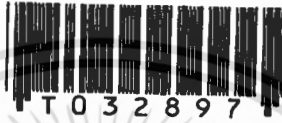


คอมพอสิตจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว
และเส้นใยอ้อย

COMPOSITES FROM RECYCLED HIGH DENSITY POLYETHYLENE
AND BAGASSE FIBERS



รัชดา ขวัญตัน

RADCHADA KHUANTON

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีประยุกต์
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2542

เลขที่.....
เลขทะเบียน..... 32897

เดือน, ปี..... 14 ส.ย. 2542

ISBN 974-622-399-2

เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรรมใดทางสน อื่นทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COMPOSITES FROM RECYCLED HIGH DENSITY POLYETHYLENE
AND BAGASSE FIBERS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED CHEMISTRY
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

1999

ISBN 974-622-399-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 1999

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	คอมพอลสิตจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว และเส้นใยอ้อย
นักศึกษา	นางสาวรัชดา ชวัญตน
รหัสประจำตัว	39065103
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีประยุกต์ (เทคโนโลยีพอลิเมอร์)
พ.ศ.	2542

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร. มาลินี ชัยสุภกิจสินธ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมคอมพอลสิตของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่ม และเส้นใยอ้อย โดยเปรียบเทียบการปรับปรุงสมบัติของคอมพอลสิตด้วยสารช่วยยึดติด 2 ชนิด คือ พอลิเอทิลีนกราฟท์อะคริลิกแอซิด (PE-g-AA) และพอลิเอทิลีนกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ (PE-g-MAH) กับสารช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทก 2 ชนิด คือ เอทิลีน พรอพิลีน ไดอีน เทอร์พอลิเมอร์ (EPDM) และเอทิลีน ไวนิล อะซิเตต (EVA) จากการทดลองพบว่า การเติมเส้นใยอ้อยลงใน HDPE จะทำให้พอลิเมอร์แข็งขึ้นแต่การดึงยึดและความทนแรงกระแทกจะลดลง และเส้นใยอ้อยที่ใช้ไม่จำเป็นต้องผ่านการคัดขนาดก่อน เมื่อเปรียบเทียบระบบที่ใช้ PE-g-AA และระบบที่ใช้ PE-g-MAH จะพบว่า สมบัติของคอมพอลสิตที่ได้จากทั้ง 2 ระบบ จะไม่แตกต่างกัน เนื่องจากจะเกิดพันธะชนิดเดียวกัน ส่วนการใช้ EPDM และ EVA ซึ่งจะแสดงสมบัติของอีลาสโตเมอร์ โดยจะช่วยปรับปรุงสมบัติการดึงยึดและความทนแรงกระแทก แต่ความทนแรงดึงและมอดุลัสจะลดลงตามปริมาณ EPDM หรือ EVA ที่เพิ่มขึ้น และพบว่าหุ้มมีขั้วในอีลาสโตเมอร์ จะมีผลต่อสมบัติการยึดติดระหว่างเส้นใยและเมตริกซ์ด้วย โดยในระบบที่ใช้ MAH-EPDM ซึ่งจะแสดงทั้งสมบัติความเป็นอีลาสโตเมอร์และสารช่วยยึดติด จะสามารถดึงยึดและรับแรงกระแทกได้สูงสุด ปริมาณ MAH ใน EPDM ก็จะมีผลต่อสมบัติของคอมพอลสิตด้วย ถ้ามี MAH ในปริมาณมากเกินไป จะทำให้คอมพอลสิตแข็งและเปราะ ส่วนผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่า T_m และ T_c ในทุกระบบ จะมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อเติม EPDM หรือ EVA ซึ่งเป็น พอลิเมอร์ออสฐานลงไป จะทำให้ความเป็นผลึกลดลง

Thesis Title	Composites from Recycled High Density Polyethylene and Bagasse Fibers
Student	Miss. Radchada Khuanton
Student ID.	39065103
Degree	Master of Science
Programme	Applied Chemistry (Polymer Technology)
Year	1999
Thesis Advisor	Assist.Prof.Dr. Malinee Chaisupakitsin

ABSTRACT

In this research, composites between HDPE from drinking water bottles and bagasse fibers were prepared. Two coupling agents (PE-g-AA and PE-g-MAH) and two impact modifiers (EPDM and EVA) were used to improve properties of the composites. The results showed that adding the bagasse fibers into HDPE could improve tensile strength of the composites while elongation at break and impact resistance were decreased. The size screening of bagasse fibers was not necessary for preparing those composites. The properties of PE-g-AA or PE-g-MAH filled composites systems were not different because the same linkage occurred in both systems. Adding EPDM or EVA, which are elastomer, increased elongation and impact properties but tensile strength and modulus would decrease with increasing their content. The polar groups on elastomers are significant on the adhesion between fibers and matrix. MAH-EPDM, which acts as both elastomer and coupling agent, could show the highest elongation and impact strength of the composites and the MAH content in EPDM affected on composites' properties: With higher MAH content, the composites showed higher hardness but lower impact strength. The results of thermal properties showed that T_m and T_c of all composites systems were not different and adding EPDM or EVA, which are amorphous polymers, into those systems reduced the crystallinity of systems.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษา รวมทั้งความช่วยเหลือเอาใจใส่ในทุก ๆ ด้าน ตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัย จาก ผศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.ต้องจิตต์ คิดชอบ ดร.อิทธิพล แจ่มชัด และคุณวรรรรม อุ่นจิตติชัย ที่กรุณาให้คำแนะนำ และให้ความอนุเคราะห์ในการเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณ คุณอภิย์ อนันตเสถ ผู้จัดการฝ่ายขาย บริษัท TOA UNI CHEMICAL MANUFACTURING, LTD. ที่เอื้อเพื่อให้ Polybond และ Royaltuf เพื่อใช้ในการทดลองครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และเจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ทุกท่าน ที่ให้การชี้แนะและช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และขอบคุณ พี่ ๆ น้อง ๆ และเพื่อน ๆ ทุกคน ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจตลอดการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

รัชดา ขวัญตน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	4
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	4
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.2 พอลิเมอร์คอมพอสิต	9
2.2.1 พอลิเมอร์เมตริกซ์	10
2.2.2 ส่วนเสริมแรง	12
2.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	14
2.3.1 วิธีการเตรียมพอลิเมอร์ในทางอุตสาหกรรม	14
2.3.2 สมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์	15
2.4 ชานอ้อย	15
2.4.1 ส่วนประกอบทางเคมีและฟิสิกส์ของชานอ้อย	17
2.4.2 การนำไปใช้ประโยชน์	20
2.5 การปรับปรุงสมบัติการยึดติด	20
2.5.1 กลไกในการยึดติด	20
2.5.2 สารช่วยยึดติดที่ใช้ในงานวิจัย	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 การปรับปรุงสมบัติความทนแรงกระแทก	24
2.6.1 เอทิลีน พรอพิลีน ไดอีน เทอร์พอลิเมอร์	24
2.6.2 เอทิลีน ไวนิล อะซิเตต	27
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	30
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	30
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	30
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	31
บทที่ 4 ผลการทดลอง	36
4.1 สมบัติเชิงกล	36
4.2 สมบัติทางความร้อน	52
4.3 สมบัติทางสัณฐานวิทยา	63
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	67
เอกสารอ้างอิง	72
ภาคผนวก	75
ภาคผนวก ก สมบัติของสารเคมี	76
ภาคผนวก ข สภาวะในการขึ้นรูปชิ้นงาน	79
ภาคผนวก ค สมบัติเชิงกลของคอมพอสิต	81
ภาคผนวก ง สมบัติทางความร้อน	91
ประวัติผู้เขียน	102

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมพอสิตและพอลิเมอร์บริสุทธิ์	14
2.2 แสดงส่วนประกอบและสมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติบางประเภท	16
2.3 แสดงการวิเคราะห์ทางเคมีของชานอ้อย	17
3.1 แสดงอัตราส่วนทั้งหมดในการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิต	33
4.1 แสดง T_m , ΔH_m และ ΔS_m ของระบบคอมพอสิตที่มีสารเติมแต่งต่างชนิดกัน	62
ค.1 แสดงความทนแรงดึงของคอมพอสิต	81
ค.2 แสดงร้อยละการดึงยืดของคอมพอสิต	83
ค.3 แสดงมอดุลัสยืดหยุ่นของคอมพอสิต	85
ค.4 แสดงความทนแรงกระแทกของคอมพอสิต	87
ค.5 แสดงความแข็งของคอมพอสิต	89
จ.1 แสดง T_m , T_c , ΔH_m , ΔH_c และร้อยละความเป็นผลึก จากการทดสอบสมบัติทาง ความร้อนของคอมพอสิต	91

สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แผนภาพแสดงแหล่งที่มาและการจัดการกับขยะพลาสติก	1
2.1 แสดงประเภทของวัสดุคอมพอลสิต โดยแบ่งตามลักษณะของส่วนเสริมแรง	10
2.2 แสดงตัวอย่างคอมพอลสิตที่มีส่วนเสริมแรงต่างกัน	12
2.3 แสดงกลไกแบบต่าง ๆ ในการยึดติดระหว่างพื้นผิว	21
2.4 แสดงปฏิกิริยาของเส้นใยเซลลูโลสที่ทำกรการปรับสภาพผิวด้วย PE-g-MAH	23
3.1 แสดงขั้นตอนการเตรียมคอมพอลสิตจากขวดน้ำดื่ม HDPE ที่ใช้แล้ว และเส้นใยอ้อย	31
4.1 แสดงสมบัติเชิงกลของคอมพอลสิตจาก HDPE ที่ใช้แล้วกับเส้นใยอ้อย โดยเปรียบเทียบเส้นใยอ้อยที่ผ่านการคัดขนาดและไม่ผ่านการคัดขนาด	37
4.2 แสดงความทนแรงดึงของคอมพอลสิต โดยเปรียบเทียบผลของการใช้ HDPE จากขวด และผลของการใช้สารช่วยยึดติดที่แตกต่างกัน	38
4.3 แสดงร้อยละการดึงยึด ณ จุดขาดของคอมพอลสิต โดยเปรียบเทียบผลของการใช้ HDPE จากขวด และผลของการใช้สารช่วยยึดติดที่แตกต่างกัน	38
4.4 แสดงค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของคอมพอลสิต โดยเปรียบเทียบผลของการใช้ HDPE จากขวด และผลของการใช้สารช่วยยึดติดที่แตกต่างกัน	39
4.5 แสดงความทนแรงกระแทกของคอมพอลสิต โดยเปรียบเทียบผลของการใช้ HDPE จากขวด และผลของการใช้สารช่วยยึดติดที่แตกต่างกัน	39
4.6 แสดงความแข็งของคอมพอลสิต โดยเปรียบเทียบผลของการใช้ HDPE จากขวด และผลของการใช้สารช่วยยึดติดที่แตกต่างกัน	40
4.7 แสดงความทนแรงดึงของคอมพอลสิต เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน HDPE ต่อสารช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทก โดยเปรียบเทียบชนิดสารช่วยยึดติดที่ต่างกัน	41
4.8 แสดงร้อยละการดึงยึด ณ จุดขาดของคอมพอลสิต เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ HDPE ต่อสารช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทก โดยเปรียบเทียบชนิดสารช่วยยึดติดที่แตกต่างกัน	42
4.9 แสดงค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของคอมพอลสิต เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ HDPE ต่อสารช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทก โดยเปรียบเทียบชนิดสารช่วยยึดติดที่ต่างกัน	43
4.10 แสดงความทนแรงกระแทกของคอมพอลสิต เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ HDPE ต่อสารช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทก โดยเปรียบเทียบชนิดสารช่วยยึดติดที่ต่างกัน	44

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 แสดงความแข็งของคอมพอลสิต เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน HDPE ต่อสารช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทก โดยเปรียบเทียบชนิดสารช่วยยึดติดที่ต่างกัน	45
4.12 แสดงความทนแรงดึงของคอมพอลสิตที่มีอัตราส่วน HDPE ต่อ EPDM เป็น 90 ต่อ 10 โดยเปรียบเทียบ EPDM ต่างชนิดกัน	46
4.13 แสดงร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของคอมพอลสิตที่มีอัตราส่วน HDPE ต่อ EPDM เป็น 90 ต่อ 10 โดยเปรียบเทียบ EPDM ต่างชนิดกัน	46
4.14 แสดงมอดุลัสยืดหยุ่นของคอมพอลสิตที่มีอัตราส่วน HDPE ต่อ EPDM เป็น 90 ต่อ 10 โดยเปรียบเทียบ EPDM ต่างชนิดกัน	47
4.15 แสดงความทนแรงกระแทกของคอมพอลสิตที่มีอัตราส่วน HDPE ต่อ EPDM เป็น 90 ต่อ 10 โดยเปรียบเทียบ EPDM ต่างชนิดกัน	47
4.16 แสดงความแข็งของคอมพอลสิตที่มีอัตราส่วน HDPE ต่อ EPDM เป็น 90 ต่อ 10 โดยเปรียบเทียบ EPDM ต่างชนิดกัน	48
4.17 แสดงความทนแรงดึงของคอมพอลสิตที่มีอัตราส่วน HDPE ต่อ สารเติมแต่ง เป็น 90 ต่อ 10 โดยเปรียบเทียบสารเติมแต่งต่างชนิดกัน	49
4.18 แสดงร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของคอมพอลสิตที่มีอัตราส่วน HDPE ต่อ สารเติมแต่ง เป็น 90 ต่อ 10 โดยเปรียบเทียบสารเติมแต่งต่างชนิดกัน	49
4.19 แสดงค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของคอมพอลสิตที่มีอัตราส่วน HDPE ต่อ สารเติมแต่ง เป็น 90 ต่อ 10 โดยเปรียบเทียบสารเติมแต่งต่างชนิดกัน	50
4.20 แสดงความทนแรงกระแทกของคอมพอลสิตที่มีอัตราส่วน HDPE ต่อ สารเติมแต่ง เป็น 90 ต่อ 10 โดยเปรียบเทียบสารเติมแต่งต่างชนิดกัน	50
4.21 แสดงความแข็งของคอมพอลสิตที่มีอัตราส่วน HDPE ต่อ สารเติมแต่ง เป็น 90 ต่อ 10 โดยเปรียบเทียบสารเติมแต่งต่างชนิดกัน	51
4.22 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอลสิต เมื่อใช้ PE-g-AA เป็นสารช่วยยึดติด และเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน HDPE ต่อ SAN-EPDM	52
4.23 แสดงอุณหภูมิหลอมผลึก (T_m) และอุณหภูมิตกผลึก (T_c) ของ HDPE ในคอมพอลสิต HDPE/SAN-EPDM/เส้นใยอ้อย/PE-g-AA เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน HDPE ต่อ SAN-EPDM	53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 แสดงร้อยละความเป็นผลึกของ HDPE ในคอมพอสิต HDPE/SAN-EPDM/เส้นใย อ้อย/PE-g-AA เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน HDPE ต่อ SAN-EPDM	54
4.25 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต เมื่อใช้ PE-g-MAH เป็นสารช่วยยึดติด และเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน HDPE ต่อ SAN-EPDM	55
4.26 แสดงอุณหภูมิหลอมผลึก (T_m) และอุณหภูมิตกผลึก (T_c) ของ HDPE ใน คอมพอสิต HDPE/SAN-EPDM/เส้นใยอ้อย/PE-g-MAH เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน HDPE ต่อ SAN-EPDM	56
4.27 แสดงร้อยละความเป็นผลึกของ HDPE ในคอมพอสิต HDPE/SAN-EPDM/เส้นใย อ้อย/PE-g-MAH เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน HDPE ต่อ SAN-EPDM	57
4.28 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน HDPE/EVA	58
4.29 แสดงอุณหภูมิหลอมผลึก (T_m) และอุณหภูมิตกผลึก (T_c) ของ HDPE ใน คอมพอสิต HDPE/EVA/เส้นใยอ้อย เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน HDPE ต่อ EVA	59
4.30 แสดงร้อยละความเป็นผลึกของ HDPE ในคอมพอสิต HDPE/EVA/เส้นใยอ้อย เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน HDPE ต่อ EVA	60
4.31 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต เมื่ออัตราส่วน HDPE ต่อ สารช่วยปรับ ปรุงความทนแรงกระแทก เป็น 90 ต่อ 10 โดยเปรียบเทียบสารช่วยปรับปรุงความทน แรงกระแทกที่ต่างชนิดกัน	61
4.32 แสดงสัณฐานวิทยาของคอมพอสิต เมื่อใช้ PE-g-AA เป็นสารช่วยยึดติด โดยเปลี่ยน แปลงอัตราส่วน HDPE ต่อ SAN-EPDM	63
4.33 แสดงสัณฐานวิทยาของคอมพอสิต เมื่อใช้ PE-g-MAH เป็นสารช่วยยึดติด โดย เปลี่ยนแปลงอัตราส่วน HDPE ต่อ SAN-EPDM	64
4.34 แสดงสัณฐานวิทยาของคอมพอสิต เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน HDPE ต่อ EVA	65
4.35 แสดงสัณฐานวิทยาของคอมพอสิต เมื่อใช้อัตราส่วน HDPE ต่อ MAH-EPDM เป็น 90 ต่อ 10 โดยเปรียบเทียบ MAH-EPDM สองชนิดที่มีปริมาณ MAH ต่างกัน	66
5.1 แสดงกลไกการยึดติดของ PE-g-AA	68
5.1 แสดงกลไกการยึดติดของ PE-g-MAH	68
5.2 แสดงกลไกการยึดติดของ EVA	69

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ง.1 แสดงสมบัติทางความร้อนของ HDPE ที่ใช้แล้ว	93
ง.2 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต HDPE ใหม่/เส้นใยอ้อย	93
ง.3 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต HDPE ที่ใช้แล้ว/SAN-EPDM/เส้นใย อ้อย/PE-g-AA โดยมีอัตราส่วน HDPE ต่อ SAN-EPDM เป็น 100 ต่อ 0	94
ง.4 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต HDPE ที่ใช้แล้ว/SAN-EPDM/เส้นใย อ้อย/PE-g-AA โดยมีอัตราส่วน HDPE ต่อ SAN-EPDM เป็น 90 ต่อ 10	94
ง.5 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต HDPE ที่ใช้แล้ว/SAN-EPDM/เส้นใย อ้อย/PE-g-AA โดยมีอัตราส่วน HDPE ต่อ SAN-EPDM เป็น 70 ต่อ 30	95
ง.6 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต HDPE ที่ใช้แล้ว/SAN-EPDM/เส้นใย อ้อย/PE-g-AA โดยมีอัตราส่วน HDPE ต่อ SAN-EPDM เป็น 50 ต่อ 50	95
ง.7 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต HDPE ที่ใช้แล้ว/SAN-EPDM/เส้นใย อ้อย/PE-g-MAH โดยมีอัตราส่วน HDPE ต่อ SAN-EPDM เป็น 100 ต่อ 0	96
ง.8 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต HDPE ที่ใช้แล้ว/SAN-EPDM/เส้นใย อ้อย/PE-g-MAH โดยมีอัตราส่วน HDPE ต่อ SAN-EPDM เป็น 90 ต่อ 10	96
ง.9 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต HDPE ที่ใช้แล้ว/SAN-EPDM/เส้นใย อ้อย/PE-g-MAH โดยมีอัตราส่วน HDPE ต่อ SAN-EPDM เป็น 70 ต่อ 30	97
ง.10 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต HDPE ที่ใช้แล้ว/SAN-EPDM/เส้นใย อ้อย/PE-g-MAH โดยมีอัตราส่วน HDPE ต่อ SAN-EPDM เป็น 50 ต่อ 50	97
ง.11 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต HDPE ที่ใช้แล้ว/EVA/เส้นใยอ้อย โดยมีอัตราส่วน HDPE ต่อ EVA เป็น 100 ต่อ 0	98
ง.12 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต HDPE ที่ใช้แล้ว/EVA/เส้นใยอ้อย โดยมีอัตราส่วน HDPE ต่อ EVA เป็น 90 ต่อ 10	98
ง.13 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต HDPE ที่ใช้แล้ว/EVA/เส้นใยอ้อย โดยมีอัตราส่วน HDPE ต่อ EVA เป็น 70 ต่อ 30	99
ง.14 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต HDPE ที่ใช้แล้ว/EVA/เส้นใยอ้อย โดยมีอัตราส่วน HDPE ต่อ EVA เป็น 50 ต่อ 50	99
ง.15 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต HDPE ที่ใช้แล้ว/MAH-EPDM(485)/ เส้นใยอ้อย โดยมีอัตราส่วน HDPE ต่อ MAH-EPDM เป็น 90 ต่อ 10	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ง.16 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต HDPE ที่ใช้แล้ว/MAH-EPDM(490)/ เส้นใยอ้อย โดยมีอัตราส่วน HDPE ต่อ MAH-EPDM เป็น 90 ต่อ 10100	
ง.17 แสดงสมบัติทางความร้อนของ SAN-EPDM101	
ง.18 แสดงสมบัติทางความร้อนของ EVA101	

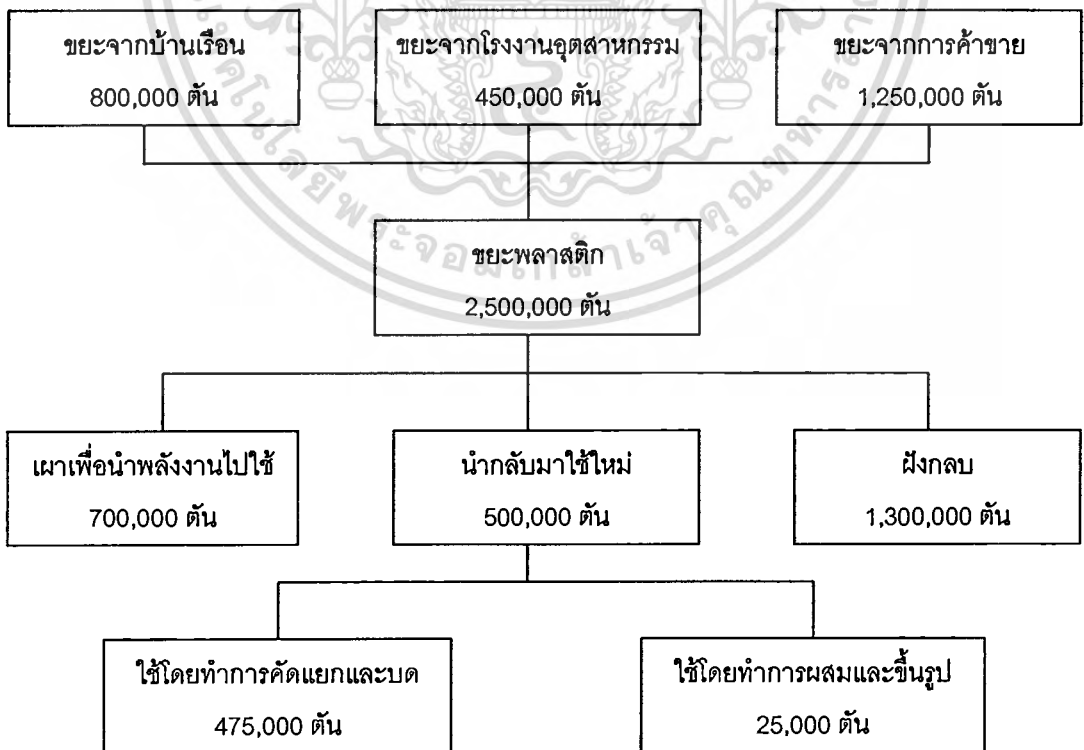


บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันพอลิเมอร์ถูกใช้อย่างกว้างขวางเพื่อเป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมหลายประเภท ปริมาณการใช้พอลิเมอร์ทั่วโลกประมาณปีละ 100 ล้านตัน จากความนิยมใช้วัสดุพอลิเมอร์ โดยเฉพาะวัสดุประเภทพลาสติกอย่างแพร่หลายนี้ ได้ทำให้ขยะจากพลาสติกมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ซึ่งโดยมากเป็นพวกพลาสติกบรรจุภัณฑ์ ชิ้นส่วนรถยนต์ และวัสดุก่อสร้าง เป็นต้น พบว่าจากปริมาณขยะของแข็งทั้งหมดจะเป็นพลาสติกประมาณร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก แต่เมื่อพิจารณาโดยปริมาตร ขยะพลาสติกจะมีปริมาณเพิ่มเป็นร้อยละ 20 เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่น ๆ แล้ว พลาสติกจะมีความหนาแน่นต่ำกว่ามาก ดังนั้นจึงก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัด เพราะแต่เดิมจะนิยมกำจัดโดยวิธีการฝังกลบ จากการรายงานพบว่าปริมาณขยะพลาสติกจากบ้านเรือน จากกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม และจากการค้าขายหมุนเวียนตามท้องตลาด จะมีโดยรวมทั้งสิ้นประมาณ 2.5 ล้านตันต่อปี นำไปทำการกำจัดโดยการฝังกลบถึง 1.3 ล้านตัน ส่วนที่เหลือนอกจากนั้นก็นำไปเผาเพื่อใช้พลังงาน และนำกลับมาใช้ใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แผนภาพแสดงแหล่งที่มาและการจัดการกับขยะพลาสติก [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัญหาที่พบจากการกำจัดโดยการฝังกลบ คือ ขยะพลาสติกจะใช้น้ำที่ในการฝังกลบมาก เนื่องจากมีปริมาตรมาก นอกจากนี้ในปัจจุบันยังพบว่า การฝังกลบขยะจะต้องใช้ต้นทุนสูง เพราะขาดแคลนพื้นที่และที่ดินมีราคาแพง อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยจะเกิดการปนเปื้อนในดินและน้ำใต้ดิน และถือว่าเป็นการสูญเสียวัสดุพลาสติกเหล่านั้นไปโดยเปล่าประโยชน์ [2] จากเหตุผลดังกล่าวจึงได้มีความสนใจที่จะนำขยะพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ โดยวิธีการนำขยะพลาสติกกลับมาใช้ใหม่สามารถทำได้ดังนี้ [1]

1. นำกลับมาใช้โดยทำลายโครงสร้างโมเลกุลเดิม

- แยกพันธะได้เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้นตัวเดิม เพื่อนำไปทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันอีกครั้ง ได้เป็นพอลิเมอร์ชนิดเดิม
- แยกพันธะได้เป็นมอนอเมอร์ใหม่ นำไปทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ได้เป็นพอลิเมอร์ชนิดใหม่
- แยกพันธะเป็นโอเลฟินเมอร์ เพื่อใช้งานในด้านอื่น

2. นำกลับมาใช้โดยคงโครงสร้างเดิมไว้

- ใช้ความร้อนในการหลอมเปลี่ยนรูปขยะแต่ละชนิดที่ผ่านการคัดแยกแล้ว เพื่อจุดประสงค์การใช้งานเดิมแต่สมบัติลดลง
- ใช้ความร้อนในการหลอมรวมขยะพลาสติกผสมต่างชนิดกัน เพื่อจุดประสงค์การใช้งานที่ต่ำลง
- ใช้กระบวนการเชิงกลในการลดขนาดขยะพลาสติกลง เพื่อจุดประสงค์การใช้งานที่ต่ำลง โดยใช้เป็นสารตัวเติม

การนำพลาสติกกลับมาใช้ประโยชน์อีกครั้งโดยการหลอมเพื่อนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์เป็นวิธีการที่สะดวกและไม่ยุ่งยากซับซ้อน อีกทั้งยังมีผู้ทำการทดลองและพบว่าพลาสติกที่นำกลับมาใช้ใหม่นี้ มีสมบัติใกล้เคียงกับพลาสติกเดิม ดังที่ Loultcheva M.K. และคณะ [3] ได้ศึกษาสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) จากพลาสติกบรรจุภัณฑ์ที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้เครื่องอัดรีดทั้งแบบเกลียวหนอนเดี่ยวและเกลียวหนอนคู่ พบว่าสมบัติที่ได้จะใกล้เคียงกับ HDPE ใหม่

ในการใช้งานบางประเภท วัสดุพลาสติกจะมีสมบัติบางประการที่ไม่เหมาะสม เนื่องจากพลาสติกจะไม่แข็งพอ และจะเสียรูปได้ง่ายโดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง ๆ แนวทางหนึ่งที่จะปรับปรุงสมบัติเหล่านี้ คือการผสมสารตัวเติมหรือเส้นใย เพื่อช่วยเสริมแรงในพลาสติก ซึ่งปัจจุบันเส้นใยธรรมชาติได้รับความนิยมในการใช้ช่วยเสริมแรงในพอลิเมอร์คอมพอสิต เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติจะมีข้อดี คือ ราคาถูก ความหนาแน่นต่ำ เกิดความเสียหายและเสียดสีระหว่างกระบวนการผลิตต่ำ ไม่เป็นพิษต่อร่างกาย ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และหาได้ง่าย [4] แต่เส้นใยธรรมชาติก็

มีข้อเสีย เช่น ทนความร้อนได้ต่ำกว่าเส้นใยสังเคราะห์ มีสมบัติดูดความชื้น และปัญหาที่สำคัญคือ การกระจายตัวของเส้นใยและการยึดติดกับพอลิเมอร์ไม่ดีพอ โดยเฉพาะเมื่อใช้พอลิเมอร์เมตริกซ์ที่ไม่มีขั้ว เช่น PE และ PP แรงยึดติดที่ผิวสัมผัสกับเส้นใยที่เป็นวัสดุภาคที่มีขั้วจะต่ำมาก ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตที่ได้

การปรับปรุงการยึดติดและการกระจายตัวของเส้นใย สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การปรับสภาพผิวเส้นใยโดยการต่อกิ่ง (Grafting) และการใช้สารช่วยยึดติด (Coupling agent) เป็นต้น ซึ่งวิธีการใช้สารช่วยยึดติดจะเป็นที่นิยมเนื่องจากสะดวกและทำได้ง่าย โดยการเลือกใช้สารช่วยยึดติดสำหรับระบบพอลิเมอร์คอมพอสิตระบบใดระบบหนึ่งนั้น จะต้องเลือกสารช่วยยึดติดที่สามารถเข้ากันได้ดีกับเมตริกซ์และเส้นใยที่ใช้ด้วย จึงจะสามารถปรับปรุงสมบัติของคอมพอสิตได้ นอกจากนี้ยังพบว่าพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใย จะมีสมบัติด้านความเหนียวลดลง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการเติมสารเติมแต่งตัวอื่น ๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติของคอมพอสิตให้เหมาะสมกับการใช้งานมากยิ่งขึ้นและสามารถประยุกต์ใช้พอลิเมอร์คอมพอสิตจากเส้นใยธรรมชาติทดแทนวัสดุชนิดอื่นได้

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาคอมพอสิตจากขวดน้ำดื่ม HDPE ที่ใช้แล้ว และเส้นใยอ้อยซึ่งเป็นกากเหลือจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลที่มีมากในประเทศ โดยพิจารณาสารช่วยยึดติด 2 ชนิด คือ พอลิเอทิลีนกราฟท์อะคริลิกแอซิด (Polyethylene-graft-acrylic acid ; PE-g-AA) และ พอลิเอทิลีนกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ (Polyethylene-graft-maleic anhydride ; PE-g-MAH) และยังได้ศึกษาผลของการผสมพอลิเมอร์เมตริกซ์กับเอทิลีน พรอพิลีน ไดอีน เทอร์พอลิเมอร์ที่ปรับปรุงด้วยสไตรีนอะคริโลไนไตรต์ (Styrene acrylonitrile modified ethylene propylene diene terpolymer ; SAN-EPDM) และที่ปรับปรุงด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ (MAH-EPDM) และเอทิลีน ไวนิล อะซิเตต (Ethylene vinyl acetate ; EVA) เพื่อปรับปรุงพอลิเมอร์คอมพอสิตจากขยะที่เหลือทิ้ง ให้มีสมบัติเหมาะแก่การใช้งานมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะเป็นทางเลือกหนึ่งในการนำขยะพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ เพื่อลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและเป็นการอนุรักษ์ทรัพยากรอีกทางหนึ่งด้วย

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือใช้ด้านการเกษตร โดยนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์
2. เพื่อเสนอแนะแนวทางในการลดปัญหาขยะพลาสติก โดยการนำกลับมาใช้ใหม่
3. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตคอมพอสิตจากเส้นใยอ้อยกับขยะพลาสติกจากขวดน้ำดื่มชนิดขุน
4. เพื่อพัฒนาและปรับปรุงสมบัติของคอมพอสิตจากเส้นใยอ้อย โดยใช้สารเคมีต่าง ๆ

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์คอมพอสิตจากขวดน้ำดื่ม HDPE กับเส้นใยอ้อย ในปริมาณเส้นใยอ้อยร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์เมตริกซ์ เมื่อไม่ใช้สารช่วยยึดติด
2. ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของพอลิเมอร์คอมพอสิต เมื่อใช้เส้นใยที่คัดขนาดและไม่คัดขนาด
3. ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของพอลิเมอร์คอมพอสิต เมื่อใช้ PE-g-AA และ PE-g-MAH เป็นสารช่วยยึดติด ในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของเส้นใย
4. ศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์คอมพอสิต เมื่อใช้ SAN-EPDM ร่วมกับสารช่วยยึดติด โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ HDPE ต่อ SAN-EPDM
5. ศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์คอมพอสิต เมื่อใช้ EVA แทน EPDM
6. ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของพอลิเมอร์คอมพอสิต เมื่อใช้ MAH-EPDM แทน SAN-EPDM และเปรียบเทียบ MAH-EPDM 2 ชนิด ที่มีปริมาณ MAH ต่างกัน

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 1984 Woodhams R.T. และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาพอลิโเอเลฟินที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไม้ที่มีความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) ประมาณ 100 โดยใช้กรดสเตียริก (Stearic acid) และ อีโพลีน (Epolene) เป็นสารช่วยให้เส้นใยกระจายตัวใน HDPE และ ไอโซแทคติก พรอพิลีน (iPP) แล้วขึ้นรูปโดยเครื่องฉีด พบว่าเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านความแข็งต่อน้ำหนักแล้ว คอมพอสิตจากเยื่อไม้จะมีความแข็งเท่ากับหรือมากกว่าวัสดุชนิดอื่น ๆ ที่ใช้ในการก่อสร้าง เช่น เหล็กกล้า อะลูมิเนียม และคอมพอสิตจากใยแก้ว ในขณะที่ราคาจะถูกกว่า แต่การวัดค่าความแข็งแรงของคอมพอสิตจากเยื่อไม้จะได้ค่าน้อยกว่าที่คาดไว้ตามทฤษฎี เนื่องจากจะเกิดช่องว่างจากการระเหยของสารในระหว่างกระบวนการผลิต

ในปี ค.ศ. 1989 Raj R.G. และคณะ [6] ได้ศึกษาการใช้เส้นใยไม้เป็นสารตัวเติมในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง (Medium density polyethylene ; MDPE) โดยใช้เส้นใย 3 ชนิด คือ เยื่อเชิงกล (Mechanical pulp) ผงไม้ (Wood flour) และ เยื่อเซลลูโลส (Cellulose pulp) และได้มีการปรับปรุงเส้นใยก่อนด้วยสารพวกไซเลน (Silane) และพอลิไอโซไซยาเนต (Polyisocyanate) เพื่อปรับปรุงการยึดติดระหว่างเส้นใยและพอลิเมอร์ พบว่าค่าความทนแรงดึงจะเพิ่มขึ้นในกรณีที่มีการปรับปรุงเส้นใยก่อน แต่จะไม่มีผลต่อค่ามอดุลัสยืดหยุ่น ค่ามอดุลัสจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น ส่วนค่าการดึงยึดและพลังงานการแตกหักจะลดลงสำหรับวิธีการผสม ถ้าผสมโดยเครื่องอัดรีดจะมีค่าความทนแรงดึงและมอดุลัสสูงกว่าผสมด้วยเครื่องผสมแบบลูกกลิ้ง และพบว่า MDPE ที่เติมด้วยเยื่อเชิงกลจะมีสมบัติดีกว่าที่เติมด้วยเยื่อเซลลูโลส และผงไม้ และในปีเดียวกันนี้ Kokta B.V. และคณะ [7] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิพรอพิลีนที่เติมด้วยผงไม้ ซึ่งเคลือบผิวด้วยอีโพลีน เพื่อช่วยในการกระจายตัว โดยใช้ไซเลนและพอลิเมทิลีน พอลิฟีนิลไอโซไซยาเนต (Polymethylene polyphenylisocyanate ; PMPPIC) เป็นสารช่วยยึดติด ทำการผสมโดยเครื่องผสมแบบลูกกลิ้ง แล้วขึ้นรูปด้วยวิธีกดอัด พบว่าในกรณีที่ใช้ PMPPIC ร่วมกับอีโพลีน ค่าความทนแรงดึงจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใย แต่การปรับปรุงเส้นใยจะไม่มีผลต่อค่ามอดุลัส ค่ามอดุลัสจะขึ้นกับอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ถ้าเส้นใยยาวจะทำให้ค่ามอดุลัสสูง และการเพิ่มปริมาณเส้นใยก็จะทำให้ค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้นด้วย แต่ค่าการดึงยึด และความทนแรงกระแทกจะลดลง

ในปี ค.ศ. 1990 Raj R.G. และคณะ [4] ได้ศึกษาคอมพอสิตจาก HDPE กับเส้นใยเซลลูโลสที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ เยื่อเชิงกล ผงไม้ และเยื่อเซลลูโลส การปรับปรุงการยึดติดระหว่างเส้นใย

และพอลิเมอร์เมตริกซ์ ทำโดยใช้ไซเลน และ PMPPIC ผสมกับเส้นใยก่อน แล้วจึงนำไปผสมกับพอลิเมอร์ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว การเติมเส้นใยใน HDPE จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของคอมพอสิต แต่ความทนแรงดึงจะลดลง พบว่าคอมพอสิตที่ใช้ผงไม้ซึ่งมีปริมาณลิกนินสูงสุดเมื่อเทียบกับเส้นใยที่เหลืออีก 2 ชนิด จะมีอัตราการลดลงของความทนแรงดึงต่ำที่สุด ขณะที่คอมพอสิตจากเยื่อเซลลูโลสซึ่งไม่มีลิกนิน จะมีค่าความทนแรงดึงต่ำสุด จะเห็นว่าลิกนินในสารตัวเติมมีอิทธิพลต่อแรงยึดติดกับเมตริกซ์ ส่วนค่าการดึงยึดจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย แต่จะไม่ขึ้นกับชนิดของเส้นใย สำหรับผลของการใช้สารช่วยยึดติด พบว่าการปรับปรุงเส้นใยด้วย PMPPIC จะให้ค่าความทนแรงดึงสูงสุด ส่วนค่ามอดุลัสจะสูงสุดเมื่อใช้ไซเลน แต่ก็ใกล้เคียงกับเส้นใยที่ไม่ได้ปรับปรุง

ต่อมาในปีเดียวกัน Yam K.L. และคณะ [8] ได้เตรียมคอมพอสิตของ HDPE จากขวดนม กับเส้นใยไม้สน โดยศึกษาเส้นใยไม้สนที่ไม่ได้ปรับปรุง ปรับปรุงด้วยความร้อน และปรับปรุงด้วยอะเซทิลเลท (Acetylate) ทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ พบว่าสามารถผสมเส้นใยได้ถึงร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ถ้าเพิ่มปริมาณเส้นใย ค่าความทนแรงดึงจะลดลง และเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงกับเส้นใยที่ปรับปรุงด้วยอะเซทิลเลท จะให้ค่าที่ต่ำกว่าเส้นใยที่ปรับปรุงด้วยความร้อน สำหรับค่ามอดุลัส ค่าความทนแรงกระแทก และค่าการดึงยึด จะไม่ขึ้นกับการปรับปรุงเส้นใย ค่ามอดุลัสจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใย ส่วนค่าความทนแรงกระแทก และค่าการดึงยึดจะลดลง รูปแบบและอุณหภูมิในการผสมจะมีผลต่อสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตที่ได้ พบว่าลิกนินจะเริ่มเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส ถ้าใช้เวลาในการผสมนานขึ้นคอมพอสิตที่ได้จะมีสีคล้ำขึ้น เนื่องจากเกิดการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน

