูดซับน้ำเช่นเดียวกันแต่อาจไม่เห็นเด่นชัดเท่ากับผลของปริมาณซีลีเยอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 สมบัติการไหล (Rheology)

การศึกษาสมบัติการไหลสามารถทำได้โดยใช้เครื่องทดสอบการไหลแบบคาปิลารี (Capillary Rheometer) จากการศึกษาสมบัติการไหลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใหม่โดยมีและไม่มีซีลี้อยเป็นองค์ประกอบ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับความเครียดเฉือน ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือน (Shear viscosity) กับอัตราความเครียดเฉือน (Shear rate) ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่โดยผสมซีลี้อยสองชนิดที่ปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 4.17 พบว่า ความหนืดเฉือนมีค่าลดลงเมื่ออัตราความเครียดเฉือนเพิ่มขึ้น แสดงว่าพอลิเอทิลีนที่มีการใช้ซีลี้อยจากไม้เต็งและไม้สักเป็นสารตัวเติมมีพฤติกรรมแบบซูดอพลาสติก (Pseudoplastic) นอกจากนี้ยังพบว่า ความหนืดของพอลิเอทิลีนที่มีและไม่มีซีลี้อยเป็นองค์ประกอบมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แสดงให้เห็นว่าการมีซีลี้อยในพอลิเอทิลีนไม่ทำให้พฤติกรรมการไหลของวัสดุเปลี่ยนแปลงไปจากพอลิเอทิลีนที่ไม่มีซีลี้อยเป็นสารตัวเติม

4.4 สมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

สมบัติทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่โดยมีซีลี้อย จากไม้เต็งและไม้สักเป็นสารตัวเติม ได้ทำการศึกษาจากตัวอย่างต่าง ๆ คือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่ไม่ผ่านการกดอัด พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่ผ่านการกดอัด พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่โดยมีซีลี้อยไม้เต็งปริมาณ 30% และขนาด 35-99 เมช เป็นสารตัวเติม และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่โดยมีซีลี้อยไม้สักปริมาณ 30% และขนาด 35-99 เมช เป็นสารตัวเติม

โครงสร้างทางเคมีของหน่วยซ้ำในพอลิเมอร์ส่งผลอย่างมากต่อค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ (T_m) เช่น ความสมมาตรของโมเลกุล (Molecular symmetry) สภาพแข็งแกร่งของโครงสร้าง (Structural rigidity) อันเนื่องมาจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสายโซ่ เช่น พันธะไฮโดรเจน [มาลินี, 2540]

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่โดยมีซีลี้อยจากไม้เต็งและไม้สักเป็นสารตัวเติม

ชนิดของวัสดุ	อุณหภูมิการหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)
(ก) HDPE ที่ไม่ผ่านการกดอัด	130.6
(ข) HDPE ที่ผ่านกดอัด	132.6
(ค) HDPE ที่มีซีลี้อยไม้เต็งปริมาณ 30% และขนาด 35-99 เมช	133.3
(ง) HDPE ที่มีซีลี้อยไม้สักปริมาณ 30% และขนาด 35-99 เมช	131.1

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน (ตารางที่ 4.1) ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ไม่ผ่านการกดอัด พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่ผ่านการกดอัดแล้ว พอลิเอทิลีนที่นำกลับมาใช้ใหม่โดยมีซีลี้อยไม้สักและไม้เต็งปริมาณ 30% และขนาด 35-99 เมช พบว่าอุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก นั่นคือ พอลิเอทิลีนที่นำกลับมาใช้ใหม่โดยมีซีลี้อยทั้งจากไม้เต็งและไม้สักเป็นสารตัวเติมไม่มีผลต่ออุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m)

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่โดยมี
ซีลี้อย่างไม้เต็งและไม้สักเป็นสารตัวเติม

ชนิดของวัสดุ	อุณหภูมิการเกิดผลึก ($^{\circ}\text{C}$)
(ก) HDPE ที่ไม่ผ่านการกดอัด	120.9
(ข) HDPE ที่ผ่านการกดอัด	120.8
(ค) HDPE ที่มีซีลี้อย่างไม้เต็งปริมาณ 30% และขนาด 35-99 เมช	120.9
(ง) HDPE ที่มีซีลี้อย่างไม้สักปริมาณ 30% และขนาด 35-99 เมช	120.9

จากการศึกษาอุณหภูมิการเกิดผลึก พอลิเอทิลีนที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่ผ่านการกดอัด และพอลิเอทิลีนที่มีซีลี้อย่างไม้เต็งเป็นสารตัวเติมไม่มีผลต่ออุณหภูมิการเกิดผลึก นั่นคือ อุณหภูมิการเกิดผลึกไม่เปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับในกรณีของอุณหภูมิการหลอมเหลว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 สัณฐานวิทยา (Morphology)

จากการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของซีลี้อยในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ ด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ที่กำลังขยาย 30 เท่า โดยใช้พอลิเอทิลีนที่ผสมซีลี้อยจากไม้เต็งและไม้สักที่ขนาด 35-99 เมช และ 100 เมชขึ้นไป ให้ปริมาณซีลี้อย 10% และ 30% ได้ผลดังรูปที่ 4.18

