



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ คอมโพสิตจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์และ
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำโดยมีซีลี้อยเป็นสารเสริมแรง

โดย ผศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร

กุมภาพันธ์ 2550

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ คอมพิวเตอร์จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์และ
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำโดยมีซีลีเย่เป็นสารเสริมแรง

คณะผู้วิจัย	สังกัด
1. ผศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯ ลาดกระบัง
2. ศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
3. นางสาวจิราภรณ์ คำศรี	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯ ลาดกระบัง
4. นางสาวศิริกาญจน์ ชันส์สมุทร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯ ลาดกระบัง

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา
และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ.และสกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

รหัสโครงการ: MRG4780091

ชื่อโครงการ: คอมโพสิตจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำโดยมีซีลี้อยเป็นสารเสริมแรง

ชื่อนักวิจัยและสถาบัน:

1. ผศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. ศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
3. นางสาวจิราภรณ์ คำศรี
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
4. นางสาวศิริกาญจน์ ชันสัมฤทธิ์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ระยะเวลาโครงการ: 1 กรกฎาคม 2547-28 กุมภาพันธ์ 2550

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) โดยใช้ซีลี้อยไม่ยางพาราเป็นสารเสริมแรงโดยได้ศึกษาวิธีการผสมของพอลิเมอร์ผสมซึ่งพบว่าการผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวตามด้วยเครื่องผสมชนิด 2 ลูกกลิ้ง ทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงกว่าการใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวเพียงขั้นตอนเดียว และจากการศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมพบว่าเมื่อปริมาณ LDPE เพิ่มขึ้นสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงเนื่องจากการยึดติดระหว่างวัฏภาคต่ำ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง PVC และ LDPE โดยใช้สารช่วยผสม 3 ชนิด ได้แก่ คลอรีเนเตดพอลิเอทิลีน (CPE) พอลิเมอร์ร่วมระหว่างเมทิลเมทาไครเลตและบิวทิลอะครีเลต (PA 20) และพอลิเมอร์ร่วมระหว่างเอทิลีนและเมทิลอะครีเลต (Elvaloy) จากการศึกษาพบว่า PA 20 ให้สมบัติโดยรวมที่เหมาะสมในการนำไปทำเป็นวัสดุคอมโพสิต สำหรับการทดสอบโดยใช้เทคนิคนิวเคลียร์ แมกเนติกเรโซแนนซ์คาร์บอน 13 พบว่า PVC ไม่เกิดการตอ้งกึ่งกับ LDPE และที่อัตราส่วน PVC100 : LDPE10 อุณหภูมิการสลายตัวของ PVC มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาถ่ายโอนอนุมูลอิสระของ PVC และ LDPE ระหว่างกระบวนการผสม แต่เมื่อใส่สารช่วยผสมชนิด PA 20 และผงไม้ทำให้อุณหภูมิในการสลายตัวของ PVC มีค่าต่ำลง ในการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าเมื่อใช้สารช่วยผสมการกระจายตัวของ LDPE ใน PVC ดีขึ้นและอนุภาคของ LDPE มีขนาดเล็กลง นอกจากนี้พบว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของ PVC ในพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมชนิด CPE และ Elvaloy[®] มีค่าลดลงโดยที่ T_g ของ PVC ในพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมชนิด PA 20 มี T_g ใกล้เคียงกับ PVC บริสุทธิ์มากกว่าการใช้สารช่วยผสมชนิด CPE และ Elvaloy สำหรับสมบัติต่างๆ ของ

คอมโพสิตจากพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมและ ชี้อ่อนจากไม้ยางพารา พบว่าเมื่อปริมาณชี้อ่อนมากขึ้น มอดูลัสการดึงยืดและมอดูลัสโค้งงอมีค่าสูงขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงดึง เบอร์เซนต์การดึงยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงโค้งงอและความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลงโดยที่สมบัติ ต่างๆ มีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีการใช้สารช่วยผสมชนิด PA 20 ความเข้ากันได้ระหว่างวัฏภาค สามารถปรับปรุงได้โดยการเติมไซเลน A137, ไซเลน A1100 หรือ MAPE ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สมบัติเชิงกลโดยรวมของคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนจากการใช้ไซเลนและ/หรือ MAPE นอกจากนี้สัณฐานวิทยาและสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิตมีแนวโน้มดีขึ้นจากการเติมไซเลนและ/ หรือ MAPE

คำหลัก พอลิเมอร์ผสม คอมโพสิต สมบัติเชิงกล

Project Code: MRG4780091

Project Title: Composites from Polymer Blends between Poly(vinyl chloride) and Low-density Polyethylene using Sawdust as Reinforcement

Investigator: 1. Asst.Prof.Dr.Jutarat Prachayawarakorn
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
2. Prof.Dr.Narongrit Sombatsompop
King Mongkut's University of Technology Thonburi
3. Ms.Jeeraphorn Khamsri
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
4. Ms.Sirikarn Khunsumled
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

E-mail address : 1. ksjutara@kmitl.ac.th
2. narongrit.som@kmutt.ac.th

Project Period: July 2004-February 2007

ABSTRACT

This research aims to study properties of polymer blend between poly(vinyl chloride) (PVC) and low-density polyethylene (LDPE) reinforced by rubber-wood sawdust. Two different mixing procedures were studied and it was found that using both single-screw extruder and then two-roll mill led to greater mechanical properties than using only single-screw extruder. The experimental results suggested that as the LDPE contents were increased, the mechanical properties of the polymer blend progressively decreased due to poor interfacial adhesion. The phase compatibility between PVC and LDPE phase could be improved by three different types of compatibilizers which included chlorinated polyethylene (CPE), poly(methyl-methacrylate-co-butylacrylate) (PA 20) and poly(ethylene-co-methacrylate) (Elvaloy[®]). The PA 20 was found to be more suitable compatibilizer for the polymer blends in order to prepare the composites. The results from ¹³C-NMR showed that no grafted product of PVC and LDPE was found and decomposition temperature (T_d) of PVC in the polymer blends of PVC100:LDPE10 increased because of a radical transfer reaction of PVC and LDPE during the mixing process. But the T_d of PVC in the blend decreased with the loading of the PA 20 and the wood sawdust. Scanning electron microscopy (SEM) was used to observe the phase morphology of the blends. It was found that the better phase dispersion and smaller particle size of LDPE of the polymer blends with the PA 20 compatibilizer were obtained. In addition, T_g of PVC decreased in the

PVC/LDPE (100/10) blends with and without the CPE and Elvaloy compatibilizers. When PA 20 was used, T_g of PVC was very close to that of neat PVC. Besides, tensile and flexural moduli of the composites increased as sawdust contents were increased but tensile, flexural and impact strengths decreased. Slight improvement in mechanical properties was achieved if PA 20 was incorporated in the composites. Phase compatibility could be improved by the incorporation of Silane A-137, Silane A-1100 or MAPE. The results showed that overall mechanical properties of the composites with the use of Silane and/or MAPE were significantly increased. Morphological and thermal properties of the composites were also improved with the addition of Silane and /or MAPE.

Keywords: polymer blend, composite, mechanical properties

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้การสนับสนุนด้านเงินทุนวิจัยสำหรับการทำโครงการวิจัยนี้

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยการได้รับคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับการทำวิจัยในครั้งนี้จาก ศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ ซึ่งเป็นนักวิจัยพี่เลี้ยง และ ผศ.ดร.จันทร์ฉาย ทองปิ่น ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับโครงการวิจัยอย่างต่อเนื่อง ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ บริษัทไทยพลาสติกและเคมีภัณฑ์ จำกัด (มหาชน) ในความอนุเคราะห์ให้ PVC Compound และบริษัทไทยพอลิเอทิลีน จำกัด ในความอนุเคราะห์ให้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ สำหรับใช้ในงานวิจัยนี้

ผศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	V
สารบัญ	VI
สารบัญตาราง	XI
สารบัญรูป	XIII
รายการคำย่อ	XVII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	5
2.1 พอลิเมอร์ผสม	5
2.1.1 วัตถุประสงค์ของการทำพอลิเมอร์ผสม	5
2.1.2 คำจำกัดความเกี่ยวกับพอลิเมอร์ผสม	6
2.1.3 ความสามารถในการละลายเข้ากันได้ และความสามารถในการผสมเข้ากันได้	7
2.1.4 สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม	7
2.1.5 กระบวนการดัดแปรพอลิเมอร์ผสมให้เข้ากันได้	9
2.2 คอมโพสิต	11
2.2.1 องค์ประกอบหลักของคอมโพสิต	11
2.2.1.1 ส่วนเสริมแรง	11
2.2.1.2 เมทริกซ์	12
2.2.2 การแบ่งชนิดของคอมโพสิต	12
2.2.3 การประยุกต์ใช้งานคอมโพสิต	13
2.3 เส้นใยไม้	14

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.1 องค์ประกอบของเส้นใยไม้	15
2.3.1.1 เซลลูโลส	15
2.3.1.2 เฮมิเซลลูโลส	16
2.3.1.3 ลิกนิน	16
2.3.1.4 สารอินทรีย์อื่นๆ	18
2.3.1.5 สารอนินทรีย์	18
2.3.2 ไม้ยางพารา	18
2.4 สารคู่ควบ	18
2.5 สารช่วยผสม	23
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
 บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	 32
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	32
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	36
3.3 วิธีการทดลอง	40
3.3.1 ศึกษาวิธีการผสมและอัตราส่วนที่เหมาะสมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE	40
3.3.2 ศึกษาปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE โดยใช้สารช่วยผสมชนิด CPE.	40
3.3.3 ศึกษาปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE โดยใช้สารช่วยผสม CPE, PA 20 และ Elvaloy	41
3.3.4 การเตรียมคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมและซีลี้อยจากไม้ยางพารา	41
3.3.4.1 การเตรียมซีลี้อย	41
3.3.4.2 การเตรียมซีลี้อยที่ปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยสารคู่ควบไซเลน	41
3.3.4.3 การเตรียมซีลี้อยที่ปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วย MAPE	42
3.3.4.4 ขั้นตอนการทำพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบหรือสารช่วยผสม	42

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.4.5 ขั้นตอนการทำพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้ สารคู่ควบไซเลน	44
3.3.4.6 ขั้นตอนการทำพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้ สารช่วยผสม MAPE	44
3.4 วิธีการตรวจวิเคราะห์และการทดสอบ	45
3.4.1 การตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ผสมและคอมโพสิต	45
3.4.1.1 อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี	45
3.4.1.2 ^{13}C – NMR	45
3.4.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล	46
3.4.2.1 ความแข็งแรงดึง มอดุลัส และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด	46
3.4.2.2 ความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอ	47
3.4.2.3 ความแข็งแรงกระแทก	48
3.4.3 สัณฐานวิทยา	49
3.4.4 สมบัติทางความร้อน	50
3.4.4.1 อุณหภูมิการสลายตัว	50
3.4.4.2 Differential scanning calorimeter (DSC)	50
3.4.4.3 การศึกษาอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว	50
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	51
4.1 ผลการศึกษาสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE	51
4.1.1 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ปรับปรุง ด้วยสารช่วยผสม	51
4.1.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วย สารช่วยผสม	52
4.1.3 การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างของพอลิเมอร์ผสม โดยใช้เทคนิค Solid-State ^{13}C -NMR	54
4.1.4 สมบัติเชิงกล	55
4.1.4.1 การศึกษาวิธีการผสมของพอลิเมอร์ผสมและผลของ ปริมาณ LDPE ต่อสมบัติเชิงกลของ PVC.	55
4.1.4.2 ผลของสารช่วยผสมต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม	60
4.1.5 การศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE	73

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.5.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาของ PVC และพอลิเมอร์ผสม	73
4.1.5.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ที่ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสม	74
4.1.6 การศึกษาอุณหภูมิในการสลายตัวของ PVC 100 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับ PVC ในพอลิเมอร์ผสม	76
4.1.7 การศึกษาอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของ PVC	77
4.1.8 การศึกษาอุณหภูมิการหลอมเหลวและอุณหภูมิการตกผลึก ของ LDPE ในพอลิเมอร์ผสม	78
4.1.8.1 อุณหภูมิการหลอมเหลวของ LDPE.	78
4.1.8.2 อุณหภูมิการตกผลึกของ LDPE	78
4.2 ผลการศึกษาสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสม และซีลี้อยจากไม้	79
4.2.1 การศึกษาหุ้ฟังก์ชันของคอมโพสิตของพอลิเมอร์ผสม ที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสม	79
4.2.2 สมบัติของคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมและซีลี้อย จากไม้ยางพารา	81
4.2.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต	86
4.2.3.1 ลักษณะการกระจายตัวของซีลี้อยในพอลิเมอร์ผสม	86
4.2.3.2 ลักษณะพื้นผิวระหว่างวัฏภาคของซีลี้อยและ พอลิเมอร์ผสม	87
4.2.4 การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวของ PVC ในคอมโพสิต ระหว่างพอลิเมอร์ผสมและซีลี้อยจากไม้ยางพารา	88
4.2.5 การศึกษาอุณหภูมิการหลอมเหลวและอุณหภูมิการตกผลึก ของ LDPE ในคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมและซีลี้อย จากไม้ยางพารา	89
4.2.5.1 อุณหภูมิการหลอมเหลวของ LDPE	89
4.2.5.2 อุณหภูมิการตกผลึกของ LDPE	90
4.3 การศึกษาผลของสารคู่ควบ Silane และ/หรือ MAPE ที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ของคอมโพสิต	91
4.3.1 การศึกษาหุ้ฟังก์ชันของคอมโพสิตที่ใช้ Silane หรือ MAPE	91
4.3.2 ผลของสารคู่ควบ Silane ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต	92

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.3 ผลของสารช่วยผสม MAPE ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต	99
4.3.4 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของคอมโพสิตที่ใช้ Silane และ MAPE	107
4.3.5 ผลของอัตราส่วนระหว่าง Silane:MAPE ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต	108
4.3.6 ผลของ Silane และ/หรือ MAPE ที่มีต่อสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต	117
4.3.7 ผลของ Silane และ/หรือ MAPE ที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิต	119
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	121
5.1 สรุปผลการวิจัย	121
5.2 ข้อเสนอแนะ	122
เอกสารอ้างอิง	123
Output จากโครงการวิจัย	128
ภาคผนวก	129

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อดีและข้อเสียของพอลิเมอร์	5
2.2 พอลิเมอร์ผสมและสารช่วยผสมในทางการค้า	11
2.3 ข้อดีและข้อเสียของพอลิเมอร์คอมโพสิต	13
2.4 ตัวอย่างการใช้งานวัสดุคอมโพสิต	14
2.5 ส่วนประกอบต่างๆ ของไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง	15
3.1 ส่วนประกอบของ PVC Compound	32
3.2 สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	32
3.3 สมบัติของคลอริเนเตดพอลิเอทิลีน (CPE 135A)	33
3.4 สมบัติของพอลิเมอร์ร่วมระหว่างเมทิลเมทาไครเลตและบิวทิลอะไครเลต (PA-20)	33
3.5 สมบัติทั่วไปของพอลิเมอร์ร่วมระหว่างเอทิลีนและเมทิลอะไครเลต Elvaloy® 1125 AC	34
3.6 สมบัติของ Silaquest A-137	35
3.7 สมบัติของ Silaquest A-1100	35
3.8 สมบัติของ Fusabond® MB100D	36
3.9 ส่วนผสมต่างๆ ที่ใช้ปรับปรุงพอลิเมอร์ผสมด้วย CPE	40
3.10 ส่วนผสมต่างๆ ที่ใช้ปรับปรุงพอลิเมอร์ผสมด้วย CPE, PA 20 และ Elvaloy	41
3.11 สูตรผสมต่างๆ ที่ใช้ในการทำคอมโพสิต	43
3.12 ส่วนผสมต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำคอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน	44
3.13 ส่วนผสมต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำคอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย MAPE	45
3.14 มาตรฐานต่างๆ ในการทดสอบพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมโพสิต	46
4.1 ตำแหน่งสเปกตรัมของ PVC และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE	52
4.2 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม (PVC100 : LDPE10) เมื่อปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมในชนิดและปริมาณต่าง ๆ กัน	70
4.3 เปรียบเทียบอุณหภูมิการสลายตัวของ PVC 100 เปอร์เซ็นต์ และ PVC ในพอลิเมอร์ผสม	76
4.4 ค่า T_g ของ PVC	77
4.5 อุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) ของ LDPE	78
4.6 อุณหภูมิการเกิดผลึก เอนทัลปีและเอนทาลปีความเป็นผลึกของ LDPE	79
4.7 ตำแหน่งสเปกตรัมของคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมและซีลี้อยจากไม้ยางพารา	81
4.8 อุณหภูมิการสลายตัวของ PVC ในพอลิเมอร์คอมโพสิต	89
4.9 อุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) ของ LDPE	90
4.10 อุณหภูมิการเกิดผลึก เอนทัลปีและเอนทาลปีความเป็นผลึกของ LDPE.	90

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.11 สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตจาก PVC/LDPE ที่ใช้ซีลี้อยปริมาณ 10% และมีการใช้สารคู่ควบ Silane A-137 และ/หรือสารช่วยผสม MAPE ในปริมาณต่าง ๆ	115
4.12 สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตจาก PVC/LDPE ที่ใช้ซีลี้อยปริมาณ 30% และมีการใช้สารคู่ควบ Silane A-137 และ/หรือสารช่วยผสม MAPE ในปริมาณต่าง ๆ	115
4.13 สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตจาก PVC/LDPE ที่ใช้ซีลี้อยปริมาณ 10% และมีการใช้สารคู่ควบ Silane A-1100 และ/หรือสารช่วยผสม MAPE ในปริมาณต่าง ๆ	116
4.14 สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตจาก PVC/LDPE ที่ใช้ซีลี้อยปริมาณ 10% และมีการใช้สารคู่ควบ Silane A-1100 และ/หรือสารช่วยผสม MAPE ในปริมาณต่าง ๆ	116
4.15 อุณหภูมิการสลายตัวของ PVC ในคอมโพสิตที่ปริมาณซีลี้อย 10% และ 30%ที่มีการใช้สารคู่ควบและ/หรือสารช่วยผสมที่ปริมาณ 3%	119
4.16 อุณหภูมิการสลายตัวของ PVC ในคอมโพสิตที่ปริมาณซีลี้อย 10% และ 30%ที่มีการใช้สารคู่ควบและ/หรือสารช่วยผสมที่ปริมาณ 5%	119
4.17 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ PVC ในคอมโพสิตที่ปริมาณซีลี้อย 30%ที่มีการใช้สารคู่ควบและ/หรือสารช่วยผสมที่ปริมาณ 3%	120

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม	8
2.2 ความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม	9
2.3 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง A และ B ที่เติมสารช่วยผสมแบบ (ก) พอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกและ (ข) พอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่ง	10
2.4 โครงสร้างของเซลลูโลส	15
2.5 โครงสร้างของมอนอเมอร์ที่พบในเฮมิเซลลูโลส	16
2.6 โครงสร้างของมอนอเมอร์ในลิกนิน	17
2.7 โครงสร้างของลิกนินในไม้เนื้ออ่อน	17
2.8 โครงสร้างของสารคู่ควบ Silane	19
2.9 การเกิดปฏิกิริยาของสารคู่ควบ Silane	20
2.10 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของสารคู่ควบ Silane	21
2.11 โครงสร้างของสารคู่ควบ Silane โดยแบ่งตามหมู่ฟังก์ชัน (X)	22
2.12 โครงสร้างของสารคู่ควบ Silane โดยแบ่งตามสารอินทรีย์ (R)	23
2.13 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์	24
2.14 การทำงานของพอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์	24
3.1 ลักษณะชิ้นงานดัมเบลล์ที่นำมาทดสอบ	46
3.2 การทดสอบความแข็งแรงแรงโค้งงอ	48
3.3 เครื่องมือทดสอบความแข็งแรงกระแทกแบบไอซอด	48
3.4 ชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงกระแทก	49
4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (ก) PVC 100 : LDPE 0 (ข) PVC 100 : LDPE 10	52
4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (ก) PVC 100:LDPE 10 (ข) PVC 10 :LDPE 10:CPE 15 % (ค) PVC 100:LDPE 10:PA 20 15% (ง) PVC 100:LDPE 10:Elvaloy 15 %	53
4.3 ¹³ C-NMR สเปกตรัมของ PVC 100 : LDPE 10	54
4.4 ผลของปริมาณ LDPE ต่อสมบัติด้านแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PVC / LDPE (ก) มอดุลัส (ข) ความแข็งแรงดึง และ (ค) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด	56
4.5 ผลของปริมาณ LDPE ต่อสมบัติด้านการโค้งงอของพอลิเมอร์ผสม PVC / LDPE (ก) มอดุลัสโค้งงอ และ (ข) ความแข็งแรงโค้งงอ	58
4.6 ผลของปริมาณ LDPE ต่อสมบัติด้านความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PVC / LDPE	59
4.7 สมบัติด้านแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PVC / LDPE โดยใช้สารช่วยผสมชนิด CPE (ก) มอดุลัส (ข) ความแข็งแรงดึง และ (ค) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด	61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 สมบัติด้านการโค้งงอของพอลิเมอร์ผสม PVC / LDPE โดยใช้สารช่วยผสมชนิด CPE (ก) มอดุลัสโค้งงอและ (ข) ความแข็งแรงโค้งงอ	63
4.9 ความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PVC / LDPE โดยใช้สารช่วยผสมชนิด CPE	64
4.10 สมบัติด้านแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PVC100 : LDPE10 และสารช่วยผสม 3 ชนิด (ก) มอดุลัส (ข) ความแข็งแรงดึง และ (ค) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด	66
4.11 สมบัติด้านการโค้งงอของพอลิเมอร์ผสม PVC100 : LDPE10 และสารช่วยผสม 3 ชนิด (ก) มอดุลัสโค้งงอ และ (ข) ความแข็งแรงโค้งงอ	68
4.12 ความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PVC100 : LDPE10 และสารช่วยผสม 3 ชนิด	69
4.13 กลไกของอันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างพอลิเมอร์ผสม PVC100 : LDPE10 และ สารช่วยผสม 3 ชนิด (ก) CPE (ข) PA 20 และ (ค) Elvaloy	72
4.14 พื้นผิวแตกหักของ (ก) PVC (500X) (ข) PVC (1500X) (ค) PVC100 : LDPE10 (500X) และ (ง) PVC100 : LDPE10 (1500X)	73
4.15 พื้นผิวแตกหักของ PVC100 : LDPE10 โดยใช้สารช่วยผสม 3 ชนิด (ก) CPE 15% (500X) (ข) CPE 15% (1500X) (ค) PA 20 15% (500X) (ง) PA 20 15% (1500X) (จ) Elvaloy [®] 15% (500X) และ (ฉ) Elvaloy 15% (1500X)	75
4.16 กลไกการเกิดการถ่ายโอนอนุมูลอิสระระหว่างกระบวนการผสม	76
4.17 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (ก) PVC100 : LDPE10 : PA 20 15% (ข) PVC100 : LDPE10: SD10% (ค) PVC100 : LDPE10 : SD 50% (ง) PVC100 : LDPE10 : SD10% : PA 20 15% (จ) PVC100 : LDPE10 : SD50% : PA 20 15%	80
4.18 ผลของปริมาณขี้เลื่อยต่อสมบัติด้านความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (ก) มอดุลัสความแข็งแรงดึง (ข) ความแข็งแรงดึง และ (ค) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด	82
4.19 ผลของปริมาณขี้เลื่อยต่อสมบัติด้านการโค้งงอของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต (ก) มอดุลัสโค้งงอ และ (ข) ความแข็งแรงโค้งงอ	84

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 ผลของปริมาณขี้เลื่อยต่อสมบัติด้านความแข็งแรงกระแทกของ พอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต	85
4.21 สัณฐานวิทยาของคอมโพสิตที่กำลังขยาย 50 เท่า (ก) PVC100 : LDPE10 : SD10 (ข) PVC100 : LDPE10 : PA 20 15 : SD10 (ค) PVC100 : LDPE10 : SD50 และ (ง) PVC100 : LDPE10 : PA 20 15 : SD50	87
4.22 สัณฐานวิทยาของคอมโพสิต ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ก) PVC100 : LDPE10 : SD10 (ข) PVC100 : LDPE10 : PA 20 15% : SD10 (ค) PVC100 : LDPE10 : SD50 (ง) PVC100 : LDPE10 : PA 20 15% : SD50	88
4.23 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสม PVC/LDPE/PA20 (ก) ไม่มี Silane หรือ MAPE (ข) ผสม Silane A-137 (ค) ผสม Silane A-1100 และ (ง) ผสม MAPE	91
4.24 สมบัติด้านแรงดึงของคอมโพสิตที่ใช้ Silane A-137 เป็นสารคู่ควบ (ก) มอดุลัส (ข) ความแข็งแรงดึง และ (ค) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด	93
4.25 สมบัติด้านการโค้งงอของคอมโพสิตที่ใช้ Silane A-137 เป็นสารคู่ควบ (ก) มอดุลัสโค้งงอ และ (ข) ความแข็งแรงโค้งงอ	94
4.26 ความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิตที่ใช้ Silane A-137 เป็นสารคู่ควบ	95
4.27 สมบัติด้านแรงดึงของคอมโพสิตที่ใช้ Silane A-1100 เป็นสารคู่ควบ (ก) มอดุลัส (ข) ความแข็งแรงดึง และ (ค) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด	97
4.28 สมบัติด้านการโค้งงอของคอมโพสิตที่ใช้ Silane A-1100 เป็นสารคู่ควบ (ก) มอดุลัสโค้งงอ และ (ข) ความแข็งแรงโค้งงอ	98
4.29 ความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิตที่ใช้ Silane A-1100 เป็นสารคู่ควบ	99
4.30 สมบัติด้านแรงดึงของคอมโพสิตที่ใช้ MAPE เป็นสารช่วยผสม (ก) มอดุลัส (ข) ความแข็งแรงดึง และ (ค) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด	100
4.31 สมบัติด้านการโค้งงอของคอมโพสิตที่ใช้ MAPE เป็นสารช่วยผสม (ก) มอดุลัสโค้งงอ และ (ข) ความแข็งแรงโค้งงอ	101
4.32 ความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิตที่ใช้ MAPE เป็นสารช่วยผสม	102
4.33 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในคอมโพสิตจากการใช้ (ก) Silane A-137 (ข) Silane A-1100 และ (ค) MAPE	106

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.34 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสม PVC/LDPE/PA20 (ก) ไม่มี Silane หรือ MAPE (ข) ผสม Silane A-137 และ MAPE และ (ค) Silane A-1100 และ MAPE	107
4.35 สมบัติด้านแรงดึงของคอมโพสิตที่ใช้ Silane A-137:MAPE (ก) มอดุลัส (ข) ความแข็งแรงดึง และ (ค) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด	109
4.36 สมบัติด้านการโค้งงอของคอมโพสิตที่ใช้ Silane A-137:MAPE (ก) มอดุลัสโค้งงอ และ (ข) ความแข็งแรงโค้งงอ	110
4.37 ความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิตที่ใช้ Silane A-137:MAPE	110
4.38 สมบัติด้านแรงดึงของคอมโพสิตที่ใช้ Silane A-1100:MAPE (ก) มอดุลัส (ข) ความแข็งแรงดึง และ (ค) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด	112
4.39 สมบัติด้านการโค้งงอของคอมโพสิตที่ใช้ Silane A-1100:MAPE (ก) มอดุลัสโค้งงอ และ (ข) ความแข็งแรงโค้งงอ	113
4.40 ความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิตที่ใช้ Silane A-1100:MAPE	113
4.41 สัณฐานวิทยาของคอมโพสิตระหว่าง PVC/LDPE ที่ใช้ PA20 (ก) ไม่มีการใช้สารคู่ควบและสารช่วยผสม (ข) ใช้สารคู่ควบ Silane A-137 (3%) (ค) ใช้สารคู่ควบ Silane A-1100 (3%) และ (ง) ใช้สารช่วยผสม MAPE (3%)	117
4.42 สัณฐานวิทยาของคอมโพสิตระหว่าง PVC/LDPE ที่ใช้ PA20 โดยใช้สารคู่ควบ Silane และสารช่วยผสม MAPE ในอัตราส่วนต่าง ๆ (ก) Silane A-137:MAPE 1:1 (ข) Silane A-137:MAPE 1:2 (ค) Silane A-137:MAPE 2:1 (ง) Silane A-1100:MAPE 1:1 (จ) Silane A-1100:MAPE 1:2 และ (ฉ) Silane A-1100:MAPE 2:1	118

รายการคำย่อ

ABS	acrylonitrile- butadiene-styrene
ASA	acrylonitrile-styrene- acrylate
CPE	chlorinated polyethylene
E-B-GMA	ethylene-butylacrylate- glycidyl methylacrylate
EBA	ethylene-butylacrylate
EEA	ethylene-ethylacrylate
Elvaloy	ethylene-co-methyl acrylate copolymer
EMA	ethylene-methacrylate
EPDM	ethylene-propylene-diene-terpolymer
EVOH	ethylene vinyl alcohol copolymer
HIPS	high impact polystyrene
LCP	liquid crystal polymer
LDPE	low-Density Polyethylene
LLDPE	linear-low density polyethylene
MA	maleic anhydride
MAPE	maleic anhydride grafted polyethylene
MAPP	maleic anhydride grafted polypropylene
MP	mechanical pulp
PA	polyamide (nylon)
PA 20	methyl methacrylate-co-butylacrylate copolymer
PBT	poly(butylene terephthalate)
PC	polycarbonate
PE	polyethylene
PET	poly(ethylene terephthalate)
PMMA	poly(methyl methacrylate)
PP	polypropylene
PPE	polyphenylene ether
PPO	polyphenylene oxide
PS	polystyrene
PVA	polyvinyl acetate
PVC	polyvinyl chloride
SAN	styrene acrylonitrile

SBC	styrenic block copolymer
SBS	styrene-butadiene- styrene
SEBS	styrene-ethylene- butylene-styrene
SIS	styrene-isoprene-styrene
Silane A-137	octyltriethoxysilane
Silane A-171	vinyltrimethoxy silane
Silane A-172	vinyl-tris-(2-methoxyethoxy) silane
Silane A-1100	γ -aminopropyltriethoxy silane
TMP	thermomechanical pulp

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันพอลิเมอร์เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของเราอย่างมากมาย ซึ่งรู้จักในนามของพลาสติกประเภทต่าง ๆ โดยที่วัสดุอุปกรณ์ เครื่องใช้ต่าง ๆ ล้วนมีส่วนประกอบที่เป็นพอลิเมอร์ เนื่องจากเทคโนโลยีปัจจุบันสามารถนำพอลิเมอร์มาดัดแปลงขึ้นรูปเป็นสิ่งต่าง ๆ ได้อย่างมากมาย แต่สิ่งที่ต้องคำนึงถึง คือ เมื่อวัสดุอุปกรณ์เหล่านี้เกิดการชำรุดเสียหายไม่สามารถใช้งานได้จะมีการกำจัดขยะเหล่านี้ได้อย่างไร ซึ่งปัจจุบันมีการวิจัยเพื่อพัฒนาให้สามารถย่อยสลายได้เอง นำมาฝักรวมหรือนำมาหลอมขึ้นรูปใหม่ ซึ่งการนำมาผ่านกระบวนการขึ้นรูปใหม่จำเป็นจะต้องแยกประเภทของพอลิเมอร์ เนื่องจากพอลิเมอร์แต่ละชนิดมีสมบัติที่ต่างกัน ในทางปฏิบัติ สามารถนำพอลิเมอร์ ชนิดต่าง ๆ มาผสมกันได้โดย เรียกว่า พอลิเมอร์ผสม ซึ่งมีงานวิจัยเกี่ยวกับการนำ PVC ผสมกับพอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) [1] เนื่องจากการใช้งานในปัจจุบัน เช่น บรรจุภัณฑ์ มักนิยมใช้พอลิเมอร์ 2 ชนิดนี้ และทำให้เกิดขยะจากพลาสติก 2 ชนิดนี้อย่างมากมาย ซึ่งในปัจจุบันมีอุตสาหกรรมเกี่ยวกับพลาสติกรีไซเคิล ดังนั้น จึงมีการวิจัยเกี่ยวกับพอลิเมอร์ผสมเพื่อประโยชน์ในการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตผลิตภัณฑ์จากพลาสติกรีไซเคิลจากงานวิจัยที่ผ่านมา [2-4] มีการศึกษาเกี่ยวกับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) โดยพบว่า PVC ทำให้เกิดการตอกรงบนสายโซ่ของ LDPE และเกิดการตอกรงมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ LDPE และยังพบว่า น้ำหนักโมเลกุลของ PVC ในพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าเพิ่มขึ้นอีกเมื่อนำไปผ่านกระบวนการผลิตอีกครั้ง ซึ่งเกิดขึ้นจากการตอกรงของ PVC บนสายโซ่ของ LDPE [5]

สำหรับการนำวัสดุเสริมแรงมาผสมกับพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติกกำลังเป็นที่นิยม ซึ่งเรียกว่า วัสดุคอมโพสิต กำลังเป็นที่นิยมเนื่องจากวัสดุนี้มีสมบัติที่สำคัญ คือ มีความแข็งแรงสูง แต่มีน้ำหนักเบาเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะ เรียกได้ว่าคอมโพสิตมีความแข็งแรงสูง ตัวอย่างวัสดุที่ใช้เสริมแรง ได้แก่ เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน เส้นใยเคฟลาร์ เป็นต้น แต่เส้นใยเหล่านี้มีราคาแพง ดังนั้นจึงได้มีการนำเส้นใยจากธรรมชาติ เช่น จากไม้หรือขี้เลื่อย ซึ่งมีราคาถูก และไม่ทำให้เครื่องจักรเกิดการสึกกร่อนอันเนื่องจากการขัดถูในระหว่างกระบวนการผลิต นอกจากนี้ยังให้ความรู้สึกละเอียดเป็นธรรมชาติกับผลิตภัณฑ์

พลาสติกที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน คือ พอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly(vinyl chloride), PVC) ซึ่งสามารถนำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนของอุปกรณ์ไฟฟ้า รถยนต์และเฟอร์นิเจอร์ นอกเหนือจากการนำมาทำเป็นท่อน้ำที่พบเห็นในปัจจุบัน โดยทั่วไป ส่วนประกอบในรถยนต์หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าจำเป็นต้องมีน้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรง จึงได้มีการพัฒนาวัสดุคอมโพสิตกันอย่างต่อเนื่อง แต่เป็นที่ทราบกันว่าในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์จาก PVC ต้องระมัดระวังเป็นพิเศษเนื่องจาก PVC เสื่อมสภาพได้ในระหว่างกระบวนการผลิต ซึ่งทำให้สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของ PVC เปลี่ยนไป โดยการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนทำให้เกิด กรดไฮโดรคลอริกทั้งนี้เพราะในโครงสร้างของ PVC มี

ส่วนประกอบของธาตุคลอรีน นอกจากนี้การเสียสภาพดังกล่าวยังทำให้เกิดพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยวในโครงสร้างส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีสีเปลี่ยนไป และน้ำหนักโมเลกุลลดลง ดังนั้นจึงมักมีการเติมสารป้องกัน การเสียสภาพเนื่องจากความร้อนในระหว่างกระบวนการผลิตด้วย

แนวทางหนึ่งในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์และลดต้นทุนการผลิต คือ การทำไม้พอลิเมอร์คอมโพสิต (Wood polymer composite, WPC) เพื่อทดแทนไม้ธรรมชาติขึ้น ซึ่งวัสดุคอมโพสิตนี้มีสมบัติที่สำคัญ คือ มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความแข็งแรงสูง แต่มีน้ำหนักเบาเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่น สามารถเลือกชนิดพอลิเมอร์และไม้เตรียมเป็นคอมโพสิต ซึ่งมีสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานได้ ซึ่งพอลิเมอร์คอมโพสิตประกอบด้วยวัสดุสองชนิด คือ พอลิเมอร์เมทริกซ์ (Matrix) และส่วนเสริมแรง (Reinforcement) ที่นิยมใช้ คือ เส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยคาร์บอน เส้นใยแก้ว เป็นต้น แต่เส้นใยเหล่านี้มีราคาแพง จึงได้มีการนำเส้นใยจากธรรมชาติ (Natural fibers) มาใช้แทน เช่น จากไม้หรือขี้เลื่อย ซึ่งมีข้อดีหลายอย่าง เช่น หาง่าย ราคาถูก ช่วยลดต้นทุนการผลิต น้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ ไม่ทำให้เครื่องจักรเกิดการสึกกร่อนเนื่องจากการขัดถูระหว่างกระบวนการผลิต สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และยังเป็นการลดวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมไม้แปรรูปได้อีกด้วย

เส้นใยธรรมชาติจากไม้ยางพารา (*Hevea brasiliensis*) เป็นไม้ชนิดหนึ่งที่น่าสนใจที่จะนำมาทำไม้พอลิเมอร์คอมโพสิตเนื่องจากปัจจุบันประเทศไทยมีการส่งออกผลิตภัณฑ์จากไม้ยางพาราเป็นจำนวนมาก และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นทุกปี ไม้ยางพาราที่มีอายุ 20-25 ปี จะถูกตัดและนำเข้าสู่อุตสาหกรรมไม้เพื่อแปรรูปเป็นเฟอร์นิเจอร์ เครื่องเรือน เครื่องใช้ โดยในปี พ.ศ. 2546 ประเทศไทยส่งออกผลิตภัณฑ์จากไม้ยางพาราคิดเป็นมูลค่า 5,983 ล้านบาท ปี พ.ศ. 2547 เพิ่มขึ้นเป็น 8,317 ล้านบาท [6] ซึ่งเห็นได้ว่าปริมาณไม้ยางพาราที่มีเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณขี้เลื่อยไม้ยางพาราเหลือมากขึ้นด้วย ดังนั้นการนำเศษไม้และขี้เลื่อยที่เหลือจากการแปรรูปมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไม้พอลิเมอร์คอมโพสิต จะทำให้สามารถเพิ่มมูลค่าของเศษวัสดุไม้เหล่านี้ด้วย อย่างไรก็ตามการใช้ประโยชน์จากเส้นใยธรรมชาติ ยังมีข้อจำกัดบางประการเนื่องจากตัวเส้นใยเอง เช่น ทนความร้อนได้ต่ำกว่าเส้นใยสังเคราะห์ มีสมบัติดูดซับความชื้น และปัญหาที่สำคัญ คือ เมื่อทำการผสมเส้นใยลงไปในพอลิเมอร์เมทริกซ์ การกระจายตัวของเส้นใยและการยึดติดกับพอลิเมอร์ไม่ดีพอ อีกทั้งสมบัติด้านความเหนียวและความสามารถในการทนต่อแรงดึงลดลง โดยเฉพาะเมื่อใช้พอลิเมอร์เมทริกซ์ เช่น พอลิเอทิลีน (PE) และพอลิพรอพิลีน (PP)

แต่ปัญหาเหล่านี้สามารถแก้ไขได้โดยการใช้สารคู่ควบ (Coupling agents) สารช่วยผสม (Compatibilizers) หรือการปรับสภาพผิวเส้นใยโดยการต่อกิ่ง (Grafting) ซึ่งวิธีการใช้สารคู่ควบเป็นที่ยอมรับเนื่องจากสะดวกและทำได้ง่าย โดยการเลือกใช้สารคู่ควบสำหรับระบบพอลิเมอร์คอมโพสิตระบบใดระบบหนึ่งจะต้องเลือกสารคู่ควบที่สามารถเข้ากันได้ดีทั้งกับเมทริกซ์และเส้นใยไม้ที่ใช้ จึงปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิตให้เหมาะสมกับการใช้งานมากยิ่งขึ้น

ในงานวิจัยนี้จึงเกี่ยวข้องกับการเตรียม การตรวจวิเคราะห์และการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อนและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ จากนั้นปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้สารช่วยผสมเนื่องจากความไม่เข้ากันของ PVC ซึ่งมีสมบัติมีขี้ผึ้งและ LDPE ซึ่งมีสมบัติไม่มีขี้ผึ้งทำให้การยึดเหนี่ยวระหว่าง 2 วัสดุไม่ดี เป็นผลให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมมีค่าต่ำ ดังนั้นจำเป็นต้องปรับปรุงด้วยสาร

ช่วยผสมซึ่งจะทำหน้าที่คล้ายเป็นสะพานเชื่อมระหว่าง PVC และ LDPE ส่งผลให้การยึดเหนี่ยวระหว่างวัฏภาคดีขึ้น สมบัติของพอลิเมอร์ผสมจึงสูงขึ้น โดยในการทดลองนี้ได้เปรียบเทียบสารช่วยผสม 3 ชนิด คือ คลอรีเนตพอลิเอทิลีน (Chlorinated polyethylene, CPE) พอลิเมอร์ร่วมระหว่างเมทิลเมทาไครเลตและบิวทิลอะไครเลต (Methyl-methacrylate-co-butylacrylate, PA 20) และ พอลิเมอร์ร่วมระหว่างเอทิลีนและเมทิลอะไครเลต (Ethylene and methyl acrylate, Elvaloy) จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมนี้มาผลิตเป็นคอมโพสิตโดยใช้ซีลี้อย่างพาราเป็นวัสดุเสริมแรงและศึกษาสมบัติที่สำคัญต่างๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิต และทำการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้สารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) 2 ชนิด คือ A-137 และ A-1100 และสารช่วยผสมชนิดมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีน (Maleic anhydride-grafted-polyethylene, MAPE) คือ Fusabond[®] MB100D มีค่า MFI 2 g/10 min เพื่อช่วยปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างพื้นผิวเส้นใยกับเมทริกซ์ให้มีการยึดเกาะที่ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาวิธีการผสมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ
2. เพื่อศึกษาแนวทางในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้สารช่วยผสม
3. เพื่อผลิตคอมโพสิตจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำโดยใช้ซีลี้อย่างพาราเป็นสารเสริมแรง
4. เพื่อศึกษาแนวทางในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมได้ โดยใช้สารคู่ควบ Silane และ/หรือ สารช่วยผสม MAPE
5. เพื่อศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิต เช่น สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ผลิตได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาวิธีการผสมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเตี้ยและเครื่องผสมชนิด 2 ลูกกลิ้ง
2. ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน รวมถึงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน ดังนี้ PVC:LDPE เป็น 100:10 100:20 100:30 100:40 และ 100:50
3. ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้สารช่วยผสมชนิดต่างๆ คือ คลอรีเนตพอลิเอทิลีน พอลิเมอร์ร่วมระหว่างเมทิลเมทาไครเลตและบิวทิลอะไครเลต และพอลิเมอร์ร่วมระหว่างเอทิลีนและเมทิลอะไครเลต โดยใช้ปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE

4. ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน รวมถึงฐานวิทยาของคอมโพสิตจากพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ซีลีเนียมอย่างพาราเป็นสารเสริมแรง โดยปริมาณซีลีเนียมอย่างพาราที่ศึกษา คือ 10 20 30 40 และ 50 phr
5. ศึกษาถึงผลกระทบของชนิดและปริมาณของสารคู่ควบ Silane และสารช่วยผสม MAPE ที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต
6. ศึกษาถึงผลของอัตราส่วนระหว่างสารคู่ควบ Silane และสารช่วยผสม MAPE ที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถผลิตพอลิเมอร์ผสมและปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้สารช่วยผสมเพื่อให้มีสมบัติโดยรวมดีขึ้น
2. สามารถผลิตคอมโพสิตจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE มีซีลีเนียมอย่างพาราที่มีสมบัติโดยรวมดีขึ้น
3. สามารถใช้ประโยชน์จากซีลีเนียมที่ได้จากอุตสาหกรรมผลิตไม้เฟอร์นิเจอร์ในการเสริมแรงพลาสติก เพื่อผลิตเป็นพอลิเมอร์คอมโพสิต

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 พอลิเมอร์ผสม [7]

พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) เป็นการนำพอลิเมอร์ 2 ชนิดหรือมากกว่ามาผสมกันเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่หรือเพื่อแก้ไขสมบัติที่ไม่ดีของพอลิเมอร์เดิมซึ่งไม่สามารถใช้สารเติมแต่ง (Additives) ในการปรับปรุงสมบัติเหล่านั้นได้ โดยในปัจจุบันมีผู้ให้ความสนใจพอลิเมอร์ผสมมากขึ้นและมีการผลิตเป็นการค้ากันอย่างกว้างขวาง

