



รายงานการวิจัย

การพัฒนาและทดสอบพลาสติกผสมระหว่างพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลท
และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว
เพื่อใช้ในงานก่อสร้าง

(Development and Testing of Recycled PET and HDPE
Commingled Plastic for Construction Applications)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กษมา จารุกัจฉา

สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. สิทธิชัย แสงอาทิตย์

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2548-2549

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่อง การพัฒนาและทดสอบพลาสติกผสมระหว่างพอลิเอทิลีนเทอร์พทาเลทและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วเพื่อใช้ในงานก่อสร้างนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2548-49

งานวิจัยนี้ สำเร็จลงได้ด้วยความร่วมมือและสนับสนุนจากหลายบุคคล ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณผู้ช่วยวิจัย คือ น.ส. สุกัญญา เจริญขวัญ นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัทเคมีคอล อินโนเวชั่น จำกัด (Chemical Innovation, Co., Ltd.) ที่ให้ความอนุเคราะห์ Fusabond[®] E MB 100D และบริษัทพรีเมียร์โปรดักส์ (Premier Products, Co., Ltd.) สำหรับการอนุเคราะห์เส้นใยแก้วชนิด E-glass

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กษมา จารุกำจร

(หัวหน้าโครงการวิจัย)

ธันวาคม 2551

บทคัดย่อภาษาไทย

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลทที่ผ่านการใช้งานแล้วและวิเคราะห์ว่าพอลิเมอร์ผสมสามารถถูกนำไปใช้แทนไม้เนื้ออ่อนโดยการพิจารณาจากสมบัติทางกล สัดส่วนของการผสม ปริมาณของสารช่วยให้เข้ากัน และสารตัวเติมถูกใช้เป็นปัจจัยหลักในการศึกษาเชิงเปรียบเทียบ พอลิเมอร์ผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลทที่อัตราส่วน 80/20, 60/40, 40/60, และ 20/80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ถูกเตรียมในเครื่องอัดรีดชนิดแกนคู่หมุนในทิศทางเดียวกัน ขึ้นทดสอบถูกเตรียมโดยใช้เครื่องฉีด สมบัติทางกล กระแสวิทยา ความร้อน สัณฐานวิทยา การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสมเปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนขององค์ประกอบ

ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมนี้สามารถถูกปรับปรุงโดยการเติมสารช่วยให้เข้ากันคือ พอลิเอทิลีนกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรเรต ปริมาณสารช่วยให้เข้ากันคือ 2, 4, 6, และ 8 ส่วนในร้อยส่วนของพอลิเมอร์ผสม พอลิเมอร์ผสมที่ถูกปรับปรุงความเข้ากันได้มีขนาดเฟสกระจายเล็กกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ถูกปรับปรุงความเข้ากันได้ การยึดติดระหว่างเฟสต่อเนื่องและเฟสกระจายเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมสารช่วยให้เข้ากันส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสม สารช่วยให้เข้ากันไม่เพียงแต่เพิ่มค่าความเหนียวของพอลิเมอร์ผสมแต่ยังมีผลกระทบต่อความเป็นผลึกพอลิเมอร์ผสมด้วย ปริมาณที่เหมาะสมของพอลิเอทิลีนกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรเรตสำหรับพอลิเมอร์ผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลทที่อัตราส่วนการผสม 20/80 คือ 6 ส่วนในร้อยส่วนของพอลิเมอร์ผสม

เส้นใยแก้วชนิดสั้นถูกใช้เป็นสารตัวเติมที่ปริมาณ 10 ส่วนในร้อยส่วนของพอลิเมอร์ผสมเพื่อเสริมแรงในพอลิเมอร์ผสม การเติมเส้นใยแก้วชนิดสั้นลงในพอลิเมอร์ผสมปรับปรุงสมบัติแรงดัดแรงอัด และแรงกระแทก สารช่วยให้เข้ากันถูกผสมกับเส้นใยแก้วชนิดสั้น เพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต

พอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง พอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลทและเส้นใยแก้วชนิดสั้นไม่สามารถใช้แทนไม้เนื้ออ่อนได้โดยตรงเพราะสมบัติทางกลบางอย่างต่ำกว่า จากการทดลองพบว่า modulus ของแรงดัดและแรงอัดของพอลิเมอร์คอมโพสิตต่ำกว่าของไม้เนื้ออ่อน ความหนาแน่นสูงกว่าไม้เนื้ออ่อน ถึงแม้ว่ามีความต้านทานแรงดัดและแรงอัดดีกว่าของไม้เนื้ออ่อนก็ตาม เมื่อไม้พลาสติกถูกนำมาใช้โดยเฉพาะการใช้งานแบบรับน้ำหนัก การแอ่นตัวของพลาสติกสมบัติการคืบควรจะถูกชดเชยโดยการพิจารณาพื้นที่หน้าตัดที่ใหญ่ขึ้นหรือลดระยะของจุกรองรับของโครงสร้าง

Abstract

This research aimed to study the properties of recycled HDPE and PET blends and analyze if the blends could replace the softwood from mechanical properties aspect. Blend compositions, compatibilizer contents, and filler were used as main parameters in the comparative study. The blends of HDPE/PET at various compositions of 80/20, 60/40, 40/60, and 20/80 wt% were prepared in a co-rotating twin screw extruder. The specimens were molded using injection molding machine. Mechanical, rheological, thermal, morphological properties, water absorption, and density of the blends were varied by the composition ratio.

Compatibility of these blends could be improved by adding the compatibilizers: polyethylene grafted with maleic anhydride (PE-g-MA). The compatibilizer contents were 2, 4, 6, and 8 phr. The compatibilized blends had a smaller size of dispersed phase than that of the uncompatibilized blends. The adhesion between matrix and dispersed phase was enhanced with addition of the compatibilizers leading to improve the mechanical properties of the blends. The compatibilizers not only increased in the melt viscosity but also affected on the crystallinity of the blends. The optimum content of PE-g-MA for 20/80 HDPE/PET was 6 phr.

Short glass fiber was used as the filler at 10 phr content to reinforce the blends. Incorporating the short glass fibers into the blends improved the flexural, compressive, and impact properties. The compatibilizers were mixed with short glass fiber to improve the prosperities of the composites.

HDPE/PET/short glass fiber composites could not directly substitute the soft wood because of some inferior mechanical properties. The experiments showed that their flexural and compressive modulus was lower than that of the soft wood; their densities were however higher than the soft wood, and their flexural and compressive strength were higher than those of soft wood. When plastic lumbers were utilized in as structural elements, the deformation and creep properties should be compensated such as by increasing cross sections or by reducing the span of the structural elements.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	5
บทที่ 2 ภูมิหลัง	
2.1 การศึกษาการทำให้เข้ากันของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง HDPE และ PET.....	7
2.2 ผลของสารตัวเติมต่อสมบัติของพอลิเมอร์.....	9
2.3 Recycled plastic lumber.....	10
บทที่ 3 วัสดุและการทดลอง	
3.1 วัสดุ.....	12
3.2 การเตรียมและการขึ้นรูปชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมโพสิต.....	12
3.3 การวิเคราะห์และตรวจสอบพอลิเมอร์ พอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมโพสิต	13
3.3.1 สมบัติทางกายภาพ.....	13
3.3.2 สมบัติทางกล.....	13
3.3.3 สมบัติทางกระแสวิทยา.....	14
3.3.4 สมบัติทางสัณฐานวิทยา.....	14
3.3.5 สมบัติทางความร้อน.....	14
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ผลการทดลอง	
4.1 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง HDPE และ PET.....	15
4.1.1 สมบัติทางกายภาพ.....	15

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.2 สมบัติทางกล	16
4.1.3 สมบัติทางกระแสวิทยา.....	16
4.1.4 สมบัติทางสัมฐานวิทยา.....	18
4.1.5 สมบัติทางความร้อน	18
4.1.6 การดูดซึมน้ำ.....	20
4.2 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง HDPE และ PET ที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย สารช่วยให้เข้ากัน	22
4.2.1 สมบัติทางกายภาพ	22
4.2.2 สมบัติทางกล	23
4.2.3 สมบัติทางกระแสวิทยา.....	28
4.2.4 สมบัติทางสัมฐานวิทยา.....	28
4.2.5 สมบัติทางความร้อน	29
4.2.6 การดูดซึมน้ำ.....	31
4.3 พอลิเมอร์ผสมที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว.....	33
4.4 การเปรียบเทียบความหนาแน่นและสมบัติทางกลของไม้สัก พอลิเมอร์ผสม และพอลิเมอร์คอม โปสิท	35
บทที่ 5 บทสรุป	
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	37
5.2 ข้อเสนอแนะ	37
บรรณานุกรม.....	39
ประวัติผู้วิจัย	44

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
4.1 ความหนาแน่นของ HDPE, PET และ HDPE/PET blends	15
4.2 HDT ของ HDPE, PET และ HDPE/PET blends	15
4.3 Tensile strength, tensile strain at break, Young's modulus, flexural strength, flexural modulus, impact strength ของ HDPE, PET และ HDPE/PET blends	16
4.4 อุณหภูมิหลอม (T_m) และเปอร์เซ็นต์ผลึก ($\%X_c$) ของ HDPE, PET และ HDPE/PET blends	19
4.5 Tensile properties ของ HDPE, PET และ HDPE/PET blends ที่ผ่านการแช่น้ำที่เวลาต่างๆ	21
4.6 ความหนาแน่นของ HDPE/PET blends ที่ปริมาณสารช่วยให้เข้ากันต่างๆ	23
4.7 HDT ของ HDPE/PET blends ที่ปริมาณสารช่วยให้เข้ากันต่างๆ	23
4.8 Tensile, flexural, compressive properties และ impact strength ของ HDPE/PET blends ที่ปริมาณสารช่วยให้เข้ากันต่างๆ	25
4.9 อุณหภูมิหลอม (T_m) และเปอร์เซ็นต์ผลึก ($\%X_c$) ของ HDPE/PET blends ที่ปริมาณสารช่วยให้เข้ากันต่างๆ	29
4.10 Tensile properties ของ HDPE/PET blends, HDPE/PET/PE-g-MA blends ที่ผ่านการแช่น้ำที่เวลาต่างๆ	32
4.11 Tensile, flexural, compressive properties และ impact strength ของ HDPE/PET blends และ HDPE/PET/SGF composites	34
4.12 เปรียบเทียบความหนาแน่นและสมบัติทางกลของไม้สัก HDPE/PET blends และ HDPE/PET/SGF composites	36

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
1.1 ลักษณะของ plastic lumber ที่ผลิตขายอยู่ในประเทศสหรัฐอเมริกา	2
1.2 ตัวอย่างการใช้งานของ plastic lumber	3
4.1 ความหนืดที่อัตราเฉือนต่างๆ ของ HDPE, PET และ PE-g-MA ที่อุณหภูมิ 270°C	17
4.2 ความหนืดที่อัตราเฉือนต่างๆ ของ HDPE, PET และ HDPE/PET blends ที่อุณหภูมิ 270°C	17
4.3 SEM micrographs ของ HDPE/PET blends (a) HDPE/PET 20/80 (b) HDPE/PET 40/60 (c) HDPE/PET 60/40 (d) HDPE/PET 80/20 (x1500)	18
4.4 DSC thermograms ของ HDPE, PET และ HDPE/PET blends	18
4.5 อัตราการดูดซึมน้ำของ HDPE, PET และ HDPE/PET blends ที่เวลาต่างๆ	20
4.6 Tensile strength ของ HDPE, PET และ HDPE/PET blends ที่ผ่านการแช่น้ำที่เวลาต่างๆ	22
4.7 Tensile strength (◆) และ Young's modulus (■) ของ HDPE/PET blends ที่ปริมาณสารช่วยให้เข้ากันต่างๆ	26
4.8 Izod impact strength (■) และ tensile strain at break (◆) ของ HDPE/PET blends ที่ปริมาณสารช่วยให้เข้ากันต่างๆ	26
4.9 Flexural strength (◆) และ flexural modulus (▲) ของ HDPE/PET blends ที่ปริมาณสารช่วยให้เข้ากันต่างๆ	27
4.10 Compressive strength (■) และ compressive modulus (◆) ของ HDPE/PET blends ที่ปริมาณสารช่วยให้เข้ากันต่างๆ	27
4.11 ความหนืดที่อัตราเฉือนต่างๆ ของ HDPE/PET blends ที่ปริมาณสารช่วยให้เข้ากันต่างๆ ที่อุณหภูมิ 270°C	28
4.12 SEM micrographs (a) HDPE/PET 20/80 (b) HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/2 (c) HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/4 (d) HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/6 (e) HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/8 (x1500)	29
4.13 เปอร์เซนต์ผลึก (%X _c) ของส่วน HDPE (◆) และ PET (■) ใน HDPE/PET blends ที่ปริมาณสารช่วยให้เข้ากันต่างๆ	30
4.14 อัตราการดูดซึมน้ำของ HDPE, PET และ HDPE/PET/PE-g-MA blends ที่เวลาต่างๆ	31
4.15 Tensile strength ของ HDPE/PET blends และ HDPE/PET/PE-g-MA blends ที่ผ่านการแช่น้ำที่เวลาต่างๆ	33

บทที่ 1

บทนำ

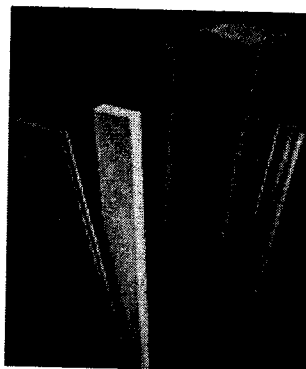
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

พลาสติกเป็นวัสดุสังเคราะห์ (synthetic material) ที่มีความสำคัญและมีประโยชน์ต่อมนุษย์เป็นอย่างมาก ในปัจจุบัน ผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ใช้ในชีวิตประจำวันล้วนแล้วแต่มีพลาสติกเป็นส่วนประกอบเกือบทั้งสิ้น เช่น บรรจุภัณฑ์ เพอร์นิเจอร์ เครื่องใช้ในครัวเรือน และเครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น เมื่อปริมาณการใช้พลาสติกมีมากขึ้น ปัญหาที่ตามมาก็คือ ขยะพลาสติกนับวันจะมีปริมาณสูงมากขึ้นตามไปด้วย ก่อให้เกิดปัญหาในการจัดเก็บและกำจัด นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากพลาสติกส่วนใหญ่ใช้เวลานานในการย่อยสลายเองตามธรรมชาติ ดังนั้น จึงมีความพยายามต่างๆ ในการที่จะนำพลาสติกที่ผ่านการใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ คือ การรีไซเคิล (recycling) แนวทางในการรีไซเคิลพลาสติก (plastic recycling) ประกอบด้วย การรีไซเคิลทางกล (mechanical recycling) การรีไซเคิลทางเคมี (chemical recycling) และการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ (energy recovery) [Herbst and Flanagan, 1997] ซึ่งการรีไซเคิลทางกล เป็นวิธีตรงไปตรงมา (straight forward) และไม่ซับซ้อน

การพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับการผสมพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว เกิดเนื่องจากการไม่ต้องการแยกส่วนผสมของพลาสติกออกจากกัน การพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้มีสมบัติที่ดีขึ้นสำหรับการใช้งานในระดับที่สูงขึ้น การผสมส่วนผสมของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว เพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และการได้ green products ชนิดใหม่ [Marhham and Mangraj, 1997]