หลังจากนั้น Bataille P. และคณะ [9] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) และ HDPE ที่เติมด้วยเซลลูโลส พบว่าค่าความแข็งแรงที่จุดคราก (Yield strength) ของคอมพอสิตจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการผสมจาก 160 ถึง 220 องศาเซลเซียส และหลังจากนั้นจะลดลงเล็กน้อย ค่าความแข็งแรงที่จุดครากของคอมพอสิตของ LLDPE และเซลลูโลสที่ปรับปรุงด้วยเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide ; BPO) ซึ่งผสมที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส จะมีค่าเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 70 ขณะที่คอมพอสิตของ HDPE จะเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 15 การปรับปรุงเส้นใยด้วย BPO จะทำให้ความแข็งแรงที่จุดครากเพิ่มขึ้นมากกว่าคอมพอสิตที่ไม่ได้ปรับปรุงเส้นใย หรือ ที่ปรับปรุงด้วยไซเลน และพบว่าการเติม BPO โดยตรงระหว่างการผสม จะให้ผลที่ดีกว่าการเติมโดยผ่านสารละลายเมทานอล เมื่อทดลองเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ BPO พบว่า BPO เพียงร้อยละ 0.025 ก็จะให้พลังงานที่จุดคราก (Energy at yield) สูงสุด และหลังจากนั้นแม้จะเพิ่มความเข้มข้น ค่าที่ได้ก็จะ

คงที่ แต่เมื่อใช้ไดคুমิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide ; DCP) แทน BPO พบว่าจะมีประสิทธิ ภาพดีกว่า เนื่องจากจะสามารถใช้ความเข้มข้นที่ต่ำกว่าเพื่อให้ได้ค่าความแข็งแรงที่จุดครากสูงสุด

ในปี ค.ศ. 1992 Simpson R.J. และ Selke S.E. [10] ได้ศึกษาถึงการนำขวด PP แบบ หลายชั้น (Multi-layer) ที่ใช้แล้ว มาผสมกับเส้นใยไม้สน โดยศึกษาสมบัติเชิงกลเปรียบเทียบกับ คอมพอลิตจาก PP บริสุทธิ์ที่ผลิตขึ้นมาใหม่ พบว่าในขวด PP ที่ใช้ จะประกอบด้วย EVA ร้อย ละ 3.75 กาวร้อยละ 1.75 และพอลิเมอร์ร่วมของเอทิลีนและพรอพิลีน ร้อยละ 94.5 นำมาผสมกับ เส้นใยโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ และขึ้นรูปโดยการกดอัด จากการทดลองค่าความทน แรงดึงจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เส้นใยร้อยละ 30 แล้วจะลดลงที่ปริมาณเส้นใยร้อยละ 40 และ 50 เส้นใยที่ จัดเรียงตัวตั้งฉากกับแนวแรงจะมีค่าความทนแรงดึงต่ำกว่าที่จัดเรียงตัวตามแนวแรง และที่ปริมาณ เส้นใยร้อยละ 30 คอมพอลิตจาก PP ที่ใช้แล้ว จะมีความทนแรงดึงสูงกว่าคอมพอลิต จาก PP ใหม่ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยจะได้ค่าที่ใกล้เคียงกัน ส่วนค่าการดึงยืดจะลดลงเมื่อเพิ่ม ปริมาณเส้นใย ขณะที่ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นและความทนแรงกระแทกจะเพิ่มขึ้น พบว่าคอมพอลิตจาก PP ที่ใช้แล้วจะมีสมบัติและความเสถียรของรูปร่างดีกว่าคอมพอลิตจาก PP ใหม่ เนื่องจากหมู่ EVA ในขวดจะช่วยปรับปรุงการยึดติดกับเส้นใยโดยไม่ต้องเติมสารตัวเติมอื่น ๆ อีก

ในปี ค.ศ. 1993 Quillin D.T. และคณะ [11] ได้ศึกษาการเกิดผลึกของคอมพอลิตจาก PP กับเส้นใยเซลลูโลส โดยใช้ Optical microscopy และ Differential scanning calorimetry (DSC) พบว่าเส้นใยเซลลูโลสจะเป็นตัวก่อนิวเคลียส (Nucleating agent) สำหรับ PP และจะ เกิดผลึกรอบเส้นใย เมื่อทำการปรับปรุงเส้นใยด้วยอัลคิลคีโตนไดเมอร์ (Alkyl ketene dimer ; AKD) , อัลคิลซัคซินิคแอนไฮไดรด์ (Alkenyl succinic anhydride ; ASA) หรือกรดสเตียริก พบ ว่าจะไม่ทำให้เกิดผลึกขึ้นที่พื้นผิวของเส้นใย ซึ่งลักษณะทางสัณฐานวิทยาเหล่านี้จะมีผลต่อสมบัติ เชิงกลของคอมพอลิตที่ได้ด้วย

ในปี ค.ศ. 1994 George J. และคณะ [12] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของ LDPE ที่เสริมแรงด้วย เส้นใยสับปะรด โดยสามารถเติมเส้นใยได้สูงสุดถึงร้อยละ 30 มีการเปรียบเทียบการเตรียม 2 วิธี คือ การผสมโดยทำเป็นสารละลาย (Solution mixing) และการผสมขณะหลอม (Melt mixing) พบว่าในการเตรียมทั้ง 2 วิธีนี้ ค่าความทนแรงดึงและมอดุลัสจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย แต่ การเตรียมแบบสารละลายจะให้ค่าที่สูงกว่า ส่วนค่าการดึงยืดจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่ม ปริมาณเส้นใย สำหรับความยาวของเส้นใยจะมีผลต่อสมบัติของคอมพอลิตที่ได้ โดยในเส้นใยที่ ยาว ค่าความทนแรงดึงและมอดุลัสจะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การจัดเรียงตัวของเส้นใยจะมีผลต่อค่า ความทนแรงดึง และมอดุลัสด้วย ถ้าเส้นใยจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันตามแนวแรง คอมพอลิต ที่ได้จะมีค่าความทนแรงดึงและมอดุลัสสูงกว่าที่จัดเรียงตัวตั้งฉากกับแนวแรง

ในปี ค.ศ. 1995 Schneider J.P. และคณะ [13] ได้ศึกษาสมบัติของคอมพอลิเมอร์จาก PP กับ สารตัวเติมที่เป็นขยะจากชุมชนชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ขยะคอมพอลิเมอร์จากไม้ แผ่นขยะคอมพอลิเมอร์ของพอลิเอสเตอร์กับปอกระเจา แกนปอกระเจา และหนังสือพิมพ์เก่า โดยเปรียบเทียบกับสมบัติของคอมพอลิเมอร์จากผงไม้ที่ใช้มากในอุปกรณ์เกี่ยวกับรถยนต์ จากผลการทดลองพบว่า

- ขยะคอมพอลิเมอร์จากไม้สามารถใช้เป็นสารตัวเติมได้ดีเท่า ๆ กับผงไม้ เนื่องจากมีโครงสร้างคล้ายกัน ปริมาณเล็กน้อยของกาวเทอร์โมเซตที่ปนอยู่ในขยะคอมพอลิเมอร์จะไม่มีผลต่อสมบัติคอมพอลิเมอร์ใหม่ที่ได้

- คอมพอลิเมอร์จาก PP และแผ่นขยะพอลิเอสเตอร์กับปอกระเจา จะมีสมบัติด้อยกว่าคอมพอลิเมอร์จากผงไม้ เมื่อใช้สารตัวเติมเพิ่มขึ้นค่ามอดุลัสจะเพิ่มขึ้น แต่จะไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรง โดยค่าความแข็งแรงและพลังงานต่อแรงกระแทกจะต่ำ

- แกนปอกระเจา จะมีสมบัติใกล้เคียงกับผงไม้ แต่การกระจายใน PP จะไม่ดีเท่าผงไม้ เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม ค่าความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้น แต่พลังงานต่อแรงกระแทกจะลดลง สมบัติโดยรวมของคอมพอลิเมอร์ที่ได้จะใกล้เคียงกับคอมพอลิเมอร์จากผงไม้

- คอมพอลิเมอร์จากขยะหนังสือพิมพ์ จะมีสมบัติเชิงกลดีกว่าคอมพอลิเมอร์จากผงไม้ โดยเฉพาะในด้านความทนแรงกระแทกและด้านความแข็งแรง

ในปี ค.ศ. 1997 Kim T.J. และคณะ [14] ได้ศึกษาการเตรียมคอมพอลิเมอร์จาก LDPE กับ เซลลูโลส โดยเปรียบเทียบ เซลลูโลสที่ไม่ได้ปรับปรุง เซลลูโลสที่ปรับปรุงด้วยเอนไซม์เซลลูเลส (Cellulase enzyme) และเซลลูโลสที่จุ่มในโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนแล้วจึงปรับปรุงด้วยเอนไซม์เซลลูเลส ได้มีการเติม PE-g-MAH เพื่อปรับปรุงแรงยึดติดระหว่างเซลลูโลสกับเมทริกซ์และเพื่อเพิ่มการกระจายตัวและความสามารถในการเปียกตัวของเซลลูโลส พบว่าการปรับปรุงด้วยเอนไซม์เซลลูเลส จะมีผลต่อการตกผลึกของเซลลูโลส ถ้าเพิ่มเวลาในการปรับปรุงเซลลูเลส อัตราการตกผลึกจะเพิ่มขึ้น จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าค่าความทนแรงดึงของคอมพอลิเมอร์ทุกตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเซลลูเลส และคอมพอลิเมอร์ที่มีการปรับปรุงเซลลูเลสด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ เซลลูเลส และ PE-g-MAH จะให้ค่าที่สูงที่สุด ตามด้วยเซลลูเลสที่ปรับปรุงด้วยเซลลูเลส และ PE-g-MAH เซลลูเลสที่เติม PE-g-MAH และเซลลูเลสที่ไม่ได้ปรับปรุงจะให้ค่าที่ต่ำสุด ส่วนค่ามอดุลัสก็จะเพิ่มตามปริมาณเส้นใยเช่นกัน แต่จะได้ค่าสูงสุดเมื่อใช้เซลลูเลสที่เติม PE-g-MAH เท่านั้น สำหรับค่าการดึงยึดจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย

และในปีเดียวกัน Park B.D. และ Balatinez J.J. [15] ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของคอมพอลิเมอร์จาก iPP กับเส้นใยไม้ โดยใช้พอลิพรอพิลีนที่ปรับปรุงด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride modified polypropylene ; MAPP) ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของเส้นใย เป็นสารช่วยในการกระจายตัวและช่วยในการยึดติดของเส้นใยในเมทริกซ์ และศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

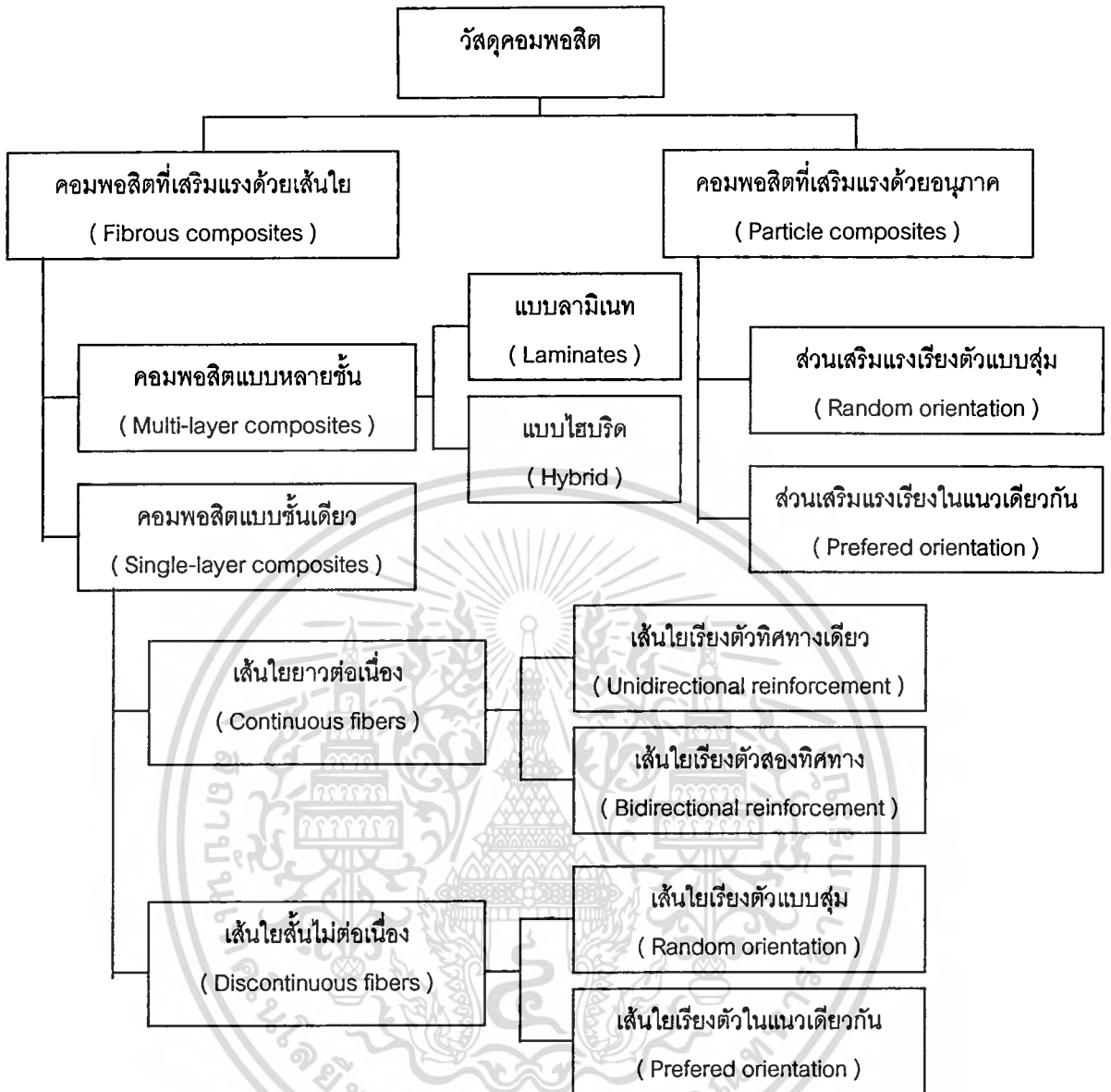
การใช้ EPDM เป็นตัวช่วยปรับปรุงความต้านทานต่อแรงกระแทก จะทำการผสม PP กับ EPDM ก่อน ด้วยบราเบนด์เลอร์ (Brabender) แล้วผสมกับเส้นใยด้วย K-Mixer และขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีด พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นและความทนแรงดึงจะเพิ่มขึ้น แต่ค่าการดึงยืดและความทนแรงกระแทกจะลดลง ขณะที่การเพิ่มปริมาณ EPDM จะให้ผลในทางตรงกันข้าม ซึ่งจะเห็นว่าเส้นใยไม้จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของคอมพอสิต ขณะที่ EPDM จะลดความแข็งแรง และจากผลการทดลองพบว่าการปรับปรุงความเหนียวด้วย EPDM จะให้ผลในระดับปานกลางสำหรับคอมพอสิตจาก iPP และเส้นใยไม้

2.2 พอลิเมอร์คอมพอสิต (Polymer composites)

พอลิเมอร์คอมพอสิต หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยส่วนประกอบอย่างน้อย 2 ชนิด ที่มีสมบัติต่างกัน โดยจะแยกกันอยู่คนละวัฏภาค และทำให้ได้วัสดุที่มีสมบัติที่ดีขึ้น โดยทั่วไปจะนิยมทำเพื่อปรับปรุงความแข็งแรง มอดุลัส ความเสถียรในรูปร่าง และลดความหนาแน่น พอลิเมอร์คอมพอสิตจะประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนเมตริกซ์ (Matrix phase) ซึ่งจะเป็นสารพอลิเมอร์ และส่วนเสริมแรง (Reinforcement phase) ซึ่งอาจจะมีลักษณะเป็นแผ่นเป็นอนุภาคเล็ก ๆ หรือ เป็นเส้นใยก็ได้ มักจะมีการใช้ลักษณะรูปร่างและการจัดเรียงตัวที่แตกต่างกันของส่วนเสริมแรง เพื่อแบ่งประเภทของวัสดุคอมพอสิต ดังตัวอย่าง รูปที่ 2.1

สมบัติของพอลิเมอร์คอมพอสิตขึ้นกับ [16]

1. การยึดเกาะระหว่างเมตริกซ์และสารเสริมแรง
2. คุณสมบัติของเมตริกซ์และสารเสริมแรง
3. ขนาดและรูปร่างของสารเสริมแรง
4. ปริมาณสารเสริมแรง
5. กระบวนการผลิต
6. การจัดเรียงตัวและการกระจายตัวของสารเสริมแรง



รูปที่ 2.1 แสดงประเภทของวัสดุคอมพอสิต โดยแบ่งตามลักษณะของส่วนเสริมแรง [17]

2.2.1 พอลิเมอร์เมตริกซ์ (Polymer matrix)

เมตริกซ์เป็นส่วนที่ช่วยหล่อหุ้มและยึดส่วนเสริมแรงเข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งโดยทั่วไปเมตริกซ์มักจะมีค่าความเหนียวสูง ความแข็งแรงและมอดุลัสต่ำกว่าส่วนเสริมแรง

หน้าที่ของเมตริกซ์ในพอลิเมอร์คอมพอสิต ได้แก่ [18]

1. รักษาความเสถียรในรูปร่าง และขนาดของวัสดุคอมพอสิต
2. รักษาการกระจายตัวของเส้นใย และแยกไม่ให้เป็นก้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำให้วัสดุคอมพอลสิตสามารถทนต่อการเสียดสี ภายใต้อุณหภูมิหรือแรงที่ระดับหนึ่ง ๆ
4. สามารถกระจายหรือส่งถ่ายแรงที่ได้รับจากภายนอกไปยังเส้นใยได้
5. ช่วยให้ทนทานต่อสภาพแวดล้อมและมีความเสถียรในตัวกลางต่าง ๆ

พอลิเมอร์เมตริกซ์ที่ใช้โดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. เทอร์โมเซต (Thermoset) [19]

พอลิเมอร์กลุ่มนี้เมื่อผ่านกรรมวิธีการผลิตจะมีรูปทรงถาวร ผลิตผลที่ได้นำไปหลอมอีกไม่ได้ และไม่ละลายในตัวทำละลาย คือไม่เกิดกระบวนการย้อนกลับ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า ก่อนผ่านกระบวนการเตรียม โครงสร้างของพอลิเมอร์ยังไม่เป็นร่างแห แต่เมื่อผ่านกระบวนการโดยให้ความร้อนหรือความดันเข้าไป จะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในโครงสร้างเกิดการเชื่อมโยง (Cross-linking) ระหว่างสายโซ่โมเลกุล มีลักษณะเป็นระบบสามมิติ มีการสร้างพันธะโควาเลนต์ระหว่างสายโซ่โมเลกุล ทำให้ผลิตผลที่ได้มีความคงทนไม่หลอม ไม่ละลาย ถ้าให้ความร้อนมาก ๆ จะไหม้เกรียมและสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม

เทอร์โมเซตที่ใช้เป็นเมตริกซ์ส่วนใหญ่ ได้แก่ อีพอกซี พอลิเอสเทอร์ และ ไวนิลเอสเทอร์ เมื่อเทอร์โมเซตเรซินที่หลอมเหลวเริ่มแข็งตัว จะเกิดการเชื่อมโยงขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดรอยต่อที่แน่นของโครงร่างแหสามมิติ การเกิดการเชื่อมโยงจะทำให้พอลิเมอร์แข็งตัว มีความแข็งแรงสูง มีความต้านทานสารละลาย มีเสถียรภาพทางความร้อน และต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้ดี สมบัติเหล่านี้จะสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นของการเกิดการเชื่อมโยง และน้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่ระหว่างการเชื่อมโยง ถ้าเกิดการเชื่อมโยงมากจะส่งผลให้เมตริกซ์มีความแข็งแรง หรือมีมอดุลัสยืดหยุ่นสูง แต่ถ้าเกิดการเชื่อมโยงมากแล้ว น้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่ระหว่างการเชื่อมโยงจะลดลง ซึ่งจะทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลเกิดได้ยาก เกิดความเปราะ มีความเครียดต่ำ ความต้านทานต่อแรงกระแทกน้อย และไม่เหนียว

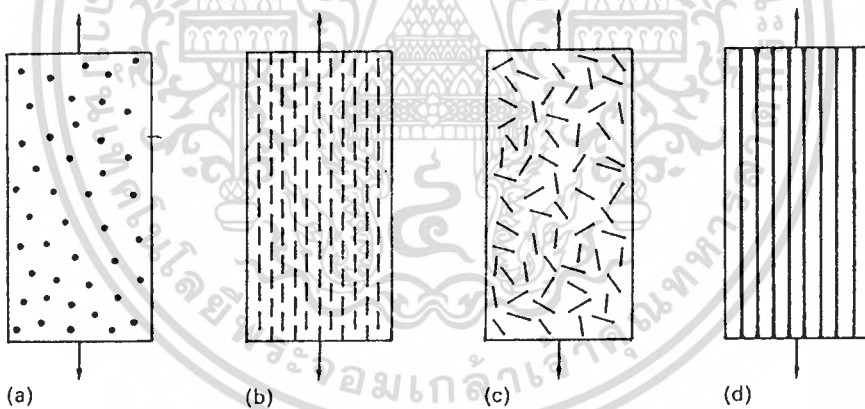
2. เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) [20]

เทอร์โมพลาสติกจะละลายได้ดีในตัวทำละลายบางชนิด เมื่อถูกความร้อนสามารถหลอมตัวได้ และเมื่อเย็นลงก็จะแข็งตัว สามารถทำให้หลอมและแข็งตัวหลาย ๆ ครั้ง โดยไม่ทำให้สมบัติทางเคมีเปลี่ยนแปลงไป อาจแยกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มเทอร์โมพลาสติกอสัณฐาน (Amorphous thermoplastic) และเทอร์โมพลาสติกที่มีผลึกบางส่วน (Semi-crystalline thermoplastic)

เทอร์โมพลาสติกจะไม่เกิดการเชื่อมโยง ดังนั้นความแข็งแรงและความแข็งของเมตริกซ์ที่ได้นั้น เป็นผลโดยตรงจากสมบัติของหน่วยซ้ำ หรือมอนอเมอร์ และน้ำหนักโมเลกุลที่สูง เทอร์โมพลาสติกอสัณฐานจะมีการพันกันของสายโซ่โมเลกุล ซึ่งจะส่งผลคล้ายกับการเกิดการเชื่อมโยง และในพอลิเมอร์ที่สามารถตกผลึกได้ก็จะมี การจัดเรียงตัวที่ดี ทำให้เมตริกซ์มีความแข็งแรง สมบัติของเทอร์โมพลาสติกจะขึ้นกับอัตราการเกิดผลึก สัณฐานวิทยา และการจัดเรียงตัวของผลึก ซึ่งเหล่านี้จะขึ้นกับสภาวะในการผลิต ตัวอย่างเทอร์โมพลาสติก เช่น พอลิเอไมด์ พอลิสไตรีน พอลิพรอพิลีน พอลิเอทิลีน เป็นต้น

2.2.2 ส่วนเสริมแรง (Reinforcement phase)

ส่วนเสริมแรงมีลักษณะรูปร่างได้หลายแบบ อาจเป็นแผ่น เส้นใย หรือ อนุภาคเล็ก ๆ ก็ได้ ดังตัวอย่างรูปที่ 2.2 ตัวเสริมแรงที่นิยมใช้ส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นเส้นใย (fiber) อาจจะเป็นเส้นใยต่อเนื่อง หรือเส้นใยสั้น ตัวอย่างเส้นใยที่ใช้เสริมแรงในพอลิเมอร์คอมพอสิต เช่น เส้นใยแก้ว เคฟลาร์ หรือเส้นใยธรรมชาติต่าง ๆ



รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างคอมพอสิตที่มีส่วนเสริมแรงต่างกัน [17]

- (a) ส่วนเสริมแรงเป็นอนุภาค จัดเรียงตัวแบบสุ่ม
- (b) ส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยสั้น จัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน
- (c) ส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยสั้น จัดเรียงตัวแบบสุ่ม
- (d) ส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยยาว จัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน

คุณสมบัติของเส้นใยที่เหมาะสมสำหรับใช้เสริมแรง ควรจะมีลักษณะดังนี้ [21]

1. เส้นใยควรมีโมดูลัสยืดหยุ่นสูง เพื่อประสิทธิภาพในการเสริมแรง
2. เส้นใยควรมีความแข็งแรงสูง
3. ความแข็งแรงของเส้นใยแต่ละเส้นไม่ควรแตกต่างกันมาก
4. เส้นใยควรจะเสถียร และรับความแข็งแรง ขณะจัดเก็บและขึ้นรูปได้
5. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และพื้นผิวของเส้นใย ควรจะมีลักษณะเหมือนกัน

ปัจจัยสำคัญของเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของคอมพอสิต ได้แก่ [21]

1. เส้นผ่านศูนย์กลาง
2. ความยาวของเส้นใย
3. ปริมาตรของเส้นใย
4. ลักษณะรูปร่างของเส้นใย
5. การจัดเรียงตัวของเส้นใยในคอมพอสิต

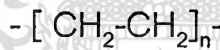
พอลิเมอร์คอมพอสิตแต่ละชนิดที่ประกอบด้วยเมตริกซ์หรือสารเสริมแรงที่แตกต่างกัน จะมีสมบัติต่างกัน โดยขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ตัวอย่างสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตที่มีเมตริกซ์ หรือสารเสริมแรงที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 2.1 โดยส่วนผสมของคอมพอสิตที่ใช้ในการทดสอบจะประกอบด้วย พอลิเมอร์เมตริกซ์ร้อยละ 57.5 สารเสริมแรงร้อยละ 37.5 และสารช่วยยึดติด คือ PP ที่ปรับปรุงด้วยมาลิเอท (maleated PP) ร้อยละ 5 ทำการทดลองเปรียบเทียบสารเสริมแรง 3 ชนิด ได้แก่ ผงไม้ (WF) เส้นใยเซลลูโลส (BW-40) และหนังสือพิมพ์เก่า (ONP) พบว่า ความทนแรงดึงจะเพิ่มขึ้นเมื่อเติมสารเสริมแรงเหล่านี้ใน PP และ HDPE เส้นใยเซลลูโลส และหนังสือพิมพ์เก่า จะให้สมบัติด้านการดึงดีกว่าผงไม้ สารตัวเติมจะช่วยให้เพิ่มความทนแรงกระแทกใน PP แต่ใน HDPE จะลดลง อาจเนื่องมาจากสารช่วยยึดติดที่ใช้เข้ากับ PP ได้ดีกว่า HDPE [22]

ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมพอสิต และพอลิเมอร์บริสุทธิ์ [22]

พอลิเมอร์	สารตัวเติม	พลังงานตีกระแทก (J/m)		การทดสอบการดึง	
		มีรอยบาก	ไม่มีรอยบาก	มอดุลัส (Gpa)	ความทนแรงดึง (Mpa)
PP ใหม่	WF	18.7	72	3.72	34.1
HDPE ใช้แล้ว	WF	36.4	81	2.60	27.7
PP ใหม่	BW-40	24.7	114	4.80	48.2
HDPE ใช้แล้ว	BW-40	30.7	68	3.78	36.3
PP ใหม่	ONP	20.8	109	4.89	47.1
HDPE ใช้แล้ว	ONP	28.6	73	3.79	37.6
PP ใหม่	None	16.0	640	-	33.1
HDPE บริสุทธิ์	None	130.0	-	-	29.6

2.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) [23]

สูตรโครงสร้าง



พอลิเมอร์ชนิดนี้มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงเกือบตลอด จะมีสาขาโซ่บ้างแต่น้อยมาก อาจเรียกว่าพอลิเอทิลีนความดันต่ำ เพราะกระบวนการเตรียมพอลิเมอร์นี้โดยทั่วไปใช้ความดันต่ำมาก พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงนี้ผลิตขึ้นในเชิงการค้าตั้งแต่ปี ค.ศ.1955

2.3.1 วิธีการเตรียมพอลิเมอร์ในทางอุตสาหกรรม มีหลายวิธีที่สำคัญได้แก่

2.3.1.1 กระบวนการซีเกลอร์ (Ziegler process)

กระบวนการนี้ใช้ตัวเร่งของซีเกลอร์-เนตตา ที่ใช้ทั่วไป ได้แก่ ไทเทเนียมเตตระคลอไรด์อะลูมิเนียมอัลคิล ที่ความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศเพียงเล็กน้อย ประมาณ 2-4 บรรยากาศ และอุณหภูมิประมาณ 50-70 องศาเซลเซียส ทำในตัวกลางเฉื่อย เช่น เฮปเทน หรือ โทลูอีน และในบรรยากาศเฉื่อย เช่น ในบรรยากาศของไนโตรเจน เนื่องจากพอลิเอทิลีนไม่ละลายในตัวกลางเฉื่อย ดังนั้นเมื่อเกิดเป็นพอลิเมอร์แล้ว จะตกตะกอนออกมา พอลิเมอร์ที่ได้ จะต่างจากพอลิเมอร์ที่เตรียมจากกระบวนการใช้ความดันสูงมาก คือมีกิ่งบ้างเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.2 กระบวนการฟิลลิปส์ (Phillips process)

กระบวนการนี้ใช้โครเมียมออกไซด์ที่อยู่บนซิลิกา หรือ อะลูมินา เป็นตัวเร่งในตัวกลางเฉื่อย เช่น ไฮโดรเจนเฮกเซน สภาวะของปฏิกิริยาอยู่ระหว่างกลางของกระบวนการความดันสูงที่ใช้เตรียมพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำและกระบวนการซีเกลอร์ ความดันที่ใช้ทั่วไปประมาณ 30-40 บรรยากาศ และอุณหภูมิ 90-160 องศาเซลเซียส พอลิเอทิลีนที่ได้มีโครงสร้างเชิงเส้นตรงเกือบสมบูรณ์

2.3.1.3 กระบวนการสแตนดาร์ด ออยล์ (Standard oil process)

กระบวนการนี้คล้ายคลึงกับกระบวนการฟิลลิปส์มาก ตัวเร่งที่ใช้ได้แก่ ออกไซด์ของโลหะ เช่น โมลิบดีนัมไดออกไซด์ บินอะลูมินา หรือไทเทเนียมไดออกไซด์ หรือเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ ความดันที่ใช้ประมาณ 40-100 บรรยากาศ และอุณหภูมิของปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 200-300 องศาเซลเซียส พอลิเมอร์ที่ได้เช่นเดียวกับพอลิเมอร์ที่ได้จากกระบวนการฟิลลิปส์ คือมีโครงสร้างเชิงเส้นตรงเกือบสมบูรณ์

2.3.2 สมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์

เนื่องจากพอลิเมอร์ที่ได้มีโครงสร้างเชิงเส้นตรงเกือบตลอด โพลิเมอร์จึงมีความเป็นระเบียบมากเป็นเหตุให้พอลิเมอร์นี้มีความเป็นผลึกสูงมาก ความหนาแน่นและจุดหลอมตัวก็สูงกว่าพอลิเอทิลีนที่เตรียมโดยกระบวนการใช้ความดันสูงทั่วไป ความหนาแน่นจะอยู่ในช่วง 0.95-0.97 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดหลอมตัวประมาณ 135 องศาเซลเซียส ความเหนียว ความทนแรงดึงสูงกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

ปริมาณมากกว่าร้อยละ 40 ของพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นสูงใช้ในการผลิตขวดพลาสติกและภาชนะบรรจุอื่นๆ เช่น ภาชนะบรรจุกรดและเบส เคมีภัณฑ์ สารชำระล้าง อีกประมาณร้อยละ 20 ใช้ทำของใช้ในครัวและของเด็กเล่น ส่วนที่เหลือใช้ทำฟิล์มเพื่อหุ้มของและอาหาร ถุงพลาสติก (ถุงร้อน) หุ้มสายไฟฟ้า ทำสายยาง และอื่นๆ

2.4 ชานอ้อย

เส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุอินทรีย์ที่สำคัญ พบได้ง่ายทั่วไปตามธรรมชาติและมีราคาถูกกว่าเส้นใยสังเคราะห์ โครงสร้างของเส้นใยธรรมชาติจะประกอบด้วยเซลลูโลส (Cellulose) เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ยังมี เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) และสารประกอบอื่น ๆ เส้นใยธรรมชาติแต่ละชนิดจะมีส่วนประกอบและสมบัติแตกต่างกัน ดังตัวอย่างตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบและสมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติบางประเภท [17]

	ความหนาแน่น (Mg/m ³)	เซลลูโลส (%)	เฮมิเซลลูโลส (%)	ลิกนิน (%)
ไม้ (Wood)	1.5	40	40	20
ปอกระเจา (Jute)	1.3	72	14	14
ป่าน (Hemp)	-	71	22	7
ป่านศรนารายณ์ (Sisal)	0.7	74	-	26

	มอดุลัส ของยัง (GPa)	ความทนแรง ดึง (MPa)	มอดุลัสจำเพาะ [(GPa)/(Mg/m ³)]	ความแข็งแรง จำเพาะ [(MPa)/(Mg/m ³)]
ไม้	-	500	-	333
ปอกระเจา	55.5	442	43	340
ป่าน	-	460	-	-
ป่านศรนารายณ์	17	530	24	757

เส้นใยธรรมชาติที่รู้จักกันอย่างกว้างขวาง คือ เส้นใยฝ้าย (Cotton) ชานอ้อย (Bagasse) ป่านศรนารายณ์ (Sisal) ปอกระเจา (Jute) เป็นต้น ฝ้ายเจริญเติบโตได้ดีในแถบตะวันออกเฉียงใต้ของอเมริกา เมื่อผสมเส้นใยฝ้ายกับพลาสติกจะช่วยเพิ่มสมบัติความทนแรงกระแทก และช่วยให้ขึ้นรูปได้ง่าย เส้นใยป่านศรนารายณ์เป็นเส้นใยที่แข็งแรงแต่ไม่ทนต่อความชื้น พบมากแถบแอฟริกาตะวันออกเฉียงและอินโดนีเซีย เส้นใยปอกระเจาจะไม่แข็งแรงเท่าเส้นใยป่านศรนารายณ์ แต่นิยมใช้เนื่องจากมีราคาถูก ในบางประเทศมีการใช้เส้นใยปอกระเจาเสริมแรงในพอลิเอสเตอร์ เพื่อใช้ในงานก่อสร้างอาคาร สำหรับชานอ้อยเป็นกากเหลือจากการผลิตน้ำตาล สามารถนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในพลาสติกได้เช่นกัน

ชานอ้อยเป็นเส้นใยธรรมชาติที่เป็นผลพลอยได้จากการผลิตน้ำตาล ในปีหนึ่ง ๆ มีชานอ้อยที่ผลิตได้ในประเทศไทยไม่ต่ำกว่า 4 ล้านตัน ซึ่งร้อยละ 30 ของชานอ้อยเหล่านี้ใช้เป็นแหล่งให้พลังงานความร้อนในโรงงานน้ำตาลเอง ส่วนชานอ้อยที่เหลืออีกจำนวนมากก็เป็นแหล่งใหญ่ของเส้นใยที่ใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อทดแทนไม้ใบกว้างในอุตสาหกรรมการผลิตวัสดุได้หลายประเภท เช่น การผลิตเยื่อและกระดาษ การผลิตแผ่นไม้ประดิษฐ์ เป็นต้น [24]

2.4.1 ส่วนประกอบทางเคมีและฟิสิกส์ของขานอ้อย [25-27]

ขานอ้อยมีหลายสี แต่โดยทั่วไปจะเป็นสีเหลืองอมเทาอ่อน ๆ จนถึงสีเขียวอ่อน มีขนาดค่อนข้างใหญ่และมีรูปแบบไม่แน่นอน ขึ้นกับการบด ขานอ้อยจะประกอบด้วยสองส่วนที่แยกกันอย่างเห็นได้ชัด คือ ส่วนแรกเป็นชั้นผนังหนาและจะค่อนข้างยาวซึ่งเป็นส่วนของเส้นใยที่ได้จากเปลือกนอก และมัดของท่อลำเลียงที่กระจายอยู่ภายในลำต้น ส่วนที่สองเป็นส่วนที่มีความสำคัญที่ได้จากเซลล์ที่มีผนังบางของพาราไคมา (Parenchyma) ของลำต้นซึ่งทำหน้าที่เก็บสะสมน้ำตาลอ้อย ส่วนประกอบของทั้งหมดของขานอ้อยในส่วนของเส้นใย และแกนกลางได้แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงการวิเคราะห์ทางเคมีของขานอ้อย(คิดเป็นร้อยละ โดยปราศจากความชื้น) [25]

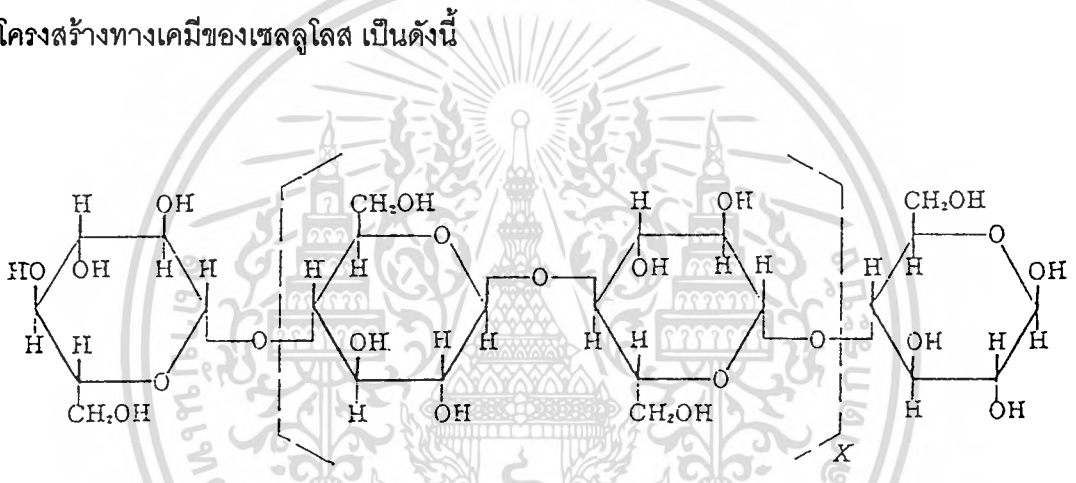
ส่วนประกอบ	ขานอ้อยทั้งหมด		เส้นใย	แกนกลาง
	(a)	(b)		
เซลลูโลส	40.00	46.00	56.60	55.40
กัม (Gums : araban , galactan , xylan)	24.40	24.50	26.11	29.30
โปรตีน	1.80			
น้ำตาล				
ซูโคส	14.00			
กลูโคส	1.40			
กรด	0.40			
ไขมันและแว็กซ์	0.60	3.45	2.25	3.55
เถ้า	2.40	2.40	1.30	3.02
ลิกนิน	15.00	19.95	19.15	22.30
ซิลิกา		2.00	0.46	2.42

เส้นใยอ้อยมีลักษณะคล้ายกับเส้นใยของฝ้าย และขนสัตว์ คือมีลักษณะโครงสร้างขดเป็นวง มีความยาวโดยเฉลี่ยประมาณ 1.0-4.0 มิลลิเมตร และกว้าง 0.010-0.04 มิลลิเมตร ลักษณะของเส้นใยนั้นขึ้นกับชนิดของขานอ้อย