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการทำให้อัตลักษณ์ที่ต้องการของพอลิเมอร์ผสม คือ วิธีการผสม เครื่องมือ และเทคนิคในการผสมพอลิเมอร์ 2 ชนิด หรือมากกว่าให้ผสมเข้ากันได้ดี ซึ่งเป็นปัจจัยในการควบคุมสมบัติของพอลิเมอร์ผสม

2.1.1 วัตถุประสงค์ของการทำพอลิเมอร์ผสม

- เพื่อให้สมบัติดีขึ้นแต่มีราคาถูก
- เพื่อพัฒนาสมบัติให้ได้ตามที่ต้องการ
- เพื่อให้สมบัติเด่นของพอลิเมอร์มีค่าสูงขึ้น
- เพื่อปรับปรุงส่วนประกอบของการผสมตามที่ถูกคำต้องการ
- เพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการอุตสาหกรรม เช่น การนำเศษพลาสติกหลาย ๆ ชนิด กลับมาขึ้นรูปใหม่

ในการเลือกพอลิเมอร์ที่จะนำมาผสมต้องคำนึงถึงข้อดีและข้อเสียของพอลิเมอร์แต่ละชนิดเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงสมบัติให้ได้ตามที่ต้องการ เนื่องจากพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งต้องชดเชยข้อเสียของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของพอลิเมอร์ [8]

ประเภท	ชื่อย่อ	ข้อดี	ข้อเสีย
Polyamide	PA	มีความแข็งแรงกระแทกสูง	เกิดการเสียรูปจากความร้อนได้ง่าย
Polycarbonate	PC	มีความเหนียวที่อุณหภูมิต่ำ ทนต่อการเสียรูปจากความร้อน	ไม่ทนต่อตัวทำละลายและสารเคมี

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

ประเภท	ชื่อย่อ	ข้อดี	ข้อเสีย
Polyoxymethylene	POM	ความแข็งแรงดึงและมอดุลัสสูง	ไม่ทนต่อแรงกระแทกและเกิดการแตกหักได้ง่าย
poly(ethylene terephthalate)	PET	ทนต่อสารละลายและ	การหดตัวสูงและความเหนียวต่ำที่อุณหภูมิต่ำ
poly(butylene terephthalate)	PBT	สารเคมีได้ดี	
High impact polystyrene	HIPS	ความแข็งแรงกระแทกสูง	เสียวรูปจากความร้อนได้ง่าย
Acrylonitrile butadiene styrene copolymer	ABS	ความแข็งแรงกระแทกสูง ทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศได้ดี	เสียวรูปจากความร้อนได้ง่าย
Poly(vinyl chloride)	PVC	ความสามารถในการหน่วงไฟสูง	เปราะ แตกหักง่าย
Polyethylene	PE	ความสามารถในการยืดตัวสูง ทนต่อตัวทำละลายและสารเคมี	
Polyphenylene ether	PPE	ทนต่อการเสียวรูปจากความร้อน มีความแข็งแรงสูง ความสามารถในการหน่วงไฟสูง	ความแข็งแรงกระแทกต่ำ

2.1.2 คำจำกัดความเกี่ยวกับพอลิเมอร์ผสม [9]

- พอลิเมอร์ผสม คือ พอลิเมอร์ที่ได้จากการผสมพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์รวมอย่างน้อย 2 ชนิดขึ้นไป

- พอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้ดีมีวัฏภาคเดียว (Miscible polymer blend) คือ พอลิเมอร์ผสมเป็นเนื้อเดียวกันไปจนถึงระดับโมเลกุลซึ่งมีพลังงานอิสระของการผสม (Free energy of mixing, ΔG_m)

$$\Delta G_m < 0$$

- พอลิเมอร์ผสมที่ไม่เข้ากันมีหลายวัฏภาค (Immiscible polymer blend) คือ พอลิเมอร์ผสมที่มี

$$\Delta G_m > 0$$

- พอลิเมอร์ผสมที่มีความเข้ากันได้ (Compatible polymer blend) คือ พอลิเมอร์ผสมที่ไม่เป็นวัฏภาคเดียวแต่มีการยึดติดระหว่างผิวสัมผัส (Interfacial adhesion) ของพอลิเมอร์ผสมดีโดยไม่คำนึงถึงพลังงานอิสระของการผสม

- กระบวนการดัดแปรพอลิเมอร์ผสมให้เข้ากันได้ (Compatibilization) คือ วิธีที่ใช้ในการดัดแปรผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์ที่ไม่เป็นวัฏภาคเดียวโดยการเติมพอลิเมอร์ร่วมหรือสารดัดแปรพื้นผิว เพื่อให้การยึดติดระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น

- สารช่วยผสม (Compatibilizer) คือ พอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ร่วมซึ่งใช้ในการเติมในพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เป็นวัฏภาคเดียว เพื่อดัดแปรพื้นผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ผสมทำให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น

2.1.3 ความสามารถในการละลายเข้ากันได้และความสามารถในการผสมเข้ากันได้ [7]

ความสามารถในการละลายเข้ากันได้ระดับโมเลกุล (Miscibility) ในทางเทอร์โมไดนามิกส์ คือ เมื่อเกิดขึ้นจะทำให้เกิดระบบวัฏภาคเดียวเนื้อเดียว (Homogeneous single-phase system) มีสมบัติอยู่ระหว่างพอลิเมอร์ 2 ชนิด และโดยทั่วไปจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของพอลิเมอร์ ชนิดนั้น ๆ องค์ประกอบที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับความความสามารถในการละลายเข้ากันได้ระดับโมเลกุล (Molecular miscibility) ได้แก่

- น้ำหนักโมเลกุลต่ำ
- ความเป็นผลึกซึ่งมีค่าเท่ากับศูนย์
- ความมีขั้วคล้ายกัน
- พันธะไฮโดรเจนร่วมกัน

ความสามารถในการผสมเข้ากันได้ (Compatibility) จัดเป็นสมบัติในทางปฏิบัติของพอลิเมอร์ผสมบางชนิดที่เข้ากันได้ในระดับโมเลกุลและมีประโยชน์ต่อทางการค้า อย่างไรก็ตามระบบพอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่ในทางการค้าเป็นระบบที่เข้ากันไม่ได้ในระดับโมเลกุล (Immiscible) และแยกออกเป็นระบบหลายวัฏภาค (Multi-phase system) ทำให้เกิดการปรับปรุงระบบผสมเพื่อให้แต่ละวัฏภาคเกิดการยึดเกาะกันดีขึ้นซึ่งเป็นการรวมสมบัติที่ดีของแต่ละวัฏภาคและเกิดเป็นความสมดุลของสมบัติทั้งหมดที่ไม่สามารถได้จากสมบัติของพอลิเมอร์เพียงชนิดเดียว

2.1.4 สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม [10]

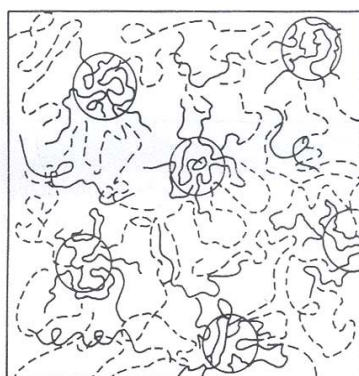
โดยทั่วไปสันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมมี 3 แบบ ซึ่งใช้ความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมเป็นหลักเกณฑ์ในการจำแนก ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ในรูปที่ 2.1 (ก) แสดงสันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้ดีมีวัฏภาคเดียวไปจนถึงระดับโมเลกุล (Miscible) ลักษณะของสันฐานวิทยาล้ำยากับพอลิเมอร์ร่วมแบบอสุระ (Random copolymer) การที่พอลิเมอร์ผสมสามารถเข้ากันได้ดีเนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ A และพอลิเมอร์ B รูปที่ 2.1 (ข) แสดงสันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เข้ากันมีหลายวัฏภาค (Immiscible) ซึ่งเป็นแบบที่พบบ่อยมากในพอลิเมอร์ผสม ทั้งนี้เนื่องจากปัจจัยพื้นฐานต่าง ๆ เช่น ความหนืดของพอลิเมอร์แต่ละชนิด สมบัติความมีขั้ว สมบัติการละลาย นอกจากนี้ยังมีสันฐานวิทยาแบบที่เข้ากันได้ดีบางส่วนและแยกวัฏภาคกันอย่างชัดเจน (Partially miscible) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ค)



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.1 สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิเมอร์ A (____) และ พอลิเมอร์ B (-----) โดย (ก) miscible (ข) immiscible และ (ค) partially miscible [9]

สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมมีอิทธิพลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมโดยเฉพาะสมบัติเชิงกลจากสันฐานวิทยาในรูปที่ 2.1 (ข) และ (ค) การกระจายตัวและการยึดติดระหว่างผิวสัมผัส (Interfacial adhesion) ของพอลิเมอร์ผสมไม่ดี ทำให้เกิดรอยตำหนิระหว่างวัฏภาค ซึ่งทำให้สมบัติเชิงกลต่ำ ดังนั้นในการผสมพอลิเมอร์เพื่อให้ได้สมบัติตามที่ต้องการ จำเป็นต้องทราบความสามารถในการเข้ากันของพอลิเมอร์แต่ละชนิด ดังตัวอย่างพอลิเมอร์ผสมในรูปที่ 2.2

	LDPE	HDPE	Ethylene Copolymers				PP	EPDM	PS	SAN	ABS	PVC	PA	PC	PMMA	PBT	PET	SEBS
HDPE	1																	
Ethylene Copolymers	1	1																
PP	4	4	2															
EPDM	4	4	3	1														
PS	4	4	4	4	4													
SAN	4	4	4	4	4	4												
ABS	4	4	4	4	4	4	1											
PVC	4	4	2	4	4	4	2	3										
PA	4	4	1	4	1	4	4	4	4									
PC	4	4	4	4	4	4	2	1	4	4								
PMMA	4	4	3	4	4	4	2	2	2	4	2							
PBT	4	4	2	4	4	4	4	2	4	4	1	4						
PET	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	1	4	2					
SEBS	4	4	4	4	4	1	3	2	3	3	4	4	4	4				

รูปที่ 2.2 ความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม 1 = ดีมาก 2 = ดี 3 = อาจเข้ากันได้ แต่ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบและ 4 = ไม่ดี [11]

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าพอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่เข้ากันได้ไม่ดี ดังนั้นจำเป็นต้องมีวิธีการในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เข้ากันมีหลายวิธีกาให้มีการยึดติดระหว่างผิวสัมผัสขึ้น

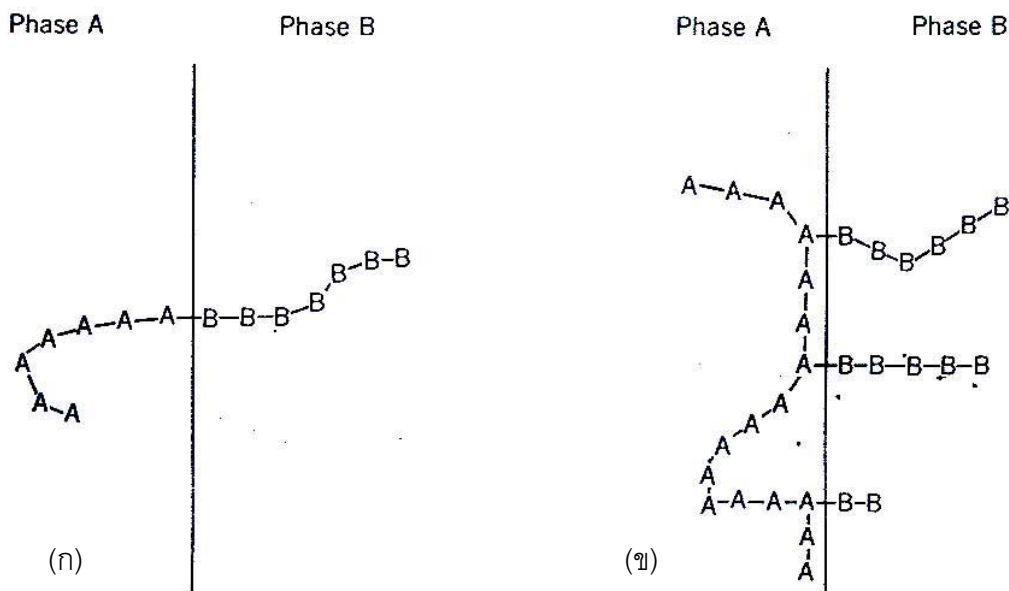
2.1.5 กระบวนการดัดแปรพอลิเมอร์ผสมให้เข้ากันได้ [8, 10]

การเติมสารช่วยผสมเป็นวิธีการหนึ่งในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งมีผลทำให้

- แรงตึงผิว (Interfacial tension) ของพอลิเมอร์หลอมเหลวมีค่าลดลง ทำให้กระจายตัวในวัฏภาคได้ดีขึ้น
- เพิ่มการยึดติด (Adhesion) ระหว่างผิวสัมผัส ทำให้การถ่ายเทความเค้น (Stress transfer) เกิดได้ดีขึ้น

โดยสารช่วยผสมอาจเป็นพอลิเมอร์ร่วมชนิดบล็อกหรือตอกิ่ง ซึ่งสามารถแทรกซึมผ่านเข้าไปในวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสม ดังในรูปที่ 2.3 แสดงพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสม โดยในรูปที่ 2.3 (ก) เป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อก และในรูปที่ 2.3 (ข) เป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่ง ซึ่งจะสังเกตได้ว่าพอลิเมอร์ร่วมทั้ง 2 แบบนี้จะมีโครงสร้างเหมือนกับพอลิเมอร์ผสมโดยส่วนที่เหมือน A จะแทรกซึมผ่านไปในพอลิเมอร์ผสมส่วนที่เป็นพอลิเมอร์ A และส่วนที่เหมือน B จะแทรกซึมผ่านไปในพอลิเมอร์ผสมส่วนที่

เป็นพอลิเมอร์ B จากวิธีการนี้เป็นการปรับปรุงการยึดติดระหว่างผิวสัมผัส (Interfacial adhesion) ทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น



รูปที่ 2.3 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง A และ B ที่เติมสารช่วยผสมแบบ (ก) พอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อก และ (ข) พอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่ง [10]

ในการเลือกพอลิเมอร์ร่วมเพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสมต้องคำนึงถึงปัจจัยของน้ำหนักโมเลกุล ในแต่ละส่วนของพอลิเมอร์ร่วม คือ ถ้ามีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ความยาวของสายโซ่สั้น ทำให้การแทรกซึมผ่านไปในพอลิเมอร์ผสมได้น้อย ส่งผลให้การยึดติดระหว่างผิวสัมผัสต่ำ แต่ถ้ามีน้ำหนักโมเลกุลสูงมากเกินไปทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ยาก การแทรกซึมผ่านเข้าไปในพอลิเมอร์ผสมต่ำเช่นเดียวกัน ซึ่งตัวอย่างของสารช่วยผสมที่ใช้ในพอลิเมอร์ผสม แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 พอลิเมอร์ผสมและสารช่วยผสมในทางการค้า [11-12]

ลำดับ	พอลิเมอร์ผสม	สารช่วยผสม	ตัวอย่างรหัสสินค้า
1	PA6/PE	PE- <i>g</i> -MAH or E-MAA (Zn)	Fusabond® E Surlyn® 1652
2	PA6/PP	PP- <i>g</i> -MAH	Fusabond® P
3	PBT/PP	E-BA-GMA	Elvaloy® PTW
4	PBT/PA	E-BA-GMA	Elvaloy® PTW
5	PET/Polyolefin	E-BA-GMA	Elvaloy® PTW
6	PC/ABS	E-Acrylate	Elvaloy® AC และ Elvaloy® PTW
7	PC/PBT	E-Acrylate	Elvaloy® AC

2.2 คอมโพสิต

คอมโพสิต (Composite) หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยองค์ประกอบสองส่วน (หรือมากกว่า) ที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด (Distinct components) อยู่ด้วยกัน และมีสมบัติแตกต่างกันอย่างชัดเจน เมื่อผสมเป็นคอมโพสิตแล้วจะมีความแข็งแรงมากกว่าแต่ละองค์ประกอบย่อย วัสดุคอมโพสิตชนิดพอลิเมอร์คอมโพสิตมีสมบัติที่ดีหลายประการ ที่สำคัญที่สุด คือ มีความแข็งแรงสูง แต่มีน้ำหนักเบา เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะ ปัจจุบันจึงมีการใช้งานวัสดุคอมโพสิตเป็นโครงสร้างและรับแรงสำหรับงานวิศวกรรม เช่น ใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องบิน รถยนต์ เรือ เฟอ์นิเจอร์ ฯลฯ นอกจากนี้คอมโพสิตยังมีสมบัติที่กว้าง เนื่องจากมีคอมโพสิตหลายรูปแบบ คือ ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของวัสดุคอมโพสิต ดังนั้นจึงสามารถเลือกใช้วัสดุคอมโพสิตให้เหมาะสมกับงานแต่ละประเภทได้

2.2.1 องค์ประกอบหลักของคอมโพสิต [13]

คอมโพสิตประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลัก คือ

2.2.1.1 ส่วนเสริมแรง

ส่วนเสริมแรง (Reinforced part) คือ ส่วนที่เป็นโครงสร้างที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุคอมโพสิต หมายถึง เป็นส่วนรับแรงหลักของวัสดุคอมโพสิต วัสดุที่เป็นส่วนเสริมแรงจะมีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง โดยที่ลักษณะของส่วนเสริมแรงมีหลายแบบ ตัวอย่างเช่น ส่วนเสริมแรงแบบแผ่น แบบเป็นก้อน หรือผงที่มีขนาดเล็ก แต่ที่นิยมใช้มากที่สุด คือ ส่วนเสริมแรงแบบเส้นใย (Fiber) ชนิดต่างๆ เช่น เส้นใยแก้ว (Glass fibers) เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) เส้นใยเคฟลาร์ (Kevlar fiber) ฯลฯ อาจเป็นเส้นใยยาว (Long fibers) หรือเส้นใยสั้น (Short fibers) นอกจากนี้อาจเป็นเส้นใยพันกันหรือทอ (Weaves) ให้มีโครงสร้างแบบต่างๆ

2.2.1.2 เมทริกซ์

เมทริกซ์ (Matrix) คือ ส่วนที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกันให้อยู่ในตำแหน่งและการเรียงตัวที่กำหนด มักมีความแข็งแรงและมอดุลัสน้อยกว่าส่วนเสริมแรง เมทริกซ์เป็นองค์ประกอบที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางถ่ายเทแรงที่ได้รับ (Load transfer medium) ไปสู่ส่วนเสริมแรง นอกจากนี้เมทริกซ์จะทำหน้าที่ปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียดสีเนื่องจากสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น เป็นต้น

วัสดุเมทริกซ์ที่ใช้ในการผลิตวัสดุคอมโพสิตมีมากมายหลายชนิดและมีสมบัติหลากหลาย ซึ่งอาจแบ่งชนิดของวัสดุเมทริกซ์ได้ 3 ชนิด คือ พอลิเมอร์ โลหะและเซรามิกส์

พอลิเมอร์เมทริกซ์ที่นิยมใช้ในคอมโพสิต คือ พอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซต (Thermosets) เนื่องจากใช้สารตั้งต้นน้ำหนักโมเลกุลต่ำมีความหนืดต่ำ สามารถผสมกับส่วนเสริมแรงขึ้นรูปได้ง่าย ตัวอย่างเทอร์โมเซตที่นิยมใช้ ได้แก่ อีพอกซีเรซิน (Epoxy resins) ไวนิลเอสเทอร์ (Vinyl esters) ฟีนอลิก (Phenolics) และพอลิอิมิด (Polyimides) เริ่มจากการใช้มอนอเมอร์ (Monomers) หรือ โอลิโกเมอร์ (Oligomers) ที่มีหลายหมู่ฟังก์ชัน ทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์เกิดเป็นพอลิเมอร์โครงสร้างร่างแหสามมิติ ซึ่งไม่สามารถหลอมเหลวนำกลับมาขึ้นรูปใหม่ได้ ส่วนพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติกใช้เป็นเมทริกซ์สำหรับคอมโพสิตน้อยกว่า แม้ว่าจะมีแนวโน้มการประยุกต์เป็นคอมโพสิตมากขึ้น เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า ทนอุณหภูมิต่ำกว่า แต่มีข้อดี คือ สามารถขึ้นรูปได้หลายครั้ง

การใช้วัสดุโลหะเป็นเมทริกซ์สำหรับคอมโพสิตนิยมใช้กับเส้นใยโลหะเป็นส่วนเสริมแรง ซึ่งมีความแข็งแรงสูงแต่มีข้อจำกัด คือ น้ำหนักของวัสดุสูง ตัวอย่างเมทริกซ์โลหะที่นิยมใช้ คือ อะลูมิเนียม (Aluminium) ไททาเนียม (Titanium) แมกนีเซียม (Magnesium) และทองแดง (Copper) ซึ่งการใช้โลหะและเซรามิกส์เป็นเมทริกซ์นิยมใช้กับคอมโพสิตที่ใช้งานอุณหภูมิสูงและทนต่อสารเคมี

2.2.2 การแบ่งชนิดของคอมโพสิต

สามารถแบ่งวัสดุคอมโพสิตได้หลายแบบ เช่น แบ่งตามลักษณะของส่วนเสริมแรง ซึ่งสามารถแบ่งชนิดของคอมโพสิตได้ดังนี้

1. คอมโพสิตแบบเส้นใย (Fibrous composites) คือ คอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใย (Fibers) อาจเป็นเส้นใยยาว (Long fibers) หรือเส้นใยสั้น (Short fibers) มักเป็นเส้นใยขนาดเล็ก มีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง ทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยสูงกว่าแนวอื่น ๆ

2. คอมโพสิตแบบแผ่นหรือลามิเนต (Laminar composites) คือ คอมโพสิตที่ประกอบด้วยชั้นหรือแผ่นของวัสดุที่ยึดติดกันด้วยตัวเชื่อมเมทริกซ์ มีลักษณะเป็นชั้น ๆ คล้ายแผ่นประกบ หรือเป็นโครงสร้างคล้ายรังผึ้ง

3. คอมโพสิตแบบเป็นก้อน (Particulate composites) คือ คอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเม็ด (Beads) แผ่น (Flake) หรือผง (Powder) ที่มีขนาดเล็ก

นอกจากนี้สามารถแบ่งชนิดของคอมโพสิตได้ตามลักษณะการเกิดของคอมโพสิต ดังนี้

1. คอมโพสิตจากธรรมชาติ (Natural composites) คือ วัสดุคอมโพสิตที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ไม้เป็นคอมโพสิตของเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose) เป็นส่วนเสริมแรง โดยมีสารจำพวก ลิกนิน (Lignin) เป็นเมทริกซ์ยึดเซลลูโลสไว้ด้วยกัน ส่วนกระดูกและฟันเป็นคอมโพสิตของผลึกแข็งอนินทรีย์ เช่น ไฮดรอกซีแอปาทาइट (Hydroxyapatite) อยู่ในเมทริกซ์ของสารอินทรีย์เหนียวคอลลาเจน (Collagen) เป็นต้น

2. คอมโพสิตจากการสังเคราะห์ (Synthetic composites) คือ วัสดุคอมโพสิตที่ได้จากการสังเคราะห์ เช่น พลาสติกเสริมแรง วัสดุไฟเบอร์กลาส เป็นต้น

ตารางที่ 2.3 ข้อดีและข้อเสียของพอลิเมอร์คอมโพสิต [13-14]

ข้อดี	ข้อเสีย
1. ช่วยลดน้ำหนักของวัสดุ 2. มีสมบัติต่อน้ำหนักสูง เช่น ความแข็งแรงต่อน้ำหนัก 3. สามารถทำให้มีสมบัติแข็งแรงเฉพาะในทิศทางที่ต้องการได้ 4. มีอายุการใช้งานนาน ด้านทานการสึกกร่อน สามารถเพิ่มหรือลดสมบัติการนำความร้อนและการนำไฟฟ้า	1. วัตถุดิบและเครื่องมือในการขึ้นรูปคอมโพสิตมีราคาสูง 2. มีสมบัติในแนวขวางของการจัดเรียงตัวของส่วนเสริมแรงต่ำ 3. มีสมบัติด้านความเหนียวต่ำ 4. มีผลเสียกับสิ่งแวดล้อมเมื่อส่วนที่เป็นเมทริกซ์เกิดการเสียดสี 5. ยากในการต่อ (Attaching) หรือเชื่อมติดกับวัสดุอื่น 6. ยากในการตรวจวิเคราะห์สมบัติของคอมโพสิต

2.2.3 การประยุกต์ใช้งานคอมโพสิต [13]

ในการประยุกต์ใช้งานวัสดุคอมโพสิต ทั้งชนิดและการออกแบบรูปร่างและโครงสร้างของคอมโพสิตสามารถประยุกต์ได้กับการใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ (Automotive) เครื่องบิน (Aircraft) ยานอวกาศ (Aerospacecraft) อุปกรณ์กีฬา (Sporting goods) ตารางที่ 2.4 แสดงตัวอย่างการใช้งานของคอมโพสิตในอุตสาหกรรมต่างๆ การที่มีการใช้งานคอมโพสิตทดแทนวัสดุอื่น ๆ เช่น โลหะ เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ผลิตภัณฑ์คอมโพสิตมีชิ้นส่วนน้อยชิ้นไม่ต้องการการประกอบมาก สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างการใช้งานวัสดุคอมโพสิต [13]

อุตสาหกรรม	ตัวอย่างการใช้งาน
เครื่องบิน	ประตู ปีก ใบพัด หางเสือ ตัวเครื่อง
ยานอวกาศ	กระสวยอวกาศ สถานีอวกาศ
ยานยนต์	ตัวถัง ส่วนประกอบเครื่องยนต์ กันชน
เรือ	ตัวถังเรือ ดาดฟ้า
เคมี	ท่อส่งสารเคมี ถังเก็บ
อุปกรณ์ก่อสร้าง	ฝ้าผนัง ประตู เฟอร์นิเจอร์ โต๊ะ เก้าอี้ บันได
อุปกรณ์ไฟฟ้า	แผงวงจรไฟฟ้า กล่องคอมพิวเตอร์

2.3 เส้นใยไม้ [15]

ไม้เป็นวัสดุธรรมชาติที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากสามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงในการประกอบอาหาร การผลิตไอน้ำ การทำเฟอร์นิเจอร์ การสร้างบ้าน นอกจากนี้ต้นไม้ยังเป็นแหล่งน้ำอีกด้วย

ในทางการค้าแบ่งไม้เป็น 2 ชนิด คือ ไม้เนื้ออ่อน (Softwoods) และไม้เนื้อแข็ง (Hardwoods) โดยอาศัยวิชาการทางพฤกษศาสตร์เป็นรากฐานในการแบ่งดังนี้

- ไม้เนื้ออ่อน เป็นไม้ที่ได้จากต้นไม้พวกสน Coniferae ที่มีลักษณะใบเรียวยาวเล็ก (Needle leaves) ผลมีรูปลักษณะเป็นรูปทรงกรวย (Cone) ไม้เนื้ออ่อนไม่มีส่วนที่เป็นท่อลำเลียงน้ำในโครงสร้างของเนื้อเยื่อ
- ไม้เนื้อแข็ง เป็นไม้ที่ได้จากต้นไม้ที่มีใบกว้างและมีท่อลำเลียงน้ำมัตรวมอยู่ในโครงสร้างของเนื้อเยื่อพืช ตัวอย่างไม้เนื้อแข็ง เช่น ไม้เต็ง ไม้สัก

องค์ประกอบทางเคมีของไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็งแตกต่างกันในด้านปริมาณของส่วนประกอบทางเคมีที่มีอยู่ในเนื้อไม้ ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ส่วนประกอบต่างๆ ของไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง [16]

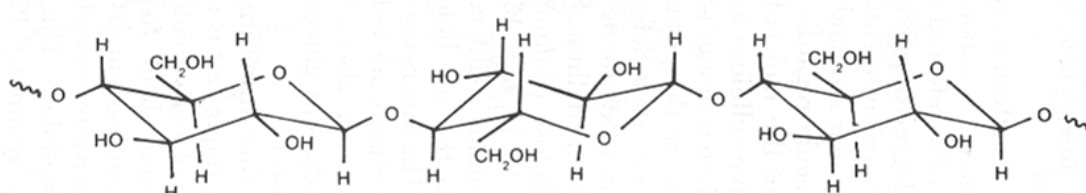
รายละเอียด	ชนิดของไม้ (% ของน้ำหนัก)	
	ไม้เนื้ออ่อน	ไม้เนื้อแข็ง
ส่วนประกอบทางเคมี (ไม้แห้ง)		
เซลลูโลส	43-61	43-64
เฮมิเซลลูโลส	28-32	15-35
ลิกนิน	29-37	22-35
การวิเคราะห์ธาตุ (ไม้แห้ง)		
H	6.1	6.2
C	53.0	51.0
O	38.3	39.0
S	-	-
N	0.1	0.2
ซีเถ้า	1.7	2.5

2.3.1 องค์ประกอบของเส้นใยไม้ [16]

องค์ประกอบที่สำคัญของเส้นใยไม้ มาจากส่วนที่เป็นพอลิเมอร์อินทรีย์ โดยมี 2 โครงสร้างหลักที่สำคัญ คือ คาร์โบไฮเดรต 65-75% และ ลิกนิน 18-35% และมีส่วนที่เป็นสารสกัดอินทรีย์ต่างๆ นอกจากนี้ มีส่วนที่เป็นสารอนินทรีย์ประมาณ 4-10%

2.3.1.1 เซลลูโลส

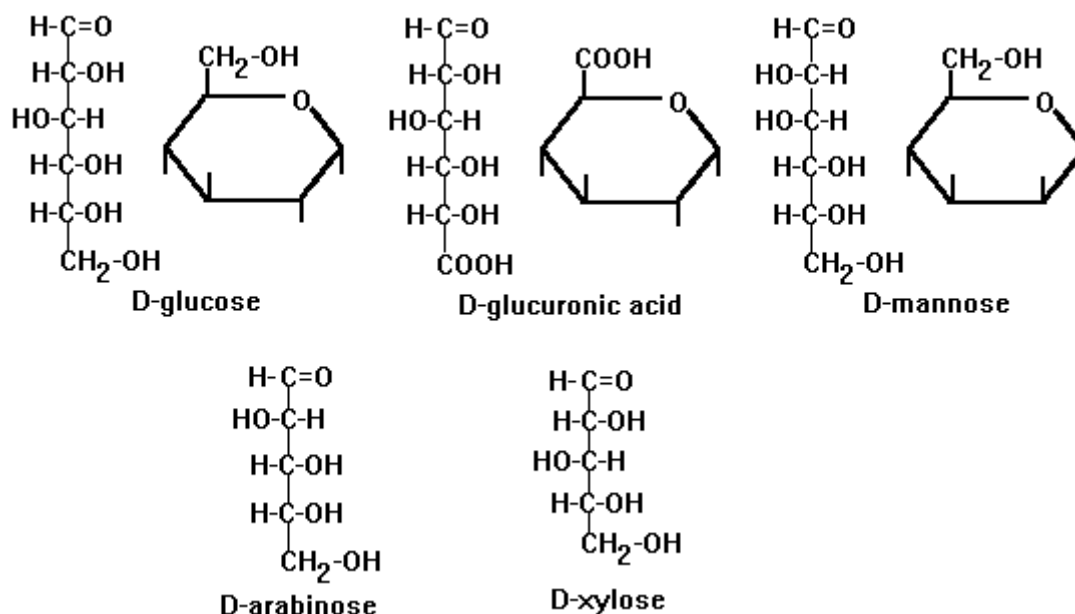
เซลลูโลสเป็นส่วนประกอบหลักในเนื้อไม้ที่มีอยู่ประมาณ 40- 50 % พบอยู่ในผนังเซลล์ (Cell wall) ของไม้ เซลลูโลสจัดเป็น กลูแคนพอลิเมอร์ (Glucan polymer) ที่ประกอบด้วยสายโซ่ตรงของ 1,4- β -bonded anhydroglucose unit มอนอเมอร์ของเซลลูโลส คือ กลูโคสซึ่งมีสูตรเคมี $C_6H_{12}O_6$



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเซลลูโลส [16]

2.3.1.2 เฮมิเซลลูโลส

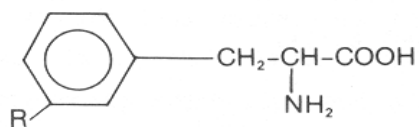
เฮมิเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบในเนื้อไม้ซึ่งมีอยู่ 25-35% โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยพอลิแซ็กคาไรด์คล้ายกับเซลลูโลส แต่มีส่วนที่แตกต่าง คือ เฮมิเซลลูโลส ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด เช่น กลูโคส แมนโนส กาแลกโตส ไซโลส อราบิโนส กรดกลูคูโรนิก และกรดกาแลกทูโรนิก ในขณะที่เซลลูโลสประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสชนิดเดียวเป็นส่วนใหญ่



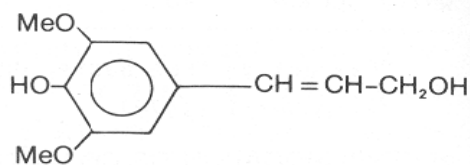
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของมอนอเมอร์ที่พบในเฮมิเซลลูโลส [17]

2.3.1.3 ลิกนิน

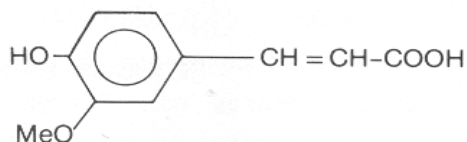
ลิกนินทำหน้าที่เหมือนเป็นกาวที่ช่วยยึดเกาะเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเข้าไว้ด้วยกัน โครงสร้างของลิกนินประกอบด้วยสารอะลิฟาติกและอะโรมาติกอยู่รวมกัน ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูงพืชที่มีปริมาณลิกนินอยู่มากจะมีความแข็งแรงสูง



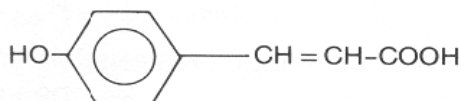
a) PHENYLALANINE



b) SINAPYL ALCOHOL

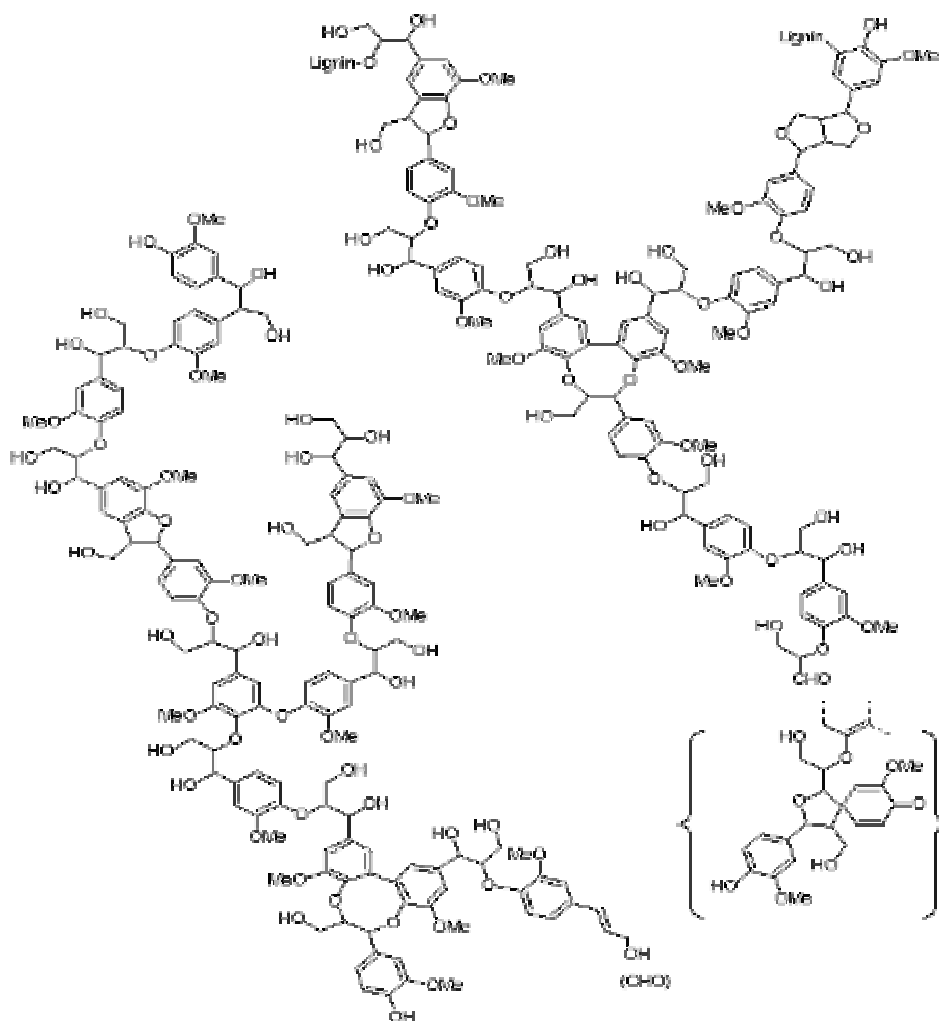


c) CONIFERYL ALCOHOL



d) PARA COUMARYL ALCOHOL

รูปที่ 2.6 โครงสร้างของมอนอเมอร์ในลิกนิน [16]



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของลิกนินในไม้เนื้ออ่อน [18]

2.3.1.4 สารอินทรีย์อื่นๆ

สารอินทรีย์ซึ่งสามารถสกัดได้ด้วย น้ำ หรือ แอลกอฮอล์ เช่น แวกซ์ อัลคาลอยด์ โปรตีน ฟีนอลิก เพกติน กาว เรซิน ไกลโคไซด์ สารเหล่านี้ทำหน้าที่เหมือนเป็นตัวกลางในกระบวนการเมตาบอลิซึมของต้นไม้ ทำหน้าที่เก็บสะสมพลังงาน และทำหน้าที่ต่อต้านจุลินทรีย์

2.3.1.5 สารอินทรีย์

สารอินทรีย์ที่มีในเนื้อไม้ เช่น แคลเซียมไอออน โพแทสเซียมไอออนและแมกนีเซียมไอออน

2.3.2 ไม้ยางพารา [19-21]

พืชที่เลือกใช้เป็นสารเสริมแรงสำหรับงานวิจัยนี้เป็นพืชไม้ที่เหลือจากอุตสาหกรรมการผลิตไม้อัดที่ทำจากไม้เนื้ออ่อนชนิดไม้ยางพารา (*Hevea brasiliensis*)

ไม้ยางพาราที่ใช้ในงานวิจัยนี้

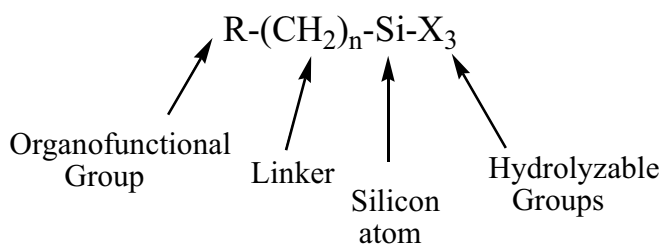
ชื่อทางพฤกษศาสตร์	<i>Hevea brasiliensis</i>
วงศ์	Enphorbiaceae
ลักษณะที่เกิด	มีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปอเมริกา ในประเทศไทยปลูกมากทางภาคใต้ ภาคตะวันออก และในปัจจุบันขยายพื้นที่ปลูกสู่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
ลักษณะทั่วไปของไม้	ยางพาราเป็นไม้ยืนต้นประเภทเนื้ออ่อน เมื่อโตเต็มที่มีความสูงประมาณ 25-30 เมตร เปลือกนอกมีสีค่อนข้างคล้ำ ใต้เปลือกมีสีชมพูไปจนถึงสีแดงหรือสีม่วงอ่อน เปลือกหนาประมาณ 6.5- 15.0 มิลลิเมตร ต้นอ่อนมีเปลือกบางกว่าต้นแก่
ลักษณะโครงสร้างของเนื้อไม้	เมื่อผ่าลำต้นตามขวางจะเห็นเป็นชั้นๆ อย่างชัดเจน ชั้นในสุดเป็นเนื้อไม้ค่อนข้างแข็งเรียกว่าแกน (Central axis) ถัดออกมาเป็นเนื้อไม้ (Wood หรือ Xylem) ชั้นเยื่อเจริญ (Cambium) เปลือกอ่อน (Soft bark) ซึ่งมีท่อลำเลียงอาหาร เปลือกแข็ง (Hard bark) เยื่อเปลือก (Cork cambium) และเปลือกแห้ง (Cork) ตามลำดับ ระหว่างเปลือกอ่อนและเปลือกแข็งมีท่อน้ำยาง (Latex vessels) เป็นจำนวนมาก

2.4 สารคู่ควบ (Coupling agent) [13]

เมื่อสารตัวเติมและเส้นใยอินทรีย์ถูกทำให้กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์พอลิเมอร์ที่เป็นสารอินทรีย์ทำให้อายุต่อระหว่างวัสดุ (Interface) อ่อนแอลง เนื่องจากความแตกต่างของโมดูลัส สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ความมีขั้ว การดึงดูดทางเคมี และความว่องไวทางเคมีจึงทำให้เกิดปัญหาในทางปฏิบัติมากมาย ดังนี้

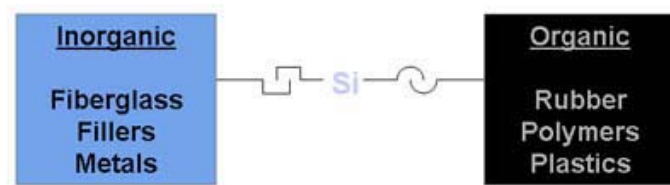
1. การกระจายตัว (Dispersion) ของสารตัวเติมที่เป็นของแข็งในเมทริกซ์ของเหลว ทำได้ยาก ทำให้อัตราการกระจายตัวช้าลง และลดการกระจายตัวที่สมดุล จึงมีผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์สุดท้าย
2. ความแข็งแรง (Strength) ลดไป เนื่องจากความอ่อนแอตรงผิวรอยต่อ
3. ความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact Strength) ลดต่ำลงอย่างมากเพราะเกิดความอ่อนแอตรงผิวรอยต่อ
4. รอบทางความร้อน (Thermal Cycling) ทำให้เกิดความไม่เข้ากัน (Mismatch) ระหว่างอนุภาคของสารอินทรีย์ที่มีการขยายตัวทางความร้อนต่ำกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่มีการขยายตัวทางความร้อนสูงทำให้เกิดความล้าเหลวตรงบริเวณรอยต่อ
5. การให้สี (Pigmentation) ทำให้เกิดการแยกตัวและการกระจายตัวของอนุภาคที่มีสีแต่ละชนิดได้อย่างเหมาะสม
6. ความชื้น (Humidity) ส่งผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างการขยายตัวและการหดตัวของ 2 วัสดุ เกิดความไม่เหมาะสมตรงผิวรอยต่อในช่วงที่มีความชื้น โดยความชื้นจะเข้ามาตามรอยต่อทำให้เกิดความอ่อนแอและเกิดความล้าเหลวในที่สุด

ด้วยเหตุผลทั้งหมด จึงเกิดความแตกต่างที่เห็นได้ชัดตรงรอยต่อระหว่างพอลิเมอร์และสารตัวเติม ทำให้เกิดปัญหาขึ้นมากมาย แต่ปัญหาเหล่านี้จะแก้ไขได้โดยใช้สารคู่ควบ (Coupling agents) เพื่อช่วยให้สารตัวเติมผสมเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ วัสดุคอมโพสิตที่มีคุณภาพสูงจำเป็นต้องรองรับความเครียดระหว่างวัสดุโดยมีแรงยึดระหว่างผิว การปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบที่เหมาะสม จะส่งเสริมแรงกระทำทางเคมีและกายภาพกับพอลิเมอร์ สารคู่ควบชนิดต่าง ๆ ที่นิยมใช้เช่น สารคู่ควบ Silane (Silane coupling agents) จัดเป็นสารคู่ควบที่นิยมใช้กันมานาน ซึ่งมีสูตรโครงสร้างทั่วไปดังรูปที่ 2.8