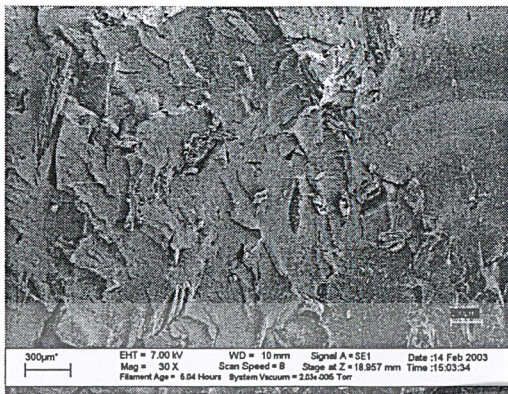
เมื่อพิจารณาถึงผลของปริมาณซีลี้อยในรูปที่ 4.18 (ก) ซึ่งเป็นซีลี้อยจากไม้เต็งในปริมาณ 10% และรูปที่ 4.18 (ค) ซึ่งเป็นซีลี้อยจากไม้เต็งในปริมาณ 30% พบว่า ในรูปที่ 4.18 (ก) จะเห็นซีลี้อยกระจายตัวอยู่ในภูมิภาคของพอลิเอทิลีนในปริมาณที่น้อยกว่ารูปที่ 4.18 (ค) เช่นเดียวกับในรูปที่ 4.18 (ข) และ 4.18 (ง) ซึ่งมีซีลี้อยจากไม้สักอยู่ในปริมาณ 10% และ 30% ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาผลของขนาดซีลี้อยในรูปที่ 4.18 (ก) ซึ่งเป็นพอลิเอทิลีนที่ผสมซีลี้อยจากไม้เต็งปริมาณ 10% ขนาด 35-99 เมช กับรูปที่ 4.18 (จ) ซึ่งเป็นพอลิเอทิลีนที่ผสมซีลี้อยจากไม้เต็งปริมาณ 10% ขนาด 100 เมชขึ้นไป พบว่า ซีลี้อยขนาด 35-99 เมช มีการกระจายตัวอยู่ในภูมิภาคของพอลิเอทิลีนยังไม่ดีนัก ยังมีซีลี้อยบางส่วนที่มีการเกาะกลุ่มกันอยู่ (Agglomeration) สำหรับซีลี้อยขนาด 100 เมชขึ้นไป พบว่ามีการกระจายตัวของซีลี้อยในภูมิภาคพอลิเอทิลีนที่ดีและมีขนาดใกล้เคียงกันมากกว่าซีลี้อยขนาด 35-99 เมช

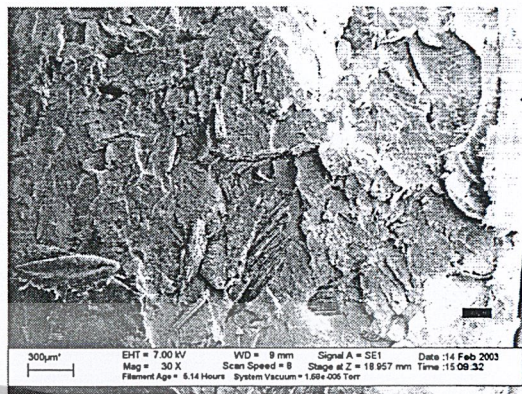
เมื่อเปรียบเทียบผลของชนิดซีลี้อยจากรูปที่ 4.18 (จ) ซึ่งมีซีลี้อยจากไม้เต็ง และรูปที่ 4.18 (ฉ) ซึ่งมีซีลี้อยจากไม้สัก พบว่า ซีลี้อยทั้งสองชนิดมีการกระจายตัวที่ไม่แตกต่างกัน

สำหรับในรูปที่ 4.19 เป็นภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 100 เท่า ของพอลิเอทิลีนที่ผสมซีลี้อยจากไม้เต็งขนาด 35-99 เมช ปริมาณ 10% พบว่าสามารถเห็นช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างภูมิภาคของพอลิเอทิลีนกับซีลี้อย ซึ่งช่องว่างเหล่านี้เปรียบเสมือนเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน ทำให้การรับและกระจายแรงระหว่างพอลิเอทิลีนกับซีลี้อยเกิดขึ้นได้ไม่ดีนัก และเมื่อปริมาณซีลี้อยมากขึ้น โอกาสที่จะเกิดจุดบกพร่องในชิ้นงานจึงมากขึ้น ส่งผลให้เมื่อมีปริมาณซีลี้อยในพอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้น ทำให้สมบัติเชิงกลต่างๆ ลดลงกว่าพอลิเอทิลีนที่ไม่มีการผสมซีลี้อย อย่างไรก็ตาม การมีซีลี้อยในปริมาณน้อยเป็นสารตัวเติมในพอลิเอทิลีนสามารถทำให้สมบัติเชิงกลบางอย่างดีขึ้นได้ คือ ค่ามอดุลัส มอดุลัสโค้งงอ มีค่ามากกว่าพอลิเอทิลีนที่ไม่มีการใช้ซีลี้อยเป็นสารตัวเติม

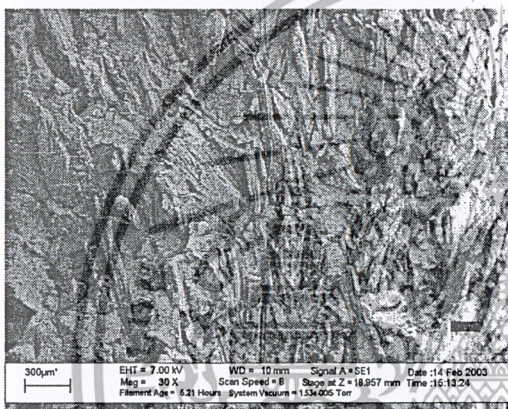
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



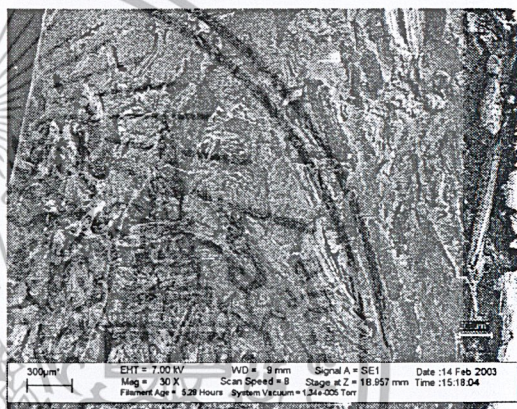
(ก)



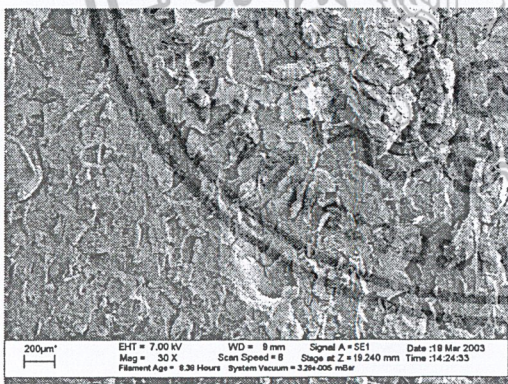
(ข)



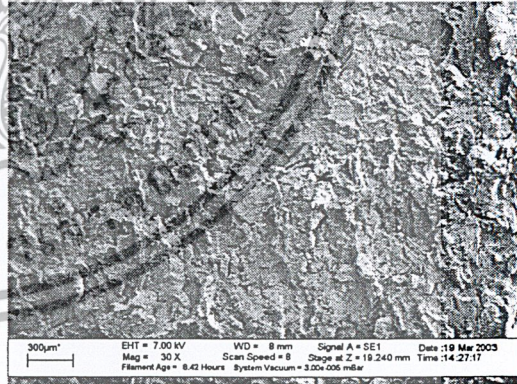
(ค)