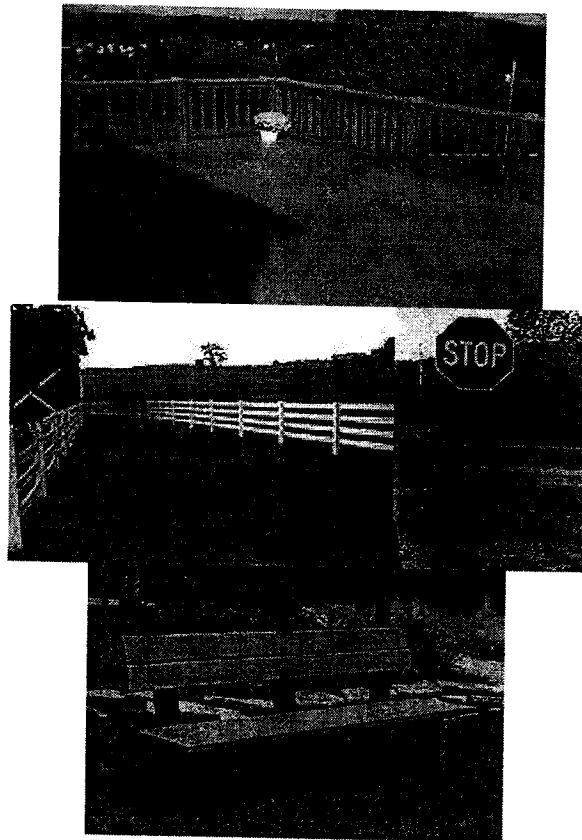
จากเหตุผลดังกล่าว จึงมีความจำเป็นที่ต้องหาวิธีหรือเทคโนโลยีที่มีความรวดเร็วและใช้เวลาน้อยในการนำพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมาใช้ใหม่ รวมถึงการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมไม่เป็นอันตรายต่อชีวิต สุขภาพ และสิ่งแวดล้อม วิธีการหนึ่งที่มีความเป็นไปได้ค่อนข้างสูงคือ การนำพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วมาแปรรูปเพื่อเป็นวัสดุก่อสร้าง โดยเฉพาะเพื่อทดแทนวัสดุเดิมที่มีราคาสูงและเป็นวัสดุที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งทางตรงและทางอ้อม เช่น ไม้และเหล็ก เป็นต้น Lampo และ Nosker ได้กล่าวไว้ในรายงานการวิจัยเรื่อง Development and Testing of Plastic Lumber Materials for Construction Applications ว่า แนวคิดในการแปรรูปขยะพลาสติกให้อยู่ในรูปไม้พลาสติก (plastic lumber) ได้เกิดขึ้นและประยุกต์ใช้ในต่างประเทศตั้งแต่ช่วงทศวรรษ 1970 [Lampo and Nosker, 1997] American Society of Testing and materials หรือ ASTM (2539) ได้ให้นิยามของ plastic lumber ว่า “a manufactured product composed of more than 50 weight percent resin, in which the product generally is rectangular in cross-section and typically supplied in board and dimensional lumber size, may be filled or unfilled, and may be composed of single or multiple

resin blends” ตัวอย่างของ plastic lumber แสดงในรูปที่ 1 ในปัจจุบัน มีผู้ผลิต plastic lumber จำหน่ายในประเทศสหรัฐอเมริกาแล้วอย่างน้อย 15 ราย โดยกระบวนการผลิตที่นิยมใช้มี 4 แบบคือ intrusion process, continuous extrusion, Reverzer process, และ compression molding โดยผู้ผลิตแต่ละรายเลือกใช้ชนิดของพลาสติกและสารเติมแต่ง (additive) ที่ค่อนข้างแตกต่างกันเป็นสูตรเฉพาะตัวของแต่ละผู้ผลิต แต่ไม่มีการเปิดเผยข้อมูลดังกล่าว อย่างไรก็ตาม จากการทดสอบพบว่า plastic lumber มีสมบัติในการต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดี มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับไม้ มีความแข็งแรงต่อการกดอัด (compression strength) ประมาณ 12-24 MPa และความแข็งแรงต่อการดึง (tensile strength) ประมาณ 9-24 MPa ซึ่งใกล้เคียงกับกำลังที่ใช้ในการออกแบบของไม้ แต่มีค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ประมาณ 0.5-1.2 GPa ซึ่งต่ำกว่าไม้พอสมควร และมีการคืบ (creep) ที่ค่อนข้างสูง สมบัติทางกลของไม้ที่มักพบในประเทศไทย เช่น ไม้สักซึ่งจัดเป็นไม้เนื้ออ่อน มีค่ามอดูลัสยืดหยุ่น 7.9 GPa [คณะกรรมการสาขาวิศวกรรมโยธา, 2538] ซึ่งในทางปฏิบัติแล้ว สมบัติทางกลทั้งสองของ plastic lumber สามารถปรับปรุงได้โดยการเสริมพลาสติกดังกล่าวโดยใช้เส้นใยแก้วหรือเส้นใยคาร์บอนแบบสั้น หรือทำการปรับปรุงชิ้นส่วนของโครงสร้างที่ทำด้วยพลาสติกดังกล่าวโดยการออกแบบหน้าตัดของชิ้นส่วนของโครงสร้างให้เหมาะสม เช่น กลมกลวงหรือสี่เหลี่ยมกลวง เป็นต้น ดังนั้น เมื่อมองถึงการนำพลาสติกที่ใช้แล้วมาเป็นวัสดุไม้ที่ใช้ในงานก่อสร้างจึงมีความเป็นไปได้สูง ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2 ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการทดสอบวัสดุและหาส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการผลิตพลาสติกและใช้ในงานก่อสร้าง ซึ่งจะช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมอย่างมากมาย ทั้งทางด้านมลพิษจากการกำจัดขยะพลาสติกและการนำทรัพยากรธรรมชาติมาใช้โดยไม่จำเป็น ทั้งยังจะช่วยลดการตัดไม้ทำลายป่าอีกทางหนึ่งด้วย อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบัน ยังไม่มีองค์กรใดกำหนดมาตรฐานการทดสอบและออกแบบโครงสร้าง plastic lumber



รูปที่ 1.1 ลักษณะของ plastic lumber ที่ผลิตขายอยู่ในประเทศสหรัฐอเมริกา

จากการศึกษาปริมาณขยะในเขตเทศบาลนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2538 ของโครงการศูนย์กำจัดขยะมูลฝอยเทศบาลนครราชสีมา จากการศึกษปริมาณขยะในโรงพยาบาลอุดรธานี ในปี พ.ศ. 2537 และจากการศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของขยะมูลฝอยภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2545 [เกียรติพงษ์ ศรีสว่าง, 2545] พบว่า ปริมาณพลาสติกที่อยู่ในขยะในเขตพื้นที่ศึกษาดังกล่าว มีอัตราส่วนประมาณร้อยละ 15-16 ของน้ำหนักขยะรวม ซึ่งมากเป็นอันดับที่ 3 รองจากขยะประเภทเศษอาหารและกระดาษ โดยจะเป็นพลาสติกที่ใช้ในบรรจุภัณฑ์ เช่น ขวดน้ำพลาสติกใส ขวดน้ำพลาสติกสีขาวขุ่น ขวดแชมพู และถุงพลาสติก เป็นต้น จากขยะพลาสติกที่ใช้ในบรรจุภัณฑ์ข้างต้น ขวดน้ำพลาสติกใส ซึ่งทำจากพลาสติกประเภทพอลิเอทรีลีนเทอเรพทาเลท (polyethylene terephthalate, PET) และขวดน้ำพลาสติกสีขาวขุ่น ซึ่งทำจากพลาสติกประเภทพอลิเอทรีลีนความหนาแน่นสูง (high density polyethylene, HDPE) เป็นขยะที่สามารถนำมาตัดแยกได้ง่ายที่สุด จากรายงานการใช้พลาสติกในบรรจุภัณฑ์ของ Modern Plastics, 2537 พบว่า พลาสติกข้างต้นถูกใช้ในบรรจุภัณฑ์ประมาณ 72% ของพลาสติกประเภทอื่นๆ ทั้งหมด นอกจากนั้นแล้ว จากรายงานของเมือง Sommerset, NJ พบว่า ขยะพลาสติกที่ได้จากการสำรวจในปี พ.ศ. 2535 ประกอบด้วยพลาสติกทั้งสองประเภทข้างต้นมากกว่า 90% [Lampo and Nosker, 1997]



รูปที่ 1.2 ตัวอย่างการใช้งาน plastic lumber

PET และ HDPE เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก ซึ่งสามารถขึ้นรูปได้ด้วยความร้อน โดยมีจุดหลอมเหลวประมาณ 250°C และ 130°C ตามลำดับ มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับไม้ มีความแข็งแรงต่อการดึงประมาณ 50-70 MPa และ 22-31 MPa ซึ่งใกล้เคียงกับกำลังที่ใช้ในการออกแบบของไม้ แต่มีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นประมาณ 2.7-4.1 GPa และ 1.0 GPa ซึ่งต่ำกว่าไม้พอสมควร อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกลของ PET และ HDPE และ plastic lumber แล้วจะเห็นได้ว่า ทั้ง PET และ HDPE มีสมบัติข้างต้นที่ดีกว่าของ plastic lumber ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้สูงมากที่จะหาอัตราส่วนผสมของ PET และ HDPE เพื่อนำมาแปรรูปเป็นวัสดุผสมแล้วจะให้สมบัติข้างต้นที่เทียบเท่าหรือดีกว่าสมบัติของ plastic lumber

ในกระบวนการผลิต plastic lumber จากพลาสติกที่ผ่านการใช้งาน มีการใส่สารเติมแต่งประเภทต่างๆ เพื่อปรับสมบัติทางกลหรือสมบัติด้านความต้านทานของวัสดุ ประเภทของสารเติมแต่งที่ใช้ เช่น [Climenhage, 2003]

สารทำให้เกิดโฟม (foaming agents) ใช้ในการลดน้ำหนักและมีส่วนในการเกิดเซลล์ที่สม่ำเสมอ (uniform cell) หรือ โครงสร้างที่เป็นช่อง (pore structure)

สารคู่ควบ (coupling agents) ที่ใช้กันมากในพอลิโอเลฟินคอมโพสิต (polyolefin composites) คือ กลุ่มมาลิก แอนไฮไดรด์ (maleic anhydride) และ อะคริลิก แอนไฮไดรด์ (acrylic anhydride) ซึ่งมีผลในการปรับปรุงสมบัติทางกล เช่น ความแข็งแรงต่อการดึง (tensile strength) ความแข็งแรงต่อการดัด (flexural strength) ความแข็งแรงต่อการกระแทก (impact strength)

สารช่วยในการอัดรีด (extrusion aids) เช่น สารหล่อลื่น (lubricant) ช่วยเพิ่มผลผลิต (throughput) ลดอุณหภูมิ และลดการเกิดการเสียหายของของหลอม (melt fracture) สำหรับสารช่วยในการอัดรีดที่ใช้กันมาก เป็น metallic stearates และ waxes เช่น zinc stearate และ Acrawax หรือใช้ทั้งสองอย่างรวมกัน

แอนติออกซิแดนท์ (antioxidants) ใช้เพื่อปรับปรุงความเสถียรต่อความร้อน (thermal stability) ซึ่งสามารถแบ่ง antioxidants ออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ hindered phenols และ organo-phosphates ซึ่ง antioxidant ที่นิยมใช้กันมากเป็นส่วนผสมของ Irganox 1010 และ Irgaphos 168 ของบริษัท Ciba Geigy

สารป้องกันแสงยูวี (UV stabilizers) โดยที่แสง UV ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีและความมันเงาของพื้นผิวของชิ้นงาน ซึ่งบริษัท Ciba Geigy เป็นผู้จำหน่ายของ UV stabilizer ที่ใหญ่ที่สุด

สารหน่วงไฟ (flame retardants) โดยมากไม้พลาสติกที่ขายกันไม่มีการเติมสารหน่วงไฟ แต่ในบางกรณี เช่น หน้าต่าง ประตู มีความจำเป็นในการเติมสารหน่วงไฟ ตัวอย่างของสารหน่วงไฟที่นิยมใช้ เช่น chlorine and bromine retardants, halogen-antimony synergistic systems, phosphorus-based retardants และ inorganic flame retardants

จากข้อมูลข้างต้น คณะผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะวิจัยเพื่อนำพลาสติกที่ใช้แล้ว โดยเฉพาะ PET และ HDPE มาแปรรูปผ่านขบวนการอัดรีด (extrusion) เพื่อใช้เป็นวัสดุในงานก่อสร้างที่มีสมบัติเทียบเคียงได้กับไม้ โดยจะมีการหาอัตราส่วนผสมของพลาสติกทั้งสองให้วัสดุที่ได้มีสมบัติที่เหมาะสมสามารถรับน้ำหนักได้เพียงพอ และทนทานต่อปฏิกิริยาทางเคมีได้ดี และยังสามารถประกอบและนำไปใช้งานได้สะดวก นอกจากนั้นแล้ว การวิจัยข้างต้นยังช่วยลดการใช้ไม้ เกิดการขบวนการที่จะนำวัสดุที่ผ่านการใช้งานแล้วและเหลือใช้มากกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ และลดปัญหาสิ่งแวดล้อมเนื่องจากขยะประเภทดังกล่าว

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของพลาสติกประเภท HDPE และ PET ที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีสมบัติทางกายภาพและทางกลที่เทียบเคียงกับไม้เนื้ออ่อน
2. เพื่อทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางกลของพลาสติกผสม HDPE และ PET ซึ่งประกอบด้วย ความถ่วงจำเพาะ การทดสอบแรงดึง การทดสอบแรงกดอัด การทดสอบแรงคัด สมบัติทางความร้อน สันฐานวิทยา และการดูดซึมน้ำ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางกลของพลาสติกประเภท HDPE และ PET ที่ผ่านการใช้งานแล้วและหลอมใหม่ โดยจัดซื้อพลาสติกประเภท HDPE และ PET ที่ผ่านการใช้งานแล้ว HDPE จะได้จากขวดน้ำพลาสติกประเภทขาวขุ่นและ PET จะได้จากขวดน้ำพลาสติกประเภทใสและขวดน้ำอัดลม
2. ทำการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของพลาสติกประเภท HDPE และ PET ที่ผ่านการใช้งานแล้ว 4 อัตราส่วนผสม คือ 20/80, 40/60, 60/40, 80/20 และทดสอบหาสมบัติทางกายภาพและทางกลซึ่งประกอบด้วย ความถ่วงจำเพาะ ความแข็งแรงต่อการดึง ความแข็งแรงต่อการคัด ความแข็งแรงต่อการกดอัด เพื่อเปรียบเทียบกับสมบัติไม้เนื้ออ่อน
3. ทำการศึกษาผลของสารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติทางกายภาพและทางกลของพลาสติกผสมระหว่าง HDPE และ PET ที่อัตราส่วนที่เหมาะสม
4. ทำการศึกษาผลของเส้นใยแก้วชนิดสั้นที่ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อสมบัติทางกายภาพและทางกลของพลาสติกผสมระหว่าง HDPE และ PET ที่อัตราส่วนที่เหมาะสม
5. ทำการเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและทางกลของตัวอย่างทดสอบที่มีสมบัติเหมาะสมกับไม้เนื้ออ่อน

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

การวิจัยนี้จะได้วัสดุก่อสร้างอีกประเภทหนึ่งที่เป็นวัสดุผสม HDPE และ PET ที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีความแข็งแรง คงทนต่อสภาวะแวดล้อม และมีความเหมาะสมที่จะใช้ในงานก่อสร้าง โดย

หน่วยงานหรือผู้ที่ให้นำผลงานการวิจัยไปใช้ประโยชน์ได้แก่ ประชาชนทั่วไป เอกชนที่ทำธุรกิจรับเหมาก่อสร้าง บริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์ก่อสร้าง หน่วยงานราชการต่างๆ เช่น กรมโยธาธิการ องค์กรการบริหารส่วนตำบล (อบต.) เทศบาล และการเคหะแห่งชาติ เป็นต้น

การพัฒนาวัสดุดังกล่าวจะเป็นการสร้างองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการนำพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วมาใช้งานใหม่ นอกจากนั้นแล้ว ยังจะเป็นการช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมเนื่องจากขยะที่เป็นพลาสติกและการทำลายป่าไม้ และเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยทำให้เกิดการนำวัสดุผ่านการใช้งานแล้วมาใช้ใหม่ เพื่อการสร้างมูลค่าเพิ่มในเชิงพาณิชย์ให้กับพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว

บทที่ 2

ภูมิหลัง

เนื่องจากการใช้พลาสติกในชีวิตประจำวันกันเป็นอย่างมาก ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาขยะพลาสติกตามมาและส่งผลกระทบต่อภาวะแวดล้อม จึงมีความจำเป็นที่ต้องหาวิธีในการนำพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมาใช้ใหม่ รวมถึงการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม การนำพลาสติกซึ่งมีปริมาณมากในขยะที่พบในชีวิตประจำวันมาผลิตเป็นวัสดุใหม่เพื่อใช้ทดแทนไม้ในงานที่เหมาะสมต่างๆ จะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับพลาสติก ลดปัญหาขยะพลาสติก และเป็นการลดปัญหาการตัดไม้ทำลายป่า การนำพลาสติกมาผสมกันเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ นอกเหนือไปจากการสังเคราะห์วัสดุชนิดใหม่ซึ่งจะมีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่า นอกจากนี้ยังเป็นสมดุล (balance) สมบัติของพลาสติกทั้งสองทั้งในด้านสมบัติทางกล สมบัติทางการส่งผ่าน (barrier properties) และสมบัติการขึ้นรูป ในการพัฒนาวัสดุผสม (multiphase blend materials) ในเบื้องต้นขึ้นกับ 2 สิ่งที่สำคัญ คือ การควบคุมเคมีของอินเทอร์เฟซ (interfacial chemistry) และการควบคุมโครงสร้างจุลภาค (microstructure) [Favis, 2000] ซึ่งมีตัวแปรของวัสดุต่างๆ (material parameters) ที่มีอิทธิพลต่อสัณฐานวิทยา (morphology) เช่น อัตราส่วนของความหนืด (viscosity ratio) สัดส่วน (composition) ความยืดหยุ่น (elasticity) อัตราเฉือน (shear rate) และการปรับเปลี่ยนอินเทอร์เฟซ (interfacial modification) [Utraki, 1989] ซึ่งถ้าสามารถควบคุมตัวแปรต่างๆ เพื่อให้ได้สัณฐานวิทยาและสมบัติที่อินเทอร์เฟซ (interface properties) ที่ต้องการ จะทำให้ได้พลาสติกผสมที่มีสมบัติที่ต้องการ

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นในบทนำ พบว่า HDPE และ PET เป็นพลาสติกที่พบในสัดส่วนที่มากที่สุด ในขยะพลาสติก แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อนำ HDPE และ PET มาผสมกันจะเกิดความไม่เข้ากัน เนื่องจาก HDPE มีความไม่เป็นขั้ว (non polar) ส่วน PET มีความเป็นขั้ว (polar) ทำให้สมบัติทางกลของพลาสติกผสมไม่ดี ดังนั้นจึงมีการศึกษาวิธีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพลาสติกทั้งสอง การใส่สารช่วยให้เข้ากัน (compatibilizer) เป็นแนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหา มีงานวิจัยที่ศึกษาการปรับปรุงความเข้ากันได้ของพลาสติกทั้งสองทั้งที่ผ่านการใช้งานแล้วและยังไม่ผ่านการใช้งาน ต่อสมบัติในด้านต่างๆ เช่น ทางกล ทางกายภาพ ทางความร้อน และสัณฐานวิทยา

2.1 การศึกษาการทำให้เข้ากันของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง HDPE และ PET