สำหรับส่วนประกอบทั่วไปของชานอ้อยโดยประมาณคือ ความชื้นร้อยละ 49 ของแข็งที่ละลายได้ซึ่งส่วนใหญ่ได้แก่น้ำตาล ร้อยละ 6 ของแข็งที่ละลายไม่ได้หรือส่วนที่เป็นเส้นใย (Fiber) ร้อยละ 45 โดยส่วนที่เป็นเส้นใยนี้จะไม่ละลายน้ำ และจะประกอบด้วย เซลลูโลส เพนโตแซน (Pentosans) และ ลิกนิน

2.4.1.1 เซลลูโลส [26,28,29]

เซลลูโลสเป็นพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharides) เชิงเส้นตรง ที่ประกอบด้วยหน่วยซ้ำ ๆ กัน มีสูตรโมเลกุลทั่ว ๆ ไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ เป็นโครงสร้างในเนื้อเยื่อพืช โดยจะพบร่วมกับ ลิกนิน เพนโตแซน กัม แทนนิน ไขมัน สารที่ทำให้เกิดสี เป็นต้น เซลลูโลสจะมีโมเลกุลยาวและแข็ง โดยเซลลูโลสในชานอ้อยจะมีสายโซ่พอลิเมอร์ประมาณ 2,000-3,000 หน่วย โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส เป็นดังนี้



เซลลูโลสประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลถึง 3 หมู่ สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสมีมาก และโครงสร้างของเซลลูโลสยังจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ จึงทำให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูง อุณหภูมิหลอมตัวจะสูงมาก มักจะเกิดการสลายตัวก่อนถึงอุณหภูมิหลอมตัว และมีความสามารถในการละลายต่ำ เซลลูโลสธรรมชาติจะมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยแตกต่างกัน การกระจายน้ำหนักโมเลกุลของเซลลูโลสมีความสำคัญต่อสมบัติทางกายภาพ ส่วนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะส่งผลให้คุณสมบัติทางกายภาพไม่ดี ในทางอุตสาหกรรมจะหาน้ำหนักโมเลกุลโดยประมาณได้โดยการทดสอบความหนืด

สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของเซลลูโลส

1) การดูดซับความชื้น

เซลลูโลสจะมีการดูดหรือคายน้ำและของเหลวอื่น ๆ ที่อยู่ในบรรยากาศรอบ ๆ จนกระทั่งถึงสมดุลย์ ซึ่งสมดุลของปริมาณความชื้นของเซลลูโลสจะเปลี่ยนไปตามความชื้นสัมพัทธ์ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรยากาศรอบ ๆ นั้น ปริมาณความชื้นของเซลลูโลสมีผลต่อคุณสมบัติบางประการ เช่น ความทนแรงดึง ของเส้นใยฝ้ายจะมากขึ้นเมื่อความชื้นสูงขึ้น แต่เส้นใยเรยอนจะมีค่าลดลง ส่วนคุณสมบัติการนำไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น

2) การละลายและความหนืด

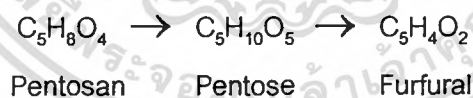
เซลลูโลสไม่ละลายในน้ำ แต่จะละลายในกรดแร่เข้มข้น เช่น กรดซัลฟูริกเข้มข้น ร้อยละ 72 กรดไฮโดรคลอริก ร้อยละ 40 และกรดฟอสฟอริก ร้อยละ 85 เป็นต้น เซลลูโลสจะเกิดไฮโดรไลซิสอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิห้อง แต่จะหยุดที่อุณหภูมิต่ำ สารละลายของเกลือบางชนิดที่เข้มข้น เช่น สังกะสีคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 72 จะทำให้เซลลูโลสบวมตัวและบางที่จะทำให้เซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ๆ ละลายได้ ความหนืดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของเซลลูโลสและอนุพันธ์ โดยความหนืดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มข้นของเซลลูโลสเพิ่มขึ้น

3) ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของเซลลูโลสที่เป็นเส้นใยเดี่ยวจะไม่เป็นค่าแน่นอน ค่าเฉลี่ยของเส้นใยเซลลูโลสจะแปรตามแหล่งที่มา และอาจเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการปรับปรุงทางเคมี

2.4.1.2 เพนโตแซน [25,29]

เพนโตแซนเป็นรูปแบบหนึ่งของเฮมิเซลลูโลส สามารถละลายน้ำได้ เฮมิเซลลูโลสจะประกอบด้วยหน่วยน้ำตาลเพนโตสมากกว่ากลูโคส และมีค่าดีกรีของพอลิเมอร์ต่ำกว่าเซลลูโลส โดยมีค่าประมาณ 40 หน่วย เมื่อไฮโดรไลซิสเพนโตแซนจะได้ ไซโลส (Xylose) อะราบิโนส (Arabinose) และกรดยูโรนิก (Uronic acid) แต่ถ้าต้มด้วยกรดเกลือ เพนโตแซนจะเปลี่ยนเป็นเฟอฟูรัล (Furfural)



2.4.1.3 ลิกนิน

ลิกนินเป็นสารประกอบเชิงซ้อน มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มักพบอยู่ร่วมกับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส มีสูตรโมเลกุล $\text{C}_{49}\text{H}_{52}\text{O}_{14}$ โครงสร้างทางเคมีจะเป็นวงแหวนอะโรมาติกขนาดใหญ่ ประกอบด้วยวงเบนซิน และหมู่ฟีนอลที่มีและไม่มีหมู่เมทิล ลิกนินไม่ละลายน้ำ ไม่มีสมบัติทางการยึดหยุ่น พืชที่มีลิกนินมากจะมีความแข็งแรงคงทน

2.4.2 การนำไปใช้ประโยชน์ [26,30]

ขานอ้อยเป็นวัสดุที่สามารถถูกย่อยสลายได้ง่าย ดังนั้นจึงมีการใช้เทคนิคพิเศษในการพัฒนาการเก็บรักษาขานอ้อย วิธีที่ใช้กันโดยทั่วไปคือการไล่ความชื้นออกไปประมาณร้อยละ 50 ของความชื้นที่มีอยู่ และเก็บไว้กลางแจ้งที่อากาศถ่ายเทสะดวก ในโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล ส่วนมากมักจะใช้ขานอ้อยเป็นเชื้อเพลิง จากการทดลองพบว่าขานอ้อย 1 กิโลกรัม สามารถให้ความร้อนได้ถึง 1,920 กิโลคัลลอรี่ แต่เมื่อเผาขานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงจะมีควันและเขม่ามาก ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมเป็นพิษโดยเฉพาะในบริเวณใกล้เคียงกับโรงงาน นอกจากนี้ขานอ้อยยังสามารถใช้ผลิตเป็นพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ ได้เช่น ใช้ผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า เป็นขานอ้อยอัดแท่ง ถ่านอัดแท่ง และผลิตเป็นเชื้อเพลิงเหลว เป็นต้น ในด้านการเกษตรขานอ้อยถูกใช้เป็นปุ๋ยคลุมดิน ใช้เลี้ยงสัตว์ แต่อย่างไรก็ตามยังคงเหลือขานอ้อยในปริมาณมาก จึงได้มีการพัฒนาขานอ้อยเพื่อใช้ในลักษณะอื่น โดยขานอ้อยที่ถูกบดจะใช้เป็นสารตัวเติมในลักษณะเป็นเศษไม้ผสมในคอนกรีต ทำวัสดุก่อสร้าง ทำไฟเบอร์บอร์ด ใช้แทนไม้และไม้อัดเพื่อผลิตเป็นเครื่องเรือน ผลิตเป็นเยื่อกระดาษ เช่น กระดาษห่อซอง กระดาษพิมพ์ กระดาษชำระ และกระดาษหนังสือพิมพ์ เป็นต้น

2.5 การปรับปรุงสมบัติการยึดติด

สมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไม่ได้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเส้นใยและเมตริกซ์เท่านั้น แต่ยังขึ้นกับลักษณะผิวสัมผัสของเส้นใยกับเมตริกซ์ด้วย การยึดติดระหว่างพอลิเมอร์ และ เส้นใยจะเป็นปัจจัยสำคัญ ในการกำหนดสมบัติของคอมพอสิต ซึ่งคอมพอสิตแต่ละระบบจะมีธรรมชาติของการยึดติดต่างกันตามลักษณะของเส้นใยและเมตริกซ์แต่ละชนิด

2.5.1 กลไกในการยึดติด แบ่งได้ดังนี้ [17]

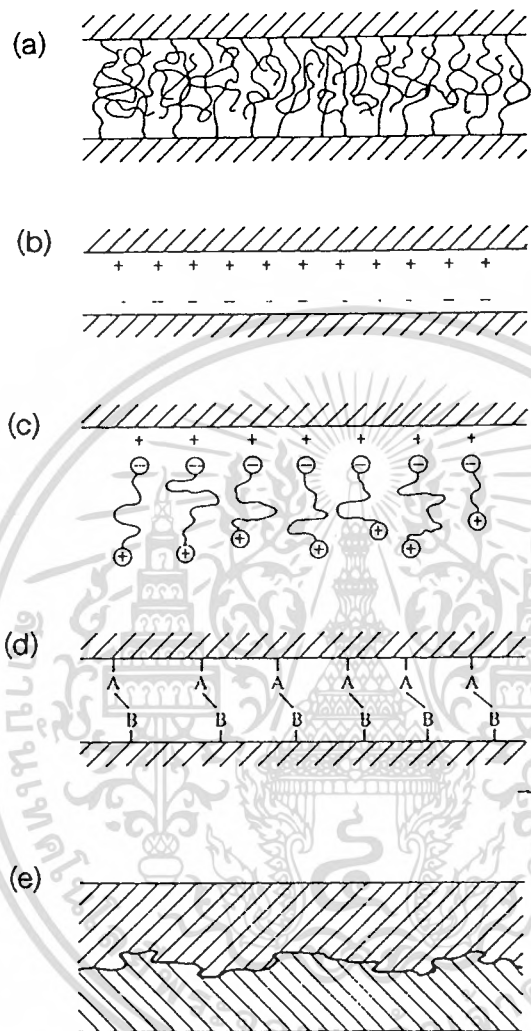
1) การยึดติดเชิงกล (Mechanical bonding)

เกิดจากเส้นใยมีความขรุขระ ซึ่งเมตริกซ์จะสามารถกระจายไปบนพื้นผิวและเข้าไปตามร่องของเส้นใยได้ เกิดแรงยึดเหนี่ยวเชิงกล (Interlocking) ขึ้น สามารถทำได้โดยนำเส้นใยไปทำการกัดกร่อน แรงยึดเหนี่ยวจะขึ้นอยู่กับความขรุขระของพื้นผิวเส้นใย

2) การยึดติดด้วยประจุไฟฟ้า (Electrostatic bonding)

การยึดติดจะเกิดระหว่างเมตริกซ์และเส้นใยที่พื้นผิวหนึ่งมีประจุเป็นบวกและอีกพื้นผิวหนึ่งมีประจุเป็นลบ จะเกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุที่ต่างกัน การยึดติดขึ้นกับความแตกต่างของประจุแต่

ละพื้นผิว แต่แรงยึดติดทางไฟฟ้านี้จะเกิดในช่วงสั้นๆ และระยะห่างของพื้นผิวทั้งสองต้องน้อยมาก ดังนั้นสารปนเปื้อนที่ติดที่ผิวและก๊าซที่ถูกกักอยู่ระหว่างพื้นผิวจะมีผลต่อกลไกการยึดติดนี้



รูปที่ 2.3 แสดงกลไกแบบต่างๆ ในการยึดติดระหว่างพื้นผิว [20]

- (a) การยึดติดแบบแพร่ผ่าน
- (b),(c) การยึดติดด้วยประจุไฟฟ้า
- (d) การยึดติดทางเคมี
- (e) การยึดติดเชิงกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) การยึดติดแบบแพร่ผ่าน (Interdiffusion bonding)

เกิดระหว่าง 2 พื้นผิวที่มีการแพร่ของโมเลกุลพอลิเมอร์บนพื้นผิวหนึ่งไปยังโครงสร้างโมเลกุลของอีกพื้นผิวหนึ่ง ความแข็งแรงของแรงยึดติดนี้จะขึ้นอยู่กับความยืดหยุ่น (Flexibility) ความสามารถในการเคลื่อนที่ และการเกี่ยวพันกันของสายโซ่พอลิเมอร์

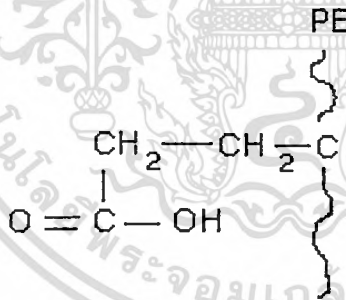
4) การยึดติดทางเคมี (Chemical bonding)

การยึดติดทางเคมีจะเกิดจากพันธะระหว่างหมู่ฟังก์ชันบนผิวเส้นใย และหมู่ที่สามารถเข้ากันได้บนเมตริกซ์ ความแข็งแรงของการยึดติดจะขึ้นกับจำนวนพันธะต่อหน่วยพื้นที่และชนิดของพันธะ วิธีที่จะช่วยให้เกิดพันธะเคมีอาจทำได้โดยเติมสารช่วยยึดติด (Coupling agent) เช่น ซิลาน (Silane) ซึ่งมักจะใช้เป็นสารช่วยยึดติดสำหรับเส้นใยแก้วกับพอลิเมอร์ โดยปลายข้างหนึ่งจะเกิดพันธะกับเส้นใย ส่วนปลายอีกข้างก็จะเกิดพันธะกับพอลิเมอร์

2.5.2 สารช่วยยึดติดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่

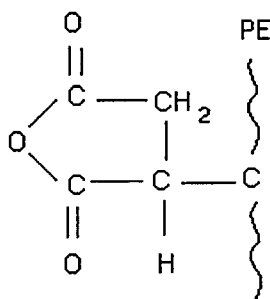
Acrylic Acid modified High Density Polyethylene (PE-g-AA)

สูตรโครงสร้าง



Maleic Anhydride modified High Density Polyethylene (PE-g-MAH)

สูตรโครงสร้าง

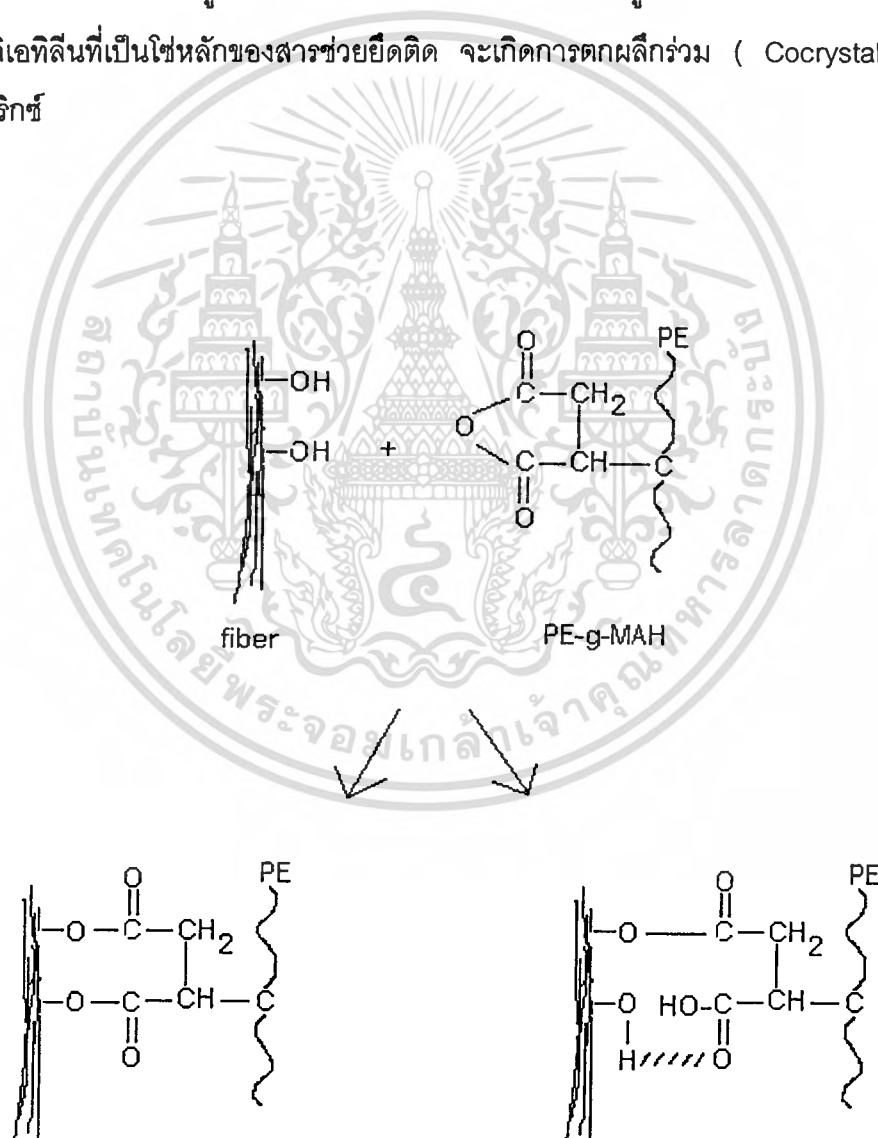


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PE-g-AA และ PE-g-MAH ใช้เป็นสารช่วยยึดติดทางเคมีสำหรับพอลิเอทิลีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วหรือไมกา ซึ่งจะช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อนให้ดีขึ้น ช่วยให้เกิดการยึดติดที่ดีในสารหลายประเภท และ PE-g-MAH ยังสามารถใช้เป็นสารช่วยผสมสำหรับพอลิเมอร์ผสมของพอลิเอทิลีนกับพอลิเมอร์ที่มีตัวอื่น ๆ เช่น พอลิเอไมด์ ทำให้ขึ้นรูปได้ง่ายและสมบัติเชิงกลดีขึ้น

กลไกที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ PE-g-AA หรือ PE-g-MAH ช่วยในการยึดติดระหว่างพอลิเอทิลีนกับเส้นใยเซลลูโลส ประกอบด้วย 2 ปฏิกิริยา คือ

- มาลิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) หรือ กรดอะคริลิก จากสารช่วยยึดติด จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับหมู่ฟังก์ชันบนผิวของเส้นใย ดังตัวอย่างรูปที่ 2.4
- พอลิเอทิลีนที่เป็นโซ่หลักของสารช่วยยึดติด จะเกิดการตกผลึกร่วม (CocrySTALLIZE) กับเมตริกซ์



รูปที่ 2.4 แสดงการเกิดปฏิกิริยาของเส้นใยเซลลูโลสที่ทำการปรับสภาพผิวด้วย PE-g-MAH

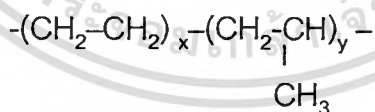
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การปรับปรุงสมบัติความทนแรงกระแทก

การผลิตพอลิเมอร์คอมพอสิต มักมีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงของพอลิเมอร์ แต่ข้อเสียคือ วัสดุพอลิเมอร์นั้นจะมีสมบัติด้านความเหนียวลดลง ทำให้สามารถทนแรงกระแทกได้ต่ำ การปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์เพื่อให้ทนแรงกระแทกได้สูง ทำโดยการเติมสารช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทก (Impact modifier) สารจำพวกนี้จะสามารถช่วยลดความเสียหายที่เกิดจากความเค้นที่ได้รับ โดยอาจจะไปช่วยกระตุ้นให้พอลิเมอร์เมตริกซ์ต่อต้านการเสียรูปซึ่งไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในสภาวะที่ไม่ได้ปรับปรุง หรืออาจจะไปช่วยขยายขีดความสามารถในการเสียรูปของพอลิเมอร์เมตริกซ์ ซึ่งโดยปกติสารช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทกมักจะเป็นสารพวกอีลาสโตเมอร์ ที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะเป็นแก้วต่ำ หรืออาจเป็นโคพอลิเมอร์แบบบล็อก ซึ่งจะประกอบด้วยสายโซ่พอลิเมอร์ที่แตกต่างกันอย่างน้อยสองส่วน โดยส่วนหนึ่งจะเป็นส่วนที่แข็ง (Hard segment) และอีกส่วนเป็นส่วนที่อ่อน (Soft segment) ซึ่งทั้งสองส่วนจะเชื่อมกันอยู่ด้วยพันธะโควาเลนต์ ในขณะที่ทำการสังเคราะห์ ส่วนที่แข็งซึ่งมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วสูงกว่าอุณหภูมิห้อง จะมีลักษณะคล้ายกับการเกิดการเชื่อมโยงทางกายภาพ ดังนั้นที่อุณหภูมิห้องวัสดุจะมีลักษณะเหมือนกับยางที่ผ่านการเชื่อมโยงแล้ว แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการขึ้นรูปสูงขึ้นจนเพียงพอที่จะทำให้ส่วนที่แข็งเกิดการหลอมเหลวแล้ว สายโซ่ก็จะเกิดการคลายตัวและเกิดการไหลได้ [31] สารตัวเติมที่ใช้ปรับปรุงความทนทานต่อแรงกระแทกในงานวิจัยนี้ ได้แก่

2.6.1 เอทิลีน พรอพิลีน ไดอีน เทอร์พอลิเมอร์ (Ethylene propylene diene terpolymer ; EPDM) [32-34]

สูตรโครงสร้าง



ยาง EPDM เป็นยางที่มีความหนาแน่นต่ำที่สุด มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ประมาณ -70 องศาเซลเซียส ผลิตมาจากกระบวนการซีเกลอร์-เนตตา โดยในระหว่างทำการโคพอลิเมอร์ไรเซชันของเอทิลีนและพรอพิลีน จะมีการเติมมอนอเมอร์ตัวที่สาม ซึ่งก็คือสารพวกไดอีน (Diene) ลงไปทำให้ยางไม่อิมตัว มีพันธะคู่อยู่ภายนอกสายโซ่หลัก เพื่อให้สามารถเกิดการเชื่อมโยงได้ ไดอีนที่นิยมใช้ ได้แก่ ทราน-1,4 เฮกซะไดอีน (Trans-1,4-hexadiene) เอทิลิดีนนอร์บอเนน (Ethylidene norbornene) และ ไดไซโคลเพนทาไดอีน (Dicyclopentadiene) อัตรา

ส่วนระหว่างเอทิลีนต่อพวอพิลีนสามารถเปลี่ยนแปลงได้ โดยมักจะอยู่ในช่วงประมาณ 50/50 ถึง 75/25

2.6.1.1 กระบวนการพอลิเมอไรเซชันอาจทำได้ดังนี้

1) พอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย

มอนอเมอร์จะถูกเติมลงไปโดยสารละลายไฮโดรคาร์บอน และปฏิกิริยาจะเริ่มขึ้นเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงไป พอลิเมอร์จะละลายอยู่ในสารละลาย หลังการพอลิเมอไรเซชันพอลิเมอร์จะถูกแยกออกจากสารละลายโดยจะแขวนลอยอยู่ในน้ำ การควบคุมน้ำหนักโมเลกุลสามารถทำได้โดยการเติมไฮโดรเจนหรือสังกะสีอัลคิล

2) พอลิเมอไรเซชันแบบแขวนลอย

จะใช้พวอพิลีนซึ่งอยู่ในรูปของเหลวเป็นตัวกลางในการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากระบบนี้จะไม่มีการละลาย พอลิเมอร์ที่ได้จะแขวนลอยอยู่ในพวอพิลีน กระบวนการนี้จะได้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าและผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความเฉพาะเจาะจงมากกว่า ข้อดีด้านอื่นก็คือ กระบวนการนี้จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในอัตราที่น้อยกว่า สามารถผลิตพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ๆ ได้ สามารถควบคุมโครงสร้างและสมบัติต่าง ๆ ได้ดีกว่า

2.6.1.2 สมบัติของ EPDM

ยาง EPDM จะทนต่อสารละลายที่มีขี้ผึ้ง แต่จะละลาย หรือพองตัวในสารละลายไฮโดรคาร์บอน และเนื่องจาก EPDM จะมีความอึดตัวในสายโซ่หลัก ดังนั้นจึงมีความทนทานต่อดินฟ้าอากาศ โอโซน ทนกรดและเบสได้ดี มีเสถียรภาพทางความร้อนมีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ สมบัติของ EPDM สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

● อัตราส่วนของเอทิลีนต่อพวอพิลีน

การกระจายตัวของมอนอเมอร์จะเป็นแบบสุ่ม จึงทำให้พอลิเมอร์ที่ได้ มีลักษณะเป็นอสัณฐาน โดยทั่วไปปริมาณเอทิลีนในพอลิเมอร์จะสามารถเปลี่ยนแปลงจากร้อยละ 75 ไปถึง 40 โดยน้ำหนัก พอลิเมอร์ที่มีปริมาณเอทิลีนสูง ๆ จะมีความเป็นผลึกอยู่บ้าง ซึ่งทำให้มีความแข็งแรงเริ่มต้นสูงกว่า และสามารถเติมสารตัวเติมหรือน้ำมันได้ในปริมาณมากกว่า ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความทนแรงดึงสูงกว่า สามารถขึ้นรูปเป็นเม็ดได้ดีกว่า และมีสมบัติด้านการอัดรีดที่ดี แต่ข้อเสียของการมีปริมาณเอทิลีนสูง ๆ คือ จะขึ้นรูปโดยลูกกลิ้งที่อุณหภูมิต่ำ ๆ ได้ยาก และที่อุณหภูมิต่ำจะมีสมบัติไม่ดี และทำการผสมยาก

- น้ำหนักโมเลกุล

น้ำหนักโมเลกุลโดยทั่ว ๆ ไปของ EPDM จะอยู่ในช่วง 200,000 – 300,000 ซึ่งน้ำหนักโมเลกุลของยาง มักจะรายงานอยู่ในรูปความหนืดของมูนนี่ (Mooney viscosity) EPDM จะทำการวัดความหนืดที่ 125 องศาเซลเซียส โดยค่าความหนืดจะมีการเปลี่ยนแปลงได้ตั้งแต่ 20 จนสูงถึง 100 พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ๆ มักจะมีน้ำมัน (Oils) ในปริมาณมาก ดังนั้นจึงไม่ควรให้โดนแสง เนื่องจากน้ำมันจะไปเร่งให้เกิดการเสื่อมสภาพโดยการออกซิเดชันได้ ข้อดีของการมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ก็คล้ายกับที่มีเอทิลีนสูง คือ มีความแข็งแรงสูง ทนแรงดึงได้ดี สามารถเติมสารตัวเติม และน้ำมันได้ในปริมาณมาก แต่ข้อเสียคือ จะขึ้นรูปยากกว่าและการกระจายตัวไม่ดี

- การกระจายน้ำหนักโมเลกุล (MWD)

MWD เป็นสมบัติสำคัญต่อการนำไปใช้งาน การรายงานค่า MWD จะรายงานอยู่ในรูปอัตราส่วนของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักต่อน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน (Mw/Mn) ซึ่งค่าที่ได้จะอยู่ในช่วง 2-5 พอลิเมอร์ที่มี MWD กว้าง จะสามารถขึ้นรูปได้ดี มีความแข็งแรงสูง สามารถประยุกต์ใช้งานได้มาก แต่อัตราการเชื่อมโยงจะเกิดช้าและความคงรูปขณะเชื่อมโยงต่ำ

- ชนิดและปริมาณของไดอินที่ใช้เป็นมอนอเมอร์

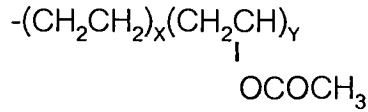
ในการผลิต EPDM จะเติมไดอินซึ่งไม่อิ่มตัวเข้าไปในสายโซ่ เพื่อให้เป็นตำแหน่งที่สามารถเกิดการเชื่อมโยง โดยไดอินที่ใช้จะมีหลายชนิด ซึ่งมีลักษณะพิเศษและโครงสร้างแตกต่างกันไป จะส่งผลต่อสมบัติของ EPDM ที่ได้ด้วย สำหรับปริมาณของไดอิน จะแบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ ซึ่งมีไอโอดีนัมเบอร์ (Iodine number) ระหว่าง 2-5 ระดับกลางมีค่าไอโอดีนัมเบอร์ 6-10 และระดับสูงมีไอโอดีนัมเบอร์ 16-20 การเพิ่มขึ้นของค่าไอโอดีนัมเบอร์จะทำให้อัตราการเชื่อมโยงสูงขึ้น

2.6.1.3 การนำไปใช้ประโยชน์

EPDM จัดว่าเป็นยางที่มีสมบัติดี เนื่องจากมีความต้านทานโอโซน ออกซิเดชัน ทนความร้อนและสารเคมี และยังมีสมบัติเป็นฉนวนที่ดี แต่จะมีความต้านทานต่อน้ำมันหรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนต่ำ ส่วนใหญ่ EPDM จะถูกใช้ในอุตสาหกรรมรถยนต์ แต่จะหลีกเลี่ยงในระบบที่ต้องสัมผัสกับน้ำมันโดยตรง สามารถใช้ทำฉนวน หุ้มสายไฟ ใช้ในงานก่อสร้าง ทำขอบประตู หน้าต่าง หรือทำแผ่นกันน้ำได้ ในสหรัฐอเมริกาพบว่า ร้อยละ 11 ของปริมาณ EPDM จะถูกใช้ในการทำยางรถยนต์ ร้อยละ 42 ใช้ทำผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ที่เกี่ยวกับรถยนต์ ร้อยละ 6 ใช้หุ้มสายไฟ ร้อยละ 20 ใช้เป็นตัวปรับปรุงพลาสติกอื่น ๆ และร้อยละ 14 ใช้ในงานอื่น ๆ เช่นกรอบประตู หน้าต่าง กันชน เป็นต้น

2.6.2 เอทิลีน ไวนิล อะซิเตต (Ethylene vinyl acetate ; EVA) [32,35]

สูตรโครงสร้าง



เอทิลีน ไวนิล อะซิเตต เตรียมได้จากพอลิเมอร์เซชันร่วมระหว่าง เอทิลีน กับ ไวนิลอะซิเตต

2.6.2.1 กระบวนการพอลิเมอร์เซชันทำได้ดังนี้

1) พอลิเมอร์เซชันแบบบัลค์

กระบวนการนี้จะใช้ความดันสูงเหมือนกับที่ใช้ในการผลิต LDPE โดยในขั้นตอนสุดท้ายจะผสมพอลิเมอร์ที่หลอมเหลวกับสารช่วยหล่อลื่น และสารต้านการเกิดออกซิเดชัน จากนั้นจะถูกทำให้เป็นเม็ด เพื่อใช้ในการกระบวนการผลิตพลาสติกในขั้นตอนต่อไป ปริมาณไวนิลอะซิเตต (VAc) ในโคพอลิเมอร์ที่ผลิตได้จากกระบวนการนี้จะมีตั้งแต่ร้อยละ 1.5-50 โดยน้ำหนักโมเลกุลของโคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีนี้จะเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 40,000 ที่ปริมาณ VAc ต่ำ ๆ จนถึง 20,000 ที่ปริมาณ VAc สูง ๆ

2) พอลิเมอร์เซชันแบบสารละลาย

กระบวนการนี้จะใช้ความดันในระดับปานกลาง ประมาณ 200-400 บาร์ จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณ VAc ในช่วงสูง ๆ ตั้งแต่ร้อยละ 30-50 โคพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ๆ จะใช้สำหรับการใช้งานที่พิเศษเท่านั้น ส่วนโคพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ๆ จะใช้ในงานเคลือบ ใช้เป็นสารตัวเติมในแว็กซ์ ใช้เป็นสารหล่อลื่นในยางและในเทอร์โมพลาสติกผสมอีกหลายชนิด

3) พอลิเมอร์เซชันแบบอิมัลชัน

กระบวนการนี้จะเหมือนกับการผลิต PVC เรซิน โดยมอนอเมอร์จะถูกกวนในน้ำ โดยใช้สารช่วยลดแรงตึงผิว และตัวริเริ่มอนุมูลอิสระ โคพอลิเมอร์ที่ได้จะมีปริมาณ VAc สูงมาก ถึงร้อยละ 60 จึงไม่จัดเป็นพวกเทอร์โมพลาสติก มักจะใช้งานในลักษณะของยางเนื่องจากมีปริมาณเจลสูงและมีกิ่งก้านสาขามากมาย

2.6.2.2 สมบัติของ EVA

ปริมาณ VAc จะเป็นตัวควบคุมความยืดหยุ่นของโคพอลิเมอร์ ถ้าปริมาณ VAc สูง ๆ จะสามารถดึงยืดได้ดี ซึ่งแสดงถึงสมบัติของยาง และความเป็นอสัณฐานของโคพอลิเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนโคพอลิเมอร์ที่มีปริมาณ VAc ต่ำ ๆ จะมีลักษณะภายนอกคล้ายกับ LDPE โดยผลิตภัณฑ์จะแข็ง แต่ถ้าปริมาณ VAc สูง ผลิตภัณฑ์จะมีความทนแรงดึงและมอดุลัสต่ำ แต่จะมีการดึงยืดได้สูง การผลิต VAc โคพอลิเมอร์ มีจุดมุ่งหมายในการปรับปรุงสมบัติในด้านต่าง ๆ ให้ดีกว่าโฮโมพอลิเมอร์ เช่น สมบัติด้านการต้านทานความเค้น ความเป็นขั้ว ความเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ผสม โดยโครงสร้างของ EVA จะช่วยเพิ่มการยึดติด ดังนั้น EVA จึงสามารถใช้เป็นตัวช่วยปรับปรุงในพอลิเมอร์ผสมได้ ซึ่งสมบัติด้านต่าง ๆ ของ EVA มีดังนี้

- สมบัติด้านความเหนียว

EVA จัดเป็นวัสดุที่มีความเหนียว สามารถทนแรงกระแทกที่อุณหภูมิต่ำ ๆ ได้ดี ในโคพอลิเมอร์ที่มี VAc ในปริมาณสูง ๆ ถึงร้อยละ 40-50 จะมีจุดแข็งตัวอยู่ในช่วงที่ต่ำมากประมาณ -20 ถึง -25 องศาเซลเซียส ซึ่งจะจัดพวกนี้เป็นพอลิเมอร์ออสฐาน EVA ที่มีค่าดรรชนีการหลอมเหลวต่ำและมีความหนาแน่นสูง จะมีสมบัติในการโค้งงอและยืดหยุ่นได้ดี เมื่อใช้งานเป็นเวลานาน ผลิตภัณฑ์ก็ยังคงอยู่ในสภาพเดิม EVA สามารถใช้ผสมใน PE เพื่อเพิ่มความสามารถในการโค้งงอได้

- สมบัติด้านการใช้งานด้านไฟฟ้า

การเพิ่มหมู่ VAc ซึ่งมีขั้วลงไปใน PE จะไปลดสมบัติความเป็นฉนวนของพอลิเมอร์ลง ดังนั้น EVA จะไม่ใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับโทรคมนาคมและด้านโทรทัศน์ซึ่งใช้ความถี่สูง ๆ แต่จะใช้ได้กับงานที่ใช้ความถี่ต่ำ ๆ เท่านั้น การเติมคาร์บอนแบล็คลงใน EVA จะช่วยเหนียวน้ำให้เกิดการนำไฟฟ้าได้ โดยสามารถเติมได้มากถึงร้อยละ 40 ของ EVA

- ความทนทานต่อสภาพการใช้งานและสิ่งแวดล้อม

EVA จะมีความทนทานต่อสภาพการใช้งานได้ดีกว่ายางหรือ PVC แต่ EVA จะไม่ทนต่ออุณหภูมิสูง ๆ มักต้องมีการเติมสารด้านการเกิดออกซิเดชันด้วย เนื่องจาก EVA มักจะเกิดการเปลี่ยนสี สูญเสียสมบัติทางกายภาพ และเกิดกลิ่นของกรดน้ำส้มขึ้นที่อุณหภูมิสูง ๆ แต่ในด้านเคมี EVA จะทนต่อต่าง อัลกอฮอล์ และสารละลายเจือจางต่าง ๆ EVA จะมีความทนต่อสภาพการใช้งาน ทนต่อแสง และโอโซนได้ดีกว่าโฮโมพอลิเมอร์ โดยสามารถทิ้งไว้กลางแจ้งได้นาน จึงเหมาะสำหรับใช้กับงานภายนอกและสัมผัสกับแสง

2.6.2.3 การนำไปใช้ประโยชน์

EVA สามารถใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง ลักษณะโดยทั่วไปจะคล้ายยาง แต่ EVA จะขึ้นรูปง่ายเหมือนกับเทอร์โมพลาสติก จึงไม่จำเป็นต้องทำการวัลคาไนซ์เซชัน การใช้ EVA สามารถใช้ทั้งในรูปแบบเป็นสารประกอบหรือยาที่ผ่านการเชื่อมโยงแล้ว ซึ่งจะได้เป็นของแข็งหรือโฟม สามารถเติมสารเสริมแรงพวกเคลย์ (Clay) เพื่อช่วยให้แข็ง หรือเติมสารพวกซิลิกา และตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วยให้ฟู เพื่อให้เหนียว ได้เป็นโฟมที่มีความหนาแน่นต่ำ ๆ ใช้ทำพื้นรองเท้าได้ EVA สามารถใช้เป็นยางกันความร้อน หุ้มลวด หรือสายเคเบิลได้ หรือใช้ผสมกับพอลิเมอร์ตัวอื่น ๆ เพื่อปรับปรุงความทนทานต่อโอโซนและดินฟ้าอากาศ อีกทั้ง EVA ยังมีขีดความสามารถในการเติมสารตัวเติม และสี ได้สูง จึงสามารถเติมสารตัวเติมได้ในปริมาณมาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ขวดน้ำดื่มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
2. Acrylic acid modified high density polyethylene (PE-g-AA) รหัส POLYBOND 1009 : TOA Uni Chemical Manufacturing , Ltd.
3. Maleic anhydride modified high density polyethylene (PE-g-MAH) รหัส POLYBOND 3009 : TOA Uni Chemical Manufacturing , Ltd.
4. Styrene acrylonitrile modified ethylene propylene diene terpolymer (SAN-EPDM) รหัส ROYALTUF 372P20 : TOA Uni Chemical Manufacturing , Ltd.
5. Maleic anhydride modified ethylene propylene diene terpolymer (MAH-EPDM) รหัส ROYALTUF 485 : TOA Uni Chemical Manufacturing , Ltd.
6. Maleic anhydride modified ethylene propylene diene terpolymer (MAH-EPDM) รหัส ROYALTUF 490 : TOA Uni Chemical Manufacturing , Ltd.
7. Ethylene vinyl acetate copolymer (EVA) รหัส NUC 8450 : Nippon Unicar Co., Ltd.
8. High density polyethylene (HDPE) รหัส POLENE G2855 : Thai Petrochemical Industry Co., Ltd.
9. เส้นใยอ้อย