(ง)



(จ)

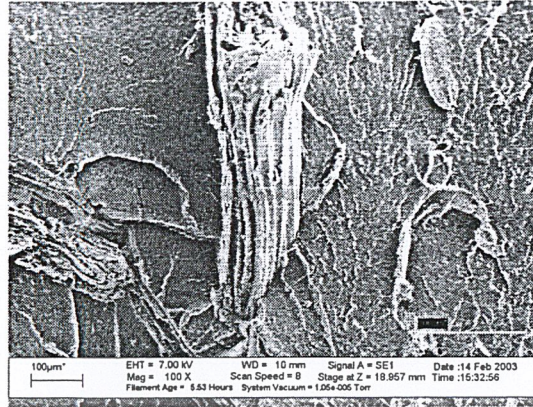


(ฉ)

รูปที่ 4.18 การกระจายตัวของซีเลื่อยในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่

- (ก) ซีเลื่อยไม้เต็ง 35-99 เมช 10 %
- (ข) ซีเลื่อยไม้สัก 35-99 เมช 10 %
- (ค) ซีเลื่อยไม้เต็ง 35-99 เมช 30 %
- (ง) ซีเลื่อยไม้สัก 35-99 เมช 30 %
- (จ) ซีเลื่อยไม้เต็ง 100 เมชขึ้นไป 10 %
- (ฉ) ซีเลื่อยไม้สัก 100 เมชขึ้นไป 10 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 การยึดเกาะระหว่างวัฏภาคของพอลิเอทิลีนกับซีลีย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

โครงการพิเศษนี้เป็นการนำขวดพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกลับมาใช้ใหม่ โดยการใช้ซีลี้อยเป็นสารตัวเติม โดยซีลี้อยที่ใช้มีสองชนิด คือ ซีลี้อยจากไม้เนื้อแข็งชนิดไม้เต็ง และซีลี้อยจากไม้เนื้อแข็งปานกลางชนิดไม้สัก ทำการศึกษาถึงผลของปริมาณต่าง ๆ ดังนี้ 10% 20% 30% 40% และขนาดของซีลี้อยที่ 12 เมช 35 เมช และ 100 เมช โดยทำการผสมสูตรด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) จากนั้นทำเป็นชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติต่าง ๆ ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression) แล้วทำการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุที่เตรียมซึ่งได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติการไหล สมบัติทางความร้อนและสัณฐานวิทยา

จากการทดสอบสมบัติต่าง ๆ สามารถสรุปได้ว่า

- พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่โดยใช้ซีลี้อยทั้งจากไม้เต็งและไม้สักเป็นสารตัวเติม พบว่าซีลี้อยเข้าไปแทรกตัวอยู่ในวัฏภาคของพอลิเมอร์ ทำให้มอดุลัส มอดุลัสโค้งงอ และความแข็งแรงกระแทกมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ความเค้นดึงสูงสุดและร้อยละการดึงยืด ณ จุดได้รับแรงสูงสุดมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ค่าความแข็งแรงโค้งงอและความแข็งกมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง
- พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่โดยมีซีลี้อยเป็นสารตัวเติม ทำให้ร้อยละการดูดซับน้ำของวัสดุเพิ่มขึ้นเมื่อเติมซีลี้อยในปริมาณมากขึ้น แต่เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดและชนิดของซีลี้อยพบว่ามอดุลัสการดูดซับน้ำเล็กน้อย
- พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่เติมซีลี้อยชนิดไม้เต็ง ปริมาณ 10% และขนาด 100 เมช ให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุดและสมบัติการดูดซับน้ำสามารถนำไปใช้งานได้
- พอลิเอทิลีนที่มีการเติมซีลี้อยจากไม้เต็งและไม้สักมีสมบัติการไหลแบบซูโดพลาสติก (Pseudoplastic) โดยปริมาณ และชนิดของซีลี้อยไม่มีผลต่อสมบัติการไหลมากนัก
- คุณหมุมิการหลอมเหลวและคุณหมุมิการเกิดผลึกของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่มีซีลี้อยจากไม้เต็งและไม้สักเป็นสารตัวเติมมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนที่ไม่มีเติมซีลี้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จากหลักฐานวิทยาศาสตร์พบว่าเมื่อเติมซีลี้อยในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พบว่าซีลี้อยสามารถแทรกตัวในวัฏภาคของพอลิเอทิลีนได้ แต่การกระจายตัวและการยึดเกาะระหว่างวัฏภาคไม่ดีนัก
- ชนิดของไม้ทั้งไม้เต็งซึ่งเป็นไม้เนื้อแข็งและไม้สักซึ่งเป็นไม้เนื้อแข็งปานกลาง มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ใกล้เคียงกัน และไม้ทั้งสองชนิดไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกล (ยกเว้นค่ามอดุลัสโค้งงอ) ร้อยละการดูดซับน้ำ สมบัติการไหล สมบัติทางความร้อนหรือหลักฐานวิทยาศาสตร์
- ปริมาณของซีลี้อยมีผลต่อสมบัติต่าง ๆ มากกว่าขนาดและชนิดของซีลี้อย