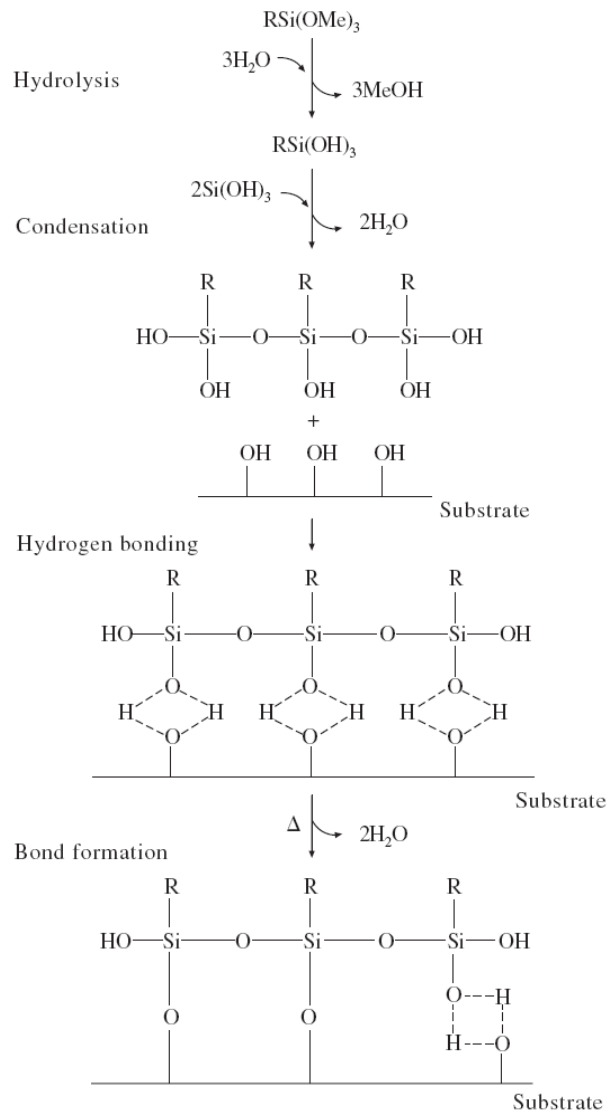
รูปที่ 2.8 โครงสร้างของสารคู่ควบ Silane [7]

โครงสร้างของสารคู่ควบ Silane ประกอบด้วยซิลิคอน (Si) เป็นจุดศูนย์กลางของโมเลกุลโดยจะจับกับหมู่ของสารอินทรีย์ (R) เช่น หมู่ไวนิล หมู่อะมิโน หมู่คลอไรด์ หมู่เมอแคปแทน และหมู่อีพอกซี เป็นต้น โดยจะทำหน้าที่ยึดติดกับเมทริกซ์พอลิเมอร์ และในส่วนของหมู่อินทรีย์ (X) เช่น เมทอกซี หรือ เอทอกซีจะสามารถยึดติดกับสารอินทรีย์ แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การเกิดปฏิกิริยาของสารคู่ควบ Silane [22]

หมู่อินทรีย์ (X) จะถูกไฮโดรไลซ์ด้วยน้ำกลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (Silanol, -O-Si) โดยจะทำปฏิกิริยากับผิวหน้าของสารตัวเติม และสารคู่ควบเองเกิดเป็นพันธะระหว่างสารตัวเติมกับสารคู่ควบ ขณะที่สารอินทรีย์ (R) เกิดปฏิกิริยากับเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ประเภทสารอินทรีย์ด้วยพันธะโควาเลนต์ และ/หรือการสร้างโครงร่างแหเชื่อมโยงภายในโครงสร้าง (Interpenetrating networks) ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่าง Silane กับหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยเซลลูโลสนั้นจะเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะกันกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งการเลือกใช้สารคู่ควบ Silane สามารถออกแบบพันธะสารอินทรีย์ (R) ให้เหมาะสมกับเมทริกซ์พอลิเมอร์ที่แตกต่างกันไป เช่น หมู่ไวนิล หมู่เอพอกซี หมู่เอมีน หมู่เมอร์แคปแทน เป็นต้น ด้วยเหตุนี้สารตัวเติม สารคู่ควบ และเมทริกซ์พอลิเมอร์ ทั้งหมดจึงกลายเป็นโมเลกุลโควาเลนต์ขนาดใหญ่หนึ่งโมเลกุล โดยอัลคอกซีไฮดรอกซิล (Alkoxy silanes, R-Si-OH) จะเกิดพันธะกับหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวเส้นใย แสดงดังรูปที่ 2.10

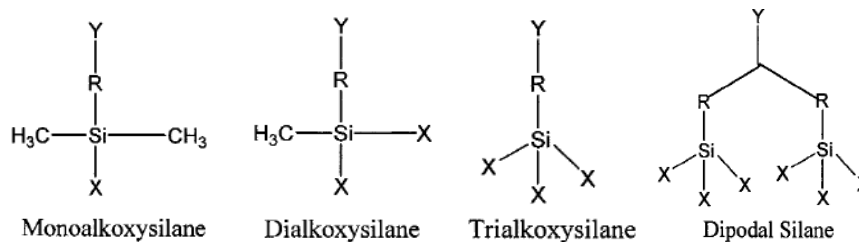


รูปที่ 2.10 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของสารคู่ควบ Silane [23]

อัลคอกซีไฮเลนเกิดผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ทำให้เกิดหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างและสามารถเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นต่อกับหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยเซลลูโลสได้โมเลกุลน้ำเป็น ผลพลอยได้ซึ่งจะเกิดพันธะโควาเลนต์ขึ้น นอกจากนี้ปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไฮเลนอล (Silanols, Si-OH) กับหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยแล้วยังเกิดโครงสร้างพอลิไซล๊อกเซน (Polysiloxane structure, $(\text{RSi}-(\text{OR}')_n)$ ขึ้นด้วย ซึ่งโครงสร้างนี้จะเชื่อมโยงระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์ให้สามารถยึดเกาะและเข้ากันได้ดียิ่งขึ้นนั่นเอง

นอกจากนี้โครงสร้างของสารคู่ควบ Silane สามารถแบ่งตามจำนวนพันธะหมู่ อนินทรีย์ (X) ได้เป็น 4 แบบ คือ Monoalkoxysilane Dialkoxysilane Trialkoxysilane และ Dipodal Silane แสดงดังรูปที่

2.11



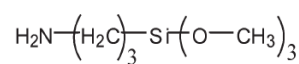
รูปที่ 2.11 โครงสร้างของสารคู่ควบ Silane โดยแบ่งตามหมู่อินทรีย์ (X) [24]

และยังสามารถแบ่งตามสารอินทรีย์ (R) ได้อีกหลายแบบ ตัวอย่างดังรูปที่ 2.12

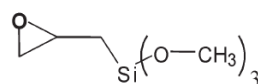
ประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้สารคู่ควบ

1. การป้องกันเส้นใย เพื่อป้องกันเส้นใยแก้วจากการขีดข่วนและทำให้อ่อนแอลงเมื่อสัมผัสกัน และสามารถใช้ผลิตในกระบวนการพลาสติกเสริมแรงได้
2. การกระจายตัวอยู่ในสมดุลดีขึ้น ช่วยทำให้เกิดสมบัติที่เหมาะสมทั้งทางกลและทางแสง ในขณะที่อนุภาคหรือเส้นใยแต่ละเส้นมีประโยชน์มากกว่าตอนที่เป็นก้อนใหญ่
3. ความหนืดต่ำ ในระบบทั้งสารละลายและหลอมเหลวเป็นผลมาจากการใช้สารคู่ควบทั้งสิ้น โดยคาดว่าสารคู่ควบจะเคลือบอนุภาคของสารอินทรีย์โดยจะดูแลไม่ให้เกิดการดึงดูดทางไอออนิกระหว่างอนุภาคจึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างอิสระในระบบของเหลวที่ไหลได้
4. การสึกกร่อนของแม่แบบ จัดเป็นปัญหาที่สำคัญโดยเฉพาะในเทอร์โมพลาสติกที่มีเส้นใยแก้วชนิดสั้น ในขณะที่ตัวแทนจำหน่ายบางบริษัทบอกว่าการบำบัดพื้นผิว ป้องกันเส้นใยแก้วชนิดแข็งได้ แต่จากอุปกรณ์ในกระบวนการของโลหะที่กัดกร่อน ได้มีการรายงานว่าจะต้องแทนชิ้นงานของแม่แบบบ่อยกว่ากระบวนการพอลิเมอร์ที่ใช้เสริมแรง
5. ความแข็งแรงของพลาสติกเสริมแรงเส้นใยชนิดสั้นอาจใช้สารคู่ควบอาจปรับปรุงได้ในบางกรณี อาจไม่มีผลหรือมีผลน้อยมาก การใช้เส้นใยชนิดสั้นเพื่อปรับปรุงความทนทานต่อแรงกระแทกอาจมีประโยชน์ในบางกรณีแต่ในบางกรณีอาจทำให้เกิดการแตกเปราะได้ในด้านเดียวกันความต้านทานต่อรอบทางความร้อน (Thermal cycling) อาจจะมีผลหรือไม่มีผลจากการใช้ สารคู่ควบโดยความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้ขึ้นอยู่กับเคมี กระบวนการ และตัวแปรอื่น ๆ ที่ยังไม่ทราบจึงต้องมีการศึกษาด้วยความระมัดระวังและด้วยความแน่นอนในแต่ละระบบต่อไป

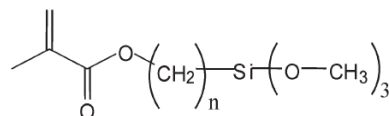
Functional Organotrialkoxysilanes (silane coupling agents)



amino silane

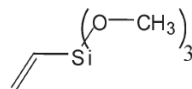


oxirane silane

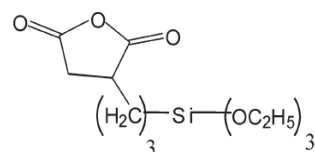


MPTMS $n = 3$

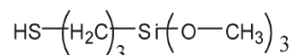
MDTMS $n = 10$



vinyl silane

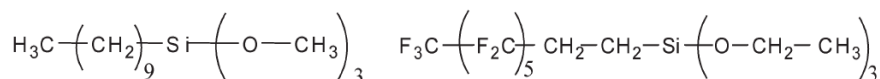


anhydride silane

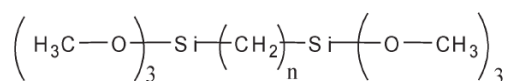


mercapto silane

Non-functional Organotrialkoxysilanes



Monopodal organosilane



Bipodal organohexalkoxysilane

รูปที่ 2.12 โครงสร้างของสารคู่ควบ Silane โดยแบ่งตามสารอินทรีย์ (R) [24]

2.5 สารช่วยผสม (Compatibilizer) [25-26]

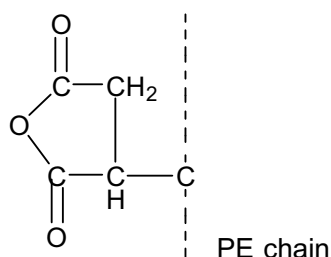
การเติมสารช่วยผสมเป็นวิธีการหนึ่งในการปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งมีผลให้

- แรงตึงผิว (Interfacial tension) ของพอลิเมอร์หลอมเหลวมีค่าลดลง ทำให้การกระจายตัวในวัฏภาคดีขึ้น
- เพิ่มแรงยึดติด (Adhesion) ระหว่างผิวสัมผัส ทำให้การถ่ายเทความเค้น (Stress transfer) เกิดได้ดีขึ้น
- ช่วยลดความตึงผิวที่พื้นผิวระหว่างสองวัฏภาค ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีเสถียรภาพที่ดีขึ้น

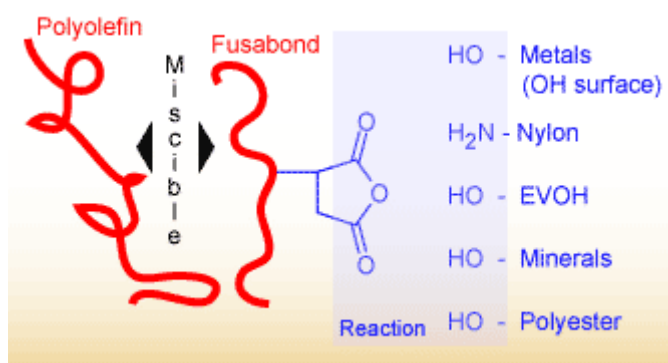
โดยสารช่วยผสมอาจเป็นพอลิเมอร์ร่วมชนิดบล็อกหรือกราฟท์ ซึ่งสามารถแทรกซึมผ่านเข้าไปในวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสม ทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น ในการเลือกพอลิเมอร์ร่วมเพื่อ

ทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสมต้องคำนึงถึงน้ำหนักโมเลกุลในแต่ละส่วนของพอลิเมอร์ร่วม คือ ถ้ามีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ความยาวของสายโซ่สั้น ทำให้การแทรกซึมผ่านไปพอลิเมอร์ผสมได้น้อย ส่งผลให้การยึดติดระหว่างผิวสัมผัสต่ำ แต่ถ้าน้ำหนักโมเลกุลสูงมากเกินไป ทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ยาก การแทรกซึมผ่านไปพอลิเมอร์ผสมก็ต่ำเช่นเดียวกัน ในงานวิจัยนี้ใช้ มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีน (Maleic anhydride grafted Polyethylene : MAPE) โครงสร้างดังรูปที่ 2.13 เป็นสารช่วยผสม พอลิเอทิลีนเป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วส่งผลให้เมื่อทำการผสมกับวัสดุอื่นที่มีขั้ว มักมีสมบัติด้านแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวไม่ดี แต่สามารถที่จะทำการแก้ไขได้โดยการเติมสารอีกชนิดหนึ่งลงไปเพื่อเพิ่มสมบัติการเข้ากันได้

มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนเป็นการต่อกิ่งพอลิเอทิลีนซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่เสถียรแล้ว ซึ่งจะทำให้สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ (Physical chemisca) ดีขึ้น โดยการเพิ่มความเป็นขั้วของพอลิเอทิลีนโดยทำให้ความเป็นบวกเพิ่มขึ้น และความสามารถในการยึดติดเพิ่มขึ้น พบว่าแอนไฮไดรด์เป็นส่วนที่เกิดการเชื่อมโยง เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เพิ่มความสามารถในการต้านทานความร้อน และเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้กับพอลิเมอร์อื่น รวมทั้งสารตัวเติม (Additive) ได้เป็นอย่างดี การทำงานแสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ [27]



รูปที่ 2.14 การทำงานของพอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ [27]

กระบวนการนำไปใช้

(ก) สารละลายในน้ำ (Aqueous solution)

เป็นวิธีที่ใช้กันทั่วไปโดยนำสารตัวเติมผสมกับน้ำเป็นของเหลวชั้นแล้วเติมสารคู่ควบในขณะที่ไฮโดรไลซ์เป็นหมู่ไฮเลนอล (Silanol) โดยจะทำปฏิกิริยากับผิวของสารตัวเติมและสารคู่ควบเกิดเป็นพันธะระหว่างสารตัวเติม สารคู่ควบ และพอลิเมอร์ออร์แกโนซิลิโคน ต่อจากนั้นผิวที่มีสารตัวเติมอยู่จะถูกทำให้กระจายตัวในพอลิเมอร์

(ข) การผสมแห้ง (Dry blending)

เป็นวิธีที่ทำโดยนำสารตัวเติมมาผสมกับสารคู่ควบได้โดยตรง โดยที่ผิวของสารตัวเติมแห้งจัดเป็นเทคนิคที่ทำได้ยากมาก

(ค) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายใน (In situ reaction)

การทำเช่นนี้เป็นการลดค่าใช้จ่าย โดยในขั้นตอนการปรับปรุงพื้นผิวซึ่งเป็นขั้นตอนพิเศษจะต้องให้สารตัวเติมและสารคู่ควบกระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ โดยสารคู่ควบจะเคลื่อนที่ไปยังผิวของสารตัวเติมและทำปฏิกิริยากันอย่างเหมาะสมตรงบริเวณรอยต่อ ซึ่งจำเป็นต้องใช้สารคู่ควบชนิดพิเศษและต้องมีขั้นตอนการปรับปรุงก่อน (pre-treating) การนำไปใช้ในทางการค้ายังไม่เป็นที่รู้จักมากนัก

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Fang Z. และคณะ [3] ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ PVC เมื่อใส่สารช่วยผสม (Compatibilizer) และสารช่วยการกระจายตัว (Dispersant) โดยใช้อัตราส่วนในการผสม LDPE/PVC เท่ากับ 70/30 และใช้คลอรีเนเตด พอลิเอทิลีน (Chlorinated Polyethylene (CPE)) เป็นสารช่วยผสมและยางบิวตะไดอิน (Butadiene rubber (BR)) เป็นสารช่วยกระจายตัวโดยใช้อัตราส่วนในการผสม LDPE/PVC/CPE หรือ BR เท่ากับ 70/30/7.5 และใช้เครื่องผสมระบบปิด HBI 90 Hakke Rheocord อุณหภูมิในการผสม 160°C ซึ่งในการทดลองนี้ได้เปรียบเทียบผลของความเร็วรอบในการผสมต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ความเร็วรอบสูง (150 รอบ/นาที) มีขนาดอนุภาคของพอลิเมอร์ผสมเล็กลง เป็นผลให้มีการกระจายตัวดีกว่าเมื่อใช้ความเร็วรอบ 50 รอบ/นาที นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อใส่ CPE และ BR ในพอลิเมอร์ผสม ทำให้การกระจายตัวของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้นโดยเฉพาะ CPE ทำให้ขนาดของพอลิเมอร์ผสมคงตัว คือ เมื่อมีการลดความเร็วรอบในการผสมลงอนุภาคเล็กๆ ไม่กลับมารวมตัวกันอีก ซึ่งต่างจากการเติม BR เมื่อลดความเร็วรอบในการผสมลงพบว่า เกิดการรวมตัวของอนุภาคเล็กๆ ทำให้การกระจายตัวของพอลิเมอร์ผสมลดลง

Xu C. และคณะ [4] ได้ศึกษาการกระจายตัวและการเกิดการเชื่อมโยงของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE โดยใช้ BR เป็นสารช่วยกระจายตัว และไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาอนุมูลอิสระเพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่าง PVC และ LDPE ซึ่งในการทดลองนี้ได้เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC/LDPE เมื่อมีการเติม BR และ DCP ชนิดใดชนิดหนึ่งเพียงอย่างเดียว พบว่าค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และร้อยละ

การดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) มีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมทั้ง BR และ DCP เมื่อตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่เติม BR เพียงอย่างเดียวมีการกระจายของวัฏภาคดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้เติม BR ส่วนการเติม DCP เพียงอย่างเดียว พบว่ามีการยึดเกาะระหว่างพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสม แต่การกระจายตัวของวัฏภาคไม่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเติม BR แต่เมื่อมีการเติมทั้ง BR และ DCP พบว่า การกระจายของวัฏภาคดีขึ้นและมีการยึดเกาะระหว่างพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมซึ่งสัมพันธ์กับสมบัติเชิงกลที่ได้

Ma G. และคณะ [28] ได้ศึกษาการกระจายตัว การเชื่อมโยง และปรากฏการณ์การดักจับ (Entrapping phenomenon) ที่เกิดขึ้นในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE ซึ่งมี DCP เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาอนุมูลอิสระ และมียางสไตรีนบิวทีไดอีน (SBR) ทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัว โดยผสม PVC และสารเติมแต่งด้วยเครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ใช้อุณหภูมิในการผสม 145-160 °C เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเติม LDPE และ SBR ผสมให้เข้ากันแล้วจึงเติม DCP ผสมต่อไปอีก 5 นาที จากนั้นขึ้นรูปด้วยวิธีการกดอัด นำชิ้นงานที่ได้มาละลายด้วยเตตระไฮโดรฟูราน (Tetrahydrofuran, THF) เพื่อสกัด PVC ออกจากพอลิเมอร์ผสม แล้วนำส่วนที่เหลือจากการสกัดไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) จากการศึกษาพบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมเป็น PVC/LDPE (100/10) และ PVC/LDPE/DCP (100/10/1) พบว่าเมื่อนำส่วนที่เหลือจากการสกัดไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ไม่พบพีกที่ตำแหน่ง 1426 cm^{-1} และ 1256 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีกที่บ่งบอกว่าเป็นของ PVC แสดงว่าไม่เกิดการเชื่อมโยงกันระหว่าง PVC และ LDPE แต่เมื่อใช้อัตราส่วน PVC/LDPE/DCP (50/50/1) และ PVC/LDPE/DCP (10/100/1) ปรากฏว่าไม่สามารถสกัด PVC ออกจากพอลิเมอร์ผสมด้วย THF ได้ทั้งหมด แสดงว่าเกิดปรากฏการณ์การดักจับของ PVC ด้วย LDPE เนื่องจาก LDPE เกิดการเชื่อมโยงเป็นร่างแหโดยมี DCP เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาอนุมูลอิสระ และพบว่าค่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมที่มีการผสม DCP และ SBR มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากการเชื่อมโยงของ LDPE และมีการกระจายวัฏภาคที่ดีโดยตรวจสอบได้จากสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope)

Fang Z. และคณะ [1] ได้ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของความหนืดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ PE ที่มีผลต่อสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม โดยได้ผสมพอลิเมอร์ในอัตราส่วน PVC/PE (50/50) ด้วยเครื่องผสมระบบปิด HBI 90 Hakke Rheocord และขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดขึ้นรูป ในระหว่างการผสมได้เปรียบเทียบความเร็วรอบที่ 30 50 และ 100 rpm เพื่อศึกษาอัตราส่วนของความหนืด จากการศึกษาพบว่า เมื่อใช้ความเร็วรอบ 50 rpm อัตราส่วนของความหนืด PVC/PE มีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุด คือ มีค่า 0.99 สำหรับการใช้ความเร็วรอบ 30 และ 100 rpm มีค่าอัตราส่วนความหนืด 0.82 และ 1.13 ตามลำดับ และจากการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่าที่อัตราส่วนความหนืดใกล้เคียง 1 ให้สมบัติต้านทานแรงดึง และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดสูงสุด เนื่องจากสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมมีความต่อเนื่องกันทั้งสองวัฏภาค ส่วนในกรณีที่ใช้ความเร็วรอบ 30 rpm พบว่ามี PE เป็นวัฏภาคต่อเนื่องทำให้สมบัติต้านทานแรงกระแทกสูงสุด

Sombatsompop N. และคณะ [2] ได้ศึกษาการเกิดการตอ้งระหว่าง LDPE และ PVC ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผสมของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดนี้ โดยใช้เทคนิค Gel permeation chromatography (GPC) และ Solid-State ^{13}C -NMR ปริมาณ LDPE ที่ใช้ในการศึกษา คือ 0-16.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และใช้เครื่องผสมชนิดเกลียวหนอนคู่ในการผสม อุณหภูมิในการผสม 140-150 องศาเซลเซียส จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค GPC พบว่า $\overline{M}_w$ ของ PVC มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ LDPE เพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดที่ปริมาณ LDPE เท่ากับ 13.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยที่ M_n มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งอธิบายได้ว่า Macroradical ของ PVC และ LDPE ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผสมซึ่งมีความร้อนและแรงเฉือนเกิดการรวมกัน (Cross-recombination) จึงทำให้ $\overline{M}_w$ ของ PVC มีค่าสูงขึ้น เมื่อตรวจสอบโครงสร้างของพอลิเมอร์ผสมเทียบกับโครงสร้างของ PVC และ LDPE โดยใช้เทคนิค Solid-State ^{13}C -NMR พบว่าใน PVC แสดงพีคที่ 57.3 ppm ซึ่งหมายถึงโครงสร้างของ $-\text{CHCl}-$ และ 46.2 ppm แสดงถึง $-\text{CH}_2-$ ในส่วนของ LDPE พบพีคที่ 32.5 ppm แสดงถึง $-\text{CH}_3-$ ส่วนในพอลิเมอร์ผสมพบพีคเพิ่มจากใน PVC และ LDPE ที่ตำแหน่ง 26 และ 22 ppm ซึ่งเป็นไปได้ว่าเป็นตำแหน่งของคาร์บอนอะตอมที่อยู่ในโครงสร้างของ LDPE ที่ตอ้งอยู่บนโครงสร้างของ PVC นอกจากนี้การตรวจสอบโดยใช้สมบัติการละลายของ PVC ใน THF พบว่าในพอลิเมอร์ผสม PVC ไม่สามารถละลายได้หมด จากข้อมูลนี้เป็นการสนับสนุนว่าเกิดการตอ้งระหว่างพอลิเมอร์ผสม 2 ชนิดนี้

Marcovich N. E. และคณะ [29] ได้ศึกษาสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแบบเส้นตรง (Linear Low Density Polyethylene, LLDPE) และผงไม้ เมื่อผสมออร์แกนิกเปอร์ออกไซด์ ซึ่งใช้ 2,5-dimethyl 2,5-diterbutylperoxyhexane (DBPH) และ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride (MA)) โดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ อุณหภูมิในการผสม 180-220 องศาเซลเซียส และขึ้นรูปโดยการอัดขึ้นรูป (Compression molding) ใช้อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที จากการตรวจสอบความเป็นผลึกพบว่า เมื่อเติม DBPH และ MA ค่าความเป็นผลึกของ LLDPE ลดลง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาระหว่าง LLDPE และ MA เมื่อมีเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาอนุมูลอิสระเกิดเป็น มาเลอเตดพอลิเอทิลีน (Maleated PE) ซึ่งเป็นการรบกวนการเกิดผลึกของ LLDPE แต่เมื่อผสมผงไม้ค่าความเป็นผลึกสูงขึ้น เนื่องจากผงไม้ทำตัวเป็นสารก่อผลึก (Nucleating agent) แต่เมื่อเติม MA และ DBPH ค่าความเป็นผลึกลดลงเนื่องจากพอลิเมอร์และผงไม้ยึดเกาะกันได้ดีขึ้นจึงเป็นการรบกวนการเคลื่อนที่ของสายโซ่ LLDPE ในการตกผลึก ส่วนสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตพบว่าเมื่อเติม MA และ DBPH สมบัติเชิงกลดีกว่าเมื่อเติมเฉพาะ DBPH เนื่องจากการปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างพื้นผิว (Interfacial adhesion) ของพอลิเมอร์และผงไม้ ส่วนสมบัติทางความร้อนเมื่อตรวจสอบด้วยเทคนิค Derivative thermogravimetry (DTG) พบว่าอุณหภูมิการเสีสภาพของ LLDPE ที่มีการเติม MA และ DBPH ลดลงคือ 482 และ 479 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับ LLDPE ซึ่งมีอุณหภูมิการเสีสภาพเท่ากับ 484 องศาเซลเซียส ส่วนในคอมโพสิตมีการเสีสภาพทางความร้อน 3 ขั้นตอนโดยใน 2 ขั้นตอนแรกเป็นการเสีสภาพของผงไม้ส่วนขั้นที่ 3 เป็นของ LLDPE

Rozman H. D. และคณะ [30] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene, HDPE) และไม้ยางพารา โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้ผงไม้และเส้นใยไม้ในการทำคอมโพสิต ปริมาณไม้ที่ใช้ในการศึกษา คือ 20 30 และ 40 % นอกจากนี้ได้ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต โดยใช้สารคู่ควบ (Coupling agent) ซึ่งได้มีการเปรียบเทียบสารคู่ควบ 2 ชนิด ระหว่าง 3-(Trimethoxysilyl) propyl methacrylate (TPM) และ 3-Aminopropyltriethoxysilane (APE) ปริมาณที่ใช้ในการศึกษา คือ 1 3 และ 5% โดยเปรียบเทียบกับปริมาณผงไม้ที่ใช้ จากผลการทดลองพบว่าสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตที่ใช้ผงไม้และเส้นใยไม้มีค่ามอดูลัสการแตกหัก (Modulus of rupture) และมอดูลัสการดึงยืด (Tensile modulus) ที่สูงขึ้นเมื่อปริมาณไม้มากขึ้น และพบว่าคอมโพสิตที่ได้จากผงไม้ให้ค่าที่สูงกว่าการใช้เส้นใยไม้ เนื่องจากผงไม้สามารถกระจายตัวในเมทริกซ์ได้ดีกว่าเส้นใยซึ่งมักเกิดการรวมตัวเป็นมัดเส้นใยที่มีขนาดใหญ่ ทำให้กระจายตัวในเมทริกซ์ได้ไม่ดี ส่วนค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ค่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลงเป็นลำดับ เมื่อเติมผงไม้หรือเส้นใยไม้ในปริมาณที่มากขึ้น จากผลการทดลองเมื่อเติมสารคู่ควบพบว่า คอมโพสิตที่ใช้ TPM เป็นสารคู่ควบมีค่ามอดูลัสการดึงยืดต่ำลง แต่มีร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดสูงขึ้น ทั้งในคอมโพสิตจากผงไม้และเส้นใยไม้ ส่วนคอมโพสิตที่ใช้ APE เป็นสารคู่ควบ พบว่า คอมโพสิตที่ทำจากผงไม้มีค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสการดึงยืดสูงขึ้น สำหรับความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณผงไม้หรือเส้นใยมากขึ้นและเมื่อใช้ TPM เป็นสารคู่ควบในคอมโพสิตที่ทำจากเส้นใยไม้พบว่าค่าความแข็งแรงกระแทกมีค่าสูงขึ้น

Liao B. และคณะ [31] ได้ศึกษาอิทธิพลของการปรับปรุงเส้นใยไม้ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LLDPE และเส้นใยไม้แอสเพน (Aspen fiber) โดยใช้สารคู่ควบไททาเนต (Titanate coupling agent) 2 ชนิด คือ TC-PBT และ TC-POT (มีโครงสร้างต่างกันที่หมู่ R คือ TC-PBT มี C₄ Chain alkyl และ TC-POT มี C₈ – C₁₀ Chain alkyl) และการตอกกิ่งด้วยอะคริโลไนไตรล์ (Acrylonitrile) เครื่องมือในการผสม LLDPE และ เส้นใยไม้ คือ เครื่องผสมชนิด 2 ลูกกลิ้ง อุณหภูมิในการผสม คือ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที และขึ้นรูปโดยการอัดขึ้นรูปใช้อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า การปรับปรุงเส้นใยไม้ทั้งการใช้สารคู่ควบและการตอกกิ่ง (Grafting) ให้ค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการดึงยืด ที่ดีกว่าการไม่ปรับปรุงเส้นใยไม้ โดยเฉพาะการปรับปรุงเส้นใยไม้ด้วยการตอกกิ่งด้วยอะคริโลไนไตรล์ ให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่า เนื่องจากการตอกกิ่งเป็นการทำให้โครงสร้างที่เป็นผลึก (Crystalline) ของไม้มีค่าลดลงเกิดเป็นอสัณฐาน (Amorphous) มากขึ้น ทำให้เกิดการเกาะติดกับ LLDPE ได้ดีขึ้น

Zhang F. และคณะ [32] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการตกผลึก และการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ระหว่างพอลิเอทิลีนตอกกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MAPE) และคอมโพสิตระหว่าง MAPE และเส้นใยเซลลูโลส จากการวิเคราะห์ MAPE ด้วยเทคนิค DSC พบว่าอุณหภูมิการหลอมเหลวลดลงเมื่อปริมาณ MA เพิ่มขึ้น ส่วนในคอมโพสิตได้ศึกษา PE ที่ตอกกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MAPE) และพอลิเอทิลีนที่ไม่ได้ตอกกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (UPE) เป็นเมทริกซ์ โดยใช้ปริมาณเส้นใย 5 15 30 และ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากเทคนิค DSC พบว่าในคอมโพสิตระหว่าง UPE และเส้นใยเซลลูโลสมีพฤติกรรมการตกผลึกและการหลอมเหลวผลึกเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณเส้นใย

เซลลูลอสเพิ่มขึ้น ส่วนคอมโพสิตระหว่าง MAPE และ เส้นใยเซลลูลอสมีอุณหภูมิการตกผลึกลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อใช้ปริมาณเส้นใยเซลลูลอส 5 % และอุณหภูมิหลอมเหลวค่อยๆ ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่าง MAPE และเส้นใยเซลลูลอส ทำให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่ PE เคลื่อนที่ได้ยากขึ้น

Canche -Escamilla G. และคณะ [33] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของเส้นใยเซลลูลอสที่ต่อกิ่งด้วย เมทิลเมทาไครเลต (Methyl methacrylate, (MMA)) และบิวทิลอะไครเลต (Butyl acrylate, (BA)) นอกจากนี้ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตระหว่าง PVC และเส้นใยที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว และปรับปรุงพื้นผิวด้วยการต่อกิ่งกับพอลิเมทิลเมทาไครเลต (Poly(methyl methacrylate), PMMA) และ พอลิบิวทิลอะไครเลต (Poly(butyl acrylate), PBA) โดยผสมเส้นใยเซลลูลอสและสารประกอบ PVC ในเครื่องผสมระบบปิด Brabender torque rheometer อุณหภูมิในการผสม 160 องศาเซลเซียส และขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปโดยใช้อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส จากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ PMMA และ PBA ในการต่อกิ่งบนเส้นใยมีผลให้มอดุลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) และความแข็งแรงดึงของเส้นใยลดลง เนื่องจากความเป็นผลึก (Crystallinity) ของเส้นใยเซลลูลอสลดลงจากการต่อกิ่งด้วย PMMA และมีส่วนที่เป็นอสัณฐานของ PMMA เกาะอยู่บนพื้นผิวของเส้นใยเซลลูลอส สำหรับสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างสารประกอบ PVC และเส้นใยเซลลูลอส โดยใช้ปริมาณเส้นใย 5 10 15 20 25 และ 30 % พบว่าค่ามอดุลัสยืดหยุ่นสูงขึ้นตามปริมาณของเส้นใยที่เพิ่มขึ้น และคอมโพสิตที่ผสมด้วยเส้นใยที่ต่อกิ่งด้วย PMMA ให้ค่าสูงสุด แต่ความแข็งแรงดึงลดลงเมื่อปริมาณของเส้นใยเพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณเส้นใย 15 % เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเป็น 30 % คอมโพสิตที่ผสมด้วยเส้นใยที่ต่อกิ่งด้วย PMMA ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้นและสูงกว่าคอมโพสิตที่ผสมด้วยเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว และที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย PBA ทั้งนี้เนื่องจาก PMMA และ PVC มีความสามารถในการเข้ากัน (Compatibility) ได้ดี

Sombatsompop N. และคณะ [34] ได้ศึกษาแรงบิด (Torque) ในการผสม สมบัติด้านแรงดึงแรงกระแทก และสมบัติด้านความร้อนของคอมโพสิตระหว่าง PVC และ ซิลิโคนโดยใช้สารควบคู่ควบไซเลนชนิดต่าง ๆ คือ *N*-2(aminoethyl)-3-aminopropylmethoxy dimethoxysilane (KBM602), *N*-2(aminoethyl) -3-aminopropyltrimethoxysilane (KBM603) *N*-2 (aminoethyl) -3-aminopropyltriethoxysilane (KBE603) วิธีการทดลองเริ่มจากปรับปรุงพื้นผิวของซิลิโคนโดยใช้สารควบคู่ควบไซเลนแต่ละชนิดปริมาณที่ใช้ 0–2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของซิลิโคน จากนั้นผสมซิลิโคนและพียูซีคอมปาวด์ในเครื่องผสมชนิดความเร็วสูงเป็นเวลา 5 นาที และผสมต่อด้วยเครื่องผสมชนิดเกลียวหนอนคู่ อุณหภูมิที่ใช้ 165 175 175 185 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 40 rpm โดยในการทดลองนี้ศึกษาปริมาณซิลิโคนที่ 9.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ 41.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากผลการทดลองพบว่าแรงบิดในการผสมคอมโพสิตของซิลิโคนที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลน มีค่าสูงกว่าคอมโพสิตที่ใช้ซิลิโคนที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว และแรงบิดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณไซเลนเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในคอมโพสิตที่ใช้ซิลิโคน 41.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แรงบิดที่เพิ่มขึ้นแสดงว่าเกิดอันตรกิริยาระหว่างพื้นผิวของซิลิโคนและไซเลน สมบัติด้านความแข็งแรงดึงและมอดุลัสของคอมโพสิตมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณไซเลนเพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดในช่วง 0.5 – 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยคอมโพสิตที่ใช้ไซเลนชนิด KBM

603 ให้สมบัติด้านแรงดึงสูงที่สุด ผลของไซเลนต่อสมบัติด้านความแข็งแรงกระแทกพบว่า KBE 603 ให้สมบัติแรงกระแทกสูงสุดที่ปริมาณ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับสมบัติทางความร้อนของ PVC ในคอมโพสิต เมื่อปริมาณไซเลนเพิ่มขึ้น อุณหภูมิการสลายตัวของ PVC ไม่เปลี่ยนแปลง จากผลการทดลองแสดงว่าโครงสร้างและปริมาณของไซเลนที่ต่างกันมีผลต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต

กนิษฐา อังกรวัชร [35] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของพอลิพรอพิลีนโดยใช้ซีลีอียจากไม้เต็งนอกเป็นสารเสริมแรงโดยใช้สารคู่ควบ Silane ชนิด A-172 (Vinyl-tris-(2-methoxyethoxy) silane) และมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน (MAPP) เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้และการยึดเกาะกันของเมทริกซ์และส่วนเสริมแรง พบว่า สารคู่ควบทั้ง 2 ชนิด ช่วยทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงโค้งงอของคอมโพสิตเพิ่มขึ้น และการใช้สารคู่ควบ Silane ให้สมบัติเชิงกลสูงกว่าการใช้ MAPP สำหรับการใส่สารคู่ควบทั้งสองชนิดร่วมกันช่วยปรับปรุงสมบัติด้านโค้งงอดีกว่าการใช้สารคู่ควบชนิดเดียวนอกจากนี้การใช้สารคู่ควบผสมที่อัตราส่วน MAPP:Silane เท่ากับ 1:1 เหมาะสมที่สุด ส่วนสัญญาณวิทยาของคอมโพสิตจากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นว่าการใช้สารคู่ควบสามารถปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัฏภาคทั้งสองที่แตกต่างกันได้

Fernanda M.B. และคณะ [36] ได้ศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยไม้ที่ได้จากเยื่อไม้ของต้นสน (Aspen) ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยสนกับเมทริกซ์ที่เป็นพอลิพรอพิลีนหรือ MAPP นอกจากนี้ยังศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการผสมเพื่อเตรียมพลาสติกคอมโพสิตโดยทำการผสม PP และเส้นใยสนที่อุณหภูมิต่าง ๆ คือ 170 180 และ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 และ 15 นาที ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที ทำการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยไม้ด้วยสารคู่ควบ Silane โดยมีชนิดของสารคู่ควบ Silane ปริมาณสารคู่ควบ Silane และกระบวนการเคลือบบนพื้นผิวของเมทริกซ์ของ PP หรือ MAPP ที่แตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิและเวลาในการผสมที่เหมาะสม คือ 180 องศาเซลเซียสและ 10 นาที ตามลำดับ ในขณะที่การปรับปรุงสภาพผิวเส้นใยไม้ด้วยสารคู่ควบ Silane ชนิด A-172 ในปริมาณ 4% โดยน้ำหนัก ที่เคลือบด้วย MAPP 2 % w/v และปริมาณเส้นใยไม้ที่ 10 % w/w ให้ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัส และค่าความทนทานต่อการโค้งงอสูงที่สุด

Rajeev K. และคณะ [37] ได้ศึกษาคอมโพสิตระหว่างไคโซแทคติกพอลิพรอพิลีนและเส้นใยปอกระเจา (Kenaf fiber) โดยใช้ MAPP เป็นสารช่วยผสมในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่และฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน นอกจากนี้ยังศึกษาคอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยสารละลาย Amino-ethyl-amino-propyltrimethoxysilane ในน้ำและทดสอบสมบัติเชิงกลต่าง ๆ จากผลงานวิจัยพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ MAPP 2-5 % ทำให้ค่าสมบัติด้านแรงดึงและสมบัติด้านโค้งงอเพิ่มขึ้นแต่ความแข็งแรงกระแทกและความเหนียว (Toughness) ลดลง นอกจากนี้สมบัติต่าง ๆ ของคอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย Silane ที่ปริมาณเส้นใยเท่ากันเปรียบเทียบกับการใช้ MAPP นั้น พบว่าการใช้ Silane ให้ค่าสมบัติด้านแรงดึงสมบัติด้านโค้งงอ และความแข็งแรงกระแทกสูงกว่าการใช้ MAPP

Balasuriya P.W. และคณะ [38] ได้ศึกษาถึงวิธีการปรับปรุงพื้นผิวของคอมโพสิตระหว่าง HDPE และเศษไม้ (Wood flakes) ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA) ผสมในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) และ Silane (N-(4-vinylbenzyl)-N'-(3-trimethoxysilylpropyl)-

ethyl)enediamine, CVBS) จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC และ FTIR สามารถพบโครงสร้างที่เกิดจาก HDPE และ Silane ต่อกันด้วยเส้นใยไม้ที่ตำแหน่งสเปกตรัม 1111 และ 1032 cm^{-1} เป็นโครงสร้างของพอลิไซลอคเซน และพบพีกที่ตำแหน่ง 1865, 1786, 1795-1775 เป็นหมู่แอนไฮดไรด์ นอกจากนี้ที่ตำแหน่ง 1305 และ 1220 cm^{-1} ของ C-O Stretching ของ Cyclic anhydride ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างเส้นใยไม้และ PE จากผลของสมบัติเชิงกลแสดงว่าคอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย Silane และ MA นั้นสามารถปรับปรุงความแข็งแรงดึง ความเหนียวและความแข็งแรงกระแทกแบบไอซอด โดยพบว่าการปรับปรุงพื้นผิวด้วย MA 1-2 % โดยน้ำหนักซีลี้อย และ Silane 1-3 % โดยน้ำหนักซีลี้อยให้สมบัติเชิงกลที่เหมาะสมที่สุด

Miller A.C. และ Berg J.C. [39] ได้ศึกษาถึงผลของสารคู่ควบ Silane ที่เคลือบบนเม็ดดูดซับที่เป็นแก้วที่มีการยึดติดกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ คือ Polyvinylbutyral โดยฝังเม็ดแก้วที่ปรับปรุงผิวด้วย Silane ลงบนพอลิเมอร์ ซึ่ง Silane แบ่งเป็นชนิด โมโนอัลคอกซีไซเลน (Monoalkoxy silane) ไดอัลคอกซีไซเลน (Dialkoxysilane) และไตรอัลคอกซีไซเลน (Trialkoxy silane) จากการทดสอบพบว่าโมโนอัลคอกซีไซเลนมีสมบัติการยึดติดที่ผิวพอลิเมอร์ต่ำที่สุด ทำให้มีสมบัติทนต่อแรงกระแทกต่ำสุด ในขณะที่ไดอัลคอกซีไซเลนและไตรอัลคอกซีไซเลน มีการยึดติดที่แข็งแรงมากขึ้นตามลำดับ เนื่องจากมีพันธะที่แข็งแรงระหว่างภูมิภาคของพื้นผิวแก้วกับพอลิเมอร์เมทริกซ์มากขึ้น

Pickering K.L. และคณะ [40] ได้ศึกษาถึงผลของสารคู่ควบ Silane ที่มีต่อคอมโพสิตระหว่างเส้นใยต้นสนกับ PE ซึ่งสารคู่ควบ Silane ที่ใช้คือ แกมมา-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอキシไซเลน (γ -Aminopropyltrimethoxy silane) ซึ่งทำหน้าที่ปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใย โดยเปรียบเทียบเส้นใยที่ปรับปรุงด้วย 2 % NaOH ก่อนแล้วจึงปรับปรุงด้วย Silane กับเส้นใยที่ปรับปรุงด้วย Silane อย่างเดียว จากผลของ X-ray photoelectron spectroscopy และ NMR ที่ใช้ศึกษาลักษณะของเส้นใยพบว่า เส้นใยที่ปรับปรุงด้วย Silane อย่างเดียวให้สมบัติเชิงกลต่ำกว่า ในขณะที่เส้นใยที่ปรับปรุงด้วย NaOH ก่อนให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่า เนื่องจาก NaOH ช่วยทำให้เกิดการเชื่อมต่อพันธะได้ดีกว่า