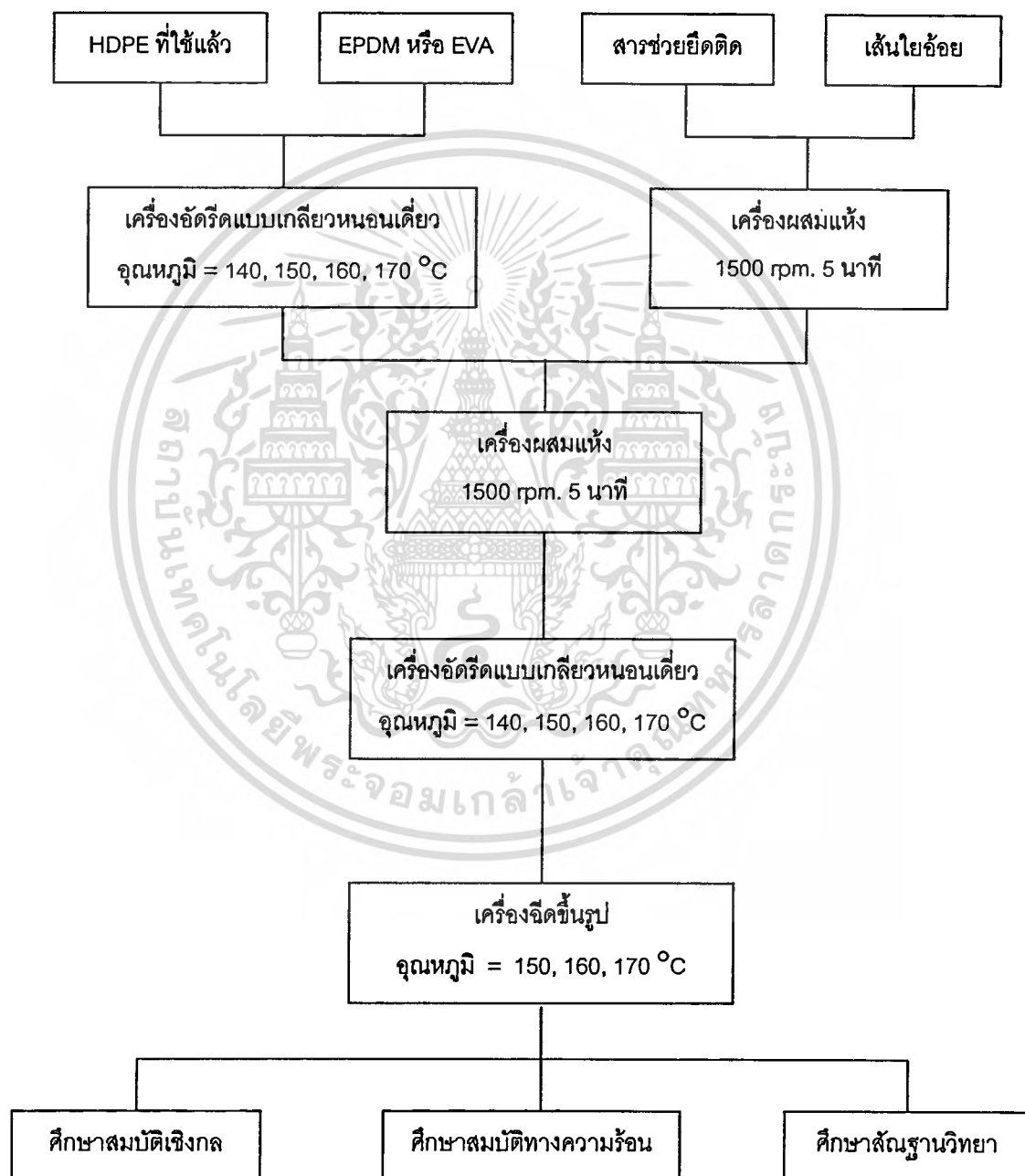
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวทวนอนเดี่ยว รุ่น Axon ab Plastmaskiner : Sew-Eurodrive
2. เครื่องผสมแห้ง (High speed mixer) : Labtech Engineering Co., Ltd.
3. เครื่องฉีดขึ้นรูป รุ่น Cosmo TTI 220/80 : Welltec Industrial Equipment Ltd.
4. เครื่องทดสอบแรงดึง รุ่น LR30K : LLOYD Instruments
5. เครื่องทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก : Yasuda Seisakusho Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เครื่องทดสอบความแข็ง : Yasuda
7. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน (DSC) รุ่น DSC-50 : Shimadzu Co., Ltd.
8. เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) รุ่น JSM6400 : JEOL
9. เครื่องบดตัดพลาสติก : Bosco Engineering

3.3 ขั้นตอนการทดลอง



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการเตรียมคอมพอสิตจากขดน้ำดื่ม HDPE ที่ใช้แล้ว และเส้นใยอ้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมเม็ดพลาสติก HDPE จากขวดน้ำดื่มชนิดขุน

นำขวดน้ำดื่มชนิดขุนที่ใช้แล้วมาตัดฉลากส่วนที่เป็นสีออก และล้างให้สะอาด ทิ้งไว้ให้แห้ง แล้วนำไปบดด้วยเครื่องบดตัดพลาสติก จากนั้นนำไปหลอมใหม่ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหมุนเดียว โดยใช้อุณหภูมิแต่ละช่วงเป็น 140 , 150 , 160 และ 170 องศาเซลเซียส ใช้ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที พลาสติกที่หลอมแล้วนำไปบดอีกครั้งด้วยเครื่องบดตัดพลาสติก

ขั้นตอนที่ 2 การเตรียมเส้นใยอ้อย

นำขานอ้อยที่ได้จากโรงงานน้ำตาลซึ่งเป็นเส้นใยขนาดสั้น มีความยาวประมาณ 1.0 – 5.0 มิลลิเมตร มาทำการคัดแยกขนาดโดยใช้ตะแกรงขนาด 10 เมช ซึ่งจะได้เส้นใยอ้อยที่มีความยาวประมาณ 2.0 มิลลิเมตร แล้วนำเส้นใยอ้อยที่ได้ไปล้างด้วยน้ำ เพื่อกำจัดฝุ่นและสิ่งสกปรกออก หลังจากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิประมาณ 105 องศาเซลเซียส

ขั้นตอนที่ 3 การเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิต

เตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตตามอัตราส่วนต่าง ๆ โดยผสม HDPE ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 กับ สารช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทกก่อน โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหมุนเดียว อุณหภูมิที่ใช้แต่ละช่วงคือ 140 , 150 , 160 และ 170 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที แล้วนำไปบดด้วยเครื่องบดตัด จะได้เป็นเม็ดพอลิเมอร์ผสมออกมา จากนั้นนำเส้นใยอ้อยจากขั้นตอนที่ 2 มาผสมกับสารช่วยยึดติดด้วยเครื่องผสมแห้ง ใช้ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที ใช้เวลาในการปั่นผสม 5 นาที แล้วจึงเติมเม็ดพอลิเมอร์ผสมลงไป ทำการปั่นผสมต่ออีก 5 นาที หลังจากนั้นจึงนำมาหลอมผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหมุนเดียว ใช้อุณหภูมิ 140 , 150 , 160 และ 170 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที และนำมาบดด้วยเครื่องบดตัด ทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานด้วยเครื่องฉีด

ขั้นตอนที่ 4 ศึกษาเปรียบเทียบการใช้เม็ด HDPE เป็นเมตริกซ์

เตรียมคอมพอสิตโดยใช้เมตริกซ์เป็นเม็ด HDPE ใหม่ ตามอัตราส่วนดังต่อไปนี้ เม็ด HDPE/เส้นใยอ้อย เป็น 100/10 ใช้วิธีการเตรียมดังขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ 5 ศึกษาผลของขนาดเส้นใย

เตรียมคอมพอสิตโดยใช้เส้นใยอ้อยซึ่งไม่ได้ผ่านการคัดขนาด ตามอัตราส่วนดังต่อไปนี้ recycled HDPE/เส้นใยอ้อย เป็น 100/10 ใช้วิธีการเตรียมดังขั้นตอนที่ 3

ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนทั้งหมดในการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิต

Recycled HDPE (ร้อยละโดย น้ำหนักของพอลิ เมอร์ผสม)	สารช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทก (ร้อยละโดยน้ำหนักของ พอลิเมอร์ผสม)			เส้นใยอ้อย (ร้อยละ โดยน้ำหนัก ของพอลิ เมอร์ผสม)	สารช่วยยึดติด (ร้อยละโดยน้ำหนักของ เส้นใย)	
	SAN-EPDM	EVA	MAH-EPDM		PE-g-AA	PE-g-MAH
100	-	-	-	-	-	-
100*	-	-	-	10	-	-
100**	-	-	-	10	-	-
100	-	-	-	10	5	-
90	10	-	-	10	5	-
70	30	-	-	10	5	-
50	50	-	-	10	5	-
100	-	-	-	10	-	5
90	10	-	-	10	-	5
70	30	-	-	10	-	5
50	50	-	-	10	-	5
100	-	-	-	10	-	-
90	-	10	-	10	-	-
70	-	30	-	10	-	-
50	-	50	-	10	-	-
90***	-	-	10	10	-	-
90****	-	-	10	10	-	-

* ใช้เม็ด HDPE ใหม่

** ใช้ขานอ้อยไม่ผ่านการคัดขนาด

*** ใช้ MAH-EPDM รหัส ROYALTUF 485

**** ใช้ MAH-EPDM รหัส ROYALTUF 490

ขั้นตอนที่ 6 ศึกษาเปรียบเทียบชนิดของสารช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทกและสารช่วยยึดติด
เตรียมคอมพอสิตจาก HDPE ที่ใช้แล้ว โดยเปรียบเทียบชนิดและปริมาณสารช่วยปรับปรุง
ความทนแรงกระแทก ได้แก่ SAN-EPDM และ EVA และสารช่วยยึดติด ได้แก่ PE-g-AA และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PE-g-MAH ทำการเปรียบเทียบระบบคอมพอลิเมอร์ที่ใช้ SAN-EPDM ร่วมกับ PE-g-AA ระบบคอมพอลิเมอร์ที่ใช้ SAN-EPDM ร่วมกับ PE-g-MAH และระบบคอมพอลิเมอร์ที่ใช้ EVA เพียงอย่างเดียว โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ HDPE ต่อ SAN-EPDM หรือ EVA เป็น 100/0 90/10 70/30 และ 50/50 สำหรับระบบที่ใช้ PE-g-AA หรือ PE-g-MAH จะใช้ในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของเส้นใย ทำการเตรียมดั่งขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ 7 ศึกษาเปรียบเทียบการใช้ MAH-EPDM 2 ชนิดที่มีปริมาณ MAH ต่างกัน

เตรียมคอมพอลิเมอร์โดยใช้ MAH-EPDM เป็นสารช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทก ตามอัตราส่วนดังต่อไปนี้ recycled HDPE/MAH-EPDM/เส้นใยอ้อย เป็น 90/10/10 ใช้วิธีการเตรียมดั่งขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ 8 การทดสอบสมบัติของคอมพอลิเมอร์

นำชิ้นงานที่เตรียมได้ในขั้นตอนที่ 4, 5, 6 และ 7 มาทดสอบสมบัติดังต่อไปนี้

1. ทดสอบสมบัติเชิงกล

1.1 สมบัติด้านการดึง (Tensile properties) ได้แก่ ความทนแรงดึง ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด และค่ามอดุลัสยืดหยุ่น ทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง ตาม ASTM D638M ใช้ชิ้นงานในการทดสอบตัวอย่างละ 8 ชิ้น สภาวะที่ใช้ในการทดสอบเป็นดั่งนี้

Load cell	30	kN
Test speed	25	mm/min
Gauge length	70	mm

1.2 สมบัติความทนแรงกระแทก ทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก ตาม ASTM D256 ใช้ชิ้นงานในการทดสอบตัวอย่างละ 8 ชิ้น

1.3 สมบัติด้านความแข็ง (Hardness) ทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแบบ shore D ตาม ASTM D2240

2. ทดสอบสมบัติทางความร้อน

ทดสอบโดยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) ใช้อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และอัตราการทำให้เย็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เพื่อหาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และปริมาณความร้อนที่ใช้หลอมผลึก (ΔH_m) คำนวณหาร้อยละของความเป็นผลึกได้ดั่งนี้

$$\text{ร้อยละความเป็นผลึก} = \frac{\Delta H_m \text{ ของ HDPE ที่ใช้แล้ว หลังผสม}}{\Delta H_m \text{ ของ HDPE ที่ใช้แล้ว ก่อนผสม}} \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และคำนวณเอนโทรปีของระบบจาก

$$\Delta G = \Delta H_m - T_m \Delta S$$

3. ตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา

นำชิ้นงานที่แตกหักจากการทดสอบสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทกตรวจสอบโดยใช้
เครื่อง Scanning electron microscope (SEM)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

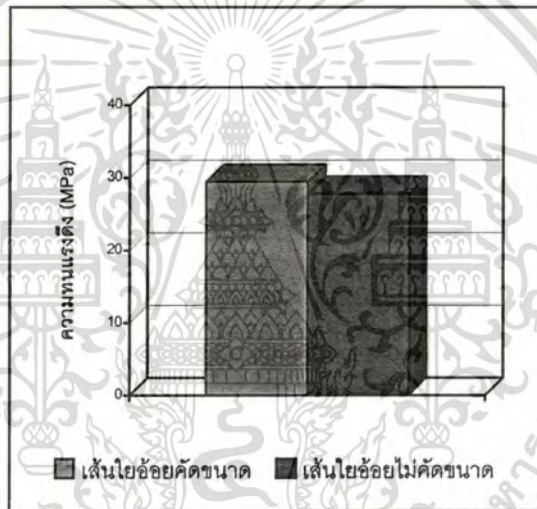
บทที่ 4

ผลการทดลอง

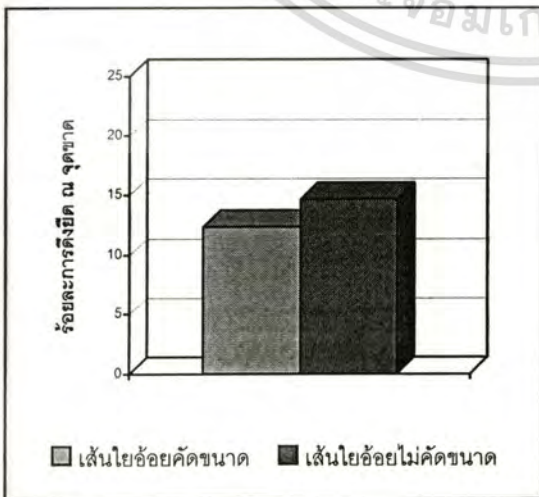
ทำการทดลองศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของคอมพอสิตจาก HDPE และเส้นใยอ้อย โดยแบ่งผลการทดลองตามสมบัติที่ทดสอบ ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางสัณฐานวิทยา

4.1 สมบัติเชิงกล

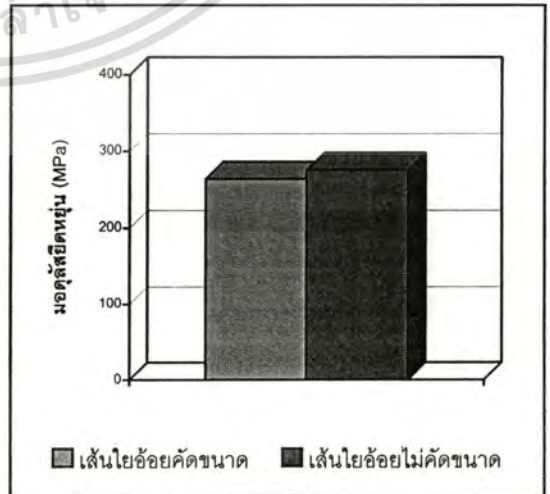
4.1.1 ศึกษาผลของขนาดเส้นใยอ้อย



(a)

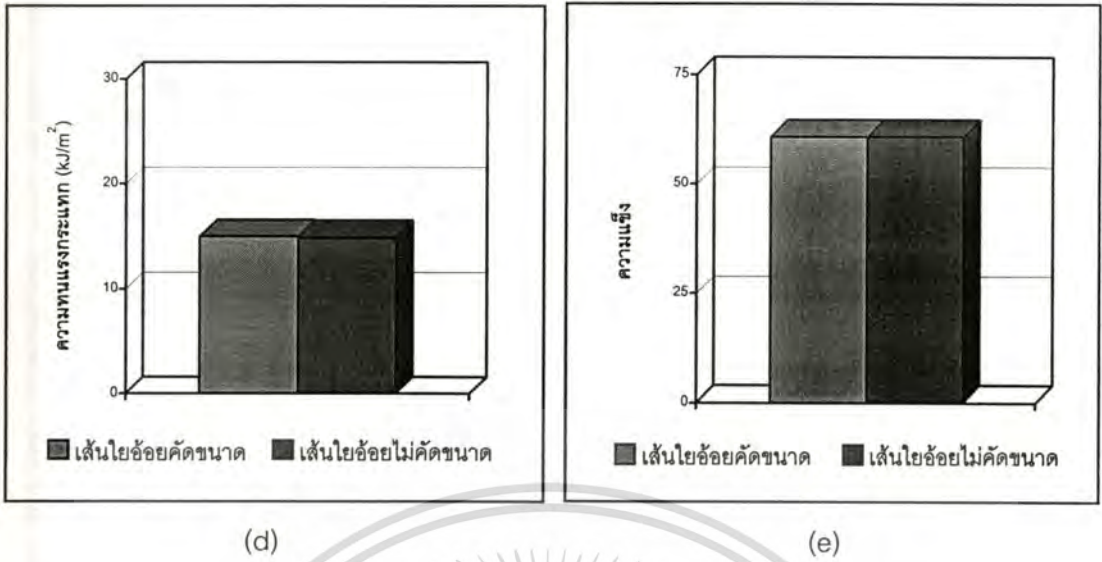


(b)



(c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

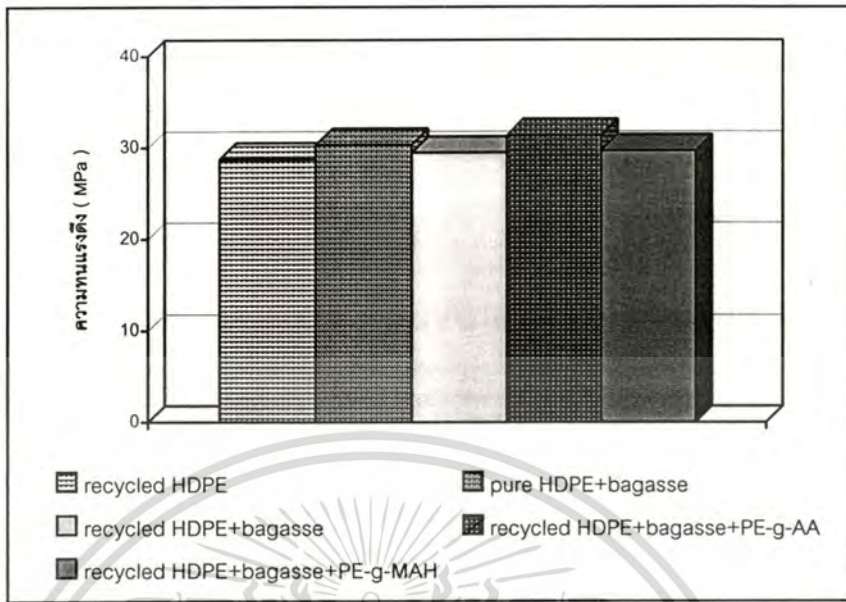


รูปที่ 4.1 แสดงสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตจาก HDPE ที่ใช้แล้วกับเส้นใยอ้อย โดยเปรียบเทียบเส้นใยอ้อยที่ผ่านการคัดขนาดและไม่ผ่านการคัดขนาด

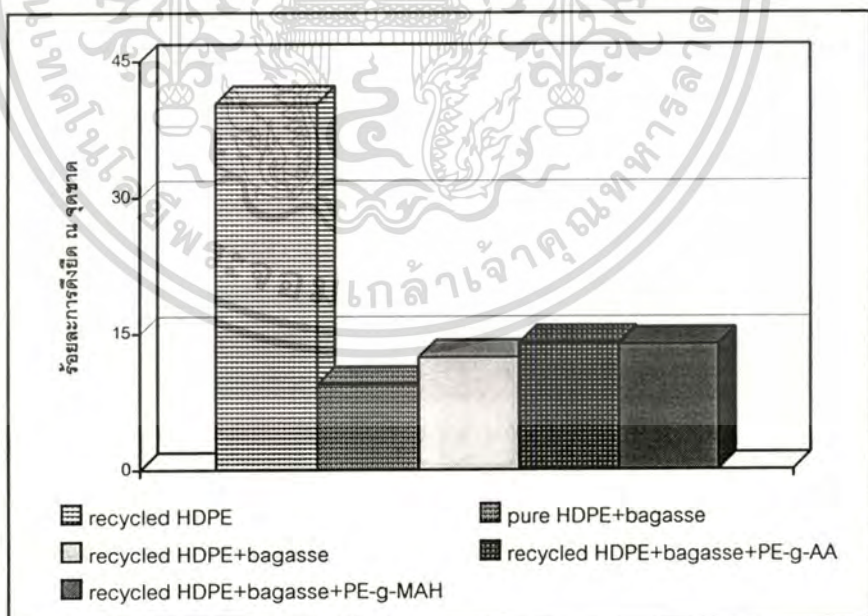
- (a) ความทนแรงดึง (b) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด
(c) มอดุลัสยืดหยุ่น (d) ความทนแรงกระแทก
(e) ความแข็ง

จากรูปที่ 4.1 ทำการศึกษาเปรียบเทียบการใช้เส้นใยอ้อยที่ผ่านการคัดขนาดด้วยตะแกรงขนาด 10 เมช กับเส้นใยอ้อยที่ไม่ผ่านการคัดขนาด โดยใช้อัตราส่วนขวด HDPE/เส้นใยอ้อย เป็น 100/10 โดยน้ำหนัก พบว่า สมบัติเชิงกลของคอมพอสิตซึ่งได้แก่ ความทนแรงดึง ค่าการดึงยืด ณ จุดขาด มอดุลัสยืดหยุ่น ความทนแรงกระแทก และความแข็ง จะมีค่าใกล้เคียงกันในทั้งสองระบบ ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยอ้อยที่ได้มาตอนเริ่มต้นมีขนาดใกล้เคียงกันอยู่แล้ว โดยอยู่ในช่วงประมาณ 1.0-5.0 มิลลิเมตร และขณะทำการเตรียมคอมพอสิต เส้นใยอ้อยจะถูกทำลายระหว่างกระบวนการอัดรีด การบด หรือขึ้นรูป ดังนั้นเส้นใยอ้อยที่คัดขนาดกับเส้นใยอ้อยที่ไม่ได้คัดขนาด จึงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงทำให้สมบัติเชิงกลของคอมพอสิตที่เตรียมได้ไม่แตกต่างกัน

4.1.2 ศึกษาผลของการใช้ HDPE จากขวด และสารช่วยยึดติด

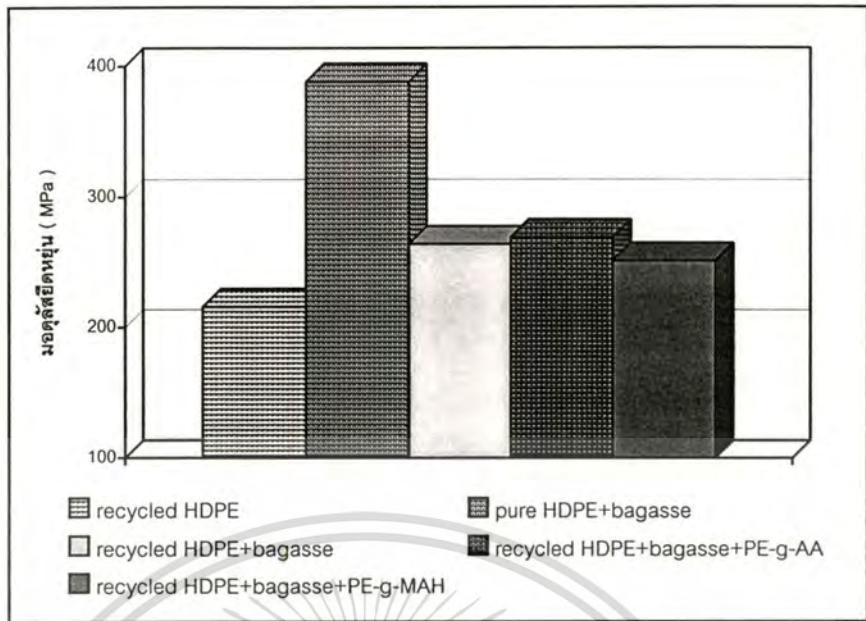


รูปที่ 4.2 แสดงความทนแรงดึงของคอมพอลิต โดยเปรียบเทียบผลของการใช้ HDPE จากขวด และผลของการใช้สารช่วยยึดติดที่แตกต่างกัน

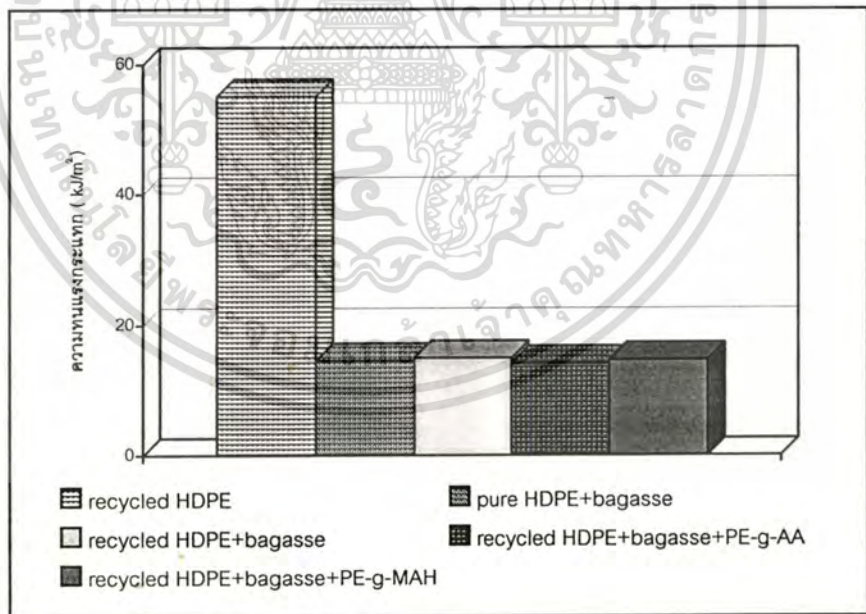


รูปที่ 4.3 แสดงร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของคอมพอลิต โดยเปรียบเทียบผลของการใช้ HDPE จากขวด และผลของการใช้สารช่วยยึดติดที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

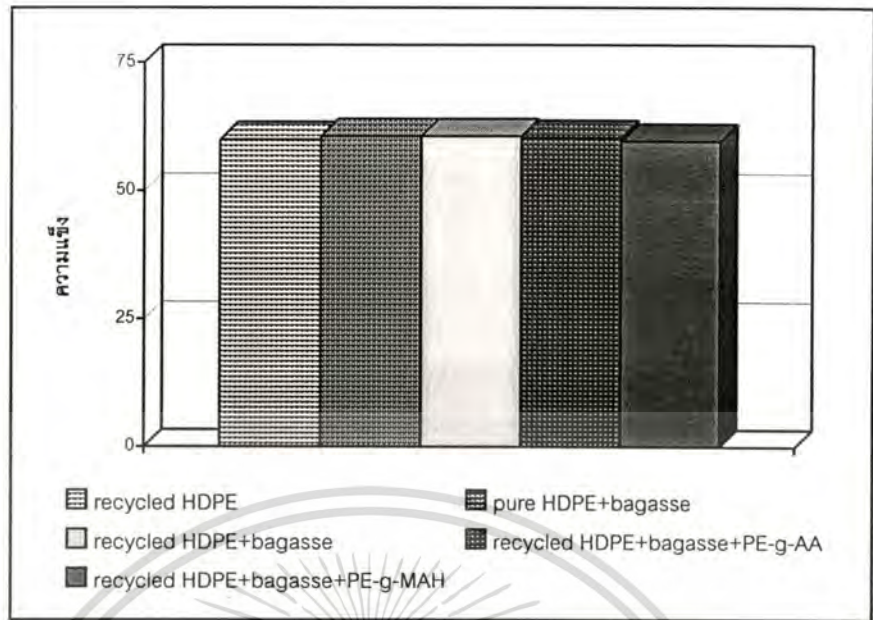


รูปที่ 4.4 แสดงค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของคอมพอสิต โดยเปรียบเทียบผลของการใช้ HDPE จากขวด และผลของการใช้สารช่วยยึดติดที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.5 แสดงความทนแรงกระแทกของคอมพอสิต โดยเปรียบเทียบผลของการใช้ HDPE จากขวด และผลของการใช้สารช่วยยึดติดที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงความแข็งของคอมพอสิต โดยเปรียบเทียบผลของการใช้ HDPE จากขวด และผลของการใช้สารช่วยยึดติดที่แตกต่างกัน

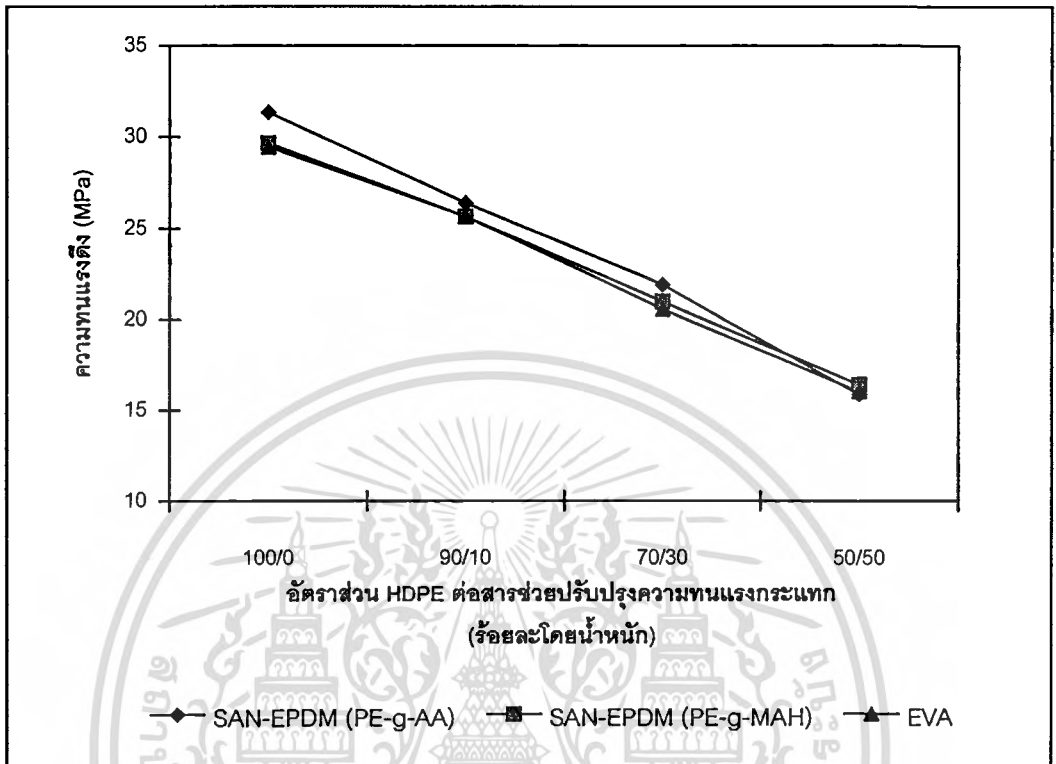
เมื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของ HDPE จากขวดที่ใช้แล้ว เทียบกับคอมพอสิตของมันกับเส้นใยอ้อย โดยใช้เส้นใยอ้อยในปริมาณร้อยละ 10 พบว่าการเติมเส้นใยอ้อยลงใน HDPE จากขวด จะช่วยปรับปรุงสมบัติความทนแรงดึง และมอดุลัสยืดหยุ่นได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.4 แต่ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด และความทนแรงกระแทกจะลดลงมาก ดังรูปที่ 4.3 และ 4.5 ส่วนค่าความแข็ง (Hardness) จะมีค่าใกล้เคียงกันในทั้งสองระบบ และเมื่อเปรียบเทียบเมตริกซ์ที่ใช้ในการเตรียมคอมพอสิต โดยเทียบการใช้เม็ด HDPE กับ HDPE จากขวดที่ใช้แล้ว พบว่าการใช้ HDPE จากขวดเป็นเมตริกซ์ จะให้ค่าความทนแรงดึง และมอดุลัสยืดหยุ่นต่ำกว่า แต่ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด และความทนแรงกระแทกจะสูงกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก HDPE จากขวดจะมีสารเติมแต่งอื่น ๆ ที่ถูกเติมระหว่างขั้นตอนการผลิตขวด ซึ่งอาจส่งผลต่อการปรับปรุงความเหนียวของคอมพอสิตที่ได้ ทำให้มีความสามารถในการยืดและทนแรงกระแทกได้ดี ส่วนสมบัติด้านความแข็งจะไม่แตกต่างกัน

เมื่อทดลองเติมสารช่วยยึดติด ได้แก่ PE-g-AA และ PE-g-MAH ในปริมาณร้อยละ 5 ของเส้นใย ลงในคอมพอสิตที่ใช้ HDPE จากขวดเป็นเมตริกซ์ พบว่า จะสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลส่วนมากได้เล็กน้อย ถ้าทำการเปรียบเทียบสารช่วยยึดติดทั้งสองชนิดนี้ พบว่าสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกันในทั้งสองระบบ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสารช่วยยึดติดทั้งสองชนิดนี้จะเกิดการยึดติดกับเส้นใยด้วยพันธะชนิดเดียวกัน จึงไม่ทำให้สมบัติเชิงกลที่ได้ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาตให้ไปใช้ประโยชน์อื่นใด

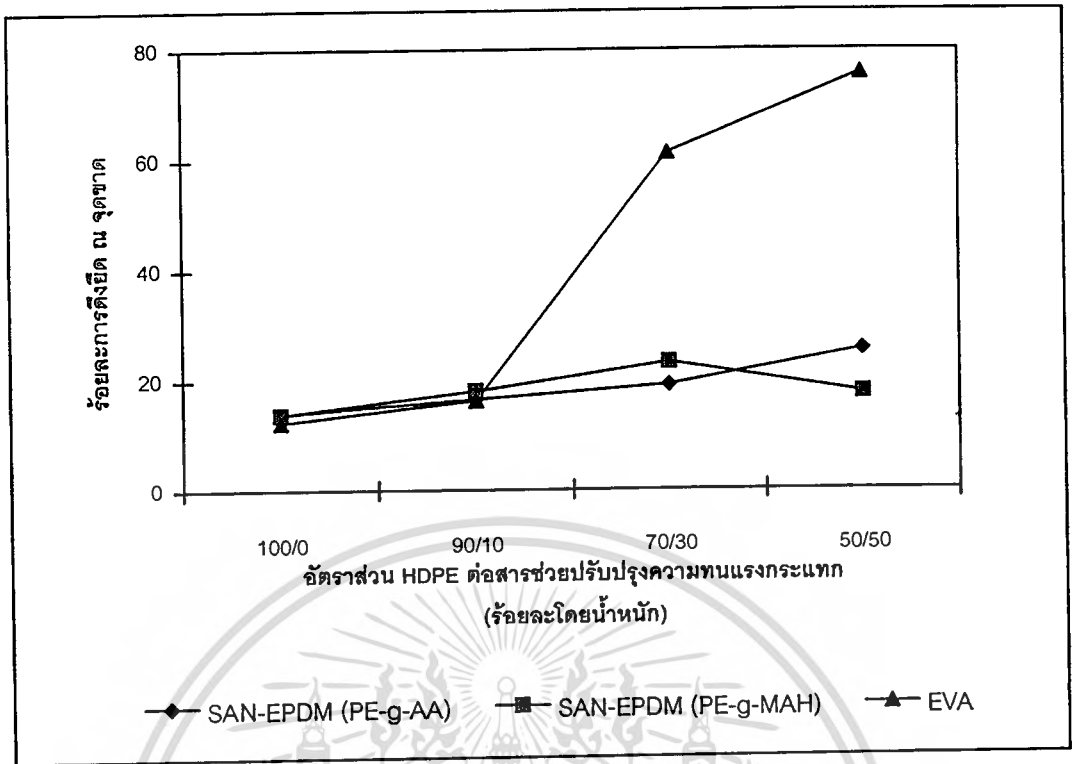
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ศึกษาเปรียบเทียบผลของสารช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทก และสารช่วยยึดติด



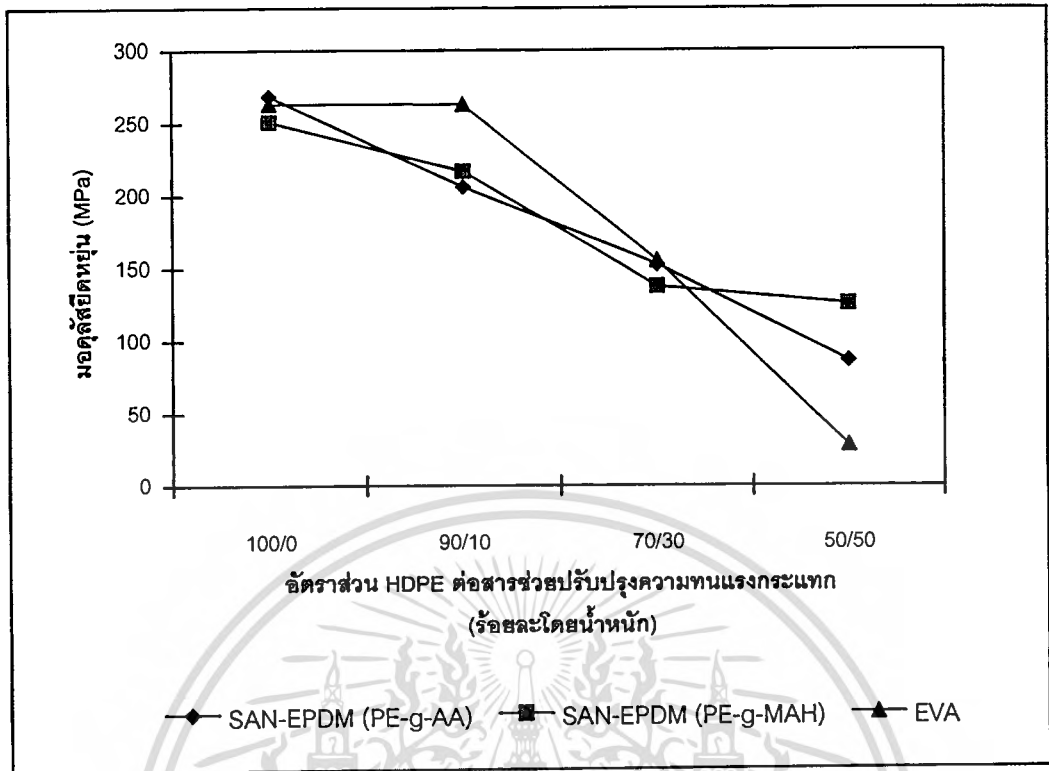
รูปที่ 4.7 แสดงความทนแรงดึงของคอมพอสิต เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ HDPE ต่อสารช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทก โดยเปรียบเทียบชนิดสารช่วยยึดติดที่ต่างกัน

จากรูปที่ 4.7 เมื่อทำการศึกษาผลของสารช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทกที่ใช้ในการทดลองนี้ ได้แก่ SAN-EPDM กับ EVA โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ HDPE ต่อสารช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทก ทำการทดลองเปรียบเทียบคอมพอสิตจาก 3 ระบบ คือ ระบบที่เตรียมโดยใช้ SAN-EPDM ร่วมกับ PE-g-AA ระบบที่ใช้ SAN-EPDM ร่วมกับ PE-g-MAH และระบบที่ใช้ EVA เพียงอย่างเดียว พบว่า เมื่อผสมโดยใช้อัตราส่วนของสารช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้น ค่าความทนแรงดึงจะลดลงด้วยอัตราคงที่ในทุก ๆ ระบบ เนื่องจาก SAN-EPDM และ EVA มีสมบัติจัดอยู่ในจำพวกอีลาสโตเมอร์ การเติมสารจำพวกนี้ลงไปจะช่วยเพิ่มลักษณะความเป็นอสัณฐานให้ระบบ ซึ่งจะช่วยให้คอมพอสิตมีความยืดหยุ่น เหนียว โค้งงอได้มากขึ้น แต่สมบัติด้านความแข็งแรงจะลดลง ค่าความทนแรงดึงที่ได้จึงลดลง และเมื่อเปรียบเทียบทั้ง 3 ระบบ พบว่า ค่าความทนแรงดึงที่ได้จะใกล้เคียงกันในทั้ง 3 ระบบ