5.2 ข้อเสนอแนะ

- เนื่องจากการใช้งานจริงของวัสดุที่ได้ อาจต้องนำไปใช้งานในที่ที่มีความชื้นสูงหรือต้องใช้งานในการสัมผัสกับน้ำบ่อย ๆ จึงควรศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุหลังจากผ่านการดูดซับน้ำโดยศึกษาว่าเมื่อวัสดุดูดซับน้ำแล้วจะทำให้สมบัติเชิงกลต่าง ๆ เปลี่ยนแปลงไปมากน้อยเพียงใด
- ศึกษาสมบัติอื่น ๆ ของวัสดุ เช่น ความทนทานต่อดินฟ้าอากาศ อายุการใช้งาน
- ควรเลือกใช้สารช่วยผสม (Coupling agent) เพื่อให้การยึดติดระหว่างพื้นผิวของซีลี้อยกับพอลิเมอร์ดีขึ้น และทำให้ซีลี้อยเกิดการกระจายตัวได้ดี
- ควรทำการศึกษาความเร็วรอบของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวทวนคู่ (Twin-screw extruder) ที่เหมาะสม เช่นการลดความเร็วรอบอาจทำให้การผสมดีขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- ชัยวัฒน์ ศิริวงศ์วานิชย์. 2542. เคมีพอลิเมอร์พื้นฐาน. พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยมหิดล.
- มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์. 2543. เคมีพอลิเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ทัศนีย์ วัตติวานิช และคณะ. 2530. องค์ประกอบทางเคมีของไม้บางชนิดในประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่1. กองวิจัยผลิตผลป่าไม้ กรมป่าไม้.
- สุชาติ ไทยเพชร. 2541. ไม้:วัสดุจากธรรมชาติ. พิมพ์ครั้งที่2. ส่วนวิจัยและพัฒนาผลิตผลป่าไม้ สำนักวิชาการป่าไม้ กรมป่าไม้.
- อิทธิพล แจ่มชัด. 2544-1. เอกสารประกอบการสอนวิชาการวัดพอลิเมอร์. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- อิทธิพล แจ่มชัด. 2544-2. เอกสารประกอบการสอนวิชาฟิสิกส์พอลิเมอร์. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- อิทธิพล แจ่มชัด. 2545. เอกสารประกอบการสอนวิชาพอลิเมอร์คอมโพสิต. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ASTM D 1238. 1992. Standard Test Methods for Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 256. 1992. Standard Test Methods for Impact Resistance of Plastics and Electrical Insulating Materials. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 3418. 1992. Standard Test Methods for Transition Temperatures of Polymers By Thermal Analysis. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 570. 1992. Standard Test Methods for Water Absorption of Plastics. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 638M. 1992. Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastic (Matric). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ASTM D 785. 1992. **Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Plastics and Electrical Insulating Materials**. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 790M . 1992. **Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials[matrix]**. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- Angle, M. N., Reguant, J., Montane, D., Ferrando, F., Farriol, X. and Salvado, J. 1999. Binderless Composites from Pretreated Residual Softwood. *J.of Apply.Polym.Sci.* 73: 2485-2491.
- Astrom, B. T. 1997. **Manufacturing of Polymer Composites**. 1st ed. : Chapman&Hall 37.
- Bledzki, A. K. and Gassan, J. 1999. Composites Reinforced with Cellulose Based Fibers. *Prog. in Polym. Sci.* 24: 225-243.
- Brydson, J. A. 1995. **Plastic Materials**. 6th ed. Butterworth: Butterworth Heinemann.
- Coutinho, F. M. B., Costa, T. H. S., Suarez, J. C. M. and Melo, D. P. 2000. Sawdust Reinforced Polypropylene Composites : A Study of Fracture Behavior. *Polymer Testing*. 19: 625-633.
- Cowie, J. W. G. 1991. **Polymer:Chemistry and Physics of Modern Material**. London: Blackie Academic and Professional.
- Hull and Clyne, T. W. 1996, **An Introduction to Composite**. 2nded. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hunt, B. J. and James, M. I. 1993. **Polymer Characterization**. 1sted. London: Blackie Academic and Professional.
- Kokta, B. V. and Maldas, D. 1994. Composite Molded Products Based on Recycled Thermoplastic and Waste Cellulosic. I. Peat Moss-Recycled PE Composites. *Polym.-Plast. Technol. Eng.* 33(6): 677-690.
- Kroschwitz J. I. 1990. **Encyclopedia of Polymer Science and Engineering**. Vol 6. 2nded. NewYork: JohnWiley & Sons.
- Li, T. Q., Ng, C. N. and Li, R. K. Y. 2001. Impact Behavior of Sawdust/Recycled-PP Composites. *J. of Apply. Polym. Sci.* 81: 1420-1428.

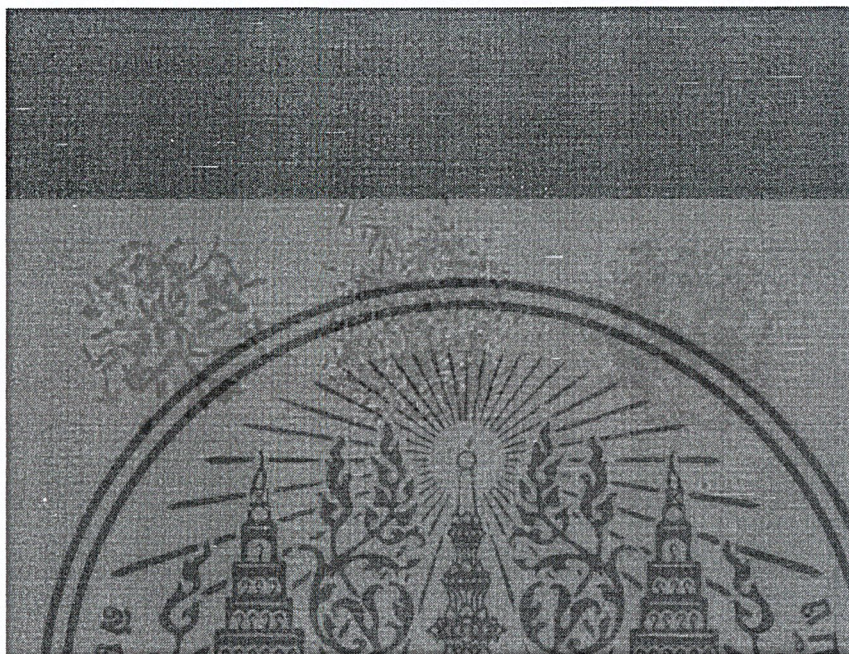
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Mukhopadhyay, S. K. 1993. **High-Performance Fibres**. 1sted. Manchester: The Textile Institute.
- Myers, G. E., Chahyadi, I. S., Gonzales, C. and Coberly, C. A. 1993. Wood Flour and Polypropylene or High-density Polyethylene Composites : Influence of Maleated Polypropylene Concentration and Extrusion Temperature on Properties. **Wood Fiber/Polymer Composites**. West Virginia: the Forest Products Society.
- Patil, Y. P., Gajre, B. J., Dusane, D. J., Chavan, S. and Misha, S. 2000. Effect of MaleicAnhydride Treatment on Steam and Water Absorption of Wood Polymer Composites Prepared from Wheat Straw, Cane Bagasse, and Teak Wood Sawdust Using Novolac as Matrex. *J. of Apply. Polym. Sci.* 77: 2963-2967.
- Selke, S. E. and Childress, J. 1993. Wood Fiber/High-density Polyethylene Composites : Ability of Additives to Enhance Mechanical Properties. **Wood Fiber/Polymer Composites**. West Virginia: the Forest Products Society.
- Wunderlich, B. 1973. **Crystal of Linear Macromolecules**. Washington D.C.: Rensselaer Plytechnic Institute, American Chemical Society.
- Yam, K. L., Gogoi, B. K., Lai C. C. and Selke S. E. 1990. Composites from Compounding Wood Fibers with Recycled HDPE. *Polym. Eng. Sci.* 30(11): 693-700.
- [http:// www.ciwmb.ca.gov/plastic/recycled/lumber/](http://www.ciwmb.ca.gov/plastic/recycled/lumber/)
- [http:// www.tspm.com.tw/wood.html](http://www.tspm.com.tw/wood.html)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.
ขนาดของซีลี้อย



