



รายงานการวิจัย

การเสริมแรงพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทธิลีนเทอเรพทาเลท  
และพอลิเอทธิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว  
เพื่อใช้ในงานก่อสร้าง

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

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การเสริมแรงพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลท  
และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว  
เพื่อใช้ในงานก่อสร้าง

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

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กษมา จารุกำจร

สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2551

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มกราคม 2553

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่อง การเสริมแรงพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลทและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วเพื่อใช้ในงานก่อสร้างนี้ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2551

งานวิจัยนี้ สำเร็จลงได้ด้วยความร่วมมือและสนับสนุนจากหลายบุคคล ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณผู้ช่วยวิจัย คือ นาย อิศนัย แสงรัตน์ และ นางสาว สุกัญญา เจริญขวัญ นักศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัทเคมีคอล อินโนเวชัน จำกัด (Chemical Innovation, Co., Ltd.) ที่ให้ความอนุเคราะห์ Fusabond<sup>®</sup> E MB 100D และบริษัทพรีเมียร์ โปรดักส์ (Premier Products, Co., Ltd.) สำหรับการอนุเคราะห์เส้นใยแก้วชนิด E-glass

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กษมา จารุกำจร  
(หัวหน้าโครงการวิจัย)

มกราคม 2553

## บทคัดย่อภาษาไทย

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารตัวเติมต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลทที่ผ่านการใช้งานแล้ว ที่อัตราส่วน 20/80 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก และวิเคราะห์ว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตสามารถถูกนำไปใช้แทนไม้เนื้ออ่อน โดยการพิจารณาจากสมบัติทางกล เส้นใยแก้วชนิดสั้นและแคลเซียมคาร์บอเนตถูกใช้เป็นสารตัวเติมที่ปริมาณ 10, 20 และ 30 ส่วนในร้อยส่วนของพอลิเมอร์ผสม พอลิเมอร์ผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลท และพอลิเมอร์ผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลทที่มีการเสริมแรงด้วยสารตัวเติม ถูกเตรียมในเครื่องอัดรีดชนิดแกนคู่หมุนในทิศทางเดียวกัน ชั้นทดสอบถูกเตรียมโดยใช้เครื่องฉีดสมบัติทางกล สมบัติทางกระแสวิชา สมบัติทางสัณฐานวิทยา ความหนาแน่น และอุณหภูมิบิดเบี้ยวของพอลิเมอร์คอมโพสิตเปลี่ยนแปลงตามชนิดและปริมาณของสารตัวเติม การเติมเส้นใยแก้วชนิดสั้นลงในพอลิเมอร์ผสมปรับปรุงสมบัติความทนต่อแรงดึง ความทนต่อแรงคด และความทนต่อแรงกระแทก นอกจากนี้ สมบัติทางกลเพิ่มขึ้นกับปริมาณของเส้นใยแก้วชนิดสั้น แต่อย่างไรก็ตาม แคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลในทางลบต่อความทนต่อแรงดึง ความทนต่อแรงคด และความทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิต พอลิเอทิลีนกราฟมาเลอิกแอนไฮดรายด์ถูกใช้เป็นสารช่วยให้เข้ากัน เพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต ปริมาณสารช่วยให้เข้ากันคือ 6 ส่วนในร้อยส่วนของพอลิเมอร์ผสม การยึดติดระหว่างเมทริกซ์และเส้นใยแก้วดีขึ้น เมื่อมีการเติมสารช่วยให้เข้ากัน ส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิต สารช่วยให้เข้ากันไม่เพียงแต่เพิ่มค่าความเหนียวของพอลิเมอร์ผสมแต่ยังมีผลกระทบต่ออุณหภูมิบิดเบี้ยวของพอลิเมอร์คอมโพสิต พอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง พอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลทและเส้นใยแก้วชนิดสั้นไม่สามารถใช้แทนไม้เนื้ออ่อนได้โดยตรงเพราะสมบัติทางกลบางอย่างต่ำกว่า ความทนต่อแรงคดของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าสูงกว่าของไม้เนื้ออ่อน แต่โมดูลัสของแรงคดมีค่าต่ำกว่าของไม้เนื้ออ่อน นอกจากนี้ ความหนาแน่นสูงกว่าไม้เนื้ออ่อน

## Abstract

This research aimed to study the effect of filler types and contents on the properties of recycled HDPE/PET (20/80 wt%) blends and analyze if the composites could replace the soft wood from mechanical properties aspect. Short glass fiber and calcium carbonate were used as fillers at contents of 10, 20, and 30 phr. The HDPE/PET blend and HDPE/PET blends reinforced with the fillers were prepared in a co-rotating twin screw extruder. The specimens were molded using injection molding machine. Mechanical, rheological, morphological properties, density and heat distortion temperature (HDT) of the composites were varied by the filler types and contents. Incorporating the short glass fibers into the blends improved the tensile, flexural, and impact properties. In addition, the mechanical properties increased with short glass fiber content. However, the calcium carbonate gave negative impact on the tensile, flexural, and impact strength of the composites. Polyethylene grafted with maleic anhydride (PE-g-MA) was used as a compatibilizer to improve the properties of the composites. The compatibilizer content was at 6 phr. The adhesion between matrix and the glass fiber was enhanced with addition of the compatibilizer leading to improve the mechanical properties of the composites. The compatibilizer not only increased in the melt viscosity but also affected on the HDT of the composites. HDPE/PET/short glass fiber composites could not directly replace the soft wood because some inferior properties. Flexural strength of HDPE/PET/short glass fiber composites was higher than that of soft wood while flexural modulus was lower. Moreover, their densities were higher than that of the soft wood.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	4
<b>บทที่ 2 ภูมิหลัง</b>	
2.1 ผลของสารตัวเติมต่อสมบัติของพอลิเมอร์และพอลิเมอร์ผสม.....	6
2.2 Recycled plastic lumber.....	8
<b>บทที่ 3 วัสดุและการทดลอง</b>	
3.1 วัสดุ.....	10
3.2 การเตรียมและการขึ้นรูปชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมโพสิต.....	10
3.3 การวิเคราะห์และตรวจสอบพอลิเมอร์ พอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมโพสิต	11
3.3.1 สมบัติทางกายภาพ.....	11
3.3.2 สมบัติทางกล.....	11
3.3.3 สมบัติทางกระแสวิทยา.....	11
3.3.4 สมบัติทางความร้อน.....	12
3.3.5 สมบัติทางสัณฐานวิทยา.....	12
<b>บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ผลการทดลอง</b>	
4.1 ความหนาแน่น.....	13
4.2 อุณหภูมิบิดเบี้ยว.....	14

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
4.1 ความหนาแน่นของ HDPE, PET, HDPE/PET blend และ HDPE/PET blends ที่ปริมาณเส้นใยแก้วชนิดสั้นและแคลเซียมคาร์บอเนตต่าง ๆ	14
4.2 HDT ของ HDPE, PET, HDPE/PET blend และ HDPE/PET blends ที่ปริมาณเส้นใยแก้วชนิดสั้นและแคลเซียมคาร์บอเนตต่าง ๆ	15
4.3 Tensile strength, tensile strain at break, tensile modulus, flexural strength, flexural modulus, impact strength ของ HDPE/PET blend และ HDPE/PET blends ที่ปริมาณเส้นใยแก้วชนิดสั้นและแคลเซียมคาร์บอเนตต่าง ๆ	17
4.4 อุณหภูมิหลอมเหลว ( $T_m$ ) อุณหภูมิตกผลึก ( $T_c$ ) และเปอร์เซ็นต์ผลึก (% $X_c$ ) ของ HDPE และ PET ใน HDPE/PET blends ที่มีการใส่สารตัวเติมที่มีและไม่มีสารช่วยให้เข้ากัน	23
4.5 เปรียบเทียบความหนาแน่น ราคาและสมบัติทางกลของไม้สัก HDPE/PET blend และ HDPE/PET blends ที่ปริมาณเส้นใยแก้วชนิดสั้นต่าง ๆ	28

## สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
1.1 ตัวอย่างของ plastic lumber	3
1.2 ตัวอย่างการใช้งานของ plastic lumber	3
4.1 Tensile strength ของ HDPE/PET blends และ HDPE/PET blends ที่ปริมาณเส้นใยแก้วชนิดสั้นและแคลเซียมคาร์บอเนตต่าง ๆ	18
4.2 Tensile modulus ของ HDPE/PET blends และ HDPE/PET blends ที่ปริมาณเส้นใยแก้วชนิดสั้นและแคลเซียมคาร์บอเนตต่าง ๆ	18
4.3 Tensile strain at break ของ HDPE/PET blends และ HDPE/PET blends ที่ปริมาณเส้นใยแก้วชนิดสั้นและแคลเซียมคาร์บอเนตต่าง ๆ	19
4.4 Flexural strength ของ HDPE/PET blends และ HDPE/PET blends ที่ปริมาณเส้นใยแก้วชนิดสั้นและแคลเซียมคาร์บอเนตต่าง ๆ	19
4.5 Flexural modulus ของ HDPE/PET blends และ HDPE/PET blends ที่ปริมาณเส้นใยแก้วชนิดสั้นและแคลเซียมคาร์บอเนตต่าง ๆ	20
4.6 Impact strength ของ HDPE/PET blends และ HDPE/PET blends ที่ปริมาณเส้นใยแก้วชนิดสั้นและแคลเซียมคาร์บอเนตต่าง ๆ	20
4.7 ความหนืดที่อัตราเฉือนต่าง ๆ ของ HDPE, PET และ HDPE/PET 20/80 blend	21
4.8 ความหนืดที่อัตราเฉือนต่าง ๆ ของ HDPE/PET blends ที่ปริมาณเส้นใยแก้วชนิดสั้นต่าง ๆ	22
4.9 ความหนืดที่อัตราเฉือนต่าง ๆ ของ HDPE/PET blends ที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตต่าง ๆ	22
4.10 SEM micrographs ของ (a) HDPE/PET/SGF 20/80/10 (b) HDPE/PET/SGF/PE-g-MA 20/80/10/6 (c) HDPE/PET/SGF 20/80/20 (d) HDPE/PET/SGF/PE-g-MA 20/80/20/6 (e) HDPE/PET/SGF 20/80/30 (f) HDPE/PET/SGF/PE-g-MA 20/80/30/6 (x1000)	25
4.11 SEM micrographs ของ (a) HDPE/PET/CaCO <sub>3</sub> 20/80/10 (b) HDPE/PET/ CaCO <sub>3</sub> /PE-g-MA 20/80/10/6 (c) HDPE/PET/CaCO <sub>3</sub> 20/80/20 (d) HDPE/PET/CaCO <sub>3</sub> /PE-g-MA 20/80/20/6 (e) HDPE/PET/CaCO <sub>3</sub> 20/80/30 (f) HDPE/PET/CaCO <sub>3</sub> /PE-g-MA 20/80/30/6 (x1500)	26
4.12 Flexural strength ของไม้สัก HDPE/PET blends และ HDPE/PET blends ที่ปริมาณเส้นใยแก้วชนิดสั้นต่าง ๆ ที่มีและไม่มีกรใส่สารช่วยให้เข้ากัน	29
4.13 Flexural modulus ของไม้สัก HDPE/PET blends และ HDPE/PET blends ที่ปริมาณเส้นใยแก้วชนิดสั้นต่าง ๆ ที่มีและไม่มีกรใส่สารช่วยให้เข้ากัน	29



# บทที่ 1

## บทนำ

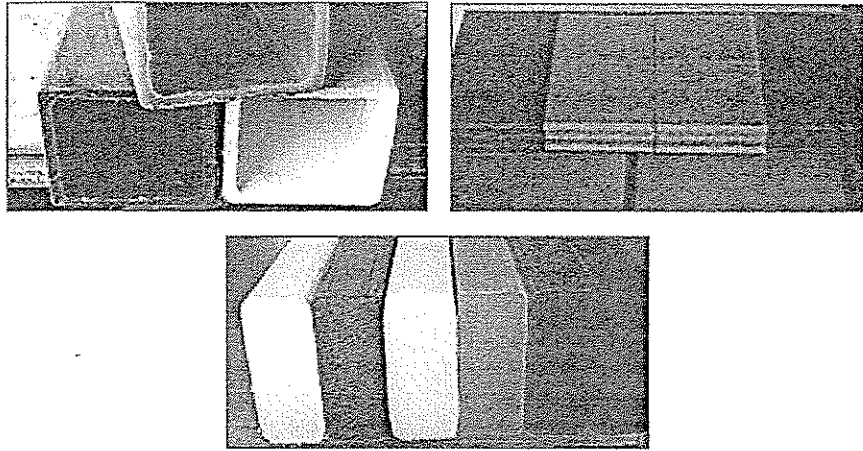
### 1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ในปัจจุบัน พลาสติกมีส่วนเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของเราเป็นอย่างมาก เช่น บรรจุก๊าซ เครื่องใช้ในครัวเรือน เครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น เมื่อมีการใช้พลาสติกในปริมาณที่มากขึ้น ผลที่ตามมาคือ ปัญหาขยะพลาสติกซึ่งนับวันจะมีปริมาณสูงมากขึ้นเรื่อย ๆ ก่อให้เกิดปัญหาในการจัดเก็บและกำจัด เนื่องจากพลาสติกเป็นวัสดุที่ต้องใช้เวลายาวนานในการย่อยสลายตามธรรมชาติ จึงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ จึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการจัดการขยะพลาสติก ซึ่งวิธีในการนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ (plastic recycling) ประกอบด้วย วิธีการทางกล (mechanical recycling) วิธีการทางเคมี (chemical recycling) และการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ (energy recovery) [Herbst and Flanagan, 1997] ซึ่งวิธีการทางกล เป็นวิธีตรงไปตรงมา (straight forward) และไม่ซับซ้อน การพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับการผสมพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว เกิดเนื่องจากการไม่ต้องการแยกส่วนผสมของพลาสติกออกจากกัน การพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้มีสมบัติที่ดีขึ้นสำหรับการใช้งานในระดับที่สูงขึ้น การผสมส่วนผสมของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว เพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และการได้ green products ชนิดใหม่ [Marhham and Mangraj, 1997]