Abu-Sharkh B.F. และ Hamid H. [41] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลและความคงทนต่อสภาพอากาศของวัสดุคอมโพสิตระหว่างเส้นใยจากปาล์มกับ PP โดยใช้มาลิอิกแอนไฮดไรด์ เป็นสารช่วยผสม และใช้ Tinuvin เป็นสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนปริมาณ 0.5 % โดยน้ำหนักการผสมทำโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว โดยผสมเป็น 3 สูตร คือ สูตรที่ 1 ใช้ PP กับ Tinuvin สูตรที่ 2 มีการเติมเส้นใยปาล์ม 29 % โดยน้ำหนัก เพิ่มจากสูตรที่ 1 และสูตรที่ 3 มีการเติมสารช่วยผสม 6 % โดยน้ำหนักเพิ่มจากสูตรที่ 2 และขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดพลาสติก และนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลและความคงทนต่อสภาพอากาศ พบว่า สูตรที่ 2 ที่มีการเติมเส้นใยมีความคงทนต่อสภาพอากาศมากกว่าสูตรที่ 1 ที่ไม่มีการเติมเส้นใยและมากกว่าสูตรที่ 3 ที่มีการเติมสารช่วยผสม แต่ในสูตรที่ 3 ที่มีการเติมสารช่วยผสมให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเนื่องจากเกิดการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับ PP ได้ดีกว่า

บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. พอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly(vinyl chloride)) : B0401 CLA จากบริษัท ไทยพลาสติกและเคมีภัณฑ์ จำกัด มหาชน ซึ่ง PVC Compound ที่ใช้ในการผลิตประกอบด้วยสารเติมแต่งหลายชนิด ดังนี้

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของ PVC Compound*

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)
Suspension PVC grade K 66	100
Tetrabasic lead sulfate	1.2
Calcium stearate	1.2
Polyethylene wax	0.1
CaCO ₃	4

* ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

2. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene) : LD1905F จากบริษัท ไทยพอลิเอทิลีน จำกัด มีสมบัติดังนี้

ตารางที่ 3.2 สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ *

สมบัติทั่วไป	หน่วย	LD1905F	Test method
อัตราการไหล (Melt flow rate)	g/10 min	5.0	ASTM D 1238
ความหนาแน่น (Density)	g/cm ³	0.919	ASTM D 1505
ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break)	kg/cm ²	MD:210 TD:170	ASTM D 638
การดึงยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)	%	MD:200 TD:720	ASTM D 638
มอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus)	kg/cm ²	2,100	ASTM D 790

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

สมบัติทั่วไป	หน่วย	LD1905F	Test method
ความแข็งผิวหน้า (Hardness)	-	46	ASTM D 2240
จุดหลอมเหลว (Melting point)	°C	110	ASTM D 2117

* ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

** MD หมายถึง Machine direction และ TD หมายถึง Transverse direction

3. คลอรีเนเตดพอลิเอทิลีน (Chlorinated polyethylene, CPE) จาก บริษัท เสรีเคมี จำกัด มีสมบัติดังนี้

ตารางที่ 3.3 สมบัติของคลอรีเนเตดพอลิเอทิลีน (CPE 135A)*

สมบัติทั่วไป	หน่วย	CPE 135A	Test method
ปริมาณคลอรีน (Chlorine content)	%	35	Q/WYX003-2002
ความร้อนในการหลอม (Heat of fusion)	J/g	0.6	Q/WYX003-2002
ความหนาแน่น (Bulk density)	g/cm ³	0.58	GB/3402-1994
ความแข็งผิวหน้า (Shore hardness A)	-	56	GB/T531-1999
ความหนืดมูนี (Mooney Viscosity ML(1+4) 125 °C)	-	98	GB/T3232-1992
ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)	MPa	10	GB/T328-1998
การดึงยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)	%	850	GB/T528-1998

* ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

4. พอลิเมอร์ร่วมระหว่าง เมทิลเมทาไครเลตและบิวทิลอะไครเลต (Methyl-methacrylate-co-butylacrylate) : PA 20 ของบริษัท Kaneka Corporation จำกัด

ตารางที่ 3.4 สมบัติของพอลิเมอร์ร่วมระหว่างเมทิลเมทาไครเลตและบิวทิลอะไครเลต (PA 20)*

สมบัติทั่วไป	PA 20	Test method
ความถ่วงจำเพาะที่พบ (Apparent specific gravity)	0.42 – 0.52	JIS K6721
การกระจายขนาดอนุภาค (Particle size distribution %)	0 (≥ 1000 μm)	Wet sieve method
ความหนืดจำเพาะ (Specific viscosity , η_{sp})	0.84 – 1.15	200 mg material in 50 ml toluene
เสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability)	Equal to STD	Geer's Oven (190°C)

* ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

5. พอลิเมอร์ร่วมระหว่างเอทิลีนและเมทิลอะครีเลต (Ethylene and methyl acrylate) : Elvaloy® 1125 AC จากบริษัท เคมีอินโนเวชัน จำกัด มีสมบัติดังนี้

ตารางที่ 3.5 สมบัติทั่วไปของพอลิเมอร์ร่วมระหว่างเอทิลีนและเมทิลอะครีเลต (Elvaloy® 1125 AC)*

สมบัติทั่วไป	หน่วย	Elvaloy® 1125 AC	Test method
ปริมาณเมทิลอะครีเลต (Methyl acrylate)	%	25	DuPont Method
อัตราการไหล (Melt flow rate)	g/10 min	0.4	ISO 1133 / ASTM D1238
ความหนาแน่น (Density)	kg/m ³	944	ISO 1183 / ASTM D792
จุดหลอมเหลว (Melting point)	°C (°F)	90(194)	ISO 3146 / ASTM D3418
อุณหภูมิอ่อนตัว (Vicat softening temperature)	°C (°F)	48(118)	ISO 306 / ASTM D155
ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)	MPa	14	ISO 527-2 / ASTM D638
การดึงยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)	%	760	ISO 527-2 / ASTM D638
มอดุลัสการดึงยืด (Tensile modulus)	MPa	25	ISO 527-2 / ASTM D638

* ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

6. สารคู่ควบไซเลน (Silane Coupling Agent)

6.1 Silquest A-137 (Octyltriethoxysilane) จาก Sigma-aldrich.Inc



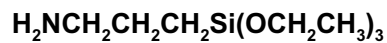
Molecular Weight 276.5 g/mol

ตารางที่ 3.6 สมบัติของ Silquest A-137

สมบัติ	Test Method	A-137*
Specific Gravity at 25/25 °C	ASTM D 93	0.879
Boiling Point at 760 mm Hg, °C	ASTM D 93	84
Flash point, °C	ASTM D 93	100

* ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

6.2 Silquest A-1100 (*gamma*-Aminopropyltriethoxysilane) จาก Optimal Tech Co.,Ltd



Molecular Weight 221.37 g/mol

ตารางที่ 3.7 สมบัติของ Silquest A-1100*

สมบัติ	Test Method	A-1100*
Physical Form	ASTM D 93	Liquid
Color	ASTM D 93	Light straw
Specific Gravity at 25/25 °C	ASTM D 93	0.946
Boiling Point at 760 mm Hg, °C	ASTM D 93	217
Refractive Index	ASTM D 93	1.420
Flash point, °C	ASTM D 93	96

* ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

7. มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีน (Maleic anhydride- grafted- polyethylene, MAPE)
Fusabond[®] MB100D

ตารางที่ 3.8 สมบัติของ Fusabond[®] MB100D*

สมบัติ	หน่วย	Test Method	MB100D*
Melt flow rate (190 °C/2.16 kg)	g/10 min	ASTM D1238	2
Density	g/cm ³	ASTM D1505	0.96
Melting point at 760 mm Hg	°C	ASTM D3418	134
Tensile strength at break	MPa	ASTM D 638	29
Elongation at break	%	ASTM D 638	1250

* ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

8.กรดอะซิติก (Acetic acid)

9.เมทานอล (Methanol)

10.น้ำปราศจากไอออน (Deionized water : DI)

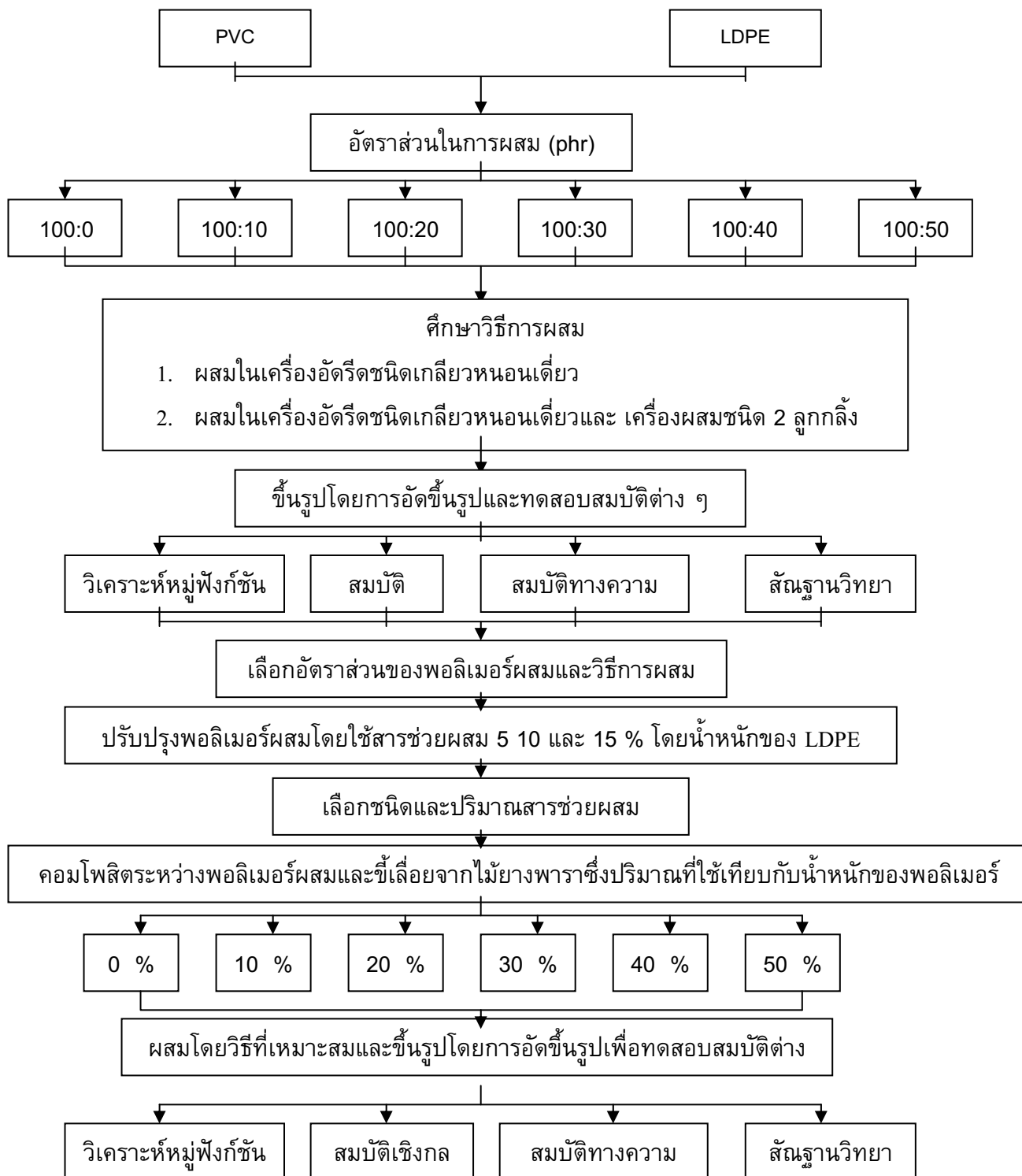
11. ซีลี้อยจากไม้ยางพารา (*Hevea brasiliensis*): จากโรงทำเฟอร์นิเจอร์ทั่วไป

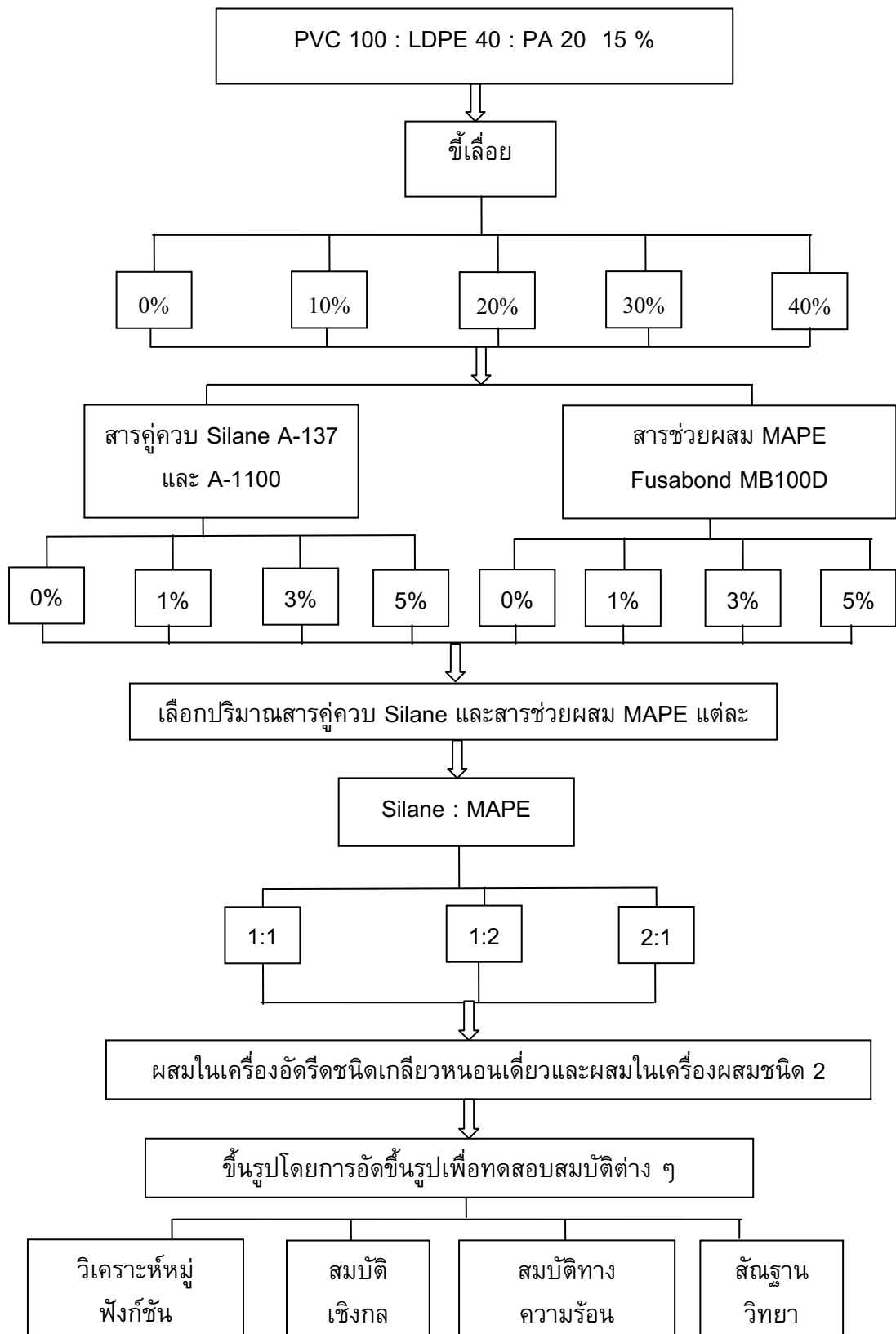
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) : THERMO HAAKE POLY DRIVE รุ่น Axon ab.Plasma : Sew Eurodrive
2. เครื่องผสมชนิด 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll-mill) LABTECH ENGINEERING รุ่น LRM 110
3. เครื่องขึ้นรูปแบบอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) : LABTECH ENGINEERING รุ่น LP20
4. เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง (Universal testing machine) : LLYOD INSTRUMENT LTD. รุ่น LR 5K
5. เครื่องทดสอบความแข็งแรงกระแทก (Izod impact tester) : บริษัท Yasuda Seiki Seisakusho รุ่น 258-PC
6. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) : บริษัท LEO รุ่น L455 VP
7. เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrophotometer, FTIR) : Perkin Elmer รุ่น FTIR Spectrum GX
8. เครื่องเทอร์มัลกราวิมิเตอร์ (Thermal Gravimeter, TGA) : รุ่น Pyris 1 TGA Perkin Elmer
9. เครื่อง Differential scanning calorimeter, DSC : Mettler Toledo DSC822^e
10. เครื่อง Dynamic mechanical analyzer, DMA : Mettler Toledo DMA/SDTA 861^e
11. เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy) รุ่น Bruker advance 300 system

12. เครื่องบด (Grinder) : Bosco Engineering
13. เครื่องร่อนแยกขนาด
14. ตะแกรงมาตรฐานขนาด 50 และ 80 เมช
15. ตู้อบ
16. เกียง
17. เครื่องชั่ง
18. ถังมือกั้นความร้อน
19. เวอร์เนียร์
20. ไมโครมิเตอร์

แผนการดำเนินงาน





3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 ศึกษาวิธีการผสมและอัตราส่วนที่เหมาะสมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE

1. เตรียมพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วนต่างๆ โดยใช้ PVC 100 phr และ LDPE 0 10 20 30 40 และ 50 phr
2. นำ PVC และ LDPE ในอัตราส่วนต่างๆ ผสมในเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว โดยใช้ อุณหภูมิ 170 180 190 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิในช่วงป้อนสาร (Feed section) ช่วงการส่งผ่านสาร (Transition section) ช่วงการผสม (Metering section) และหัวตาย (Die) ตามลำดับ ใช้ ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที
3. นำของผสมที่ได้ไปบดด้วยเครื่องบด
4. แบ่งของผสมเป็น 2 ส่วน
5. นำของผสมส่วนที่ 1 ไปขึ้นรูปโดยการอัดขึ้นรูป โดยใช้อุณหภูมิในการอัดรีด 200 องศาเซลเซียส และความดัน 1300 kg/cm^2 เป็นเวลา 8 นาที โดยแบ่งช่วงเวลาในการอัดรีดเป็นดังนี้ คือ อัดรีด 4 นาที จากนั้นทำการกดอัดขึ้นลงเพื่อไล่ฟองอากาศที่อยู่ในพอลิเมอร์หลอมเหลวจำนวน 5 ครั้ง และให้ความร้อนต่อไปอีก 4 นาที หลังจากนั้นอัดเย็น 4 นาที โดยอุณหภูมิที่ให้อยู่ในช่วง 3-5 องศาเซลเซียส
6. นำของผสมส่วนที่ 2 ไปผสมด้วยเครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง โดยใช้อุณหภูมิ 165-175 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการผสม 10 นาที จากนั้นนำมาขึ้นรูปโดยการอัดขึ้นรูปโดยใช้สภาวะเดียวกับข้อ 5
7. นำชิ้นงานที่ได้จากข้อ 5 และ 6 ไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สัณฐานวิทยา และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

3.3.2 ศึกษาปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE โดยใช้สารช่วยผสมชนิด CPE

1. ผสมพอลิเมอร์และสารช่วยผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.7 โดยใช้สารช่วยผสมชนิด CPE

ตารางที่ 3.9 ส่วนผสมต่างๆ ที่ใช้ปรับปรุงพอลิเมอร์ผสมด้วย CPE

สูตรที่	ปริมาณ		
	PVC (phr)	LDPE (phr)	สารช่วยผสม (%/wt LDPE)
1	100	*	5
2	100	*	10
3	100	*	15

หมายเหตุ * คือ ปริมาณ LDPE ที่ 10 20 30 40 และ 50 phr

2. ขั้นตอนการผสม การขึ้นรูปและสมบัติต่างๆตามหัวข้อที่ 3.3.1

3.3.3 ศึกษาปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE โดยใช้สารช่วยผสม CPE, PA 20 และ Elvaloy

1. ผสมพอลิเมอร์และสารช่วยผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.8 โดยเปรียบเทียบสารช่วยผสม 3 ชนิด คือ CPE, PA 20 และ Elvaloy

ตารางที่ 3.10 ส่วนผสมต่างๆ ที่ใช้ปรับปรุงพอลิเมอร์ผสมด้วย CPE, PA 20 และ Elvaloy[®]

สูตรที่	ปริมาณ		
	PVC (phr)	LDPE (phr)	สารช่วยผสม (%/wt LDPE)
1	100	*	5
2	100	*	10
3	100	*	15

หมายเหตุ * คือ เลือกปริมาณ LDPE ที่ให้สมบัติโดยรวมดีที่สุด

2. ขั้นตอนการผสม การขึ้นรูปและสมบัติต่างๆตามหัวข้อที่ 3.3.1

3.3.4 การเตรียมคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมและซีลี้อยจากไม้ยางพารา

3.3.4.1 การเตรียมซีลี้อย

1. นำซีลี้อยผ่านเครื่องแยกขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อนขนาด 50 และ 80 เมช โดยสัมพันธ์กับความยาวในช่วง 180 ถึง 300 ไมครอน
2. นำซีลี้อยที่ได้เข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
3. นำซีลี้อยที่ได้ไปใช้ในการผสมและเตรียมคอมโพสิตต่อไป

3.3.4.2 การเตรียมซีลี้อยที่ปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยสารคู่ควบ Silane

1. นำซีลี้อยผ่านเครื่องแยกขนาดโดยใช้ตะแกรงขนาด 50 และ 80 เมช โดยสัมพันธ์กับความยาวในช่วง 180 ถึง 300 ไมครอน
2. นำซีลี้อยเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
3. ปรับปรุงพื้นผิวของซีลี้อยด้วยสารคู่ควบ Silane ชนิด A-137 หรือ A-1100 โดยการละลายในตัวทำละลายโดยใช้สารคู่ควบ Silane ในปริมาณ 1 3 และ 5 % ของน้ำหนักซีลี้อย

3.1 วิธีการเตรียมการปรับปรุงพื้นผิวของซีลี้อยด้วยสารคู่ควบ Silane ชนิด A-137 ใช้สารคู่ควบ Silane ชนิด A-137 ละลายในสารละลายเมทานอลปริมาณ 100 % w/w โดยนำน้ำหนัก Silane ปั่นกวนด้วยความเร็วรอบ 2,000-3,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที

3.2 วิธีการเตรียมการปรับปรุงพื้นผิวของซีเมนต์ด้วยสารคู่ควบ Silane ชนิด A-1100 ใช้สารคู่ควบ Silane ชนิด A-1100 ละลายในกรดอะซิติกที่อัตราส่วน 1:1 จากนั้น ละลายในน้ำปราศจากไอออน (Deionized water :DI) 100 % w/w โดยน้ำหนัก Silane บั่นกวนด้วยความเร็วรอบ 2,000- 3,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที

4. นำซีเมนต์ที่ได้เข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง
5. นำซีเมนต์ที่ได้ไปใช้ในการผสมและเตรียมคอมโพสิตต่อไป

3.3.4.3 การเตรียมซีเมนต์ที่ปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วย MAPE

1. นำซีเมนต์ผ่านเครื่องแยกขนาดโดยใช้ตะแกรงขนาด 50 และ 80 เมช โดยสัมพันธ์กับความยาวในช่วง 180 ถึง 300 ไมครอน
2. นำซีเมนต์เข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
3. ผสมซีเมนต์กับสารช่วยผสม MAPE ชนิด Fusabond[®] MB100D โดยใช้ในปริมาณ 1 3 และ 5 % ของน้ำหนักซีเมนต์
5. นำซีเมนต์ที่ได้ไปใช้ในการผสมและเตรียมคอมโพสิตต่อไป

3.3.4.4 ขั้นตอนการทำพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบหรือสารช่วยผสม

1. ผสมซีเมนต์กับพอลิเมอร์ในอัตราส่วนผสมต่างๆ ดังตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 สูตรผสมต่างๆ ที่ใช้ในการทำคอมโพสิตโดยไม่มีการใช้สารคู่ควบและ/หรือสารช่วยผสม

สูตร	ปริมาณ			
	PVC (phr)	LDPE (phr)	สารช่วยผสม (%/wt LDPE)	ซีลี้อย (%/wt polymer blend)
1	100	*	-	10
2	100	*	-	20
3	100	*	-	30
4	100	*	-	40
5	100	*	-	50
6	100	**	-	10
7	100	**	-	20
8	100	**	-	30
9	100	**	-	40
10	100	**	-	50
11	100	*	***	10
12	100	*	***	20
13	100	*	***	30
14	100	*	***	40
15	100	*	***	50
16	100	**	***	10
17	100	**	***	20
18	100	**	***	30
19	100	**	***	40
20	100	**	***	50

หมายเหตุ * คือ เลือกปริมาณ LDPE ที่ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด

** เลือกปริมาณ LDPE ที่ให้สมบัติเชิงกลต่ำ

*** คือ เลือกชนิดและปริมาณของสารช่วยผสมที่ให้สมบัติโดยรวมดีที่สุด

2. ขั้นตอนการผสม การขึ้นรูปและสมบัติต่างๆตามหัวข้อที่ 3.3.1

3.3.4.5 ขั้นตอนการทำพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้สารคู่ควบ Silane

1. ผสมซีลี้อยู่ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวแล้วกับส่วนผสมต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.12

ตารางที่ 3.12 ส่วนผสมต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำคอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยสารคู่ควบ Silane

ปริมาณ					
PVC (phr)	LDPE (phr)	PA 20 (%/wt LDPE)	ซีลี้อย (%/wtPVC+LDPE)	A-137 (%/wt ซีลี้อย)	A-1100 (%/wt ซีลี้อย)
100	40	*	10	0,1,3,5 %	-
100	40	*	20	0,1,3,5 %	-
100	40	*	30	0,1,3,5 %	-
100	40	*	40	0,1,3,5 %	-
100	40	*	10	-	0,1,3,5 %
100	40	*	20	-	0,1,3,5 %
100	40	*	30	-	0,1,3,5 %
100	40	*	40	-	0,1,3,5 %

หมายเหตุ * เลือกปริมาณสารช่วยผสมที่ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด

3.3.4.6 ขั้นตอนการทำพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้สารช่วยผสม MAPE

1. ชั่งส่วนผสมต่าง ๆ ตามตารางที่ 3.13
2. ขั้นตอนการทำคอมโพสิตตามหัวข้อ 3.3.1

ตารางที่ 3.13 ส่วนผสมต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำคอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วย MAPE

ปริมาณ				
PVC (phr)	LDPE (phr)	PA 20 (%/wt LDPE)	ซีลีย (%/wtPVC+LDPE)	MB100D (%/wt ซีลีย)
100	40	*	10	0,1,3,5 %
100	40	*	20	0,1,3,5 %
100	40	*	30	0,1,3,5 %
100	40	*	40	0,1,3,5 %
100	40	*	10	-
100	40	*	20	-
100	40	*	30	-
100	40	*	40	-

หมายเหตุ * เลือกปริมาณสารช่วยผสมที่ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด

3.4 วิธีการตรวจวิเคราะห์และการทดสอบ

3.4.1 การตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ผสมและคอมโพสิต

3.4.1.1 อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

การทดสอบทำได้โดยนำสารตัวอย่างที่ผ่านการผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวแล้ว บดด้วยเครื่องบดหยาบ จากนั้นนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลวประมาณ 10 นาที แล้วจึงนำไปบดด้วยเครื่อง บดความเร็วสูง (1400 รอบต่อนาที) ทำให้ได้สารตัวอย่างที่มีขนาดเล็ก ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 0.025 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปบดกับ KBr วิเคราะห์ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ในช่วงเลข คลื่น $4000-400\text{ cm}^{-1}$ Resolution เท่ากับ 4 และจำนวนรอบของการ scan เท่ากับ 16

3.4.1.2 ^{13}C - NMR

การทดสอบทำได้โดยใช้วิธีเตรียมตัวอย่างเหมือนในหัวข้อที่ 3.4.1.1 และตรวจวัดด้วยเครื่อง Nuclear Magnetic Resonance ที่ความถี่ 75.4 MHz ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางของ Zirconia rotor 7 mm Recycle delay และ Contact times เท่ากับ 2 s และ 1 ms ตามลำดับ โดยทุกสเปกตรัมได้จากการ สแกนซ้ำ 2000 ครั้ง

3.4.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลได้ทำการทดสอบตามมาตรฐานต่างๆ ดังตารางที่ 3.14

ตารางที่ 3.14 มาตรฐานต่างๆ ในการทดสอบพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมโพสิต

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยที่รายงาน
ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)	ASTM D 638	MPa
การดึงยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)	ASTM D 638	%
ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength)	ASTM D 256	kJ/m^2
ความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength)	ASTM D 790	MPa
มอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus)	ASTM D 790	MPa

3.4.2.1 ความแข็งแรงดึง มอดุลัส และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด

การทดสอบสมบัติด้านแรงดึงเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 638 โดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal testing machine) และโปรแกรม WINDAP ในการคำนวณชิ้นงานตัวอย่างอยู่ในรูปดัมเบลล์ ดังรูปที่ 3.1 ใช้ชิ้นงานตัวอย่าง 8 ชิ้นในแต่ละสูตรและใช้สภาวะในการทดสอบดังนี้

- โหลดเซลล์ (Load cell) 5 กิโลนิวตัน (kN)
- ความเร็วในการดึง (Test speed) 5 มิลลิเมตร/นาที
- Gammage 1.0 กรัม/ตารางเมตร
- ระดับเซลล์ (Cell class) 0.5
- ความยาวของเกจ (Gauge length) 25 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.1 ลักษณะชิ้นงานดัมเบลล์ที่นำมาทดสอบ [42]

ความแข็งแรงดึง มอดุลัส และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด สามารถหาได้จาก สมการต่อไปนี้

$$\text{ความแข็งแรงดึง (Tensile strength, } \sigma) = \frac{F_1}{A}$$

$$\text{มอดูลัส (Tensile modulus , E)} = \frac{((F_3 / A) - (F_2 / A))}{1/100}$$

$$\text{ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (\%Elongation at break, At)} = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100$$

เมื่อ F_1 คือ แรงที่ใช้ในการดึงยืดชิ้นงานตัวอย่าง ณ จุดสูงสุด (หน่วยเป็นนิวตัน; N)
 F_2 และ F_3 คือ แรงที่ใช้ในการดึงยืดชิ้นงานตัวอย่างที่ 2 และ 3 % ความเครียด (N)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่างตอนเริ่มต้น (หน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร; mm^2)
 l คือ ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงชิ้นงานตัวอย่าง ณ จุดขาด (หน่วยเป็นมิลลิเมตร; mm)
 l_0 คือ ระยะที่ชิ้นงานตัวอย่างแคบที่สุดและมีพื้นที่หน้าตัดขนานกัน (Gauge length หน่วยเป็นมิลลิเมตร; mm เท่ากับ 25 mm)

3.4.2.2 ความแข็งแรงโค้งงอ และมอดูลัสโค้งงอ

การทดสอบหาค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) และมอดูลัสโค้งงอ (Flexural modulus) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 790 โดยการทดสอบแต่ละครั้งใช้ชิ้นงานตัวอย่าง 10 ชิ้น รูปที่ 3.2 เป็นภาพการทดสอบความแข็งแรงโค้งงอ สภาวะที่ใช้ในการทดสอบเป็นดังนี้

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

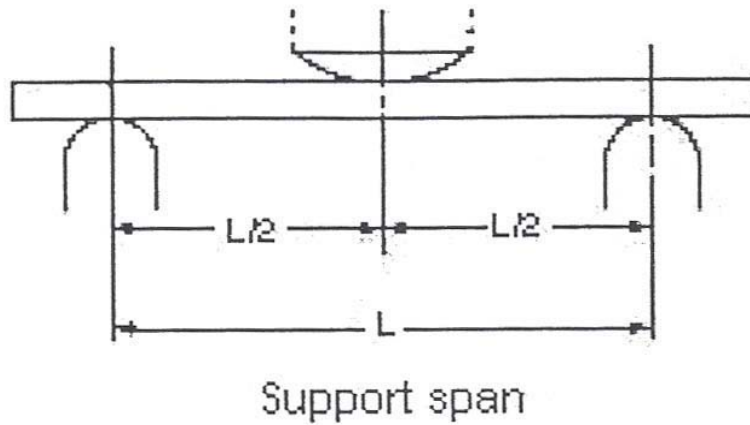
สูตรที่ใช้ในการคำนวณค่าความแข็งแรงโค้งงอและมอดูลัสโค้งงอมีดังนี้

$$\text{ค่าความแข็งแรงโค้งงอ ; } \sigma_f = \frac{1.5FL}{bh^2}$$

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

เมื่อ F คือ แรงกดสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานโค้งงอ (หน่วยเป็นนิวตัน; N)
 L คือ Span length เท่ากับ 40 mm
 b คือ ความกว้างของตัวอย่าง
 h คือ ความหนาของตัวอย่าง
 ΔF คือ ผลต่างของแรงกด ณ จุดเริ่มต้นถึงแรงกดที่ 20 N ในช่วง ความชันเป็นเส้นตรง (หน่วยเป็นนิวตัน; N)

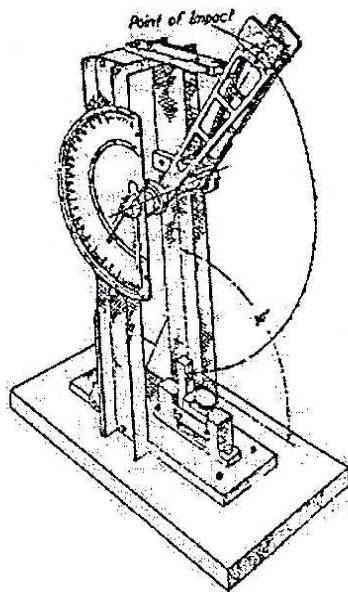
Δd คือ ระยะกดโค้งงอในช่วงแรงกด 0-20 N (หน่วยเป็นมิลลิเมตร; mm)



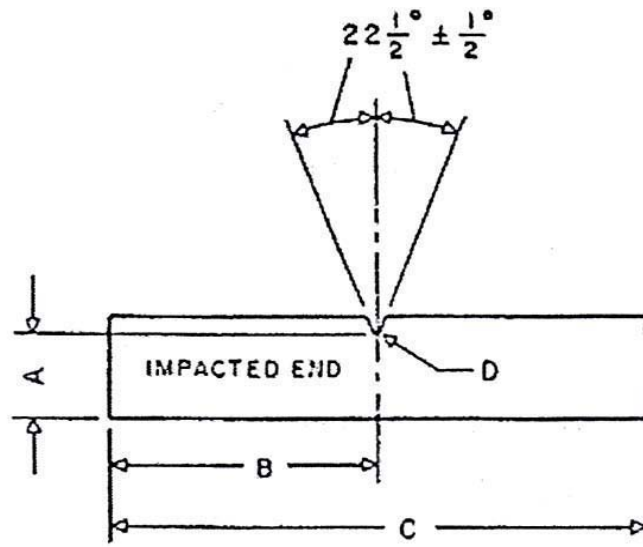
รูปที่ 3.2 การทดสอบความแข็งแรงโค้งงอ [43]

3.4.2.3 ความแข็งแรงกระแทก

การทดสอบความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 256 โดยในการทดสอบใช้มาตรฐานแบบไอซอด (Izod type) ขึ้นงานตัวอย่าง 10 ชิ้นในแต่ละสูตร โดยทำการบาก (Notch) ขึ้นงานก่อนทดสอบ รูปที่ 3.3 แสดงเครื่องมือ Izod impact ที่ใช้ในการทดสอบ และรูปที่ 3.4 แสดงชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.3 เครื่องมือทดสอบความแข็งแรงกระแทกแบบไอซอด [44]



รูปที่ 3.4 ชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงกระแทก [44]

- โดย A แสดงความยาว 10.16 ± 0.05 มิลลิเมตร
 โดย B แสดงความยาว $31.5 - 32.00$ มิลลิเมตร
 โดย C แสดงความยาว $60.30 - 63.50$ มิลลิเมตร
 โดย D แสดงมุมรูปตัว V เท่ากับ $22.5^{\circ} \pm 0.5^{\circ}$

ความแข็งแรงกระแทกสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

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

- เมื่อ IS คือ ค่าความแข็งแรงกระแทก (หน่วยเป็นกิโลจูลต่อตารางเมตร; kJ/m^2)
 W คือ ค่าพลังงานกระแทก (หน่วยเป็นกิโลจูล; kJ)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (ตารางเมตร; m^2)

3.4.3 สันฐานวิทยา

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ใช้มาศึกษาลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ที่แตกหักที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) การเตรียมตัวอย่างทำได้โดยนำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยการกดอัดมาแช่ในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) และทำการหักทันที หลังจากนั้นนำมาเคลือบด้วยทองและนำเข้าเครื่อง SEM ต่อไป โดยทำการศึกษาการกระจายตัวของพอลิเมอร์ผสม เส้นใย และศึกษาการยึดติดระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์

3.4.4 สมบัติทางความร้อน

3.4.4.1 อุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition temperature, T_d)

เทคนิค Thermogravimetry analysis (TGA) ใช้เข้ามาศึกษาสมบัติทางความร้อนและอุณหภูมิการสลายตัวของ PVC ในพอลิเมอร์ผสม และคอมโพสิต สภาวะในการทดสอบ คือ อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ในช่วงอุณหภูมิ 50 – 600 องศาเซลเซียส และทดสอบในบรรยากาศไนโตรเจน

3.4.4.2 Differential scanning calorimeter (DSC)

DSC เป็นเครื่องมือที่ใช้หาอุณหภูมิการตกผลึก (Crystallization temperature, T_c) อุณหภูมิการหลอมเหลว (Melt temperature, T_m) และพื้นที่ใต้กราฟซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงปริมาณความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึก (Enthalpy of fusion, ΔH_f) เพื่อดำหนดองศาของการเกิดผลึก (Degree of crystallinity) ของสารจากสูตรดังต่อไปนี้

$$\Delta H_f = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟ (mJ)}}{\text{น้ำหนักของสารตัวอย่าง (mg)}}$$

$$\Delta H_{\text{normalised}} = \frac{\Delta H_f \times 100}{100 - \% \text{ โดยน้ำหนักของสารที่ไม่มีผลึก}}$$

$$\text{Degree of crystallinity} = \frac{\Delta H_n}{\Delta H_{f0}} \times 100$$

เมื่อ ΔH_f = Enthalpy of fusion ของสารหรือพื้นที่ใต้กราฟ ซึ่งได้จากเครื่อง

ΔH_{f0} = Enthalpy of fusion ของพอลิเอทิลีนที่มีองศาการเป็นผลึก 100 % เท่ากับ 293.6 J/g [30]

$\Delta H_{\text{normalised}}$, ΔH_n = Enthalpy of fusion ของพอลิเอทิลีนในของผสมโดยคิดเทียบปริมาณของพอลิเอทิลีน 100 % โดยน้ำหนัก

สภาวะที่ใช้ศึกษา คือ อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ในช่วงอุณหภูมิ 25 – 150 องศาเซลเซียส

3.4.4.3 การศึกษาอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว

เพื่อศึกษาอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ PVC ในพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมชนิดต่าง ๆ ทดสอบโดย Dynamic Mechanical Analyzer (DMA, Mettler Teledo DMA/SDTA 861) ลักษณะตัวอย่างที่นำมาทดสอบเป็นตัวอย่างที่ขึ้นรูปโดยใช้กระบวนการอัดขึ้นรูป แบบของการทดสอบ คือ แบบใช้แรงเฉือน (Shear-bending mode) สภาวะในการทดสอบ คือ อัตราการให้ความร้อน 4 องศาเซลเซียสต่อนาที ในช่วงอุณหภูมิ 20–130 องศาเซลเซียส โดยใช้ความถี่ 1 Hz

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

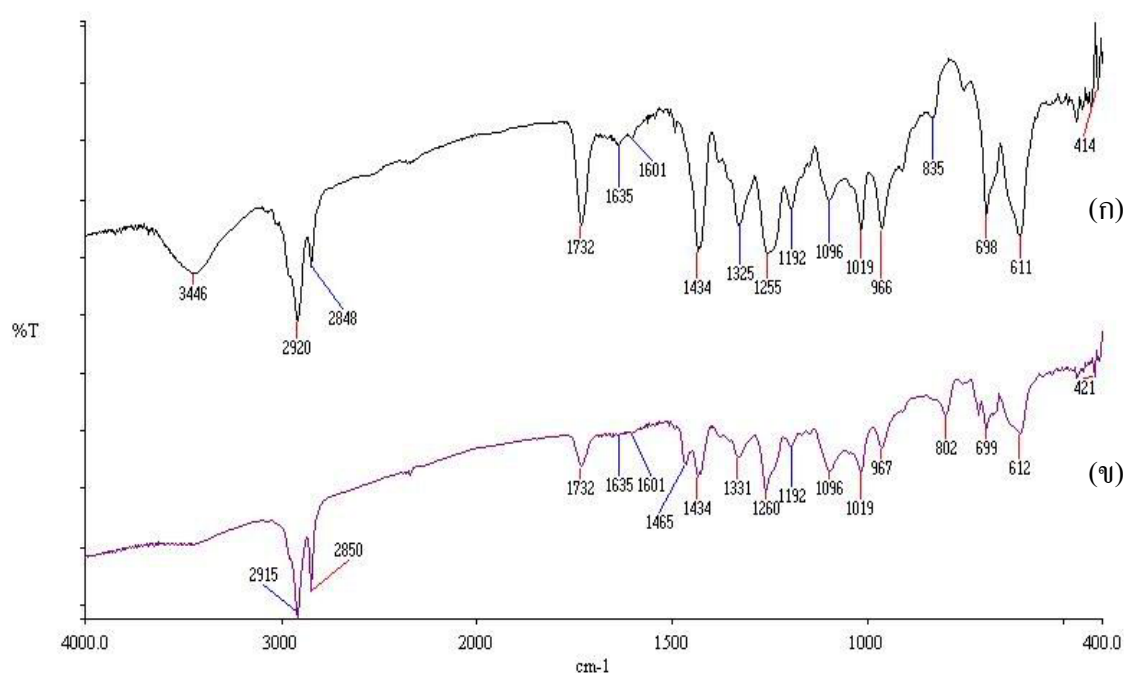
งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์และพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำ ซึ่งใช้อัตราส่วนในการผสม PVC100 : LDPE10 20 30 40 และ 50 โดยได้ศึกษาวิธีการผสมระหว่างการใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวเพียงขั้นตอนเดียวและการใช้เครื่องผสม ชนิด 2 ลูกกลิ้ง หลังจากผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวรวมทั้งได้ศึกษาการใช้สารช่วยผสมเพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมโดยได้เปรียบเทียบสารช่วยผสม 3 ชนิด คือ คลอรีเนตเตดพอลิเอทิลีน (Chlorinated polyethylene, CPE) พอลิเมอร์ร่วมระหว่างเมทิลเมทาไครเลตและบิวทิลอะไครเลต (Methyl methacrylate-co-butylacrylate, PA 20) และ พอลิเมอร์ร่วมระหว่างเอทิลีนและเมทิลอะไครเลต (Ethylene and methyl acrylate copolymer, Elvaloy) นอกจากนี้ได้ศึกษาสมบัติของคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมและซีลียจากไม้ยางพารา โดยศึกษาถึงการปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิตจากพอลิเมอร์ผสมที่มีการใช้สารคู่ควบ Silane และ/หรือ สารช่วยผสม MAPE ซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้

4.1 ผลการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE

4.1.1 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสม

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีบนพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมทำได้โดยการใช้เครื่อง FTIR และพิจารณาจากพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วน PVC100:LDPE 10 ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1 จากรูปที่ 4.1 แสดงสเปกตรัมของร้อยละการส่งผ่านแสงของ PVC และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE โดยในรูปที่ 4.1 (ก) เป็นสเปกตรัมของ PVC 100% ซึ่งพบพีกอินฟราเรดสเปกตรัมช่วง $2835 - 2962\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นลักษณะการสั่นของ C-H Stretching ของ CH_2 ที่มีอยู่ในสายโซ่ของ PVC ส่วนพีกช่วง $1700 - 1750\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของ Carbonyl stretching ซึ่งหมู่ Carbonyl เกิดจากกระบวนการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนโดยมีออกซิเจนร่วมอยู่ด้วย (Thermal oxidative degradation) ที่เกิดขึ้นใน PVC [45] และตำแหน่งพีกที่ 1635 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบ $\text{C}=\text{C}$ - Stretching ซึ่งเกิดจากการเสื่อมสภาพของ PVC เนื่องจากกระบวนการดีไฮโดรคลอรีเนชัน (Dehydrochlorination process) ทำให้มีโครงสร้างของพันธะคู่ (-CH=CH-) เกิดขึ้น [5] ส่วนพีกช่วง $1430 - 1470\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-H bending ของ CH_2 ซึ่งมีอยู่ในสายโซ่ของ PVC แถบพีกช่วง $1300 - 1400\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการเปลี่ยนรูป (Deformation) ของ CH_2 สำหรับพีกช่วง $600 - 800\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-Cl Stretching ซึ่งมีอยู่ในโครงสร้างของ PVC ส่วนในรูปที่ 4.1 (ข) แสดงสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE ซึ่งความเข้ม (Intensity) ของพีกที่ตำแหน่ง 1635 cm^{-1} ลดลงเล็กน้อยแสดงว่า LDPE ที่ผสมอยู่ใน PVC กีดขวางการเกิด polyene และ หมู่คาร์บอนิล เนื่องจากส่วนที่เสื่อมสภาพของ