(ก)

(ข)

(ค)

- (ก) ซีลี้อยที่ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 12 เมช ขนาดรูตะแกรงร้อนเฉลี่ย 1.7 มิลลิเมตร
 (ข) ซีลี้อยที่ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 35 เมช ขนาดรูตะแกรงร้อนเฉลี่ย 0.5 มิลลิเมตร
 (ค) ซีลี้อยที่ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช ขนาดรูตะแกรงร้อนเฉลี่ย 0.15 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.
สมบัติเชิงกล

สูตรที่	ส่วนผสม	ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield, MPa)
1	HDPE	18.58±0.54
2	HDPE+10% 12-34 mesh ไม้เต็ง	15.13±1.01
3	HDPE+10% 35-99 mesh ไม้เต็ง	14.94±1.17
4	HDPE+10% >100 mesh ไม้เต็ง	16.77±0.9
5	HDPE+20% 12-34 mesh ไม้เต็ง	13.56±0.43
6	HDPE+20% 35-99 mesh ไม้เต็ง	13.61±0.73
7	HDPE+20% >100 mesh ไม้เต็ง	14.54±1.14
8	HDPE+30% 12-34 mesh ไม้เต็ง	10.81±0.92
9	HDPE+30% 35-99 mesh ไม้เต็ง	10.47±0.57
10	HDPE+30% >100 mesh ไม้เต็ง	12.75±0.49
11	HDPE+40% 12-34 mesh ไม้เต็ง	9.51±0.76
12	HDPE+40% 35-99 mesh ไม้เต็ง	9.68±0.68
13	HDPE+40% >100 mesh ไม้เต็ง	11.36±2.31
14	HDPE+10% 12-34 mesh ไม้สัก	16.01±0.71
15	HDPE+10% 35-99 mesh ไม้สัก	17.24±0.58
16	HDPE+10% >100 mesh ไม้สัก	17.40±0.81
17	HDPE+20% 12-34 mesh ไม้สัก	12.90±0.29
18	HDPE+20% 35-99 mesh ไม้สัก	13.49±0.30
19	HDPE+20% >100 mesh ไม้สัก	13.88±1.24
20	HDPE+30% 12-34 mesh ไม้สัก	11.07±0.90
21	HDPE+30% 35-99 mesh ไม้สัก	13.37±1.02
22	HDPE+30% >100 mesh ไม้สัก	10.95±0.53
23	HDPE+40% 12-34 mesh ไม้สัก	7.50±0.83
24	HDPE+40% 35-99 mesh ไม้สัก	8.95±0.53
25	HDPE+40% >100 mesh ไม้สัก	9.04±0.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตรที่	ส่วนผสม	มอดุลัส (Young's modulus, MPa)
1	HDPE	95.89±8.23
2	HDPE+10% 12-34 mesh ไม้เต็ง	95.08±8.23
3	HDPE+10% 35-99 mesh ไม้เต็ง	121.88±14.77
4	HDPE+10% >100 mesh ไม้เต็ง	130.16±18.71
5	HDPE+20% 12-34 mesh ไม้เต็ง	96.23±8.23
6	HDPE+20% 35-99 mesh ไม้เต็ง	111.12±16.26
7	HDPE+20% >100 mesh ไม้เต็ง	127.40±19.65
8	HDPE+30% 12-34 mesh ไม้เต็ง	97.89±8.23
9	HDPE+30% 35-99 mesh ไม้เต็ง	100.24±20.38
10	HDPE+30% >100 mesh ไม้เต็ง	126.31±18.03
11	HDPE+40% 12-34 mesh ไม้เต็ง	87.46±8.23
12	HDPE+40% 35-99 mesh ไม้เต็ง	109.23±17.38
13	HDPE+40% >100 mesh ไม้เต็ง	135.24±20.34
14	HDPE+10% 12-34 mesh ไม้สัก	154.05±13.83
15	HDPE+10% 35-99 mesh ไม้สัก	125.82±19.05
16	HDPE+10% >100 mesh ไม้สัก	129.28±15.10
17	HDPE+20% 12-34 mesh ไม้สัก	134.91±17.40
18	HDPE+20% 35-99 mesh ไม้สัก	113.69±11.48
19	HDPE+20% >100 mesh ไม้สัก	112.69±14.93
20	HDPE+30% 12-34 mesh ไม้สัก	132.42±11.33
21	HDPE+30% 35-99 mesh ไม้สัก	112.51±8.08
22	HDPE+30% >100 mesh ไม้สัก	118.85±20.60
23	HDPE+40% 12-34 mesh ไม้สัก	116.11±19.62
24	HDPE+40% 35-99 mesh ไม้สัก	110.89±8.67
25	HDPE+40% >100 mesh ไม้สัก	112.11±8.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตรที่	ส่วนผสม	ร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก (%Elongation at yield)
1	HDPE	26.57±2.19
2	HDPE+10% 12-34 mesh ไม่เต็ง	26.62±4.14
3	HDPE+10% 35-99 mesh ไม่เต็ง	19.22±2.11
4	HDPE+10% >100 mesh ไม่เต็ง	19.56±1.67
5	HDPE+20% 12-34 mesh ไม่เต็ง	18.36±2.56
6	HDPE+20% 35-99 mesh ไม่เต็ง	16.33±2.08
7	HDPE+20% >100 mesh ไม่เต็ง	15.64±2.04
8	HDPE+30% 12-34 mesh ไม่เต็ง	15.56±2.30
9	HDPE+30% 35-99 mesh ไม่เต็ง	13.96±1.34
10	HDPE+30% >100 mesh ไม่เต็ง	12.37±1.69
11	HDPE+40% 12-34 mesh ไม่เต็ง	11.69±1.95
12	HDPE+40% 35-99 mesh ไม่เต็ง	12.90±2.04
13	HDPE+40% >100 mesh ไม่เต็ง	8.47±1.39
14	HDPE+10% 12-34 mesh ไม่ลึ้ก	16.73±1.79
15	HDPE+10% 35-99 mesh ไม่ลึ้ก	19.80±1.67
16	HDPE+10% >100 mesh ไม่ลึ้ก	22.38±1.43
17	HDPE+20% 12-34 mesh ไม่ลึ้ก	14.14±1.25
18	HDPE+20% 35-99 mesh ไม่ลึ้ก	18.35±2.33
19	HDPE+20% >100 mesh ไม่ลึ้ก	19.10±2.56
20	HDPE+30% 12-34 mesh ไม่ลึ้ก	12.79±1.96
21	HDPE+30% 35-99 mesh ไม่ลึ้ก	16.83±0.27
22	HDPE+30% >100 mesh ไม่ลึ้ก	18.83±2.16
23	HDPE+40% 12-34 mesh ไม่ลึ้ก	8.93±0.78
24	HDPE+40% 35-99 mesh ไม่ลึ้ก	11.48±2.27
25	HDPE+40% >100 mesh ไม่ลึ้ก	12.47±1.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตรที่	ส่วนผสม	ความแข็งแรงดัดงอ (Flexural strength, MPa)
1	HDPE	30.39±1.43
2	HDPE+10% 12-34 mesh ไม้เต็ง	29.00±2.80
3	HDPE+10% 35-99 mesh ไม้เต็ง	27.81±3.76
4	HDPE+10% >100 mesh ไม้เต็ง	36.67±1.97
5	HDPE+20% 12-34 mesh ไม้เต็ง	25.22±2.24
6	HDPE+20% 35-99 mesh ไม้เต็ง	26.73±1.87
7	HDPE+20% >100 mesh ไม้เต็ง	36.88±2.56
8	HDPE+30% 12-34 mesh ไม้เต็ง	19.95±1.08