การศึกษาผลของสารช่วยให้เข้ากันชนิดต่างๆ ต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PE และ PET ที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว พบว่าการใช้ Fusabond BA 413 ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride) และอีพอกซี (epoxy) ให้สมบัติด้านความแข็งแรงต่อการกระแทก และความแข็งแรง (stiffness) ที่สมดุลที่สุด [Hausann, 1997] นอกจากนี้มีการใช้บล็อกโคพอลิเมอร์ของมาลีเอท สไตรีน เอทิลีน บิวทิลีน สไตรีน (maleated styrene-ethylene/butylene-styrene block copolymer, SEBS-g-

MA) และโคพอลิเมอร์ของเอทธิลีนไกลิคเมทาคริลิก เมทาคริลิก (ethylene-glycidyl methacrylate copolymer, E-GMA) เป็นสารช่วยให้เข้ากันในพอลิเมอร์ผสมนี้ พบว่าใน PE/PET (25/75) การใช้ 4 ส่วนของ E-GMA ใน 100 ส่วนของพอลิเมอร์ผสม หรือการใช้ 10 ส่วนของ SEBS-g-MA ใน 100 ส่วนของพอลิเมอร์ผสม ให้ความแข็งแรงต่อการดึง และความแข็งแรงต่อการกระแทกที่ดีที่สุดในกรณีของ PE/PET (75/25) การใช้ 3 ส่วนของ E-GMA หรือ การใช้ 5 ส่วนของ SEBS-g-MA ใน 100 ส่วนของพอลิเมอร์ผสม ให้ความแข็งแรงต่อการดึงและความแข็งแรงต่อการกระแทกที่ดีที่สุด [Pluta et al., 2001] การใช้ E-GMA 10% มีผลต่อการปรับปรุงความเหนียว (toughness) และการทนต่อความร้อน (heat resistance) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง HDPE/PET (1/1.8) ที่ผ่านการใช้งานแล้วอย่างมีนัยสำคัญ [Akkapeddi et al., 1992] นอกจากนี้ มีการนำ HDPE และ PET ที่ผ่านการใช้งานแล้วมาผสมกันในอัตราส่วน 75/25 และ 25/75 และศึกษาผลของอัตราส่วนและชนิดของสารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติทางกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม สารช่วยให้เข้ากันที่ใช้ คือ SEBS-g-MA และ E-GMA พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการใส่สารช่วยให้เข้ากัน มีการเพิ่มขึ้นของการดึงยึดและค่าความแข็งแรงในการรับแรงกระแทก [Pawlak et al., 2002] การศึกษาผลของประสิทธิภาพของสารช่วยให้เข้ากัน 5 ชนิด คือ พอลิเอทธิลีนความหนาแน่นสูงกราฟมาเลอิกไฮดรอกไซด์ (high density polyethylene grafted maleic anhydride, HDPE-g-MA), เอทธิลีน-โพรพิลีน รับเบอร์กราฟมาเลอิกไฮดรอกไซด์ (ethylene propylene rubber grafted maleic anhydride, EPR-g-MA), พอลิเอทธิลีนโคอะคริลิกแอซิด (polyethylene-co-acrylic acid, E-AA), E-GMA, SEBS-g-MA ต่อการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง HDPE และ PET ที่ผ่านการใช้งานแล้ว พบว่า E-GMA ส่งผลต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพการเข้ากันได้ที่ดีกว่าสารช่วยให้เข้ากันชนิดอื่นๆ เนื่องจากการมีความไวต่อปฏิกิริยา (reactivity) ที่สูงของหมู่เอพอกซีของ E-GMA กับกับหมู่ฟังก์ชันที่ปลายของ PET ในระหว่างการผสม [Pracella et al., 2002]

นอกจากนี้มีการศึกษาผลของสารช่วยให้เข้ากันชนิดต่างๆ ต่อสมบัติทางกล กระแสวิตา ความร้อน หรือสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง HDPE และ PET ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน เช่น E-GMA [Dagli and Kamdar, 1994, Kalfoglou et al., 1995], โคพอลิเมอร์ของสไตรีน บิวตะไดอิน สไตรีน (styrene-butadiene-styrene triblock copolymer, SEBS) [Traugott et al., 1983, Carte and Moet, 1993, Chen and Shiak, 1989], พอลิเอทธิลีนกราฟมาเลอิกไฮดรอกไซด์ (maleic anhydride grafted PE, PE-g-MA) [Curry and Kiani, 1990], ไอออนอเมอร์ของเอทธิลีน เมทาคริลิก (ionomer of ethylene methacrylic acid copolymer) [Guerrero et al., 2001], โคพอลิเอสเทอร์ (copolyesters) [Dimitrova, et al., 2000] จากการศึกษาโดยรวม พบว่าสารช่วยให้เข้ากันมีผลในการปรับปรุงสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสม การลดขนาดของเฟสกระจาย (dispersed phase) ค่าอุณหภูมิหลอม (melting temperature, T_m) ของ HDPE และ PET ที่มีและไม่มีสารช่วยให้เข้ากันมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งพบในพอลิเมอร์ผสมที่

ไม่เข้ากัน (immiscible blends) ในสถานะของหลอม (melt state) ในการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารช่วยให้เข้ากันชนิดต่างๆ คือ E-GMA, SEBS-g-MA, เอทิลีน เอท- ธิลอะคริเลท ไกลซิไดล เมททาไคลเลท (ethylene ethylacrylate glycidyl methacrylate, E-EA-GMA), โคลิเมอร์ของเอทิลีน เมทิล อะไคลเลท ที่มีการปรับเปลี่ยนด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ (MA modified ethylene-methyl acrylate copolymer, E-MeA-g-MA) ต่อสมบัติด้านฐานานวิทยาและการดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง HDPE และ PET พบว่าประสิทธิภาพในการปรับปรุงความเข้ากันได้เรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ E-GMA>E-EA-GMA>SEBS-g-MA>E-MeA-g-MA เนื่องมาจากความแตกต่างของความไวต่อปฏิกิริยาของหมู่ฟังก์ชัน GMA และ MA ในสารช่วยให้เข้ากัน [Kallfoglou et al., 1995]

จากงานวิจัยต่างๆ พบว่าสมบัติของพลาสติกผสมระหว่าง HDPE และ PET ที่ผ่านการใช้งานแล้ว ขึ้นกับปัจจัยต่างๆ คือ สมบัติเริ่มต้นของพลาสติกทั้งสอง อัตราส่วนในการผสม สารช่วยให้เข้ากันทั้งในแง่ของชนิดและปริมาณ และสภาวะในการผสม

2.2 ผลของสารตัวเติมต่อสมบัติของพอลิเมอร์

การใส่สารตัวเติม (filler) ที่อยู่ในรูปของอนุภาคหรือเส้นใยเข้าไปในพอลิเมอร์เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการปรับปรุงสมบัติทางกล เส้นใยแก้วเป็นหนึ่งในวัสดุที่ใช้กันมากในการเสริมแรงของเทอร์โมพลาสติก เนื่องจากมีคุณลักษณะที่ดี เช่น ความแข็งแรงต่อการดึงที่สูง มีความต้านทานทางเคมี มีสมบัติด้านฉนวนที่ดีเยี่ยม [Giraldi et al., 2005] Joshi และคณะ [Joshi et. al., 1992] ศึกษาผลของเส้นใยแก้วชนิดสั้นต่อสมบัติทางความร้อน สมบัติทางกลชนิดไดนามิก (dynamic mechanical properties) และสมบัติกระแสวิชชาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีนเทอเรพทาเลท (polybutylene terephthalate, PBT) และ HDPE พบว่าเมื่อมีการใส่เส้นใยแก้ว มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณผลึก มีการลดลงของ damping มีการเพิ่มขึ้นของมอดูลัสสะสม (storage modulus) นอกจากนี้เส้นใยแก้วส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความหนืดและการลดลงของการบวมตัวของเอ็กทูด (extrudate swell)

McLoughlin และ Elliott [McLoughlin and Elliott, 1998] ศึกษาผลของปริมาณและดัชนีการไหล (melt flow index, MFI) ของพอลิโพรพิลีนกราฟมาเลอิกไฮไดรด์ (polypropylene grafted maleic anhydride, PP-g-MA) ต่อสมบัติทางกลของคอมโพสิทระหว่างพอลิโพรพิลีน (polypropylene, PP) และเส้นใยแก้ว พบว่าปริมาณ PP-g-MA ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญของความแข็งแรงต่อการดึง แต่ดัชนีการไหลของ PP-g-MA ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความแข็งแรงต่อการดึง

Andreeva และคณะ [Andreeva et al., 2000] พบว่า MBI (4,4'-diphenylmethane bismaleimide) ซึ่งเป็นสารช่วยให้เข้ากัน ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงต่อการดึงของคอมโพสิทระหว่าง PP

พอลิเอไมด์หก (polyamide 6, PA6) และเส้นใยแก้ว เนื่องจากการปรับปรุงความเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PP และ PA6 และการเพิ่มการยึดติดระหว่าง PP และเส้นใยแก้ว

Gnatowski และ Koszkuł [Gnatowski and Koszkuł, 2005] พบว่าการใส่เส้นใยแก้ว 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเข้าไปใน PA6 50%/PP 50%/polybond (PP-g-MA) 2% ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงต่อการดึง

Fung และ Li [Fung and Li, 2006] วิเคราะห์ประสิทธิภาพของการเสริมแรงของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET และ MA-g-SEBS ด้วยเส้นใยแก้วชนิดสั้น (short glass fiber, SGF) พบว่าเส้นใยแก้วมีผลในการปรับปรุงมอดูลัสการดึง (tensile modulus) ความแข็งแรงต่อการดึงและความแข็งแรงต่อการกระแทกชนิดมีรอยบาก (notched impact strength) ของ PET การมี MA-g-SEBS rubber ใน SGF/rubber/PET ไม่ได้ส่งผลต่อการปรับปรุง notched impact strength ในขณะที่มีผลในทางลบต่อสมบัติด้านการดึง

นอกจากเส้นใยแก้วแล้ว มีการใช้แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) เป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์ผสม Albano และคณะ [Albano et al., 2000] ศึกษาสมบัติทางกลและสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PP และ HDPE ที่ไม่ผ่านและผ่านการใช้งาน อัตราส่วนในการผสม คือ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก การใช้แคลเซียมคาร์บอเนตที่มีการปรับเปลี่ยนพื้นผิวด้วยสารคู่ควบชนิดไททาเนต (titanate) ไม่ได้ส่งผลต่อการได้สมบัติทางกลที่ดีขึ้น

Gonzalez และคณะ [Gonzalez et al., 2002] ศึกษาผลของสารคู่ควบ (coupling agent) ต่อสมบัติทางกลและสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PP และ HDPE ที่อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนัก แคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในการศึกษามีขนาดอนุภาคต่างกันสองขนาด สารคู่ควบที่ใช้ คือ สารไททาเนต และเซอร์โคเนต (zirconate) ปริมาณที่ใช้ 0.3, 0.5, 0.7 และ 1.0 โดยน้ำหนักของแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าสารคู่ควบส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติทางกลของคอมโพสิต ซึ่งการเพิ่มขึ้นของสมบัติทางกลขึ้นกับชนิดของสารคู่ควบ

2.3 Recycled plastic lumber

Recycled plastic lumber (RPL) คือ ผลิตภัณฑ์ที่เหมือนไม้ (wood-like) ซึ่งทำจากพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว หรือพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วผสมกับวัสดุอื่นๆ ในช่วงต้น ค.ศ. 1970 มีการพัฒนา RPL ทั้งในยุโรป ญี่ปุ่น และสหรัฐอเมริกา ในระหว่างปี ค.ศ. 1990 มีการพัฒนา RPL อย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีการเติบโตของยอดขายของ RPL ในส่วนของตลาดผลิตภัณฑ์ deck board และ deck railing [Climenhage, 2003] กระบวนการผลิต RPL ที่นิยมใช้มี 4 แบบคือ intrusion process, continuous extrusion, Reverser process และ compression molding ได้ชิ้นงานรูปแบบต่างๆ ทั้งที่เป็นโครงสร้างกลวงและตัน (hollow, solid structure) เพื่อใช้แทนไม้ เช่น รั้ว เสา เก้าอี้ ในสวนสาธารณะ โต๊ะปิกนิก ข้อดีต่างๆ ของ RPL เช่น ทำจากพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว จัดเป็น green products

ทนทานต่อการผุ (rot) สภาพอากาศ และแมลง ทำให้มีอายุการใช้งานนานกว่าไม้ ซึ่งในกรณีของไม้ ต้องมีบำรุงรักษาด้วยสารเคมีที่เป็นอันตราย ไม้ต้องทาสี สามารถทำให้มีสีในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป ทำให้มีความคงทน (long lasting color) มีสีและลวดลาย (texture) ต่างๆ ไม่มีค่าบำรุงรักษา เช่น การล้าง การ resealing/re-staining ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและแรงงาน และมีอายุการใช้งานนานกว่าเมื่อเทียบกับไม้ทั่วไป เป็นต้น จากงานวิจัยพบว่า plastic lumber มีความแข็งแรงต่อการกดอัด (compression strength) ที่ใกล้เคียงหรือดีกว่าไม้ แต่มีมอดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ที่ต่ำกว่าไม้ และมีการคืบ (creep) ที่ค่อนข้างสูง ซึ่งในทางปฏิบัติถ้าการประยุกต์ใช้งานที่ต้องการสมบัติทางกลทั้งสองสามารถปรับปรุงได้โดยการออกแบบหน้าตัดของชิ้นงาน โครงสร้างให้เหมาะสมหรือการเติมเส้นใยเสริมแรง เช่น เส้นใยคาร์บอนหรือเส้นใยแก้วชนิดสั้น [Lampo and Nosker, 1997] ในช่วงปี ค.ศ. 1998-2008 ตลาดของ RPL และวัสดุคอมโพสิตจากไม้ (wood composites) มีการเติบโตที่ 13% ในทุกๆ ปี การประยุกต์ใช้งานแบ่งออกได้อย่างกว้างๆ เป็น 4 กลุ่ม คือ ผลิตภัณฑ์ก่อสร้าง (building products) งานด้าน โครงสร้าง (infrastructure) การขนส่ง (transportation) และอุตสาหกรรม (industrial) ซึ่งกลุ่มผลิตภัณฑ์ก่อสร้างเป็นกลุ่มที่ใหญ่ที่สุดและคาดว่าจะมีแนวโน้มการเติบโต 11% ทุกๆ ปี [Rossi, 2000]

บทที่ 3

วัสดุและการทดลอง

3.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย HDPE ที่ผ่านการใช้งานแล้ว ซึ่งได้จากขบวนการรีไซเคิลพลาสติก และ PET ที่ผ่านการใช้งานแล้ว ได้มาจากขบวนการรีไซเคิลพลาสติก และขบวนการรีไซเคิลพลาสติก ทำความสะอาด ขวดด้วยน้ำ และบดให้มีขนาดเล็กกลงโดยใช้เครื่องบด (mechanical grinder)

สารช่วยให้เข้ากัน (compatibilizer) ที่ใช้ คือ Fusabond[®] E MB100D (polyethylene grafted maleic anhydride, PE-g-MA) ของบริษัท DuPont เส้นใยแก้ว (E-glass, Saint-Gobain Vetrotex) ที่ใช้ อยู่ในรูปของโรฟวิ่ง (roving) นำมาตัดให้มีขนาดยาวเฉลี่ยประมาณ 4 มิลลิเมตร

3.2 การเตรียมและการขึ้นรูปชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมโพสิต

อัตราส่วนของ HDPE และ PET ที่ใช้ในการศึกษา คือ 20/80, 40/60, 60/40, 80/20 โดยนำน้ำหนัก HDPE และ PET ไปทำการอบเพื่อกำจัดความชื้นที่อุณหภูมิ 105 และ 160 องศาเซลเซียส (°C) ตามลำดับ ก่อนนำไปทำการผสม ปริมาณสารช่วยให้เข้ากัน คือ 1, 2, 4, 6, 8 ส่วนต่อ 100 ส่วนของพอลิเมอร์ (part per hundred part of polymer, phr) และปริมาณเส้นใยแก้วชนิดสั้นที่ใช้ คือ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

การผสมพอลิเมอร์ทำในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (intermeshing corotating twin screw extruder, Brabender DSE 35/17D) โดยอุณหภูมิที่ใช้ คือ 255-260-265-270°C และหัวอัดรีด (die) ที่ใช้เป็นชนิดแท่ง (rod die) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3 มิลลิเมตร ความเร็วรอบของสกรูที่ใช้ คือ 50 รอบต่อนาที (rpm)

การขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบทำโดยใช้เครื่องฉีด (injection molding, Chuan Lih Fa: CLF-80T) ลักษณะชิ้นงานเป็นชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติด้านการดึง (tensile properties) สมบัติด้านการคด (flexural properties) สมบัติด้านการรับการกระแทกชนิด Izod (Izod impact properties) และอุณหภูมิบิดเบี้ยว (heat distortion temperature, HDT) สำหรับชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติด้านการการกดอัด (compressive properties) เตรียมโดยใช้เทคนิคการกดอัด (compression molding, Gotech)

3.3 การวิเคราะห์และตรวจสอบพอลิเมอร์ พอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมโพสิต

3.3.1 สมบัติทางกายภาพ (physical properties)

ความหนาแน่น (density)

การวัดความหนาแน่นของพอลิเมอร์ พอลิเมอร์ผสม และพอลิเมอร์คอมโพสิต ใช้ pyknometer โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวกลาง (medium) ยกเว้นในกรณีของ HDPE ใช้เมทิล เอทิล คีโตน (methyl ethyl ketone) เป็นตัวกลางแทนการใช้น้ำกลั่น เนื่องจาก HDPE มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำ

อุณหภูมิบิดเบี้ยว (heat distortion temperature, HDT)