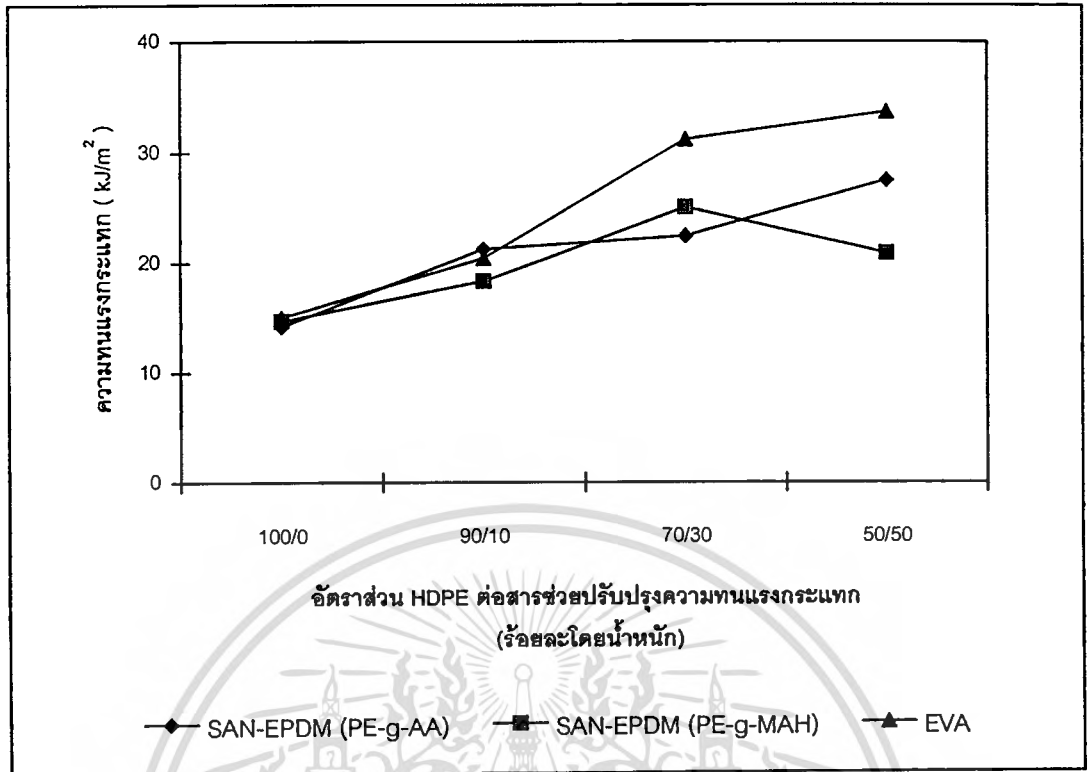
รูปที่ 4.8 แสดงร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของคอมพอลิเมอร์ เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ HDPE ต่อสารช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทก โดยเปรียบเทียบชนิดสารช่วยยึดติดที่ต่างกัน

จากรูปที่ 4.8 พบว่า ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดจะเพิ่มขึ้นในทุก ๆ ระบบ ตามอัตราส่วนของสารช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทกที่เพิ่มขึ้น โดยในระบบที่ใช้ SAN-EPDM ร่วมกับ PE-g-AA หรือ PE-g-MAH ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด จะเพิ่มขึ้นไม่มากนัก ส่วนระบบที่ใช้ EVA เพียงอย่างเดียว ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดจะเพิ่มเล็กน้อยที่อัตราส่วน HDPE ต่อ EVA เป็น 90 ต่อ 10 แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วน EVA มากขึ้น ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดจะเพิ่มขึ้นสูงมากถึง 3-4 เท่า แสดงว่า EVA จะสามารถช่วยปรับปรุงความสามารถในการยึดตัวของคอมพอลิเมอร์ได้ดีกว่า SAN-EPDM ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก SAN-EPDM จะมีส่วนที่เป็น SAN ซึ่งต่อกิ่งอยู่กับ EPDM ส่วนนี้อาจจะไปขัดขวางการยึดของ EPDM ถึงแม้จะเพิ่มอัตราส่วนของ EPDM มากขึ้น แต่ปริมาณ SAN ก็เพิ่มตามไปด้วย จึงไม่สามารถเห็นผลของ EPDM ได้ชัดเจนมากนัก ทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดในระบบที่ใช้ SAN-EPDM นี้ เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย



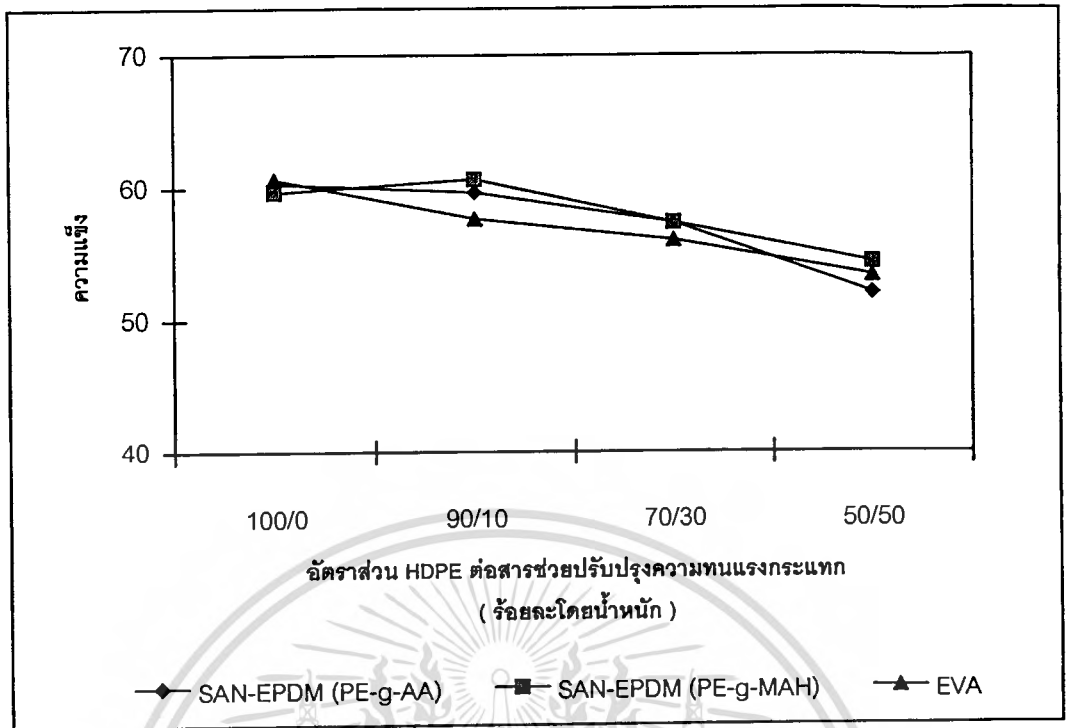
รูปที่ 4.9 แสดงค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของคอมพอสิต เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ HDPE ต่อสารช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทก โดยเปรียบเทียบชนิดสารช่วยยึดติดที่ต่างกัน

จากรูปที่ 4.9 พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของสารช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทก ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นจะลดลงในทุก ๆ ระบบ โดยในระบบที่ใช้ SAN-EPDM ร่วมกับ PE-g-AA หรือ PE-g-MAH อัตราการลดลงจะค่อนข้างสม่ำเสมอ และค่าที่ได้จะใกล้เคียงกันในทั้ง 2 ระบบ ส่วนระบบที่ใช้ EVA เพียงอย่างเดียว นั้น ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นจะลดลงเพียงเล็กน้อยในช่วงแรก แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ EVA ขึ้นถึงร้อยละ 30-50 ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นจะลดลงต่ำมาก โดยผลที่ได้นี้จะสอดคล้องกับผลจากการดึงยึด ณ จุดขาด ในรูป 4.8 ซึ่งจะเห็นว่า EVA มีอิทธิพลต่อสมบัติของคอมพอสิต โดยเฉพาะมอดุลัสยืดหยุ่นและค่าการดึงยึด มากกว่า SAN-EPDM โดย EVA จะช่วยปรับปรุงสมบัติด้านการดึงยึดให้ดีขึ้น แต่จะไปลดสมบัติทางด้านความแข็งแรง ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดของคอมพอสิตจึงลดลงด้วย



รูปที่ 4.10 แสดงความทนแรงกระแทกของคอมพอสิต เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ HDPE ต่อสารช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทก โดยเปรียบเทียบชนิดสารช่วยยึดติดที่ต่างกัน

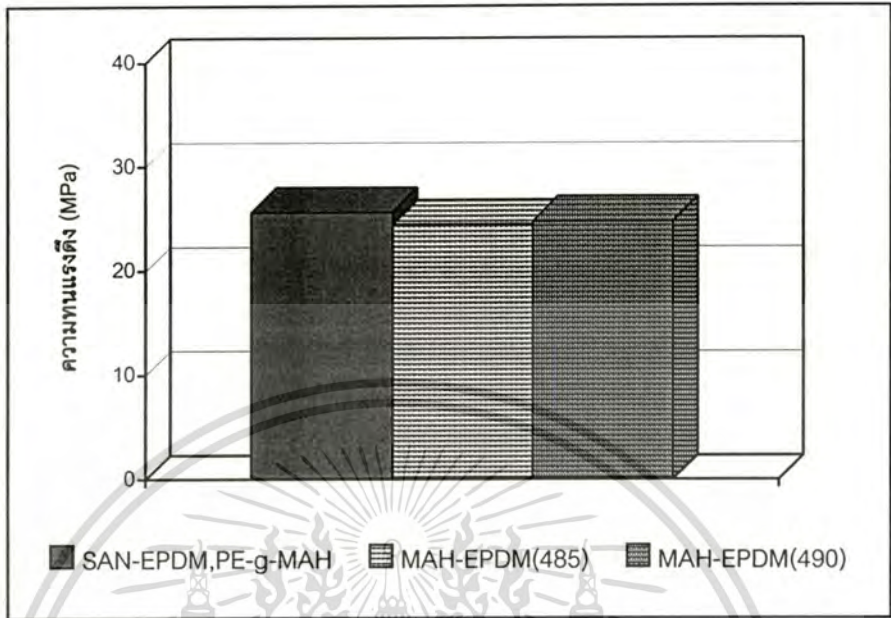
จากรูปที่ 4.10 พบว่า ค่าความทนแรงกระแทกในทุก ๆ ระบบ โดยส่วนมากแล้วจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของ SAN-EPDM หรือ EVA ที่เพิ่มขึ้น โดยในระบบที่ใช้ EVA ในปริมาณมาก ๆ จะให้ค่าความทนแรงกระแทกสูงกว่าระบบอื่นอย่างชัดเจน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก EVA จะสามารถกระจายตัวในคอมพอสิต ช่วยรับและกระจายแรงได้ดีกว่า SAN-EPDM ซึ่งมี SAN ที่ประกอบด้วยสไตรีน ทำให้มีลักษณะแข็ง ไม่สามารถรวมหรือกระจายตัวได้ดีพอ ทั้งยังขัดขวางการกระจายแรงของ EPDM ด้วย



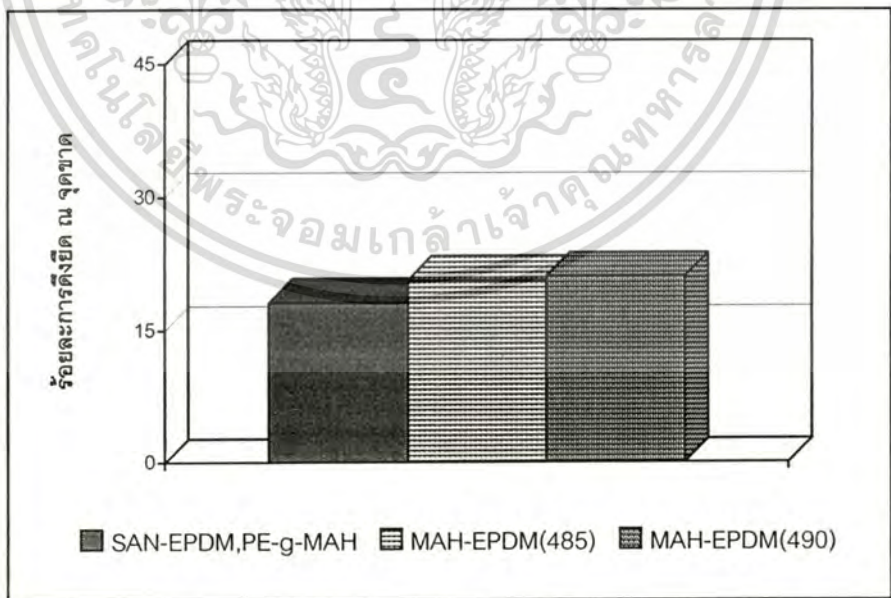
รูปที่ 4.11 แสดงความแข็งแรงของคอมพอสิต เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน HDPE ต่อสารช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทก ความทนแรงกระแทก โดยเปรียบเทียบชนิดสารช่วยยึดติดที่ต่างกัน

จากรูปที่ 4.11 พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของสารช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทกขึ้น ค่าความแข็งแรงจะลดลงในทุก ๆ ระบบ แต่จะลดในปริมาณเล็กน้อย และทุกระบบจะมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าชนิดสารช่วยยึดติดจะไม่มีผลต่อความแข็งแรงของคอมพอสิต โดยความแข็งแรงจะขึ้นกับปริมาณสารช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทกที่ใช้ ซึ่งได้แก่ SAN-EPDM และ EVA โดยสารทั้งสองตัวนี้จะไปลดปริมาณความเป็นผลึกของ HDPE ลง ทำให้คอมพอสิตมีลักษณะที่นิ่มลง

4.1.4 ศึกษาเปรียบเทียบผลการใช้ SAN-EPDM ร่วมกับ PE-g-MAH และการใช้ MAH-EPDM 2 ชนิดที่มี MAH ในปริมาณต่างกัน

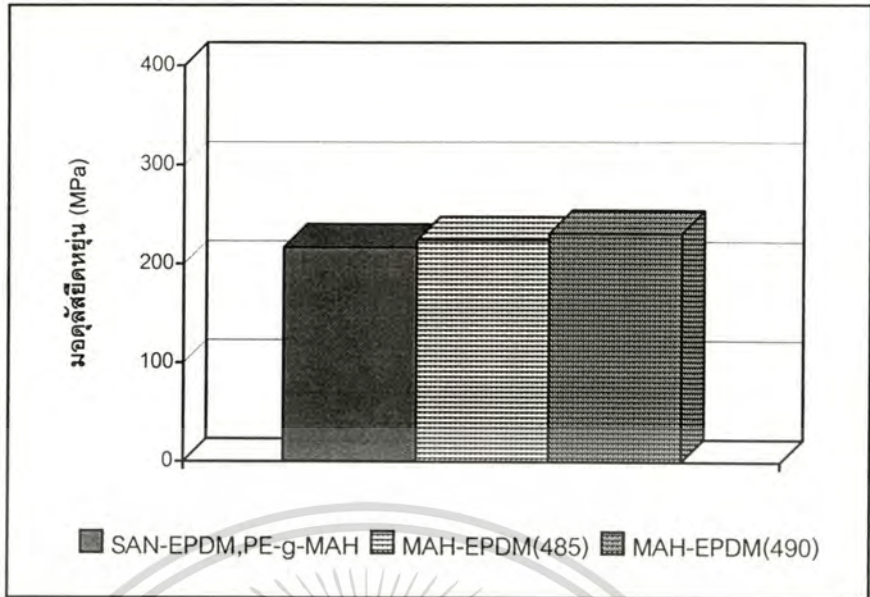


รูปที่ 4.12 แสดงความทนแรงดึงของคอมพอลิทีที่มีอัตราส่วน HDPE ต่อ EPDM เป็น 90 ต่อ 10 โดยเปรียบเทียบ EPDM ต่างชนิดกัน

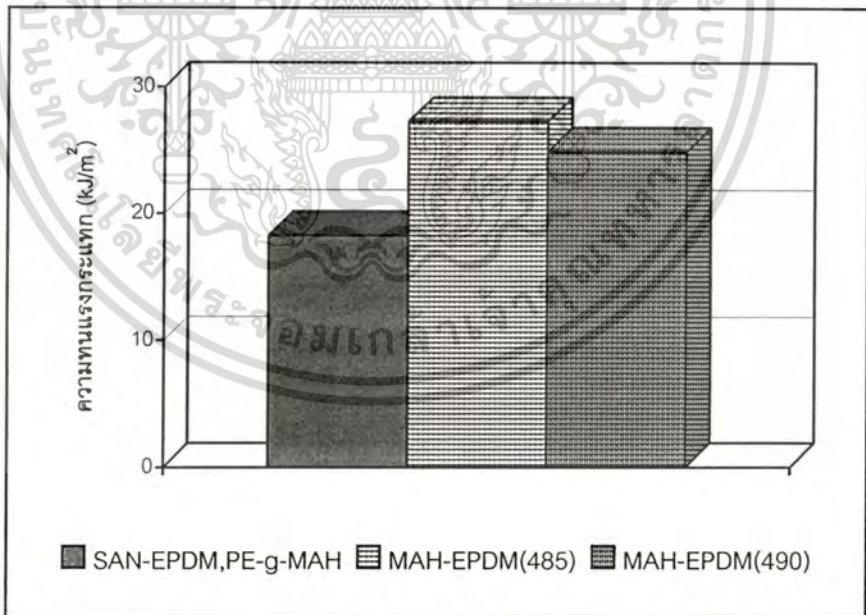


รูปที่ 4.13 แสดงร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของคอมพอลิทีที่มีอัตราส่วน HDPE ต่อ EPDM เป็น 90 ต่อ 10 โดยเปรียบเทียบ EPDM ต่างชนิดกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

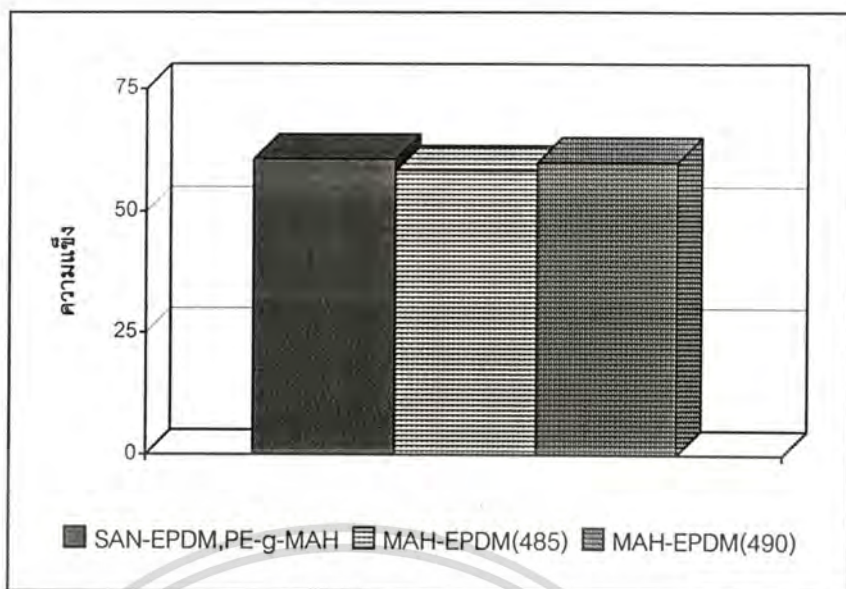


รูปที่ 4.14 แสดงมอดุลลียืดหยุ่นของคอมพอลสิตที่มีอัตราส่วน HDPE ต่อ EPDM เป็น 90 ต่อ 10 โดยเปรียบเทียบ EPDM ต่างชนิดกัน



รูปที่ 4.15 แสดงความทนแรงกระแทกของคอมพอลสิตที่มีอัตราส่วน HDPE ต่อ EPDM เป็น 90 ต่อ 10 โดยเปรียบเทียบ EPDM ต่างชนิดกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แสดงความแข็งของคอมพอลสิตที่มีอัตราส่วน HDPE ต่อ EPDM เป็น 90 ต่อ 10 โดยเปรียบเทียบ EPDM ต่างชนิดกัน

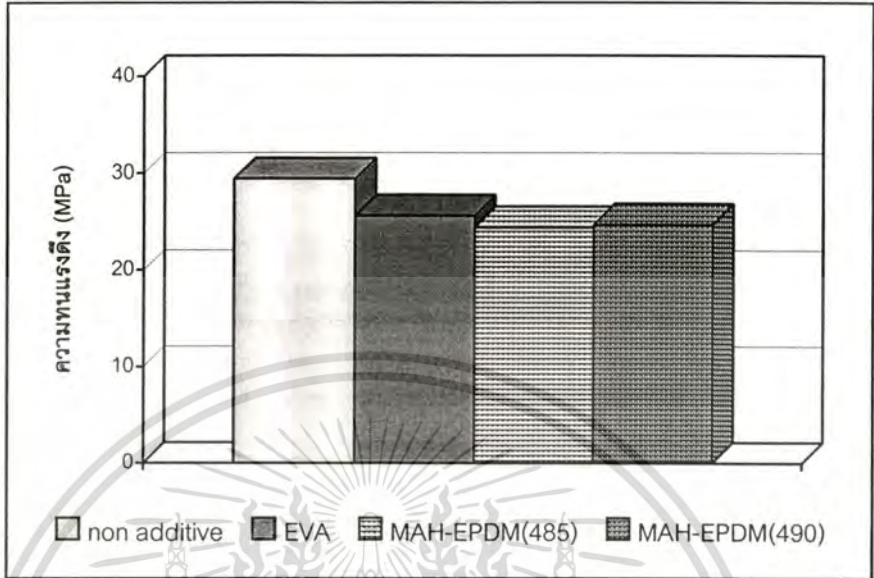
จากรูปที่ 4.12 ถึง 4.16 เมื่อทำการทดลองเปรียบเทียบระบบที่เตรียมคอมพอลสิตโดยใช้ SAN-EPDM ร่วมกับ PE-g-MAH และระบบที่ใช้ MAH-EPDM เพียงอย่างเดียว ทำการผสมในอัตราส่วน HDPE /EPDM เป็น 90/10 พบว่า ค่าความทนแรงดึง และความแข็งจะใกล้เคียงกันทั้ง 2 ระบบ แต่ในระบบที่ใช้ MAH-EPDM ค่ามอดุลัสยืดหยุ่น ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด และความทนแรงกระแทก จะมีค่าสูงกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากหมู่ MAH ที่ตอกกับอยู่กับ EPDM ไปเกิดพันธะกับหมู่ไฮดรอกซิลจากเส้นใยอ้อย ส่งเสริมให้เกิดแรงยึดติดระหว่างพื้นผิวที่ดีขึ้น เกิดการรวมกันเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ทำให้สมบัติเชิงกลของคอมพอลสิตดีขึ้น ส่วนการใช้ SAN-EPDM ร่วมกับ PE-g-MAH ถึงแม้ MAH จาก PE-g-MAH จะสามารถเกิดพันธะกับไฮดรอกซิลจากเส้นใยอ้อยได้เช่นกัน แต่จะมีหมู่ SAN เป็นตัวขัดขวาง ทำให้การรวมเป็นเนื้อเดียวกันไม่ดีพอ สมบัติเชิงกลที่ได้จึงมีค่าต่ำกว่า

เมื่อเปรียบเทียบการใช้ MAH-EPDM ซึ่งมีปริมาณ MAH และอัตราส่วนของเอทิลีนต่อพรอพิลีน ต่างกัน โดยใน MAH-EPDM รหัส 485 จะมี MAH ร้อยละ 0.5 และเอทิลีน/พรอพิลีน เป็น 75/25 ส่วนรหัส 490 จะมี MAH ร้อยละ 1 และเอทิลีน/พรอพิลีน เป็น 55/45 พบว่าคอมพอลสิตจากทั้งสองระบบนี้ จะมีค่าความทนแรงดึง และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ใกล้เคียงกัน แต่ในระบบที่ใช้ MAH-EPDM 490 จะมีมอดุลัสยืดหยุ่นและความแข็งสูงกว่าเล็กน้อย แต่ความทนแรงกระแทกจะต่ำกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก MAH-EPDM 490 จะมีปริมาณ MAH มากกว่า ซึ่งจะสามารถเกิดพันธะได้มากกว่า จึงทำให้มีความแข็งแรง ประกอบกับ MAH-EPDM 485 จะมีปริมาณเอทิลีนสูงกว่า จึงทำให้มีความเหนียวมากกว่า ทนแรงกระแทกได้ดีกว่า

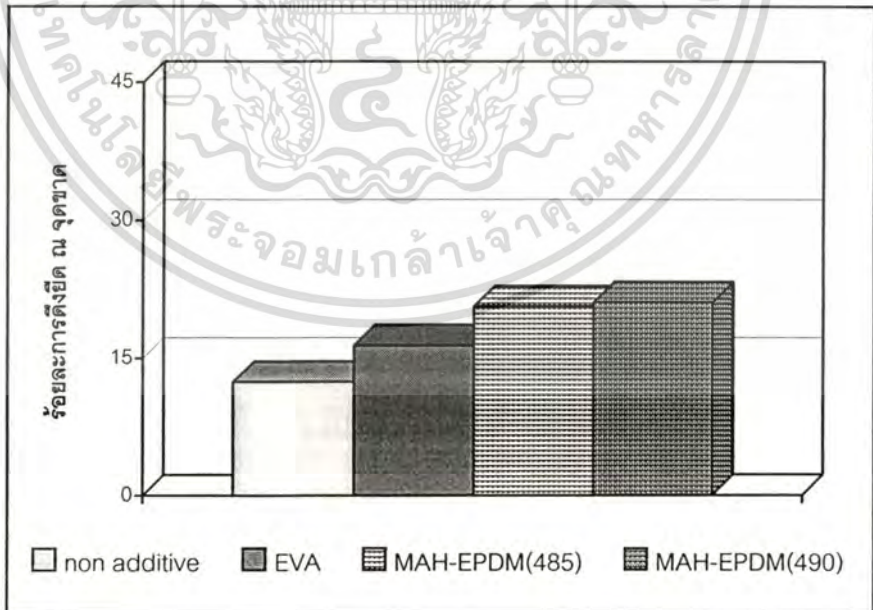
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 ศึกษาเปรียบเทียบผลของการใช้สารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เป็นทั้งสารช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทกและสารช่วยยึดติด

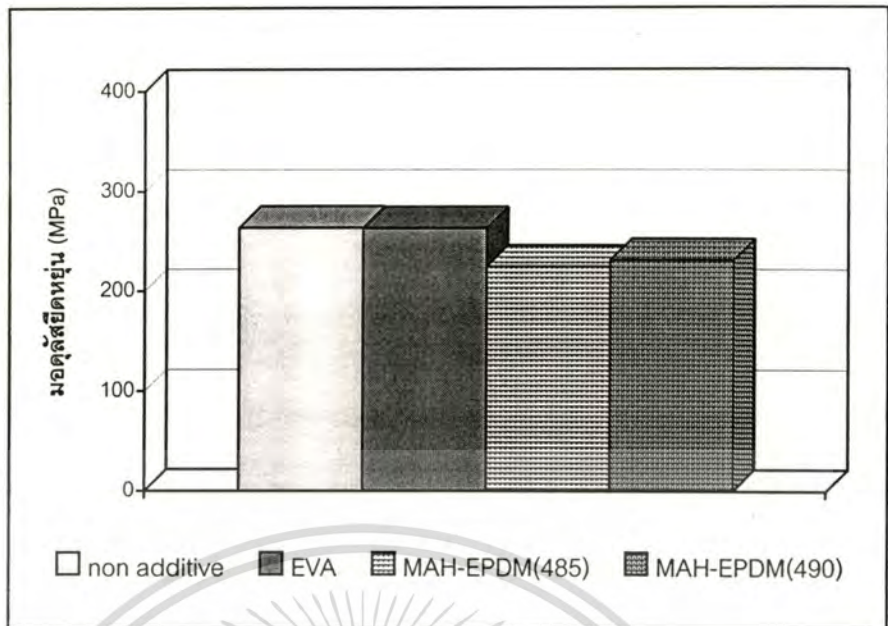


รูปที่ 4.17 แสดงความทนแรงดึงของคอมพอลสิตที่มีอัตราส่วน HDPE ต่อ สารเติมแต่ง เป็น 90 ต่อ 10 โดยเปรียบเทียบสารเติมแต่งต่างชนิดกัน

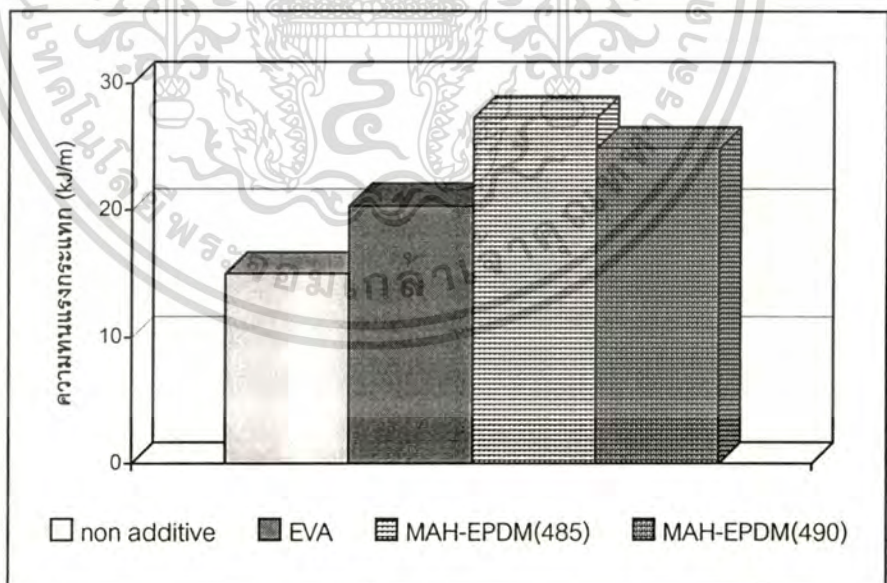


รูปที่ 4.18 แสดงร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของคอมพอลสิตที่มีอัตราส่วน HDPE ต่อ สารเติมแต่ง เป็น 90 ต่อ 10 โดยเปรียบเทียบสารเติมแต่งต่างชนิดกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

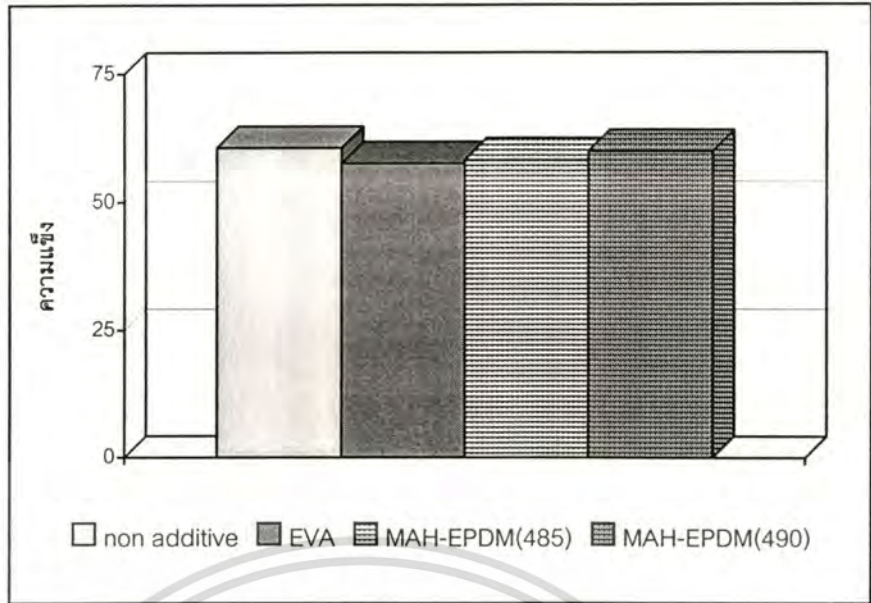


รูปที่ 4.19 แสดงค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของคอมพอสิตที่มีอัตราส่วน HDPE ต่อ สารเติมแต่ง เป็น 90 ต่อ 10 โดยเปรียบเทียบสารเติมแต่งต่างชนิดกัน



รูปที่ 4.20 แสดงความทนแรงกระแทกของคอมพอสิตที่มีอัตราส่วน HDPE ต่อ สารเติมแต่ง เป็น 90 ต่อ 10 โดยเปรียบเทียบสารเติมแต่งต่างชนิดกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

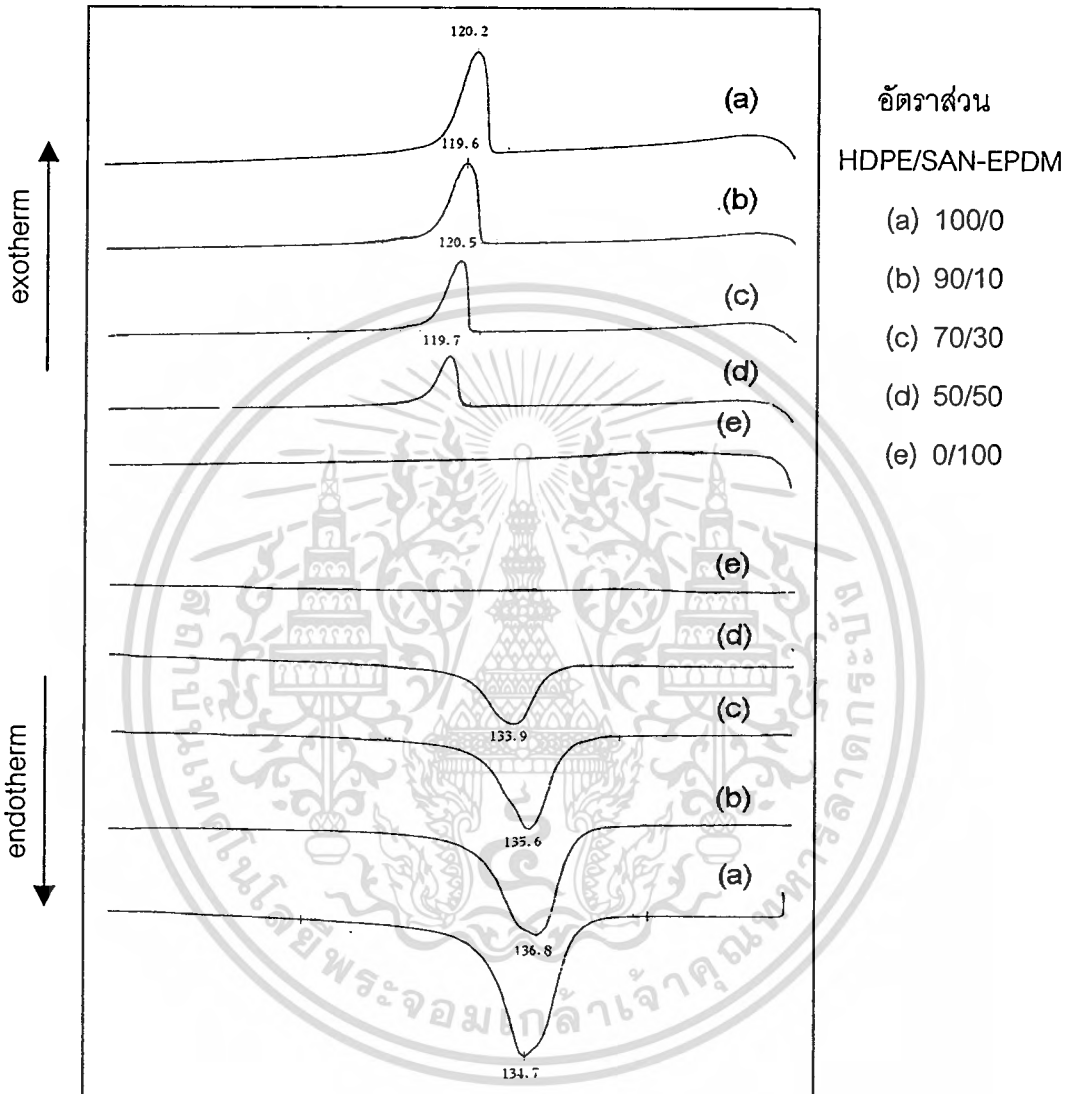


รูปที่ 4.21 แสดงความแข็งของคอมพอลิสมัดที่มีอัตราส่วน HDPE ต่อ สารเติมแต่ง เป็น 90 ต่อ 10 โดยเปรียบเทียบสารเติมแต่งต่างชนิดกัน

เมื่อทำการศึกษเปรียบเทียบการปรับปรุงสมบัติของคอมพอลิสมัด โดยใช้ EVA และ MAH-EPDM 2 ชนิด โดยทำการศึกษาคอมพอลิสมัดที่มีอัตราส่วน HDPE ต่อ EVA หรือ MAH-EPDM เป็น 90 ต่อ 10 จะพบว่า การใช้ EVA หรือ MAH-EPDM จะช่วยปรับปรุงสมบัติด้านการดึงยืด และความทนแรงกระแทกของคอมพอลิสมัดได้ ดังรูปที่ 4.18 และ 4.20 ตามลำดับ แสดงว่าทั้ง EVA และ MAH-EPDM มีสมบัติเป็นอีลาสโตเมอร์ และเมื่อเปรียบเทียบสารทั้ง 2 ชนิดแล้วพบว่า MAH-EPDM จะมีสมบัติในด้านความเป็นอีลาสโตเมอร์มากกว่า EVA เนื่องจากคอมพอลิสมัดที่เตรียมได้ จะมีความทนแรงกระแทกสูงกว่าและดึงยืดได้มากกว่า ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มอดูลัสของระบบคอมพอลิสมัดที่ใช้ EVA มีค่าสูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก EPDM จะมีลักษณะเป็น อัดแน่นฐานมากกว่า EVA จึงสามารถรับและกระจายแรงได้ดีกว่า และหมู่ MAH จะมีการยึดติดที่ดีกว่าหมู่ VAc จึงทำให้ระบบที่ใช้ MAH-EPDM สามารถทนต่อแรงกระแทกได้สูงกว่า และจากผลการทดลองยังพบว่าทั้ง EVA และ MAH-EPDM จะไม่ให้ผลที่แตกต่างในสมบัติด้านความทนแรงดึงและความแข็งของคอมพอลิสมัด

4.2 สมบัติทางความร้อน

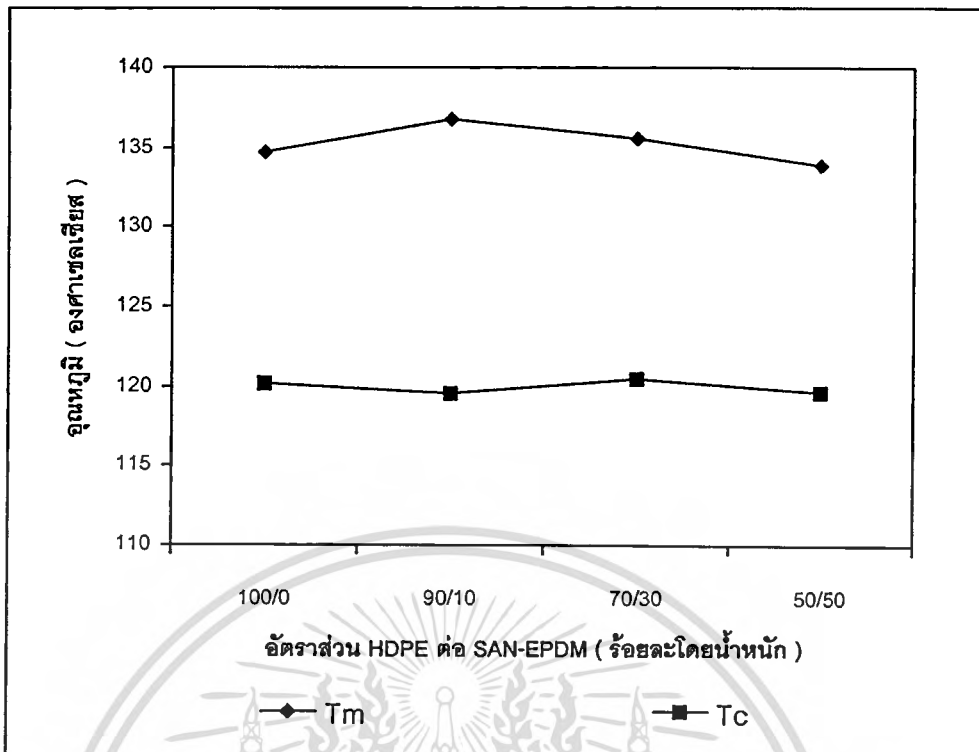
4.2.1 ผลของคอมพอสิต HDPE/SAN-EPDM/ซานอ้อย/PE-g-AA