9	HDPE+30% 35-99 mesh ไม้เต็ง	25.80±1.74
10	HDPE+30% >100 mesh ไม้เต็ง	37.05±1.08
11	HDPE+40% 12-34 mesh ไม้เต็ง	19.15±1.76
12	HDPE+40% 35-99 mesh ไม้เต็ง	20.42±2.25
13	HDPE+40% >100 mesh ไม้เต็ง	32.88±1.96
14	HDPE+10% 12-34 mesh ไม้สัก	36.86±2.27
15	HDPE+10% 35-99 mesh ไม้สัก	32.29±0.78
16	HDPE+10% >100 mesh ไม้สัก	38.31±1.51
17	HDPE+20% 12-34 mesh ไม้สัก	31.23±2.91
18	HDPE+20% 35-99 mesh ไม้สัก	29.81±0.80
19	HDPE+20% >100 mesh ไม้สัก	31.41±2.30
20	HDPE+30% 12-34 mesh ไม้สัก	27.16±1.93
21	HDPE+30% 35-99 mesh ไม้สัก	31.89±1.29
22	HDPE+30% >100 mesh ไม้สัก	30.06±1.61
23	HDPE+40% 12-34 mesh ไม้สัก	21.98±1.89
24	HDPE+40% 35-99 mesh ไม้สัก	24.63±2.69
25	HDPE+40% >100 mesh ไม้สัก	25.77±1.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตรที่	ส่วนผสม	มอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus, MPa)
1	HDPE	389.43±32.53
2	HDPE+10% 12-34 mesh ไม้เต็ง	363.90±40.92
3	HDPE+10% 35-99 mesh ไม้เต็ง	350.41±64.13
4	HDPE+10% >100 mesh ไม้เต็ง	440.06±31.97
5	HDPE+20% 12-34 mesh ไม้เต็ง	395.94±45.11
6	HDPE+20% 35-99 mesh ไม้เต็ง	389.95±45.01
7	HDPE+20% >100 mesh ไม้เต็ง	456.76±65.40
8	HDPE+30% 12-34 mesh ไม้เต็ง	348.37±23.31
9	HDPE+30% 35-99 mesh ไม้เต็ง	460.32±30.63
10	HDPE+30% >100 mesh ไม้เต็ง	648.81±73.29
11	HDPE+40% 12-34 mesh ไม้เต็ง	487.72±75.43
12	HDPE+40% 35-99 mesh ไม้เต็ง	544.75±75.12
13	HDPE+40% >100 mesh ไม้เต็ง	938.47±80.01
14	HDPE+10% 12-34 mesh ไม้สัก	459.09±21.74
15	HDPE+10% 35-99 mesh ไม้สัก	365.92±19.52
16	HDPE+10% >100 mesh ไม้สัก	456.72±30.66
17	HDPE+20% 12-34 mesh ไม้สัก	392.10±42.01
18	HDPE+20% 35-99 mesh ไม้สัก	356.52±25.37
19	HDPE+20% >100 mesh ไม้สัก	396.41±42.45
20	HDPE+30% 12-34 mesh ไม้สัก	383.96±29.61
21	HDPE+30% 35-99 mesh ไม้สัก	408.33±23.13
22	HDPE+30% >100 mesh ไม้สัก	372.57±31.05
23	HDPE+40% 12-34 mesh ไม้สัก	339.23±27.36
24	HDPE+40% 35-99 mesh ไม้สัก	378.88±41.87
25	HDPE+40% >100 mesh ไม้สัก	358.00±22.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตรที่	ส่วนผสม	ความแข็งกด (Hardness)
1	HDPE	62.50±0.19
2	HDPE+10% 12-34 mesh ไม้เต็ง	62.65±0.56
3	HDPE+10% 35-99 mesh ไม้เต็ง	60.40±0.23
4	HDPE+10% >100 mesh ไม้เต็ง	62.55±0.34
5	HDPE+20% 12-34 mesh ไม้เต็ง	63.65±0.39
6	HDPE+20% 35-99 mesh ไม้เต็ง	60.95±0.43
7	HDPE+20% >100 mesh ไม้เต็ง	61.30±0.25
8	HDPE+30% 12-34 mesh ไม้เต็ง	62.65±0.27
9	HDPE+30% 35-99 mesh ไม้เต็ง	62.30±0.08
10	HDPE+30% >100 mesh ไม้เต็ง	62.40±0.30
11	HDPE+40% 12-34 mesh ไม้เต็ง	64.35±0.26
12	HDPE+40% 35-99 mesh ไม้เต็ง	62.15±0.12
13	HDPE+40% >100 mesh ไม้เต็ง	63.40±0.23
14	HDPE+10% 12-34 mesh ไม้สัก	61.15±0.11
15	HDPE+10% 35-99 mesh ไม้สัก	61.24±0.17
16	HDPE+10% >100 mesh ไม้สัก	60.72±0.25
17	HDPE+20% 12-34 mesh ไม้สัก	59.25±0.24
18	HDPE+20% 35-99 mesh ไม้สัก	61.77±0.15
19	HDPE+20% >100 mesh ไม้สัก	59.97±0.24
20	HDPE+30% 12-34 mesh ไม้สัก	60.12±0.32
21	HDPE+30% 35-99 mesh ไม้สัก	62.15±0.26
22	HDPE+30% >100 mesh ไม้สัก	60.45±0.29
23	HDPE+40% 12-34 mesh ไม้สัก	60.30±0.26
24	HDPE+40% 35-99 mesh ไม้สัก	62.11±0.28
25	HDPE+40% >100 mesh ไม้สัก	61.78±0.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตรที่	ส่วนผสม	ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength, kJ/m ²)
1	HDPE	8.49±0.65
2	HDPE+10% 12-34 mesh ไม้เต็ง	9.99±0.79
3	HDPE+10% 35-99 mesh ไม้เต็ง	8.60±0.88
4	HDPE+10% >100 mesh ไม้เต็ง	6.67±0.33
5	HDPE+20% 12-34 mesh ไม้เต็ง	8.77±0.85
6	HDPE+20% 35-99 mesh ไม้เต็ง	7.36±0.43
7	HDPE+20% >100 mesh ไม้เต็ง	5.52±0.76
8	HDPE+30% 12-34 mesh ไม้เต็ง	7.14±0.94
9	HDPE+30% 35-99 mesh ไม้เต็ง	5.82±0.36
10	HDPE+30% >100 mesh ไม้เต็ง	4.48±0.29
11	HDPE+40% 12-34 mesh ไม้เต็ง	6.28±0.49
12	HDPE+40% 35-99 mesh ไม้เต็ง	5.29±0.52
13	HDPE+40% >100 mesh ไม้เต็ง	4.06±0.45
14	HDPE+10% 12-34 mesh ไม้สัก	9.11±1.00
15	HDPE+10% 35-99 mesh ไม้สัก	8.81±0.67
16	HDPE+10% >100 mesh ไม้สัก	6.33±0.26
17	HDPE+20% 12-34 mesh ไม้สัก	7.53±1.17
18	HDPE+20% 35-99 mesh ไม้สัก	7.31±0.22
19	HDPE+20% >100 mesh ไม้สัก	5.90±0.46
20	HDPE+30% 12-34 mesh ไม้สัก	6.81±1.07
21	HDPE+30% 35-99 mesh ไม้สัก	7.16±0.45
22	HDPE+30% >100 mesh ไม้สัก	5.40±0.58
23	HDPE+40% 12-34 mesh ไม้สัก	5.54±0.32
24	HDPE+40% 35-99 mesh ไม้สัก	5.13±0.20
25	HDPE+40% >100 mesh ไม้สัก	5.03±0.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.
ค่าร้อยละการดูดซับน้ำ