ในการวัดค่า HDT ของชิ้นงานตัวอย่างซึ่งมีความยาว 127 มิลลิเมตร ความกว้าง 13 มิลลิเมตร และความหนา 4 มิลลิเมตร ทำตามมาตรฐาน ASTM D 648 โดยใช้ DTUL/VICAT (Atlas) ตัวกลางในการให้ความร้อนคือ น้ำมันซิลิโคน แรงกดที่ใช้มีค่า 455 กิโลปาสกาล (kPa) และอัตราการให้ความร้อน 120 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง (°C/hr)

การดูดซึมน้ำ (water absorption)

ในการวัดสมบัติการดูดซึมน้ำของตัวอย่าง ทำตามมาตรฐาน ASTM D570 โดยนำชิ้นทดสอบไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง เปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักคำนวณจากสมการที่ 1

$$\text{การเพิ่มขึ้นของน้ำหนัก (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักเปียก} - \text{น้ำหนักแห้ง}}{\text{น้ำหนักแห้ง}} \times 100 \quad (1)$$

3.3.2 สมบัติทางกล (mechanical properties)

สมบัติด้านการดึง (tensile properties)

สมบัติด้านการดึงประกอบด้วย ความแข็งแรงต่อการดึง (tensile strength) โมดูลัสของยังก์ (Young's modulus) ค่าการดึงยืด (tensile strain at break) การทดสอบทำตามมาตรฐาน ASTM D638 โดยใช้เครื่อง universal testing machine (Instron model 5565) ขนาดของเซลล์รับแรง (load cell) 5 กิโลนิวตัน (kN) ความเร็วในการดึง (crosshead speed) 5 มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min) ชิ้นงานในการทดสอบรูปดัมเบลมีขนาดความกว้างของส่วนที่แคบ 13 มิลลิเมตร ความกว้างทั้งหมด 20 มิลลิเมตร ความยาวของเกท (gauge length) 60 มิลลิเมตร ความยาวของชิ้นงาน 165 มิลลิเมตร และความหนาของชิ้นงาน 3.7 มิลลิเมตร

สมบัติด้านการดึงของ HDPE, PET และ HDPE/PET blends ที่ผ่านการแช่น้ำที่เวลา 1 วัน 1, 2 อาทิตย์ และ 1 เดือน การทดสอบทำเช่นเดียวกับการทดสอบสมบัติด้านการดึงที่กล่าวมาข้างต้น

สมบัติด้านการดัด (flexural properties)

การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790 แบบ three point bending โดยใช้เครื่อง universal testing machine (Instron model 5565) ความเร็วที่ใช้ คือ 5 มิลลิเมตรต่อนาที ความยาวของระยะ (span length) ที่ใช้ 72 มิลลิเมตร ขนาดของชิ้นงานมีขนาดเดียวกับที่ใช้ในการทดสอบ HDT

สมบัติด้านการกดอัด (compressive properties)

การทดสอบสมบัติการกดอัดของชิ้นงานทำตามมาตรฐาน ASTM D695 โดยใช้เครื่อง universal testing machine (Instron model 5565) ขนาดของ load cell 50 กิโลนิวตัน ความเร็วที่ใช้ คือ 1.27 มิลลิเมตรต่อนาที การเตรียมชิ้นทดสอบใช้จากกระบวนการกดอัด ชิ้นทดสอบมีความกว้าง 12.7 มิลลิเมตร ความหนา 12.7 มิลลิเมตร และความสูง 25.4 มิลลิเมตร

สมบัติด้านการรับแรงกระแทก (impact properties)

การทดสอบ notched Izod impact strength ของตัวอย่างทำตามมาตรฐาน ASTM D256 เครื่องที่ใช้ในการทดสอบ คือ Atlas testing machine model BPI ชิ้นงานมีความหนา 12.7 มิลลิเมตร ความยาว 64 มิลลิเมตร และความกว้าง 4 มิลลิเมตร

3.3.3 สมบัติทางกระแสวิทยา (rheological properties)

การทดสอบความหนืดของพอลิเมอร์ที่อัตราเร็วต่างๆ วัดโดยใช้เครื่อง capillary rheometer (Kayeness Capillary Rheometer) อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ คือ 270°C

3.3.4 สมบัติทางสัณฐานวิทยา (morphological properties)

การตรวจสอบสมบัติทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ทำโดยใช้ scanning electron microscope (SEM, JEOL model 6400) การเตรียมตัวอย่าง ทำโดยการนำชิ้นงานตัวอย่างไปแช่ในไนโตรเจนเหลว ทำการหักชิ้นงานตัวอย่างและนำส่วนพื้นผิวที่ได้จากการหัก (fracture surface) ไปทำการเคลือบด้วยทองคำก่อนนำไปศึกษา

3.3.5 สมบัติทางความร้อน (thermal properties)

การตรวจสอบสมบัติทางความร้อน ทำโดยใช้ differential scanning calorimeter (DSC, Perkin Elmer DSC-7) ในการศึกษาทำการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อ นาที (°C/min) จากนั้นทำให้เย็นลงด้วยอัตรา 10°C/min และทำการให้ความร้อนด้วยอัตรา 10°C/min ช่วงอุณหภูมิในการศึกษา คือ 40-280°C สมบัติที่ศึกษาประกอบด้วยอุณหภูมิหลอม (melting temperature, T_m) และเปอร์เซ็นต์ผลึก (% crystallinity, % X_c)

เปอร์เซ็นต์ผลึกสามารถคำนวณได้จากสมการสมการที่ 2

$$\% \text{ crystallinity} = (\Delta H_{\text{sample}} / \Delta H_{100\% \text{ crystalline}}) \times 100 \quad (2)$$

ΔH_{sample} คือความร้อนของการฟิวชัน (heat of fusion) ของตัวอย่าง (จุดต่อกรัม, J/g) และ $\Delta H_{100\% \text{ crystalline}}$ คือ heat of fusion ของผลึก 100 เปอร์เซ็นต์ (pure crystalline) ซึ่งในกรณีของ PET มีค่า 119.8 J/g และ PE มีค่า 293.0 J/g [Wunderlich and Dole, 1957]

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ พอลิเมอร์ผสมระหว่าง HDPE และ PET พอลิเมอร์ผสมระหว่าง HDPE และ PET ที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยสารช่วยให้เข้ากัน และพอลิเมอร์คอมโพสิต ซึ่งคือพอลิเมอร์ผสมที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิดสั้น

4.1 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง HDPE และ PET

อัตราส่วนในการผสมระหว่าง HDPE และ PET คือ 20/80, 40/60, 60/40, 80/20

4.1.1 สมบัติทางกายภาพ

ความหนาแน่นของ HDPE, PET และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง HDPE และ PET (HDPE/PET blends) แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสมอยู่ระหว่างความหนาแน่นของ HDPE และ PET โดยพอลิเมอร์ผสมที่มี PET ในอัตราส่วนที่สูงจะมีความหนาแน่นสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่มี PET ในอัตราส่วนที่ต่ำ

ตารางที่ 4.1 ความหนาแน่นของ HDPE, PET และ HDPE/PET blends

วัสดุ	ความหนาแน่น (g/cm ³)
HDPE	0.97±0.02
PET	1.38±0.01
HDPE/PET 20/80	1.19±0.02
HDPE/PET 40/60	1.17±0.01
HDPE/PET 60/40	0.94±0.02
HDPE/PET 80/20	0.91±0.01

ตารางที่ 4.2 HDT ของ HDPE, PET และ HDPE/PET blends

วัสดุ	HDT (°C)
HDPE	65.33±0.3
PET	69.30±0.3
HDPE/PET 20/80	69.00±0.3
HDPE/PET 40/60	68.50±0.7
HDPE/PET 60/40	68.00±0.7
HDPE/PET 80/20	66.70±0.3

อุณหภูมิบิดเบี้ยว (HDT) ของ HDPE, PET และ HDPE/PET blends แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่า HDT ของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างกันอยู่ระหว่าง 67-69°C ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ระหว่าง HDT ของ HDPE และ PET

4.1.2 สมบัติทางกล

สมบัติทางกลของ HDPE, PET และ HDPE/PET blends ซึ่งประกอบด้วย tensile properties, flexural properties และ Izod impact strength แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 Tensile strength, tensile strain at break, Young's modulus, flexural strength, flexural modulus, impact strength ของ HDPE, PET และ HDPE/PET blends

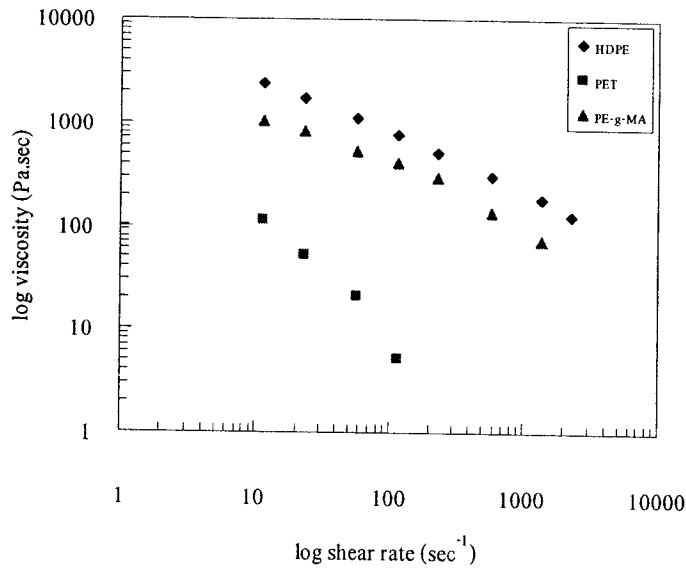
วัสดุ	Tensile strength (MPa)	Tensile strain at break (%)	Young's modulus (MPa)	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (MPa)	Impact strength (MPa)
HDPE	18.10±0.12	NB	731.60±29.07	24.10±0.52	805.96±30.15	20241.12±25.54
PET	56.98±1.15	4.42±0.26	1663.53±26.64	89.92±2.38	2789.27±18.60	1435.42±55.47
HDPE/PET 20/80	30.85±0.73	3.46±0.16	1320.73±53.03	54.49±0.47	1872.54±44.90	2578.41±77.12
HDPE/PET 40/60	20.19±0.72	2.44±0.15	1146.72±18.17	31.78±1.74	1427.76±71.62	1685.55±41.22
HDPE/PET 60/40	22.66±1.22	4.04±0.42	1007.86±23.98	35.58±1.14	1211.86±28.40	2928.71±58.64
HDPE/PET 80/20	20.37±0.35	10.87±1.09	872.24±37.25	30.02±0.68	945.76±14.39	5763.21±29.91

***NB = not broken ไม่ขาด

จากตารางที่ 4.3 พบว่า tensile strength, tensile strain at break, Young's modulus, flexural strength, flexural modulus และ Izod impact strength ของพอลิเมอร์ผสมขึ้นกับอัตราส่วนของ HDPE และ PET ในพอลิเมอร์ผสม โดยที่ HDPE เป็นพอลิเมอร์ที่มี tensile strain at break และ impact strength ที่ดี ส่วน PET มี tensile strength และ modulus ที่ดี นอกจากนี้ PET มีค่า flexural strength และ modulus ที่สูง การนำ HDPE มาผสมใน PET จะเป็นการเพิ่มความเหนียว (toughness) ให้กับพอลิเมอร์ผสม เช่น กรณี HDPE/PET ที่อัตราส่วน 20/80 ซึ่งมี HDPE เป็นเฟสกระจายซึ่งจะทำให้หน้าตัดในการดูดซับพลังงานระหว่างการทดสอบการกระแทก เป็นตัวเริ่มและหยุดการเกิดริ้ว (crazing) จากสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสม พบว่า HDPE/PET ที่อัตราส่วน 20/80 มีค่า tensile, flexural properties สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนอื่นๆ

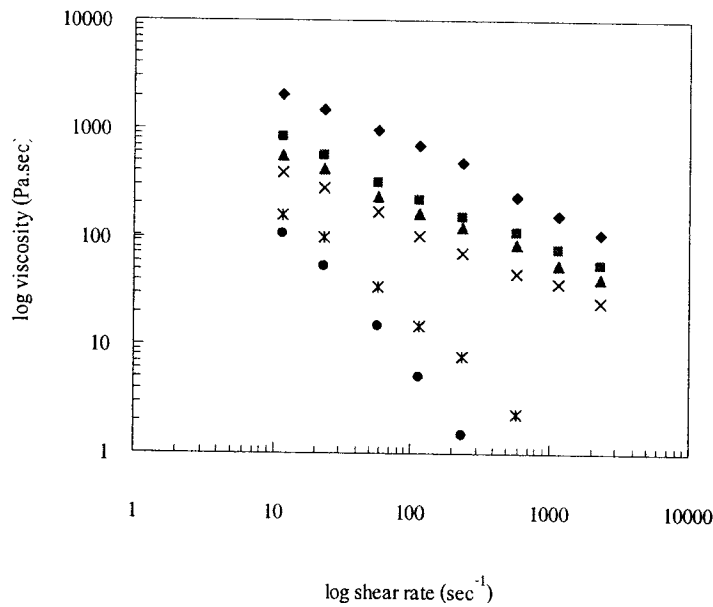
4.1.3 สมบัติทางกระแสวิทยา

ความหนืดที่อัตราเร็วต่างๆ ของ HDPE, PET และสารช่วยให้เข้ากัน คือ PE-g-MA ที่อุณหภูมิ 270°C แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่าความหนืดของ HDPE มีค่ามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุทั้งสามชนิด



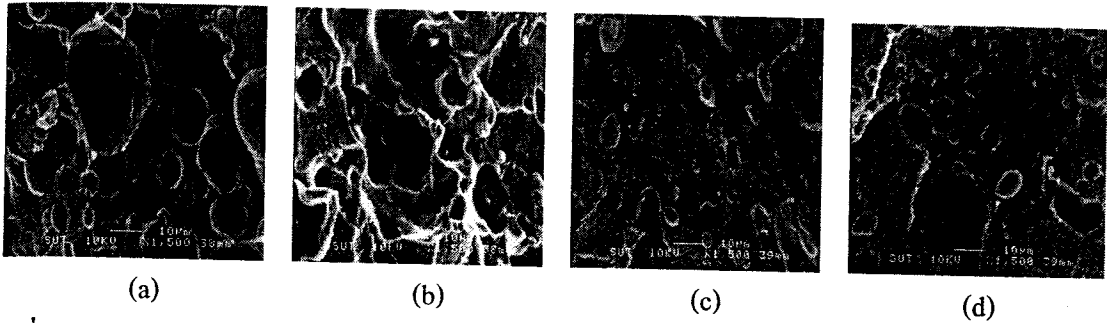
รูปที่ 4.1 ความหนืดที่อัตราเฉือนต่างๆ ของ HDPE, PET และ PE-g-MA ที่อุณหภูมิ 270°C

ความหนืดที่อัตราเฉือนต่างๆ ของ PET, HDPE และ HDPE/PET blends ที่อัตราส่วน 20/80, 40/60, 60/40, 80/20 แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าความหนืดของพอลิเมอร์ผสมขึ้นกับอัตราส่วนของพอลิเมอร์และอยู่ระหว่างความหนืดของ HDPE และ PET



รูปที่ 4.2 ความหนืดที่อัตราเฉือนต่างๆ ของ HDPE, PET และ HDPE/PET blends ที่อุณหภูมิ 270°C

4.1.4 สมบัติทางสัณฐานวิทยา



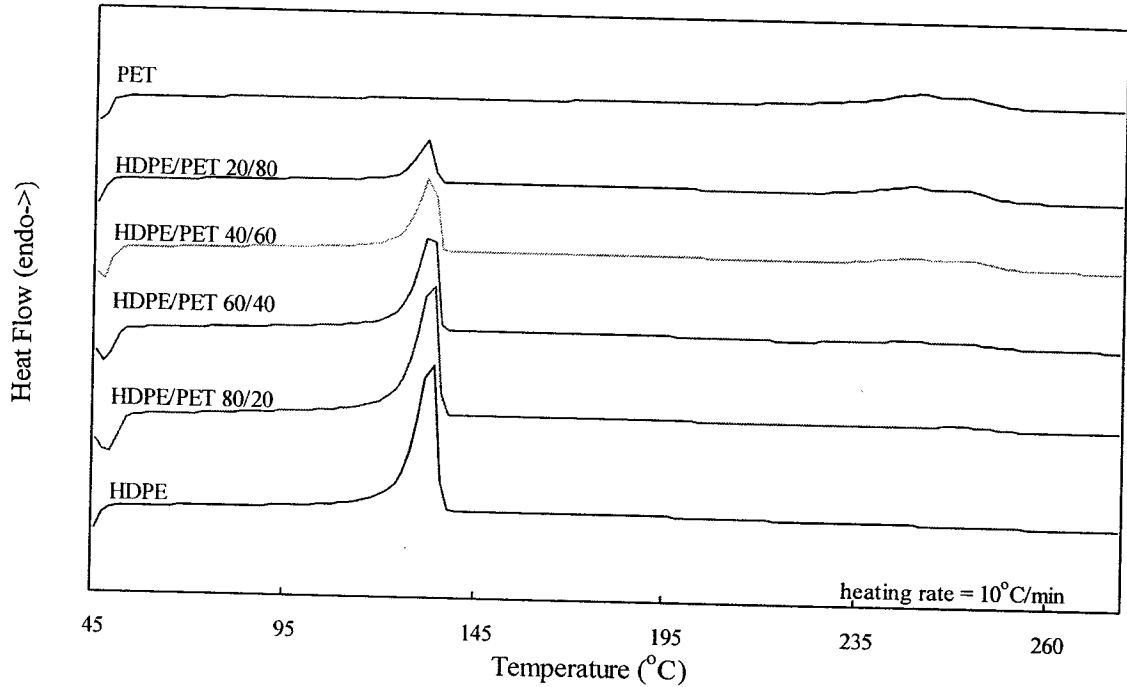
รูปที่ 4.3 SEM micrographs ของ HDPE/PET blends (a) HDPE/PET 20/80 (b) HDPE/PET 40/60 (c) HDPE/PET 60/40 (d) HDPE/PET 80/20 (x1500)