รูปที่ 4.22 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต เมื่อใช้ PE-g-AA เป็นสารช่วยยึดติด และเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน HDPE ต่อ SAN-EPDM

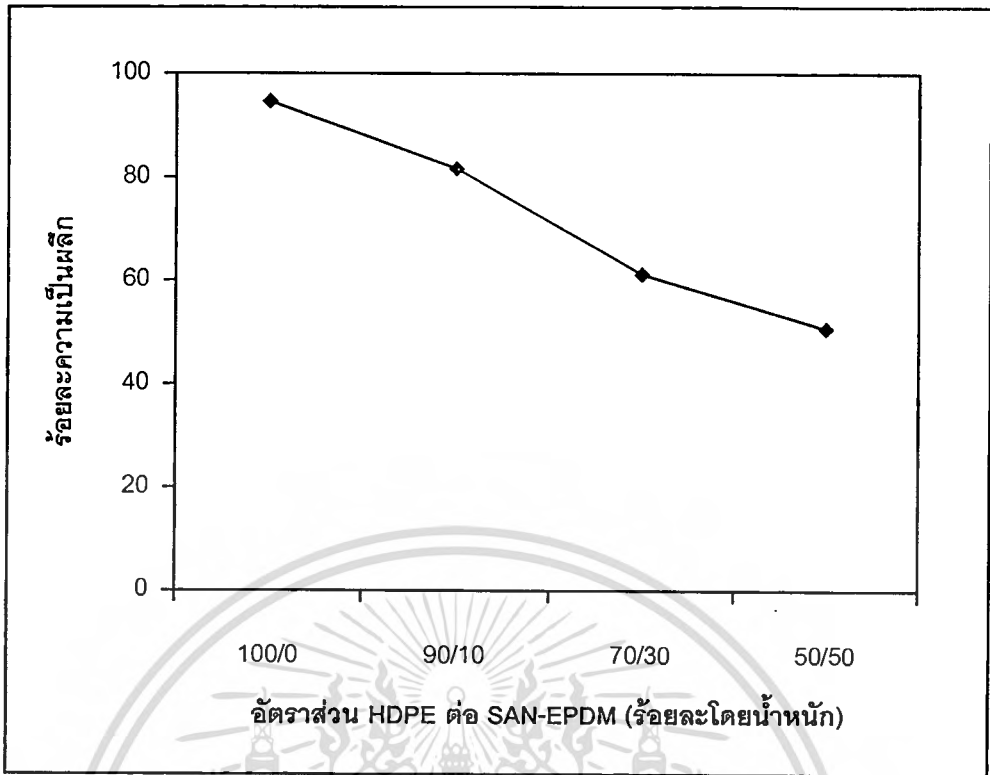
จากรูปที่ 4.22 พบว่าพิกที่ปรากฏจะเป็นพิกของ HDPE เนื่องจาก SAN-EPDM เป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน จึงไม่ปรากฏพิกดังแสดงในเทอร์โมแกรมรูป e ความสัมพันธ์ระหว่าง T_m และ T_c กับอัตราส่วนของ HDPE ต่อ SAN-EPDM แสดงในรูปที่ 4.23 ส่วนค่า ΔH_m และ ΔH_c ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเป็นผลึก จะลดลงตามอัตราส่วนของ SAN-EPDM ที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 แสดงอุณหภูมิหลอมผลึก (T_m) และอุณหภูมิตกผลึก (T_c) ของ HDPE ในคอมพอลิเมอร์ HDPE/SAN-EPDM/เส้นใยอ้อย/PE-g-AA เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน HDPE ต่อ SAN-EPDM

จากรูปที่ 4.23 แสดง T_m และ T_c ของ HDPE ในระบบคอมพอลิเมอร์ที่ใช้ SAN-EPDM ร่วมกับ PE-g-AA พบว่า ค่า T_c จะค่อนข้างคงที่ แม้จะเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ HDPE ต่อ SAN-EPDM ขณะที่ T_m มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ SAN-EPDM ที่เพิ่มขึ้น แสดงว่า SAN-EPDM สามารถละลายเข้ากันได้บางส่วนกับ HDPE และจะไปรบกวนการตกผลึกของ HDPE



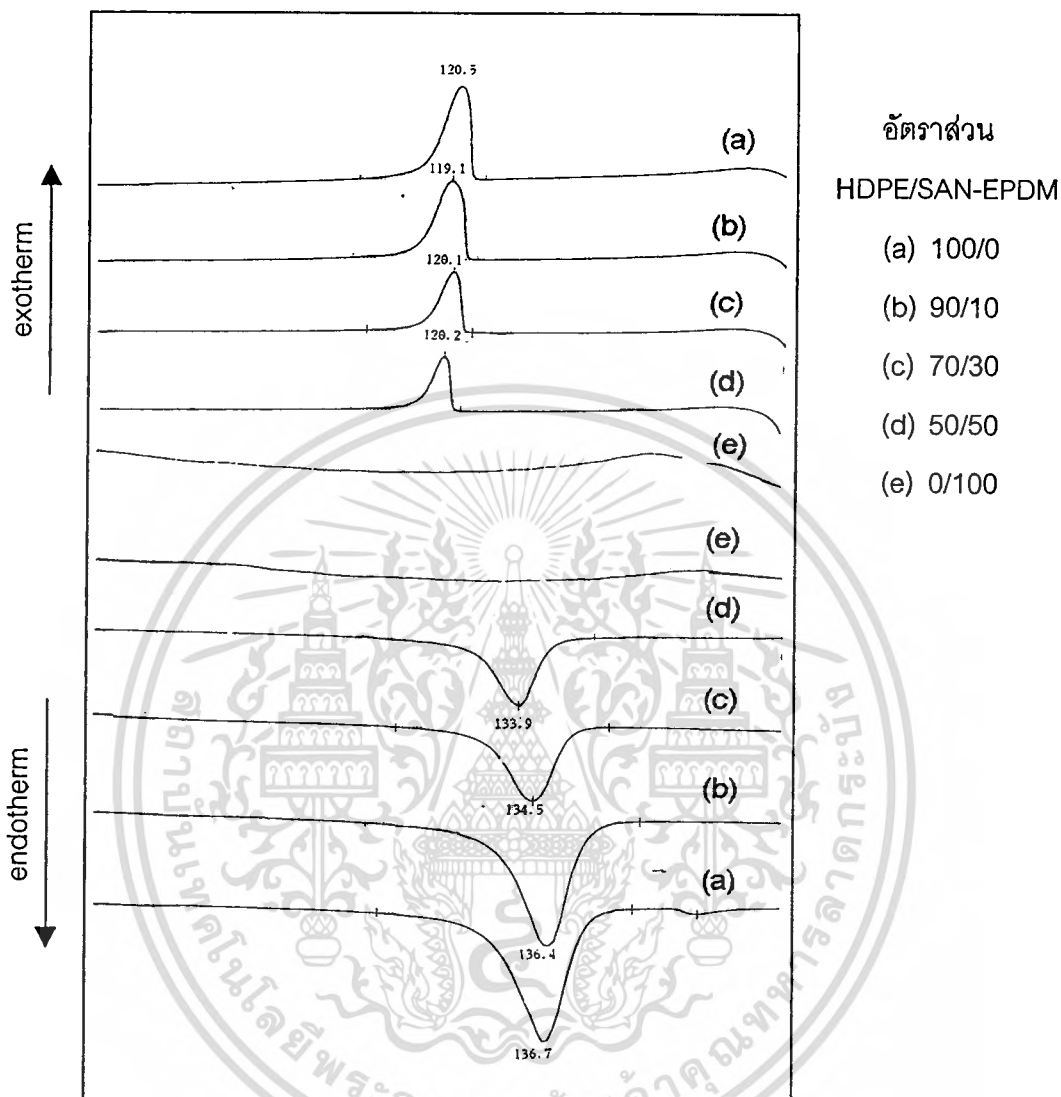
รูปที่ 4.24 แสดงร้อยละความเป็นผลึกของ HDPE ในคอมพอลิเมอร์ HDPE/SAN-EPDM/เส้นใยอ้อย/PE-g-AA เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน HDPE ต่อ SAN-EPDM

จากรูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นผลึกของ HDPE กับอัตราส่วนของ HDPE ต่อ SAN-EPDM ซึ่งความเป็นผลึกจะแปรผันโดยตรงกับ ΔH_m ของระบบ โดยสามารถคำนวณความเป็นผลึกได้ดังนี้

$$\text{ร้อยละความเป็นผลึก} = \frac{\Delta H_m \text{ ของ recycled HDPE หลังผสม}}{\Delta H_m \text{ ของ recycled HDPE ก่อนผสม}} \times 100$$

พบว่าความเป็นผลึกจะมีแนวโน้มลดลง เมื่ออัตราส่วนของ SAN-EPDM เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจาก HDPE ในระบบคอมพอลิเมอร์มีปริมาณลดลง ตามอัตราส่วนในการผสม ดังนั้นความเป็นผลึกจึงลดลงด้วย

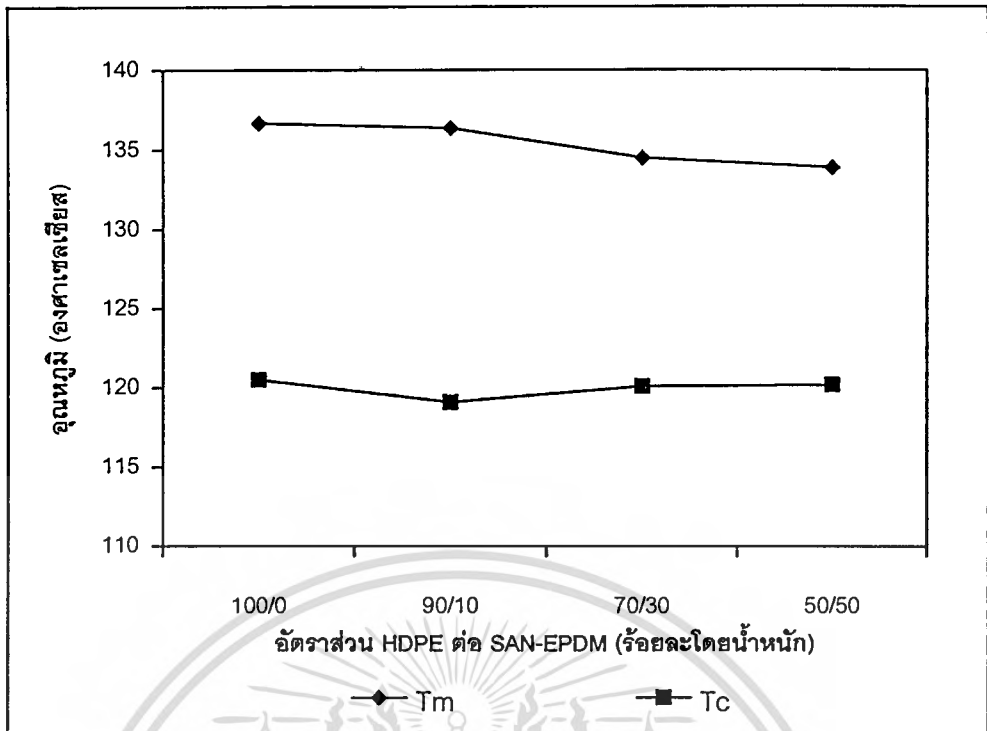
4.2.2 ผลของคอมพอลิเมอร์ HDPE/SAN-EPDM/ซานอ้อย/PE-g-MAH



รูปที่ 4.25 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอลิเมอร์ เมื่อใช้ PE-g-MAH เป็นสารช่วยยึดติด และเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน HDPE ต่อ SAN-EPDM

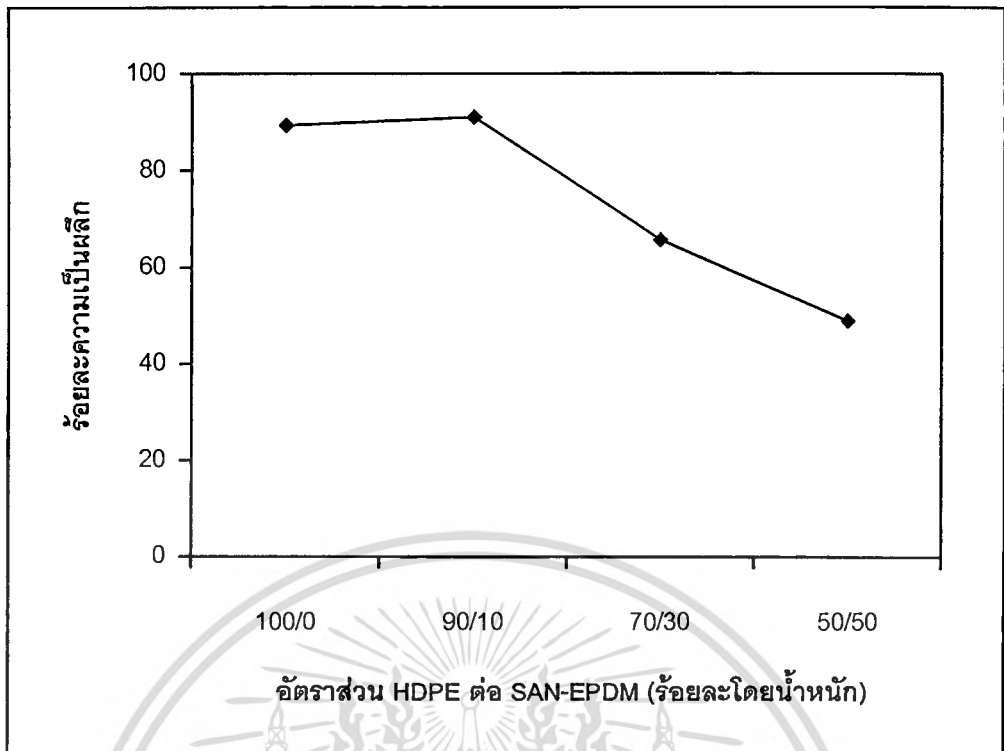
จากรูปที่ 4.25 จะปรากฏพีกของ HDPE อย่างชัดเจน ขณะที่ SAN-EPDM จะไม่ปรากฏพีก เนื่องจากมีความเป็นอสัณฐานสูง โดยความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า T_m และ T_c กับอัตราส่วนของ HDPE ต่อ SAN-EPDM แสดงดังรูปที่ 4.26 สำหรับค่า ΔH_m และ ΔH_c จะลดลงตามปริมาณ SAN-EPDM ที่เพิ่มขึ้น และจาก ΔH_m จะสามารถคำนวณความเป็นผลึกของ HDPE ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 แสดงอุณหภูมิหลอมผลึก (T_m) และอุณหภูมิตกผลึก (T_c) ของ HDPE ในคอมพอลิเมอร์ HDPE/SAN-EPDM/เส้นใยอ้อย/PE-g-MAH เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน HDPE ต่อ SAN-EPDM

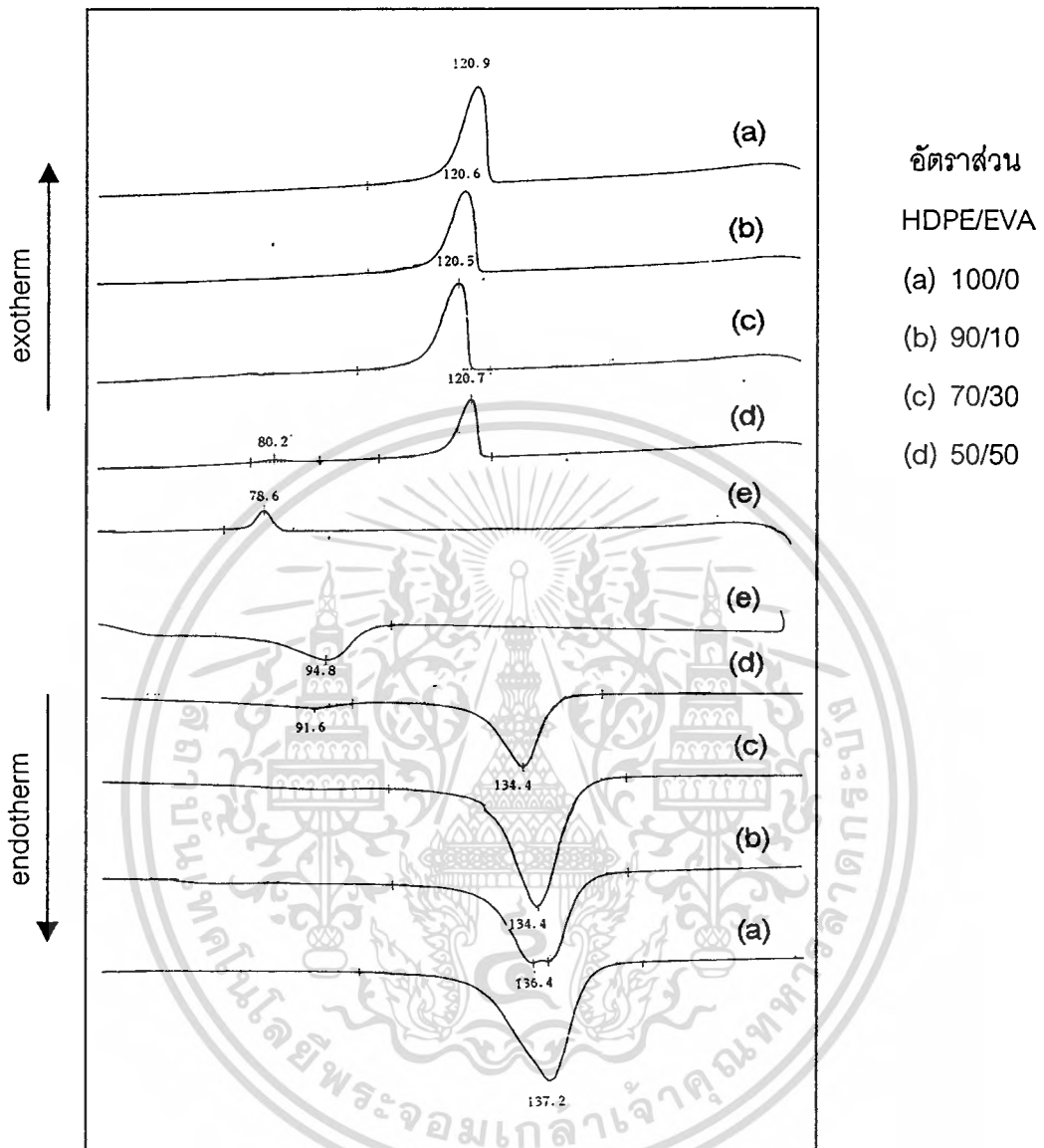
จากรูปที่ 4.26 แสดง T_m และ T_c ของ HDPE ในระบบคอมพอลิเมอร์ที่ใช้ SAN-EPDM ร่วมกับ PE-g-MAH ซึ่งจะพบว่า ลักษณะแนวโน้มของ T_m และ T_c จะมีลักษณะเช่นเดียวกับในระบบที่ใช้ PE-g-AA โดยที่ค่า T_c จะค่อนข้างคงที่ในทุก ๆ อัตราส่วน ขณะที่ T_m จะมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ SAN-EPDM ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.27 แสดงร้อยละความเป็นผลึกของ HDPE ในคอมพอลิเมอร์ HDPE/SAN-EPDM/เส้นใยอ้อย/PE-g-MAH เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน HDPE ต่อ SAN-EPDM

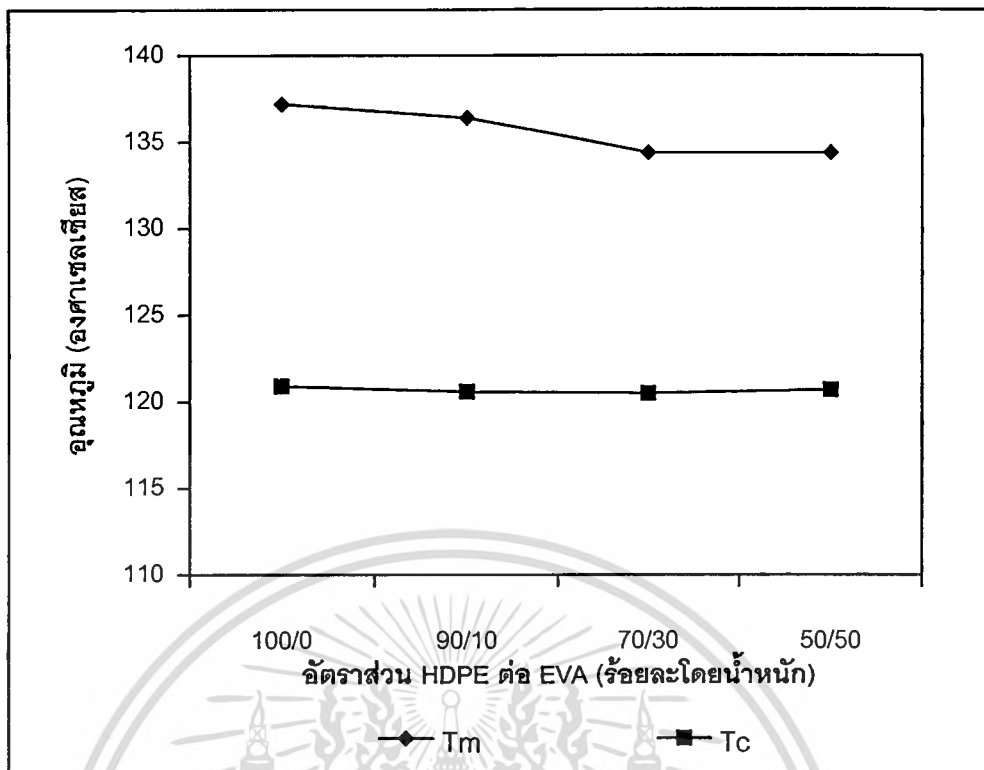
จากรูปที่ 4.27 แสดงถึงความเป็นผลึกของ HDPE ในระบบคอมพอลิเมอร์ เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ HDPE ต่อ SAN-EPDM จะพบว่า ค่าร้อยละความเป็นผลึกจะลดลงตามอัตราส่วนของ SAN-EPDM ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากปริมาณ HDPE ในคอมพอลิเมอร์ลดลง ตามอัตราส่วนในการผสม ดังนั้นความเป็นผลึกของระบบจึงลดลงด้วย

4.2.3 ผลของคอมพอลิเมอร์ HDPE/EVA/ชานอ้อย



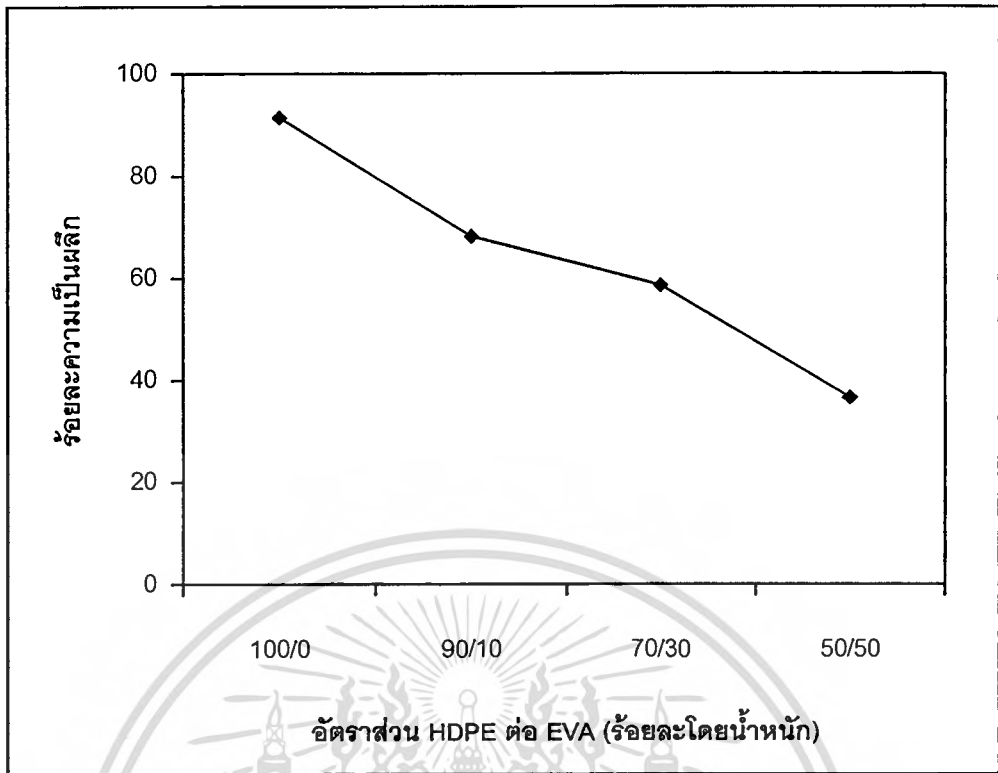
รูปที่ 4.28 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอลิเมอร์ เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน HDPE ต่อ EVA

จากรูปที่ 4.28 พบว่าพีคของ HDPE จะปรากฏอย่างชัดเจน ส่วน EVA ก็ปรากฏเป็นพีคเช่นกัน แต่เนื่องจาก EVA มีความเป็นผลึกน้อยกว่า พีคที่ปรากฏจึงไม่ชัดเจน ดังนั้นในคอมพอลิเมอร์ที่มีปริมาณ EVA น้อย ๆ จึงไม่สามารถสังเกตเห็นพีค EVA ได้ แต่เมื่อใช้ปริมาณ EVA เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 50 ก็จะมีพีค EVA ปรากฏอยู่เป็นพีคเล็ก ๆ



รูปที่ 4.29 แสดงอุณหภูมิหลอมผลึก (T_m) และอุณหภูมิตกผลึก (T_c) ของ HDPE ในคอมพอลิเมอร์ HDPE/EVA/เส้นใยอ้อย เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน HDPE ต่อ EVA

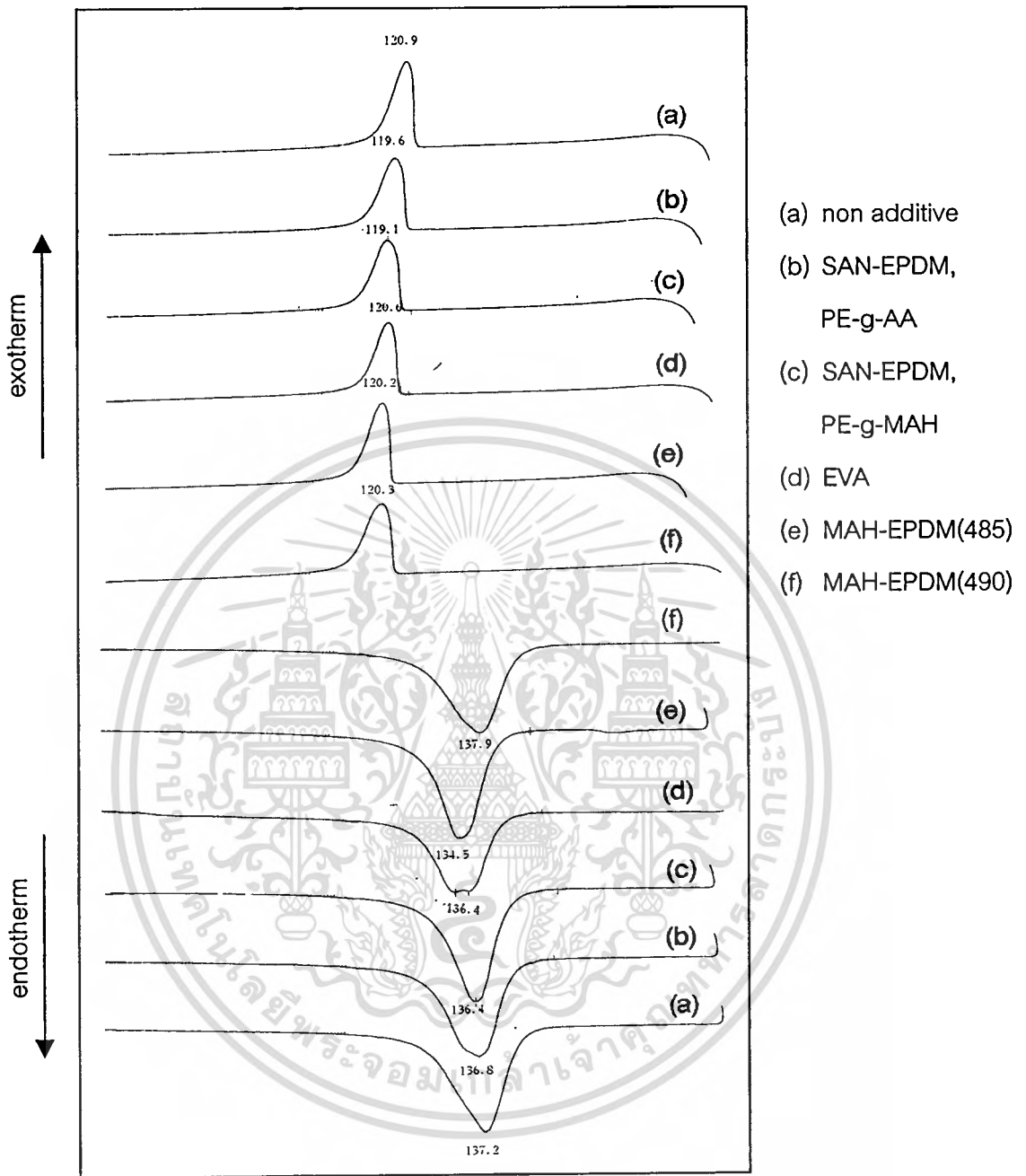
จากรูปที่ 4.29 แสดง T_m และ T_c ของ HDPE ในระบบคอมพอลิเมอร์ที่ใช้ EVA เพื่อทำหน้าที่เป็นทั้งสารช่วยยึดติดและสารช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทก พบว่า ค่า T_c จะคงที่ แม้จะเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ HDPE ต่อ EVA ขณะที่ค่า T_m จะมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ EVA ที่เพิ่มขึ้น แสดงว่า EVA สามารถละลายเข้ากันได้บางส่วนกับ HDPE จึงทำให้ค่า T_m ของ HDPE ลดลง



รูปที่ 4.30 แสดงร้อยละความเป็นผลึกของ HDPE ในคอมพอสิต HDPE/EVA/เส้นใยอ้อย เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน HDPE ต่อ EVA

รูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความเป็นผลึกของ HDPE กับอัตราส่วนของ HDPE ต่อ EVA โดยความเป็นผลึกจะแปรผันโดยตรงกับ ΔH_m ซึ่งจากการทดลองพบว่า เมื่ออัตราส่วนของ EVA เพิ่มขึ้น ความเป็นผลึกจะลดลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากปริมาณของ HDPE ที่ลดลง ตามอัตราส่วนในการผสม

4.2.4 ผลของคอมพอลิสมี่สารเติมแต่งต่างชนิดกัน



รูปที่ 4.31 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอลิสมี่อัตราส่วน HDPE ต่อสารเติมแต่งเป็น 90 ต่อ 10 โดยเปรียบเทียบสารเติมแต่งต่างชนิดกัน

จากรูปที่ 4.31 ทำการเปรียบเทียบระบบคอมพอลิสมี่อัตราส่วน HDPE ต่อ EVA หรือ EPDM เป็น 90 ต่อ 10 พบว่า ค่า T_m และ T_c จะมีค่าใกล้เคียงกันในทุก ๆ ระบบ

เมื่อพิจารณาพลังงานอิสระของระบบ จาก

$$\Delta G = \Delta H_m - T_m \Delta S_m$$

โดยระบบจะเกิดการหลอมเมื่อพลังงานอิสระเป็นศูนย์ ดังนั้น

$$\Delta S_m = \Delta H_m / T_m$$

โดยค่า ΔS_m จะสามารถอธิบายถึงความเป็นระเบียบของระบบได้ และจากการทดลองสามารถคำนวณ ΔS_m ของระบบต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 4.1

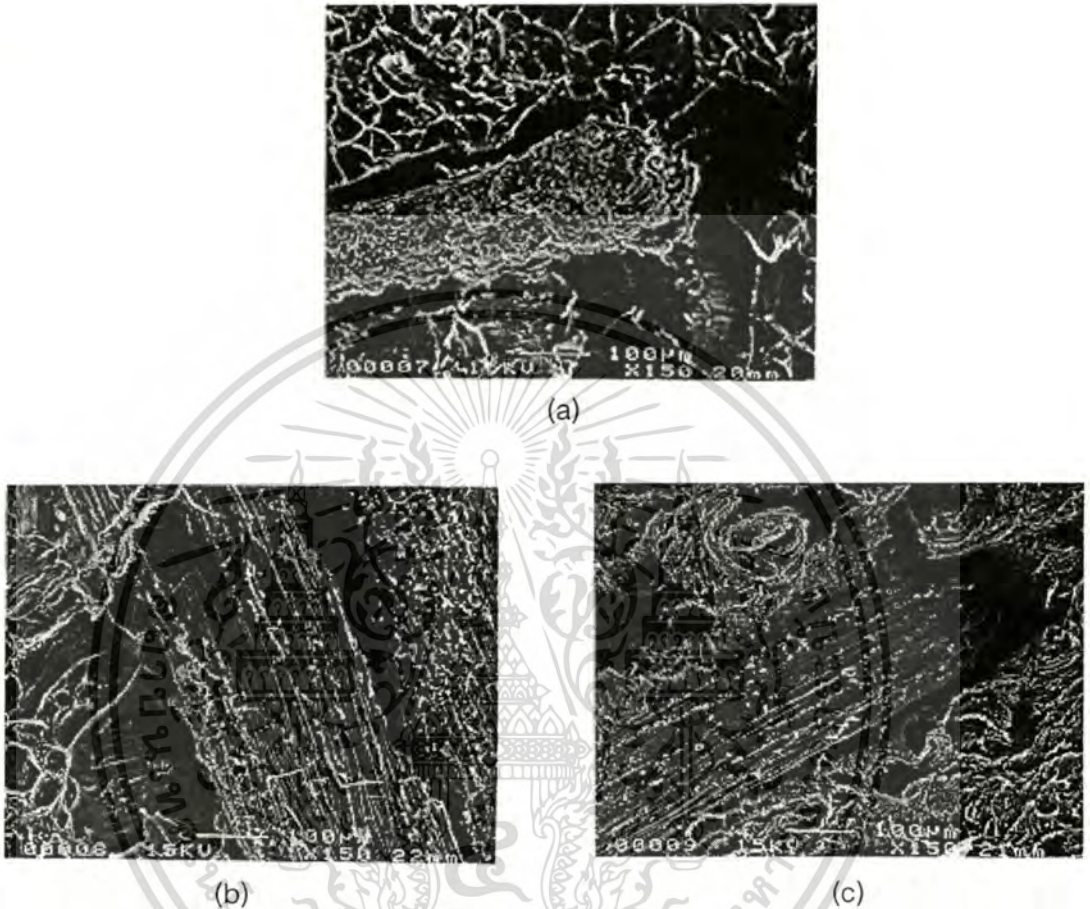
ตารางที่ 4.1 แสดง T_m , ΔH_m และ ΔS_m ของระบบคอมพอลิเมอร์ที่มีสารเติมแต่งต่างชนิดกัน

สูตร	สารเติมแต่ง	T_m ($^{\circ}\text{C}$)	ΔH_m (J/g)	ΔS_m (J/g $^{\circ}\text{C}$)
a	Non additive	137.2	134.41	0.98
b	SAN-EPDM,PE-g-AA	136.8	120.00	0.88
c	SAN-EPDM,PE-g-MAH	136.4	133.81	0.98
d	EVA	136.4	100.10	0.73
e	MAH-EPDM (485)	134.5	107.40	0.79
f	MAH-EPDM (490)	137.9	102.20	0.74

พบว่าระบบที่ใช้ SAN-EPDM จะมีความเป็นระเบียบน้อยกว่าระบบที่ใช้ EVA หรือ MAH-EPDM ซึ่งสังเกตได้จากค่า ΔS_m ที่คำนวณได้จะมีค่ามากกว่า แสดงว่า SAN-EPDM จะไปรบกวนการตกผลึกของ HDPE ได้มากกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากหมู่สไตรีนเป็นหมู่ที่แข็งทำให้การจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลเกิดได้ไม่ดี

4.3 สมบัติทางสัณฐานวิทยา

ทำการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมพอลิเมอร์จาก SEM โดยใช้ชิ้นงานที่ผ่านการตีกระแทก และใช้กำลังขยาย 150 เท่า ได้ผลการทดลองดังนี้



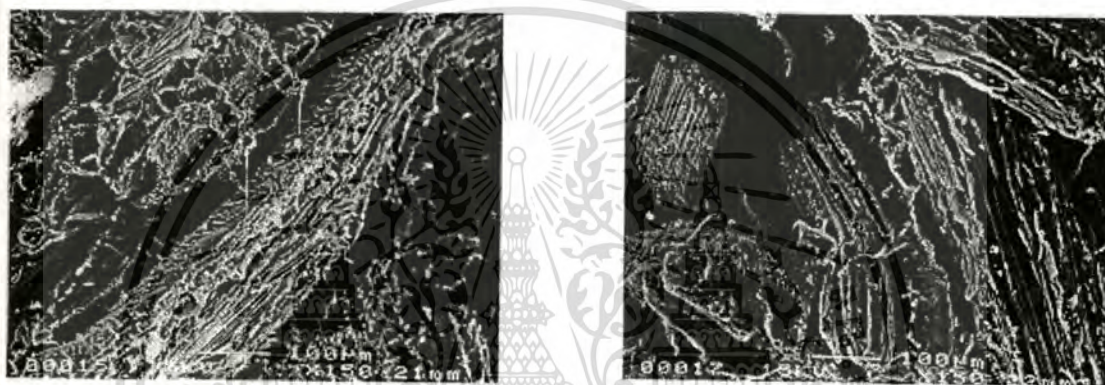
รูปที่ 4.32 แสดงสัณฐานวิทยาของคอมพอลิเมอร์ เมื่อใช้ PE-g-AA เป็นสารช่วยยึดติด โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน HDPE ต่อ SAN-EPDM

- (a) HDPE ต่อ SAN-EPDM เป็น 100 ต่อ 0
- (b) HDPE ต่อ SAN-EPDM เป็น 90 ต่อ 10
- (c) HDPE ต่อ SAN-EPDM เป็น 50 ต่อ 50

จากรูปที่ 4.32 จะสามารถสังเกตเห็นเส้นใยอ้อยซึ่งแทรกปะปนอยู่ในเนื้อเมตริกซ์ แต่ยังคงพบช่องว่างระหว่างผิวสัมผัสของเส้นใยและเมตริกซ์เกิดขึ้น และเมื่อใช้อัตราส่วน SAN-EPDM เพิ่มขึ้น จะสามารถสังเกตเห็นการยึดของเนื้อเมตริกซ์ได้มากขึ้น