PVC อาจถูกห่อหุ้มด้วย LDPE ทำให้ไม่สามารถเกิดเป็น polyene ได้ และลดโอกาสที่จะสัมผัสกับ O_2 ซึ่งทำให้แนวโน้มความเข้มของพีกหมู่คาร์บอนิลลดลง [5]



รูปที่ 4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (ก) PVC 100 : LDPE 0 และ (ข) PVC 100 : LDPE 10

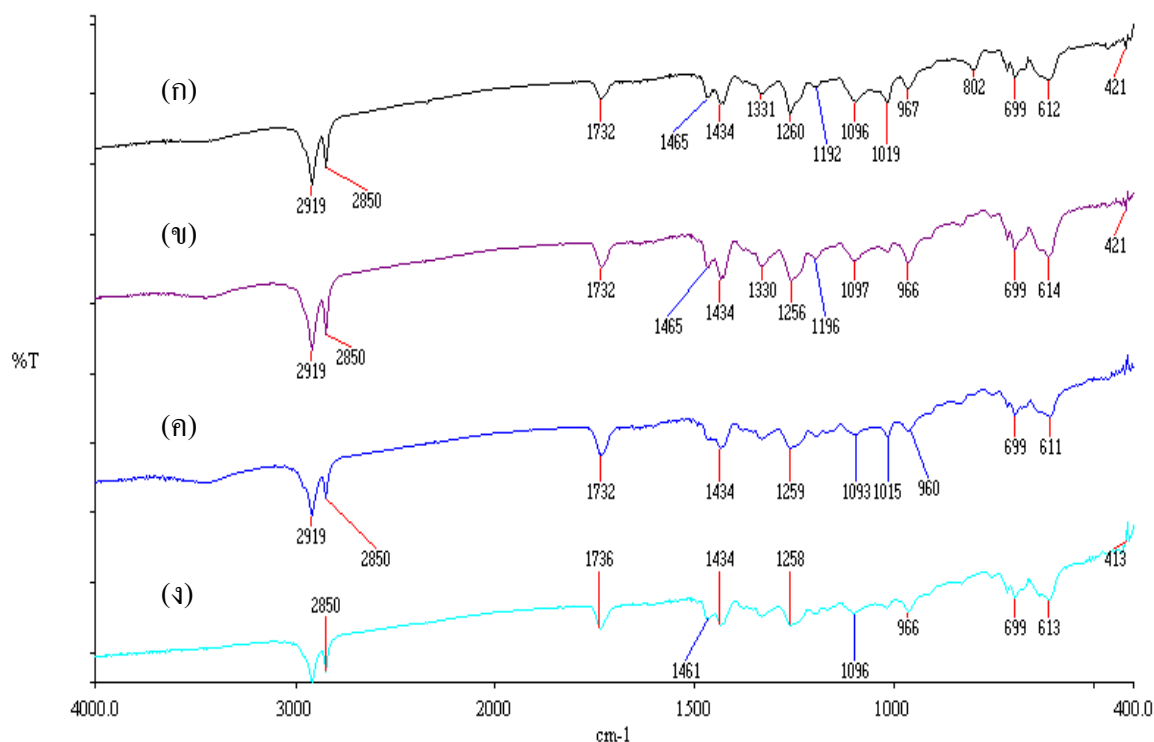
ตำแหน่งของสเปกตรัมที่สำคัญของ PVC และพอลิเมอร์ผสมสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตำแหน่งสเปกตรัมของ PVC และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE

ตำแหน่งพีก (cm^{-1})	ลักษณะการสั่น	เอกสารอ้างอิง
2835 – 2962	C-H Stretching ของ CH_2	46-47
1700 – 1750	C=O Stretching ของคาร์บอนิล	46-47
1635	-C=C- Stretching	5, 46-47
1430 – 1470	C-H Bending ของ CH_2	46-47
1300 – 1400	C-H Deformation ของ CH_2	46-47
600 – 800	C-Cl Stretching	46-47

4.1.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสม

จากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสม 3 ชนิด โดยใช้ PVC 100 phr และ LDPE 10 phr และสารช่วยผสม 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE ได้ผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.2

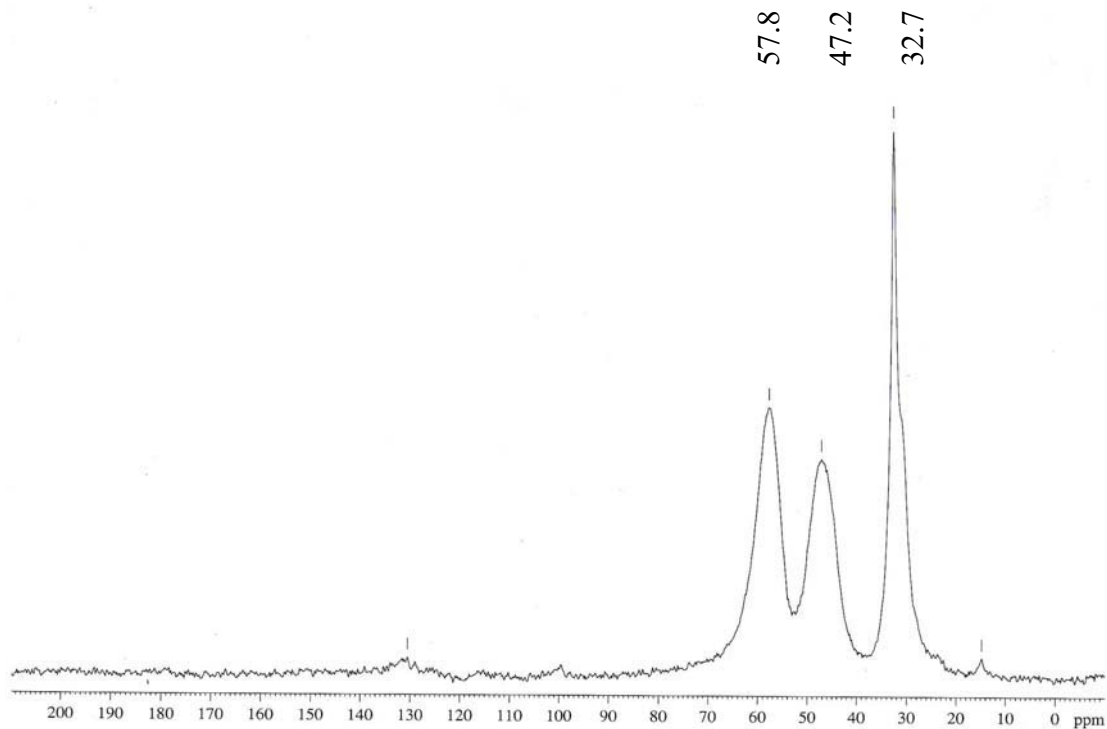


รูปที่ 4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (ก) PVC 100:LDPE 10 (ข) PVC 10 :LDPE 10:CPE 15%
(ค) PVC 100 : LDPE 10: PA 20 15% และ (ง) PVC 100 : LDPE 10 : Elvaloy 15 %

จากรูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัมของร้อยละการส่งผ่านแสงของ PVC และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE ซึ่งใช้สารช่วยผสม 3 ชนิด โดยรูปที่ 4.2 (ข) เป็นสารช่วยผสมชนิด CPE จากสเปกตรัมพบว่ามีตำแหน่งต่าง ๆ ของพีคคล้ายกับของ PVC 100 : LDPE 10 เนื่องจาก CPE มีโครงสร้างคล้าย PVC และ LDPE คือ มี CH_2 และ C-Cl จึงทำให้พบพีคช่วง $2835 - 2962 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นลักษณะการสั่นแบบ C-H Stretching $1430 - 1470 \text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-H Bending และ $600 - 800 \text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-Cl Stretching ส่วนรูปที่ 4.2 (ค)-(ง) เป็นสารช่วยผสมชนิด PA 20 และ Elvaloy โดยในโครงสร้างประกอบด้วยอะไครเลตซึ่งมีหมู่คาร์บอนิล ดังนั้นตำแหน่งของพีคจึงเกิดการซ้อนทับกับหมู่คาร์บอนิลที่เกิดขึ้นใน PVC คือ ในช่วง $1700 - 1750 \text{ cm}^{-1}$ เป็นผลให้ตำแหน่งของพีคใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสม

4.1.3 การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างของพอลิเมอร์ผสม โดยใช้เทคนิค Solid-State ^{13}C -NMR

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีบนพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน PVC100 : LDPE10 ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ^{13}C -NMR สเปกตรัมของ PVC 100 : LDPE 10

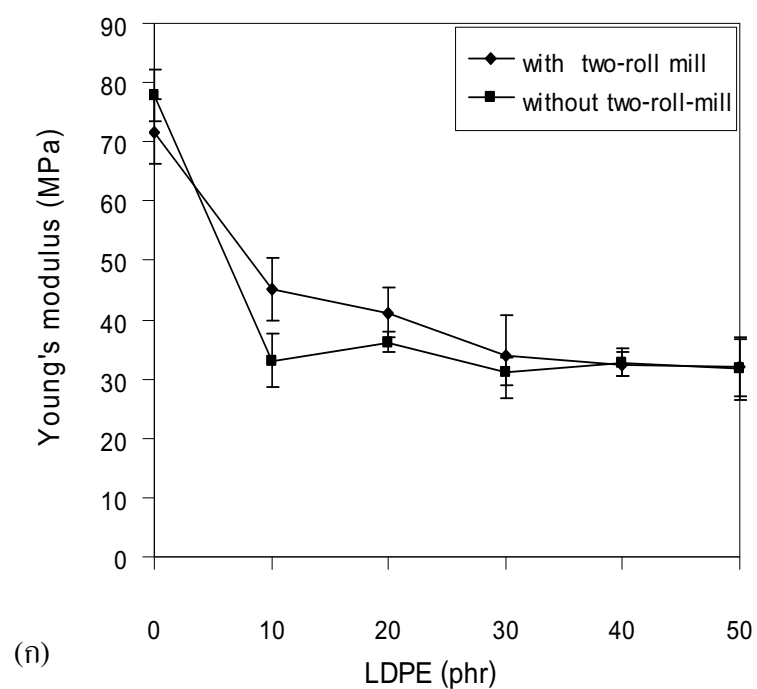
จาก ^{13}C -NMR สเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วน PVC 100 : LDPE 10 พบว่ามีพีคที่ตำแหน่ง 57.8 และ 47.2 ppm ซึ่งสอดคล้องกับสเปกตรัมของ PVC [2] และพีคที่ 32.7 ppm สอดคล้องกับสเปกตรัมของ LDPE [2] ซึ่งอธิบายได้ว่าพอลิเมอร์ผสมไม่เกิดการต่อกิ่ง (Graft) หรือไม่เกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างพอลิเมอร์ผสม สาเหตุที่พอลิเมอร์ผสมในงานวิจัยนี้ไม่เกิดการต่อกิ่งนั้นอาจเกิดจากสภาวะที่ใช้ในการผสมต่างกับงานวิจัยที่ผ่านมา [2] คือ มีการผสมเพียงรอบเดียว ซึ่งอาจไม่ทำให้เกิดการเสียหายและไม่เกิดอนุมูลอิสระของ PVC และ LDPE จึงไม่เกิดการต่อกิ่ง แต่ในงานวิจัยที่ผ่านมา มีการผสมถึง 5 รอบ ทำให้ PVC และ LDPE เกิดการเสียหายและมีอนุมูลอิสระ (Free radical) อยู่ในระบบของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการต่อกิ่งระหว่าง PVC และ LDPE

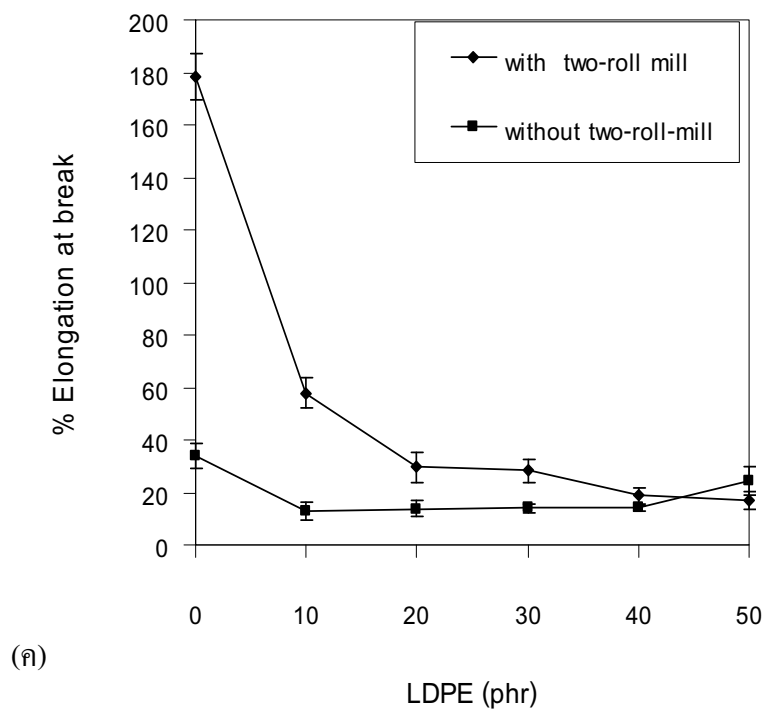
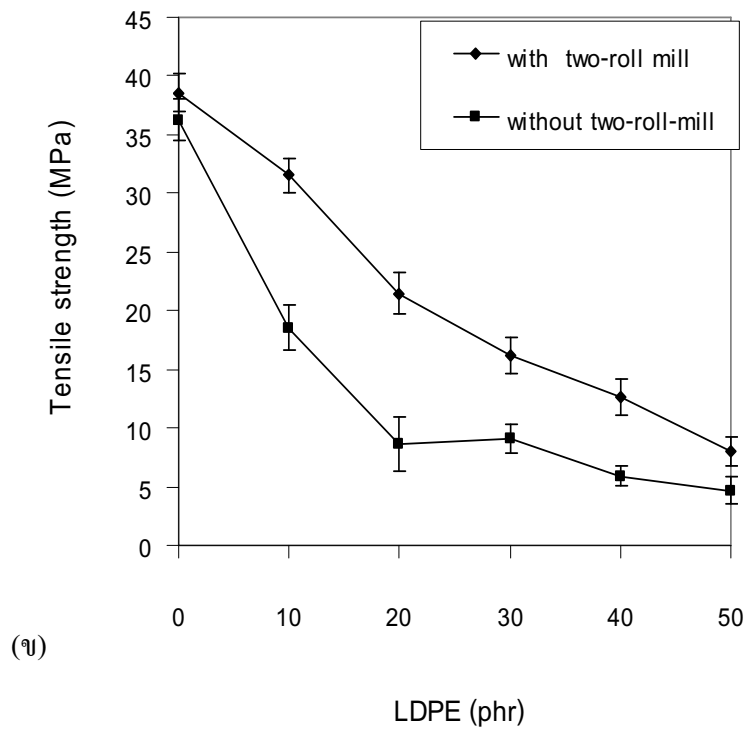
4.1.4 สมบัติเชิงกล

ในการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม ได้แบ่งการศึกษาออกเป็นการศึกษาวิธีการผสมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE และผลของการปรับปรุงพอลิเมอร์ผสมโดยใช้สารช่วยผสม

4.1.4.1 การศึกษาวิธีการผสมของพอลิเมอร์ผสมและผลของปริมาณ LDPE ต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

ในการศึกษาวิธีการผสมของพอลิเมอร์ผสม 2 แบบ ได้แก่ การใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวในการผสมเพียงขั้นตอนเดียว และการเพิ่มขั้นตอนการผสมโดยใช้เครื่องผสมชนิด 2 ลูกกลิ้ง โดยศึกษาพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณของ PVC 100 phr และ LDPE 10 20 30 40 และ 50 phr

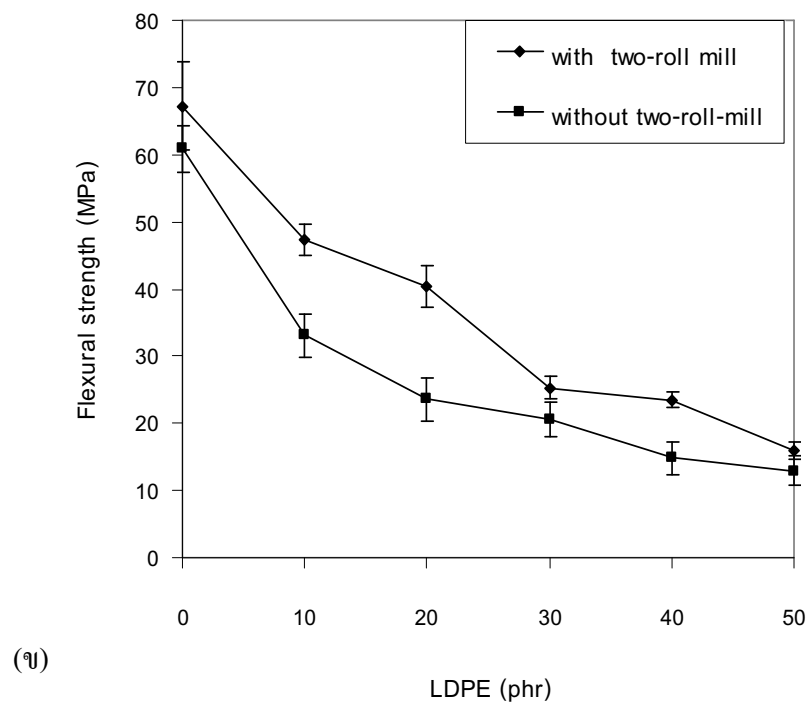
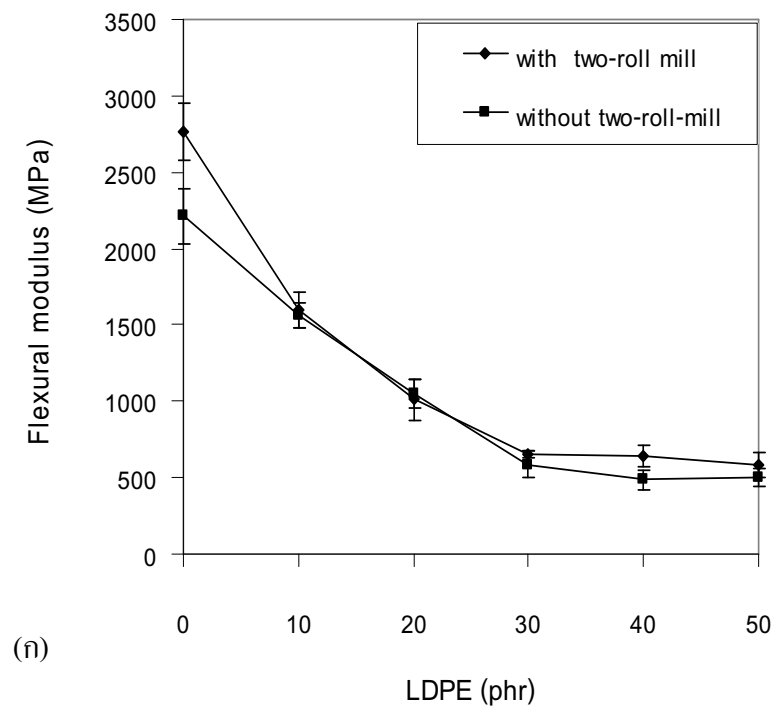




รูปที่ 4.4 ผลของปริมาณ LDPE ต่อสมบัติด้านแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PVC / LDPE

(ก) มอดุลัส (ข) ความแข็งแรงดึง และ (ค) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด

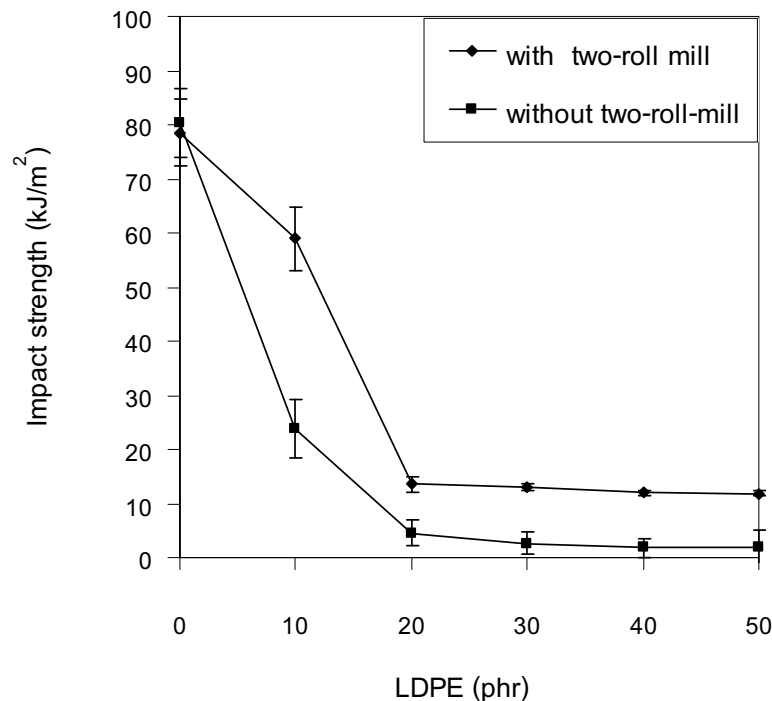
ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัส ความแข็งแรงดึงและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสม PVC / LDPE แสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อมีการผสมด้วยเครื่องผสมชนิด 2 ลูกกลิ้ง หลังจากที่ได้ผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวแล้วนั้น ทำให้สมบัติทางแรงดึงมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านการผสมด้วยเครื่องผสมชนิด 2 ลูกกลิ้ง เนื่องจากการผสมด้วยเครื่องผสมชนิด 2 ลูกกลิ้ง มีการให้ความร้อนในการผสม ทำให้พอลิเมอร์ 2 ชนิดสามารถหลอม (Fuse) รวมกันได้มากขึ้นและเกิดการกระจายตัวของพอลิเมอร์ผสมได้ดีขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการผสม จึงเป็นผลให้รอยตำหนิ (Defects) มีน้อยกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการผสมจากใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวเพียงอย่างเดียว แต่พบว่าสมบัติด้านแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมทั้ง 2 แบบ เป็นไปในทางเดียวกัน กล่าวคือ การเติม LDPE ลงใน PVC ทำให้ค่ามอดุลัส ความแข็งแรงดึงและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าต่ำลง นอกจากนี้เมื่อปริมาณ LDPE เพิ่มขึ้นยิ่งทำให้สมบัติทางแรงดึงมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากสมบัติด้านแรงดึงนั้นเป็นการศึกษาพฤติกรรมของพอลิเมอร์เมื่อมีการให้ความเค้น (Stress) ดึงให้พอลิเมอร์ยืดยาวออก โดยในช่วงต้นของการดึงจะเกิดการเสียสภาพแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) คือสามารถหดกลับมาในตำแหน่งเดิมได้เมื่อปล่อยแรงและในช่วงนี้เราจะพิจารณาถึงค่ายังมอดุลัส การผสม LDPE ซึ่งมีความอ่อนนุ่ม (Soft) มากกว่า PVC ทำให้ค่ายังมอดุลัสมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ LDPE เพิ่มขึ้น จึงทำให้มีความสามารถต้านทานต่อการเสียรูปได้น้อยลง เมื่อให้แรงดึงเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พอลิเมอร์เกิดการเสียสภาพและขาดออกจากกัน เมื่อพอลิเมอร์ผสมได้รับแรงดึงสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์จะเคลื่อนที่ตามแนวแรงที่ถูกดึงในช่วงความเครียดสูงๆ หลังจากจุดคราก (Yield point) สายโซ่พอลิเมอร์จะเกิดการเลื่อนหลุด (Slip) ออกจากการยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่ เกิดการเสียสภาพแบบพลาสติก (Plastic deformation) สายโซ่ของพอลิเมอร์ไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ และจากที่พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE ไม่สามารถเข้ากันได้ เนื่องจาก PVC แสดงความมีขั้วส่วน LDPE ไม่มีขั้วจึงไม่มีการยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่ทำให้มีลักษณะเหมือนมีรอยตำหนิในชิ้นงาน ดังนั้นเมื่อให้แรงดึงสายโซ่จึงเลื่อนหลุดออกจากกันได้ง่าย สมบัติด้านความแข็งแรงดึงและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดจึงมีค่าลดลง เมื่อ LDPE มีปริมาณเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.5 ผลของปริมาณ LDPE ต่อสมบัติด้านการโค้งงอของพอลิเมอร์ผสม PVC / LDPE (ก) มอดุลัสโค้งงอ และ (ข) ความแข็งแรงโค้งงอ

จากรูปที่ 4.5 พบว่าสมบัติด้านการโค้งงอเป็นไปในแนวเดียวกับสมบัติด้านแรงดึง กล่าวคือ เมื่อเพิ่มการผสมด้วยเครื่องผสมชนิด 2 ลูกกลิ้ง ทำให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงกว่าการผสมเพียง

ขั้นตอนเดียว โดยการผสมทั้ง 2 แบบนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณ LDPE ค่ามอดุลัสโค้งงอและค่าความแข็งแรงโค้งงอมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากค่ามอดุลัสพิจารณาถึงความแข็ง (Stiffness) ของชิ้นงาน ดังนั้นมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมจึงมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ LDPE ซึ่งมีความอ่อนนุ่มมีปริมาณเพิ่มขึ้น สำหรับค่าความแข็งแรงโค้งงอเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่ให้แก่ชิ้นงานก่อนเกิดการเสียรูปอย่างถาวร เมื่อชิ้นงานได้รับแรงกดจะเกิดการกระจายแรง แต่เมื่อชิ้นงานมีรอยตำหนิทำให้ไม่สามารถกระจายแรงได้อย่างต่อเนื่อง เพราะความไม่เข้ากันของ PVC และ LDPE เมื่อเพิ่มปริมาณ LDPE จึงเหมือนเป็นการเพิ่มรอยตำหนิในชิ้นงาน ความแข็งแรงโค้งงอจึงลดลง

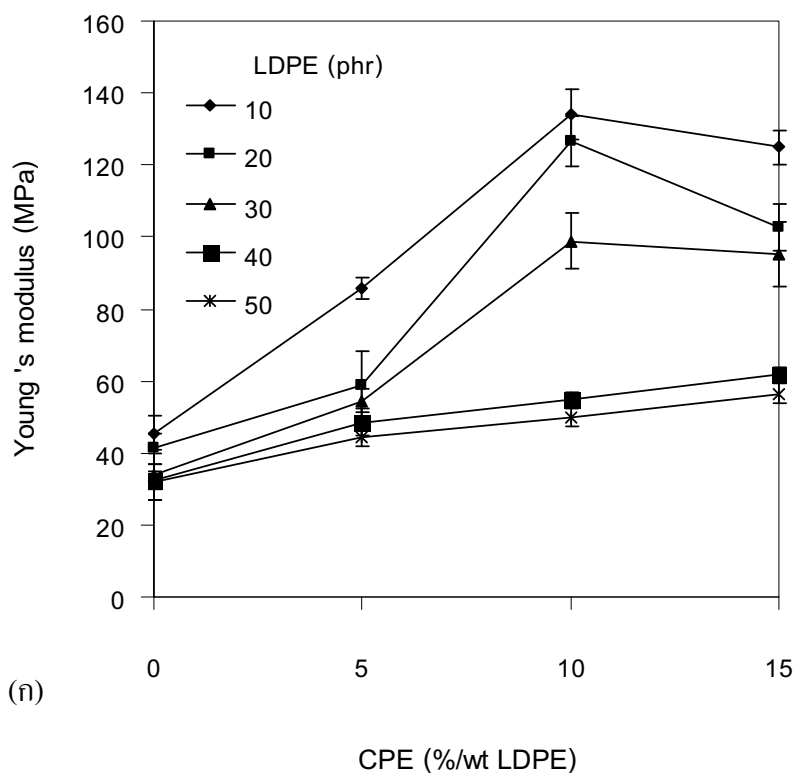


รูปที่ 4.6 ผลของปริมาณ LDPE ต่อสมบัติด้านความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PVC / LDPE

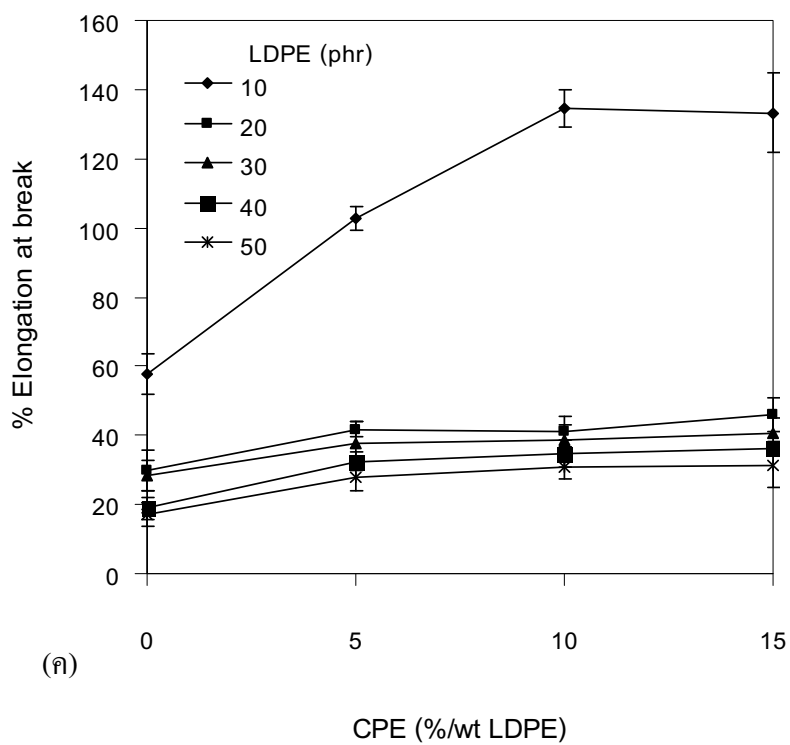
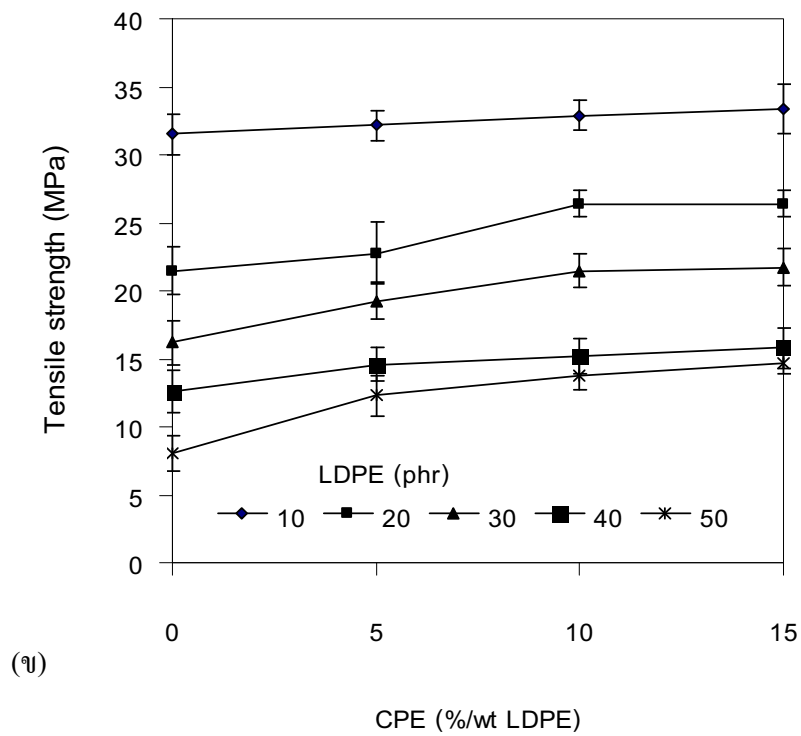
จากรูปที่ 4.6 พบว่าค่าความแข็งแรงกระแทกจากวิธีการผสมทั้ง 2 แบบ มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ LDPE เพิ่มขึ้น โดยการผสมด้วย 2 ขั้นตอนให้ค่าที่สูงกว่าเล็กน้อย เนื่องจากความแข็งแรงกระแทกเป็นการให้พลังงานแก่ชิ้นงานทันทีก่อนที่จะเกิดการแตกหักอย่างถาวรเกิดความเค้นบริเวณรอยบากของชิ้นงานในวัสดุภายใต้แรงเป็นบริเวณที่มีความเค้นสูงสายโซ่โมเลกุลเริ่มหลุดออกจากกันเกิดการแตกหักเริ่มต้นแล้วปลดปล่อยพลังงานออกมาเกิดการแตกหักต่อเนื่อง ดังนั้นเมื่อชิ้นงานมีรอยตำหนิจากความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์ผสมทำให้ไม่สามารถส่งผ่านแรงระหว่างสายโซ่ได้ สมบัติด้านความแข็งแรงกระแทกจึงลดลง

4.1.4.2 ผลของสารช่วยผสมต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

จากสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ที่มีค่าต่ำลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสม สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้สารช่วยผสมซึ่งแบ่งการศึกษาออกเป็นดังนี้ ศึกษาผลของสารช่วยผสมชนิดคลอรีเนเตดพอลิเอทิลีน (Chlorinated polyethylene, CPE) เพื่อปรับปรุงความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่าง PVC และ LDPE โดยใช้ปริมาณในการศึกษา ดังนี้ PVC 100 phr และ LDPE ในปริมาณต่าง ๆ คือ 10 20 30 40 และ 50 phr และใช้ CPE ในปริมาณ 5 10 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE และจากผลทดสอบที่ได้จะเลือกอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม 1 อัตราส่วนเพื่อนำมาปรับปรุงสมบัติโดยใช้สารช่วยผสมชนิดพอลิเมอร์ร่วมระหว่างเมทิลเมทาไครเลตและบิวทิลอะไครเลต (Methyl methacrylate-co-butylacrylate, PA 20) และพอลิเมอร์ร่วมระหว่างเอทิลีนและเมทิลอะไครเลต (Ethylene and methyl acrylate copolymer, Elvaloy)



(ก)

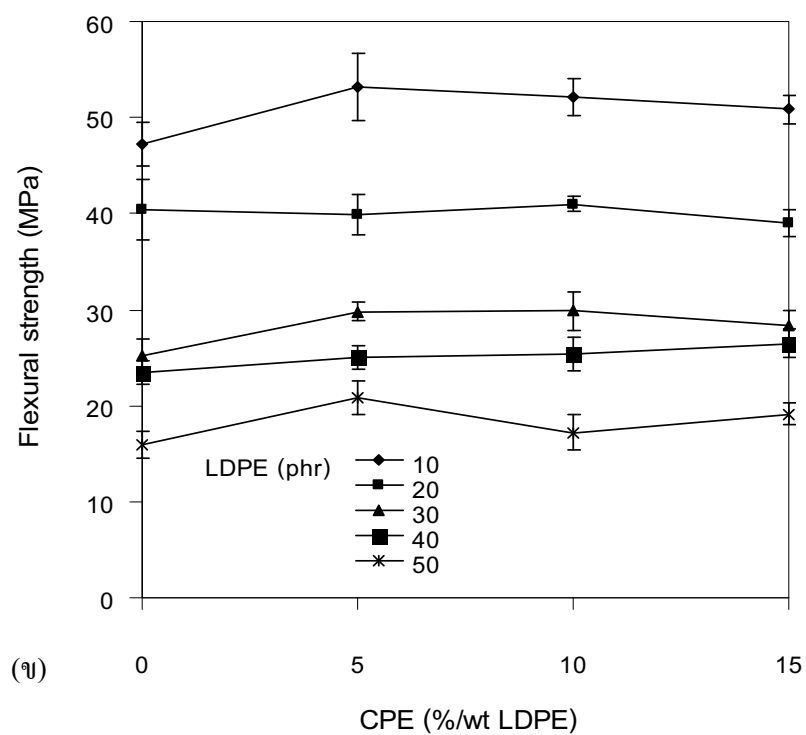
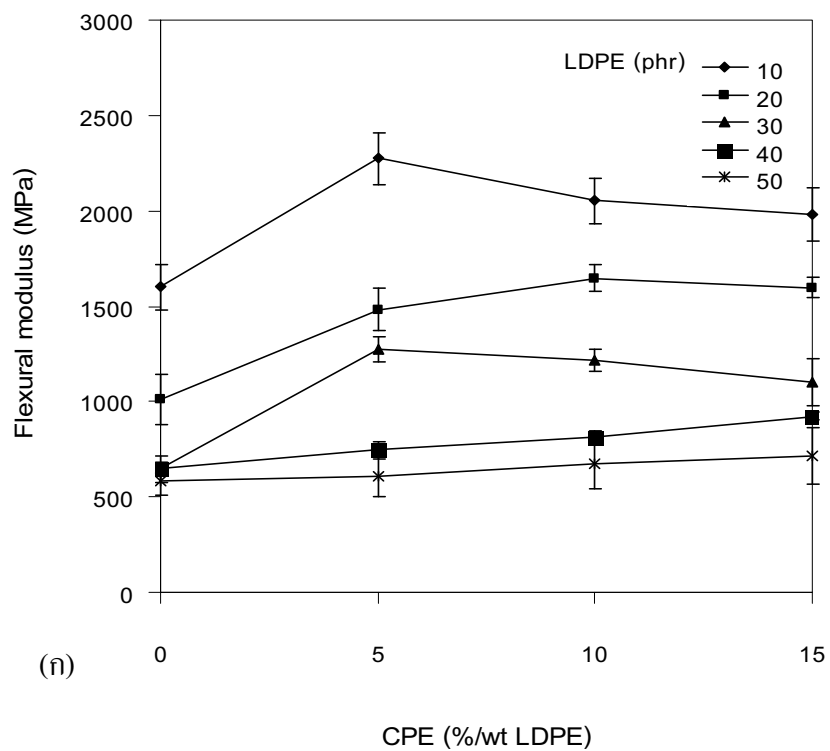


รูปที่ 4.7 สมบัติด้านแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PVC / LDPE โดยใช้สารช่วยผสมชนิด CPE

(ก) มอดุลัส (ข) ความแข็งแรงดึง และ (ค) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด

ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัส ความแข็งแรงดึงและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมและสารช่วยผสมชนิด CPE แสดงในรูปที่ 4.7 พบว่า เมื่อใช้สารช่วยผสมทำให้ค่ามอดุลัสสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อทำการปรับปรุงความแข็งแรงบริเวณพื้นผิวระหว่างวัฏภาคจะช่วยต้านทานการเสียรูปหรือการหลุดเลื่อนของสายโซ่เมื่อได้รับแรงดึงทำให้การเสียสภาพแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) เป็นไปได้ยากขึ้น เนื่องจากสายโซ่มีการเกี่ยวพันกันทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ยาก คือ มีความแข็ง (Stiffness) ค่ามอดุลัสจึงมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อธิบายได้จากโครงสร้างของสารช่วยผสม คือ CPE มีโครงสร้าง C-Cl เหมือนกับโครงสร้างของ PVC จึงเกิดการยึดเหนี่ยวกันได้โดยลักษณะของความมีขั้ว นอกจากนี้ CH_2 ในโครงสร้างของ CPE สามารถเกิดการเกี่ยวพันกันของสายโซ่ (Chain entanglement) กับ LDPE ได้ สำหรับค่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของ พอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้น เช่นเดียวกัน เนื่องจากการปรับปรุงการยึดติด (Adhesion) ระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ผสมมีผลให้รอยตำหนิของชิ้นงานลดลง ดังนั้นเมื่อได้รับแรงดึงจึงสามารถส่งผ่านแรงได้อย่างต่อเนื่อง สมบัติทางแรงดึงจึงสูงขึ้น

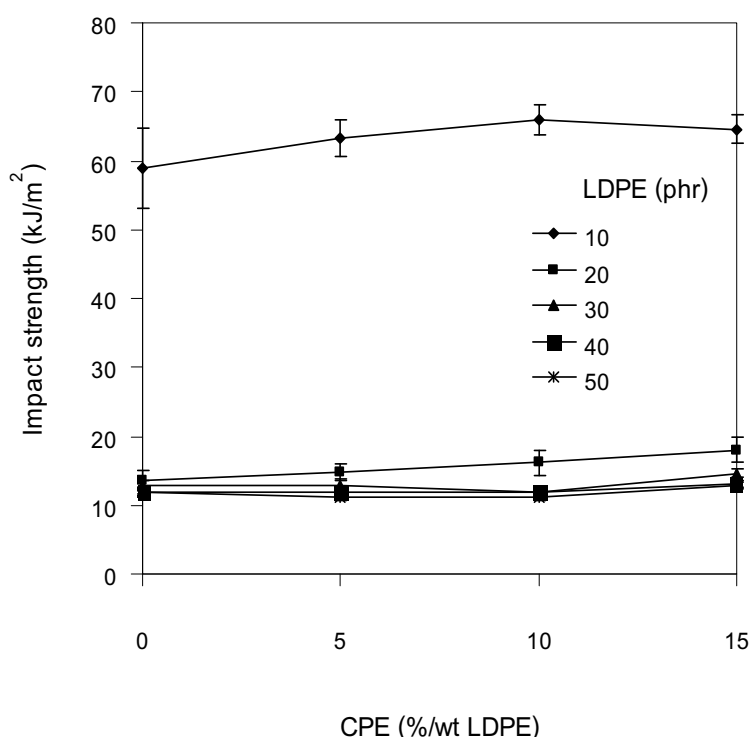
ในส่วนของปริมาณการใช้ CPE ในพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน PVC100 : LDPE10 20 และ 30 เมื่อใช้ปริมาณ CPE 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE มอดุลัสมีค่าลดลง ทั้งนี้อธิบายได้ว่าเนื่องจากในโครงสร้างของ CPE ที่ประกอบด้วย CH_2 ซึ่งมีความอ่อนนุ่ม ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณมากขึ้น จึงส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงลดลงมอดุลัสจึงมีแนวโน้มต่ำลง สำหรับพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน PVC100 : LDPE 40 และ 50 มอดุลัสมีค่าสูงสุดเมื่อใช้ปริมาณ CPE 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE จากผลดังกล่าวแสดงว่าในการเลือกใช้ปริมาณสารช่วยผสมต้องคำนึงถึงอัตราส่วนของพอลิเมอร์ด้วย สำหรับความแข็งแรงดึงพบว่าเมื่อใช้ปริมาณ CPE 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE ทำให้พอลิเมอร์ผสมในทุกอัตราส่วนมีความแข็งแรงดึงสูงที่สุด แต่สังเกตได้ว่าค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสม ส่วนร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในอัตราส่วน PVC100 : LDPE10 แต่ในอัตราส่วนอื่นมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น แสดงว่าในชิ้นงานของพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วนของ LDPE ในปริมาณมากทำให้มีรอยตำหนิหรือช่องว่างระหว่างรอยต่อของวัฏภาคมาก เมื่อถูกดึงยืดจึงไม่สามารถส่งผ่านแรงได้อย่างต่อเนื่อง สมบัติที่ได้จึงมีค่าต่ำ



รูปที่ 4.8 สมบัติด้านการโค้งงอของพอลิเมอร์ผสม PVC / LDPE โดยใช้สารช่วยผสมชนิด CPE

(ก) โมดูลัสโค้งงอและ (ข) ความแข็งแรงโค้งงอ

จากรูปที่ 4.8 พบว่าสมบัติด้านการโค้งงอของพอลิเมอร์ผสมเป็นไปในแนวทางเดียวกับสมบัติด้านแรงดึง คือ เมื่อปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมชนิด CPE ทำให้มอดุลัสโค้งงอและความแข็งแรงโค้งงอมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการปรับปรุงความแข็งแรงระหว่างวัฏภาค ทำให้เมื่อรับแรงกดสามารถกระจายแรงได้อย่างต่อเนื่อง สำหรับปริมาณการใช้ CPE พบว่ามีลักษณะเหมือนกับสมบัติด้านแรงดึง คือ ที่อัตราส่วน PVC100 : LDPE10 20 และ 30 มอดุลัสโค้งงอเริ่มลดลงเมื่อใช้ปริมาณ CPE 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก LDPE ในอัตราส่วน PVC100 : LDPE40 และ 50 มอดุลัสมีค่าสูงสุดเมื่อใช้ปริมาณ CPE 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE ส่วนความแข็งแรง โค้งงอมีแนวโน้มใกล้เคียงกันแม้ว่าจะเพิ่มปริมาณ CPE เป็น 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE

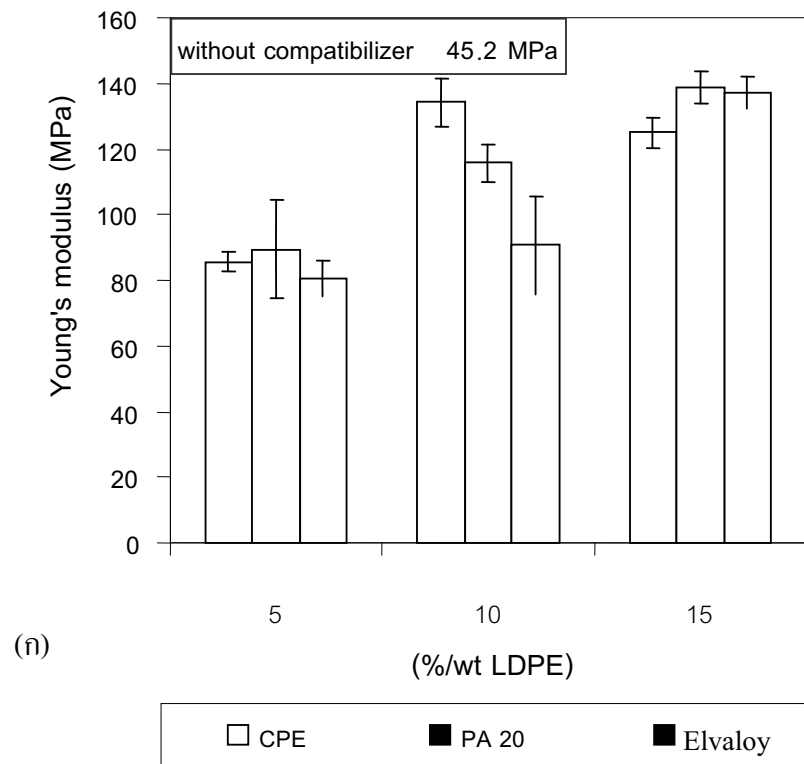


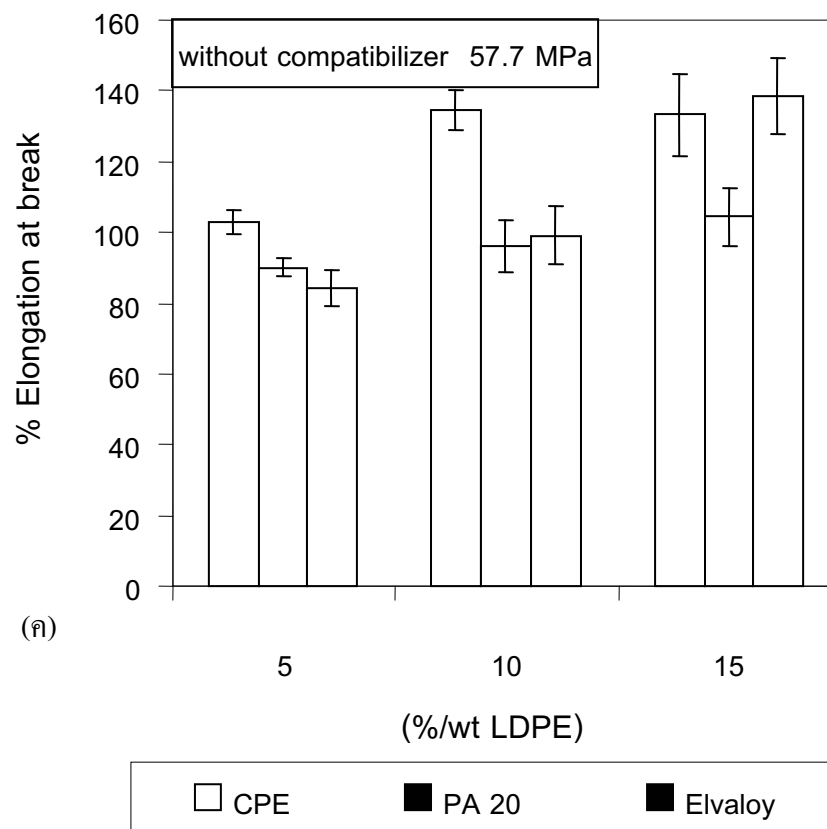
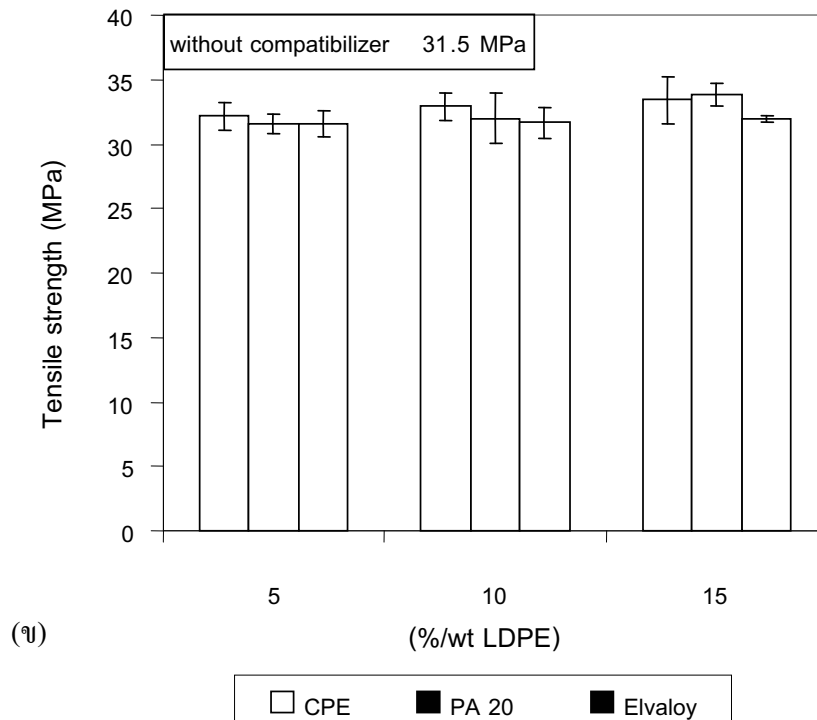
รูปที่ 4.9 ความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PVC / LDPE โดยใช้สารช่วยผสมชนิด CPE

จากรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อปรับปรุงการยึดติดระหว่างวัฏภาคของ PVC และ LDPE ด้วยสารช่วยผสมทำให้พอลิเมอร์ผสมสามารถถ่ายเทความเค้น (Stress transfer) ระหว่างรอยต่อของวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสมได้ ทำให้ต้านทานแรงกระแทกได้ดีขึ้นเล็กน้อย โดยปริมาณ CPE ที่เหมาะสมในอัตราส่วน PVC100 : LDPE10 คือ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE แต่ในอัตราส่วนอื่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากแรงกระแทกเป็นการทดสอบโดยให้แรงกระแทกแบบทันทีทันใด ดังนั้นเมื่อชิ้นงานยังมีรอยตำหนิอยู่จึงไม่สามารถส่งผ่านแรงได้อย่างต่อเนื่องความแข็งแรงกระแทกจึงมีค่าลดลง

จากสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมชนิด CPE พบว่ามีสมบัติโดยรวมดีขึ้นในทุกอัตราส่วนของการผสมโดยเฉพาะค่ามอดุลัส มีการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน แต่

ความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงโค้งงอนั้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมและซีลี้อยจากไม้ยางพารา จึงต้องคำนึงถึงความแข็งแรงของชิ้นงาน จากเหตุผลนี้จึงเลือกอัตราส่วนของ PVC100 : LDPE10 เพื่อศึกษาการปรับปรุงสมบัติโดยใช้สารช่วยผสมชนิด CPE PA 20 และ Elvaloy ในปริมาณ 5 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE ก่อนนำพอลิเมอร์ผสมไปทำเป็นวัสดุคอมโพสิตต่อไป

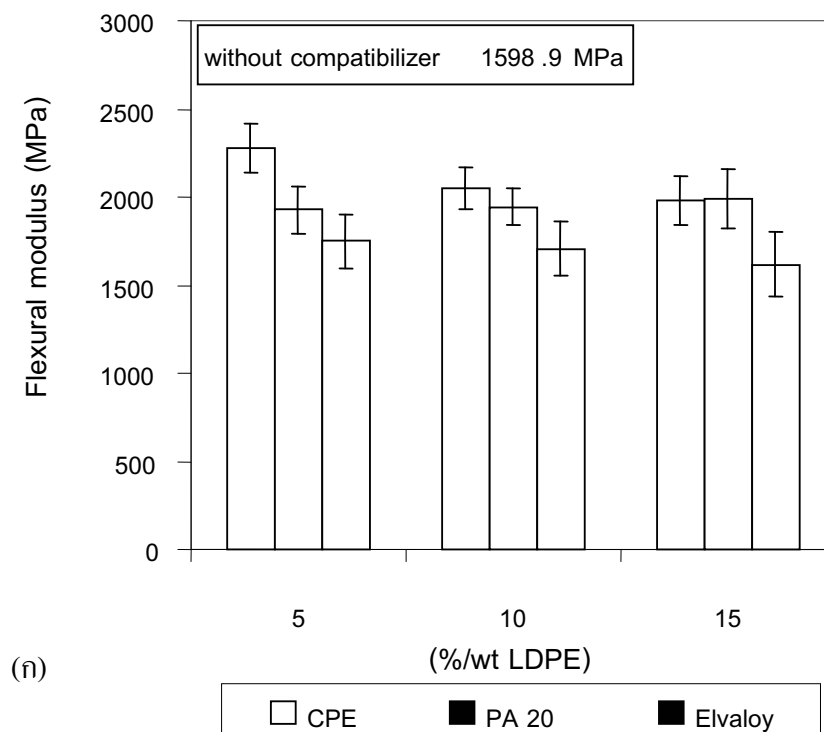


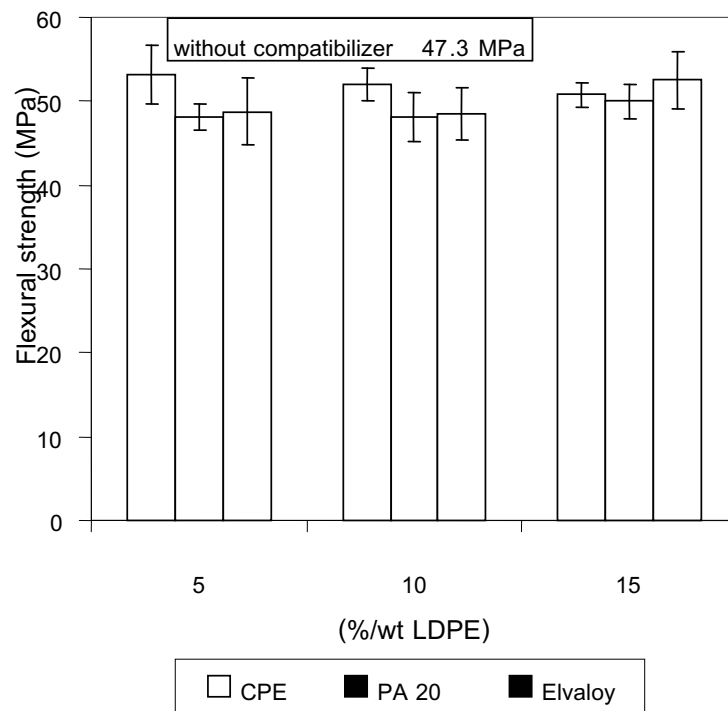


รูปที่ 4.10 สมบัติด้านแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PVC100 : LDPE10 และสารช่วยผสม 3 ชนิด

(ก) มอดุลัส (ข) ความแข็งแรงดึง และ (ค) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด

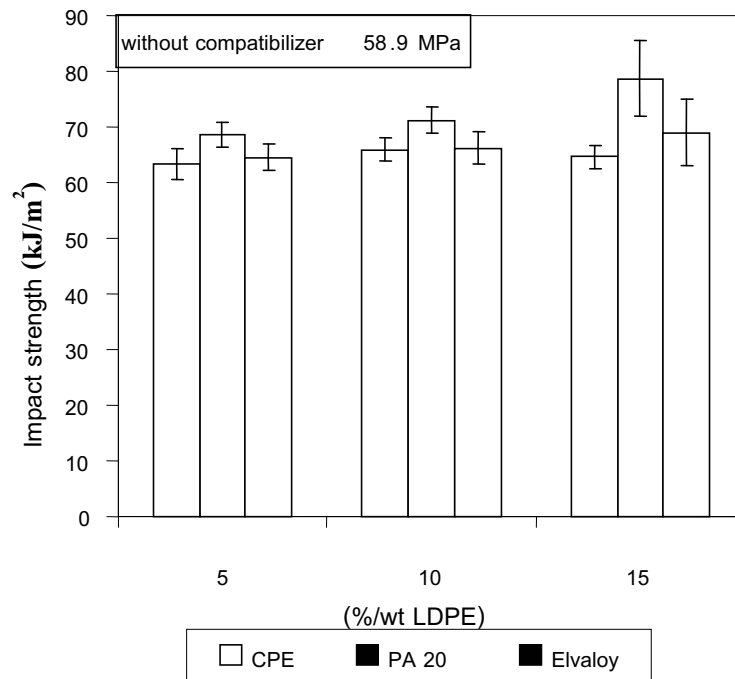
จากรูปที่ 4.10 พบว่ามอดุลัส ความแข็งแรงดึงและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด มีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้ สารช่วยผสมทั้ง 3 ชนิด เนื่องจากการปรับปรุงการยึดติดระหว่างวัฏภาคของสารช่วยผสม จากที่กล่าวถึง ในสารช่วยผสมชนิด CPE ไปแล้วนั้น สำหรับ PA 20 และ Elvaloy ซึ่งในโครงสร้างมีหมู่อะไครเลตซึ่งมี สภาพขั้วจึงเกิดการยึดเหนี่ยวกับ PVC โดยใช้สมบัติความมีขั้วและ CH_2 เกี่ยวพันกับสายโซ่ของ LDPE นอกจากนี้ PA 20 ยังมีหน้าที่ช่วยในกระบวนการผลิตสำหรับ PVC คือ ช่วยในการหลอมได้ดีขึ้น ดังนั้น จึงมีผลในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมได้อีกทางหนึ่งซึ่งเป็นการลดรอยตำหนิบริเวณรอยต่อ ของวัฏภาค เป็นผลให้สมบัติด้านแรงดึงมีค่าสูงขึ้น โดย PA 20 ที่ปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE ให้มอดุลัสและความแข็งแรงดึงที่สูงที่สุด ส่วน Elvaloy ที่ปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE ให้ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดที่สูงที่สุด





รูปที่ 4.11 สมบัติด้านการโค้งงอของพอลิเมอร์ผสม PVC100 : LDPE10 และสารช่วยผสม 3 ชนิด
(ก) มอดุลัสโค้งงอ และ (ข) ความแข็งแรงโค้งงอ

จากรูปที่ 4.11 พบว่ามอดุลัสโค้งงอและความแข็งแรงโค้งงอมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้สารช่วยผสมทั้งสามชนิดในการปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสมเช่นเดียวกับสมบัติด้านแรงดึง โดยสมบัติด้านการโค้งงอมีค่าสูงสุดเมื่อปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์ผสมชนิด CPE ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE



รูปที่ 4.12 ความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PVC100 : LDPE10 และสารช่วยผสม 3 ชนิด

จากรูปที่ 4.12 พบว่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้นเมื่อปรับปรุงความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมโดย PA 20 ที่ปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE ให้ค่าที่สูงที่สุด

จากการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้สารช่วยผสม ชนิด CPE PA 20 และ Elvaloy สามารถแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของสมบัติเชิงกลได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม (PVC100 : LDPE10)
เมื่อปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมในชนิดและปริมาณต่าง ๆ กันโดยเปรียบเทียบกับ
พอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีสารช่วยผสม

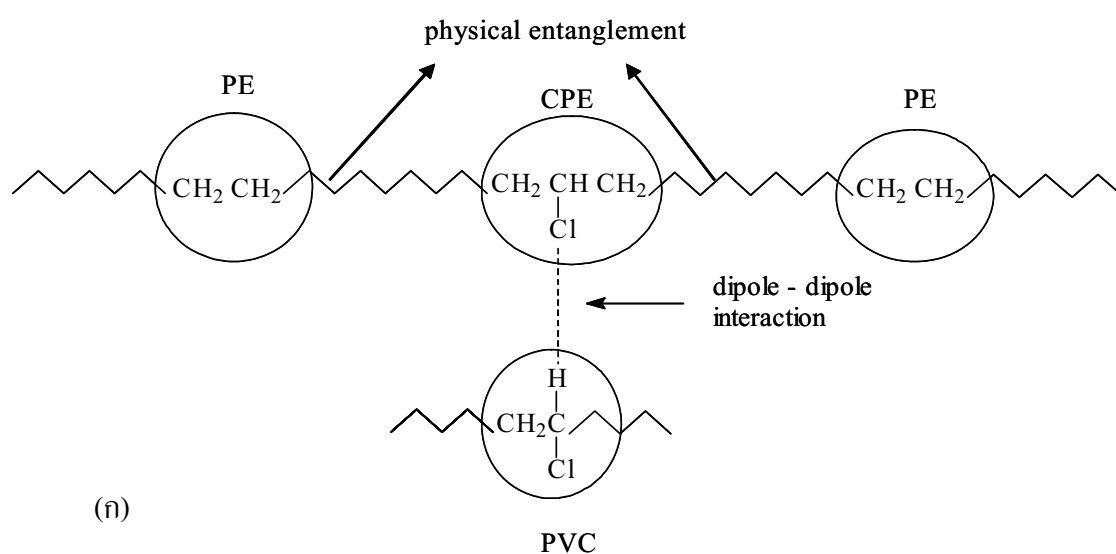
Mechanical Properties	CPE			PA 20			Elvaloy		
	5 %	10 %	15 %	5 %	10 %	15 %	5 %	10 %	15 %
Young's modulus (MPa)	+89.4	+196.7	+176.3	+97.7	+155.9	+207.3	+78.2	+100.8	+203.6
Tensile strength (MPa)	+2.0	+4.4	+6.0	+0.1	+1.4	+7.3	+0.2	+0.4	+1.4
% Elongation at break	+78.0	+133.2	+131.1	+56.1	+66.5	+81.0	+45.8	+71.8	+140.3
Flexural modulus (MPa)	+42.3	+28.3	+24.0	+21.0	+21.5	+24.7	+9.4	+0.8	+1.2
Flexural strength (MPa)	+12.3	+10.1	+7.5	+1.6	+0.9	+5.6	+3.2	+2.7	+11.1
Impact strength (kJ/m ²)	+7.4	+11.9	+9.7	+16.4	+21.0	+33.5	+9.4	+12.5	+17.1

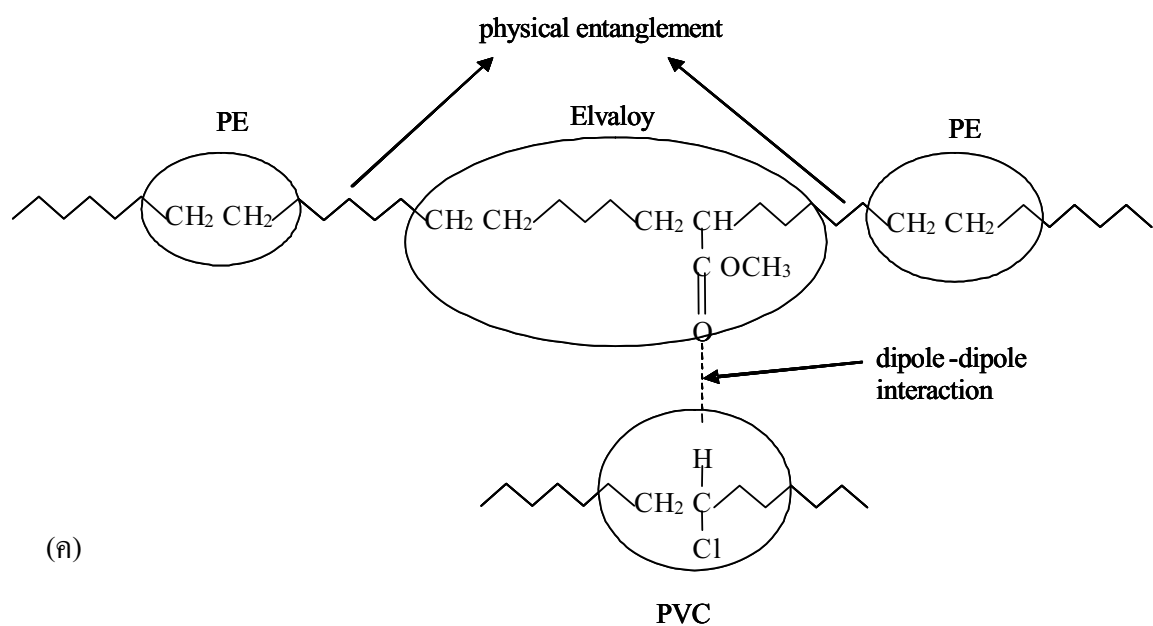
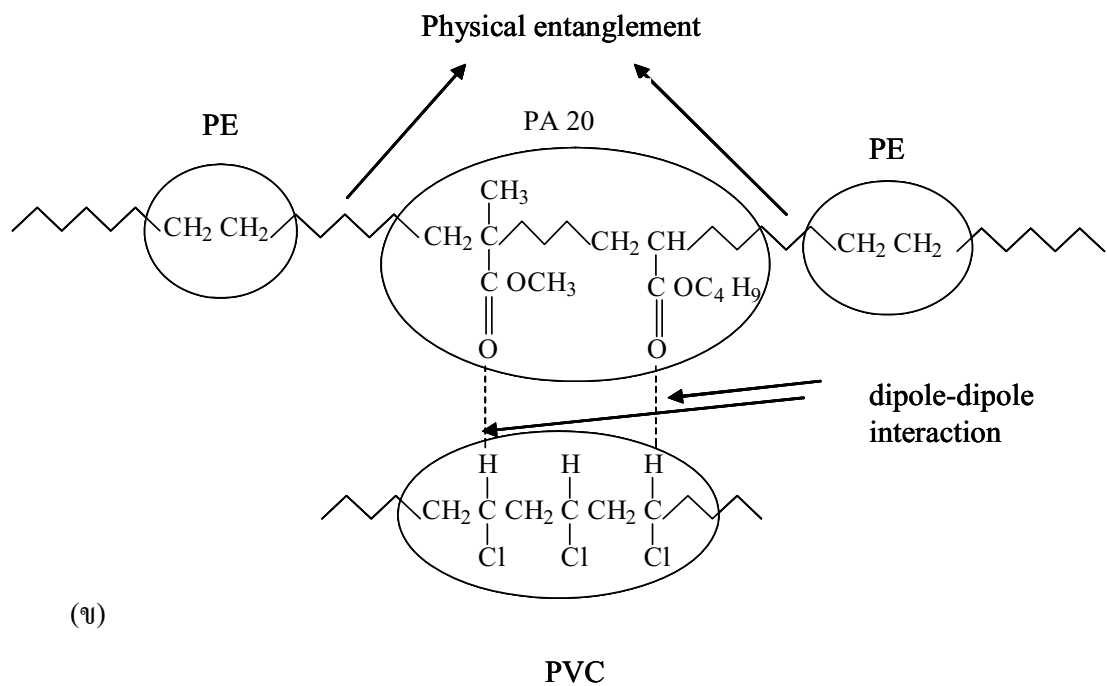
จากตารางที่ 4.2 พบว่าการปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมทั้ง 3 ชนิด คือ CPE PA 20 และ Elvaloy ในพอลิเมอร์ผสมอัตราส่วน PVC100 : LDPE10 ทำให้สมบัติเชิงกลมีค่าสูงขึ้น โดยสังเกตได้ว่าการเพิ่มปริมาณ PA 20 ทำให้สมบัติเชิงกลสูงขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของ PA 20 แต่การเพิ่มปริมาณของ CPE และ Elvaloy ไม่ทำให้สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารช่วยผสมที่เพิ่มขึ้น โดยกรณีที่ใช้ CPE และ Elvaloy ในปริมาณ 10 หรือ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE ให้สมบัติด้านมอดุลัสโค้งงอมีแนวโน้มต่ำกว่าที่ใช้ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้ชนิดและปริมาณของสารช่วยผสมมีความสำคัญต่อสมบัติเชิงกล และจากหลักฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมเมื่อปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมแต่ละชนิดดังแสดงในรูปที่ 4.15 พบว่า ลักษณะของหลักฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ Elvaloy เป็นสารช่วยผสมมีการกระจายตัวของ LDPE ใน PVC ที่ดีที่สุด แต่ไม่ได้ให้สมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารช่วยผสมชนิด PA 20 ทั้งนี้อธิบายได้ว่า

ลักษณะการทำหน้าที่ของ PA 20 นอกจากจะช่วยให้ LDPE มีขนาดเล็กและกระจายตัวใน PVC ได้ดีขึ้นแล้วนั้นยังเป็นการปรับปรุงสมบัติของ PVC คือ PA 20 โดยปกติทำหน้าที่เป็นสารช่วยหลอม (Processing aid) ในกระบวนการผสม PVC โดยในโครงสร้างของ PA 20 ประกอบด้วย เมทิลเมทาไครเลตและบิวทิลอะไครเลต ซึ่งเข้ากับ PVC ได้ดีโดยใช้สมบัติความมีขี้ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงเป็นการปรับปรุง PVC ซึ่งเป็นวัสดุภาคที่ต่อเนื่องในพอลิเมอร์ผสม ดังนั้นจึงทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมสูงกว่าการใช้สารช่วยชนิด CPE และ Elvaloy ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสมเพียงอย่างเดียว

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงสมบัติของคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมและซีลี้อย่างไม่เพียงพอ ดังนั้นในการเลือกปริมาณและสารช่วยผสมจำเป็นต้องคำนึงถึงสมบัติในด้านความแข็งแรง ซึ่งจากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า PA 20 ที่ปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE ให้สมบัติโดยรวมที่สูงกว่าใช้สารช่วยผสมชนิด CPE และ Elvaloy โดยเฉพาะความแข็งแรงกระแทก ซึ่งสอดคล้องกับผลของ T_g ที่แสดงในตารางที่ 4.4 (ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อ 4.17) คือ จากการใช้สารช่วยผสมชนิด PA 20 ในพอลิเมอร์ผสมอัตราส่วน PVC100 : LDPE10 ทำให้ค่า T_g ใกล้เคียงกับ PVC Compound มากกว่าการใช้ CPE และ Elvaloy และพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสม นอกจากนี้มีงานวิจัย [46] ที่พบว่าการใช้สารเติมแต่งที่ประกอบด้วยอะคริลิก (Acrylic-based modifier) ในการปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิตระหว่าง PVC และเส้นใยไม่มีผลทำให้ความแข็งแรงกระแทกสูงขึ้น และในงานวิจัย [47] ที่ใช้ PA 20 ในการปรับปรุงสมบัติในด้านความแข็งแรงดึงของคอมโพสิตระหว่าง PVC และไม้ จากผลดังกล่าวทำให้ทราบได้ว่า PA 20 เหมาะสมในการเป็นสารช่วยผสมและสารที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงกระแทก ดังนั้นในการศึกษาสมบัติของคอมโพสิตจึงได้เลือกใช้ PA 20 ที่ปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE

จากสมบัติที่เพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์ผสมเมื่อปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมทั้ง 3 ชนิด สามารถแสดงความสัมพันธ์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นได้ระหว่างพอลิเมอร์ผสมและสารช่วยผสม ดังนี้





รูปที่ 4.13 กลไกของอันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างพอลิเมอร์ผสม PVC100 : LDPE10 และ สารช่วยผสม 3 ชนิด (ก) CPE (ข) PA 20 และ (ค) Elvaloy

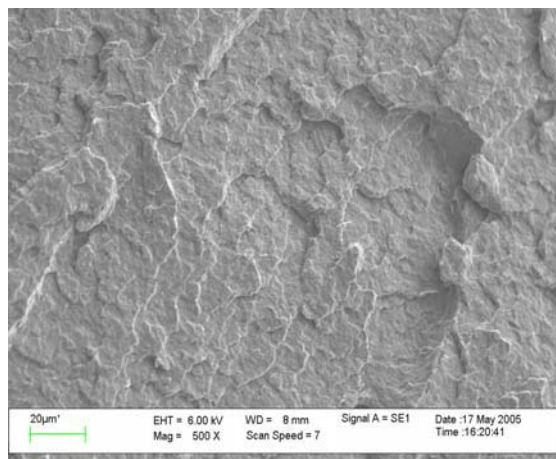
จากรูปที่ 4.13 (ก) เป็นกลไกที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ CPE เป็นสารช่วยผสมซึ่งจะเห็นได้ว่า CPE มีโครงสร้างที่คล้ายกับ PVC และ LDPE จึงทำให้เกิดการยึดกันโดยความมีขั้ว (Dipole-dipole interaction) และ CH_2 ในโครงสร้างของ CPE เกี่ยวพันกับสายโซ่ (Chain entanglement) ของ LDPE สำหรับรูปที่ 4.13 (ข) เป็นกลไกที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในสารช่วยผสมชนิด PA

20 โดยจากโครงสร้างของ PA 20 ประกอบด้วยพอลิเมทิลเมทาไครเลตและบิวทิลอะไครเลต ซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยาได้โดยใช้สมบัติความมีขั้วของหมู่เอไครเลต ส่วน LDPE เกี่ยวพันกับ CH_2 ที่มีอยู่ในโครงสร้าง และจากรูปที่ 4.13 (ค) เป็นกลไกที่คาดว่าเกิดขึ้นในสารช่วยผสมชนิด Elvaloy จากโครงสร้างที่เป็นพอลิเมอร์ร่วมระหว่างเอทิลีนและเมทิลอะไครเลต ดังนั้นส่วนที่มีขั้ว คือ เมทิลอะไครเลตจะเกิดอันตรกิริยากับ PVC และเอทิลีนจะเกี่ยวพันกับสายโซ่ของ LDPE จากอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นการปรับปรุงการยึดติดระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสม คือ สามารถส่งผ่านแรงได้อย่างต่อเนื่องเมื่อได้รับแรงจึงทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมสูงขึ้น

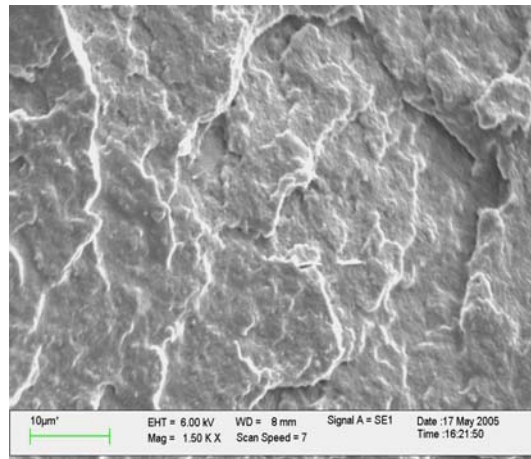
4.1.5 การศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE

4.1.5.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาของ PVC และพอลิเมอร์ผสม

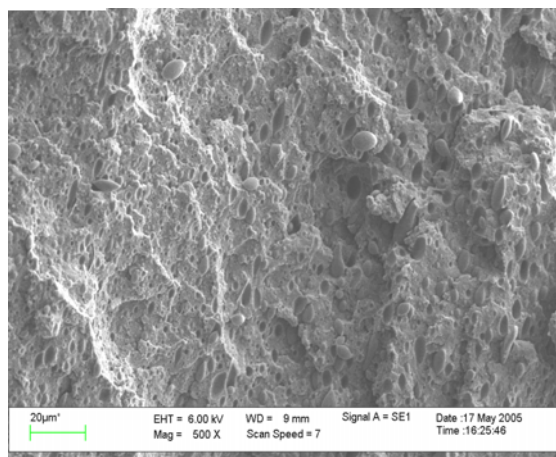
การศึกษาสัณฐานวิทยาประกอบด้วย PVC 100 เปอร์เซ็นต์ และพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนของ PVC100 : LDPE 10 ดังแสดงในรูปที่ 4.14



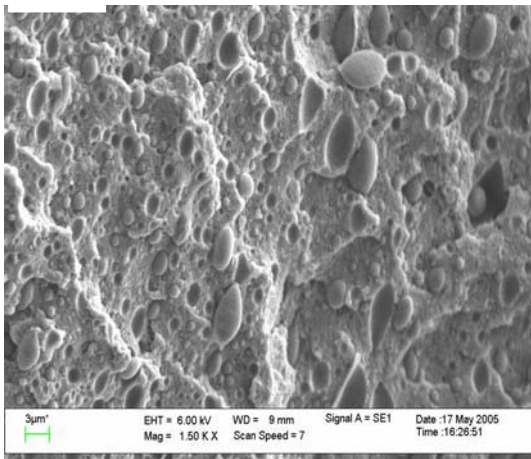
(ก)



(ข)



(ค)



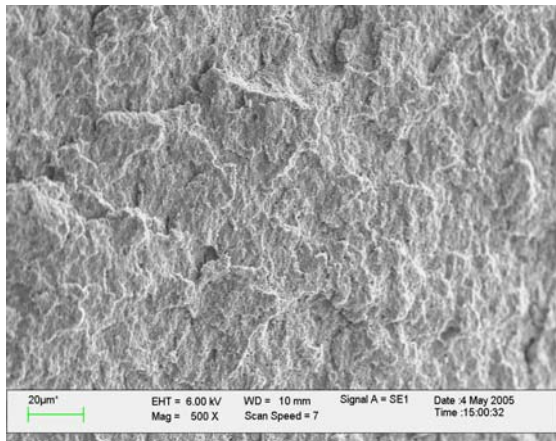
(ง)

รูปที่ 4.14 พื้นผิวแตกหักของ (ก) PVC (500X) (ข) PVC (1500X) (ค) PVC100 : LDPE10 (500X) และ (ง) PVC100 : LDPE10 (1500X)

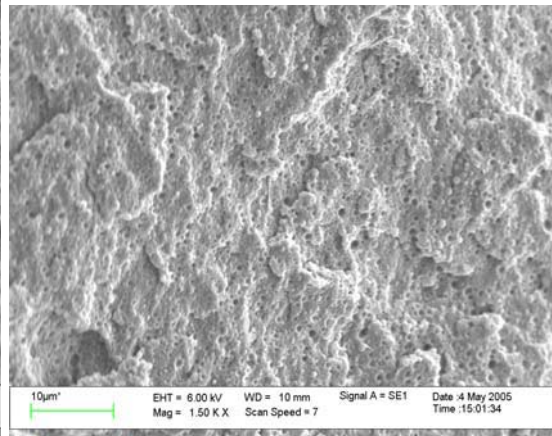
จากรูปที่ 4.14 (ก) และ (ค) พบว่าสัณฐานวิทยาของ PVC เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE มีลักษณะต่างกัน คือ ในส่วนของ PVC พื้นผิวมีลักษณะเรียบ แต่ในพอลิเมอร์ผสมมีส่วนที่เป็นเม็ดกระจายตัวอยู่อย่างไม่สม่ำเสมอ จากลักษณะที่แตกต่างกันนี้แสดงว่าส่วนที่กระจายตัวอยู่ คือ อนุภาคของ LDPE และในรูปที่ 4.14 (ง) พบว่าอนุภาคของ LDPE ที่กระจายตัวอยู่มีลักษณะเป็นเม็ดและมีขนาดไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้พื้นผิวของ PVC ซึ่งเป็นเมทริกซ์ไม่เกิดการยึดเกาะกับ LDPE ซึ่งเป็นส่วนที่กระจายตัวอยู่ โดยสังเกตได้จากบริเวณหลุมซึ่งเป็นบริเวณที่อนุภาคของ LDPE หลุดออกไปนั้นพื้นผิวมีลักษณะเรียบ ซึ่งสอดคล้องกับผลของสมบัติเชิงกลที่มีค่าต่ำลงเมื่อผสม LDPE ลงไปใน PVC เมทริกซ์

4.1.5.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสม

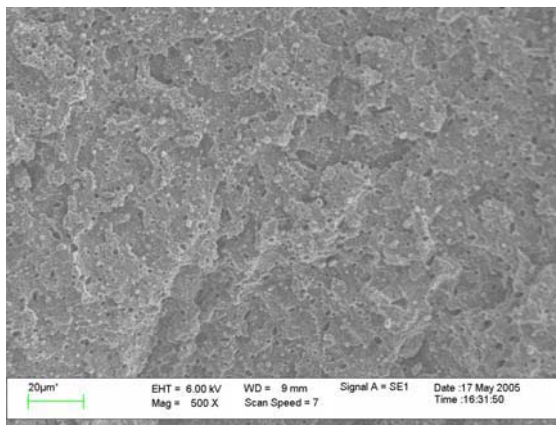
อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่นำมาศึกษา คือ PVC100 : LDPE 10 และสารช่วยผสม 3 ชนิด คือ CPE Elvaloy และ PA 20 โดยใช้ปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE จากรูปที่ 4.15 (ก) (ค) และ (จ) พบว่าสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมทั้ง 3 ชนิด มีการกระจายตัวของ LDPE ใน PVC ซึ่งเป็นเมทริกซ์ได้ดีขึ้น คือ มีอนุภาคของ LDPE แทรกอยู่ใน PVC ซึ่งเป็นเมทริกซ์อย่างสม่ำเสมอและในรูปที่ 4.15 (ข) (ง) และ (ฉ) พบว่าอนุภาคของ LDPE มีขนาดเล็กลงเมื่อเปรียบเทียบกับสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากสารช่วยผสมทำหน้าที่เสมือนเป็นสะพานเชื่อมระหว่าง PVC และ LDPE จึงเป็นการป้องกันการรวมตัวของ PVC หรือ LDPE ในระหว่างกระบวนการผสมจึงมีผลทำให้ขนาด LDPE ลดลงการกระจายตัวดีขึ้นจึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารช่วยผสมมีแนวโน้มสูงขึ้น



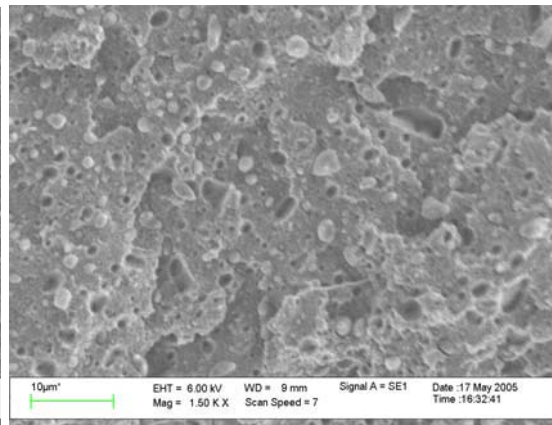
(ก)



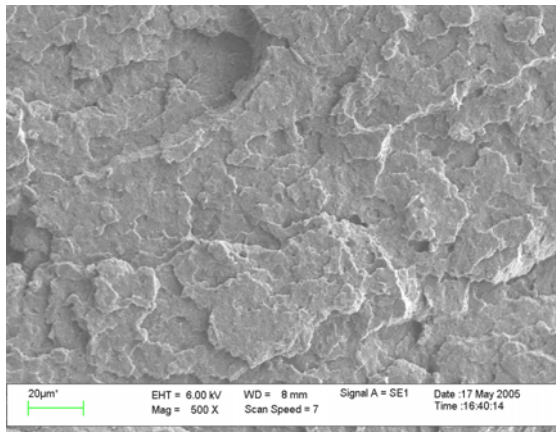
(ข)



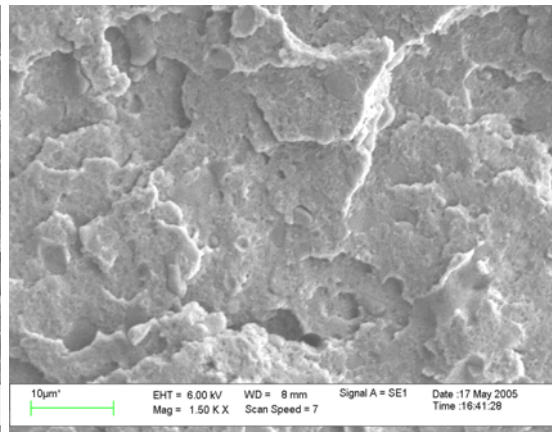
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 4.15 พื้นผิวแตกหักของ PVC100 : LDPE10 โดยใช้สารช่วยผสม 3 ชนิด (ก) CPE 15% (500X) (ข) CPE 15% (1500X) (ค) PA 20 15% (500X) (ง) PA 20 15% (1500X) (จ) Elvaloy 15% (500X) และ (ฉ) Elvaloy 15% (1500X)

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัวของ PVC 100 เปอร์เซ็นต์ และ PVC ในพอลิเมอร์ผสม

รายการ	อุณหภูมิการสลายตัว (°C)
PVC 100 %	287.9
PVC 100 : LDPE 10	291.3
PVC 100 : LDPE 10 : CPE 15 %	284.0
PVC 100 : LDPE 10 : PA 20 15 %	289.9
PVC 100 : LDPE 10 : Elvaloy 15 %	281.1

Diagram illustrating the thermal degradation of PVC:

The initial PVC chain segment is shown as: $\text{---CH}_2\text{---CHCl---CH}_2\text{---CHCl---CH}_2\text{---CHCl---CH}_2\text{---CHCl---}$.

Thermal degradation leads to two pathways:

- Left Pathway:** A hydrogen atom (H) is transferred from a chlorine atom to a methylene group, forming a radical on the methylene carbon. This leads to a chain with more branching and crosslinking, resulting in **PE with more branching and crosslinking**.
- Right Pathway:** The elimination of HCl leads to a chain with more methylene groups, resulting in **PVC with more methylene in the chain**.