SEM micrographs ของ HDPE/PET blends ที่อัตราส่วนต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.3 เมื่อพิจารณาแบบที่มี PET เป็นเมทริกซ์ (HDPE/PET 20/80, 40/60) พบว่าขนาดของเฟสกระจายมีขนาดใหญ่กว่าแบบที่มี HDPE เป็นเมทริกซ์ (HDPE/PET 80/20, 60/40) ซึ่งสัมพันธ์กับอัตราส่วนของความหนืดของเมทริกซ์และเฟสกระจาย (viscosity ratio) ขนาดของเฟสกระจายของ HDPE/PET 20/80 มีขนาดใหญ่กว่าของ HDPE/PET 20/80 และ HDPE/PET 40/60 มีขนาดของเฟสกระจายใหญ่กว่าของ HDPE/PET 60/40 เนื่องจากในระหว่างทำการผสม HDPE ซึ่งเป็นเฟสกระจายมีความหนืดที่มากกว่า PET Favis (2000) พบว่าเฟสกระจายจะมีการกระจายที่ดี (fine dispersion) ในเมทริกซ์ ถ้าความหนืดของเฟสกระจายมีค่าต่ำกว่าของเมทริกซ์ และในกรณีตรงกันข้ามจะได้รับการกระจายที่ไม่ดี (coarse dispersion) ขนาดของเฟสกระจายในพอลิเมอร์ผสมจะเป็นผลเนื่องมาจากการสมดุลระหว่างแรงทางกลและแรงที่อินเทอร์เฟซ (mechanical and interfacial forces) การมีแรงดึงระหว่างผิว (interfacial tension) ที่ต่ำกว่าจะทำให้มีขนาดของเฟสกระจายที่เล็กกว่า นอกจากนี้การมีการกระจายที่ดี (finer dispersion) ระหว่างเฟสส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม [Inoue and Marechal, 1997]

4.1.5 สมบัติทางความร้อน

DSC thermograms ของ HDPE, PET และ HDPE/PET blends ที่อัตราส่วนต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.4 อุณหภูมิหลอม (melting temperature, T_m) ของ HDPE และ PET มีค่า 132.35 และ 246.77°C ตามลำดับ อุณหภูมิหลอม และเปอร์เซ็นต์ผลึก (% crystallinity, %X_c) ของ HDPE, PET และ HDPE/PET blends แสดงตารางที่ 4.4 ค่าอุณหภูมิหลอมของส่วน HDPE (HDPE component) ในพอลิเมอร์ผสมมีค่าต่ำกว่าค่าอุณหภูมิหลอมของ HDPE เล็กน้อย (1-2°C) เปอร์เซ็นต์ผลึกในส่วน HDPE มีค่าลดลง เมื่อมีสัดส่วนของ PET เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาอุณหภูมิหลอมของส่วน PET (PET component) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิหลอมของ PET ส่วนเปอร์เซ็นต์ผลึกของส่วน PET มีค่าลดลง เมื่อมีสัดส่วนของ HDPE เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า HDPE และ PET มีการขัดขวางซึ่งกัน

และกันในกระบวนการเกิดผลึก (crystallization) ดังนั้นพฤติกรรมการเกิดผลึก (crystallization behavior) ของพอลิเมอร์ในพอลิเมอร์ผสมขึ้นกับพอลิเมอร์ที่เป็นส่วนประกอบ



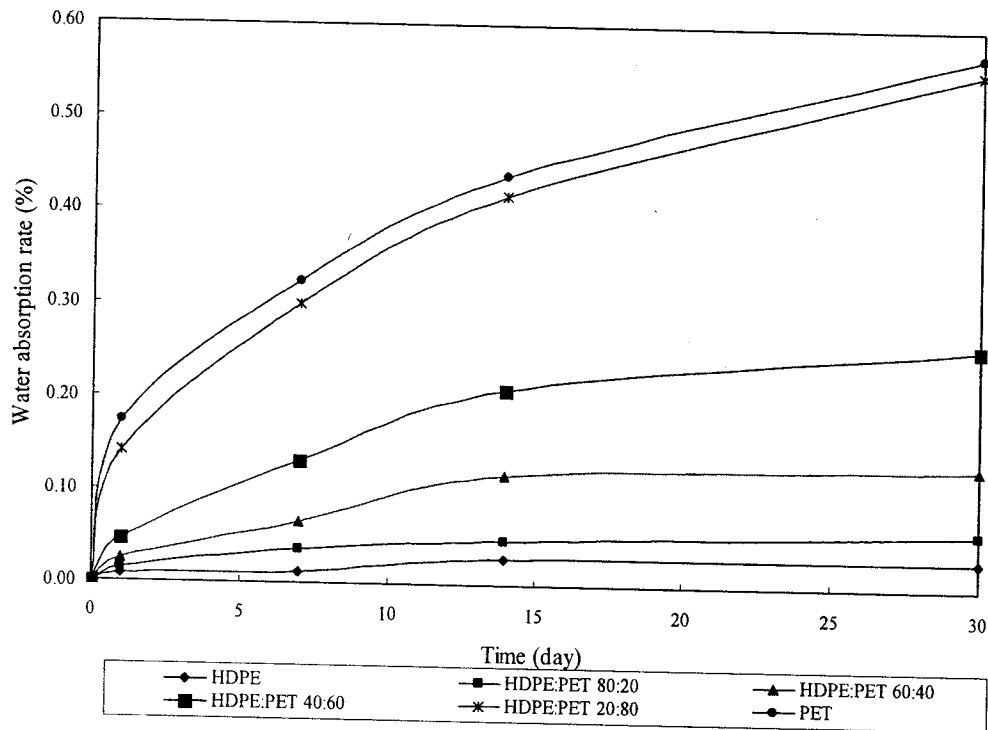
รูปที่ 4.4 DSC thermograms ของ HDPE, PET และ HDPE/PET blends

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิหลอม (T_m) และเปอร์เซ็นต์ผลึก (% X_c) ของ HDPE, PET และ HDPE/PET blends

วัสดุ	HDPE component		PET component	
	T_m (°C)	% X_c	T_m (°C)	% X_c
HDPE	132.35	70.94	-	-
PET	-	-	246.77	19.87
HDPE/PET 20/80	131.10	13.80	247.99	15.78
HDPE/PET 40/60	131.70	23.04	248.60	6.99
HDPE/PET 60/40	131.99	26.62	247.99	6.08
HDPE/PET 80/20	132.47	54.63	248.57	3.71

4.1.6 การดูดซึมน้ำ

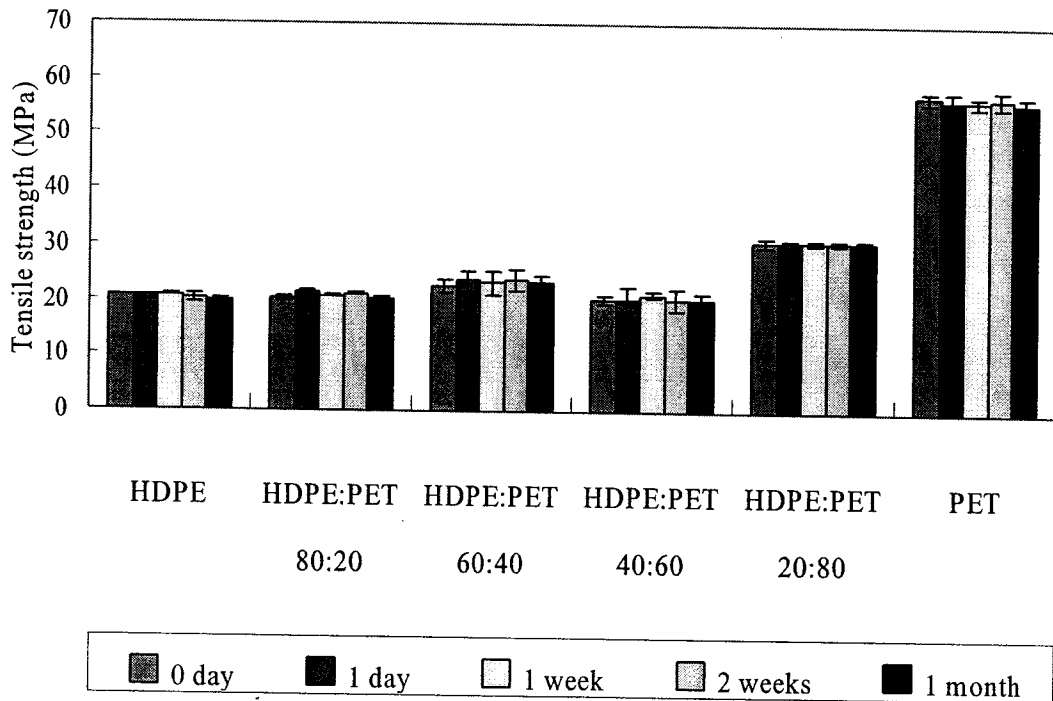
อัตราการดูดซึมน้ำของ HDPE, PET และ HDPE/PET blends ที่เวลาต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าอัตราการดูดซึมน้ำของวัสดุเพิ่มขึ้นตามเวลา โดยที่ PET มีอัตราการดูดซึมน้ำที่สูงที่สุด เนื่องจากมีหมู่ที่ชอบน้ำ คือ หมู่เอสเทอร์ (ester groups) ในโครงสร้าง ส่วนอัตราการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมขึ้นกับอัตราส่วนในการผสม โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณ PET ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.5 อัตราการดูดซึมน้ำของ HDPE, PET และ HDPE/PET blends ที่เวลาต่างๆ

ตารางที่ 4.5 Tensile properties ของ HDPE, PET และ HDPE/PET blends ที่ผ่านการแช่น้ำที่เวลาต่างๆ

วัสดุ	Tensile strength (MPa)	Tensile strain at break (%)	Young's modulus (MPa)
HDPE	20.62±0.12	NB	731.60±29.07
HDPE 1 day	20.60±0.15	NB	776.24±20.83
HDPE 1 week	20.70±0.16	NB	790.68±42.45
HDPE 2 weeks	20.32±0.82	NB	748.24±45.93
HDPE 1 month	20.01±0.24	NB	732.22±35.12
PET	56.98±1.15	4.42±0.26	1663.53±26.64
PET 1 day	56.40±1.40	5.45±0.53	1500.17±17.64
PET 1 week	56.23±0.95	5.24±0.26	1414.36±48.73
PET 2 weeks	56.71±1.55	5.08±0.17	1473.69±57.48
PET 1 month	56.10±1.24	5.00±0.25	1402.45±48.32
HDPE/PET 20/80	30.85±0.73	3.46±0.16	1320.73±53.03
HDPE/PET 20/80 1 day	30.86±0.24	3.54±0.12	1283.67±39.47
HDPE/PET 20/80 1 week	30.74±0.44	3.36±0.08	1306.05±15.81
HDPE/PET 20/80 2 weeks	30.68±0.53	3.43±0.21	1305.19±44.87
HDPE/PET 20/80 1 month	30.69±0.39	3.13±0.25	1256.65±35.20
HDPE/PET 40/60	20.19±0.72	2.44±0.15	1146.72±18.17
HDPE/PET 40/60 1 day	20.40±2.04	2.31±0.28	1188.06±25.74
HDPE/PET 40/60 1 week	21.16±0.71	2.43±0.10	1187.61±20.67
HDPE/PET 40/60 2 weeks	20.20±1.85	2.34±0.24	1215.92±22.50
HDPE/PET 40/60 1 month	20.09±1.22	2.40±0.25	1195.48±34.65
HDPE/PET 60/40	22.66±1.22	4.04±0.24	1007.86±23.98
HDPE/PET 60/40 1 day	23.60±1.63	3.91±0.42	1061.16±17.51
HDPE/PET 60/40 1 week	23.23±2.23	3.77±0.37	1048.45±23.39
HDPE/PET 60/40 2 weeks	23.66±1.90	4.16±0.38	1070.45±63.66
HDPE/PET 60/40 1 month	23.28±1.05	4.01±0.47	1058.24±54.62
HDPE/PET 80/20	20.37±0.35	10.87±0.25	872.24±37.25
HDPE/PET 80/20 1 day	21.37±0.35	9.54±3.09	906.68±40.67
HDPE/PET 80/20 1 week	20.68±0.18	10.84±1.81	916.12±23.91
HDPE/PET 80/20 2 weeks	21.08±0.26	7.88±1.85	981.79±27.37
HDPE/PET 80/20 1 month	20.22±0.27	8.22±0.89	952.12±35.48



รูปที่ 4.6 Tensile strength ของ HDPE, PET และ HDPE/PET blends ที่ผ่านการแช่น้ำที่เวลาต่างๆ

จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 พบว่าค่า tensile strength, tensile strain at break และ Young's modulus ของ HDPE, PET และ HDPE/PET blends ที่ผ่านการแช่น้ำที่เวลาต่างๆ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

4.2 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง HDPE และ PET ที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยสารช่วยให้เข้ากัน

ระบบการผสมประกอบด้วย HDPE, PET และ PE-g-MA ซึ่งเป็นสารช่วยให้เข้ากัน ใช้ในการปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสม โดยใช้สารช่วยให้เข้ากันที่ปริมาณต่างๆ คือ 2, 4, 6, 8 phr ในการศึกษาเลือกอัตราส่วนในการผสมของ HDPE และ PET ที่ 20 ต่อ 80 โดยน้ำหนัก เนื่องจากให้สมบัติทางกลที่ดี เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ

4.2.1 สมบัติทางกายภาพ

สมบัติทางกายภาพที่ศึกษาประกอบด้วยความหนาแน่นและค่าอุณหภูมิบิดเบี้ยว (HDT) ซึ่งความหนาแน่นของ HDPE/PET blends แสดงดังตารางที่ 4.6 ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสมที่มีและไม่มีการเติมสารช่วยให้เข้ากัน

ตารางที่ 4.6 ความหนาแน่นของ HDPE/PET blends ที่ปริมาณสารช่วยให้เข้ากันต่างๆ

วัสดุ	ความหนาแน่น (g/cm ³)
HDPE/PET/ 20/80	1.19±0.02
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/2	1.25±0.01
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/4	1.25±0.01
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/6	1.24±0.01
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/8	1.24±0.01

HDT ของ HDPE/PET blends และ HDPE/PET/PE-g-MA blends แสดงดังตารางที่ 4.7 พบว่า HDT ของพอลิเมอร์ผสมที่มีการใส่สารช่วยให้เข้ากันมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับ HDT ของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ใส่สารช่วยให้เข้ากัน แต่จากการศึกษาของ Akkapeddi และคณะ ในระบบ PET/HDPE (1.8/1) blend พบว่า E-GMA ที่ 10% มีผลต่อการปรับปรุงค่า vicat softening temperature ของพอลิเมอร์ผสม ที่ปริมาณ E-GMA ที่สูงขึ้น (15%) ความหนืดของเฟส PET ซึ่งมีโคพอลิเมอร์ของ PET/E-GMA อยู่ มีค่ามากกว่าความหนืดของเฟส HDPE ส่งผลต่อการเกิดการกลับของเฟส (phase inversion) ทำให้ค่าของ vicat softening temperature ลดต่ำลง [Akkapeddi, VanBuskirk, and Swamikannu, 1992] แนวโน้มโดยทั่วไปของค่า HDT ของพอลิเมอร์ผสมที่มีการใส่สารช่วยให้เข้ากันมากกว่าจะมีค่า HDT ที่สูงกว่า เนื่องจากพอลิเมอร์มีความเข้ากันได้มากขึ้น ขนาดของเฟสกระจายมีขนาดเล็กลง [Liu et al., 1996]

ตารางที่ 4.7 HDT ของ HDPE/PET blends ที่ปริมาณสารช่วยให้เข้ากันต่างๆ

วัสดุ	HDT (°C)
HDPE/PET 20/80	69.0±0.3
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/2	70.5±0.3
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/4	71.3±0.4
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/6	71.4±0.3
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/8	71.5±0.0

4.2.2 สมบัติทางกล

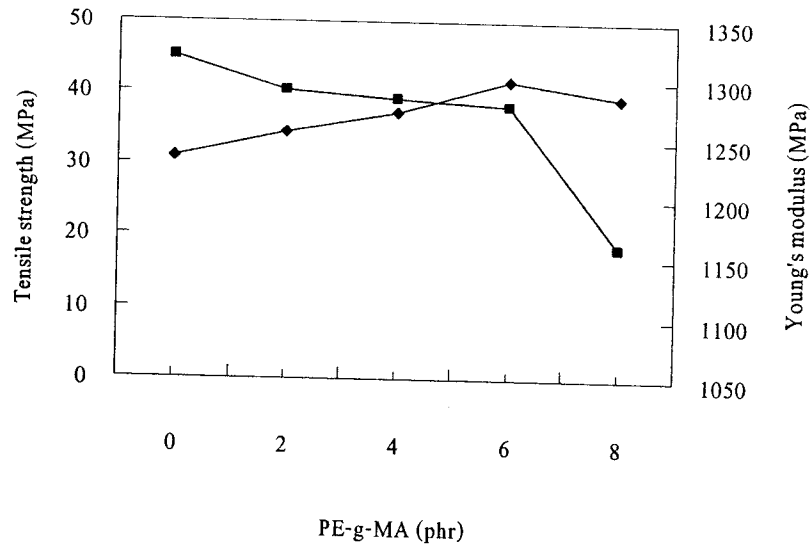
สมบัติทางกลของ HDPE, PET และ HDPE/PET blends ซึ่งประกอบด้วย tensile properties, flexural properties, compressive properties และ Izod impact strength แสดงในตารางที่ 4.8