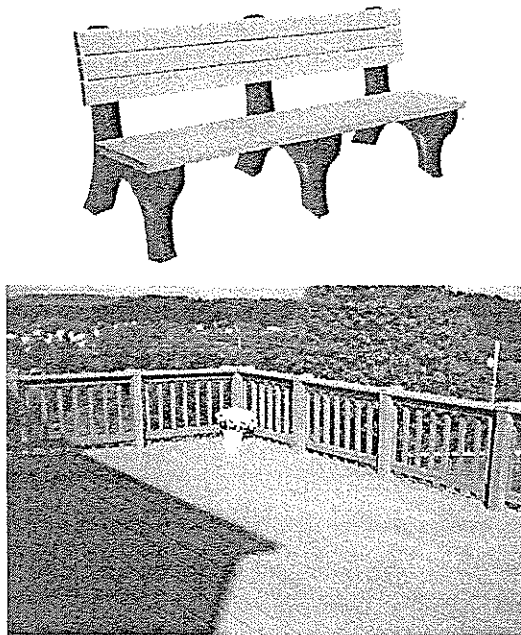
การนำพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วมาขึ้นรูปใหม่ เพื่อการใช้งานในรูปแบบอื่น ๆ เช่น การผลิตเป็น plastic lumber ซึ่ง American Society of Testing and Materials หรือ ASTM (2539) ได้ให้นิยามของ plastic lumber ว่า “a manufactured product composed of more than 50 weight percent resin, in which the product generally 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” ซึ่ง plastic lumber มีส่วนในการลดปัญหาการตัดไม้ทำลายป่าและเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว ในต่างประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา มีการผลิต plastic lumber ในเชิงการค้าจากขยะพลาสติกที่ใช้ในครัวเรือนอยู่ไม่น้อยกว่า 15 ราย ซึ่งแต่ละผู้ผลิตมีการใช้ชนิดของพลาสติก ซึ่งจะเป็นพลาสติกชนิดเดียวหรือพลาสติกผสม สารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ เช่น แอนติออกซิแดนต์ (antioxidant) สารหน่วงไฟ (flame retardant) สารหล่อลื่น (lubricant) สารคู่ควบ (coupling agents) สารป้องกันรังสียูวี (UV stabilizer) [Climenhage, 2003] และกระบวนการผลิตที่ต่างกัน กระบวนการที่นิยมใช้ในการขึ้นรูปมี 4 แบบ คือ intrusion process, continuous extrusion, Reverzer process และ compression molding มาผลิตเป็นชิ้นงานรูปแบบต่าง ๆ ทั้งที่เป็นโครงสร้างกลวงและตัน (hollow, solid structure) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 เพื่อใช้แทนไม้ เช่น รั้ว เสา ก่ออิฐในสวนสาธารณะ โต๊ะปิกนิก โครงสร้างท่าเรือ (pier construction) ตัวอย่างการใช้งานของ plastic lumber แสดงดังรูปที่

1.2 ข้อดีต่าง ๆ ของ plastic lumber เช่น ทำจากพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว จัดเป็น green products ทนทานต่อการผุ (rot) สภาพอากาศ และแมลง ทำให้มีอายุการใช้งานนานกว่าไม้ ซึ่งในกรณีของไม้ ต้องมีบำรุงรักษาด้วยสารเคมีที่เป็นอันตราย ไม้ต้องทาสี สามารถทำให้มีสีในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป ทำให้มีความคงทน (long lasting color) มีสีและลวดลาย (texture) ต่าง ๆ ไม่มีค่าบำรุงรักษา เช่น การล้าง การ resealing/re-staining ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและแรงงาน และมีอายุการใช้งานนานกว่าเมื่อเทียบกับไม้ทั่วไป เป็นต้น ตลาดของ plastic lumber และ wood composites ในช่วงปี ค.ศ. 1998-2008 มีการเติบโตที่ 13% ในทุก ๆ ปี การประยุกต์ใช้งานแบ่งได้อย่างกว้าง ๆ เป็น 4 กลุ่ม คือ ผลิตภัณฑ์ก่อสร้าง (building products) งานด้านโครงสร้าง (infrastructure) การขนส่ง (transportation) และอุตสาหกรรมและบริโภค (industrial/consumer) ซึ่งกลุ่มผลิตภัณฑ์ก่อสร้างเป็นกลุ่มที่ใหญ่ที่สุดและคาดว่าจะมีแนวโน้มการเติบโต 11% ทุก ๆ ปี [Rossi, 2000] จากงานวิจัยพบว่า plastic lumber มีความแข็งแรงต่อการกดอัด (compression strength) ที่ใกล้เคียงหรือดีกว่าไม้ แต่มีมอดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ที่ต่ำกว่าไม้ และมีการคืบ (creep) ที่ค่อนข้างสูง

จากรายงานการใช้พลาสติกในบรรจุภัณฑ์ของ Modern Plastics ในปี ค.ศ. 1991 พบว่ามีการใช้พอลิเอทิลีน (polyethylene, PE) และพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลท (polyethylene terephthalate, PET) ในบรรจุภัณฑ์ประมาณ 70% ของพลาสติกประเภทอื่น ๆ ทั้งหมด และจากรายงานของเมือง Sommerset, NJ พบว่า ขยะพลาสติกที่ได้จากการสำรวจในปี ค.ศ. 1992 ประกอบด้วยพลาสติกทั้งสองประเภทข้างต้นมากกว่า 90% [Lampo and Nosker, 1997] นอกจากนี้จากการศึกษาปริมาณขยะในเขตเทศบาลนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2538 ของโครงการศูนย์กำจัดขยะมูลฝอยเทศบาลนครราชสีมา และ การศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของขยะมูลฝอยในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2545 พบว่ามีปริมาณขยะพลาสติกเป็นอันดับ 3 รองจากเศษอาหารและกระดาษ โดยพลาสติกที่พบเป็นพวกบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ขวดน้ำชนิดขุ่นและใส ขวดแชมพู กรณีขวดน้ำชนิดขุ่นที่ทำจาก HDPE และขวดน้ำชนิดใสที่ทำจาก PET เป็นขยะพลาสติกที่พบมาก [ศรีสว่าง, 2545] ดังนั้นในการวิจัยนี้เลือก HDPE และ PET มาใช้ในการศึกษา เนื่องจากเป็นพลาสติกที่พบในปริมาณที่มากในขยะพลาสติกและสามารถแยกออกจากพลาสติกชนิดอื่นได้ง่าย ในการศึกษาการนำขยะพลาสติก New Jersey Curbside Tailings (NJCT) มาผลิตเป็น plastic lumber พบว่ามีอัตราส่วนของ HDPE ถึงร้อยละ 80 [Van Ness and Nosker, 1992] อีกทั้งยังเป็นการสมดุล (balance) สมบัติของพอลิเมอร์ทั้งสอง ทั้งในด้านสมบัติทางกล และสมบัติในการขึ้นรูป (processability) เป็นการปรับปรุง (upgrade) สมบัติของ PE นอกจากนี้ถ้าพิจารณาในแง่ของการจัดหาของวัสดุ การเลือกใช้วัสดุที่หาได้ง่าย มีปริมาณมาก เป็นข้อสำคัญที่ควรพิจารณาประกอบกับสมบัติที่จะได้จากพอลิเมอร์ทั้งสอง



รูปที่ 1.1 ตัวอย่าง plastic lumber [<http://plasteak.com/>]



รูปที่ 1.2 ตัวอย่างการใช้งาน plastic lumber [<http://plasteak.com/>]

จากที่กล่าวมาข้างต้น plastic lumber มีสมบัติทางกลที่ดีกว่าไม้ เช่น โมดูลัสยืดหยุ่น (elastic modulus) ดังนั้น แนวทางในการปรับปรุงสมบัติทางกลของ plastic lumber ที่ผลิตจากพอลิเมอร์ผสมให้ดีขึ้น คือ การเติมใช้สารตัวเติม (filler) ประเภทอนุภาคหรือเส้นใย ดังนั้นจุดประสงค์ในการวิจัยนี้ เป็นการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและทางกลของพลาสติกผสมระหว่าง PET และ HDPE ที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยการใส่สารตัวเติมที่เป็นอนุภาคและเส้นใย เพื่อใช้วัสดุที่มีสมบัติทางกลที่ใกล้เคียงกับไม้เนื้ออ่อน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารตัวเติมต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล สมบัติทางกระแสวิทยา และสมบัติทางสัญญาณวิทยาของพลาสติกผสมระหว่าง PET และ HDPE ที่อัตราส่วน 80 ต่อ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารตัวเติมในการศึกษา คือ เส้นใยแก้วชนิดสั้นและแคลเซียมคาร์บอเนต ที่ปริมาณ 10, 20, 30 phr

2. เพื่อศึกษาผลของสารช่วยให้เข้ากัน คือ PE-g-MA ที่ปริมาณ 6 phr ต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล สมบัติทางกระแสวิทยา และสมบัติทางสัญญาณวิทยาของพลาสติกผสมระหว่าง PET และ HDPE ที่อัตราส่วน 80 ต่อ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางกลของพลาสติกประเภท PET และ HDPE ที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดย HDPE จะได้จากขบวนการพลาสติกประเภทขาวขุ่นและ PET จะได้จากขบวนการพลาสติกประเภทใส และขบวนการอัดลม

2. ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล และสมบัติทางกระแสวิทยาของพลาสติกผสมระหว่าง PET และ HDPE ที่ผ่านการใช้งานแล้ว ที่อัตราส่วนในการผสม 80 ต่อ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาเบื้องต้น [กษมา, 2551]

3. ทำการศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารตัวเติมต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล สมบัติทางกระแสวิทยา และสมบัติทางสัญญาณวิทยาของพลาสติกผสมในข้อ 2 เพื่อเปรียบเทียบกับสมบัติไม้เนื้ออ่อน

4. ทำการศึกษาผลของสารช่วยให้เข้ากัน คือ PE-g-MA ที่ 6 phr ซึ่งเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาเบื้องต้น [กษมา, 2551] ต่อสมบัติทางกายภาพสมบัติทางกล สมบัติทางกระแสวิทยา และสมบัติทางสัญญาณวิทยาของพลาสติกผสมในข้อ 3 เพื่อเปรียบเทียบกับสมบัติไม้เนื้ออ่อน

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

การวิจัยนี้จะได้วัสดุก่อสร้างอีกประเภทหนึ่งที่เป็นวัสดุผสม HDPE และ PET ที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีความแข็งแรง คงทนต่อสภาวะแวดล้อม และมีความเหมาะสมที่จะใช้ในงานก่อสร้าง โดยหน่วยงานหรือผู้ที่ให้นำผลงานการวิจัยไปใช้ประโยชน์ได้แก่ ประชาชนทั่วไป เอกชนที่ทำธุรกิจรับเหมาก่อสร้าง บริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์ก่อสร้าง หน่วยงานราชการต่าง ๆ เช่น กรมโยธาธิการ องค์การบริหารส่วนตำบล (อบต.) เทศบาล และการเคหะแห่งชาติ เป็นต้น

การพัฒนาวัสดุดังกล่าวจะเป็นการสร้างองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการนำพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วมาใช้ในงานใหม่ นอกจากนั้นแล้ว ยังจะเป็นการช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมเนื่องจากขยะที่เป็นพลาสติกและการทำลายป่าไม้ และเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยทำให้เกิดการนำวัสดุผ่านการใช้งานแล้วมาใช้ใหม่ เพื่อการสร้างมูลค่าเพิ่มในเชิงพาณิชย์ให้กับพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว

## บทที่ 2

### ภูมิหลัง

ในปัจจุบันนี้ มีการใช้พลาสติกในชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก ก่อให้เกิดปัญหาขยะพลาสติก เนื่องจากพลาสติกต้องใช้เวลาในการสลายตัวตามธรรมชาติ ส่งผลต่อสถานะแวดล้อม จึงมีความจำเป็นในการหาวิธีในการนำพลาสติกที่ผ่านการใช้งานกลับมาใช้ใหม่ รวมถึงการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม การนำพลาสติกซึ่งมีปริมาณการใช้งานที่มากในชีวิตประจำวันมาผลิตเป็นวัสดุเพื่อใช้ทดแทนไม้ในงานที่เหมาะสมต่าง ๆ เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับพลาสติก ลดปัญหาขยะพลาสติก และลดการใช้ไม้ลง การนำพลาสติกมาผสมกันเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ นอกเหนือจากการสังเคราะห์วัสดุชนิดใหม่ ซึ่งจะมีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่า ในการพัฒนาวัสดุผสม (multiphase blend materials) ในเบื้องต้นขึ้นกับ 2 สิ่งที่สำคัญ คือ การควบคุมเคมีของอินเทอร์เฟซ (interfacial chemistry) และการควบคุมโครงสร้างจุลภาค (microstructure) [Favis, 2000] ซึ่งมีตัวแปรของวัสดุต่าง ๆ (material parameters) ที่มีอิทธิพลต่อสัณฐานวิทยา (morphology) เช่น อัตราส่วนของความหนืด (viscosity ratio) สัดส่วน (composition) ความยืดหยุ่น (elasticity) อัตราเฉือน (shear rate) และการปรับเปลี่ยนอินเทอร์เฟซ (interfacial modification) [Utraki, 1989] ซึ่งถ้าสามารถควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ได้ เพื่อให้ได้สัณฐานวิทยา (morphology) และสมบัติที่อินเทอร์เฟซ (interface properties) ที่ต้องการ จะทำให้ได้พลาสติกผสมที่มีสมบัติที่ต้องการ