(a)



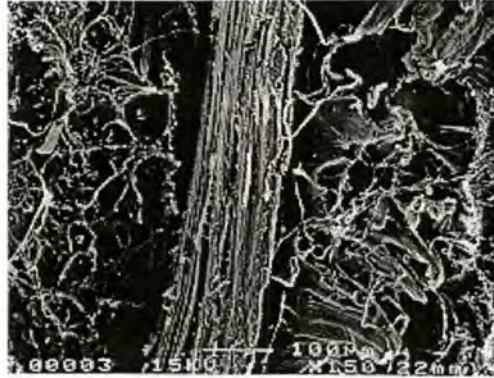
(b)

(c)

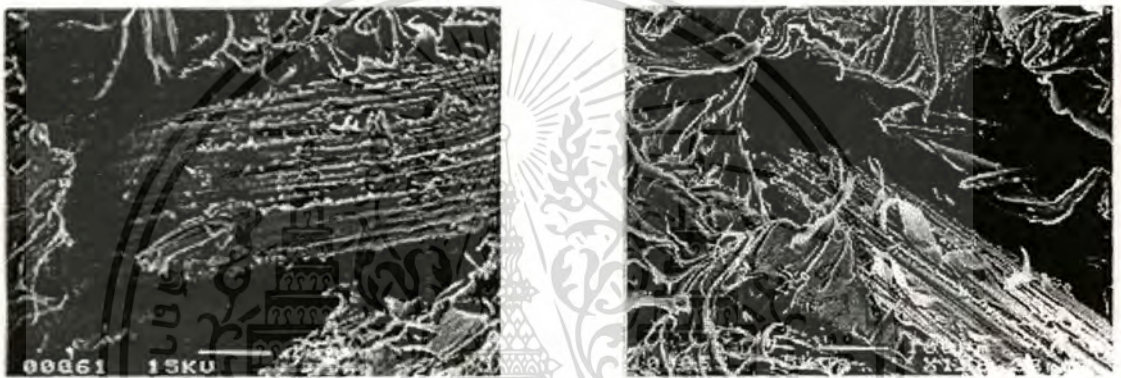
รูปที่ 4.33 แสดงสัณฐานวิทยาของคอมพอสิต เมื่อใช้ PE-g-MAH เป็นสารช่วยยึดติด โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน HDPE ต่อ SAN-EPDM

- (a) HDPE ต่อ SAN-EPDM เป็น 100 ต่อ 0
- (b) HDPE ต่อ SAN-EPDM เป็น 90 ต่อ 10
- (c) HDPE ต่อ SAN-EPDM เป็น 50 ต่อ 50

จากรูปที่ 4.33 แสดงสัณฐานวิทยาของคอมพอสิตที่ใช้ SAN-EPDM ร่วมกับ PE-g-MAH พบว่าลักษณะที่ได้จะคล้ายกับระบบคอมพอสิตที่ใช้ PE-g-AA โดยเส้นใยจะแทรกอยู่ในเนื้อเมตริกซ์ และจะยังสามารถสังเกตเห็นช่องว่างระหว่างผิวสัมผัสของเส้นใยและเมตริกซ์เกิดขึ้น



(a)



(b)

(c)

รูปที่ 4.34 แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาของคอมพอสิต เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน HDPE ต่อ EVA

(a) HDPE ต่อ EVA เป็น 100 ต่อ 0

(b) HDPE ต่อ EVA เป็น 90 ต่อ 10

(c) HDPE ต่อ EVA เป็น 50 ต่อ 50

จากรูปที่ 4.34 แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาของคอมพอสิตที่ใช้ EVA เพื่อทำหน้าที่เป็นทั้งสารช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทกและสารช่วยยึดติด พบว่าลักษณะที่ได้ก็จะคล้ายกับระบบอื่น ๆ คือยังพบช่องว่างระหว่างผิวสัมผัสของเส้นใยและเมตริกซ์เกิดขึ้น และในระบบที่ใช้ EVA นี้ จะสังเกตเห็นเนื้อเมตริกซ์มีการยึดได้มาก โดยเฉพาะที่ปริมาณ EVA สูง ๆ ซึ่งจะสอดคล้องกับผลการทดสอบความทนแรงกระแทกและผลการดึงยึดที่มีค่าสูงมาก เมื่อใช้ EVA ถึงร้อยละ 30-50



(a)



(b)

รูปที่ 4.35 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมพอลิเมอร์เมื่อใช้อัตราส่วน HDPE ต่อ MAH-EPDM เป็น 90 ต่อ 10 โดยเปรียบเทียบ MAH-EPDM สองชนิดที่มีปริมาณ MAH ต่างกัน

(a) MAH-EPDM(485)

(b) MAH-EPDM(490)

จากรูปที่ 4.35 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมพอลิเมอร์ที่ใช้ MAH-EPDM 2 ชนิดที่ต่างกัน โดยอัตราส่วนของ HDPE ต่อ MAH-EPDM เป็น 90 ต่อ 10 พบว่าระบบคอมพอลิเมอร์ทั้ง 2 ระบบ จะมีลักษณะคล้ายกัน และมีลักษณะเช่นเดียวกับระบบคอมพอลิเมอร์อื่น ๆ ในรูปที่ 4.32-4.34 โดยเส้นใยจะแทรกอยู่ในเนื้อเมตริกซ์ แต่ก็ยังพบช่องว่างระหว่างผิวสัมผัสของเส้นใยและเมตริกซ์เกิดขึ้น

บทที่ 5

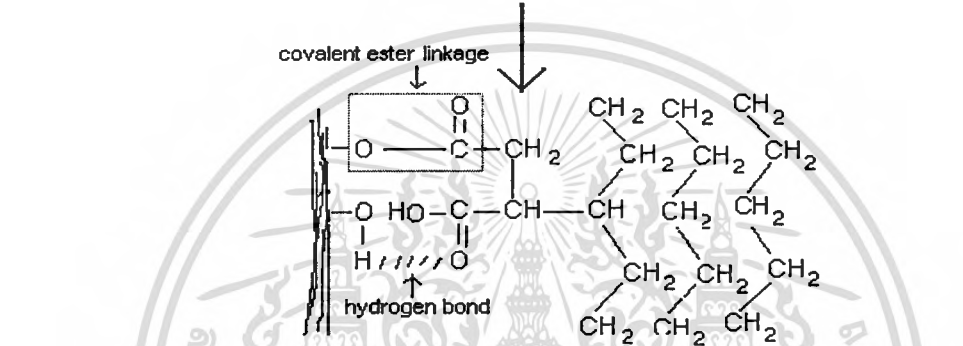
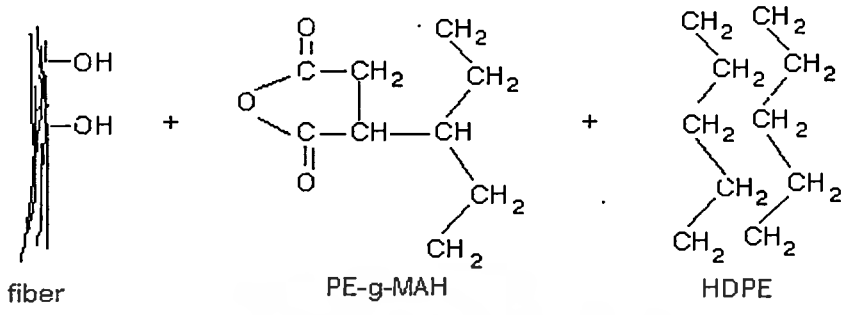
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคัดขนาดเตรียมคอมพอลิเมอร์จากขวดน้ำดื่ม HDPE และเส้นใยอ้อย โดยทำการศึกษาดังกล่าวถึงผลของการคัดขนาดขานอ้อย ผลของสารช่วยยึดติดที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ PE-g-AA และ PE-g-MAH และศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทก โดยจากการทดลองจะพบว่า การเติมขานอ้อยลงในขวด HDPE เมตริกซ์นั้น จะสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติความทนแรงดึงและมอดุลัสยืดหยุ่นได้ในระดับที่ไม่สูงนัก แต่ขานอ้อยจะไปลดสมบัติด้านการดึงยึด และความทนแรงกระแทกของ HDPE ลง และการเตรียมคอมพอลิเมอร์ไม่จำเป็นต้องทำการคัดขนาดขานอ้อยก่อน เนื่องจากขานอ้อยจะถูกทำลายระหว่างกระบวนการผลิต ทำให้สมบัติของคอมพอลิเมอร์ที่ได้ไม่แตกต่างกัน และพบว่าการใช้ HDPE จากขวดที่ใช้แล้วเป็นเมตริกซ์นั้น จะทำให้สมบัติด้านความเหนียวและทนแรงกระแทกของคอมพอลิเมอร์ดีขึ้น เนื่องจากสารเติมแต่งที่ถูกเติมในระหว่างการขึ้นรูปขวดนั่นเอง

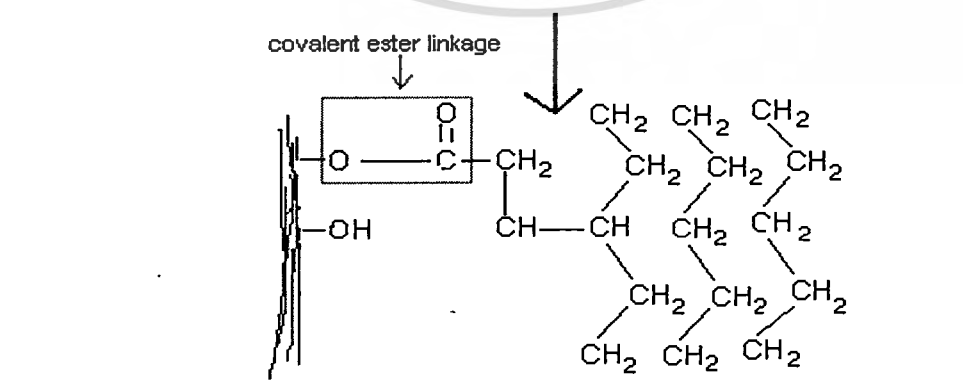
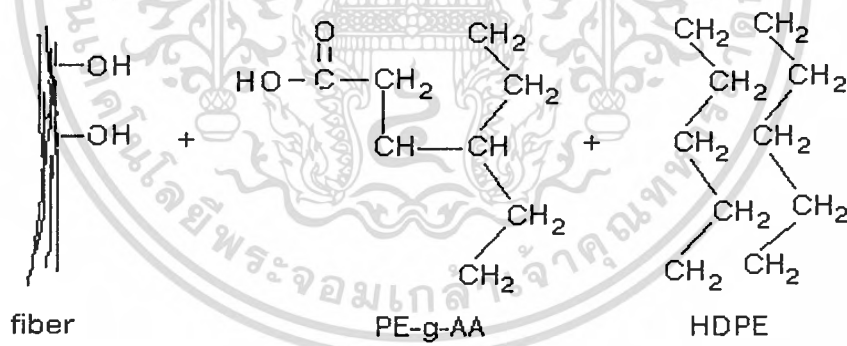
เมื่อเปรียบเทียบชนิดของสารช่วยยึดติดทั้ง 2 ชนิดที่ใช้ คือ PE-g-AA และ PE-g-MAH จะพบว่า สารช่วยยึดติดทั้ง 2 จะสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้เล็กน้อย และชนิดของสารช่วยยึดติดจะไม่มีผลต่อสมบัติของคอมพอลิเมอร์มากนัก โดยกลไกในการช่วยยึดติดของสารทั้งสองตัว จะเกิดจากหมู่เอคริลิกแอซิด หรือ มาลิกแอนไฮไดรด์ จากสารช่วยยึดติด ไปทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลบนเส้นใย เกิดเป็นพันธะเคมีขึ้น และปลายอีกด้านของสารช่วยยึดติดซึ่งมี HDPE เป็นโซ่หลักอยู่ก็จะเกิดการตกผลึกร่วมกับ HDPE ที่ใช้เป็นเมตริกซ์ ดังแสดงในรูปที่ 5.1 และ 5.2 และจะสังเกตเห็นว่าพันธะที่เกิดในการเชื่อมโยงของสารทั้งสองชนิดมีลักษณะคล้ายกัน ดังนั้นสารช่วยยึดติดทั้งสองชนิดจะให้ผลต่อสมบัติเชิงกลของคอมพอลิเมอร์ใกล้เคียงกัน

สารช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทกจะมีผลต่อสมบัติของคอมพอลิเมอร์เป็นอย่างมาก โดยจะไปช่วยปรับปรุงความเหนียวของคอมพอลิเมอร์ แต่จะไปลดสมบัติด้านความแข็งของคอมพอลิเมอร์ลง เนื่องจากสารช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทกที่ใช้จะมีลักษณะเป็นพอลิเมอร์อ่อนนุ่ม เมื่อเติมลงไปจะทำให้คอมพอลิเมอร์มีความเป็นผลึกลดลง จึงทำให้สมบัติด้านความแข็งลดลง เมื่อเปรียบเทียบชนิดของสารช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทก พบว่า EVA จะช่วยปรับปรุงความเหนียวของคอมพอลิเมอร์ได้ดีกว่าการใช้ SAN-EPDM ร่วมกับ สารช่วยยึดติด แสดงว่า EVA จะสามารถผสมเข้ากันกับเมตริกซ์ HDPE ได้ดีกว่า เนื่องจาก SAN-EPDM จะมี SAN ซึ่งมีสไตรีนที่เป็นหมู่ที่มีความแข็งอยู่ด้วย ทำให้ขัดขวางการรับและกระจายแรงของ EPDM ดังนั้นการใช้ EVA

จะให้ผลดีกว่า เนื่องจาก EVA จะมีทั้งสมบัติด้านการยืดหยุ่นที่ดี และยังมีสมบัติในการยึดติดที่ดีด้วย จึงไม่จำเป็นต้องเติมสารช่วยยึดติดลงไปอีก กลไกการยึดติดของ EVA แสดงดังรูปที่ 5.3

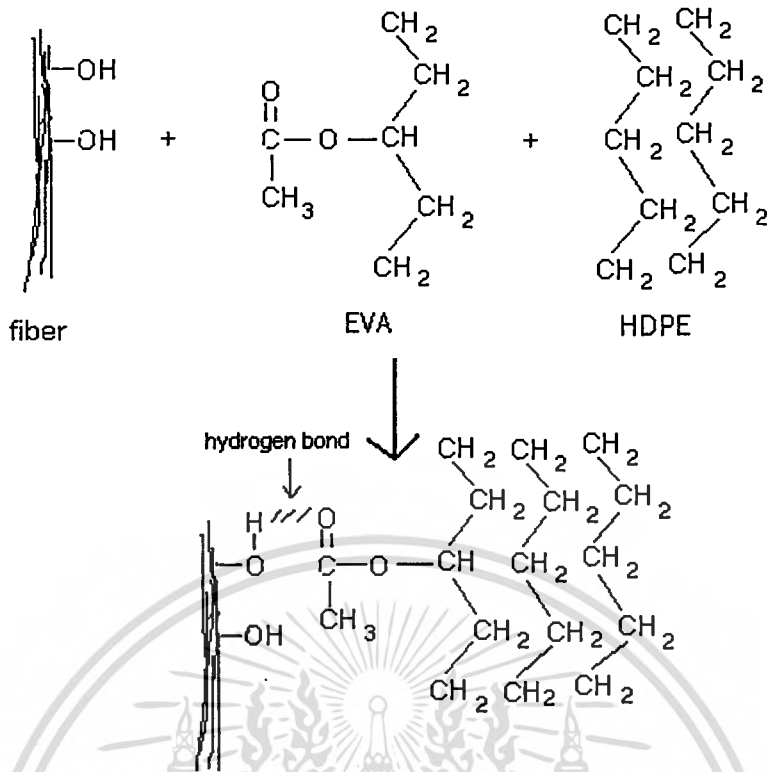


รูปที่ 5.1 แสดงกลไกการยึดติดของ PE-g-MAH



รูปที่ 5.2 แสดงกลไกการยึดติดของ PE-g-AA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 แสดงกลไกการยึดติดของ EVA

เมื่อทดลองเปรียบเทียบการใช้ SAN-EPDM ร่วมกับ PE-g-MAH เทียบกับการใช้ MAH-EPDM เพียงอย่างเดียว พบว่าการใช้ MAH-EPDM จะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตได้ดีกว่า เนื่องจาก MAH ที่ต่ออยู่กับ EPDM ก็จะสามารถเกิดการยึดติดกับเส้นใยได้ และ EPDM ก็จะสามารถรับและกระจายแรงได้เต็มที่ โดยไม่มีหมู่ SAN เป็นตัวขัดขวาง ปริมาณ MAH ที่ต่ออยู่กับ EPDM ก็จะมีผลต่อสมบัติของคอมพอสิตด้วย โดยถ้า MAH มากขึ้น ก็จะทำให้พันธะได้มากขึ้น ทำให้คอมพอสิตมีความแข็งแรงขึ้น แต่จะให้ผลตรงกันข้ามในด้านความเหนียว

เมื่อพิจารณาสมบัติทางความร้อน พบว่าจะปรากฏพีกของ HDPE อย่างชัดเจน โดย T_m และ T_c จะมีค่าใกล้เคียงกันในทุก ๆ ระบบ ส่วน EPDM ซึ่งมีลักษณะเป็นพอลิเมอร์อสัณฐานจะไม่ปรากฏพีก สำหรับ EVA จะสามารถตกผลึกได้บ้างเล็กน้อย ดังนั้นจึงสามารถสังเกตเห็นพีกเล็ก ๆ เกิดขึ้น และพบว่าปริมาณความเป็นผลึกของทุก ๆ ระบบจะลดลงตามปริมาณ EPDM หรือ EVA ที่เพิ่มขึ้น

จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมพอสิต พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาจะคล้ายกันในทุกระบบ โดยเส้นใยอ้อยจะแทรกอยู่ในเนื้อเมตริกซ์ แต่จะยังเกิดช่องว่างระหว่างผิวสัมผัสของเส้นใยและเมตริกซ์ และระบบคอมพอสิตที่มีอัตราส่วนของอิลาสโตเมอร์สูง ๆ จะสามารถสังเกตเห็นการยึดของเนื้อเมตริกซ์ได้มากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากงานวิจัยนี้สามารถสรุปผลได้ดังนี้

- ผลของขานอ้อยต่อสมบัติของคอมพอสิต โดยการเติมขานอ้อยลงใน HDPE จะทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติด้านความแข็งเพิ่มขึ้น แต่จะเปราะมากขึ้น สมบัติด้านการดึงยึดและความทนแรงกระแทกจะลดลง
- ผลของอิลาสโตเมอร์ จะช่วยทำให้คอมพอสิตมีสมบัติด้านความเหนียว นุ่ม ดึงยึดได้มากขึ้น สามารถทนแรงกระแทกได้สูงขึ้น ลดความแข็งเปราะลง

ลำดับความสามารถในการดึงยึดจากสูงไปต่ำ เรียงได้ดังนี้

MAH-EPDM(485) > MAH-EPDM(490) > SAN-EPDM > EVA

ลำดับความสามารถในการรับแรงกระแทกจากสูงไปต่ำ เรียงได้ดังนี้

MAH-EPDM(485) > MAH-EPDM(490) > EVA > SAN-EPDM

- ผลของหมู่มีซีวต่อสมบัติการยึดติด ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติความทนแรงกระแทกของคอมพอสิต โดยสมบัตินี้จะขึ้นกับแรงยึดติดระหว่างเส้นใยกับเมตริกซ์ แต่จะไม่ส่งผลต่อความทนแรงดึง

ลำดับความสามารถของหมู่มีซีวที่ช่วยในการยึดติดจากสูงไปต่ำ เรียงได้ดังนี้

MAH > VAc > SAN

ดังนั้นในการเตรียมคอมพอสิตจากเส้นใยธรรมชาติและพอลิเมอร์สังเคราะห์ ควรคำนึงถึงชนิดของอิลาสโตเมอร์ที่จะนำมาใช้ปรับปรุงสมบัติของคอมพอสิตด้วย โดยอิลาสโตเมอร์ควรมีโครงสร้างทางเคมีคล้ายคลึงกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ใช้เป็นเมตริกซ์ และสารช่วยยึดติดที่ดีควรสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสได้ จึงจะทำให้ได้คอมพอสิตที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาปรับปรุงสมบัติของคอมพอลิเมอร์โดยทดลองเปลี่ยนสารช่วยยึดติดและสารช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทก หรือทดลองปรับปรุงการยึดติดระหว่างเส้นใยและเมตริกซ์โดยวิธีอื่น ๆ เช่น การตอกกึ่งโดยใช้รังสี เป็นต้น
2. ควรศึกษาความสามารถในการย่อยสลายและการเสื่อมสภาพของคอมพอลิเมอร์จากเส้นใยธรรมชาติ เมื่อทิ้งไว้ในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ เพื่อให้ทราบถึงความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมและอายุการใช้งานของคอมพอลิเมอร์
3. ควรศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตคอมพอลิเมอร์จากเส้นใยธรรมชาติและขยะพลาสติก ในเชิงการค้า โดยศึกษาด้านทุนการผลิตเทียบกับสมบัติของคอมพอลิเมอร์ที่ผลิตได้



เอกสารอ้างอิง

1. Burger, H. et. al. 1995. "Use or Natural Fibers and Environmental Aspects." International Polymer Science and Technology. 22(8) : 25-34.
2. Diraddo, R.W. and Laroche I. 1995. "Physical Properties of Virgin HDPE and Recycled Polymers." Plastics,Rubber and Composites Processing and Applications. 24 : 97-200.
3. Lourltcheva, M.K. et. al. 1990. "Recycling of High Density Polyethylene Containers." Polymer Degradation and Stability. 57 : 77-81.
4. Raj, R.G. et. al. 1990. "The Influence of Coupling Agents on Mechanical Properties of Composites Containing Cellulosic Filters." Polym.-Plast.Technol. Eng. 29 (4) : 339-353.
5. Woodhams, R.T. et. al. 1984. "Wood Fibers as Reinforcing Fillers for Polyolefins." Polym. Eng. Sci. 24 (15) : 1166-1171.
6. Raj, R.G. et. al. 1989. "Use of Wood Fiber as a Filler in Polyethylene : Studies on Mechanical Properties." Plastics and Rubber Processing and Applications. 11 : 215-221.
7. Kokta, B.V. et. al. 1989. "Use of Wood Flour as Filler in Polypropylene : Studies on Mechanical Properties." Polym.-Plast.Technol. Eng. 28 (3) : 247-259.
8. Yam, K.L. et. al. 1990. "Composites from Compounding Wood Fibers with Recycled HDPE." Polym. Eng. Sci. 30 (11) : 693-700.
9. Bataille, P. et. al. 1990. "Interfacial Phenomena in Cellulose/Polyethylene Composites." Polymer Composites. 11 (5) : 301-304.
10. Simpson, R.J. and Selke, S.E. 1992. "Composite Materials from Recycled Multilayer Polypropylene Bottles and Wood Fibers." Emerging Technologies in Plastics Recycling. Washington D.C. : American Chemical Society.
11. Quillin, D.T. et. al. 1993. "Crystallinity in the Polypropylene/Cellulose System : Nucleation and Crystalline Morphology." J. Appl. Polym. Sci. 50 : 1187-1194.

12. George, J. et. al. 1994. "Mechanical and Viscoelastic Properties of Short Pineapple Fiber Reinforced Low-Density Polyethylene Composites." *Polymer Science Recent Advances*. 2 : 526-531.
13. Schneider, J.P. et. al. 1995. "Biofibers as Reinforcing Fillers in Thermoplastic Composites." *Engineering Plastics*. 8 : 207-222.
14. Kim, T.J. et. al. 1997. "The Preparation and Characteristic of Low-Density Polyethylene Composites Containing Cellulose Treated with Cellulase." *Polymer Composites*. 18 (3) : 273-282.
15. Park, B.D. and Balatinez, J.J. 1997. "Mechanical Properties of Wood-Fiber/Toughened Isotactic Polypropylene Composites." *Polymer Composites*. 18 (1) : 79-89.
16. Richardson, T. 1987. *Composites: A Design-Guide*. New York : Industrial Press.
17. Matthews, F.L. and Rawlings, R.D. 1994. *Composite Materials : Engineering and Science*. London : Chapman & Hall.
18. Trostyanskaya, E.B. 1995. "Polymeric matrices in fiber-reinforced composite Materials." *Polymer Matrix Composites*. London : Chapman & Hall.
19. Jang, B.Z. 1994. *Advanced Polymer Composites*. New York : ASM International.
20. Hull, D. and Clyne, T.W. 1996. *An Introduction to Composite Materials*. 2nd ed. Great Britain : Cambridge University Press.
21. Hollaway, L. 1993. *Polymer Composites for Civil and Structural Engineering*. London : Chapman & Hall.
22. English, B. et. al. 1994. "Lignocellulosic Composites." *Cellulosic Polymers ; Blends and Composites*. New York : Hanser.
23. ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. 2527. *เคมีพอลิเมอร์พื้นฐาน*. กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์.
24. ปรีชา เกียรติกระจาย. 2532. " การใช้ประโยชน์จากขาน้อย." *วารสารน้ำตาล*. 25 (5) : 13-19.
25. Mark, H.F. et. al. 1965. *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. Vol. 2. New York : John Wiley & Sons.
26. ปกิต อุดมโชติ. 2523. " ผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมน้ำตาล." *วารสารน้ำตาล*. 16 (4) : 18-27.

27. นันทพร พันธุ์ภักดี และเรวดี สกุลอาริยะ. 2540 "วัสดุคอมพอสิตจากพอลิพรอพิลีนและเส้นใยอ้อย." โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
28. เฉลิมพล อธิธิวิวัฒน์ และสกุล บรรจงวุฒิ. 2537. "การใช้เส้นใยเซลลูโลสผสมกับเส้นใยแก้วเพื่อเป็นสารเสริมแรงในพอลิพรอพิลีน." โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
29. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2541. "การใช้ประโยชน์ของกากอ้อย." วารสารน้ำตาล. 34(3) : 4-22.
30. กระทรวงอุตสาหกรรม. 2521. "ข่าวกรมวิทยาศาสตร์." 88 : 27-28.
31. Lutz, J.T. , editor. 1989. Thermoplastic Polymer Additives : Theory and Practice. New York : Marcel Dekker.
32. Hofmann, W. 1989. Rubber Technology Handbook. New York : Hanser.
33. Bryson, J.A. 1988. Rubbery Materials and Their Compounds. London : Elsevier Science.
34. Morton, M., editor. 1987. Rubber Technology. 3rd ed. New York : Van Nostrand Reinhold.
35. Edenbaum, J., editor. 1992. Plastics Additives and Modifiers Handbook. New York : Van Nostrand Reinhold.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

สมบัติของสารเคมี

Acrylic acid modified high density polyethylene (PE-g-AA) : รหัส POLYBOND 1009 จาก TOA Uni Chemical Manufacturing , Ltd.

องค์ประกอบ	Acrylic acid modified high density polyethylene
ลักษณะทางกายภาพ	เป็นเม็ด
อัตราการไหล (190°C)	5-6 g/10 min
ความหนาแน่น (23°C)	0.95 g/cm ³
ปริมาณกรดอะคริลิก	ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก
จุดหลอมเหลว	127°C

Maleic anhydride modified high density polyethylene (PE-g-MAH) : รหัส POLYBOND 3009 จาก TOA Uni Chemical Manufacturing , Ltd.

องค์ประกอบ	Maleic anhydride modified high density polyethylene
ลักษณะทางกายภาพ	เป็นเม็ด
อัตราการไหล (190°C)	3-6 g/10 min
ความหนาแน่น (23°C)	0.95 g/cm ³
จุดหลอมเหลว	127°C

Styrene acrylonitrile modified ethylene propylene diene terpolymer (SAN-EPDM) : รหัส ROYALTUF 372P20 จาก TOA Uni Chemical Manufacturing , Ltd.

องค์ประกอบ	Styrene acrylonitrile modified ethylene propylene non-conjugated diene elastomer
ลักษณะทางกายภาพ	เป็นเม็ดพลาสติก
ความต้วงจำเพาะ	0.98
อัตราการไหล (265°C)	20 g/10 min

Maleic anhydride modified ethylene propylene diene terpolymer (MAH-EPDM) : รหัส ROYALTUF 485 จาก TOA Uni Chemical Manufacturing , Ltd.

องค์ประกอบ	Maleic anhydride modified ethylene propylene non-conjugated diene elastomer
ลักษณะทางกายภาพ	เป็นเม็ดยาง
ความตึงจำเพาะ	0.85
ปริมาณ MAH	ร้อยละ 0.5
ความหนืด (125°C)	30
เอทิลีน/พรอพิลีน	75/25

Maleic anhydride modified ethylene propylene diene terpolymer (MAH-EPDM) : รหัส ROYALTUF 490 จาก TOA Uni Chemical Manufacturing , Ltd.

องค์ประกอบ	Maleic anhydride modified ethylene propylene non-conjugated diene elastomer
ลักษณะทางกายภาพ	เป็นเม็ดยาง
ความตึงจำเพาะ	0.89
ปริมาณ MAH	ร้อยละ 1.0
ความหนืด (125°C)	35
เอทิลีน/พรอพิลีน	55/45

Ethylene vinyl acetate copolymer (EVA) : รหัส NUC 8450 จาก Nippon Unicar Co., Ltd.

ความหนาแน่น	0.93 g/cm ³
อัตราการไหล	2.0 g/10 min
จุดเปราะตัว	ต่ำกว่า -75°C
จุดอ่อนตัว	61°C
ความทนแรงดึง	150 kg/cm ²
ร้อยละการดึงยืด	650
มอดุลัสของความแข็ง	500 kg/cm ²
ความแข็ง shore A	92
shore D	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

High density polyethylene (HDPE) : รหัส POLENE G2855 จาก Thai Petrochemical Industry Co., Ltd.

ความหนาแน่น	0.955 g/cm ³
อัตราการไหล (190°C)	0.35 g/10 min
อุณหภูมิขึ้นรูป	170-200°C
ความทนแรงดึง ณ จุดขาด	มากกว่า 32 N/mm ²
ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด	มากกว่า 1700
ความทนแรงกระแทก	มากกว่า 5.5 mj/mm ²
ความแข็งโดยหัดกดแบบกลม	มากกว่า 53 N/mm ²



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

สภาวะในการขึ้นรูปชิ้นงาน

อุณหภูมิในการฉีดขึ้นรูป (Temperature programming)

NOZZLE TEMP.	170
ZONE 1 TEMP.	160
ZONE 2 TEMP.	150

เวลาในการฉีดขึ้นรูป (Time programming)

DIE CLS/OPN TIME	60	MELTING TIME	120
SID-COR ACT TIME	0	DECOMPRS TIME	2
1 ST STG. INJ. TIME	20	COOLING TIME	200
2 ND STG. INJ. TIME	15	EJECTOR COUNT	2
3 RD STG. INJ. TIME	10	SCW. FEW. TIME	0
EJE. FWD. DLY TIME	0	SCW. BWD. TIME1	0
MEL. FWD. DLY TIME	0	SCW. BWD. TIME2	0
EJE. BKD. DLY TIME	0	ALARM TIME	500

ความเร็วในการฉีดขึ้นรูป (Programming flow speed)

RAPID CLS. SPD.	25	1 ST STG. INJ. SPD.	30
HIGH CLS. SPD.	15	2 ND STG. INJ. SPD.	20
CLAMPING SPD.	15	3 RD STG. INJ. SPD.	25
DIE OPN. SLW.1	10	MELTING SPD.	35
RAPID OPN. SPD.	25	DECOMP. SPD.	50
DIE OPN. SLW.	15	EJECTOR SPD.	20
PLUNGER SPD.	30	SCREW-IN SPD.	0
DIE ADJ. SPD.	25	DIE CHANGE SPD.	0

ความดันในการฉีดขึ้นรูป (Pressure programming)

DIE CLS. PRESR.	26	MELTING PRESR.	80
CLS. LOW PRESR.	30	DECOMP. PRESR.	100
CLS. HI PRESR.	50	PLUNGER PRESR.	30
DIE OPN. PRESR.	30	EJECTOR PRESR.	25
1 ST INJ. PRESR.	80	SCW.-IN PRESR.	20
2 ND INJ. PRESR.	70	DIE ADJ. PRESR.	50
3 RD INJ. PRESR.	60		



ภาคผนวก ค

สมบัติเชิงกลของคอมพอสิต

ตารางที่ ค.1 แสดงความทนแรงดึงของคอมพอสิต

สูตร	Recycled HDPE (wt% of matrix)	Impact modifier (wt% of matrix)			Coupling agent (wt% of fiber)		Bagasse fibers (wt% of matrix)	Tensile strength (MPa)	
		SAN-EPDM	EVA	MAH-EPDM	PE-g-AA	PE-g-MAH		Mean	SD
1	100	-	-	-	-	-	-	28.74	0.91
2*	100	-	-	-	-	-	10	30.33	0.78
3**	100	-	-	-	-	-	10	27.79	1.30
4	100	-	-	-	5	-	10	31.33	0.89
5	90	10	-	-	5	-	10	26.38	0.98
6	70	30	-	-	5	-	10	21.45	0.47
7	50	50	-	-	5	-	10	15.88	0.32
8	100	-	-	-	-	5	10	28.85	0.52
9	90	10	-	-	-	5	10	25.63	0.33
10	70	30	-	-	-	5	10	20.98	0.47
11	50	50	-	-	-	5	10	16.43	0.34

ตารางที่ ค.1 (ต่อ)

สูตร	Recycled HDPE (wt% of matrix)	Impact modifier (wt% of matrix)			Coupling agent (wt% of fiber)		Bagasse fibers (wt% of matrix)	Tensile strength (MPa)	
		SAN-EPDM	EVA	MAH-EPDM	PE-g-AA	PE-g-MAH		Mean	SD
12	100	-	-	-	-	-	10	29.44	0.51
13	90	-	10	-	-	-	10	25.65	0.38
14	70	-	30	-	-	-	10	20.59	0.51
15	50	-	50	-	-	-	10	16.04	0.39
16***	90	-	-	10	-	-	10	24.46	0.41
17****	90	-	-	10	-	-	10	24.77	0.40

* ใช้ pure HDPE

** ใช้เส้นใยดัดไม่ผ่านการคัดขนาด

*** ใช้ MAH-EPDM รหัส ROYALTUF 485

**** ใช้ MAH-EPDM รหัส ROYALTUF 490

ตารางที่ ค.2 แสดงร้อยละการดัดยั้งของคอมพอลิเมอร์

สูตร	Recycled HDPE (wt% of matrix)	Impact modifier (wt% of matrix)			Coupling agent (wt% of fiber)		Bagasse fibers (wt% of matrix)	Elongation at break (%)	
		SAN-EPDM	EVA	MAH-EPDM	PE-g-AA	PE-g-MAH		Mean	SD
1	100	-	-	-	-	-	-	40.38	22.77
2*	100	-	-	-	-	-	10	9.47	1.34
3**	100	-	-	-	-	-	10	14.71	3.42
4	100	-	-	-	5	-	10	13.95	2.15
5	90	10	-	-	5	-	10	16.64	4.13
6	70	30	-	-	5	-	10	19.27	2.21
7	50	50	-	-	5	-	10	25.62	3.23
8	100	-	-	-	-	5	10	13.79	7.79
9	90	10	-	-	-	5	10	18.10	3.91
10	70	30	-	-	-	5	10	23.32	1.99
11	50	50	-	-	-	5	10	17.81	2.91
12	100	-	-	-	-	-	10	12.40	6.94
13	90	-	10	-	-	-	10	16.36	3.80
14	70	-	30	-	-	-	10	61.27	18.16

ตารางที่ ค.2 (ต่อ)

สูตร	Recycled HDPE (wt% of matrix)	Impact modifier (wt% of matrix)			Coupling agent (wt% of fiber)		Bagasse fibers (wt% of matrix)	Elongation at break (%)	
		SAN-EPDM	EVA	MAH-EPDM	PE-g-AA	PE-g-MAH		Mean	SD
15	50	-	50	-	-	-	10	75.69	14.30
16***	90	-	-	10	-	-	10	20.61	1.33
17****	90	-	-	10	-	-	10	21.07	1.16

* ใช้ pure HDPE

** ใช้เส้นใยชื่อยไม่ผ่านการคัดขนาด

*** ใช้ MAH-EPDM รหัส ROYALTUF 485

**** ใช้ MAH-EPDM รหัส ROYALTUF 490

ตารางที่ ค.3 แสดงมอดุลีตีดยืดหยุ่นของคอมพอลิเมอร์

สูตร	Recycled HDPE (wt% of matrix)	Impact modifier (wt% of matrix)			Coupling agent (wt% of fiber)			Bagasse fibers (wt% of matrix)	Modulus of elasticity (MPa)	
		SAN-EPDM	EVA	MAH-EPDM	PE-g-AA	PE-g-MAH	Mean		SD	
1	100	-	-	-	-	-	-	-	215.09	19.69
2*	100	-	-	-	-	-	10	10	388.32	33.94
3**	100	-	-	-	-	-	10	10	275.39	46.11
4	100	-	-	-	5	-	10	10	268.86	28.67
5	90	10	-	-	5	-	10	10	206.14	56.04
6	70	30	-	-	5	-	10	10	152.37	19.09
7	50	50	-	-	5	-	10	10	86.68	9.25
8	100	-	-	-	-	5	10	10	251.06	23.40
9	90	10	-	-	-	5	10	10	216.81	29.38
10	70	30	-	-	-	5	10	10	137.38	13.69
11	50	50	-	-	-	5	10	10	125.83	10.91
12	100	-	-	-	-	-	10	10	263.58	13.19
13	90	-	10	-	-	-	10	10	263.03	25.68
14	70	-	30	-	-	-	10	10	155.08	14.63

ตารางที่ ค.3 (ต่อ)

สูตร	Recycled HDPE (wt% of matrix)	Impact modifier (wt% of matrix)			Coupling agent (wt% of fiber)		Bagasse fibers (wt% of matrix)	Modulus of elasticity (Mpa)	
		SAN-EPDM	EVA	MAH-EPDM	PE-g-AA	PE-g-MAH		Mean	SD
15	50	-	50	-	-	-	10	28.33	5.67
16***	90	-	-	10	-	-	10	224.19	17.58
17****	90	-	-	10	-	-	10	231.15	18.71

* ใช้ pure HDPE

** ใช้เส้นใยชอยไม่ผ่านการดัดขนาด

*** ใช้ MAH-EPDM รหัส ROYALTUF 485

**** ใช้ MAH-EPDM รหัส ROYALTUF 490



ตารางที่ ค.4 แสดงความทนแรงกระแทกของคอมพอสิต

สูตร	Recycled HDPE (wt% of matrix)	Impact modifier (wt% of matrix)			Coupling agent (wt% of fiber)		Bagasse fibers (wt% of matrix)	Impact strength (kJ/m ²)	
		SAN-EPDM	EVA	MAH-EPDM	PE-g-AA	PE-g-MAH		Mean	SD
1	100	-	-	-	-	-	-	55.1	2.67
2*	100	-	-	-	-	-	10	14.60	1.64
3**	100	-	-	-	-	-	10	14.9	0.70
4	100	-	-	-	5	-	10	14.2	0.71
5	90	10	-	-	5	-	10	21.2	0.38
6	70	30	-	-	5	-	10	22.4	1.60
7	50	50	-	-	5	-	10	27.5	2.88
8	100	-	-	-	-	5	10	14.7	1.05
9	90	10	-	-	-	5	10	18.3	1.34
10	70	30	-	-	-	5	10	25.0	1.99
11	50	50	-	-	-	5	10	20.9	1.59
12	100	-	-	-	-	-	10	15.0	1.06
13	90	-	10	-	-	-	10	20.4	2.87
14	70	-	30	-	-	-	10	31.2	1.81