สูตร ชนิด ปริมาณ ขนาดขี้เสี้ยน	ระยะเวลา (วัน)						
	1	7	14	21	28	35	42
HDPE	0.09	0.09	0.09	0.10	0.11	0.11	0.11
ไม้เต็ง 10% 12-34 เมช	0.25	0.33	0.48	0.57	0.59	0.67	0.67
ไม้เต็ง 20% 12-34 เมช	0.54	1.08	1.43	1.48	1.55	1.75	1.75
ไม้เต็ง 30% 12-34 เมช	1.28	2.14	3.39	3.64	4.57	4.49	4.50
ไม้เต็ง 40% 12-34 เมช	1.72	3.52	4.66	5.17	7.32	7.89	6.94
ไม้เต็ง 10% 35-99 เมช	0.11	0.23	0.37	0.39	0.44	0.52	0.52
ไม้เต็ง 20% 35-99 เมช	0.36	0.70	0.94	1.07	1.17	1.44	1.44
ไม้เต็ง 30% 35-99 เมช	0.77	1.82	2.23	2.49	2.64	3.01	3.13
ไม้เต็ง 40% 35-99 เมช	1.13	2.65	3.38	3.88	4.09	4.37	4.88
ไม้เต็ง 10% มากกว่า100 เมช	0.11	0.16	0.29	0.34	0.38	0.41	0.41
ไม้เต็ง 20% มากกว่า100 เมช	0.27	0.50	0.76	0.86	1.02	1.20	1.20
ไม้เต็ง 30% มากกว่า100 เมช	0.32	0.75	0.99	1.15	1.42	1.581	1.75
ไม้เต็ง 40% มากกว่า100 เมช	0.59	1.22	1.80	2.25	2.52	2.77	3.12
ไม้สัก 10% 12-34 เมช	0.21	0.40	0.56	0.62	0.69	0.77	0.77
ไม้สัก 20% 12-34 เมช	0.51	1.01	1.37	1.53	1.62	2.05	2.05
ไม้สัก 30% 12-34 เมช	1.20	2.64	3.54	4.17	4.46	5.12	5.41
ไม้สัก 40% 12-34 เมช	1.96	3.87	5.38	6.54	7.18	7.87	8.04
ไม้สัก 10% 35-99 เมช	0.14	0.37	0.46	0.53	0.56	0.67	0.67
ไม้สัก 20% 35-99 เมช	0.31	0.64	0.92	1.12	1.21	1.48	1.48
ไม้สัก 30% 35-99 เมช	0.32	0.60	0.91	1.06	1.16	1.43	1.48
ไม้สัก 40% 35-99 เมช	1.45	3.22	4.58	5.68	6.30	7.02	7.52
ไม้สัก 10% มากกว่า100 เมช	0.07	0.13	0.23	0.28	0.29	0.33	0.33
ไม้สัก 20% มากกว่า100 เมช	0.26	0.50	0.97	0.99	1.08	1.24	1.24
ไม้สัก 30% มากกว่า100 เมช	0.60	1.53	1.93	2.36	2.65	2.98	3.21
ไม้สัก 40% 100 เมช	1.12	2.75	4.02	5.18	6.00	6.65	7.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.
สมบัติการไหล