จากการศึกษาปริมาณขยะพลาสติก พบว่าขยะพลาสติกประเภท HDPE และ PET ซึ่งมักใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ประเภทต่าง ๆ มีปริมาณที่ค่อนข้างสูง แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อนำ HDPE และ PET มาผสมกัน จะเกิดการแยกเฟสหรือการไม่เข้ากันของพอลิเมอร์ ซึ่งทำให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมไม่ดีขึ้น การใส่สารช่วยให้เข้ากัน (compatibilizer) เป็นแนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหา การใช้น็ลคโคพอลิเมอร์ของมาทีเอท สไตรีนเอทธิลีน บิวทีลีน สไตรีน (maleated styrene-ethylene/butylene-styrene block copolymer, SEBS-g-MA) และโคพอลิเมอร์ของเอทธิลีน ไกลซีดิล เมทาไครเลท (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 ให้ความทนต่อการดึง และความทนต่อการกระแทกที่ดีที่สุด ในกรณีของ PE/PET (75/25) การใช้ 3 ส่วนของ E-GMA หรือ การใช้ 5 ส่วนของ SEBS-g-MA ใน 100 ส่วนของพอลิเมอร์ผสม ให้ความทนต่อการดึงและความทนต่อการกระแทกที่ดีที่สุด [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 ที่ผ่านการใช้งานแล้วมา

ผสมกันในอัตราส่วน 75/25 และ 25/75 และศึกษาผลของอัตราส่วนและชนิดของสารช่วยให้เข้ากัน ต่อสมบัติทางกลและพื้นฐานทางวิทยาของพอลิเมอร์ผสม สารช่วยให้เข้ากันที่ใช้ คือ SEBS-g-MA และ E-GMA พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการใส่สารช่วยให้เข้ากัน มีการเพิ่มขึ้นของการดึงยืดและค่าความแข็งแรงในการรับแรงกระแทก [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 ส่งผลต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพการเข้ากันได้ที่ดีกว่าสารช่วยให้เข้ากันชนิดอื่น ๆ เนื่องจากการมีความไวต่อปฏิกิริยา (reactivity) ที่สูงของหมู่ฟังก์ชันของ E-GMA กับหมู่ฟังก์ชันที่ปลายของ PET ในระหว่างการผสม [Pracella et al., 2002]

## 2.1 ผลของสารตัวเติมต่อสมบัติของพอลิเมอร์และพอลิเมอร์ผสม

การใส่สารตัวเติม (filler) ลงในพอลิเมอร์เป็นวิธีในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ ซึ่งการปรับปรุงสมบัติขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ขนาด รูปร่าง และปริมาณของสารตัวเติม การกระจายตัว (dispersion) การทำทรีทเมนต์ของพื้นผิว (surface treatment) [Wang and Wang, 1999] นอกจากนี้การใส่สารตัวเติมลงในพอลิเมอร์เป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายไม่สูงในการปรับเปลี่ยนสมบัติของพอลิเมอร์ จากเหตุผลดังกล่าว ส่งผลให้มีความสนใจเพิ่มขึ้นทั้งในด้านอุตสาหกรรมและวิจัยในการศึกษาการใส่สารตัวเติมลงในพอลิเมอร์ ซึ่งทำให้สามารถปรับเปลี่ยนสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ เช่น สมบัติทางกล เช่น ความแข็งแรง (strength) ความแข็ง (hardness) สมบัติทางความร้อน สมบัติทางไฟฟ้า ความเสถียรของขนาด (dimensional stability) ได้ตามที่ต้องการ [Guerrica-Echevarria, et al., 1998] ซึ่งสารตัวเติมทั่วไปที่ใช้กันมาก เช่น เส้นใยแก้ว (glass fiber) แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate,  $\text{CaCO}_3$ ) ทาล์ว (talc) เส้นใยธรรมชาติ (natural fibers) ผงไม้ (wood flour) เป็นต้น

เส้นใยแก้วจัดเป็นสารตัวเติมที่ใช้กันมากในการเสริมแรงของเทอร์โมพลาสติก และเทอร์โมเซต เนื่องจากมีสมบัติที่ดีต่าง ๆ เช่น ความทนต่อแรงดึงที่สูง มีความต้านทานทางเคมี มีสมบัติด้านจนวนที่ต่ำ [Giraldi et al., 2005] ปริมาณเส้นใยแก้วที่ใช้ทั่วไปอยู่ที่ประมาณ 10-50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก การเติมเส้นใยแก้วชนิดสั้นจะเพิ่มค่ามอดูลัสยืดหยุ่นอย่างมีนัยสำคัญให้แก่ plastic lumber [Lampo and Nosker, 1997]

Joshi และคณะ [Joshi et al., 1992] ศึกษาผลของเส้นใยแก้วชนิดสั้นต่อสมบัติทางความร้อน สมบัติทางกลชนิดไดนามิก (dynamic mechanical properties) และสมบัติทางกระแสวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีนเทอเรพทาเลท (polybutylene terephthalate, PBT) และ HDPE พบว่า

เมื่อมีการใส่เส้นใยแก้ว มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณผลึก มีการลดลงของ damping มีการเพิ่มขึ้นของมอดูลัสสะสม (storage modulus) นอกจากนี้เส้นใยแก้วส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความหนืดและการลดลงของการบวมตัวของเอ็กทราดูเตท (extrudate swell)

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

Andreeva และคณะ [Andreeva et al., 2000] พบว่า MBI (4,4'-diphenylmethane bismaleimide) ซึ่งเป็นสารช่วยให้เข้ากัน ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความทนต่อแรงดึง (tensile strength) ของคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีน พอลิเอไมด์หก (polyamide 6, PA6) และเส้นใยแก้ว เนื่องจากการปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง 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% ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความทนต่อแรงดึง และมีผลต่อการปรับปรุงความต้านทานต่อการกระแทก (impact resistance)

Malchev และคณะ [Malchev et al., 2005] ศึกษาสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PE และ PA6 ที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว ที่อัตราส่วนต่าง ๆ โดย PE เป็นเมทริกซ์ ส่วน PA6 เป็นเฟสกระจาย พบว่ามีคอมโพสิตที่มีค่ามอดูลัสสะสมที่สูงที่สุดหนุมิมากกว่าจุดหลอมเหลวของเมทริกซ์

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

นอกจากนี้เส้นใยแก้วส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า stiffness ของ PP/SEBS blends ซึ่งมีการปรับปรุงการเข้ากันได้โดยใช้ PP-g-MA หรือ SEBS-g-MA จากการศึกษา dynamic mechanical analysis (DMA) พบว่าการใส่เส้นใยแก้วมีผลต่อการเพิ่มของมอดูลัสสะสม (storage modulus) และการลดลงของ damping factor [Tjong et al., 2002]

นอกจากเส้นใยแก้วแล้ว มีการใช้แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์ เนื่องจากมีราคาถูก เนื้อ ใช้ในการลดต้นทุนของพอลิเมอร์และมีผลในระดับปานกลางต่อสมบัติทางกล เมื่อ

พิจารณาในกรณีที่ทำหน้าที่ในการปรับปรุงสมบัติทางกลของเทอร์โมพลาสติก แคลเซียมคาร์บอเนต มีข้อดีในการเพิ่มขึ้นของมอดูลัสเล็กน้อยและการเพิ่มขึ้นของความทนต่อแรงกระแทก [Xanthos, 2005] Albano และคณะ [Albano et al., 2000] ศึกษาสมบัติทางกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PP และ HDPE ที่ไม่ผ่านและผ่านการใช้งาน อัตราส่วนในการผสม คือ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก การใช้แคลเซียมคาร์บอเนตที่มีการปรับเปลี่ยนพื้นผิวด้วยสารคู่ควบชนิดไททาเนต (titanate) ไม่ได้ส่งผลต่อการได้สมบัติทางกลที่ดีขึ้น

Gonzalez และคณะ [Gonzalez et al., 2002] ศึกษาผลของสารคู่ควบ (coupling agent) ต่อสมบัติทางกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PP และ HDPE ที่อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนัก แคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในการศึกษามีขนาดอนุภาคต่างกันสองขนาด (3.0 และ 1.8 ไมโครเมตร) พบว่าความทนต่อแรงดึง มอดูลัสของยังก์ การดึงยืดที่ตำแหน่งขาด (elongation at break) และความทนต่อแรงกระแทกของคอมโพสิตที่ใส่แคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาดเล็กกว่ามีค่าสูงกว่า เนื่องจากมีการกระจายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ดีกว่าและมีแนวโน้มการเกิดการเกาะกลุ่มที่มีขนาดเล็กกว่า นอกจากนี้มีการศึกษาผลของสารคู่ควบ คือ สารไททาเนต และเซอร์โคเนต (zirconate) ปริมาณที่ใช้ 0.3, 0.5, 0.7 และ 1.0 โดยน้ำหนักของแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าสารคู่ควบส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติทางกลของคอมโพสิต ซึ่งการเพิ่มขึ้นของสมบัติทางกลขึ้นกับชนิดของสารคู่ควบ

Ersoy และ Nugay [Ersoy and Nugay, 2003] ศึกษาผลของปริมาณทาลูวต่อสมบัติทางกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน (PP) และพอลิเอไมด์หก (PA6) ที่อัตราส่วนในการผสม 75 ต่อ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณทาลูวที่ใช้ คือ 10, 20, 30 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก พบว่าการใส่ทาลูวส่งผลต่อการลดลงของค่าความทนต่อแรงดึง แต่เมื่อใส่สารช่วยให้เข้ากัน (PP-g-MA) พบว่ามีการเพิ่มขึ้นของค่าความทนต่อแรงดึงอย่างมาก ส่วนค่ามอดูลัสของยังก์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณทาลูวที่ใส่ และระบบที่มีการใส่สารช่วยให้เข้ากันมีค่ามอดูลัสสูงกว่าระบบที่ไม่ใส่ นอกจากนี้การใส่ทาลูวส่งผลต่อการลดลงของการดึงยืด สารช่วยให้เข้ากันช่วยส่งผลในการเกิดการถ่ายเทความเค้นระหว่างเฟสและปรับปรุงสมบัติทางกล

## 2.2 Recycled plastic lumber

Recycled plastic lumber (RPL) คือ ผลิตภัณฑ์ที่เหมือนไม้ (wood-like) ซึ่งทำจากพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว หรือพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วผสมกับวัสดุอื่น ๆ 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] เมื่อพิจารณาถึงผลิตภัณฑ์ plastic lumber ที่ผลิตจากผู้ผลิตต่าง ๆ บนเกณฑ์ 3 ข้อ คือ วัสดุที่ใช้ ปริมาณของส่วนที่นำกลับมาใช้ใหม่ และการนำกลับมาใช้ใหม่ พบว่า



plastic lumber ในตลาดส่วนมากทำจาก HDPE, LDPE นอกจากนี้มี PS และ PVC ในการปรับปรุงสมบัติ เช่น ความแข็ง ความแข็งแรง ของ plastic lumber ทำโดยการเสริมแรงพลาสติก ซึ่งเส้นใยแก้ว จัดเป็นวัสดุเสริมแรงชนิดหนึ่งที่ใช้กันมากในการเพิ่มความสามารถในการรับแรงของ plastic lumber แต่การใช้เส้นใยแก้วในการปรับปรุงสมบัติของ plastic lumber ต้องตระหนักถึงเรื่องสุขภาพ ในส่วนของปริมาณของส่วนที่นำกลับมาใช้ใหม่เปลี่ยนแปลงตามผลิตภัณฑ์ ซึ่งส่วนมากผลิตจากพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว [Brenda, et. al. , 2005]

ข้อดีต่าง ๆ ของ RPL เช่น ทำจากพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ หลังจากการใช้งาน ทนทานต่อการผุ (rot) สภาพอากาศ และแมลง ทำให้มีอายุการใช้งานนานกว่าไม้ ซึ่งในกรณีของไม้ต้องมีบำรุงรักษาด้วยสารเคมีที่เป็นอันตราย ไม้ต้องทาสี สามารถทำให้มีสีในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป ทำให้มีความคงทน (long lasting color) มีสีและลวดลาย (texture) ต่าง ๆ ไม่มีค่าบำรุงรักษา เช่น การล้าง การ resealing/re-staining ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและแรงงาน และมีอายุการใช้งานนานกว่าเมื่อเทียบกับไม้ทั่วไป เป็นต้น จากงานวิจัยพบว่า plastic lumber มีความทนต่อแรงกดอัด (compression strength) ที่ใกล้เคียงหรือดีกว่าไม้ แต่มีมอดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ที่ต่ำกว่าไม้ และมีการคืบ (creep) ที่ค่อนข้างสูง มีความหนาแน่นกว่าไม้แห้งที่มีขนาดเดียวกัน มีการขยายและหดตัวมากกว่าไม้ ไม่ควรใช้เป็นส่วนประกอบโครงสร้าง (structural component) ซึ่งในทางปฏิบัติถ้าการประยุกต์ใช้งานที่ต้องการสมบัติทางกลทั้งสองสามารถปรับปรุงได้โดยการออกแบบหน้าตัดของชิ้นงาน โครงสร้างให้เหมาะสมหรือการเติมเส้นใยเสริมแรง เช่น เส้นใยคาร์บอนหรือเส้นใยแก้วชนิดสั้น [Lampo and Nosker, 1997]