จากตารางที่ 4.8 รูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่า tensile strength และ tensile strain at break มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมีการใส่สารช่วยให้เข้ากันในพอลิเมอร์ผสม แต่เมื่อปริมาณสารช่วยให้เข้ากันมากกว่า 6 phr พบว่าสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Pracella และคณะ [Pracella et al., 2002] ซึ่งพบว่าขนาดของเฟสกระจายมีการลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารช่วยให้เข้ากันจนถึงค่าสมดุล (equilibrium value) ซึ่งค่าความเข้มข้นสมดุลนี้สัมพันธ์กับปริมาณ โคพอลิเมอร์ที่อยู่ทีอินเทอร์เฟซ (interface) ซึ่งในสภาวะนี้การลดลงของขนาดของเฟสกระจายเนื่องมาจากการไม่เกิดการรวมตัวของเฟสกระจาย (coalescence) การลดลงของขนาดเฟสกระจายเมื่อมีสารช่วยให้เข้ากันสัมพันธ์กับการลดลงของความตึงระหว่างผิว (interfacial tension) และการไม่เกิดการรวมตัวของเฟสกระจาย ซึ่งขึ้นกับปริมาณของสารช่วยให้เข้ากัน [Lepers et al., 1997] ในทางตรงกันข้าม Young's modulus เมื่อมีค่าลดลงมีการใส่สารช่วยให้เข้ากัน อาจเนื่องมาจาก toughening effect ซึ่งจากการศึกษาของ Kunori และ Geil [Kunori and Geil, 1980] ซึ่งให้เห็นว่า tensile failure ของพอลิเมอร์ผสมมีผลมาจากการยึดติดระหว่างเฟสกระจายและเมทริกซ์ผ่านการเกิด crazing หรือผลของ dewetting ซึ่งการที่พอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการใส่สารช่วยให้เข้ากันมี tensile strength ที่ต่ำกว่าของพอลิเมอร์ผสมที่มีสารช่วยให้เข้ากัน เนื่องมาจากการยึดติดที่ไม่ดีระหว่างอินเทอร์เฟซของพอลิเมอร์ เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนของพอลิเมอร์พบว่าระบบ HDPE/PET 20/80 ให้ค่า tensile strength สูงที่สุด ส่วนระบบ HDPE/PET 80/20 ให้ค่า tensile strain at break สูงสุด เมื่อพิจารณาค่า impact strength ของพอลิเมอร์ผสม พบว่า impact strength มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใส่สารช่วยให้เข้ากันเพิ่มขึ้น จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สารช่วยให้เข้ากันทำให้ส่งผลต่อ toughening effect ทำให้ค่า impact resistance ของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น

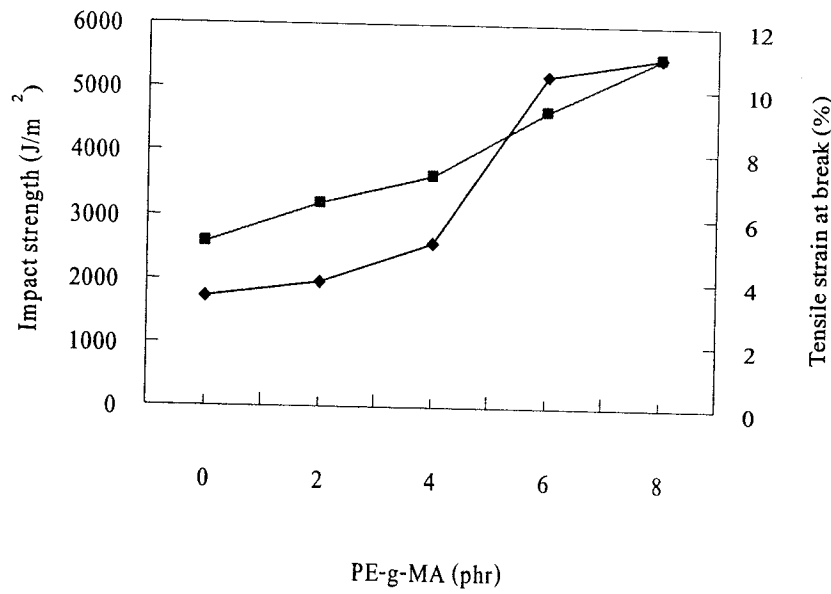
นอกจากนี้พบว่า เมื่อมีการใส่สารช่วยให้เข้ากัน ค่า flexural strength ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ถ้าใส่สารช่วยให้เข้ากัน 8 phr ค่า flexural strength มีค่าลดลง ซึ่งผลที่ได้มีแนวโน้มเหมือนกับ tensile strength ส่วน flexural modulus ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง ตามปริมาณของสารช่วยให้เข้ากัน ดังแสดงในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 ค่า compressive strength และ modulus ของพอลิเมอร์ผสมแสดงในตารางที่ 4.8 และ รูปที่ 4.10 พบว่าเมื่อมีการใส่สารช่วยให้เข้ากันเพิ่มขึ้น ค่า compressive modulus มีการเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ ส่วนค่า compressive strength มีค่าสูงสุดที่ปริมาณสารช่วยให้เข้ากันที่ 6 phr จากผลของสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสม พบว่าค่าปริมาณที่เหมาะสม (optimum content) ของสารช่วยให้เข้ากันสำหรับ HDPE/PET (20/80) blend คือ 6 phr

ตารางที่ 4.8 Tensile, flexural, compressive properties และ impact strength ของ HDPE/PET blends ที่ปริมาณสารช่วยให้เชื่อมกันต่างๆ

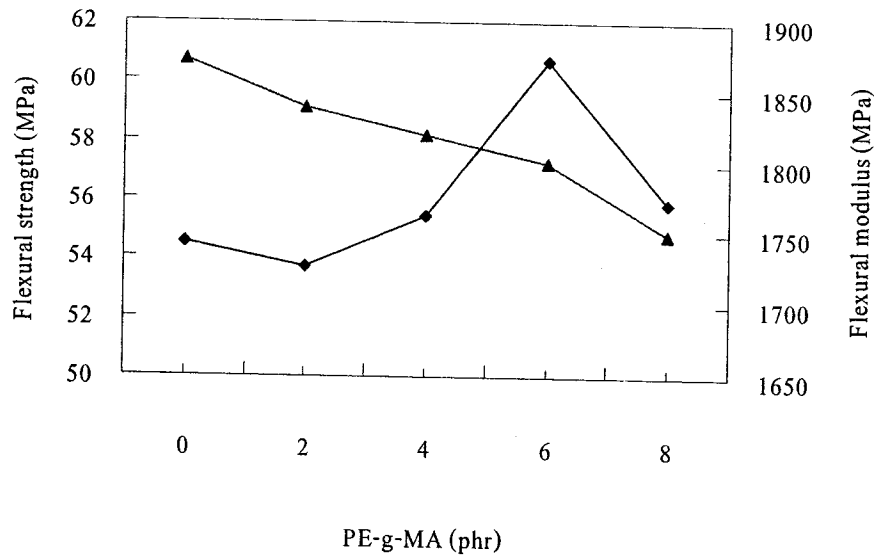
วัสดุ	Tensile			Flexural		Compressive		Impact strength (J/m ²)
	strength (MPa)	modulus (MPa)	strain at break (%)	strength (MPa)	modulus (MPa)	strength (MPa)	modulus (MPa)	
HDPE/PET 20/80	30.85±0.73	1320.73±53.03	3.46±0.16	54.49±0.47	1872.54±44.90	59.52±5.27	1500.76±106.00	2578.41±77.12
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/2	34.41±0.53	1291.91±12.25	3.94±0.08	53.72±0.74	1839.69±46.03	81.37±3.59	1492.26±149.81	3176.87±84.45
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/4	37.24±0.62	1285.37±35.11	5.17±0.31	55.45±1.68	1820.29±24.22	78.53±7.02	1489.11±98.45	3635.25±92.76
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/6	41.80±0.41	1279.35±39.61	10.40±0.77	60.73±0.78	1800.20±13.08	103.88±12.50	1494.56±79.95	4641.24±74.86
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/8	39.36±0.29	1159.92±79.43	10.98±0.83	55.87±1.48	1750.59±36.93	102.88±6.75	1499.69±88.83	5503.45±93.02



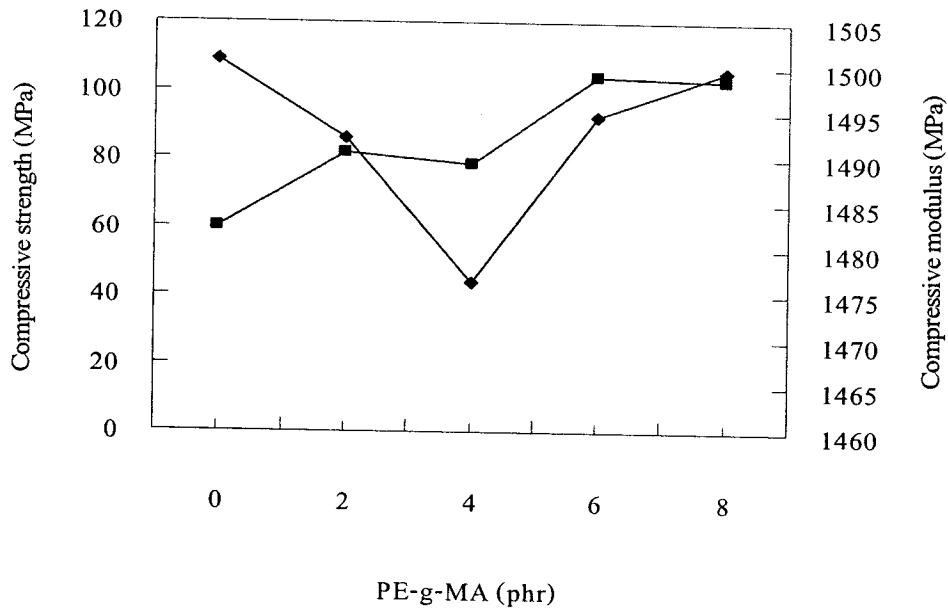
รูปที่ 4.7 Tensile strength (◆) และ Young's modulus (■) ของ HDPE/PET blends ที่ปริมาณสารช่วยให้เข้ากันต่างๆ



รูปที่ 4.8 Izod impact strength (■) และ tensile strain at break (◆) ของ HDPE/PET blends ที่ปริมาณสารช่วยให้เข้ากันต่างๆ



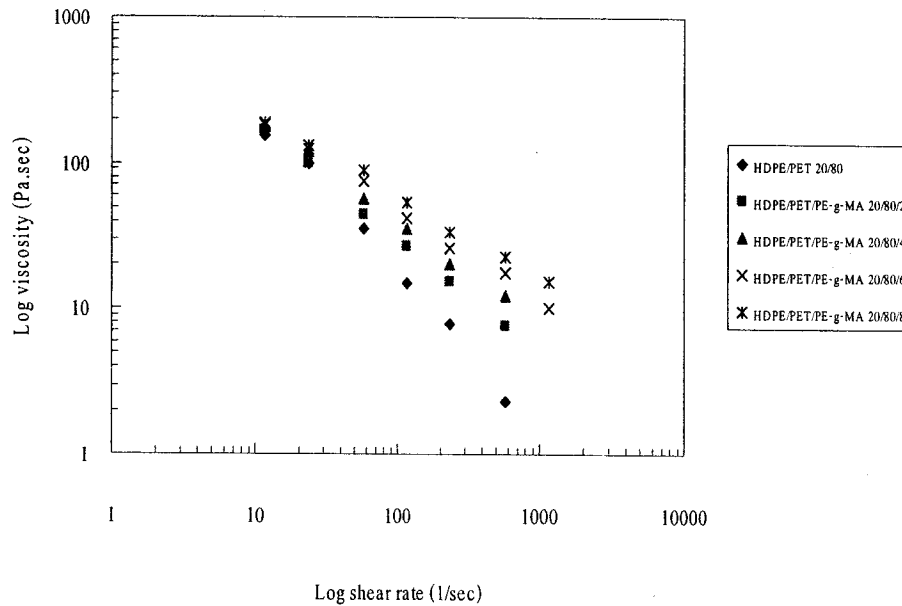
รูปที่ 4.9 Flexural strength (◆) และ flexural modulus (▲) ของ HDPE/PET blends ที่ปริมาณสารช่วยให้เข้ากันต่างๆ



รูปที่ 4.10 Compressive strength (■) และ compressive modulus (◆) ของ HDPE/PET blends ที่ปริมาณสารช่วยให้เข้ากันต่างๆ

4.2.3 สมบัติทางกระแสวิทยา

ความหนืดที่อัตราเฉือนต่างๆ ของ HDPE/PET blends แสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่าความหนืดของพอลิเมอร์ผสมที่มีการใส่สารช่วยให้เข้ากันมีค่าสูงกว่าของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการใส่สารช่วยให้เข้ากัน การเพิ่มขึ้นของความหนืด เนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารช่วยให้เข้ากันและพอลิเมอร์ระหว่างการผสม [Pracella, Rolla, Chionma, and Galeski, 2002 , Dagli and Kamdar, 1994]

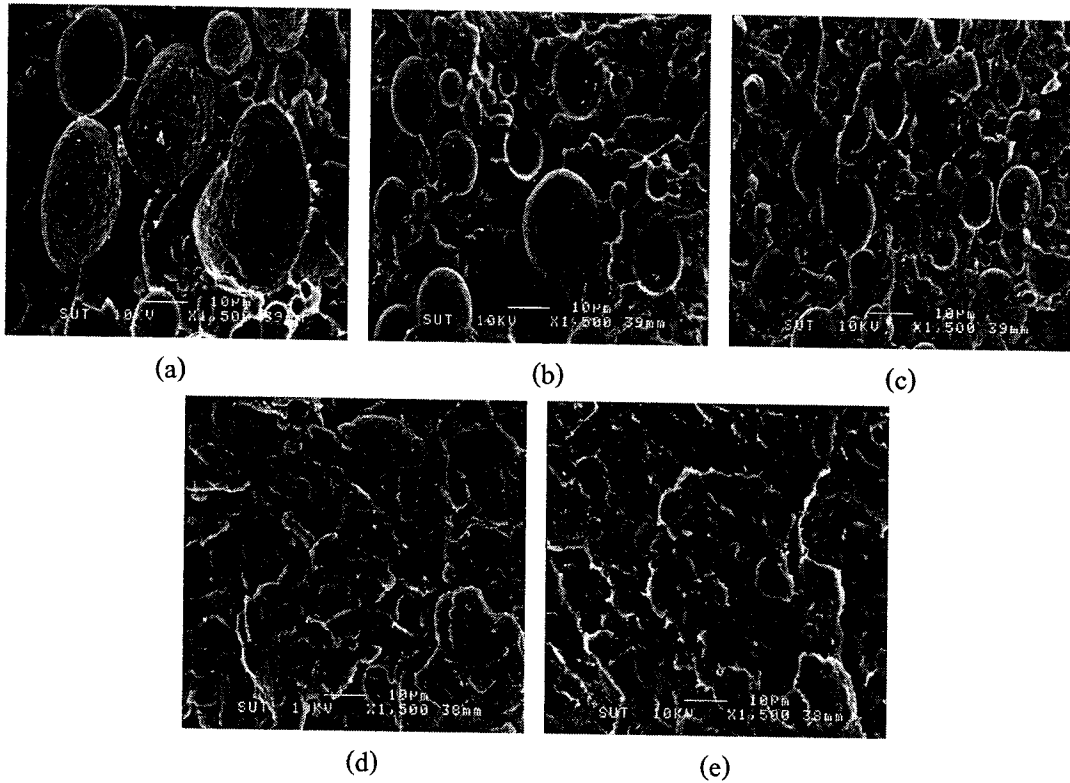


รูปที่ 4.11 ความหนืดที่อัตราเฉือนต่างๆ ของ HDPE/PET blends ที่ปริมาณสารช่วยให้เข้ากันต่างๆ ที่อุณหภูมิ 270°C

4.2.4 สมบัติทางสัณฐานวิทยา

รูปที่ 4.12 แสดง SEM micrographs ของ HDPE/PET blends ที่มีและไม่มีสารช่วยให้เข้ากัน พบว่าขนาดของเฟสกระจายมีขนาดลดลง เมื่อมีการใส่สารช่วยให้เข้ากันมากขึ้น สารช่วยให้เข้ากันมีส่วนในการเพิ่มการยึดติดระหว่างพื้นผิว (interfacial adhesion) และลดแรงตึงระหว่างผิว (interfacial tension) ของพอลิเมอร์ ทำให้เฟสกระจายมีขนาดเล็กลง

จากผลการทดลอง พบว่าสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมที่มีการใส่สารช่วยให้เข้ากันมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ใส่สารช่วยให้เข้ากัน เนื่องจากการมีการปรับปรุงการยึดติดที่อินเทอร์เฟซ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางสัณฐานวิทยา คือขนาดของเฟสกระจายมีขนาดเล็กลงเมื่อมีการใส่สารช่วยให้เข้ากัน