อัตราความเครียด เฉือน (Shear rate) (s^{-1})	ความหนืดเฉือน (Shear viscosity; Pa.s)				
	HDPE	HDPE +ไม้สัก 35-99 เมช 10%	HDPE+ไม้เต็ง 35-99 เมช 10%	HDPE+ไม้สัก 35-99 เมช 30%	HDPE+ไม้เต็ง 35-99 เมช 30%
	19.91	2703.60	2663.48	2522.88	2194.00
56.25	1456.81	1428.90	1352.17	1302.37	1023.65
153.45	733.74	662.73	594.31	569.70	496.20
424.80	217.07	211.72	214.32	219.37	231.29
1256.06	105.96	106.67	109.81	116.62	126.17
3549.49	48.95	54.39	56.67	62.96	73.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

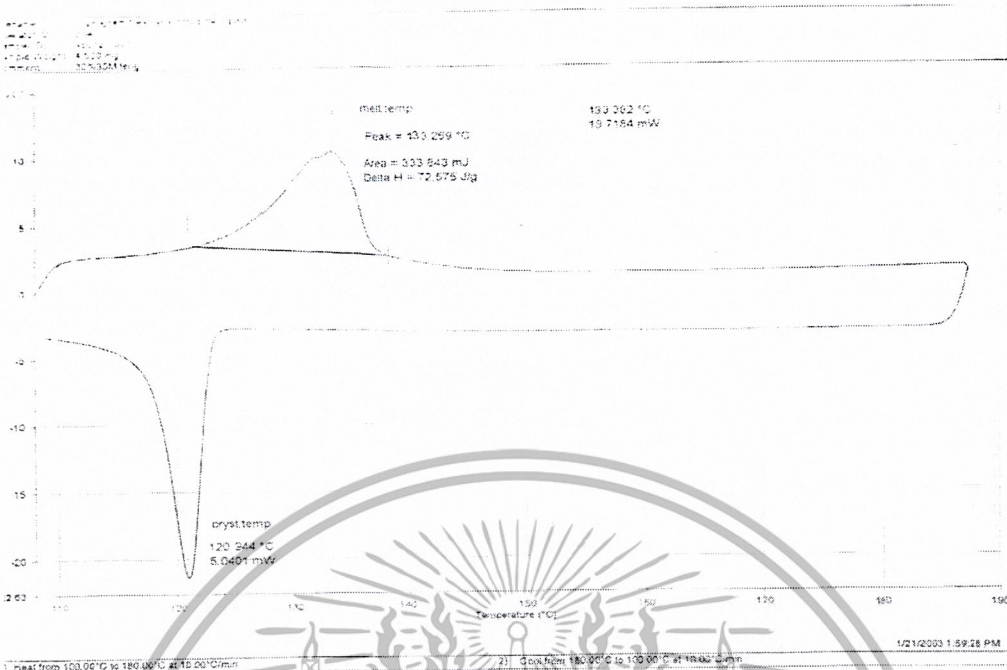
ภาคผนวก จ. สมบัติทางความร้อน



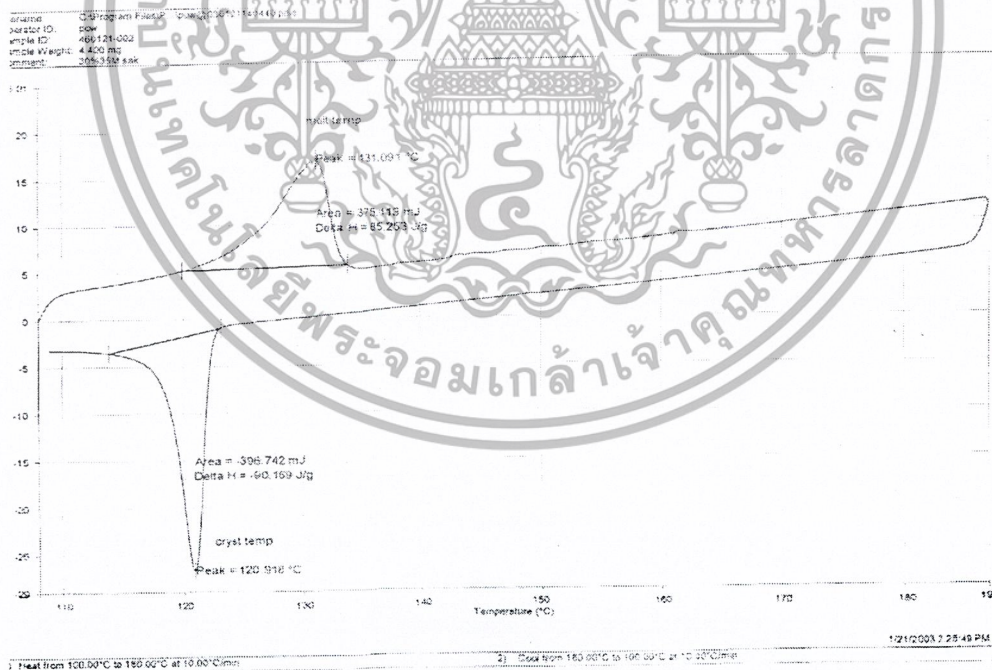
รูปที่ 1 สมบัติทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ยังไม่ผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่

รูปที่ 2 สมบัติทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่โดยการขึ้นรูปแบบกดอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 สมบัติทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ยังนำกลับมาใช้ใหม่โดยมี
 ซีล้อยจากไม้เต็งขนาด 35-99 เมท ปริมาณ 30% เป็นสารตัวเติม



รูปที่ 4 สมบัติทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ยังนำกลับมาใช้ใหม่โดยมี
 ซีล้อยจากไม้สักขนาด 35-99 เมท ปริมาณ 30% เป็นสารตัวเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้