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น ในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ สามารถทำได้โดยการใส่สารตัวเติม ในการวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET และ HDPE ที่มีการเสริมแรงด้วยวัสดุประเภทเส้นใยหรืออนุภาคมาใช้เป็นวัสดุทดแทนไม้ ซึ่งเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการนำพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วมาใช้งานในรูปแบบอื่น ๆ สร้างโอกาสให้กับธุรกิจอื่น ๆ (additional business) เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุ และลดปัญหาสิ่งแวดล้อม ปัจจุบันแนวโน้มในการนำ plastic lumber มาใช้ทดแทนไม้มีมากขึ้น เนื่องจากข้อดีต่าง ๆ ของ plastic lumber ที่เหนือกว่าไม้

## บทที่ 3

### วัสดุและการทดลอง

#### 3.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย HDPE ที่ผ่านการใช้งานแล้ว ซึ่งได้จากขวดน้ำดื่มชนิด ขุ่น และ PET ที่ผ่านการใช้งานแล้ว ได้มาจากขวดน้ำดื่มชนิดใส และขวดน้ำอัดลม ทำความสะอาด ขวดด้วยน้ำและบดให้มีขนาดเล็กกลงโดยใช้เครื่องบด (mechanical grinder)

สารตัวเติมที่ใช้ในการศึกษา คือ เส้นใยแก้ว (E-glass, Saint-Gobain Vetrotex) ซึ่งมีความหนาแน่น 2.33 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เส้นใยแก้วที่ใช้อยู่ในรูปของโรฟวิง (roving) นำมาตัดให้มี ความยาวเฉลี่ยประมาณ 4 มิลลิเมตร และแคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate, CaCO<sub>3</sub>) มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 2.05 ไมโครเมตร และมีความหนาแน่น 1.51 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

สารช่วยให้เข้ากัน (compatibilizer) ที่ใช้ คือ polyethylene grafted maleic anhydride (PE-g-MA, Fusabond<sup>®</sup> E MB100D) ของบริษัท DuPont

#### 3.2 การเตรียมและการขึ้นรูปชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมโพสิต

อัตราส่วนของ HDPE และ PET ที่ใช้ในการศึกษา คือ 20 ต่อ 80 โดยน้ำหนัก นำ HDPE และ PET ไปทำการอบเพื่อกำจัดความชื้นที่อุณหภูมิ 105 และ 160 องศาเซลเซียส (°C) ตามลำดับ ก่อนนำไปทำการผสม ปริมาณสารช่วยให้เข้ากัน คือ 6 ส่วนต่อ 100 ส่วนของพอลิเมอร์ (part per hundred part of polymer, phr) [กษมา, 2552] และปริมาณเส้นใยแก้วชนิดสั้นและแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ คือ 10, 20, 30 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์ผสม (phr)

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

การขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบทำโดยใช้เครื่องฉีด (injection molding, Chuan Lih Fa: CLF-80T) ลักษณะชิ้นงานเป็นชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติด้านการดึง (tensile properties) สมบัติด้านการดัด (flexural properties) สมบัติด้านการรับการกระแทกชนิด Izod (Izod impact properties) และอุณหภูมิ บิดเบี้ยว (heat distortion temperature, HDT)

### 3.3 การวิเคราะห์และตรวจสอบพอลิเมอร์ พอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมโพสิต

#### 3.3.1 สมบัติทางกายภาพ (physical properties)

##### ความหนาแน่น (density)

การวัดความหนาแน่นของพอลิเมอร์ พอลิเมอร์ผสม และพอลิเมอร์ผสมที่มีการใส่สารตัวเติม pyknometer โดยใช้ น้ำกลั่น เป็นตัวกลาง (medium) ยกเว้นในกรณีของ HDPE ใช้เมทิล เอทิล คี โทน (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 ( $^{\circ}\text{C/hr}$ )

#### 3.3.2 สมบัติทางกล (mechanical properties)

##### สมบัติด้านการดึง (tensile properties)

สมบัติด้านการดึงประกอบด้วย ความทนต่อแรงดึง (tensile strength) โมดูลัสของแรงดึง (tensile modulus) การดึงยืดที่ตำแหน่งขาด (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

##### 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

##### 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)

การทดสอบความหนืดของพอลิเมอร์ พอลิเมอร์ผสม และพอลิเมอร์ผสมที่มีการใส่สารตัวเติมที่อัตราเจือปนต่าง ๆ วัดโดยใช้เครื่อง capillary rheometer (Kayeness Capillary Rheometer) อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ คือ 270°C

### 3.3.4 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<sub>c</sub>)

เปอร์เซ็นต์ผลึกสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\% \text{ crystallinity} = (\Delta H_{\text{sample}} / \Delta H_{100\% \text{ crystalline}}) \times 100 \quad (1)$$

$\Delta H_{\text{sample}}$  คือความร้อนของการฟิวชัน (heat of fusion) ของตัวอย่าง (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]

### 3.3.5 สมบัติทางสัณฐานวิทยา (morphological properties)

การตรวจสอบสมบัติทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม และพอลิเมอร์ผสมที่มีการใส่สารตัวเติมที่อัตราเจือปนต่าง ๆ ทำโดยใช้ scanning electron microscope (SEM, JEOL model 6400) การเตรียมตัวอย่าง ทำโดยการนำชิ้นงานตัวอย่างไปแช่ในไนโตรเจนเหลว ทำการหักชิ้นงานตัวอย่าง และนำส่วนพื้นผิวที่ได้จากการหัก (fracture surface) ไปทำการเคลือบด้วยทองคำก่อนนำไปศึกษา

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของสารตัวเติมสองชนิด คือ เส้นใยแก้วชนิดสั้น (short glass fiber, SGF) และแคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate, CaCO<sub>3</sub>) ต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล สมบัติทางกระแสวิทยา สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง HDPE และ PET ที่อัตราส่วน 20 ต่อ 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และผลของปริมาณของสารตัวเติมที่ ปริมาณ 10, 20, 30 ส่วนต่อ 100 ส่วนของพอลิเมอร์ผสม (part per hundred part of polymer, phr) นอกจากนี้มีการศึกษาผลของสารช่วยให้เข้ากัน คือ PE-g-MA ที่ปริมาณ 6 phr ต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล สมบัติทางกระแสวิทยา สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง HDPE และ PET ที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิดสั้นและแคลเซียมคาร์บอเนต

#### 4.1 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของ HDPE, PET พอลิเมอร์ผสมระหว่าง HDPE และ PET และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง HDPE และ PET ที่มีการใส่เส้นใยแก้วชนิดสั้นและแคลเซียมคาร์บอเนต ที่ปริมาณ 10, 20, 30 phr แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสมอยู่ระหว่างความหนาแน่นของ HDPE และ PET เมื่อมีการใส่สารตัวเติมทั้งแคลเซียมคาร์บอเนตและเส้นใยแก้วชนิดสั้นลงในพอลิเมอร์ผสม พบว่าความหนาแน่นมีค่าสูงขึ้นและเพิ่มขึ้นกับปริมาณสารตัวเติม ซึ่งความหนาแน่นของพอลิเมอร์จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใส่สารตัวเติมทั่ว ๆ ไป [Hancock, 1995] เนื่องจากสารตัวเติมทั้งสองมีความหนาแน่นมากกว่าพอลิเมอร์ เมื่อพิจารณาผลของสารช่วยให้เข้ากัน พบว่าไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง HDPE และ PET ที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิดสั้นและแคลเซียมคาร์บอเนต

ตารางที่ 4.1 ความหนาแน่นของ HDPE, PET, HDPE/PET blend และ HDPE/PET blends ที่ปริมาณเส้นใยแก้วชนิดสั้นและแคลเซียมคาร์บอเนตต่าง ๆ

วัสดุ	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
HDPE	0.97±0.02
PET	1.38±0.01
HDPE/PET 20/80	1.18±0.02
HDPE/PET/CaCO <sub>3</sub> 20/80/10	1.19±0.09
HDPE/PET/CaCO <sub>3</sub> 20/80/20	1.24±0.09
HDPE/PET/CaCO <sub>3</sub> 20/80/30	1.32±0.09
HDPE/PET/SGF 20/80/10	1.21±0.04
HDPE/PET/SGF 20/80/20	1.25±0.10
HDPE/PET/SGF 20/80/30	1.32±0.01
HDPE/PET/CaCO <sub>3</sub> /PE-g-MA 20/80/10/6	1.19±0.03
HDPE/PET/CaCO <sub>3</sub> /PE-g-MA 20/80/20/6	1.25±0.10
HDPE/PET/CaCO <sub>3</sub> /PE-g-MA 20/80/30/6	1.33±0.12
HDPE/PET/SGF/PE-g-MA 20/80/10/6	1.24±0.01
HDPE/PET/SGF/PE-g-MA 20/80/20/6	1.27±0.11
HDPE/PET/SGF/PE-g-MA 20/80/30/6	1.35±0.09

#### 4.2 อุณหภูมิบิดเบี้ยว

โดยทั่วไปการใส่สารตัวเติมส่งผลต่อการปรับปรุงอุณหภูมิบิดเบี้ยวของพอลิเมอร์ จากตารางที่ 4.2 พบว่าแคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลต่อการปรับปรุง HDT ของพอลิเมอร์ผสมเล็กน้อยและเพิ่มขึ้นกับปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนต และการใส่สารช่วยให้เข้ากันไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงค่า HDT ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Xanthos และคณะ พบว่าการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเอทิลีนและแคลเซียมคาร์บอเนต โดยการปรับเปลี่ยนพอลิเอทิลีนด้วยมาเลอิกแอนไฮดราด ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่า HDT ของพอลิเอทิลีนที่มีการใส่แคลเซียมคาร์บอเนต [Xanthos et al., 1995] แต่ในกรณีการใส่เส้นใยแก้วชนิดสั้น พบว่า HDT มีค่าเพิ่มขึ้นและเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยแก้ว นอกจากนี้ สารช่วยให้เข้ากันมีผลต่อการปรับปรุงการยึดติดระหว่างเส้นใยแก้วและเมทริกซ์ ส่งผลให้ HDT มีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.2 HDT ของ HDPE, PET, HDPE/PET blend และ HDPE/PET blends ที่ปริมาณเส้นใย แก้ว ชนิดสั้นและแคลเซียมคาร์บอเนตต่าง ๆ

วัสดุ	HDT (°C)
HDPE	65.33±0.30
PET	69.30±0.30
HDPE/PET 20/80	69.00±0.00
HDPE/PET/CaCO <sub>3</sub> 20/80/10	69.33±0.29
HDPE/PET/CaCO <sub>3</sub> 20/80/20	70.50±0.00
HDPE/PET/CaCO <sub>3</sub> 20/80/30	71.33±0.58
HDPE/PET/SGF 20/80/10	71.66±0.29
HDPE/PET/SGF 20/80/20	74.16±0.66
HDPE/PET/SGF 20/80/30	77.66±0.29
HDPE/PET/CaCO <sub>3</sub> /PE-g-MA 20/80/10/6	70.00±0.00
HDPE/PET/CaCO <sub>3</sub> /PE-g-MA 20/80/20/6	72.00±0.00
HDPE/PET/CaCO <sub>3</sub> /PE-g-MA 20/80/30/6	72.16±0.28
HDPE/PET/SGF/PE-g-MA 20/80/10/6	72.16±0.14
HDPE/PET/SGF/PE-g-MA 20/80/20/6	75.50±0.50
HDPE/PET/SGF/PE-g-MA 20/80/30/6	80.00±0.50

#### 4.3 สมบัติทางกล

ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.1-4.6 แสดงสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์ผสมที่มีการใส่เส้นใยแก้วชนิดสั้นและแคลเซียมคาร์บอเนต การเติมเส้นใยแก้วชนิดสั้น เป็นวิธีที่ใช้กันมากในการปรับปรุงสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ เนื่องมาจากการมีสมบัติทางกลที่ดีของเส้นใย ในการศึกษาครั้งนี้มีการเติมเส้นใยแก้วชนิดสั้น 10, 20, 30 phr เข้าไปในพอลิเมอร์ผสม พบว่าเส้นใยแก้วมีผลต่อการปรับปรุง tensile strength, tensile modulus, flexural strength และ flexural modulus ของพอลิเมอร์ผสม และสมบัติทางกลมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยแก้ว เมื่อพิจารณาผลสารช่วยให้เข้ากัน พบว่าสารช่วยให้เข้ากันส่งผลต่อการปรับปรุง tensile properties และ flexural properties การเพิ่มขึ้นของสมบัติทางกล เนื่องมาจากการมีอันตรกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นระหว่างหมู่แอนไฮดรอกซิลของสารช่วยให้เข้ากันกับ หมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยแก้ว ส่งผลต่อการมีการยึดติดระหว่างเฟสที่ดี การถ่ายโอนแรงที่กระทำผ่านเมทริกซ์ไปยังเส้นใยขึ้นกับการยึดติดระหว่างเมทริกซ์และเส้นใย การมีการยึดติดที่ดีทำให้