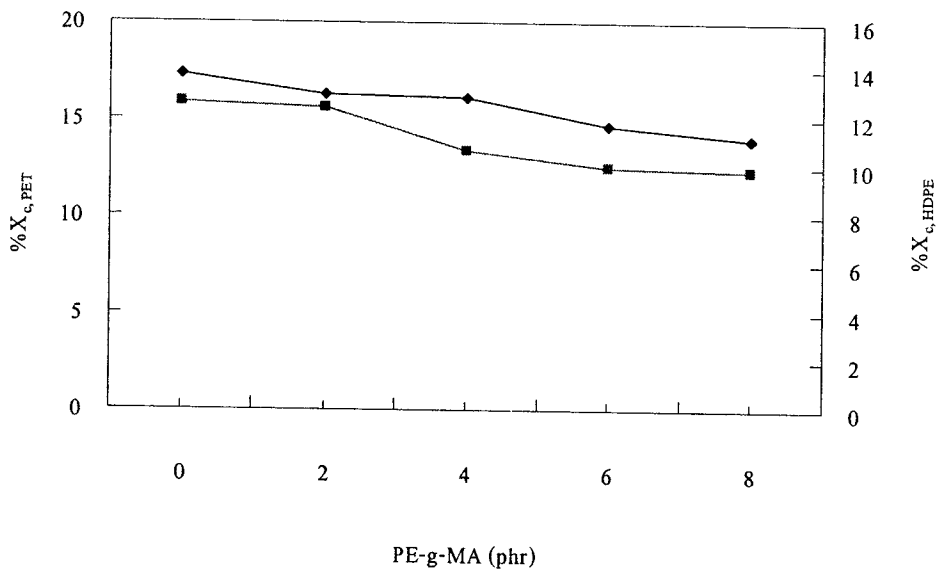
รูปที่ 4.12 SEM micrographs (a) HDPE/PET 20/80 (b) HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/2 (c) HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/4 (d) HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/6 (e) HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/8 (x1500)

4.2.5 สมบัติทางความร้อน

อุณหภูมิหลอม (T_m) และเปอร์เซ็นต์ผลึก ($\%X_c$) ของ HDPE/PET blends ที่มีและไม่มี การใส่สารช่วยให้เข้ากัน แสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 อุณหภูมิหลอม (T_m) และเปอร์เซ็นต์ผลึก ($\%X_c$) ของ HDPE/PET blends ที่ปริมาณสาร ช่วยให้อเข้ากันต่างๆ

วัสดุ	HDPE component		PET component	
	T_m (°C)	$\%X_c$	T_m (°C)	$\%X_c$
HDPE	132.35	70.94	-	-
PET	-	-	246.77	19.87
HDPE/PET 20/80	131.10	13.80	247.99	15.78
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/2	131.02	12.97	247.48	15.57
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/4	130.78	12.87	247.30	13.36
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/6	130.39	11.71	247.05	12.52
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/8	130.46	11.17	247.50	12.32



รูปที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์ผลึก (%X_c) ของส่วน HDPE (◆) และ PET (■) ใน HDPE/PET blends ที่ ปริมาณสารช่วยให้เข้ากันต่างๆ

จากตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.13 พบว่าสารช่วยให้เข้ากันมีผลต่อพฤติกรรมกาเกิดผลึกและการหลอมของพอลิเมอร์ผสม อุณหภูมิหลอมของส่วน HDPE และ PET ในพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมสารช่วยให้เข้ากันมีค่าไม่แตกต่างจากอุณหภูมิหลอมของ HDPE และ PET ในพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมสารช่วยให้เข้ากัน และเปอร์เซ็นต์ผลึกของส่วน HDPE และ PET ในพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมสารช่วยให้เข้ากันมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ HDPE และ PET ในพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมสารช่วยให้เข้ากัน ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลของ Pracella และคณะ [Pracella et al, 2002] จากผลที่ได้พบว่า PE-g-MA มีผลต่อการเกิดผลึกของทั้งสองส่วนประกอบของพอลิเมอร์ผสม

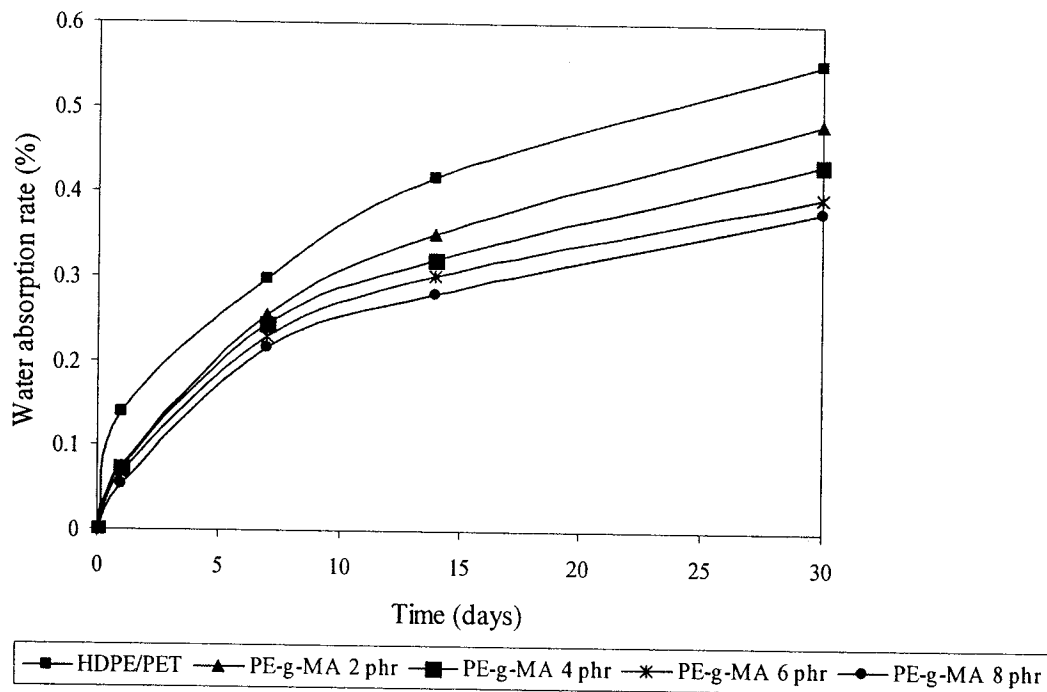
ผลการทดลองที่ได้อธิบายได้จากการพิจารณาผลของการเข้ากันได้ของ PE-g-MA กับเฟสของ HDPE และอันตรกิริยาทางเคมีระหว่างหมู่ฟังก์ชันของ PE-g-MA กับ PET ที่บริเวณอินเทอร์เฟซ ในความเป็นจริงคาดกันว่าส่วนที่สามารถเป็นผลึกของ PE-g-MA จะเข้ากันได้กับเฟสกระจายของ HDPE และมีผลในการลดลงของเปอร์เซ็นต์ผลึก ในทางตรงกันข้ามการเกิดผลึกของ PET ที่บริเวณใกล้อินเทอร์เฟซ จะมีอิทธิพลมาจากการ reactivity และปริมาณของ PE-g-MA ผลของสารช่วยให้เข้ากันต่อการเกิดผลึกจะส่งผลมากยิ่งขึ้น เมื่อมีการลดลงของขนาดของเฟสกระจายหรือการเพิ่มพื้นที่ระหว่างเฟส [Pracella et al, 2002]

จากการศึกษาของ Pang และคณะ ในระบบของ PP/PET/maleic anhydride grafted polypropylene (75/20/5) พบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า melting enthalpy (ΔH_m) ของส่วนพอลิโพรพิลีน (PP component) สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของลักษณะสัญญาณวิทยาในพอลิเมอร์ผสม การมี

เฟสกระจายที่มีขนาดเล็กจะมีค่า ΔH_m ที่ต่ำ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของอินเทอร์เฟซในพอลิเมอร์ผสม [Pang, Jia, Hu, Hourston, and Song, 2000] นอกจากนี้ จากการศึกษาแรงดึงผิวของวัสดุพอลิเมอร์โดย Wu พบว่าการลดลงของการเกิดผลึกของส่วนประกอบในพอลิเมอร์ผสมอาจมาจากการลดลงของแรงดึงระหว่างผิวบริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างเฟส [Wu, 1978]

4.2.6 การดูดซึมน้ำ

อัตราการดูดซึมน้ำของ HDPE/PET blends ที่เวลาต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าอัตราการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นตามเวลา โดยที่สารช่วยให้เข้ากันมีผลต่อการลดลงของอัตราการดูดซึมน้ำ Bae และคณะ [Bae et al., 2001] พบว่าการต้านทานการดูดซึมน้ำ (water resistance) ของ PET/PP-g-HI (PP grafted with 2-hydroxyethyl methacrylate-isophorone diisocyanate) blend ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ PP/PET blend เนื่องมาจากการมีเฟสกระจายที่มีขนาดเล็กส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวทั้งหมดของเฟสกระจาย นอกจากนี้การปรับปรุงการยึดติดที่อินเทอร์เฟซ (interfacial adhesion) ส่งผลต่อการลดการแทรกซึม (penetration) ของโมเลกุลของน้ำในพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ [Arbelaiz et al., 2005]

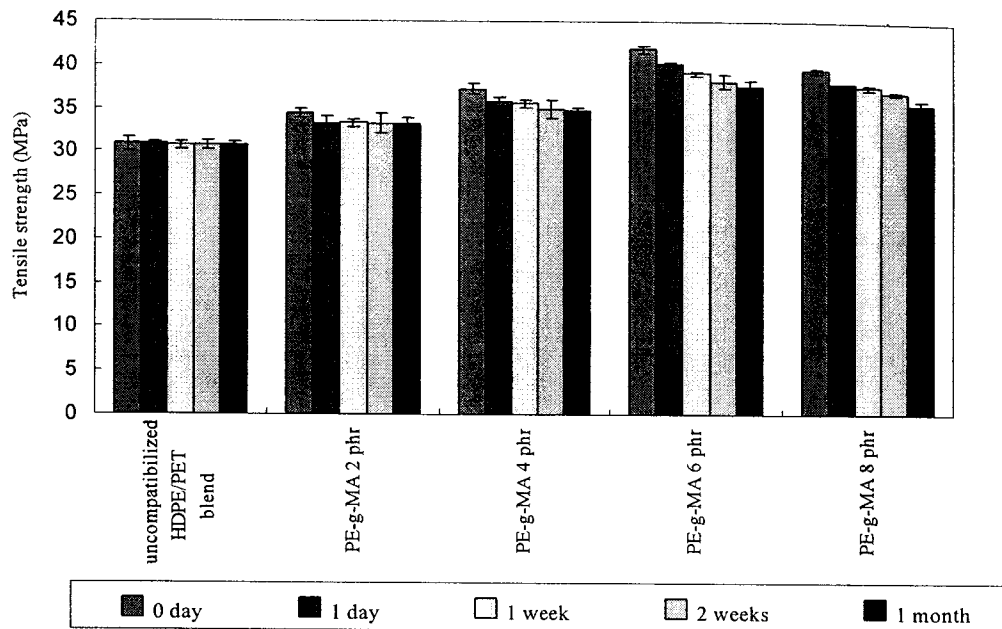


รูปที่ 4.14 อัตราการดูดซึมน้ำของ HDPE, PET และ HDPE/PET/PE-g-MA blends ที่เวลาต่างๆ

จากตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.15 พบว่าค่า tensile strength, tensile strain at break และ Young's modulus ของ HDPE/PET blend และ HDPE/PET/PE-g-MA blends ที่ผ่านการแช่น้ำในเวลาต่างๆ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.10 Tensile properties ของ HDPE/PET blends, HDPE/PET/PE-g-MA blends ที่ผ่านการแช่น้ำที่เวลาต่างๆ

วัสดุ	Tensile strength (MPa)	Tensile strain at break (%)	Young's modulus (MPa)
HDPE/PET 20/80	30.85±0.73	3.46±0.16	1320.73±53.03
HDPE/PET 20/80 1 day	30.86±0.24	3.54±0.12	1283.67±39.47
HDPE/PET 20/80 1 week	30.74±0.44	3.36±0.08	1306.05±15.81
HDPE/PET 20/80 2 weeks	30.68±0.53	3.43±0.21	1305.19±44.87
HDPE/PET 20/80 1 month	30.69±0.39	3.13±0.25	1256.65±35.21
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/2	34.41±0.53	3.94±0.08	1291.91±57.33
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/2 1 day	33.18±0.82	3.69±0.15	1233.42±12.25
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/2 1 week	33.30±0.49	3.93±0.15	1280.31±22.57
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/2 2 weeks	33.26±1.50	3.59±0.14	1269.99±38.48
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/2 1 month	33.25±0.64	3.65±0.18	1203.90±15.27
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/4	37.24±0.62	5.17±0.31	1205.37±20.25
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/4 1 day	35.56±0.55	4.66±0.19	1206.06±37.68
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/4 1 week	34.82±0.43	4.81±0.31	1178.34±51.56
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/4 2 weeks	34.94±1.03	4.72±0.23	1187.52±30.86
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/4 1 month	34.82±0.25	4.86±0.25	1131.91±12.46
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/6	41.80±0.41	10.40±0.77	1273.35±39.61
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/6 1 day	40.20±0.12	15.79±0.26	1216.30±21.00
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/6 1 week	39.02±0.25	17.41±0.85	1302.62±30.15
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/6 2 weeks	38.10±0.74	24.10±0.63	1277.24±26.77
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/6 1 month	37.59±0.59	22.34±0.89	1203.04±29.45
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/8	39.36±0.29	10.98±0.83	1159.92±79.43
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/6 1 day	37.87±0.07	21.40±0.37	1156.58±19.85
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/8 1 week	37.46±0.25	21.99±0.85	1195.68±73.39
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/8 2 weeks	36.78±0.18	21.78±0.36	1194.81±35.24
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/8 1 month	35.45±0.64	21.74±0.47	1137.93±48.25



รูปที่ 4.15 Tensile strength ของ HDPE/PET blends และ HDPE/PET/PE-g-MA blends ที่ผ่านการแช่น้ำที่เวลาต่าง ๆ

4.3 พอลิเมอร์ผสมที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว

ตารางที่ 4.11 แสดงสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์ผสมที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิดสั้น การเติมเส้นใยแก้วชนิดสั้น เป็นวิธีที่ใช้กันมากในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ ในการศึกษาที่มีการเติมเส้นใยแก้วชนิดสั้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเข้าไปในพอลิเมอร์ผสม พบว่าการเติมเส้นใยแก้วส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของ tensile, flexural, compressive properties และ impact strength การใส่สารช่วยให้เข้ากันส่งผลต่อการปรับปรุง tensile, compressive, impact strength ของพอลิเมอร์คอมโพสิต เนื่องมาจากการมีอันตรกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นระหว่างหมู่แอนไฮดรายด์ของสารช่วยให้เข้ากันกับหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยแก้ว ส่งผลต่อการมีการยึดติดระหว่างเฟสที่ดี การถ่ายโอนแรงที่กระทำผ่านเมทริกซ์ไปยังเส้นใยขึ้นกับการยึดติดระหว่างเมทริกซ์และเส้นใย การมีการยึดติดที่ดีทำให้เส้นใยถูกหุ้มด้วยเมทริกซ์ ซึ่งส่งผลต่อการถ่ายโอนและกระจายแรงที่กระทำระหว่างเส้นใย [Tselios, et al., 1999]

ตารางที่ 4.11 Tensile, flexural, compressive properties และ impact strength ของ HDPE/PET blends และ HDPE/PET/SGF composites

วัสดุ	Tensile			Flexural		Compressive		Impact strength (J/m^2)
	strength (MPa)	modulus (MPa)	strain at break (%)	strength (MPa)	modulus (MPa)	strength (MPa)	modulus (MPa)	
HDPE/PET 20/80	30.85±0.73	1320.73±53.03	3.46±0.16	54.49±0.47	1872.54±44.90	59.52±5.27	1500.76±106.00	2578.41±77.12
HDPE/PET/PE-g-MA 20/80/6	41.80±0.41	1279.35±39.61	10.40±0.77	60.73±0.78	1800.20±13.08	103.88±12.50	1494.56±79.95	4641.24±74.86
HDPE/PET/SGF 20/80/10	39.19±1.96	1666.85±54.87	3.64±0.27	68.06±0.97	2887.53±78.56	75.23±9.87	1755.98±87.45	4527.21±72.51
HDPE/PET/PE-g-MA/SGF 20/80/6/10	42.11±0.61	1748.52±55.96	5.97±0.25	59.57±1.97	2652.19±31.19	94.21±12.19	1977.24±113.31	5173.54±82.11

4.4. การเปรียบเทียบความหนาแน่นและสมบัติทางกลของไม้สัก พอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมโพสิท

สมบัติของไม้สัก (*Tectona grandis*) ซึ่งจัดเป็นเนื้ออ่อน HDPE/PET blends และ HDPE/PET/SGF composite แสดงในตารางที่ 4.12 พบว่าสมบัติทางกลของ HDPE/PET blend ที่ได้มีค่าต่ำกว่าของไม้สัก การเติมเส้นใยแก้วชนิดสั้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเข้าไปในพอลิเมอร์ผสม ช่วยปรับปรุงค่า tensile modulus, flexural modulus, compressive modulus แต่ค่าที่ได้ต่ำกว่าของไม้เนื้ออ่อน

ในการประยุกต์ใช้งาน plastic lumber ที่ยังไม่ประสบความสำเร็จส่วนมาก เนื่องมาจากการขาดความเข้าใจในความแตกต่างของสมบัติทางกลระหว่างไม้และ plastic lumber ถึงแม้ว่ามีการผลิต plastic lumber ให้มีขนาดทั่วไปเช่นเดียวกับไม้ แต่ก็ไม่เหมาะสมที่จะนำ plastic lumber มาใช้โดยตรงแทนไม้ที่มีขนาดใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะการใช้งานที่ต้องมีการรับแรง (load bearing applications)

การปรับเปลี่ยนสมบัติทางกลของ plastic lumber สามารถทำได้โดยการเติมอนุภาคหรือเส้นใยเข้าไป เช่น การเติมเส้นใยแก้วขนาดสั้นจะเพิ่มค่า elastic modulus อย่างมีนัยสำคัญให้แก่ plastic lumber แต่ค่าที่ได้ยังไม่อยู่ในระดับเดียวกับไม้ แต่การเติมเส้นใยเข้าไปใน plastic lumber ก่อให้เกิดปัญหาในการใช้งานในบางกรณี เช่น การระคายเคืองอันเนื่องมาจากการสัมผัส [Lampo and Nosker, 1997]