รูปที่ 4.16 กลไกการเกิดการถ่ายโอนอนุมูลอิสระระหว่างกระบวนการผสม [48]

จากรูปที่ 4.16 แสดงถึงกลไกการเกิดการถ่ายโอนอนุมูลอิสระระหว่างกระบวนการผสมโดยเริ่มจากอนุมูลอิสระที่เกิดจากการเสถียรภาพของ PVC ด้วยกระบวนการดีไฮโดรจีเนชัน (Dehydrogenation process) เกิดเป็นอนุมูลอิสระขนาดใหญ่ (Macro-radical) ของ PVC ซึ่งเหนี่ยวนำให้เกิดอนุมูลอิสระของไฮโดรเจนที่เกิดจากการหลุดออกจากสายโซ่ของ LDPE และอนุมูลอิสระของไฮโดรเจนนี้อาจจะเข้าทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระขนาดใหญ่ของ PVC ได้ซึ่งจะทำให้ในสายโซ่ของ PVC มีหมู่ CH_2 เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการเสถียรภาพของ PVC เพิ่มขึ้น ส่วนอนุมูลอิสระในโครงสร้างของ LDPE อาจเกิดปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระในโครงสร้างของ LDPE ทำให้โครงสร้างของ LDPE มีกิ่งก้าน (Branching) หรือเกิดการเชื่อมโยง (Crosslinking) ในโครงสร้างมากขึ้น ซึ่งจากปฏิกิริยานี้จึงทำให้โอกาสที่จะเกิดกระบวนการดีไฮโดรจีเนชันเกิดได้น้อยลงเป็นผลให้ PVC มีเสถียรภาพมากขึ้น [48] ทำให้ T_g สูงขึ้น แต่เมื่อมีสารช่วยผสมอยู่ในพอลิเมอร์ผสมทำให้อุณหภูมิการสลายตัวมีค่าต่ำลงซึ่งอธิบายได้ว่าเมื่อผสมสารช่วยผสมทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้มากขึ้น คือ ส่วนที่มีขั้วใน CPE PA 20 และ Elvaloy ยึดเหนี่ยวกับ PVC และส่วนที่มีโครงสร้างเหมือน LDPE จะเกิดการเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุล ซึ่งลักษณะนี้มีผลทำให้ปฏิกิริยาการถ่ายโอนอนุมูลอิสระที่เกิดใน PVC และ LDPE เกิดได้น้อยลง ดังนั้นการเสถียรภาพของ PVC จึงมีโอกาสเกิดได้ง่ายกว่ากรณีที่ไม่ใช้สารช่วยผสม

4.1.7 การศึกษาอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของ PVC

ตารางที่ 4.4 ค่า T_g ของ PVC

สูตรพอลิเมอร์	T_g ($^{\circ}\text{C}$)
PVC 100 %	91
PVC100 : LDPE10	89
PVC100 : LDPE10 : CPE 15 %	88
PVC100 : LDPE10 : PA 20 15 %	90
PVC100 : LDPE10 : Elvaloy 15 %	89

จากตารางที่ 4.4 พบว่าค่า T_g ของ PVC ในพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีสารช่วยผสมมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ PVC 100 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการเติม LDPE ซึ่งมีโครงสร้างที่อ่อนนุ่ม(Flexible) เมื่อได้รับความร้อนสายโซ่จึงสามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย นอกจากนี้เมื่อผสมสารช่วยผสมพบว่า T_g ของ PVC ในพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารช่วยผสมชนิด PA 20 มีแนวโน้มใกล้เคียงกับ T_g ของ PVC 100% แสดงว่าการทำหน้าที่ของสารช่วยผสมชนิด PA 20 ซึ่งมีลักษณะเสมือนเป็นสะพานเชื่อมระหว่าง PVC และ LDPE มีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้สารช่วยผสมชนิด CPE และ Elvaloy T_g ที่ได้จากการใช้ PA 20 สอดคล้องกับสมบัติเชิงกลที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.2

4.1.8 การศึกษาอุณหภูมิการหลอมเหลวและอุณหภูมิการตกผลึกของ LDPE ในพอลิเมอร์ผสม

เพื่อศึกษาผลกระทบของการผสมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE โดยใช้วิธีการผสม 2 แบบ คือ ใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวเพียงขั้นตอนเดียว และ ใช้เครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง หลังจากผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว โดยมีผลการทดลอง ดังนี้

4.1.8.1 อุณหภูมิการหลอมเหลวของ LDPE

การศึกษาอุณหภูมิการหลอมเหลว (Melt temperature, T_m) ทำได้โดยการใช้เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) ในการทดสอบได้ศึกษาช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 25-150 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) ของ LDPE

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)
LDPE 100 %	112.2
PVC100 : LDPE10 (Single screw)	111.4
PVC100 : LDPE10 (Single screw + Two roll mill)	111.1
PVC100 : LDPE10 : CPE 15 %	111.6
PVC100 : LDPE10 : PA 20 15 %	110.9
PVC100 : LDPE10 : Elvaloy 15 %	111.9

จากตารางที่ 4.5 พบว่าอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึกของ LDPE ในพอลิเมอร์ผสมอัตราส่วน PVC100 : LDPE10 ที่มีการผสมด้วยขั้นตอนที่ต่างกันและการใช้และไม่ใช้สารช่วยผสมมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าวิธีการผสมไม่ทำให้พฤติกรรมการหลอมเหลวผลึกของ LDPE เปลี่ยนไป

4.1.8.2 อุณหภูมิการตกผลึกของ LDPE

การศึกษาอุณหภูมิการตกผลึก เอนทัลปีและเอนทัลปีความเป็นผลึกใช้เทคนิคเดียวกับการศึกษาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึกซึ่งได้ผลการทดลองตารางที่ 4.6 พบว่าอุณหภูมิการเกิดผลึก เอนทัลปีและเอนทัลปีความเป็นผลึกมีปริมาณใกล้เคียงกันแม้ว่าจะมีวิธีการผสมที่ต่างกันหรือใช้สารช่วยผสมต่างกัน แสดงว่าปัจจัยเหล่านี้ไม่ทำให้สมบัติเกี่ยวกับความเป็นผลึกของ LDPE เปลี่ยนไป

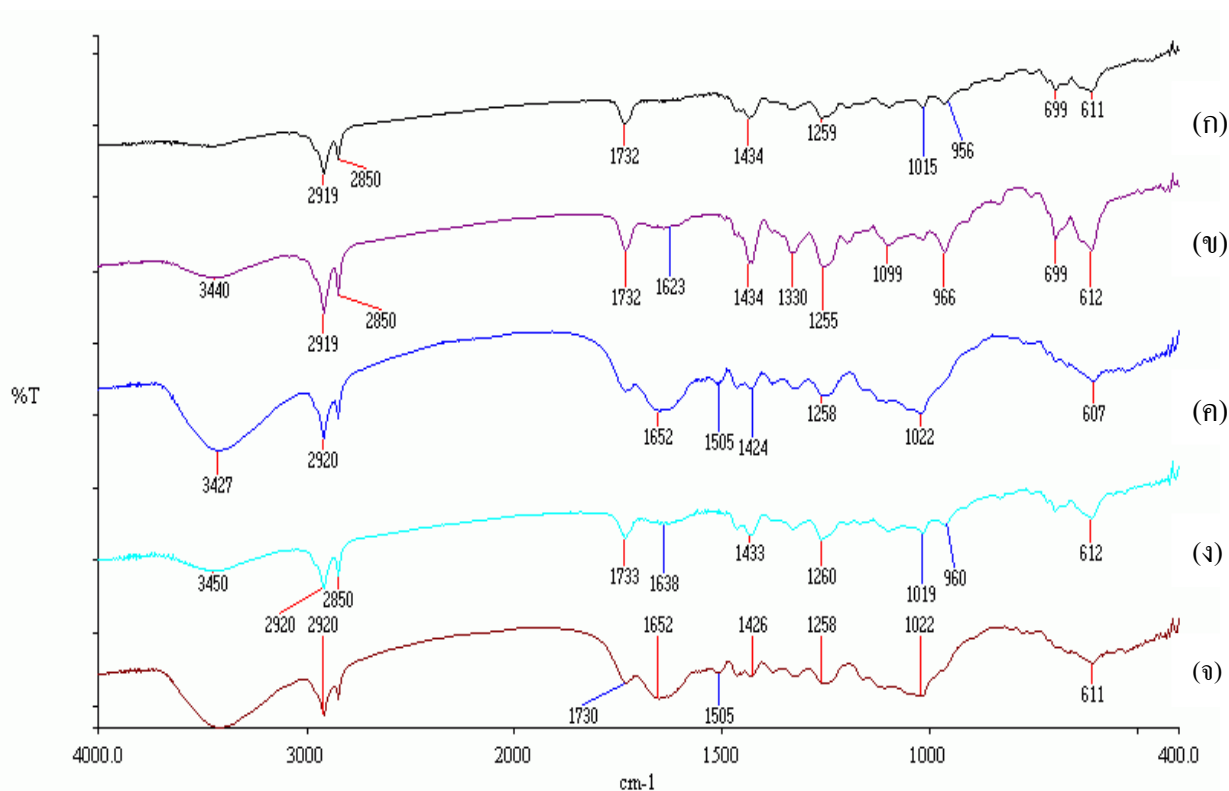
ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิการเกิดผลึก เอนทัลปีและเอนทาลปีความเป็นผลึกของ LDPE

ตัวอย่าง	T_c ($^{\circ}\text{C}$)	ΔH_f (J/g)	ΔH_n (J/g)	% Crystallinity
LDPE 100 %	97.6	93.01	93.01	31.68
PVC 100 : LDPE10 (Single screw)	97.9	3.49	38.39	13.08
PVC 100 : LDPE10 (Single screw + Two roll mill)	98.1	3.22	35.42	12.06
PVC 100 : LDPE10 : CPE 15 %	97.7	3.89	43.37	14.77
PVC 100 : LDPE10 : PA 20 15 %	98.1	3.37	37.57	12.79
PVC 100 : LDPE10 : Elvaloy15 %	97.3	3.79	42.25	14.39

4.2 ผลการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมและซีลี้อยจากไม้ยางพารา

4.2.1 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของคอมโพสิตของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสม

จากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของคอมโพสิตของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมชนิด PA 20 และไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมโดยใช้ PVC 100 phr LDPE 10 phr PA 20 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE และซีลี้อย 10 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม ได้ผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (ก) PVC100 : LDPE10 : PA 20 15% (ข) PVC100 : LDPE10 : SD10% (ค) PVC100 : LDPE10 : SD 50% (ง) PVC100 : LDPE10 : SD10% : PA 20 15% และ (จ) PVC100 : LDPE10 : SD50% : PA 20 15%

จากรูปที่ 4.17 แสดงสเปกตรัมของร้อยละการส่งผ่านแสงของคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมชนิด PA 20 และซีลี้อยู่โดยใช้ปริมาณ 10 และ 50 เปอร์เซ็นต์ จากสเปกตรัมในรูปที่ 4.17 (ข)-(จ) เมื่อผสมซีลี้อยู่ในพอลิเมอร์ผสมพบฟีกที่ต่างไปจากสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมที่ตำแหน่งต่างๆ ดังนี้ ลักษณะฟีกกว้างในช่วง $1650-1720\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นลักษณะการสั่นแบบ C=O Stretching ของคาร์บอนิลซึ่งมีอยู่ในโครงสร้างของเส้นใยไมไ่โดยที่คอมโพสิตที่มีซีลี้อยู่ 50 เปอร์เซ็นต์ มีฟีกที่ตำแหน่งนี้เด่นชัดกว่าคอมโพสิตที่ใช้ซีลี้อยู่ 10 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังมีฟีกการยืดตัวของวงแหวนอะโรมาติกซึ่งมีอยู่ในโครงสร้างของลิกนินที่มีอยู่ในเส้นใยไมไ่เป็นฟีกใหญ่ในช่วง $1650-1450\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเห็นชัดเจนในคอมโพสิตที่ใช้ปริมาณซีลี้อยู่ 50 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการสั่นแบบ O-H Stretching พบในช่วง $3450 - 3500\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งมีอยู่ในโครงสร้างของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่มีอยู่ในเนื้อไม้ นอกจากนี้พบว่า ในรูปที่ 4.17 (ค)และ (จ) มีฟีกปรากฏที่ตำแหน่ง 1505 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบ C=C Stretching ที่อยู่ในวงแหวนอะโรมาติกซึ่งเป็นโครงสร้างของลิกนิน [46, 47] สำหรับคอมโพสิตจากพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารช่วยผสมพบว่า ตำแหน่งของฟีกมีลักษณะคล้ายกับคอมโพสิตที่ไม่ได้ใช้สารช่วยผสมชนิด PA 20

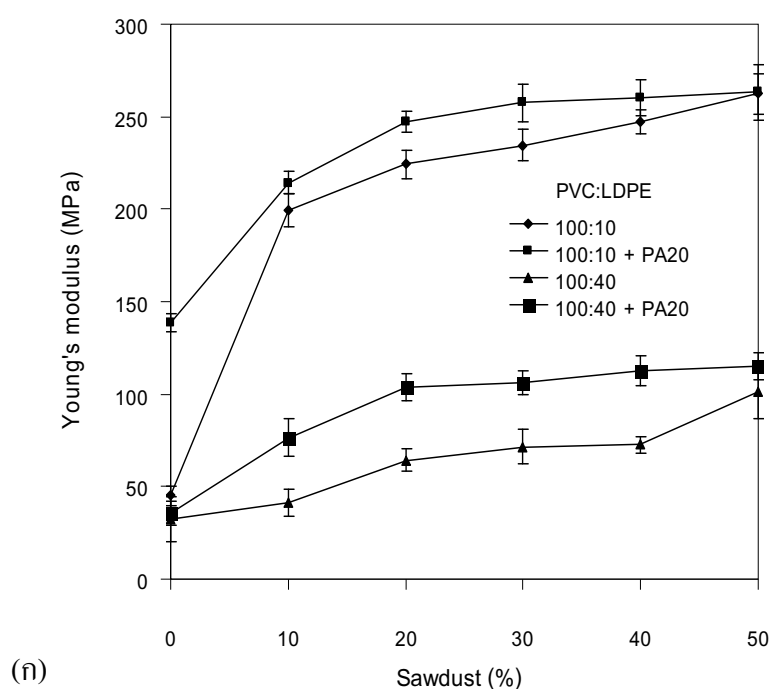
ตำแหน่งของสเปกตรัมที่สำคัญของคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมและซีลี้อยู่จากไม้ยางพาราสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.7

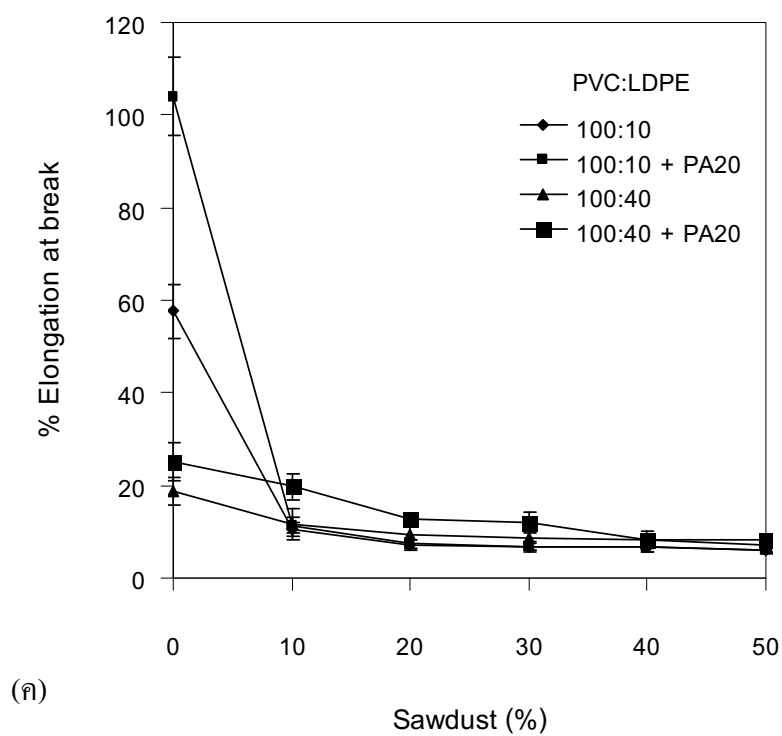
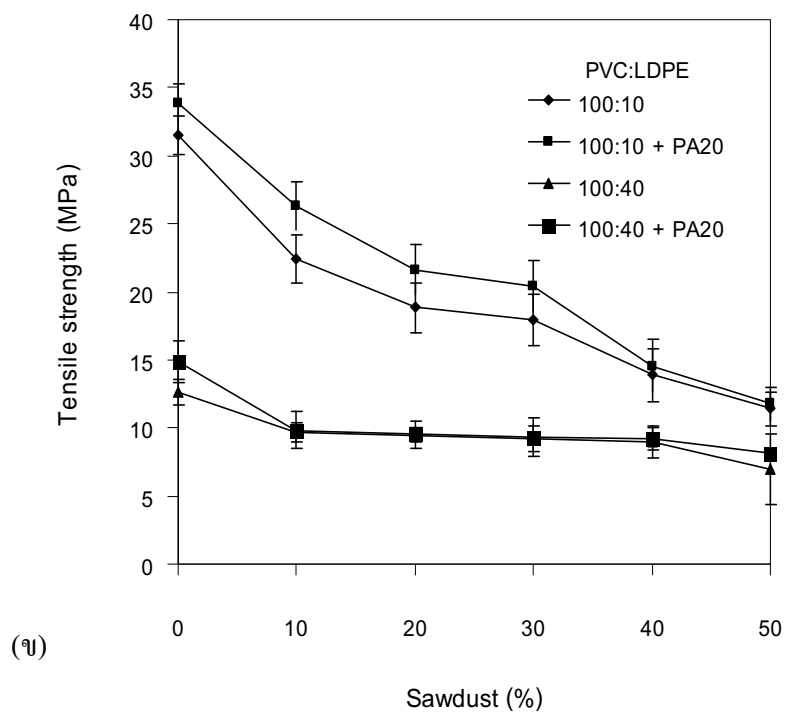
ตารางที่ 4.7 ตำแหน่งสเปกตรัมของคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมและซีลี้อยจากไม้ยางพารา

ตำแหน่งพีก (cm^{-1})	ลักษณะการสั่น	เอกสารอ้างอิง
3450 – 3500	O-H Stretching	46-47
1450-1650	วงแหวนอะโรมาติก	46-47
1650-1720	C=O Stretching	46-47
1500-1600	C=C Stretching in aromatic	46-47
1430 – 1470	C-H bending ของ CH_2	46-47
1300 – 1400	C-H Deformation ของ CH_2	46-47
600 – 800	C-Cl Stretching	46-47

4.2.2 สมบัติของคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมและซีลี้อยจากไม้ยางพารา

การศึกษาผลของปริมาณซีลี้อยที่มีต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมและซีลี้อยจากไม้ยางพาราโดยอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่นำมาทำเป็นคอมโพสิต คือ PVC100 : LDPE10 และ PVC100 : LDPE40 ซึ่งศึกษา 2 แบบ คือ ใช้และไม่ใช้สารช่วยผสม ชนิดและปริมาณสารช่วยผสม คือ PA 20 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE สำหรับซีลี้อยได้ศึกษาปริมาณซีลี้อยที่แตกต่างกัน ได้แก่ 0 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมและใช้ขนาดของซีลี้อย 50 – 80 เมช ซึ่งสัมพันธ์กับความยาวของซีลี้อยในช่วง 180 – 300 ไมครอน ได้ผลการทดลองดังนี้



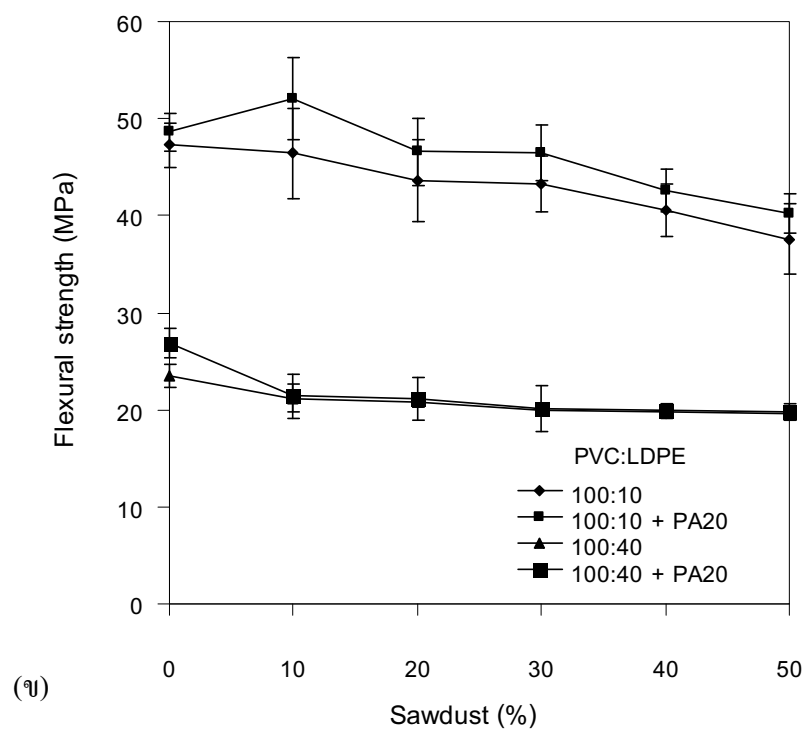
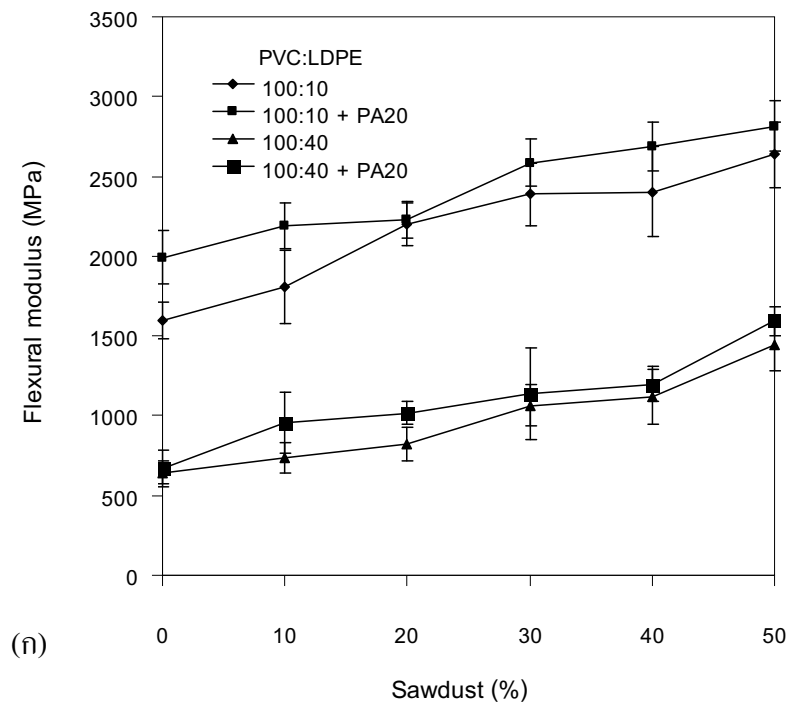


รูปที่ 4.18 ผลของปริมาณขี้เลื่อยต่อสมบัติด้านความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต

(ก) มอดุลัสความแข็งแรงดึง (ข) ความแข็งแรงดึง และ (ค) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด

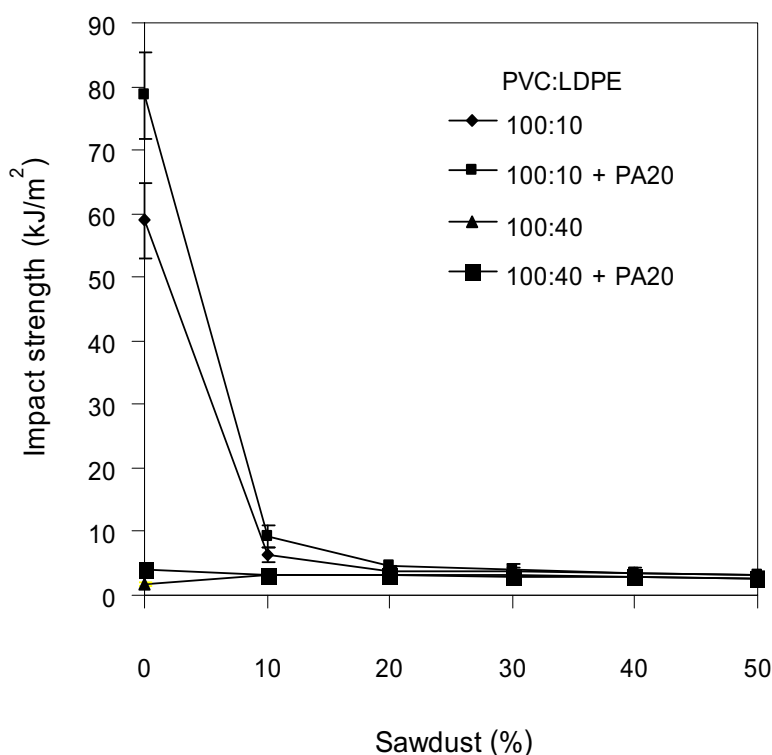
ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัส ความแข็งแรงดึงและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดกับปริมาณซีลี้อย แสดงดังรูปที่ 4.18 พบว่ามอดุลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซีลี้อยเพิ่มขึ้น เนื่องจากซีลี้อยมีมอดุลัสที่สูงกว่าพอลิเมอร์ผสม ดังนั้นมอดุลัสโดยรวมของคอมโพสิตจึงมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยคอมโพสิตที่ทำจากพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ LDPE 10 ให้ค่าที่สูงกว่าคอมโพสิตที่ทำจากพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ LDPE 40 เนื่องจาก LDPE มีลักษณะที่อ่อนนุ่มดังนั้นเมื่อใช้ซีลี้อยในปริมาณที่เท่ากันคอมโพสิตที่มีปริมาณ LDPE ต่ำกว่าจึงมีมอดุลัสที่สูงกว่า นอกจากนี้พบว่าคอมโพสิตที่มีสารช่วยผสมให้มอดุลัสที่สูงกว่าคอมโพสิตที่ไม่มีสารช่วยผสม แต่เมื่อปริมาณไม่มากขึ้น คือ 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามอดุลัสของคอมโพสิตที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

สำหรับความแข็งแรงดึงและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ของคอมโพสิตจากพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ LDPE 10 และ 40 มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ต่ำทำให้ชิ้นงานมีรอยตำหนิ (Defects) ดังนั้นเมื่อให้แรงดึงแก่ชิ้นงานบริเวณที่เส้นใยติดต่อกับวัฏภาคเมทริกซ์นั้นเป็นบริเวณที่มีความเค้นสูงทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์ผสมเลื่อนหลุดออกจากกันได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ปริมาณซีลี้อยที่เพิ่มมากขึ้นนั้นซีลี้อยอาจจะจับตัวไม่ดี บางส่วนมีการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนซึ่งบริเวณที่มีซีลี้อยรวมกันเป็นก้อน ดังแสดงได้จากสัณฐานวิทยาในรูปที่ 4.21 นั้นจะเป็นบริเวณที่ไม่มีการยึดเกาะกับเมทริกซ์ ทำให้เกิดเป็นตำหนิในชิ้นงาน แต่เนื่องจากวิธีการผสมคอมโพสิตเป็นแบบสุ่มคือ ผสม PVC LDPE และ PA 20 พร้อมกัน ดังนั้นจึงมีโอกาที่จะเกิดการยึดเหนี่ยวกันโดยใช้สมบัติความมีขั้วของ PVC และ PA 20 กับซีลี้อยได้ ซึ่งเป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับรอยต่อของวัฏภาคในพอลิเมอร์ผสมหรือพอลิเมอร์กับซีลี้อย เป็นผลให้รอยตำหนิในชิ้นงานลดลง ทำให้ส่งผ่านแรงได้ดีเมื่อได้รับแรงดึง จึงทำให้ความแข็งแรงดึงและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ของคอมโพสิตที่ใช้พอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมมีค่าสูงกว่าคอมโพสิตที่ใช้พอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสม แต่เมื่อปริมาณซีลี้อยมากขึ้น สมบัติด้านความแข็งแรงดึงของคอมโพสิตที่มีและไม่มีสารช่วยผสมมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณซีลี้อยที่เพิ่มขึ้นทำให้โอกาสที่ซีลี้อยจะเกิดอันตรกิริยากับสารช่วยผสมมีมากขึ้น เป็นผลให้สารช่วยผสมไม่สามารถทำหน้าที่ปรับปรุงพอลิเมอร์ผสมได้ จึงทำให้ความแข็งแรงดึงไม่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.19 ผลของปริมาณขี้เลื่อยต่อสมบัติด้านการโค้งงอของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต
(ก) โมดูลัสโค้งงอ และ (ข) ความแข็งแรงโค้งงอ

จากรูปที่ 4.19 พบว่าค่ามอดุลัสโค้งงอมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งในคอมโพลีสิตจากพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสม เนื่องจากซีลี้อยมีมอดุลัสสูงจึงทำให้มอดุลัสโค้งงอของคอมโพลีสิตมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณซีลี้อยเพิ่มขึ้น สำหรับค่าความแข็งแรงโค้งงอมีค่าลดลงเนื่องจากแรงกดอัดแบบโค้งงอทำให้เกิดความเค้นขึ้นบริเวณภายในของคอมโพลีสิต โดยค่าความแข็งแรงโค้งงอเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่ให้แก่วัสดุก่อนเกิดการเสียรูปของชิ้นงานอย่างถาวร เมื่อได้รับแรงกดจะเกิดการกระจายแรงจากเมทริกซ์สู่เส้นใยโดยถ่ายเทความเค้นที่ได้รับไปตามความยาวของเส้นใย แต่เนื่องจากความไม่เข้ากันของเมทริกซ์และซีลี้อย นอกจากนี้เมื่อซีลี้อยมีปริมาณมากขึ้นอาจรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน ทำให้ไม่สามารถกระจายแรงได้ความแข็งแรงโค้งงอ จึงมีค่าลดลงตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของซีลี้อย โดยที่คอมโพลีสิตของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ LDPE 10 ให้มอดุลัสโค้งงอและความแข็งแรงโค้งงอสูงกว่าคอมโพลีสิตของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ LDPE 40 และเมื่อมีสารช่วยผสมในระบบทำให้ความแข็งแรงโค้งงอสูงขึ้นเล็กน้อย ซึ่งอธิบายได้เช่นเดียวกับสมบัติด้านความแข็งแรงดึง



รูปที่ 4.20 ผลของปริมาณซีลี้อยต่อสมบัติด้านความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมคอมโพลีสิต

จากรูปที่ 4.20 พบว่าค่าความแข็งแรงกระแทกลดลงอย่างมากทั้งในคอมโพลีสิตของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสม เนื่องจากการเติมซีลี้อยในพอลิเมอร์ผสมซึ่งมีการยึดเกาะระหว่างวัฏภาคต่ำ เมื่อรับแรงกระแทกจึงไม่สามารถถ่ายเทความเค้นจากเมทริกซ์สู่เส้นใยได้ โดยคอมโพลีสิตของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ LDPE 40 ให้ความแข็งแรงกระแทกที่ต่ำกว่าคอมโพลีสิตของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ LDPE 10 แต่เมื่อปริมาณซีลี้อยเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 20 เปอร์เซ็นต์ ค่าความแข็งแรง

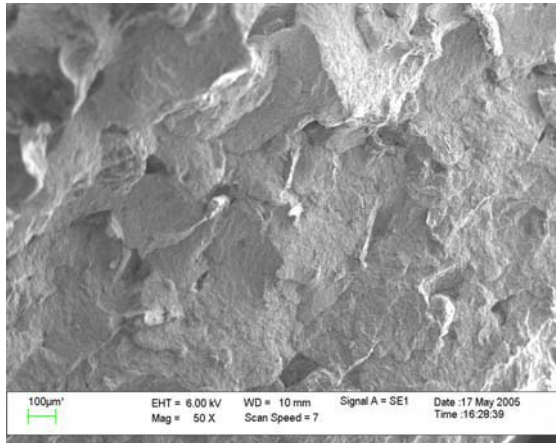
กระแทกที่ได้ไม่แตกต่างกันซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับสารช่วยผสม คือ สังเกตได้ว่าปริมาณซีลี้อยู่ที่ 10 เปอร์เซ็นต์ ค่าความแข็งแรงกระแทกของคอมโพลิตจากพอลิเมอร์ผสมที่มีสารช่วยผสมให้ค่าสูงกว่า แต่เมื่อปริมาณซีลีอยเพิ่มเป็น 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ค่าความแข็งแรงกระแทกของคอมโพลิตทั้ง 2 ตัวอย่าง มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากการให้แรงกระแทกนั้นเป็นการให้แรงอย่างทันทีทันใดตรงบริเวณรอยบาก ดังนั้นเมื่อชิ้นงานมีรอยตำหนิไม่สามารถส่งผ่านแรงได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดการแตกหักอย่างรวดเร็วถึงแม้ว่าจะมีสารช่วยผสม แต่ปริมาณซีลีอยที่เพิ่มขึ้นอาจมีการรวมตัวของซีลีอยเป็นกลุ่มก้อน ทำให้ผลจากการใช้สารช่วยผสมไม่เด่นชัด ดังนั้นจึงเกิดบริเวณที่ไม่ติดต่อกับเมทริกซ์และเกิดเป็นรอยตำหนิในชิ้นงาน ความแข็งแรงกระแทกจึงลดลง

4.2.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาของคอมโพลิต

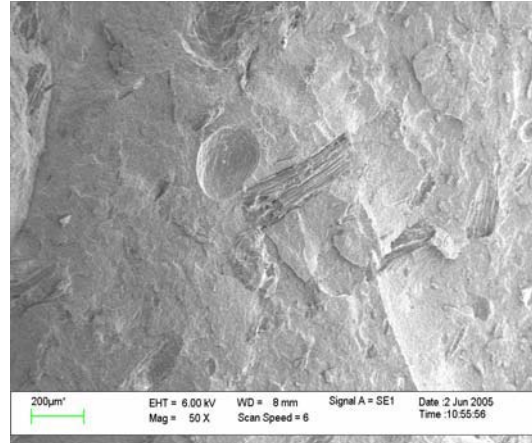
ทำการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของคอมโพลิตเพื่อศึกษาถึงลักษณะการกระจายตัวของ ซีลีอยในพอลิเมอร์ผสมและลักษณะการยึดเกาะกันระหว่างทั้งสองวัสดุ โดยได้พิจารณาในอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม PVC 100 : LDPE 10 ปริมาณสารช่วยผสม 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE และปริมาณซีลีอย 10 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งได้ผลดังนี้

4.2.3.1 ลักษณะการกระจายตัวของซีลีอยในพอลิเมอร์ผสม

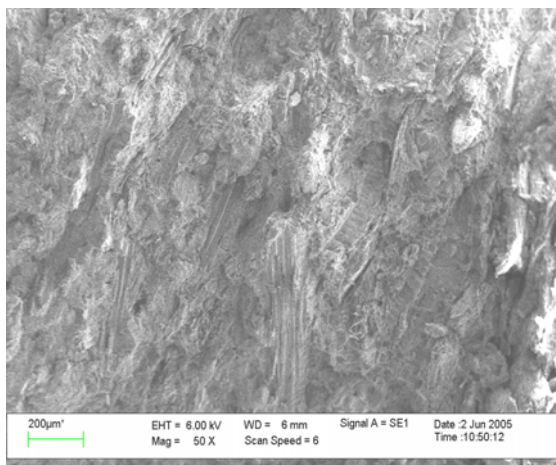
ลักษณะการกระจายตัวของซีลีอยในพอลิเมอร์ผสมพิจารณาได้ตามรูปที่ 4.21



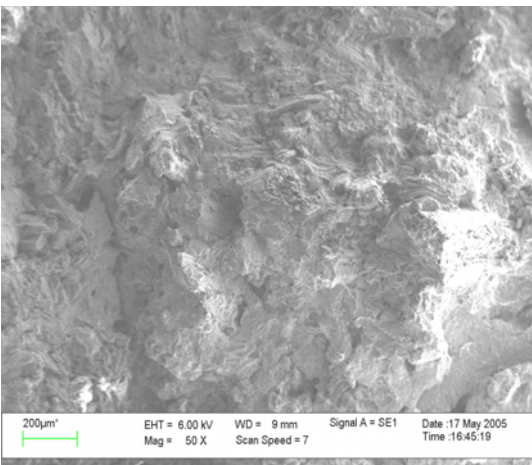
(ก)



(ข)



(ค)



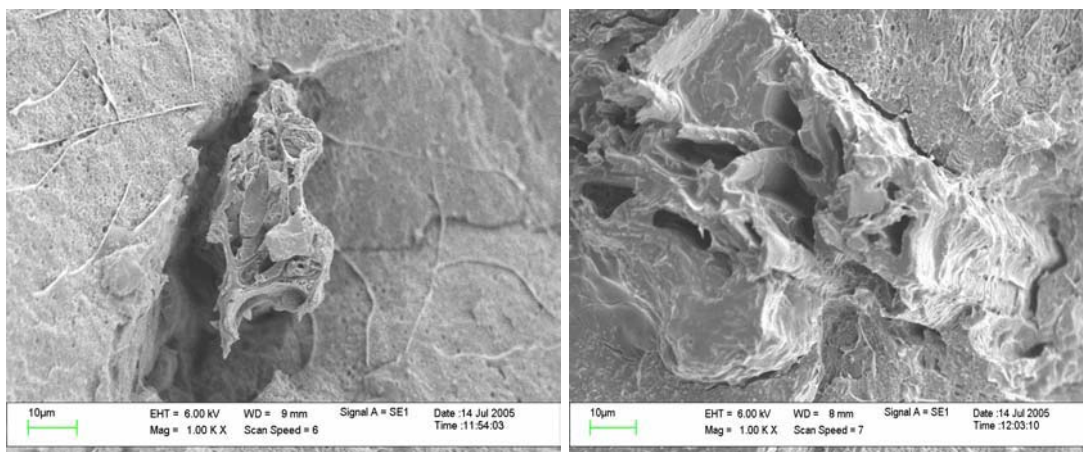
(ง)

รูปที่ 4.21 สัณฐานวิทยาของคอมโพสิตที่กำลังขยาย 50 เท่า (ก) PVC100 : LDPE10 : SD10 (ข) PVC100 : LDPE10 : PA 20 15 : SD10 (ค) PVC100 : LDPE10 : SD50 และ (ง) PVC100 : LDPE10 : PA 20 15 : SD50

จากรูปที่ 4.21 พบว่าคอมโพสิตที่มีปริมาณไม้ 10 เปอร์เซ็นต์ กระจายตัวดีกว่าคอมโพสิตที่มีปริมาณไม้ 50 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเมื่อปริมาณไม้มากขึ้นทำให้มีโอกาสเกิดการเกาะกลุ่มกัน เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนที่อยู่ในเนื้อไม้ ทำให้ไม้ชอบที่จะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน นอกจากนี้พบว่า เมื่อมีสารช่วยผสมอยู่ในระบบลักษณะการกระจายตัวของผงไม้ในปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ และ 50 เปอร์เซ็นต์ ไม่แตกต่างกันมากนัก

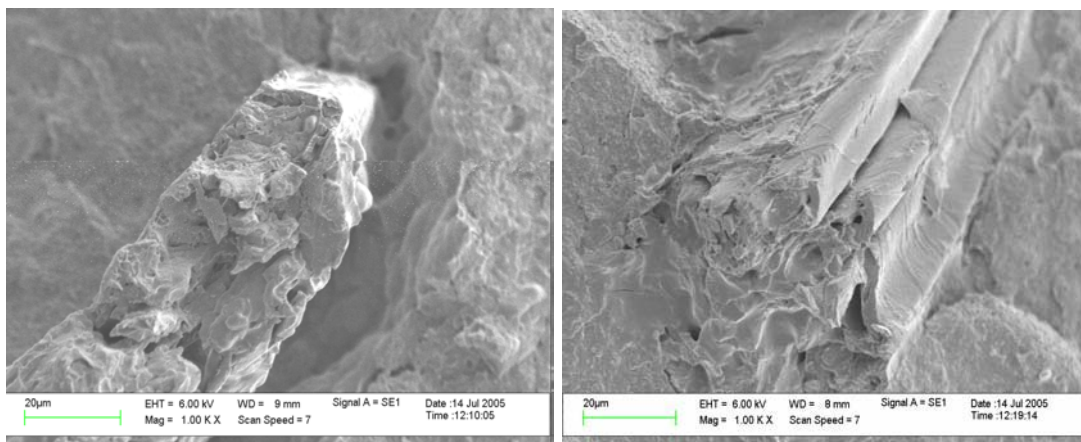
4.2.3.2 ลักษณะพื้นผิวระหว่างวัฏภาคของซีลี้อยและพอลิเมอร์ผสม

ศึกษาการยึดเกาะระหว่างวัฏภาคของซีลี้อยและพอลิเมอร์ผสมโดยพิจารณาได้จากรอยต่อระหว่างวัฏภาคทั้งสอง ซึ่งผลการทดลองเป็นไปดังรูปที่ 4.22



(ก)

(ข)



(ค)

(ง)

รูปที่ 4.22 สัณฐานวิทยาของคอมโพสิต ที่กำลังขยาย 100 เท่า (ก) PVC100 : LDPE10 : SD10
(ข) PVC100 : LDPE10 : PA 20 15% : SD10 (ค) PVC100 : LDPE10 : SD50 และ
(ง) PVC100 : LDPE10 : PA 20 15% : SD50

ลักษณะพื้นผิวระหว่างวัฏภาคของซีลี้อยและพอลิเมอร์ผสม จากรูปที่ 4.22 (ก) และ (ค) ซึ่งเป็นคอมโพสิตที่ไม่มีสารช่วยผสม พบว่าช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคของซีลี้อยและพอลิเมอร์มีขนาดกว้างกว่าช่องว่างในคอมโพสิตที่มีสารช่วยผสม ดังแสดงในรูปที่ 4.22 (ข) และ (ง) ซึ่งเป็นไปได้ว่า PA 20 อาจยึดเกาะกับซีลี้อยโดยใช้สมบัติความมีขั้ว เป็นผลให้สามารถยึดเกาะกับ PVC ซึ่งเป็นวัฏภาคหลักในพอลิเมอร์ผสมได้ดีขึ้น

4.2.4 การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวของ PVC ในคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมและซีลี้อยจากไม้ยางพารา

อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ในการศึกษาอุณหภูมิในการสลายตัวของ PVC ในคอมโพสิตคือ PVC100 : LDPE10 นอกจากนี้ได้ศึกษาอุณหภูมิในการสลายตัวเมื่อปรับปรุงพอลิเมอร์ผสมด้วยสารช่วยผสมชนิด PA 20 ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 อุณหภูมิการสลายตัวของ PVC ในพอลิเมอร์คอมโพสิต

รายการ	อุณหภูมิการสลายตัว (°C)
PVC100 : LDPE10	291.3
PVC100 : LDPE10 : PA 20 15 %	289.9
PVC100 : LDPE10 : SD10	243.7
PVC100 : LDPE10 : SD 50	234.9
PVC100 : LDPE10 : SD10 : PA 20 15 %	254.0
PVC100 : LDPE10 : SD50 : PA 20 15 %	238.3

จากตารางที่ 4.8 พบว่าอุณหภูมิในการสลายตัว (Decomposition temperature, T_d) ของ PVC ลดลงเนื่องจากความไม่เข้ากันของไม้ซึ่งมีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) ส่วน PVC และ LDPE มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) นอกจากนี้ในงานวิจัยที่ผ่านมา [51-52] พบว่าปริมาณไม้ที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิการสลายตัวของ PVC คือ พันธะไฮโดรเจนที่มีอยู่ในเนื้อไม้มีความสามารถทำให้อะตอมของ Cl หลุดออกจาก PVC เนื่องจากอะตอมของไฮโดรเจนซึ่งมีความเป็นบวกมากและสามารถดึงดูดคู่อิเล็กตรอนโคตเดี่ยวจากอะตอมของโมเลกุลอื่นที่อยู่ข้างเคียงซึ่งในกรณีนี้คือ Cl แรงที่เกิดขึ้นในลักษณะเช่นนี้ เรียกว่า พันธะไฮโดรเจน ดังนั้นเมื่อในระบบมีความร้อน PVC เกิดการเสียสภาพจึงทำให้ Cl หลุดไปสร้างพันธะกับไฮโดรเจนอะตอมได้ แต่เมื่อใช้สารช่วยผสม พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวของ PVC สูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากลักษณะการทำงานของสารช่วยผสม คือ ส่วนที่มีขั้วใน PA 20 จะยึดเหนี่ยวกับส่วนที่มีขั้วใน PVC คือ C-Cl ดังนั้น Cl จึงมีโอกาสเกิดพันธะกับไฮโดรเจนได้น้อยลงเป็นผลให้ T_d มีค่าสูงขึ้น

4.2.5 การศึกษาอุณหภูมิการหลอมเหลวและอุณหภูมิการตกผลึกของ LDPE ในคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมและขี้เลื่อยจากไม้ยางพารา

การศึกษาใช้อัตราส่วนของ PVC100 : LDPE10 โดยใช้และไม่ใช้สารช่วยผสมชนิด PA 20 ปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE และปริมาณขี้เลื่อยที่ศึกษา คือ 10 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม ทำได้โดยการใช้เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) ในการทดสอบจะศึกษาช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 25-150 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

4.2.5.1 อุณหภูมิการหลอมเหลวของ LDPE

การศึกษาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึกของ LDPE ในคอมโพสิตได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.9 อุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) ของ LDPE

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)
PVC100 : LDPE10	111.1
PVC100 : LDPE10 : SD10	110.4
PVC 100 : LDPE10 : PA 20 15 : SD10	110.7
PVC 100 : LDPE10 : SD50	110.4
PVC 100 : LDPE10 : PA 20 15 : SD50	109.7

จากตารางที่ 4.9 พบว่าเมื่อผสมซีลี้อยปริมาณ 10 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE ที่ใช้และไม่ใช้สารช่วยผสมไม่ทำให้อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึกของ LDPE ในคอมโพสิตเปลี่ยนแปลงมากนัก

4.2.5.2 อุณหภูมิการตกผลึกของ LDPE

การศึกษาอุณหภูมิการตกผลึก เอนทัลปีและเอนโทรปีความเป็นผลึกใช้เทคนิคเดียวกับการศึกษาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึกซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.10 อุณหภูมิการเกิดผลึก เอนทัลปีและเอนโทรปีความเป็นผลึกของ LDPE