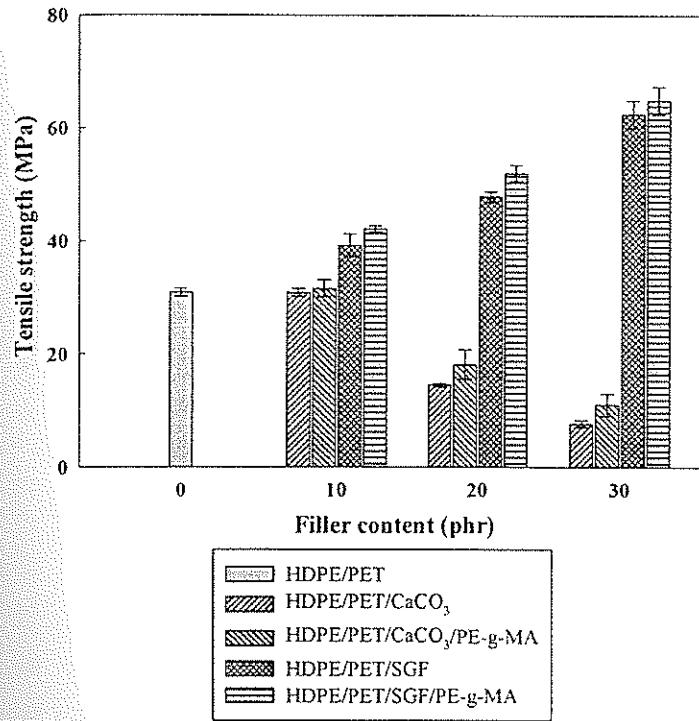
เส้นใยถูกหุ้มด้วยเมทริกซ์ ซึ่งส่งผลต่อการถ่ายโอนและกระจายแรงที่กระทำระหว่างเส้นใย [Tselios, et al., 1999] เมื่อมีการใส่เส้นใยแก้ว พบว่า tensile strain at break มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนสารช่วยให้เข้ากัน ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า tensile strain at break นอกจากนี้ notched Izod impact strength ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใส่เส้นใยแก้วและขึ้นกับปริมาณเส้นใยแก้ว สารช่วยให้เข้ากันยังส่งผลต่อการปรับปรุงค่า impact strength

เมื่อพิจารณาผลของแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าการใส่แคลเซียมส่งผลต่อการลดลงของ tensile strength, tensile strain at break, flexural strength และ impact strength อย่างมีนัยสำคัญ และการลดลงของสมบัติทางกลดังกล่าวขึ้นกับปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนต ดังแสดงในรูปที่ 4.1-4.6 โดยเฉพาะเมื่อใส่แคลเซียมคาร์บอเนตมากกว่า 10 phr พบการลดลงของ tensile strength, tensile strain at break, flexural strength, impact strength อย่างมีนัยสำคัญ การลดลงของสมบัติทางกล อาจเนื่องมาจากการเกิดการกระจายตัวที่ไม่ดีของแคลเซียมคาร์บอเนตในพอลิเมอร์ เป็นผลจากแคลเซียมคาร์บอเนตไม่เข้ากันกับพอลิเมอร์ ส่วน tensile modulus และ flexural modulus มีค่าเปลี่ยนแปลงและเพิ่มขึ้นตามปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนต เมื่อมีการใส่สารช่วยให้เข้ากัน ส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติทางกล เนื่องมาจากการปรับปรุงการยึดติดระหว่างสารตัวเติมและพอลิเมอร์ ดังนั้นการใส่สารตัวเติมชนิดแคลเซียมคาร์บอเนตมีข้อดีในด้านการลดต้นทุน เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีราคาถูกกว่าพอลิเมอร์มาก ซึ่งราคาของแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ที่ประมาณ 2 บาทต่อกิโลกรัม แต่อย่างไรก็ตามต้องพิจารณาถึงปริมาณที่ใส่เพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์

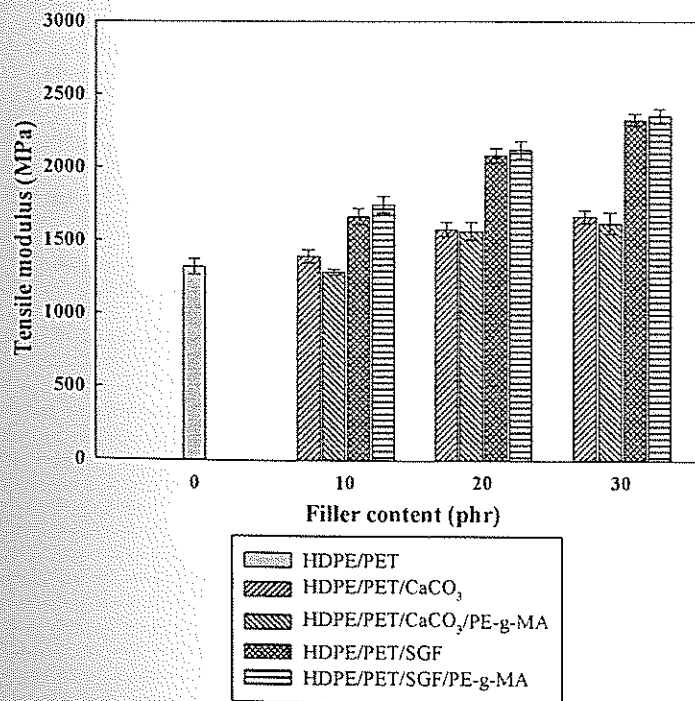


ตารางที่ 4.3 Tensile strength, tensile strain at break, Young's modulus, flexural strength, flexural modulus, impact strength ของ HDPE, PET, HDPE/PET blend และ HDPE/PET blends ที่ปริมาณเส้นใยแก้วชนิดสั้นและเคลือบคาร์บอนแตกต่างกัน

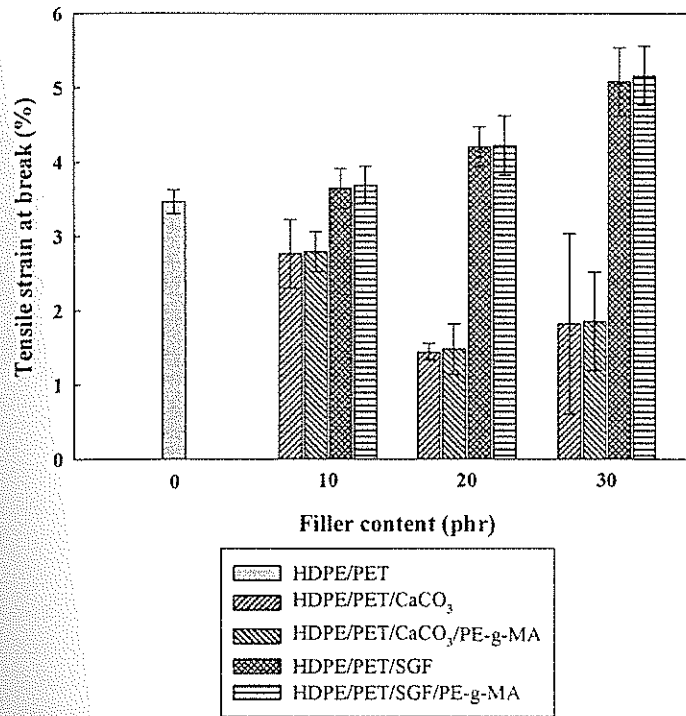
วัสดุ	Tensile			Flexural			Impact strength (J/m <sup>3</sup> )
	strength (MPa)	modulus (MPa)	strain at break (%)	strength (MPa)	modulus (MPa)	modulus (MPa)	
HDPE/PET 20/80	30.85±0.73	1320.73±53.03	3.46±0.16	54.49±0.47	1872.54±44.90		2578.41±77.12
HDPE/PET/CaCO <sub>3</sub> 20/80/10	30.82±0.73	1393.91±45.66	2.76±0.46	40.06±1.22	2093.91±49.57		1782.20±64.22
HDPE/PET/CaCO <sub>3</sub> 20/80/20	14.50±0.38	1580.00±47.61	1.44±0.11	27.74±4.41	2599.04±27.02		1232.57±45.77
HDPE/PET/CaCO <sub>3</sub> 20/80/30	7.71±0.61	1664.95±44.75	1.82±1.21	23.15±3.11	3260.72±22.90		1038.77±24.36
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		3678.32±14.48
HDPE/PET/SGF 20/80/20	47.78±0.96	2082.48±50.36	4.20±0.27	95.32±1.82	4550.36±48.04		4527.94±97.16
HDPE/PET/SGF 20/80/30	62.40±2.47	2327.17±40.34	5.08±0.46	104.75±1.38			5053.78±51.07
HDPE/PET/CaCO <sub>3</sub> /PE-g-MA 20/80/10/6	31.55±1.53	1287.41±19.09	2.79±0.27	46.06±0.67	2012.54±27.50		1890.25±62.64
HDPE/PET/CaCO <sub>3</sub> /PE-g-MA 20/80/20/6	18.16±2.58	1567.42±60.32	1.48±0.34	34.25±4.25	2367.83±73.06		1476.35±98.35
HDPE/PET/CaCO <sub>3</sub> /PE-g-MA 20/80/30/6	11.09±1.95	1621.27±72.26	1.85±0.66	30.69±1.56	2911.87±60.56		1116.85±47.87
HDPE/PET/SGF/PE-g-MA 20/80/10/6	42.11±0.61	1748.52±55.96	3.69±0.25	69.57±1.97	2852.19±31.19		4370.31±28.02
HDPE/PET/SGF/PE-g-MA 20/80/20/6	51.94±1.42	2118.88±61.46	4.22±0.40	96.00±1.53	4594.54±26.91		4946.53±91.06
HDPE/PET/SGF/PE-g-MA 20/80/30/6	64.85±2.46	2353.27±50.49	5.16±0.40	117.67±2.67	4624.61±29.76		5457.22±53.11



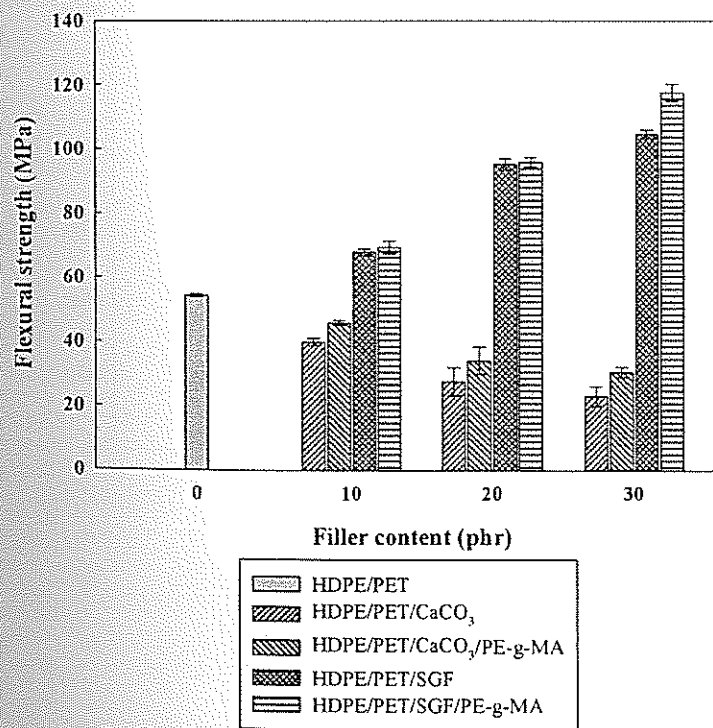
รูปที่ 4.1 Tensile strength ของ HDPE/PET blends และ HDPE/PET blends ที่ปริมาณเส้นใยแก้วชนิดสั้นและแคลเซียมคาร์บอเนตต่าง ๆ



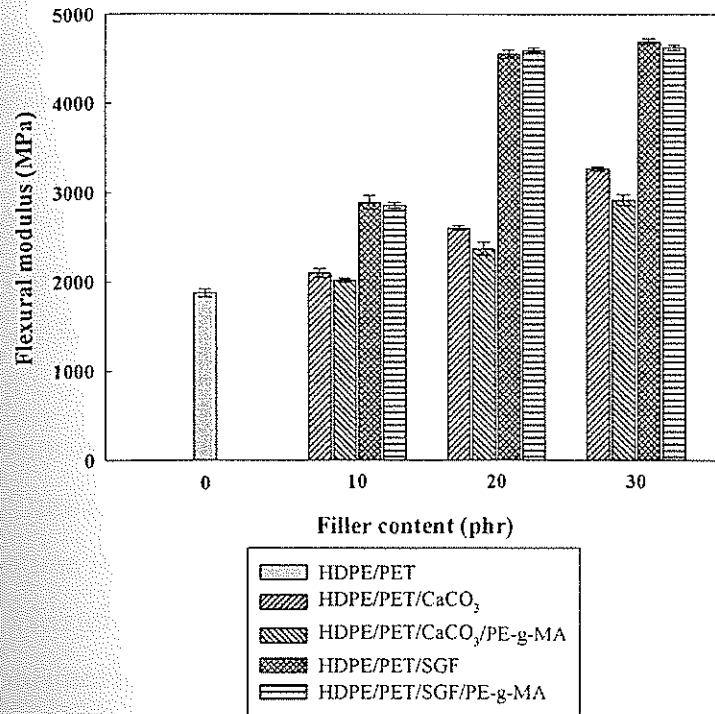
รูปที่ 4.2 Tensile modulus ของ HDPE/PET blends และ HDPE/PET blends ที่ปริมาณเส้นใยแก้วชนิดสั้นและแคลเซียมคาร์บอเนตต่าง ๆ