จากการที่สมบัติทางกลที่ด้อยกว่าไม้ของ plastic lumber ดังนั้นจึงควรมีการออกแบบลักษณะของ plastic lumber ให้เหมาะสม เช่น การออกแบบให้มีภาคตัดขวางที่ใหญ่ขึ้น เพื่อทดแทนปัญหาการเกิดการโก่งของพลาสติกและสมบัติด้านการคืบ

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบความหนาแน่นและสมบัติทางกลของไม้สัก HDPE/PET blends และ HDPE/PET/SGF composites

วัสดุ	ความหนาแน่น (g/cm ³)	Tensile		Flexural		Compressive		Impact strength (J/m ²)
		strength (MPa)	modulus (MPa)	strength (MPa)	modulus (MPa)	strength (MPa)	modulus (MPa)	
ไม้สัก (Tectona grandis) ^(*)	0.62	-	-	62.88	8002.31	32.07	9231.21	-
HDPE/PET (20/80)	1.19±0.02	30.85±0.73	1320.73±53.03	54.49±0.47	1872.54±44.90	59.52±5.27	1500.76±106.00	2578.41±77.12
HDPE/PET/PE-g-MA (20/80/6)	1.24±0.01	41.80±0.41	1279.35±39.61	60.73±0.78	1800.20±13.08	103.88±12.50	1494.56±79.95	4641.24±74.86
HDPE/PET/SGF (20/80/10)	1.17±0.10	39.19±1.96	1666.85±54.84	68.06±0.97	2887.53±78.56	75.23±9.87	1755.98±87.45	4527.21±72.51
HDPE/PET/PE-g-MA/SGF (20/80/6/10)	1.16±0.03	42.11±0.61	1748.52±55.96	59.57±0.25	2652.19±31.19	94.21±12.19	1977.24±113.31	5173.54±82.11

* คณะกรรมการสภาวิชาชีพวิศวกรรมโยธา (2538)

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมขึ้นกับอัตราส่วนของพอลิเมอร์ในพอลิเมอร์ผสม โดยที่พอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน HDPE/PET 20 ต่อ 80 ให้ tensile strength, Young's modulus, flexural properties ที่สูงกว่าที่อัตราส่วนอื่นๆ ส่วนพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน HDPE/PET 80 ต่อ 20 ให้ tensile strain at break และ impact strength ที่สูงกว่าอัตราส่วนอื่นๆ

2. สารช่วยให้เข้ากันมีผลต่อการปรับปรุงสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสม และลดขนาดของเฟสกระจาย การเพิ่มของปริมาณสารช่วยให้เข้ากันในพอลิเมอร์ผสมส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของสมบัติทางกล เนื่องจากสารช่วยให้เข้ากันปรับปรุงการยึดติดที่อินเทอร์เฟซของพอลิเมอร์

3. ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ มีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ และสารช่วยให้เข้ากัน ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสม

4. HDT ของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ มีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แต่สารช่วยให้เข้ากันมีผลในการปรับปรุง HDT ของพอลิเมอร์ผสมเล็กน้อย

5. ความหนืดของพอลิเมอร์ผสมขึ้นกับอัตราส่วนของพอลิเมอร์ในพอลิเมอร์ผสม การใส่สารช่วยให้เข้ากัน ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความหนืด เนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารช่วยให้เข้ากันและพอลิเมอร์ระหว่างการผสม

6. อุณหภูมิหลอมและเปอร์เซ็นต์ผลึกของ HDPE และ PET ในพอลิเมอร์ผสมขึ้นกับส่วนประกอบในพอลิเมอร์ผสม และสารช่วยให้เข้ากัน ซึ่งสายโซ่ของ HDPE และ PET มีส่วนในการขัดขวางซึ่งกันและกันในการเกิดผลึก การลดลงของการเกิดผลึกของส่วนประกอบในพอลิเมอร์ผสมอาจมาจากบริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างเฟส มีการลดลงของแรงดึงระหว่างผิว

7. จากการเปรียบเทียบสมบัติทางกลระหว่างไม้เนื้ออ่อนที่พบในประเทศไทย เช่น ไม้สัก กับพอลิเมอร์ผสม พบว่าสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมมีค่าต่ำกว่าของไม้เนื้ออ่อน

8. การเติมเส้นใยแก้วชนิดสั้น 10 phr ลงในพอลิเมอร์ผสมช่วยในการปรับปรุงสมบัติด้าน tensile, flexural และ compressive modulus ของพอลิเมอร์ผสม แต่ค่าที่ได้ยังต่ำกว่าของไม้สัก

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การปรับปรุงสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสม เพื่อผลิตเป็น plastic lumber ให้ดีขึ้น อาจทำได้โดยการเพิ่มปริมาณเส้นใยแก้วชนิดสั้นที่เหมาะสมในพอลิเมอร์ผสม

2. การศึกษาชนิดของสารตัวเติมชนิดอื่นๆ ต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม

3. จากการที่สมบัติทางกลที่ด้อยกว่าไม้ของ plastic lumber ดังนั้นในการใช้งานจึงควรมีการออกแบบลักษณะของ plastic lumber ให้เหมาะสม เช่น การออกแบบให้มีภาคตัดขวางที่ใหญ่ขึ้น เพื่อทดแทนปัญหาการเกิดการ โกงของพลาสติก และสมบัติด้านคืบ

บรรณานุกรม

- เกียรติพงษ์ ศรีสว่าง. 2545. การศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของขยะมูลฝอยภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- คณะกรรมการ สาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. (2538). มาตรฐานสำหรับอาคารไม้. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย: กรุงเทพมหานคร.
- Albano, C., Gonzalez, J., Ichazo, M., Rosales, C., Urbina de Navarro, C., and Parra, C. (2000). Mechanical and morphological behavior of polyolefin blends in the presence of CaCO₃. Comp. Struct. 48. 49-58.
- Andreeva, M.B., Novotortzeva, T.N., Kalugina, E.V. and Tochir, V.A. (2000). Improvement of compatibility in glass-reinforced PA6/PP blends. Polym. Plast. Technol. Eng. 39(3). 513-528.
- Akkapeddi, M.K. and VanBuskirk, B. (1992). On the compatibilization of polyolefin blends. Polym. Mat. Sci. & Eng. 67. 317-318.
- Arbelaiz, A., Fernández, B., Ramos, J.A., Retegi, A., Llano-Ponte, R. and Mondragon, I. (2005). Mechanical properties of short flax fiber bundle/polypropylene composites: Influence of matrix/fiber modification, fiber content, water uptake and recycling. Comp. Sci. Tech. 62. 1582-1592.
- Bae, T-Y., Park, K-Y., Kim, D-H., and Suh, K-D. (2001). Poly(ethylene terephthalate)/polypropylene reactive blends through isocyanate functional group, J. Appl. Polym. Sci. 81. 1056-1062.
- Carte, T.L. and Moet, A. (1993). Morphological origin of super toughness in poly(ethylene terephthalate)/polyethylene blends. J. Appl. Polym. Sci. 48. 611-624.
- Chen, I. and Shiak, C. (1989). Plastics Engineering. 45. 33.
- Climenhage, D. (2003). Recycled Plastics Lumber: A Strategic Assessment of Its Production, Use and Future Prospects, Environmental and Plastics Industry Council, January.
- Curry, J. and Kiani, A. (1990). The 48th Society of Plastics Engineers: Annual Technical Conference; May 7-11, 1990; Dallas, Texas, USA, p. 1452-1456.
- Dagli, S.S. and Kamdar, K.M. (1994). Effect of component addition protocol on the reactive compatibilization of HDPE/PET blends. Polym. Eng & Sci. 34(23). 1709-1719.

- Dimitrova, T.L., La Mantia, F.P., Pilati, F., Toselli, M., Valenza, A. and Visco, A. (2000). On the compatibilization of PET/HDPE blends through a new class of copolymers. Polymer. 41. 4817-4825.
- Favis. B.D. (2000). Factors influencing the morphology of immiscible polymer blends in melt processing, D.R. Pual, D.R. and Bucknall. C.B., Eds., Polymer Blend: Performance. P.501. John Wiley&Sons: New York.
- Fung, K.L and Li, R.K.Y. (2006). Mechanical properties of short glass fiber reinforced and functionalized rubber-toughened PET blends. Polym. Test. 25. 923-931.
- Giraldi, A.L.F de M., Bartoli, J.R., Velasco, J.I. and Mei, L.H.I. (2005). Glass fiber recycled poly(ethylene terephthalate) composites: Mechanical and thermal properties. Polym. Test. 24. 507-512.
- Gnatowski, A. and Koszkuł, J. (2005). Investigations of the influence of compatibilizer and filler type on the properties of chosen polymer blends. J. Mat. Proc. Tech. 162-163. 52-58.
- Gonzalez, J, Albano, C., Ichazo, M. and Diaz, B. (2002). Effects of coupling agents on mechanical and morphological behavior of the PP/HDPE blend with two different CaCO₃. Eur. Polym. J. 38. 2465-2475.
- Guerrero, C., Lozano, T., Gonzalez, V. and Arroyo, E. (2001). Properties and morphology of poly(ethylene terephthalate) and high density polyethylene blends. J. Appl. Polym. Sci. 82. 1382-1390.
- Hausann, K. (1997). Recycling of incompatible plastics with reactive compatibilizers. Hoyle, W. and Karsa, D.R. Eds. Chemical Aspects of Plastics Recycling. P. 176. Bookcraft: Bath.
- Herbst. H and Flanagan. P (1997). Plastics recycling-added value by stabilization. Hoyle, W. and Karsa, D.R. Eds. Chemical Aspects of Plastics Recycling. P. 180. Bookcraft: Bath.
- Inoue, T. and Marechal, P. (1997). Reactive processing of polymer blends: Polymer-polymer interface aspects. Cahn, R.W., Haasen, P. and Kramer, E.J., Eds. Materials Science and Technology: A Comprehensive Treatment, V. 18 Processing of Polymers. P. 433. Wiley-VCH: Weinheim
- Jabarin, S.A. and Bhakkad, V.V. (1995). Morphology and properties of poly(ethylene terephthalate)-high density polyethylene blends: Effect of processing variables. Rader, C.P., Baldwin, S.D., Cornell, D.D., Sader, G.D. and Stockel, R.F. Eds. Plastics.

- Rubber, and Paper Recycling: A Pragmatic Approach. P. 113. American-Chemical Society: Washington DC.
- Joshi, M., Maiti, S.N. and Misra, A. (1992). Poly(butylene terephthalate)/high density polyethylene alloys. II. Mechanical properties and rheology. J. Appl. Polym. Sci. 45. 1837-1847.
- Joshi, M., Maiti, S.N. and Misra, A. (1994). Studies on the thermal, dynamic, mechanical and rheological behavior of short-glass fiber reinforced composites based on poly(butylenes terephthalate)/high density polyethylene blends. Polymer. 35(17). 3679-3685.
- Kalfoglou, N.K., Skafidas, D.S., Kallitisis, J.K., Lambert, J-C. and Stappen, L.Van der. (1995). Comparison of compatibilizer effectiveness for PET/HDPE blends. Polymer. 36(23). 4453-4462.
- Kalfoglou, N.K., Skafidas, D.S. and Sotiropoulou, D.D. (1994). Compatibilization of blends of poly(ethylene terephthalate) and linear low density polyethylene with the ionomer of poly(ethylene-co-methacrylic acid). Polymer. 35(17). 3624-3630.
- Kunori, T and Geil, O.H. (1980). Morphology-property relationships in polycarbonate based blends, II. Tensile and impact strength. Macromol. Sci. Part B: Phys. 18(1). 135-175.
- Lampo, R.G. and Nosker. T.J. (1997). Development and Testing of Plastic Lumber Materials for Construction Applications, USACERL Technical Report 97/95, June.
- Lepers, J.C., Favis, B.D. and Tabar, R.J. (1997). The relative role of coalescence and interfacial tension in controlling dispersed phase size reduction during the compatibilization of polyethylene terephthalate/polypropylene blends J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys. 35. 2271-2289.
- Liu, W-B, Kuo, W-F., Chiang, C-J. and Chang, F-C. (1996). In situ compatibilization of PBT/PPO blends. Eur. Polym. J. 32(1). 91-99.
- Lusinchi, J.M., Boutevin, B., Torres, N. and Robib, J.J. (2001). In situ compatibilization of HDPE/PET blends. J. Apply. Polym. Sci. 79. 874-880.
- Markham. R.L. and Mangraj. D. (1997). Compatibilization of blends of recycled plastics. Hoyle, W. and Karsa, D.R. Eds. Chemical Aspects of Plastics Recycling. P. 154. Bookcraft: Bath.
- McLoughlin, K.M. and Elliott, S.J. (1998). Properties of glass-filled polypropylene, nylon 6, and polypropylene/nylon 6 alloys compatibilized using PP-g-MA. The 56th Society of

- Plastics Engineers: Annual Technical Conference; April 26-30, 1998; Atlanta, Georgia, USA, p. 1561-1570
- Pang, Y.X., Jia, D.M., Hu, H.J., Hourston, D.J. and Song, M. (2000). Effects of a compatibilizing agent on the morphology, interface and mechanical behavior of polypropylene/poly(ethylene terephthalate) blends. Polymer. 41(1). 357-365.
- Pawlak, A., Morawiec, J., Pazzagli, F., Pracella, M. and Galeski, A. (2002). Recycling of postconsumer poly(ethylene terephthalate) and high density polyethylene by compatibilized blending. J. Appl. Polym. Sci. 86. 1473-1485.
- Pietrasanta, Y., Robin, J-J., Toress, N., and Boutevin, B. (1999). Reactive compatibilization of HDPE/PET blends by glycidyl methacrylate functionalized polyolefins. Macromol. Chem. Phys. 200(1). 142-149.
- Pluta, M., Bartczak, Z., Pawlak, A., Galeski, A. and Pracella, M. (2001). Phase structure and viscoelastic properties of compatibilized blend of PET and HDPE recyclates. J. Appl. Polym. Sci. 82. 1423-1436.
- Pracella, M., Rolla, L., Chionna, D. and Galeski, A. (2002). Compatibilization and properties of poly(ethylene terephthalate)/polyethylene blends based on recycled materials. Macromol. Chem. Phys. 203 (10/11). 1473-1485.
- Rossi, L. 2000, Jan. Wood composites and plastic lumber proving worthy competition to wood according to principia partners study. (online). Available URL: <http://www.principiaconsulting.com/>
- Selke, S.E. (1997) Understanding Plastic Packaging Technology. Carl Hanser Vorlasg: Munich.
- Torres, N., Pobin, J.L. and Boutevin, B. (2001). Study of compatibilization of HDPE-PET blends by adding grafted or statistical copolymers. J. Appl. Polym. Sci. 81. 2377-2386.
- Traugott, T.D., Barlow, J.W. and Pual, D.R. (1983). Mechanical properties of high density polyethylene-poly(ethylene terephthalate) blends. J. Appl. Polym. Sci. 28. 2947-2956.
- Tselios, Ch., Bikiaris, D., Savidis, P. and Panayiotou, C. (1999). Glass-fiber reinforcement of in situ compatibilized polypropylene/polyethylene blends. J. Mat. Sci. 34. 385-394.
- Utracki, L.A (1989). Polymer Blends and Alloys. P. 20. Hanser Publishers: New York.
- Van Ness, K.E. and Nosker, T.J. (1992). Commingled plastics, Ehring, R.J. Ed., Plastics Recycling. P. 197. Hanser Publishers: Munich.

- Wilfong, D. L. , Hilter, A. and Baer, E.J. (1986). Toughening of polyester resins through blending with polyolefins. J. Mater. Sci. 21. 2014-2026.
- Wu, S. (1978). Paul, D.R. and Newman, S., Eds. Polymer Blends. P. 243. Academic Press, Inc.: New York.
- Wunderlich, B and Dole, M. (1957). Specific heat synthetic high polymers. VIII Low pressure polyethylene. J. Polym. Sci. 24. 201-213.

ประวัตินักวิจัย

หัวหน้าโครงการ

นางสาว กษมา จารุกำจร ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สถานที่ติดต่อ สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000 การศึกษา พ.ศ. 2533 วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมี) เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง มหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ. 2536 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์) มหาวิทยาลัยมหิดล และ พ.ศ. 2542 Ph.D. (Polymer Engineering) University of Akron, OH, USA สาขาวิชาการที่มีความสนใจ กระบวนการขึ้นรูปและตรวจสอบพอลิเมอร์ (polymer processing and characterization) และพอลิเมอร์ผสมและคอมโพสิต (polymer blends and composites) ผลงานทางวิชาการ ประกอบด้วย บทความทางวิชาการ 29 บทความ และรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ 3 ฉบับ

ผู้ร่วมวิจัย

นายสิทธิชัย แสงอาทิตย์ ตำแหน่ง รองศาสตราจารย์ สถานที่ติดต่อ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 การศึกษา B.Eng. in Civil Engineering (1990), Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand M. Eng. in Civil Engineering (1993), University of Texas at Arlington, Arlington, Texas, USA Ph.D. in Civil Engineering (1997), University of Texas at Arlington, Arlington, Texas, USA สาขาวิชาการที่มีความชำนาญ Structural Engineering - Experimental and Applied Mechanics on Civil Engineering Fiber Reinforced Plastic Composite Materials and Structures, Reinforced Concrete, Masonry, and Steel. Finite Element Analysis. ผลงานทางวิชาการ ประกอบด้วย บทความวิจัย 46 บทความ บทความทั่วไป 9 บทความ และรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ 15 ฉบับ