ตารางที่ ค.4 (ต่อ)

สูตร	Recycled HDPE (wt% of matrix)	Impact modifier (wt% of matrix)			Coupling agent (wt% of fiber)		Bagasse fibers (wt% of matrix)	Impact strength (kJ/m ²)	
		SAN-EPDM	EVA	MAH-EPDM	PE-g-AA	PE-g-MAH		Mean	SD
15	50	-	50	-	-	-	10	33.7	4.96
16***	90	-	-	10	-	-	10	27.3	2.27
17****	90	-	-	10	-	-	10	24.9	2.63

* ใช้ pure HDPE

** ใช้เส้นใยดัดไม่ผ่านการคัดขนาด

*** ใช้ MAH-EPDM รหัส ROYALTUF 485

**** ใช้ MAH-EPDM รหัส ROYALTUF 490

ตารางที่ ค.5 แสดงความแข็งของคอมพอลิเมอร์

สูตร	Recycled HDPE (wt% of matrix)	Impact modifier (wt% of matrix)			Coupling agent (wt% of fiber)		Bagasse fibers (wt% of matrix)	Hardness	
		SAN-EPDM	EVA	MAH-EPDM	PE-g-AA	PE-g-MAH		Mean	SD
1	100	-	-	-	-	-	-	60.00	0
2*	100	-	-	-	-	-	10	60.67	1.15
3**	100	-	-	-	-	-	10	60.67	0.58
4	100	-	-	-	5	-	10	60.33	0.58
5	90	10	-	-	5	-	10	59.67	0.58
6	70	30	-	-	5	-	10	57.33	0.58
7	50	50	-	-	5	-	10	52.00	1.00
8	100	-	-	-	-	5	10	59.67	0.58
9	90	10	-	-	-	5	10	60.67	1.15
10	70	30	-	-	-	5	10	57.33	0.58
11	50	50	-	-	-	5	10	54.33	0.58
12	100	-	-	-	-	-	10	60.67	1.15
13	90	-	10	-	-	-	10	57.67	1.15
14	70	-	30	-	-	-	10	56.00	1.00

ตารางที่ ค.5 (ต่อ)

สูตร	Recycled HDPE (wt% of matrix)	Impact modifier (wt% of matrix)			Coupling agent (wt% of fiber)		Bagasse fibers (wt% of matrix)	Hardness	
		SAN-EPDM	EVA	MAH-EPDM	PE-g-AA	PE-g-MAH		Mean	SD
15	50	-	50	-	-	-	10	53.33	0.58
16***	90	-	-	10	-	-	10	58.33	0.58
17****	90	-	-	10	-	-	10	60.00	0

* ใช้ pure HDPE

** ใช้เส้นใยช้อยไม่ผ่านการคัดขนาด

*** ใช้ MAH-EPDM รหัส ROYALTUF 485

**** ใช้ MAH-EPDM รหัส ROYALTUF 490



ภาคผนวก ง

สมบัติทางความร้อน

ตารางที่ ง.1 แสดง T_m , T_c , ΔH_m , ΔH_c และ ร้อยละความเข้มข้นของคอมพอลิเมอร์

สูตร	Recycled HDPE (wt% of matrix)	Impact modifier (wt% of matrix)			Coupling agent (wt% of fiber)		Bagasse fibers (wt% of matrix)	T_m (°C)	T_c (°C)	ΔH_m (J/g)	ΔH_c (J/g)	Degree of crystallinity (%)
		SAN-EPDM	EVA	MAH-EPDM	PE-g-AA	PE-g-MAH						
1	100	-	-	-	-	-	-	136.9	120.5	146.89	169.74	-
2*	100	-	-	-	-	-	10	136.0	118.1	130.0	149.0	88.50
3**	100	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-	-
4	100	-	-	-	5	-	10	134.7	120.2	139.04	141.74	94.66
5	90	10	-	-	5	-	10	136.8	119.6	120.0	141.61	81.69
6	70	30	-	-	5	-	10	135.6	120.5	90.04	98.65	61.29
7	50	50	-	-	5	-	10	133.9	119.7	74.56	82.36	50.76
8	100	-	-	-	-	5	10	136.7	120.5	131.27	149.36	89.37
9	90	10	-	-	-	5	10	136.4	119.1	133.81	146.96	91.09
10	70	30	-	-	-	5	10	134.7	120.1	96.75	110.02	65.87
11	50	50	-	-	-	5	10	133.9	120.2	71.98	77.65	49.00

ตารางที่ ง.1 (ต่อ)

สูตร	Recycled HDPE (wt% of matrix)	Impact modifier (wt% of matrix)			Coupling agent (wt% of fiber)		Bagasse fibers (wt% of matrix)	T _m (°C)	T _c (°C)	ΔH _m (J/g)	ΔH _c (J/g)	Degree of crystallinity (%)
		SAN-EPDM	EVA	MAH-EPDM	PE-g-AA	PE-g-MAH						
12	100	-	-	-	-	-	10	137.2	120.9	134.41	153.67	91.50
13	90	-	10	-	-	-	10	136.4	120.6	100.10	118.03	68.15
14	70	-	30	-	-	-	10	134.4	120.5	85.98	99.70	58.53
15	50	-	50	-	-	-	10	91.6	80.0	4.55	6.04	
16***	90	-	-	10	-	-	10	134.5	120.2	107.40	124.1	73.14
17****	90	-	-	10	-	-	10	137.9	120.3	102.20	115.4	69.58
18	-	-	100	-	-	-	-	94.8	78.6	35.20	34.00	-

* ใช้ pure HDPE

** ใช้เส้นใยดัดไม่ผ่านการคัดขนาด

*** ใช้ MAH-EPDM รหัส ROYALTUF 485

**** ใช้ MAH-EPDM รหัส ROYALTUF 490

* สมบัติทางความร้อน (DSC Thermograms)

==== THERMAL ANALYSIS REPORT ====

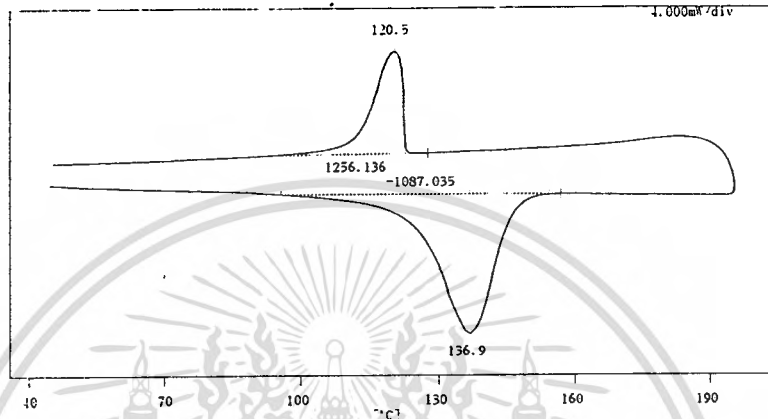
98 06/29

FILE NAME <<HDPE18.000>>

DATE (y/m/d) : 98 06 29
 SAMPLE NAME : WASTE HDPE
 COMMENT :
 SAMPLE Q'TY : 7 mg
 MODULE TYPE : DSC
 SAMPLING INT. : 1 sec

● TEMPERATURE PROGRAM ●

	dT	dt	T (hold)	t (hold)	ΔT (add)	n (repeat)
1:	10		200	0	0	0
2:	-10		40	0	0	0
3:	0		0	0	0	0
4:	0		0	0	0	0
5:	0		0	0	0	0



รูปที่ ง.1 แสดงสมบัติทางความร้อนของ HDPE ที่ใช้แล้ว

==== THERMAL ANALYSIS REPORT ====

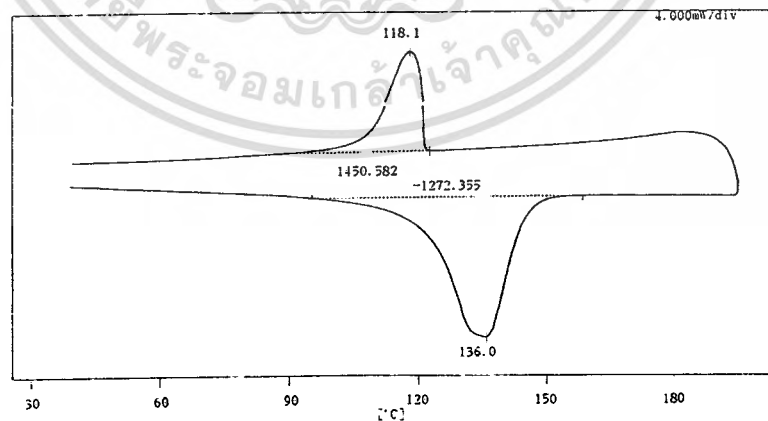
98/12/08

FILE NAME <<HDPE26.000>>

DATE (y/m/d) : 98/12 08
 SAMPLE NAME : HDPE BAGASSE
 COMMENT : 100:10
 SAMPLE Q'TY : 9.8 mg
 MODULE TYPE : DSC
 SAMPLING INT. : 1 sec

● TEMPERATURE PROGRAM ●

	dT	dt	T (hold)	t (hold)	ΔT (add)	n (repeat)
1:	10		200	0	0	0
2:	-10		40	0	0	0
3:	0		0	0	0	0
4:	0		0	0	0	0
5:	0		0	0	0	0



รูปที่ ง.2 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต HDPE ใหม่/เส้นใยอ้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

==== THERMAL ANALYSIS REPORT ====

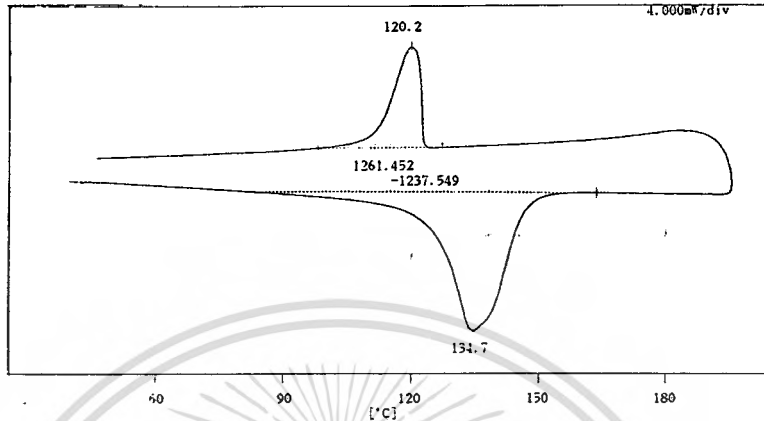
98/06/23

FILE NAME <<A11 000>>

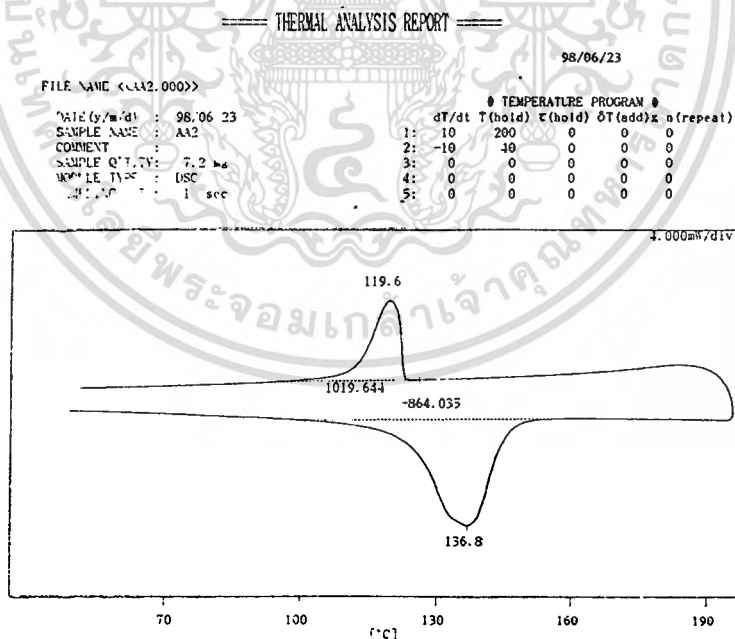
DATE (y.m.d) : 98/06/23
 SAMPLE NAME : 1
 COMMENT :
 SAMPLE QUANTITY : 8.9 mg
 SAMPLE TYPE : DSC
 SAMPLING INT. : 1 sec

TEMPERATURE PROGRAM

	dT/dt	T(hold)	t(hold)	t(Add)	n(repeat)
1:	10	200	0	0	0
2:	-10	40	0	0	0
3:	0	0	0	0	0
4:	0	0	0	0	0
5:	0	0	0	0	0



รูปที่ ง.3 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอลิเมอร์ HDPE ที่ใช้แล้ว/SAN-EPDM/เส้นใยอ้อย/PE-g-AA โดยมีอัตราส่วน HDPE ต่อ SAN-EPDM เป็น 100 ต่อ 0



รูปที่ ง.4 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอลิเมอร์ HDPE ที่ใช้แล้ว/SAN-EPDM/เส้นใยอ้อย/PE-g-AA โดยมีอัตราส่วน HDPE ต่อ SAN-EPDM เป็น 90 ต่อ 10

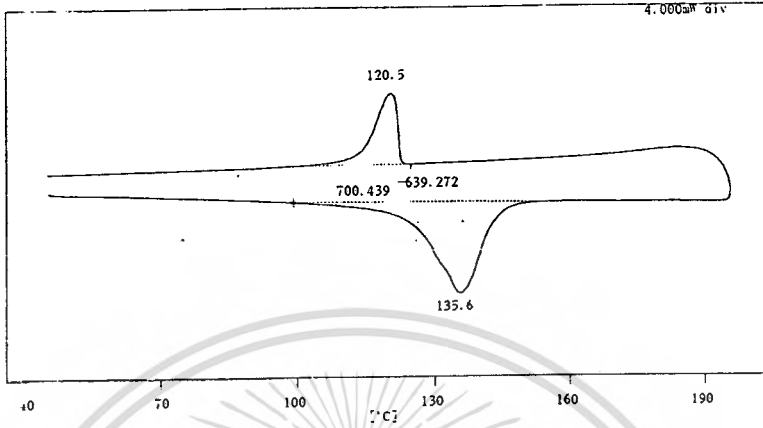
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

==== THERMAL ANALYSIS REPORT ====

98/06/30

FILE NAME <<AA3.000>>

DATE (y/m/d)	98/06/30	TEMPERATURE PROGRAM #			
SAMPLE NAME	HDPE:EPDM:BAGASSE:PE-G-AA	dT/dt	T(hold)	t(hold)	OT(add)x n(repeat)
COMMENT	350:150:50:2.5	1:	10	200	0 0 0
SAMPLE Q'TY	7.1 mg	2:	-10	40	0 0 0
MODULE TYPE	DSC	3:	0	0	0 0 0
SAMPLING INT.	1 sec	4:	0	0	0 0 0
		5:	0	0	0 0 0



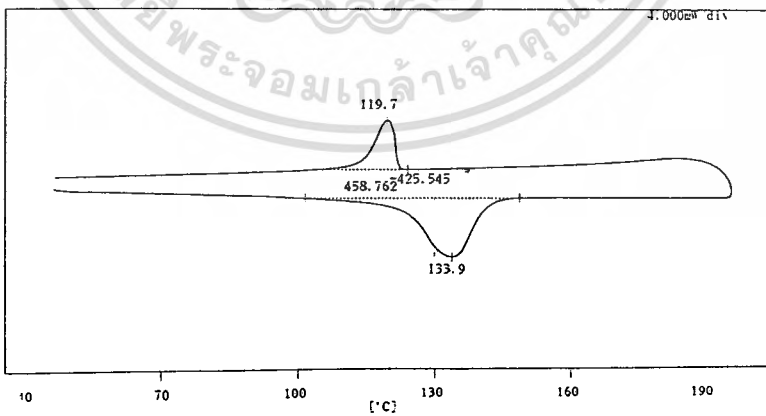
รูปที่ ๓.5 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอลิเมอร์ HDPE ที่ใช้แล้ว/SAN-EPDM/เส้นใยอ้อย/PE-g-AA โดยมีอัตราส่วน HDPE ต่อ SAN-EPDM เป็น 70 ต่อ 30

==== THERMAL ANALYSIS REPORT ====

98/02/15

FILE NAME <<AA4.000>>

DATE (y/m/d)	98/06/30	TEMPERATURE PROGRAM #			
SAMPLE NAME	HDPE:EPDM:BAGASSE:PE-G-AA	dT/dt	T(hold)	t(hold)	OT(add)x n(repeat)
COMMENT	250:250:50:2.5	1:	10	200	0 0 0
SAMPLE Q'TY	5.9 mg	2:	-10	40	0 0 0
MODULE TYPE	DSC	3:	0	0	0 0 0
SAMPLING INT.	1 sec	4:	0	0	0 0 0
		5:	0	0	0 0 0



รูปที่ ๓.6 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอลิเมอร์ HDPE ที่ใช้แล้ว/SAN-EPDM/เส้นใยอ้อย/PE-g-AA โดยมีอัตราส่วน HDPE ต่อ SAN-EPDM เป็น 50 ต่อ 50

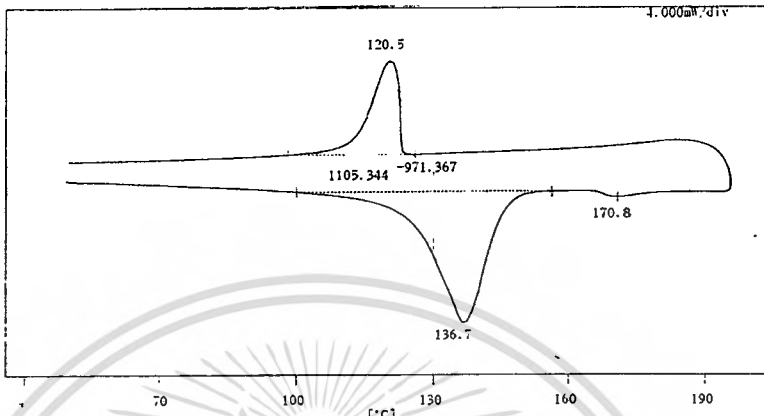
==== THERMAL ANALYSIS REPORT ====

98/06/29

FILE NAME <<MA1.000>>

DATE (y m d) : 98 06 29
 SAMPLE NAME : MA1
 COMMENT :
 SAMPLE QTY : 7.4 mg
 ANALYSIS : DSC
 SAMPLE NO. INT. : 1 sec

● TEMPERATURE PROGRAM ●					
dT/dt	T (hold)	t (hold)	OT (add)	x	n (repeat)
1:	10	200	0	0	0
2:	-10	40	0	0	0
3:	0	0	0	0	0
4:	0	0	0	0	0
5:	0	0	0	0	0



รูปที่ ง.7 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอลิเมอร์ HDPE ที่ใช้แล้ว/SAN-EPDM/เส้นใยอ้อย/PE-g-MAH โดยมีอัตราส่วน HDPE ต่อ SAN-EPDM เป็น 100 ต่อ 0

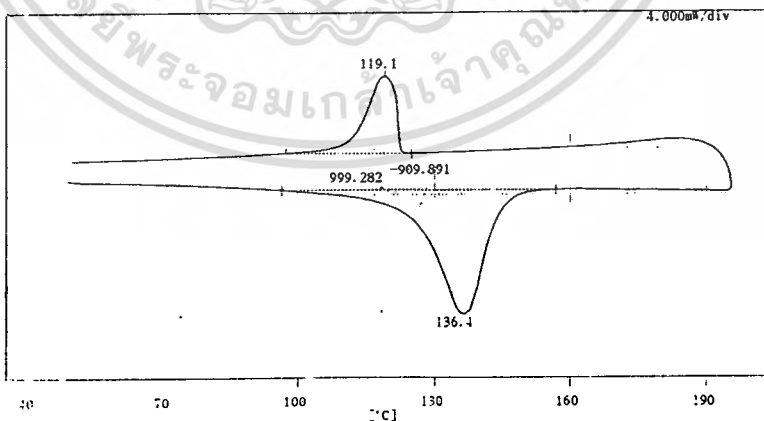
==== THERMAL ANALYSIS REPORT ====

98/06/29

FILE NAME <<MA2.000>>

DATE (y m d) : 98 06 29
 SAMPLE NAME : MA2
 COMMENT :
 SAMPLE QTY : 6.8 mg
 ANALYSIS : DSC
 SAMPLE NO. INT. : 1 sec

● TEMPERATURE PROGRAM ●					
dT/dt	T (hold)	t (hold)	OT (add)	x	n (repeat)
1:	10	200	0	0	0
2:	-10	40	0	0	0
3:	0	0	0	0	0
4:	0	0	0	0	0
5:	0	0	0	0	0



รูปที่ ง.8 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอลิเมอร์ HDPE ที่ใช้แล้ว/SAN-EPDM/เส้นใยอ้อย/PE-g-MAH โดยมีอัตราส่วน HDPE ต่อ SAN-EPDM เป็น 90 ต่อ 0

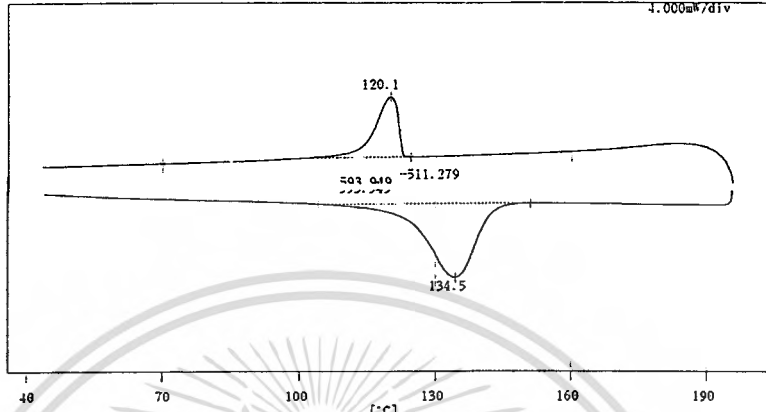
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

==== THERMAL ANALYSIS REPORT ====

98/02/15

FILE NAME <<MA7.000>>

DATE (y m d)	98/06/30	dT/dt	T (hold)	τ (hold)	ΔT (add)	x	n (repeat)
SAMPLE NAME	HDPE:EPDM:BAGASSE:PE-G-MA	1:	10	200	0	0	0
COMMENT	350:150:50:2.5	2:	-10	40	0	0	0
SAMPLE Q'TYTY	5.7 mg	3:	0	0	0	0	0
MODULE TYPE	DSC	4:	0	0	0	0	0
SAMPLING INT.	1 sec	5:	0	0	0	0	0



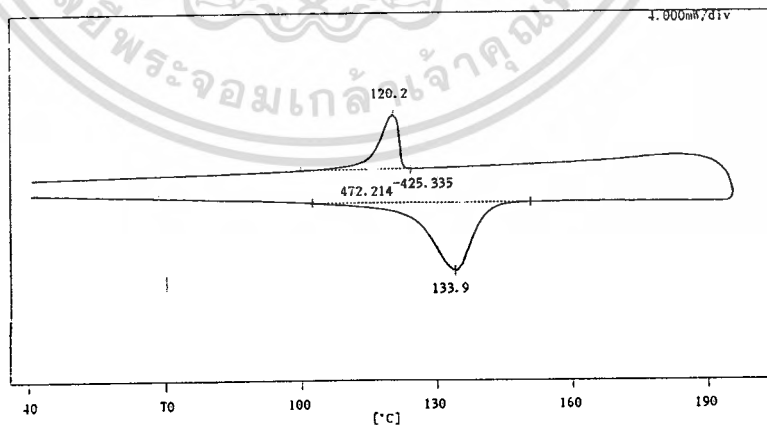
รูปที่ ง.9 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต HDPE ที่ใช้แล้ว/SAN-EPDM/เส้นใยช้อย/
PE-g-MAH โดยมีอัตราส่วน HDPE ต่อ SAN-EPDM เป็น 70 ต่อ 30

==== THERMAL ANALYSIS REPORT ====

98/02/15

FILE NAME <<MA4.000>>

DATE (y m d)	98/07/07	dT/dt	T (hold)	τ (hold)	ΔT (add)	x	n (repeat)
SAMPLE NAME	HDPE:EPDM:BAGASSE:PE-G-MA	1:	10	200	0	0	0
COMMENT	250:250:50:2.5	2:	-10	40	0	0	0
SAMPLE Q'TYTY	6.3 mg	3:	0	0	0	0	0
MODULE TYPE	DSC	4:	0	0	0	0	0
SAMPLING INT.	1 sec	5:	0	0	0	0	0



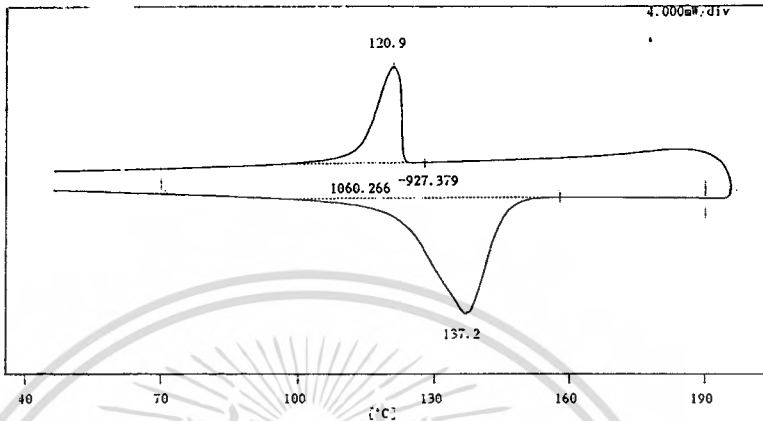
รูปที่ ง.10 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต HDPE ที่ใช้แล้ว/SAN-EPDM/เส้นใยช้อย/
PE-g-MAH โดยมีอัตราส่วน HDPE ต่อ SAN-EPDM เป็น 50 ต่อ 50

==== THERMAL ANALYSIS REPORT ====

98/06/29

FILE NAME <<EVA1.000>>

		* TEMPERATURE PROGRAM *				
DATE (y.m.d)		dT/dt	T (hold)	τ (hold)	ΔT (add)	n (repeat)
98.11.29		10	200	0	0	0
SAMPLE NAME : HDPE:EVA:BAGASSE	1:	10	200	0	0	0
COMMENT : 450:50:50	2:	-10	40	0	0	0
SAMPLE Q'TITY : 6.9 mg	3:	0	0	0	0	0
MODULE TYPE : DSC	4:	0	0	0	0	0
SAMPLING INT.: 1 sec	5:	0	0	0	0	0



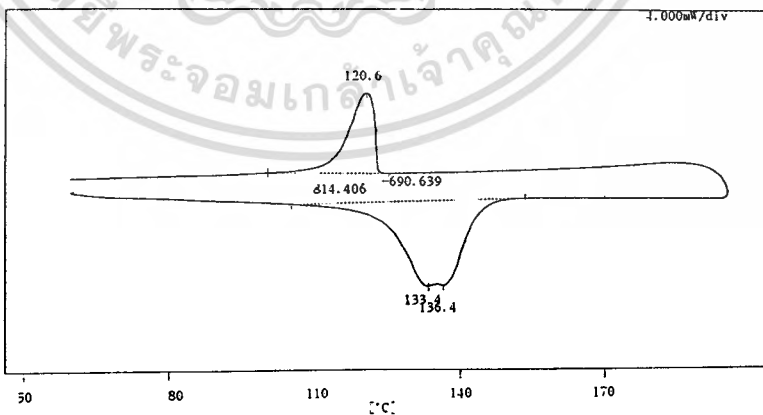
รูปที่ ง.11 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอลิเมอร์ HDPE ที่ใช้แล้ว/EVA/เส้นใยอ้อย โดยมีอัตราส่วน HDPE ต่อ EVA เป็น 100 ต่อ 0

==== THERMAL ANALYSIS REPORT ====

98/11/29

FILE NAME <<EVA1.000>>

		* TEMPERATURE PROGRAM *				
DATE (y.m.d)		dT/dt	T (hold)	τ (hold)	ΔT (add)	n (repeat)
98.11.29		10	200	0	0	0
SAMPLE NAME : HDPE:EVA:BAGASSE	1:	10	200	0	0	0
COMMENT : 450:50:50	2:	-10	40	0	0	0
SAMPLE Q'TITY : 6.9 mg	3:	0	0	0	0	0
MODULE TYPE : DSC	4:	0	0	0	0	0
SAMPLING INT.: 1 sec	5:	0	0	0	0	0



รูปที่ ง.12 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอลิเมอร์ HDPE ที่ใช้แล้ว/EVA/เส้นใยอ้อย โดยมีอัตราส่วน HDPE ต่อ EVA เป็น 90 ต่อ 10

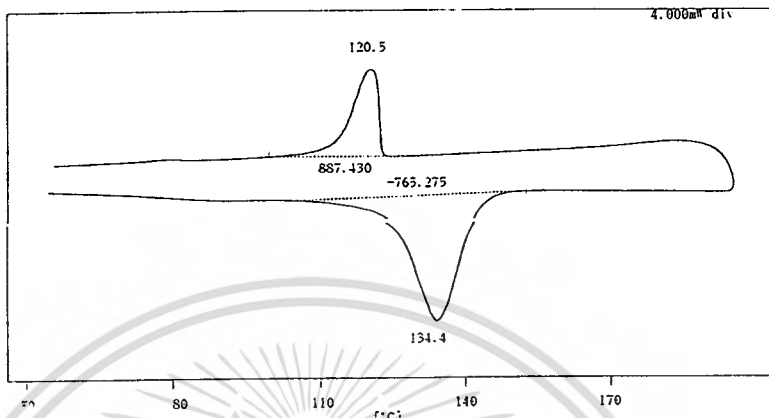
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

==== THERMAL ANALYSIS REPORT =====

98/11/29

FILE NAME <<EVA2.000>>

		* TEMPERATURE PROGRAM *				
DATE (y,m/d)	98 11 29	dT/dt	T (hold)	τ (hold)	δT (add)	x n (repeat)
SAMPLE NAME	HDPE:EVA:BAGASSE	1:	10	200	0	0 0
COMMENT	350:150:50	2:	-10	40	0	0 0
SAMPLE Q'TITY	8.9 mg	3:	0	0	0	0 0
MODULE TYPE	DSC	4:	0	0	0	0 0
SAMPLING INT.:	1 sec	5:	0	0	0	0 0



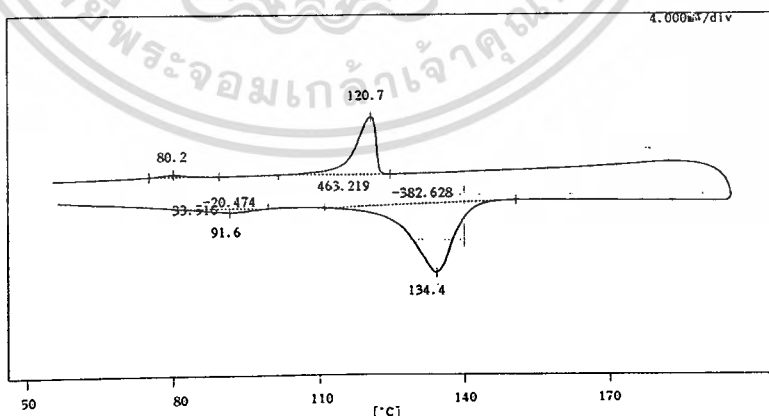
รูปที่ ง.13 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอลิเมอร์ HDPE ที่ใช้แล้ว/EVA/เส้นใยอ้อย โดยมีอัตราส่วน HDPE ต่อ EVA เป็น 70 ต่อ 30

==== THERMAL ANALYSIS REPORT =====

98/02/15

FILE NAME <<EVA3.000>>

		* TEMPERATURE PROGRAM *				
DATE (y,m/d)	98/11/29	dT/dt	T (hold)	τ (hold)	δT (add)	x n (repeat)
SAMPLE NAME	HDPE:EVA:BAGASSE	1:	10	200	0	0 0
COMMENT	250:250:50	2:	-10	40	0	0 0
SAMPLE Q'TITY	7.2 mg	3:	0	0	0	0 0
MODULE TYPE	DSC	4:	0	0	0	0 0
SAMPLING INT.:	1 sec	5:	0	0	0	0 0



รูปที่ ง.14 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอลิเมอร์ HDPE ที่ใช้แล้ว/EVA/เส้นใยอ้อย โดยมีอัตราส่วน HDPE ต่อ EVA เป็น 50 ต่อ 50

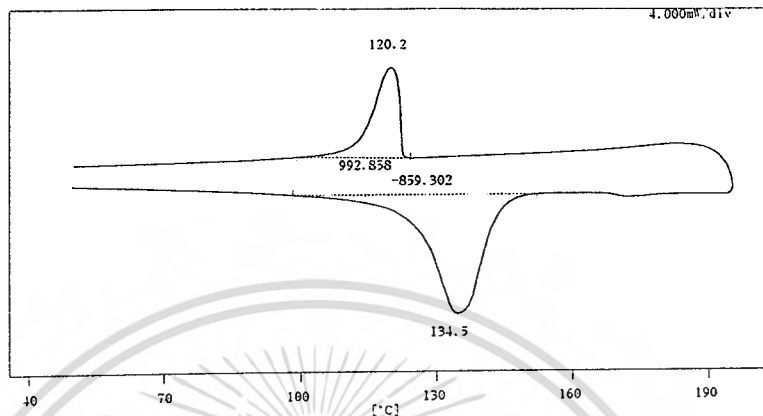
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

===== THERMAL ANALYSIS REPORT =====

98/12/08

FILE NAME <<485.000>>

DATE (y m d) :	98.12.08	TEMPERATURE PROGRAM			
SAMPLE NAME :	HDPE:EPDM485:BAGASSE	dT/dt	T(hold)	t(hold)	ΔT(Δd)x n(repeat)
COMMENT :	90:10:10	1: 10	200	0	0 0 0
SAMPLE Q'TITY :	8 mg	2: -10	40	0	0 0 0
SAMPLE TYPE :	DSC	3: 0	0	0	0 0 0
SAMPLING INT. :	1 sec	4: 0	0	0	0 0 0
		5: 0	0	0	0 0 0



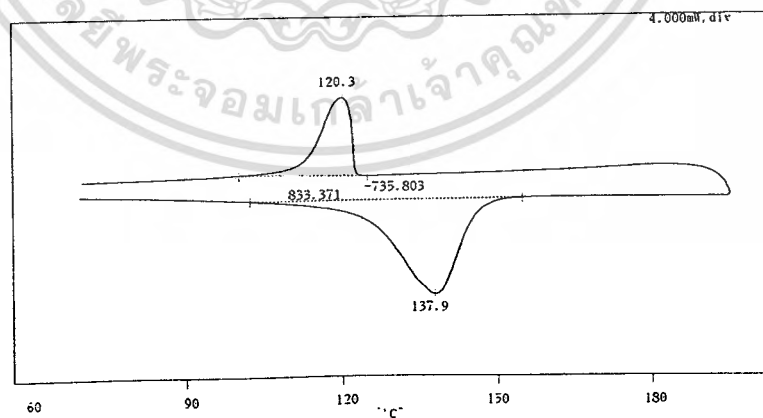
รูปที่ ง.15 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต HDPE ที่ใช้แล้ว/MAH-EPDM(485)/เส้นใย
อ้อย โดยมีอัตราส่วน HDPE ต่อ MAH-EPDM เป็น 90 ต่อ 10

===== THERMAL ANALYSIS REPORT =====

98/12/08

FILE NAME <<25.000>>

DATE (y m d) :	98/12/08	TEMPERATURE PROGRAM			
SAMPLE NAME :	HDPE:EPDM190:BAG	dT/dt	T(hold)	t(hold)	ΔT(Δd)x n(repeat)
COMMENT :	90:10:10	1: 10	200	0	0 0 0
SAMPLE Q'TITY :	7.2 mg	2: -10	40	0	0 0 0
SAMPLE TYPE :	DSC	3: 0	0	0	0 0 0
SAMPLING INT. :	1 sec	4: 0	0	0	0 0 0
		5: 0	0	0	0 0 0



รูปที่ ง.16 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต HDPE ที่ใช้แล้ว/MAH-EPDM(490)/เส้นใย
อ้อย โดยมีอัตราส่วน HDPE ต่อ MAH-EPDM เป็น 90 ต่อ 10

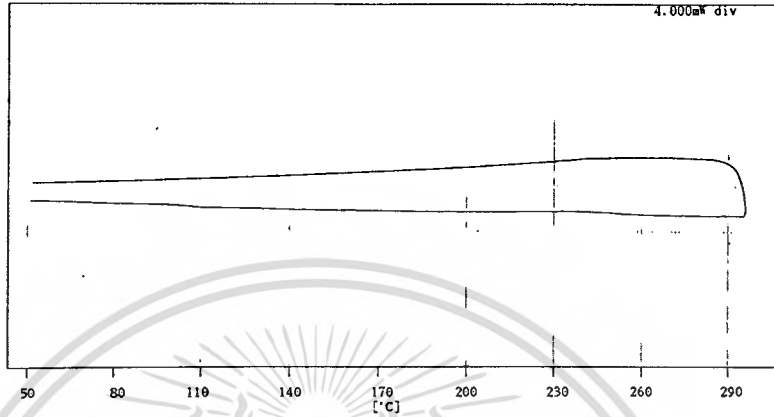
==== THERMAL ANALYSIS REPORT ====

98/02/15

FILE NAME <<EPDM12.000>>

DATE (y/m/d) : 98/06/23
 SAMPLE NAME : EPDM
 COMMENT :
 SAMPLE Q'TITY : 8 mg
 MODULE TYPE : DSC
 SAMPLING INT. : 1 sec

	dT/dt	T (hold)	τ (hold)	δT (add)	x n (repeat)
1:	10	300	0	0	0
2:	-10	40	0	0	0
3:	0	0	0	0	0
4:	0	0	0	0	0
5:	0	0	0	0	0



รูปที่ ง.17 แสดงสมบัติทางความร้อนของ SAN-EPDM

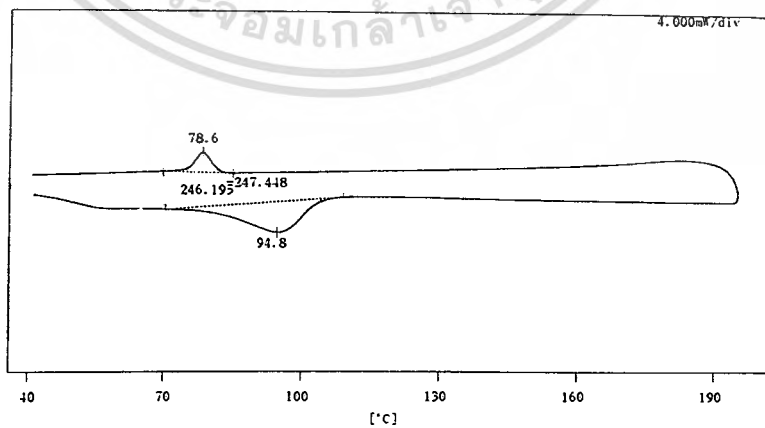
==== THERMAL ANALYSIS REPORT ====

98/02/15

FILE NAME <<EVA.000>>

DATE (y/m/d) : 98/11/29
 SAMPLE NAME : pure EVA
 COMMENT :
 SAMPLE Q'TITY : 7.2 mg
 MODULE TYPE : DSC
 SAMPLING INT. : 1 sec

	dT/dt	T (hold)	τ (hold)	δT (add)	x n (repeat)
1:	10	200	0	0	0
2:	-10	40	0	0	0
3:	0	0	0	0	0
4:	0	0	0	0	0
5:	0	0	0	0	0



รูปที่ ง.18 แสดงสมบัติทางความร้อนของ EVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นางสาวรัชดา ขวัญตน เกิดเมื่อวันที่ 8 สิงหาคม พ.ศ. 2517 ที่จังหวัดพะเยา สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม จากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปีการศึกษา 2539 และเข้าศึกษาต่อวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้