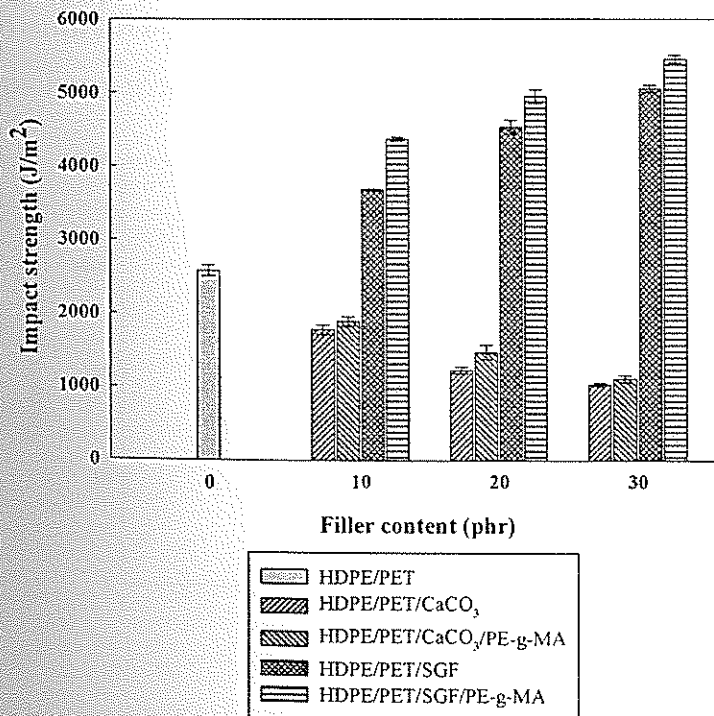
รูปที่ 4.3 Tensile strain at break ของ HDPE/PET blends และ HDPE/PET blends ที่ปริมาณเส้นใยแก้วชนิดสั้นและแคลเซียมคาร์บอเนตต่าง ๆ



รูปที่ 4.4 Flexural strength ของ HDPE/PET blends และ HDPE/PET blends ที่ปริมาณเส้นใยแก้วชนิดสั้นและแคลเซียมคาร์บอเนตต่าง ๆ



รูปที่ 4.5 Flexural modulus ของ HDPE/PET blends และ HDPE/PET blends ที่ปริมาณเส้นใยแก้วชนิดสั้นและเคลือบคาร์บอนแตกต่างกัน



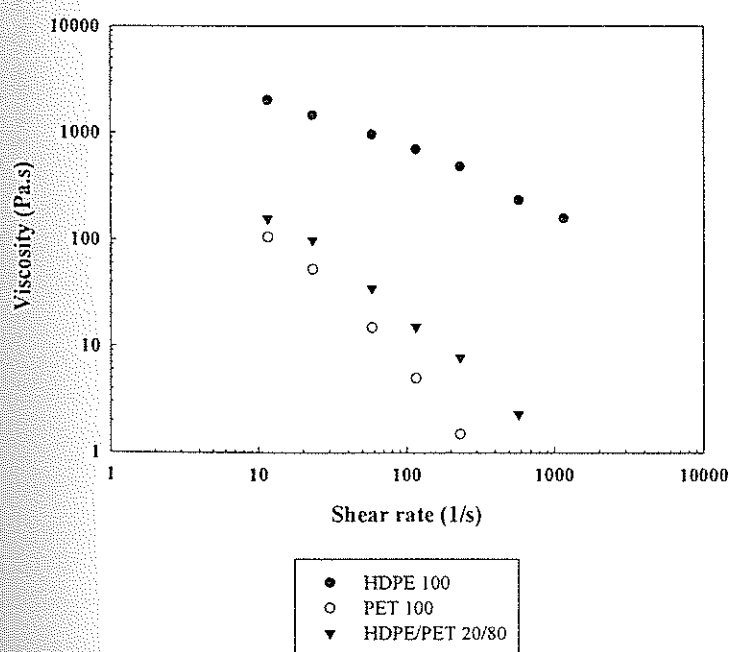
รูปที่ 4.6 Impact strength ของ HDPE/PET blends และ HDPE/PET blends ที่ปริมาณเส้นใยแก้วชนิดสั้นและเคลือบคาร์บอนแตกต่างกัน

#### 4.4 สมบัติทางกระแสวิทยา

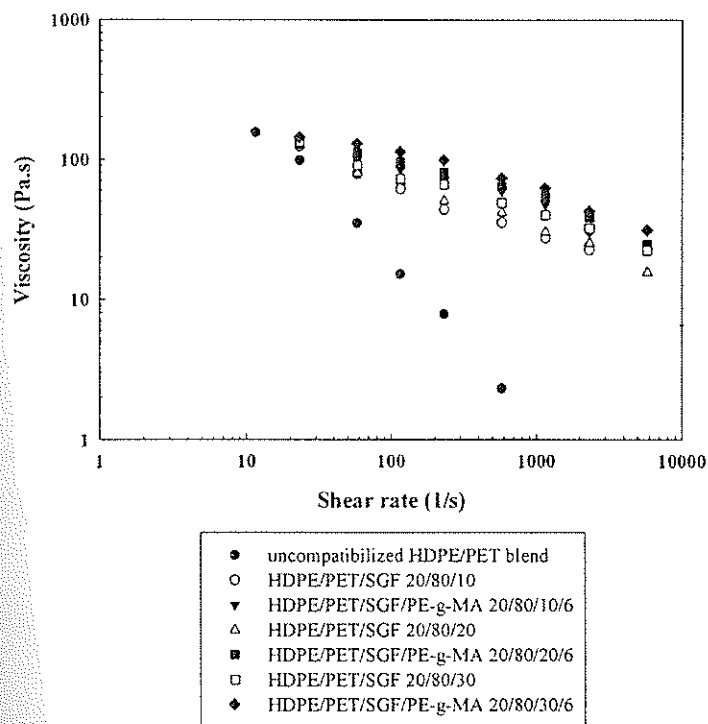
ผลของสารตัวเติมในรูปของอนุภาค (dispersed particulates) เส้นใย (fibers) หรือเกล็ด (flakes) ต่อสมบัติทางกระแสวิทยาของพอลิเมอร์หลอม สัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการขึ้นรูป (processability) ซึ่งเกี่ยวข้องกับทั้งกระบวนการผสมและการขึ้นรูป ผลของสารตัวเติมต่อความหนืดขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วย ปริมาณ ขนาด รูปร่าง อัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของสารตัวเติม อันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมกับพอลิเมอร์ อัตราเฉือน การเกาะกลุ่ม (agglomerates) การจัดเรียงตัวของเส้นใยหรือเกล็ด การทำทรีทเมนต์ของพื้นผิว (surface treatment) [Xanthos, 2005]

ความหนืดที่อัตราเฉือนต่าง ๆ ของ HDPE, PET และ HDPE/PET 20/80 blends ที่อุณหภูมิ 270°C แสดงในรูปที่ 4.7 พบว่า ที่ทุก ๆ ค่าของอัตราเฉือน ความหนืดของ HDPE มีค่ามากกว่าของ PET และ HDPE/PET 20/80 blends มีค่าความหนืดอยู่ระหว่าง HDPE และ PET

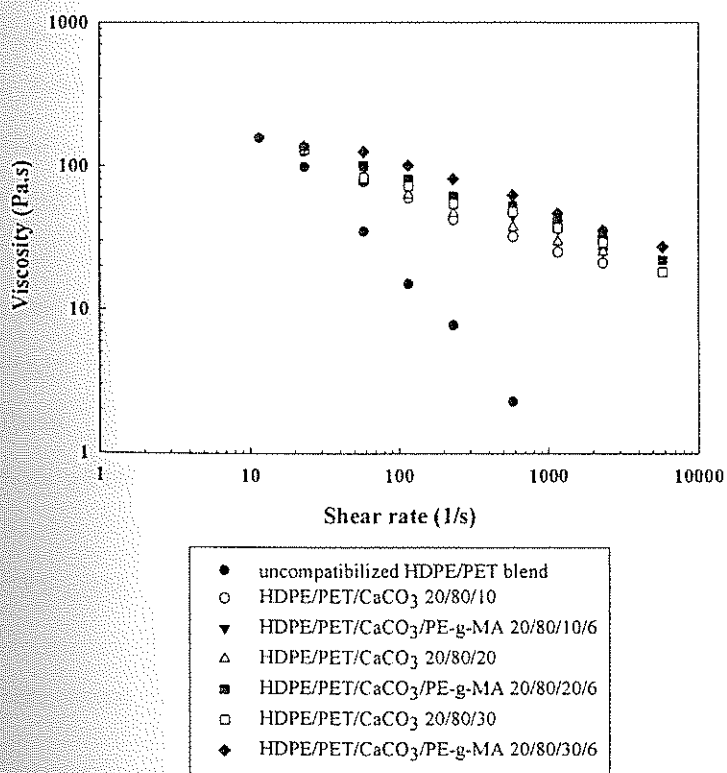
ความหนืดที่อัตราเฉือนต่าง ๆ ของ HDPE/PET blends และ HDPE/PET blends ที่มีปริมาณเส้นใยแก้วชนิดสั้นและแคลเซียมคาร์บอเนตต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ พบว่าเมื่อใส่สารตัวเติมทั้งสองส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความหนืด โดยที่พอลิเมอร์ผสมที่มีการใส่เส้นใยแก้วมีความหนืดสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการใส่แคลเซียมคาร์บอเนต และความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารตัวเติม เนื่องจากสารตัวเติมจะขัดขวางการเคลื่อนที่โมเลกุลของพอลิเมอร์ นอกจากนี้สารช่วยให้เข้ากันส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความหนืดของพอลิเมอร์ผสมที่มีการใส่สารตัวเติม เนื่องมาจากสารช่วยให้เข้ากันส่งผลต่อการปรับปรุงการยึดติดของสารตัวเติมและพอลิเมอร์ [Xanthos, 2005]



รูปที่ 4.7 ความหนืดที่อัตราเฉือนต่าง ๆ ของ HDPE, PET และ HDPE/PET 20/80 blend



รูปที่ 4.8 ความหนืดที่อัตราเฉือนต่าง ๆ ของ HDPE/PET blends ที่ปริมาณเส้นใยแก้วต่าง ๆ



รูปที่ 4.9 ความหนืดที่อัตราเฉือนต่าง ๆ ของ HDPE/PET blends ที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตต่าง ๆ

## 4.5 สมบัติทางความร้อน

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิหลอม ( $T_m$ ) อุณหภูมิตกผลึก ( $T_c$ ) และเปอร์เซ็นต์ผลึก (% Xc) ของ HDPE และ PET ใน HDPE/PET blends ที่มีการใส่สารตัวเติมที่มีและไม่มีสารช่วยให้เข้ากัน

วัสดุ	HDPE component			PET component		
	$T_m$ (°C)	$T_c$ (°C)	%Xc	$T_m$ (°C)	$T_c$ (°C)	%Xc
HDPE	132.35	116.80	70.94	-	-	-
PET	-	-	-	246.77	198.41	19.87
HDPE/PET 20/80	135.60	119.90	12.18	246.76	198.84	15.78
HDPE/PET/CaCO <sub>3</sub> 20/80/10	134.83	119.90	10.50	244.47	199.63	15.53
HDPE/PET/CaCO <sub>3</sub> 20/80/20	134.83	119.90	11.40	245.37	199.56	16.28
HDPE/PET/CaCO <sub>3</sub> 20/80/30	134.07	119.13	9.37	242.36	199.80	16.83
HDPE/PET/SGF 20/80/10	134.83	119.13	10.31	246.00	203.47	27.41
HDPE/PET/SGF 20/80/20	134.83	119.90	10.47	246.77	204.23	28.46
HDPE/PET/SGF 20/80/30	134.83	119.13	10.14	245.23	201.17	28.87
HDPE/PET/CaCO <sub>3</sub> / PE-g-MA 20/80/10/6	134.83	119.13	11.70	245.20	199.00	17.25
HDPE/PET/CaCO <sub>3</sub> / PE-g-MA 20/80/20/6	134.83	119.13	10.71	245.23	199.63	13.83
HDPE/PET/CaCO <sub>3</sub> / PE-g-MA 20/80/30/6	134.07	119.13	10.31	246.83	199.20	14.22
HDPE/PET/SGF/PE-g-MA 20/80/10/6	134.07	119.90	9.54	246.37	198.10	19.94
HDPE/PET/SGF/PE-g-MA 20/80/20/6	134.83	119.90	10.70	244.47	198.10	15.94
HDPE/PET/SGF/PE-g-MA 20/80/30/6	134.83	119.90	10.54	245.23	199.63	16.38

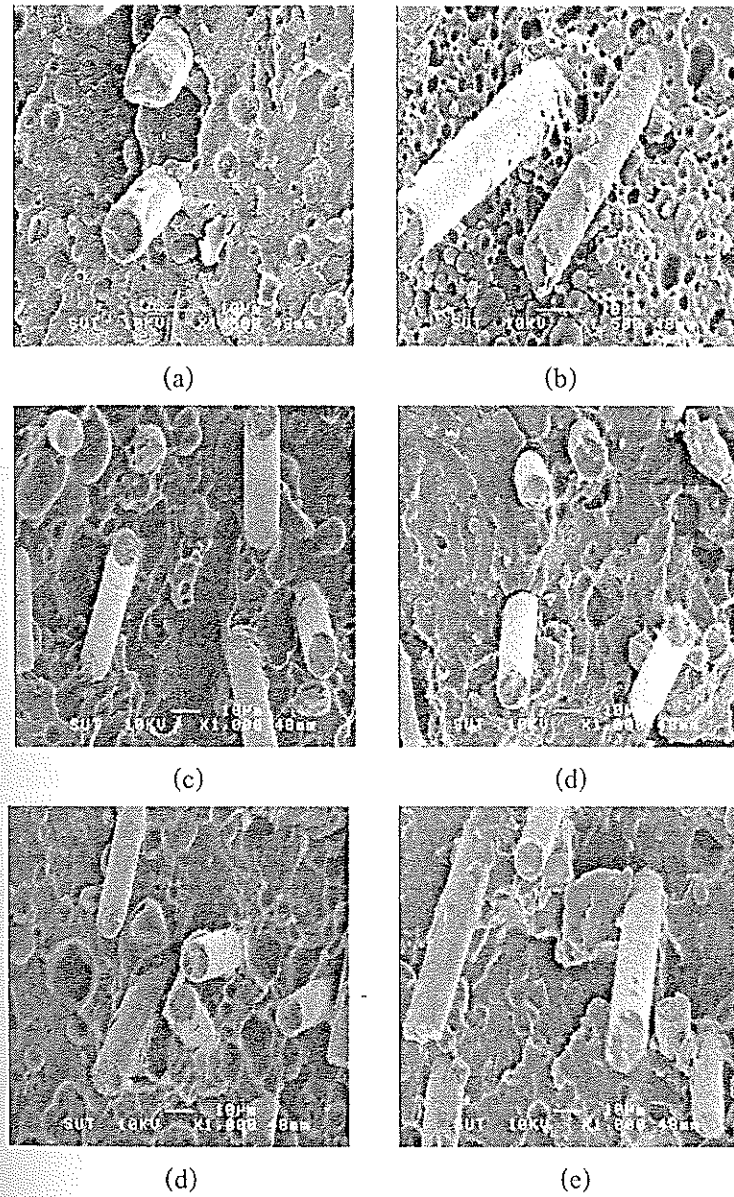
อุณหภูมิหลอม ( $T_m$ ) อุณหภูมิตกผลึก ( $T_c$ ) และเปอร์เซ็นต์ผลึก ( $\% X_c$ ) ของ HDPE และ PET component ใน HDPE/PET blends ที่มีการใส่สารตัวเติมทั้งสองชนิดที่มีและไม่มีสารช่วยให้เข้ากัน แสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่าเมื่อมีการใส่สารตัวเติม คือ เส้นใยแก้ว ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิหลอม แต่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิตกผลึกและเปอร์เซ็นต์ผลึกในเฟสของ PET สารช่วยให้เข้ากันส่งผลต่อการลดลงของปริมาณผลึกเล็กน้อย จากการศึกษาของ Joshi และคณะ [Joshi et al., 1994] พบว่าไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญของจุดเริ่มต้นของการหลอม (onset of melting) ของทั้ง PBT และ HDPE เมื่อมีการใส่เส้นใยแก้ว ซึ่งชี้ให้เห็นว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดของผลึก (crystallite size) เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์ผลึกของ PBT พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมีการใส่เส้นใยแก้ว เนื่องจาก heterogeneous nucleation นอกจากนี้ เส้นใยแก้วส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิตกผลึก ซึ่งชี้ให้เห็นว่า เส้นใยแก้วมีส่วนในการช่วยในการเกิดผลึกของ PBT และ HDPE ในพอลิเมอร์ผสม

เมื่อพิจารณาผลของแคลเซียมคาร์บอเนตพบว่าไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิตกผลึก และปริมาณผลึกของ HDPE และ PET นอกจากนี้สารช่วยให้เข้ากันไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิตกผลึก และเปอร์เซ็นต์ผลึกของ HDPE/PET blends จากการศึกษาของ Gonzalez และคณะ [Gonzalez et al., 2002] พบว่าอุณหภูมิหลอมของ PP และ HDPE ใน PP/HDPE blend ไม่แตกต่างจากอุณหภูมิหลอมของ PP และ HDPE แคลเซียมคาร์บอเนตทำหน้าที่เป็น nucleating agent ในระหว่างการเกิดการตกผลึก (crystallization) ของ PP/HDPE blend เนื่องจากค่า enthalpy of fusion ของ PP/HDPE blend ที่มีการใส่แคลเซียมคาร์บอเนตมีค่ามากกว่าของ PP/HDPE blend แต่การทรีทเมนต์แคลเซียมคาร์บอเนตด้วยสารคู่ควบ (coupling agents) ชนิดต่าง ๆ ลดประสิทธิภาพการเป็น nucleating agent ของแคลเซียมคาร์บอเนต นอกจากนี้การใช้สารคู่ควบไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิหลอมและอุณหภูมิตกผลึก

โดยทั่วไป การเกิดผลึก (nucleation) โดยสารตัวเติม ส่งผลต่อปริมาณผลึก (crystallinity) และยังส่งผลต่อสมบัติทางกลและสมบัติอื่น ๆ ของพอลิเมอร์ ซึ่งการเกิดผลึกจะขึ้นกับชนิดของสารตัวเติม การทรีทเมนต์ของพื้นผิว ซึ่งมีการศึกษาพบว่า แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นสารก่อผลึก (nucleating agent) ในพอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน การทำทรีทเมนต์ของพื้นผิวของสารตัวเติมส่งผลต่อการลดของผลการเกิดผลึก [Rothon and Hancock, 1995]



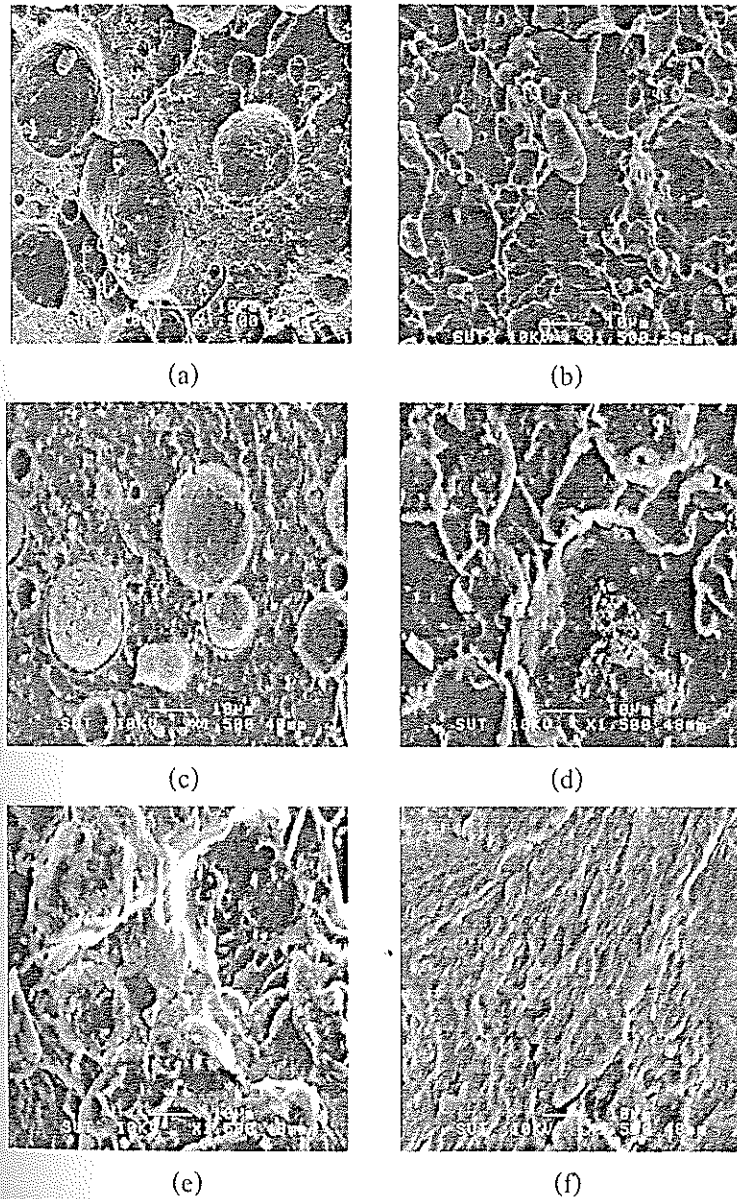
## 4.6 สมบัติทางสัณฐานวิทยา



รูปที่ 4.10 SEM micrographs (a) HDPE/PET/SGF 20/80/10 (b) HDPE/PET/SGF/PE-g-MA 20/80/10/6 (c) HDPE/PET/SGF 20/80/20 (d) HDPE/PET/SGF/PE-g-MA 20/80/20/6 (e) HDPE/PET/SGF 20/80/30 (f) HDPE/PET/SGF/PE-g-MA 20/80/30/6 ( $\times 1000$ )

รูปที่ 4.10 แสดง SEM micrographs ของ HDPE/PET/SGF ที่ปริมาณเส้นใยแก้ว 10, 20, 30 phr ที่มีและไม่มีสารช่วยให้เข้ากัน เมื่อมีการใส่สารช่วยให้เข้ากัน พบว่าขนาดของเฟสกระจายมีขนาดเล็กลงและมีพอลิเมอร์มาติดที่เส้นใยแก้วมากขึ้น สารช่วยให้เข้ากันมีส่วนในการเพิ่มการยึดติดระหว่างพื้นผิว (interfacial adhesion) ระหว่างเส้นใยแก้วและเมทริกซ์ ซึ่งสอดคล้องกับผลของสมบัติ

ทางกล พบว่าสมบัติทางกลของระบบที่มีการใส่สารช่วยให้เข้ากันมีค่าสูงกว่าระบบที่ไม่ใส่สารช่วยให้เข้ากัน



รูปที่ 4.11 SEM micrographs (a) HDPE/PET/CaCO<sub>3</sub> 20/80/10 (b) HDPE/PET/CaCO<sub>3</sub>/PE-g-MA 20/80/10/6 (c) HDPE/PET/CaCO<sub>3</sub> 20/80/20 (d) HDPE/PET/CaCO<sub>3</sub>/PE-g-MA 20/80/20/6 (e) HDPE/PET/CaCO<sub>3</sub> 20/80/30 (f) HDPE/PET/CaCO<sub>3</sub>/PE-g-MA 20/80/30/6 (x1500)

รูปที่ 4.11 แสดง SEM micrographs ของ HDPE/PET/CaCO<sub>3</sub> ที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต 10, 20, 30 phr ที่มีและไม่มีสารช่วยให้เข้ากัน เมื่อมีการใส่สารช่วยให้เข้าพบว่าขนาดของเฟสกระจายลดลง และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.10 (c) และ 4.10 (f) พบความแตกต่างอย่างมาก การใส่สาร

ช่วยให้เข้ากันปรับปรุงเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneity) เนื่องมาจากการลดลงของขนาดของเฟสกระจาย และการยึดติดที่ดี

#### 4.7 การเปรียบเทียบความหนาแน่น ราคาและสมบัติทางกลของไม้สัก พอลิเมอร์ผสม และพอลิเมอร์ผสมที่มีการใส่สารตัวเติม

ตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบความหนาแน่น ราคาและสมบัติทางกลของไม้สัก ซึ่งจัดเป็นไม้เนื้ออ่อน HDPE/PET blends และ HDPE/PET blends ที่มีการใส่เส้นใยแก้วชนิดสั้นที่ปริมาณต่าง ๆ ซึ่งพบว่าความหนาแน่นของไม้สักมีค่าต่ำกว่าของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์ผสมที่มีการใส่เส้นใยแก้ว การใส่เส้นใยแก้วลงในพอลิเมอร์ผสม ทำให้ค่า flexural strength มีค่ามากกว่าของไม้สัก แต่ค่า flexural modulus ยังคงมีค่าต่ำกว่าของไม้สัก ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และ 4.13 เมื่อพิจารณาราคาคต่อลูกบาศก์ฟุตของไม้สัก พบว่ามีค่าต่ำกว่าของ HDPE/PET blends และ HDPE/PET blends ที่ปริมาณเส้นใยแก้วชนิดสั้นต่าง ๆ

จากการรายงานพบว่า ในการประยุกต์ใช้งาน plastic lumber ที่ไม่ประสบความสำเร็จส่วนมาก เนื่องมาจากการขาดความเข้าใจในความแตกต่างของสมบัติทางกลระหว่างไม้และ plastic lumber ถึงแม้จะมีการผลิต plastic lumber ให้มีขนาดทั่วไปเช่นเดียวกับไม้ แต่ก็ไม่เหมาะสมที่จะนำ plastic lumber มาใช้โดยตรงแทนไม้ที่มีขนาดใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะการใช้งานที่ต้องมีการรับแรง (load bearing applications)

การปรับเปลี่ยนสมบัติทางกลของ plastic lumber สามารถทำได้โดยการการเติมอนุภาคหรือเส้นใยเข้าไป 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

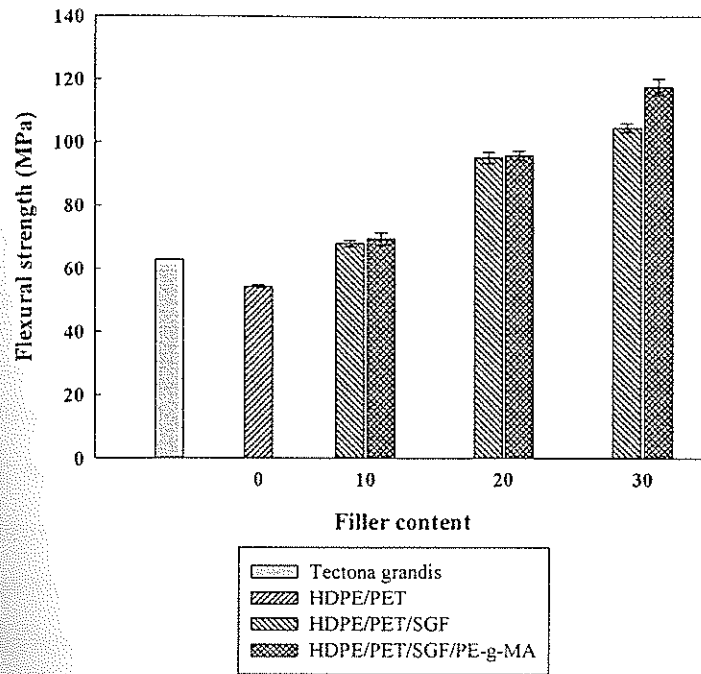
ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบความหนาแน่น ราคาและสมบัติทางกลของไม้สัก HDPE/PET blends และ HDPE/PET blends ที่ปริมาณเส้นใยแก้วชนิดสั้นต่าง ๆ

วัสดุ	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	ราคา (บาท/ft <sup>3</sup> )	Tensile		Flexural		Impact strength (J/m <sup>2</sup> )
			strength (MPa)	modulus (MPa)	strength (MPa)	modulus (MPa)	
ไม้สัก (Tectona grandis) <sup>(*)</sup>	0.62	508.09**	-	-	62.88	8002.31	-
HDPE/PET (20/80)	1.18±0.02	372.62	30.85±0.73	1320.73±53.03	54.49±0.47	1872.54±44.90	2578.41±77.12
HDPE/PET/SGF 20/80/10	1.20±0.14	621.02	39.19±1.96	1666.85±54.87	68.06±0.97	2887.53±78.56	3678.32±14.48
HDPE/PET/SGF 20/80/20	1.25±0.10	861.46	47.78±0.96	2082.48±50.36	95.32±1.82	4693.57±28.98	4527.94±97.16
HDPE/PET/SGF 20/80/30	1.32±0.10	1101.42	62.40±2.47	2327.17±40.34	104.75±1.38	4550.56±48.04	5053.78±51.07
HDPE/PET/SGF/PE-g-MA 20/80/10/6	1.24±0.01	1082.64	42.11±0.61	1748.52±55.96	69.57±1.97	2852.19±31.19	4370.31±28.02
HDPE/PET/SGF/PE-g-MA 20/80/20/6	1.27±0.11	1280.61	51.94±1.42	2118.88±61.46	96.00±1.53	4594.54±26.91	4946.53±91.06
HDPE/PET/SGF/PE-g-MA 20/80/30/6	1.35±0.09	1517.01	64.85±2.46	2353.27±50.49	117.67±2.67	4624.61±29.76	5457.22±53.11

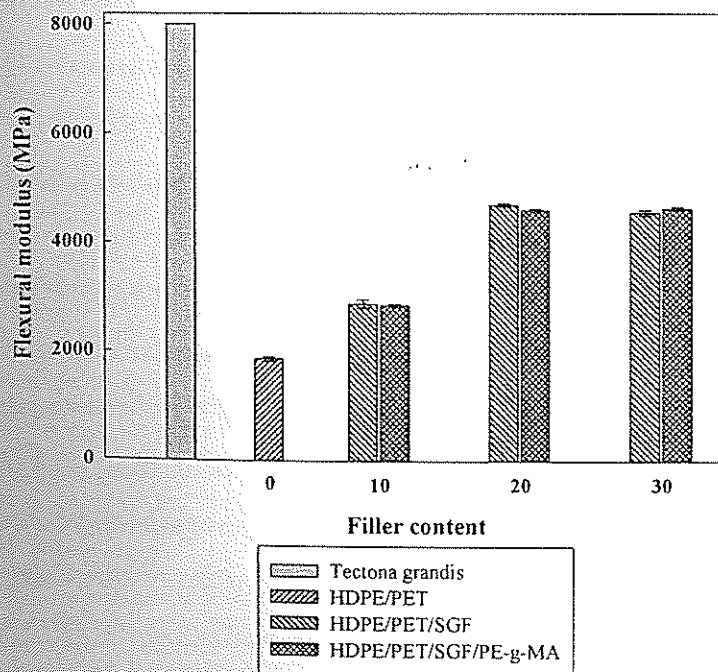
\* คณะกรรมการสาขาวิศวกรรมโยธา (2538)

\*\* ราคาไม้สัก ขนาดกว้าง 3 นิ้ว x หนา 1.5 นิ้ว x ยาว 3 เมตร ราคาต่อแผ่น 156.25 บาท [www.108wood.com]

ราคาของ HDPE/PET blends และ HDPE/PET blends ที่ปริมาณเส้นใยแก้วชนิดสั้นต่าง ๆ เป็นราคาที่คิดเฉพาะค่าวัสดุ ซึ่ง HDPE ราคา 15 บาทต่อกิโลกรัม PET ราคา 10 บาทต่อกิโลกรัม SGF ราคา 80 บาทต่อกิโลกรัม และ PE-g-MA ราคา 250 บาทต่อกิโลกรัม



รูปที่ 4.12 Flexural strength ของไม้สัก HDPE/PET blends และ HDPE/PET blends ที่ปริมาณเส้นใย แก้วชนิดสั้นต่าง ๆ ที่มีและไม่มีการใช้สารช่วยให้เข้ากัน



รูปที่ 4.13 Flexural modulus ของไม้สัก HDPE/PET blends และ HDPE/PET blends ที่ปริมาณเส้นใย แก้วชนิดสั้นต่าง ๆ ที่มีและไม่มีการใช้สารช่วยให้เข้ากัน

## บทที่ 5

### บทสรุป

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

1. ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใส่สารตัวเติมชนิดเส้นใยแก้วชนิดสั้นและแคลเซียมคาร์บอเนต และมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารตัวเติมที่ใส่ สารช่วยให้เข้ากันไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นของพอลิเมอร์ที่มีการใส่สารตัวเติม

2. สารตัวเติมส่งผลต่อการปรับปรุงค่า HDT ของพอลิเมอร์ผสมและมีค่าเพิ่มขึ้นกับปริมาณสารตัวเติม ค่า HDT ของพอลิเมอร์ผสมที่มีการใส่เส้นใยแก้วมีค่ามากกว่าของพอลิเมอร์ผสมที่มีการใส่แคลเซียมคาร์บอเนต สารช่วยให้เข้ากันมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า HDT ของพอลิเมอร์ผสมที่มีการใส่เส้นใยแก้ว เนื่องจากการปรับปรุงการยึดติดระหว่างเส้นใยแก้วและเมทริกซ์

3. สมบัติด้านการดึง สมบัติด้านการคัด และความทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใส่เส้นใยแก้ว และเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยแก้ว แสดงว่าเส้นใยแก้วเป็นสารเสริมแรงสำหรับพอลิเมอร์ผสม สารช่วยให้เข้ากันมีผลต่อการปรับปรุงสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสม เนื่องมาจากสารช่วยให้เข้ากันปรับปรุงการยึดติดที่อินเทอร์เฟซของพอลิเมอร์เมทริกซ์และเส้นใยแก้ว แต่เมื่อพิจารณาผลของแคลเซียมคาร์บอเนตพบว่าความทนต่อแรงดึง ความทนต่อแรงคัด และความทนต่อแรงกระแทกมีค่าลดลงและลดลงตามปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากความไม่เข้ากันของเมทริกซ์และแคลเซียมคาร์บอเนต ส่วนมอดูลัสของการดึงและการคัดมีค่าเพิ่มขึ้นกับปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนต สารช่วยให้เข้ากันส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของสมบัติทางกลเล็กน้อย

4. สารตัวเติมส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความหนืดของพอลิเมอร์ผสมและเพิ่มขึ้นกับปริมาณสารตัวเติมที่ใส่ โดยพอลิเมอร์ผสมที่มีการใส่เส้นใยแก้วมีค่าความหนืดสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใส่แคลเซียมคาร์บอเนต การใส่สารช่วยให้เข้ากัน ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความหนืด เนื่องมาจาก การปรับปรุงการยึดติดระหว่างสารตัวเติมและพอลิเมอร์ผสม

5. จากลักษณะทางสัญญาณวิทยาพบว่าสารช่วยให้เข้ากันส่งผลต่อการปรับปรุงการยึดติดระหว่างพื้นผิวของเส้นใยแก้วและเมทริกซ์

6. จากการเปรียบเทียบสมบัติทางกลระหว่างไม้เนื้ออ่อนที่พบในประเทศไทย เช่น ไม้สัก กับพอลิเมอร์ผสมที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว พบว่าความทนต่อแรงคัดของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูง แต่มีค่ามอดูลัสแรงคัดต่ำกว่าของไม้เนื้ออ่อน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษาผลของสารตัวเติม 2 ชนิด (hybrid fillers) ต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม
2. จากการศึกษาสมบัติทางกลบางสมบัติที่ด้อยกว่าไม้ของ plastic lumber ดังนั้นในการใช้งานจึงควรมีการออกแบบลักษณะของ plastic lumber ให้เหมาะสม เช่น การออกแบบให้มีภาคตัดขวางที่ใหญ่ขึ้น เพื่อทดแทนปัญหาการเกิดการโค้งของพลาสติก และสมบัติด้านคืบ

## บรรณานุกรม

- กษมา จารุกัจจ และ สิทธิชัย แสงอาทิตย์. 2551. การพัฒนาและทดสอบพลาสติกผสมระหว่างพอลิเอทธิลีนเทอเรพทาเลทและพอลิเอทธิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วเพื่อใช้ในงานก่อสร้าง. สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- 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  $\text{CaCO}_3$ . 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.
- Brenda, P., Lent, T, and Walsh, B. 2005, Oct. Guide to plastic lumber. (online). Available URL: <http://www.healthybuilding.net/>
- Climenhage, D. (2003). Recycled Plastics Lumber: A Strategic Assessment of Its Production, Use and Future Prospects, Environmental and Plastics Industry Council, January.
- Ersoy, O.G. and Nugay, N. (2003). Effect of inorganic filler phase on mechanical and morphological properties of binary immiscible polymer blends. Polym. Bull. 49. 465-472.
- Favis, B.D. (2000). Factors influencing the morphology of immiscible polymer blends in melt processing, 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 CaCO<sub>3</sub>. Eur. Polym. J. 38. 2465-2475.
- Guerrica-Echevarria, G., Eguiazabal, J.I. and Nazabal, J. (1998). Influence of molding conditions and talc content on the properties of polypropylene composites. Eur. Polym. J. 34(8). 1213-1219.
- Hancock, M. (1995). Filled thermoplastics. Rotheron, R. Ed. Particulate-Filled Polymer Composites. P.280. 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.
- Lampo, R.G. and Nosker, T.J. (1997). Development and Testing of Plastic Lumber Materials for Construction Applications, USACERL Technical Report 97/95, June.
- Malchev, P.G., David, C.T., Picken, S.J. and Gotsis, A.D. (2005). Mechanical properties of short fiber reinforced thermoplastic blends. Polymer. 46. 3895-3905.
- 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 56<sup>th</sup> Society of Plastics Engineers: Annual Technical Conference; April 26-30, 1998; Atlanta, Georgia, USA, p. 1561-1570
- 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.
- 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/>
- Rothon, R. and Hancock, M. (1995). General principles guiding selection and use of particulate materials. Rothon, R. Ed. Particulate-Filled Polymer Composites. P.39. Longman Scientific & Technical: Essex.
- Tjong, S.C., Xu, S-A., Li, R.K-Y. and Mai, Y-W. (2002). Mechanical behavior and fracture toughness evaluation of maleic anhydride compatibilized short glass fiber/SEBS/polypropylene hybrid composites. Comp. Sci. Tech. 62. 831-840.
- 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.
- Wang, Y. and Wang, J.J. (1999). Shear yield of calcium carbonate-filled polypropylene. Polym. Eng. Sci. 39(1). 190-198.
- Xanthos, M. (1995). Modification of polymer mechanical and rheological properties with functional fillers. Xanthos, M. Ed. Functional Fillers for Plastics. P.32. Wiley-VCH: Weinheim.
- Xanthos, M., Greci, J., Patel, S.H., Patel, A., Jacob, C., Dey, S. and Dagli, S.S. (1995). Thermoplastic composites from maleic anhydride modified post-consumer plastics. Polym. Comp. 16(3). 204-214.
- Wunderlich, B and Dole, M. (1957). Specific heat synthetic high polymers. VIII Low pressure polyethylene. J. Polym. Sci. 24. 201.

- 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.
- Curry, J. and Kiani, A. (1990). The 48<sup>th</sup> 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.
- 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.
- 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
- Jabarr, 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.
- 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.
- Lusinehi, J.M., Boutevin, B., Torres, N. and Robib, J.J. (2001). In situ compatibilization of HDPE/PET blends. *J. Appl. Polym. Sci.* 79. 874-880.
- 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.
- 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.
- Selke, S.E. (1997) *Understanding Plastic Packaging Technology*. Carl Hanser Verlag: 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.
- 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 วิทยาศาสตรบัณฑิต (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 31 บทความ และรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ 3 ฉบับ