ตัวอย่าง	$T_c (^{\circ}\text{C})$	ΔH_f (J/g)	ΔH_n (J/g)	% Crystallinity
PVC100 : LDPE10	98.1	3.22	35.42	12.06
PVC100 : LDPE10 : SD10	97.1	4.12	50.37	17.15
PVC100 : LDPE10 : PA 20 15 : SD10	96.3	3.93	48.64	15.57
PVC100 : LDPE10 : SD50	95.4	2.42	53.19	18.12
PVC100 : LDPE10 : PA 20 15 : SD50	95.3	2.28	50.55	17.22

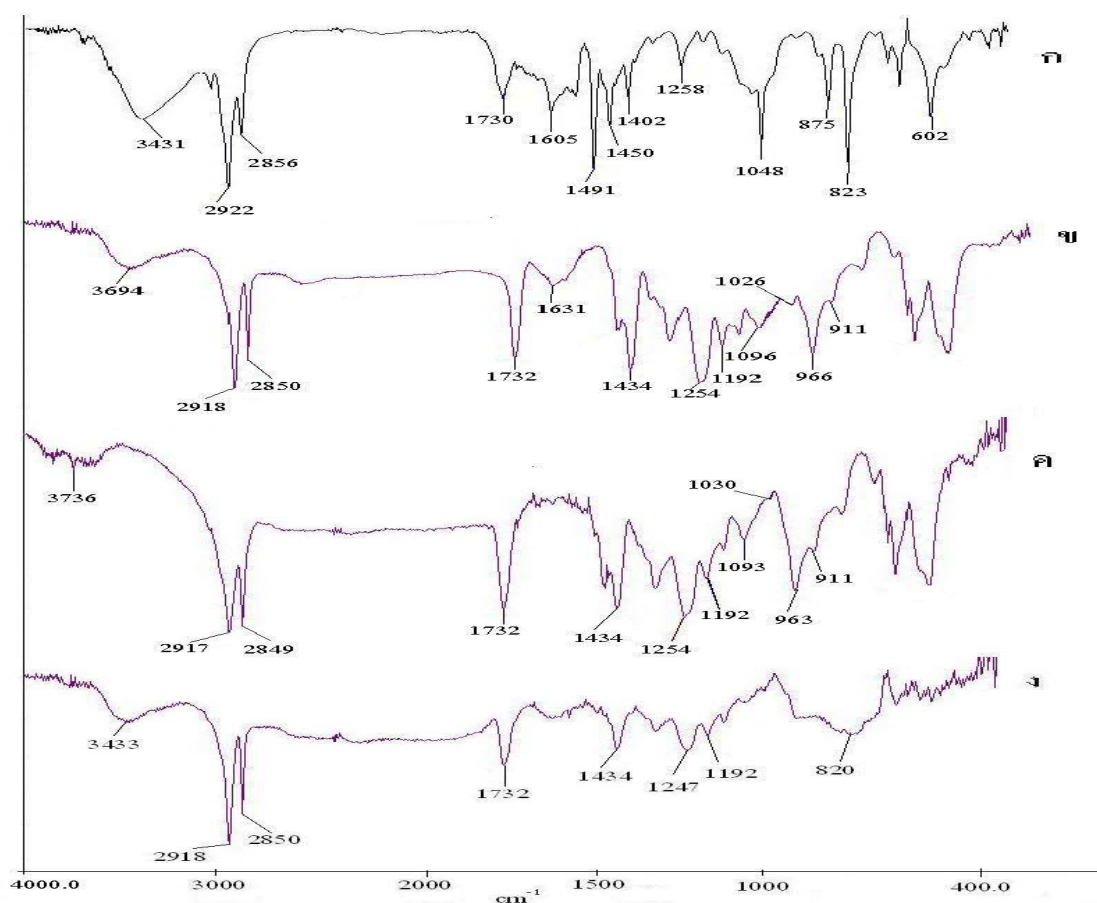
อุณหภูมิการเกิดผลึกเป็นอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ของพอลิเมอร์ โดยจากผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.10 พบว่า การเติมซีลี้อยลงไปในพอลิเมอร์ผสมในแต่ละอัตราส่วนที่นำมาศึกษาไม่ทำให้อุณหภูมิการเกิดผลึกเปลี่ยนแปลงมากนัก แต่เอนทัลปีและเอนโทรปีความเป็นผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีซีลี้อยอยู่ในระบบ ทั้งนี้เนื่องจากผลึกที่เกิดขึ้นสามารถเกิดผลึกเล็ก ๆ ขึ้นแบบตั้งฉาก (Transcrystallization) [49] ที่บริเวณพื้นผิวของซีลี้อยได้ คือ ซีลี้อยทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกโดยเมื่อปริมาณซีลี้อยมากขึ้นทำให้เอนโทรปีความเป็นผลึกมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนการใช้สารช่วยผสมมีผลทำให้เอนทัลปีและเอนโทรปีความเป็นผลึกมีค่าลดลงเล็กน้อย ซึ่งเป็นไปได้ว่าสารช่วยผสมอาจเกิดการยึดเหนี่ยวกับซีลี้อยโดยใช้สมบัติความมีขั้วทำให้ซีลี้อยทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกได้ลดลงหรืออาจเกิดจากการยึดเหนี่ยวระหว่าง

PVC และ LDPE ส่งผลให้การจัดเรียงตัวของ LDPE เป็นไปได้ยากขึ้น ความสามารถในการเกิดผลึกจึงลดลง

4.3 การศึกษาผลของสารคู่ควบ Silane และ/หรือ MAPE ที่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของคอมโพสิต

ในขั้นตอนนี้เป็นการนำคอมโพสิตจากพอลิเมอร์ผสม PVC:LDPE 100:40 ที่มี PA-20 เป็นสารช่วยผสมมาเตรียมเป็นคอมโพสิตโดยใช้สารคู่ควบ Silane A-137 และ Silane A-1100 และสารช่วยผสม MAPE ในปริมาณแตกต่างกัน ได้แก่ 0 1 3 และ 5% โดยน้ำหนักของซีลีออย รวมถึงศึกษาเกี่ยวกับการใช้ Silane A-137 หรือ Silane A-1100 และสารช่วยผสม MAPE ในอัตราส่วนต่าง ๆ ได้แก่ 1:1 1:2 และ 2:1 ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยาและสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิต

4.3.1 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของคอมโพสิตที่ใช้ Silane หรือ MAPE



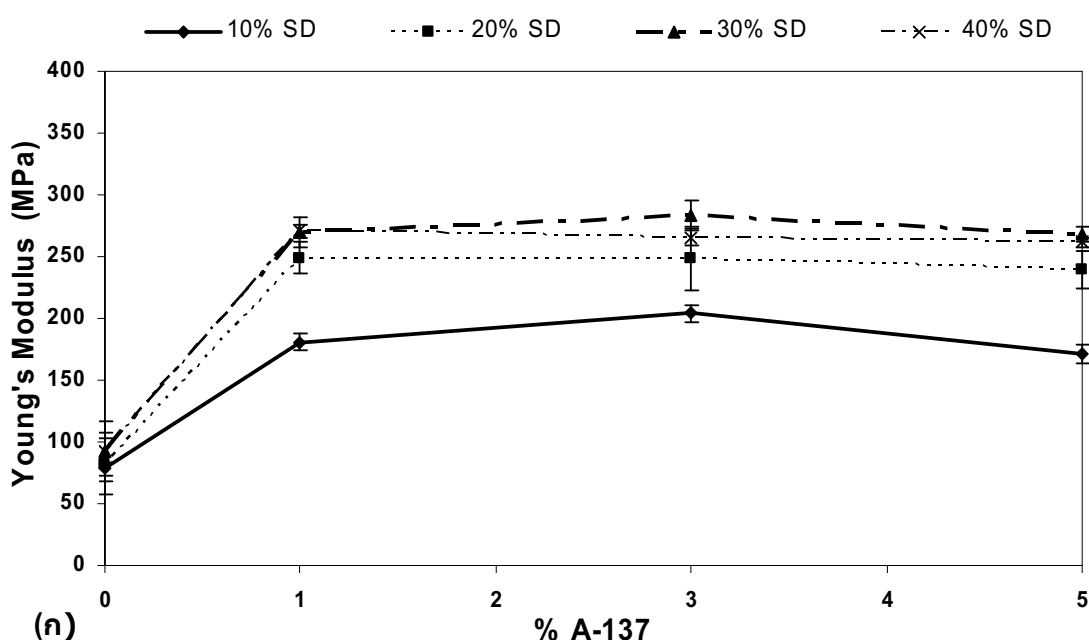
รูปที่ 4.23 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสม PVC/LDPE/PA20 (ก) ไม่มี Silane หรือ MAPE (ข) ผสม Silane A-137 (ค) ผสม Silane A-1100 และ (ง) ผสม MAPE

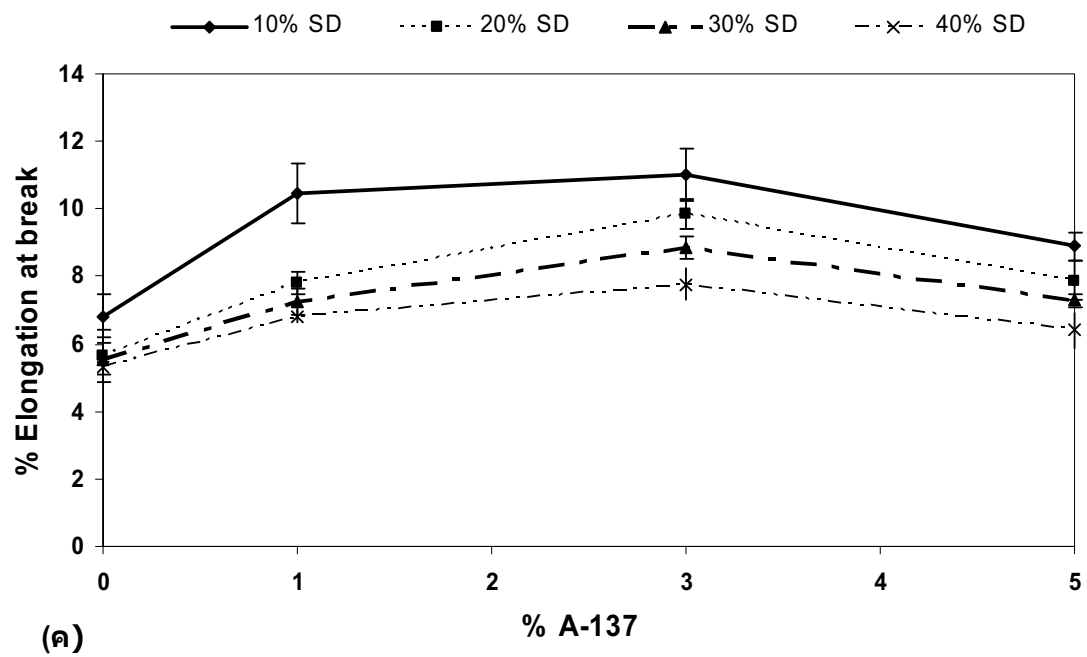
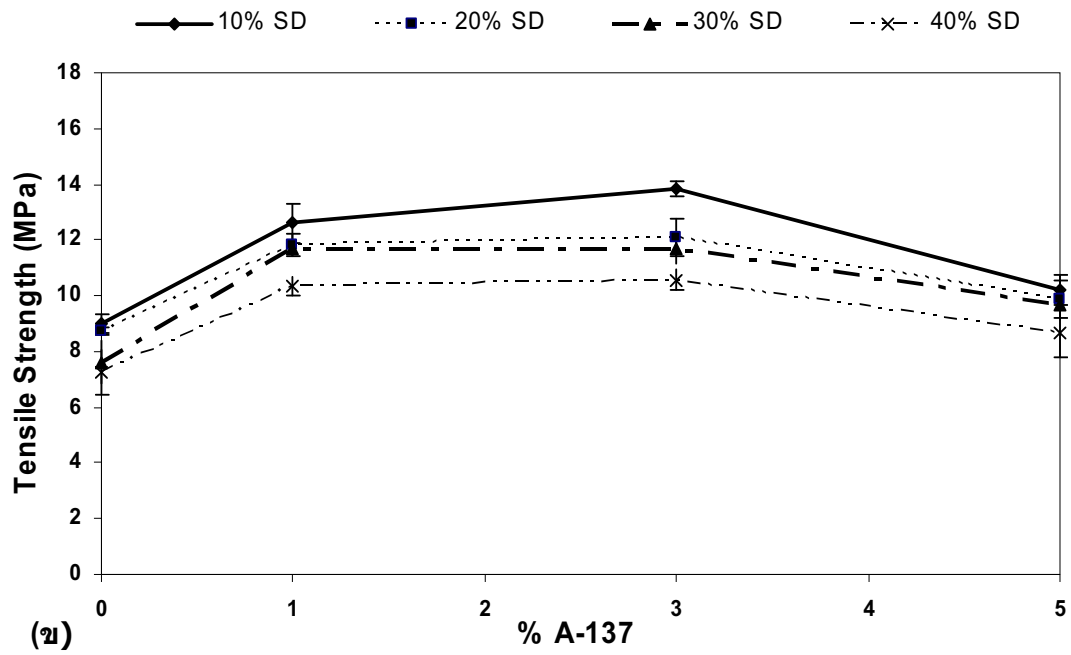
จากอินฟราเรดสเปกตรัมในรูปที่ 4.23 พบว่า ตัวอย่างคอมโพสิต PVC/LDPE เสริมแรงโดยซีลี้อยให้พีกหลักคล้ายกับอินฟราเรดสเปกตรัมที่แสดงในรูปที่ 4.17 โดยตำแหน่งพีกช่วง $3400-3500\text{ cm}^{-1}$ เกิดจากการสั่นแบบ O-H stretching ของหมู่ไฮดรอกซิลในซีลี้อย ที่ตำแหน่ง $1650-1720\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของหมู่คาร์บอนิล (C=O stretching) ที่พบในองค์ประกอบซีลี้อย $1430-1470\text{ cm}^{-1}$ เกิดจาก C-H bending ของ CH_2 ที่เป็นสายโซ่หลักของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE สำหรับการใส่ Silane A-137 ให้พีกสำคัญเพิ่มขึ้นมาที่ตำแหน่ง $1095-1190\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบ Si-O-C stretching [46-47] และพีกที่ตำแหน่ง $1020-1030\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงการสั่นของ Si-OH stretching [46-47] เช่นเดียวกับการใช้ Silane A-1100 ที่ให้พีกสำคัญที่ตำแหน่งเดียวกัน ส่วนการใช้ MAPE แสดงพีกที่ตำแหน่ง 1732 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบ C=O stretching [46-47] ที่ซ้อนทับกันระหว่างหมู่คาร์บอนิลที่พบในซีลี้อยและหมู่คาร์บอนิลที่อยู่ในโครงสร้างของมาลิกแอนไฮดรายด์

4.3.2 ผลของสารคู่ควบ Silane ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต

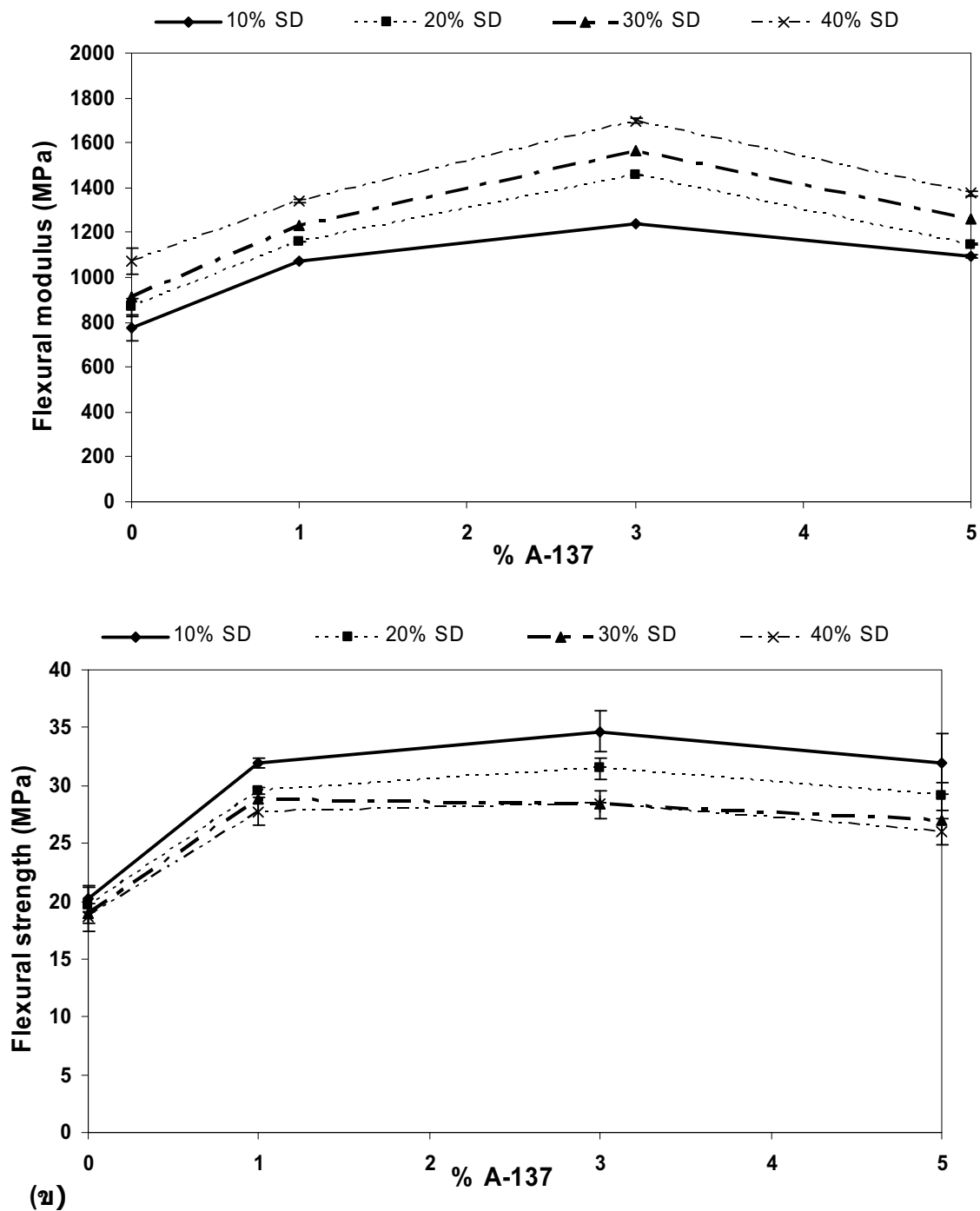
4.3.2.1 Silane A-137

จากรูปที่ 4.24 (ก)-(ค) พบว่าสมบัติด้านแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีแนวโน้มที่ดีขึ้นเมื่อมีการใช้สารคู่ควบ Silane A-137 ทั้งนี้เนื่องจากการที่สารคู่ควบ Silane A-137 ประกอบด้วยส่วนที่ไม่มีขั้ว (หมู่เอทิล) และส่วนมีขั้ว (หมู่เอทอกซี) สามารถเชื่อมโยงให้โมเลกุลของพอลิเมอร์ผสมเกิดการยึดเหนี่ยวกับโมเลกุลของเซลล์โลสที่เป็นองค์ประกอบหลักของซีลี้อยได้ผ่านทางการเกี่ยวพันเชิงกลและการเชื่อมโยงแบบไดโพลตามลำดับ และปริมาณ Silane A-137 ที่ให้สมบัติด้านแรงดึงดีที่สุดอยู่ที่ปริมาณ 3% นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณซีลี้อยที่แตกต่างกัน ทำให้สมบัติด้านแรงดึงของคอมโพสิตที่มีการใช้ Silane A-137 เป็นไปในทำนองเดียวกัน





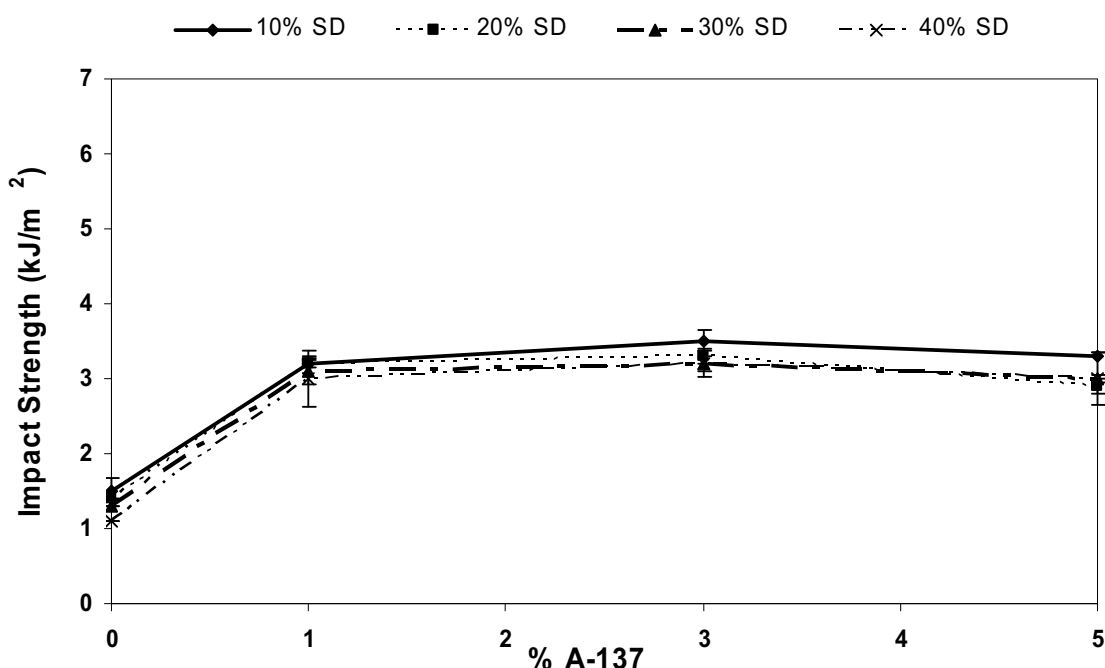
รูปที่ 4.24 สมบัติด้านแรงดึงของคอมโพสิตที่ใช้ Silane A-137 เป็นสารคู่ควบ (ก) มอดุลัส (ข) ความแข็งแรงดึง และ (ค) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด



รูปที่ 4.25 สมบัติด้านการโค้งงอของคอมโพสิตที่ใช้ Silane A-137 เป็นสารคู่ควบ (ก) โมดูลัสโค้งงอ และ (ข) ความแข็งแรงโค้งงอ

สมบัติด้านการโค้งงอของคอมโพสิตที่มีการใช้สารคู่ควบ Silane A-137 แสดงได้ดังรูปที่ 4.25 จากผลการทดลองพบว่า สารคู่ควบ Silane A-137 ทำให้สมบัติด้านการโค้งงอของคอมโพสิตเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอมโพสิตที่ไม่มีการใช้ Silane A-137 สำหรับปริมาณที่ให้สมบัติด้านการโค้งงอดีที่สุด

คือ 3% เช่นเดียวกับสมบัติด้านแรงดึง นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณซีลี้อยที่เพิ่มขึ้น ทำให้มอดุลัสโค้งงอเพิ่มขึ้นแต่ทำให้ความแข็งแรงโค้งงอลดลง

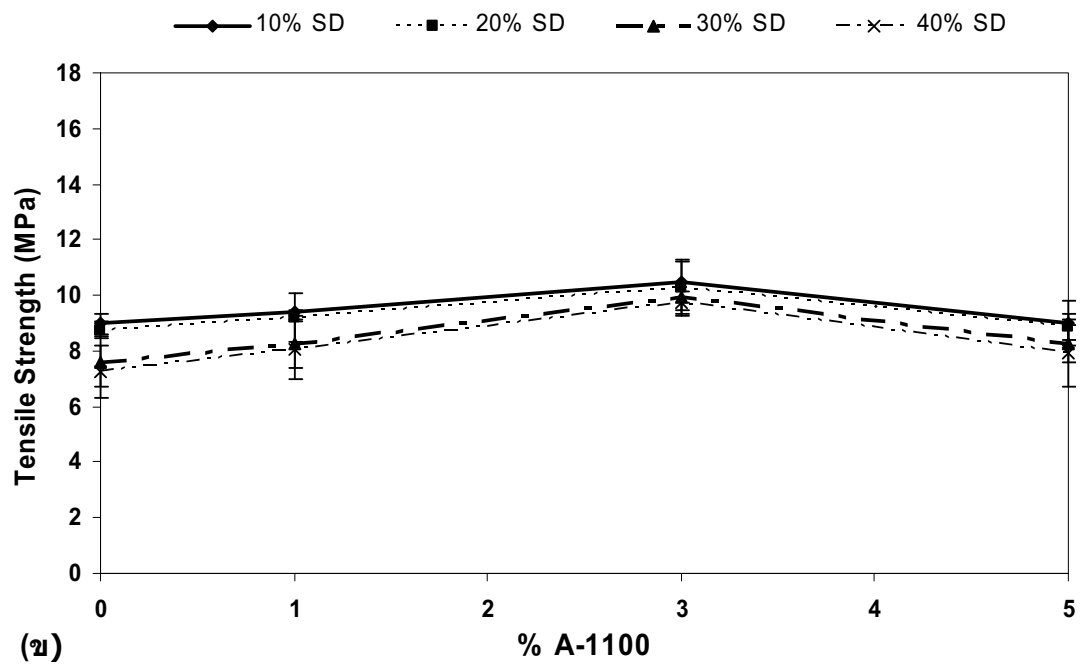
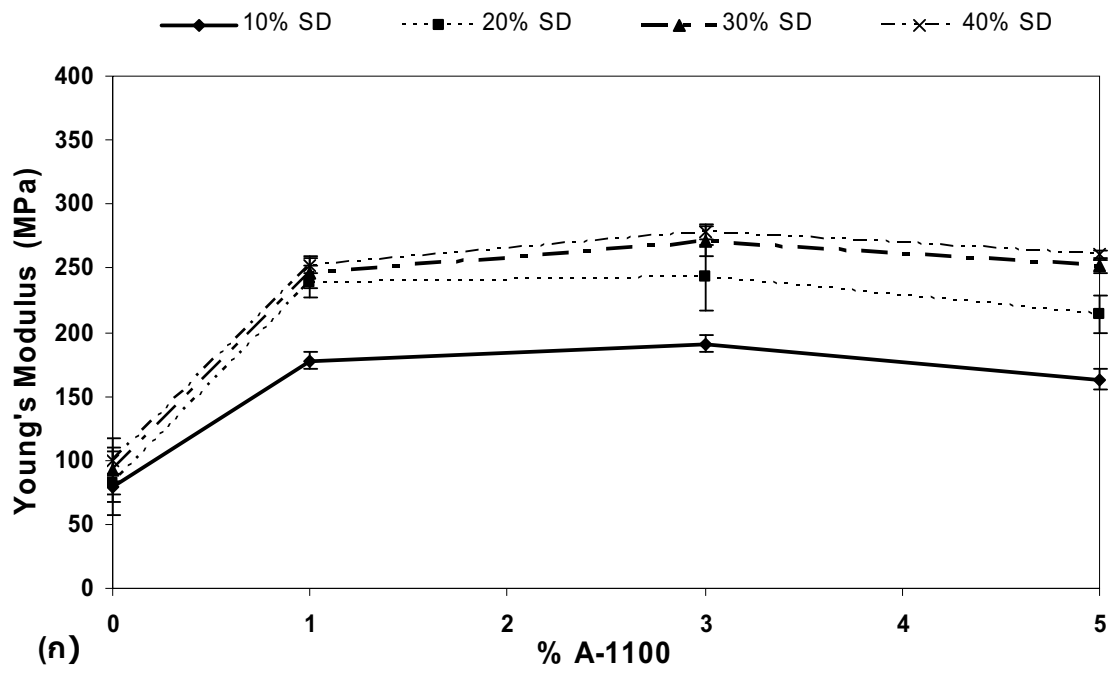


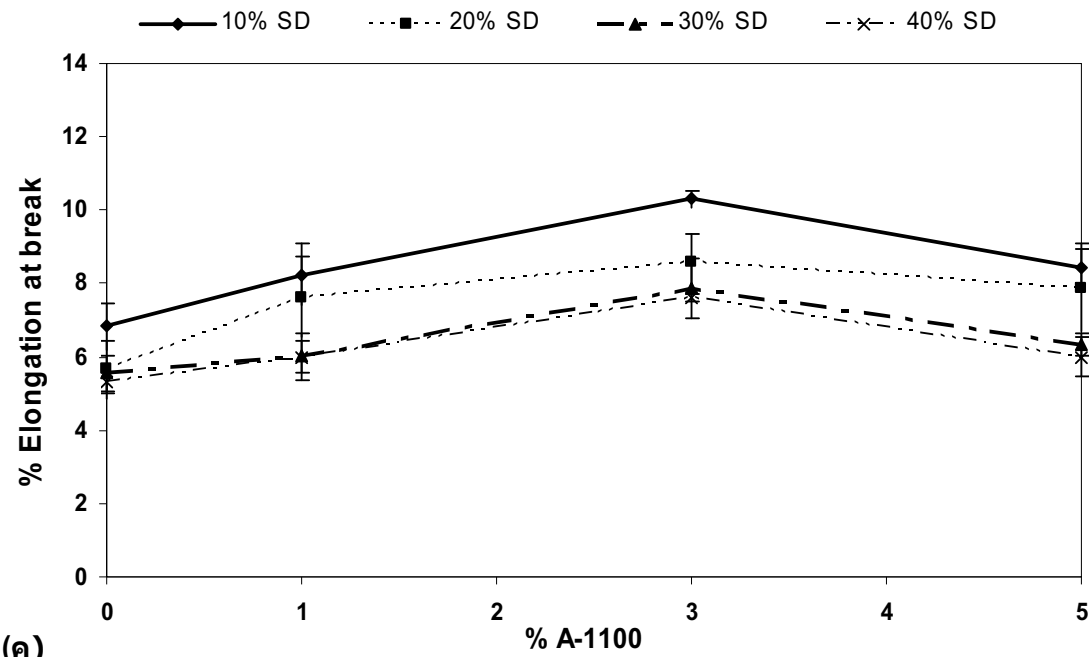
รูปที่ 4.26 ความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิตที่ใช้ Silane A-137 เป็นสารคู่ควบ

จากรูปที่ 4.26 พบว่า ความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิตที่ใช้ Silane A-137 เป็นสารคู่ควบให้แนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่การใช้ Silane A-137 ที่ 1% และปริมาณซีลี้อยที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความแข็งแรงกระแทกมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง

4.3.2.2 Silane A-1100

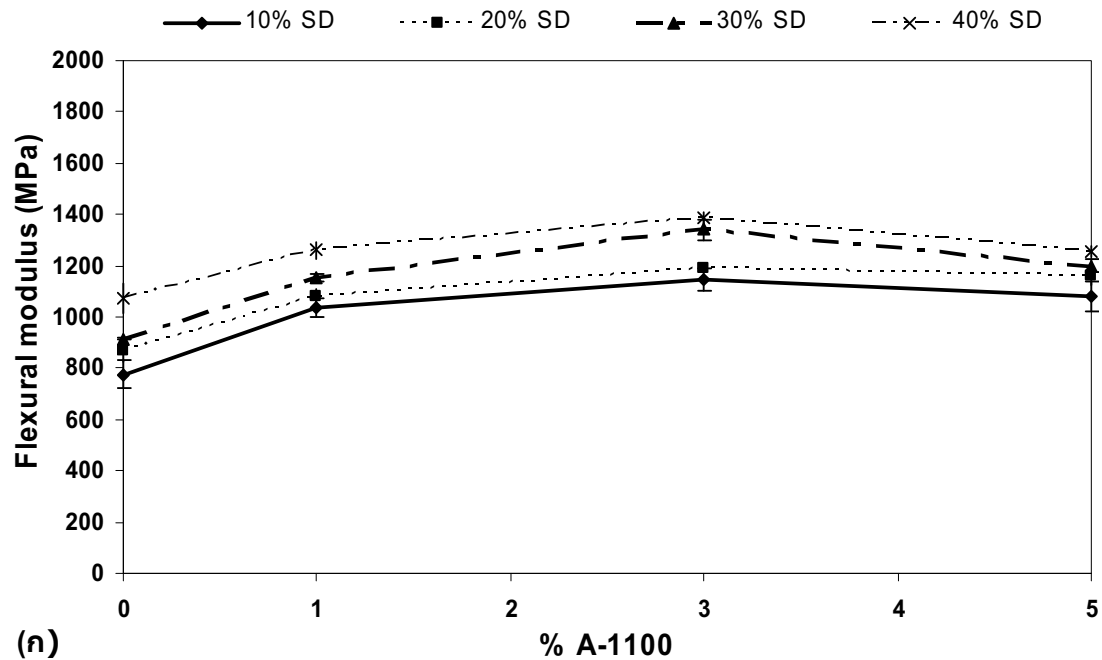
มอดุลัส ความแข็งแรงดึงและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของคอมโพสิตที่ใช้สารคู่ควบ Silane A-1100 แสดงได้ดังรูปที่ 4.27 (ก)-(ค) ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า สารคู่ควบ Silane A-1100 ทำให้สมบัติด้านแรงดึงของคอมโพสิตเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยปริมาณของ Silane A-1100 ที่ดีที่สุดอยู่ที่ 3% เช่นเดียวกับการใช้ Silane A-137 เนื่องจากโครงสร้างของ Silane A-1100 ที่ประกอบด้วยส่วนมีขั้วที่ทั้ง 2 ปลาย ได้แก่ หมู่อะมิโนและเอทอกซี สามารถเกิดการยึดเหนี่ยวระหว่างพอลิเมอร์ผสมและซีลี้อยได้โดยการยึดเหนี่ยวแบบไดโพล นอกจากนี้ปริมาณซีลี้อยที่เพิ่มขึ้นทำให้มอดุลัสเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ความแข็งแรงดึงและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดลดลง



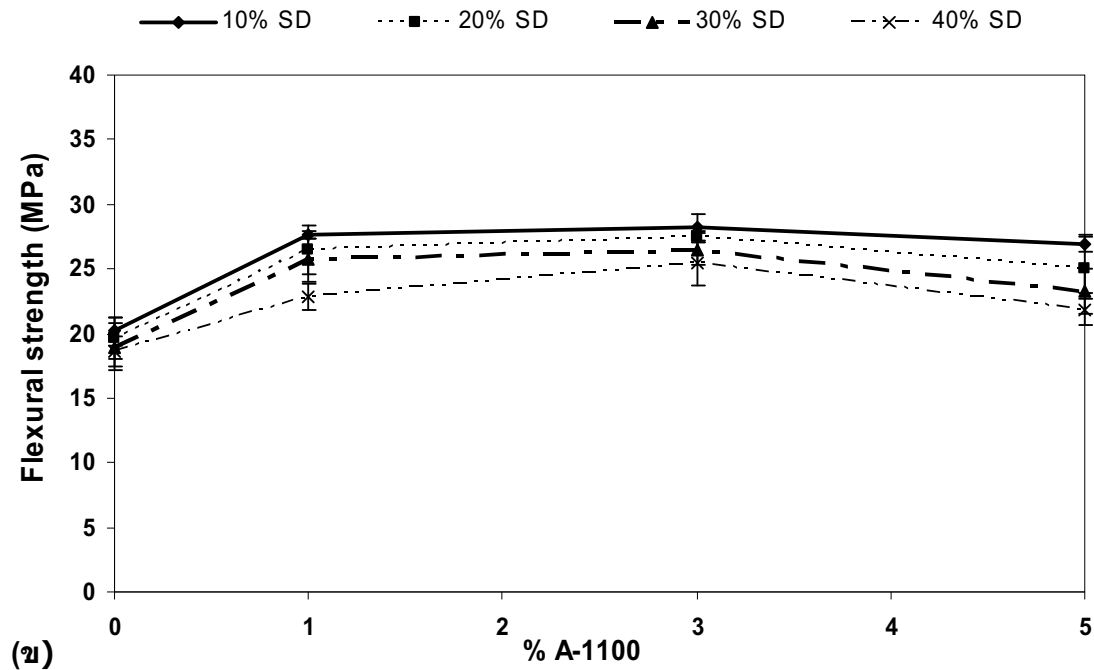


(ค)

รูปที่ 4.27 สมบัติด้านแรงดึงของคอมโพสิตที่ใช้ Silane A-1100 เป็นสารคู่ควบ (ก) มอดุลัส (ข) ความแข็งแรงดึง และ (ค) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด



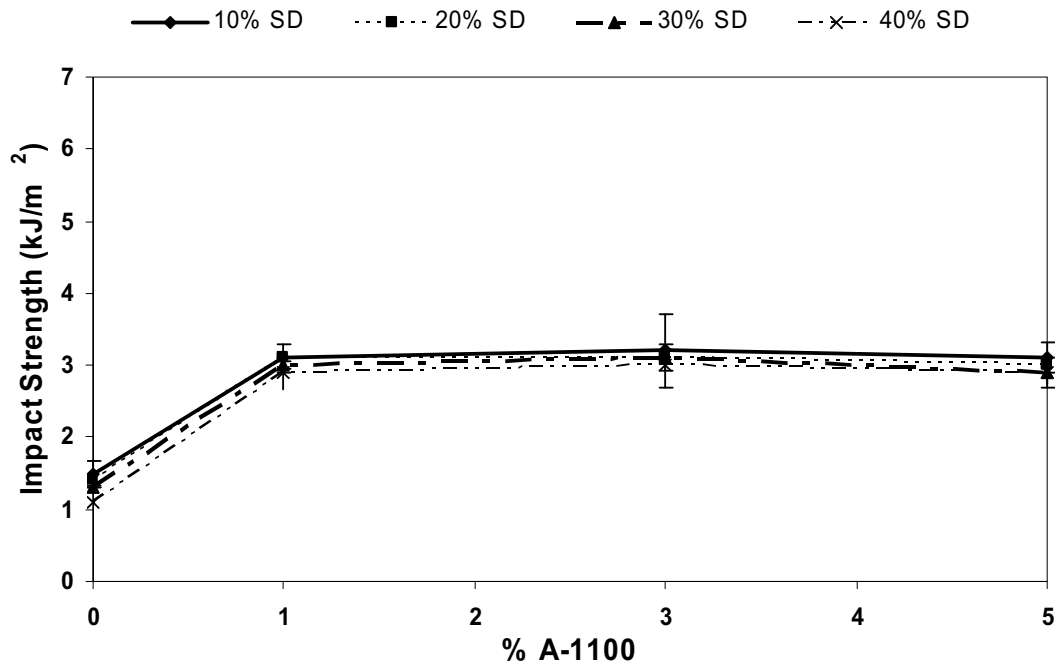
(ก)



รูปที่ 4.28 สมบัติด้านการโค้งงอของคอมโพสิตที่ใช้ Silane A-1100 เป็นสารคู่ควบ (ก) มอดุลัสโค้งงอ และ (ข) ความแข็งแรงโค้งงอ

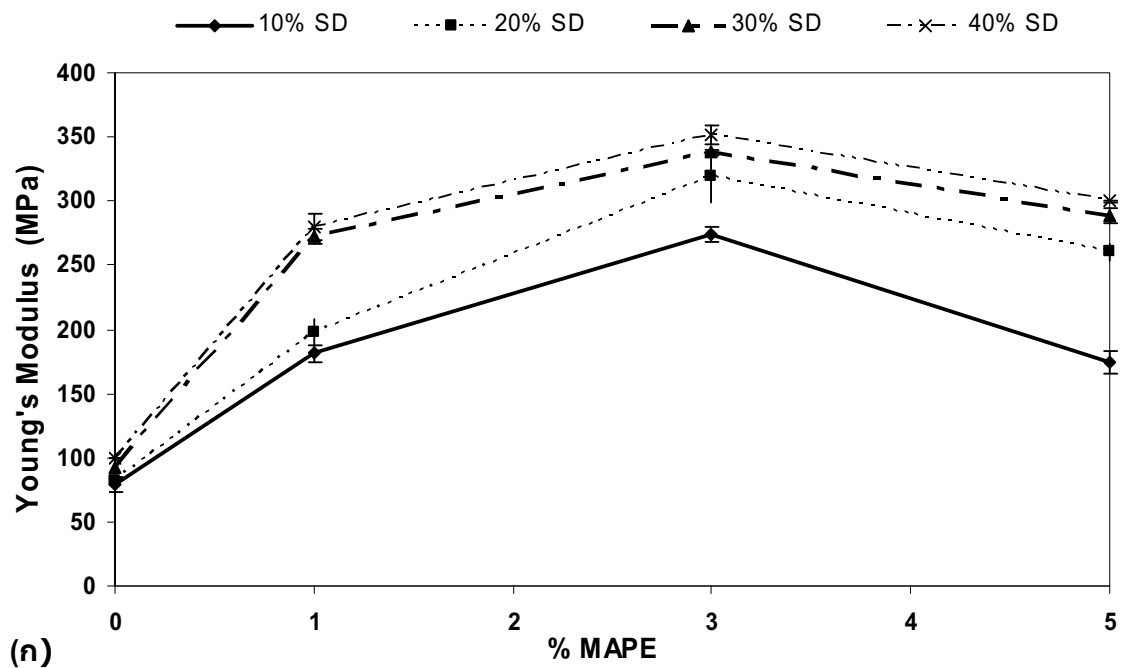
จากรูปที่ 4.28 พบว่าสมบัติด้านการโค้งงอของคอมโพสิตที่มีการใช้ Silane A-1100 ให้แนวโน้มที่คล้ายกับการใช้ Silane A-1100 ในรูปที่ 4.24 กล่าวคือ ทำให้มอดุลัสโค้งงอและความแข็งแรงโค้งงอมีค่าเพิ่มขึ้นโดยให้ค่าที่มากที่สุดเมื่อใช้ Silane A-1100 ในปริมาณ 3%

ความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิตที่ใช้ Silane A-1100 เป็นสารคู่ควบมีค่ามากกว่าความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิตที่ไม่มีการใช้ Silane A-1100 เป็นสารคู่ควบ ดังแสดงในรูปที่ 4.29 และปริมาณซีลี้อย 10% ให้ค่าความแข็งแรงกระแทกมากที่สุด

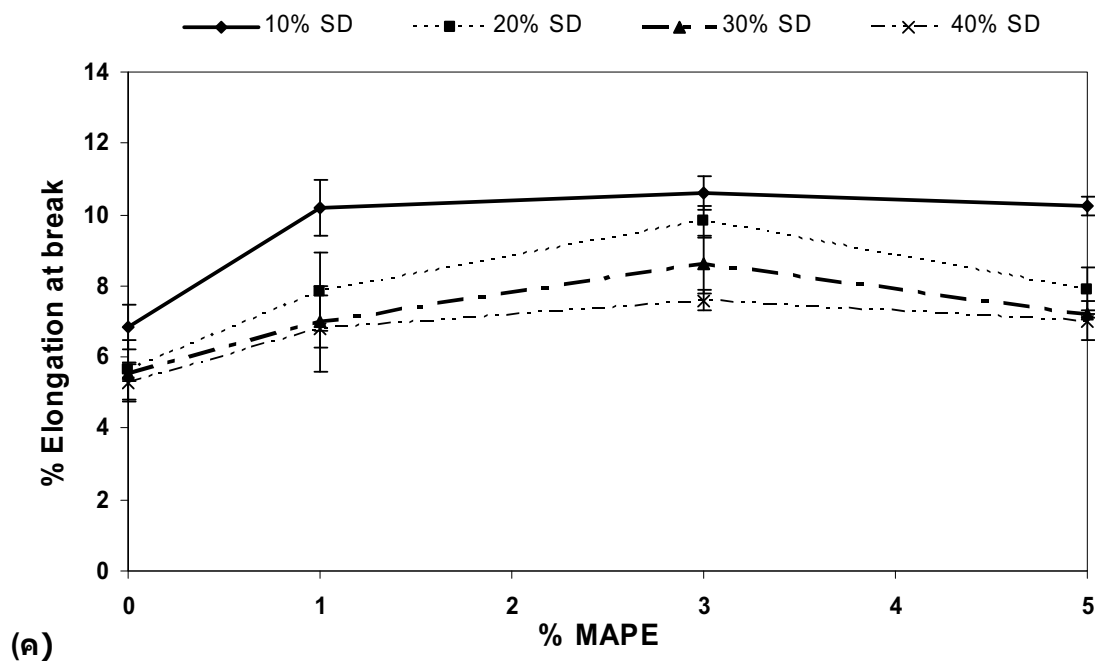
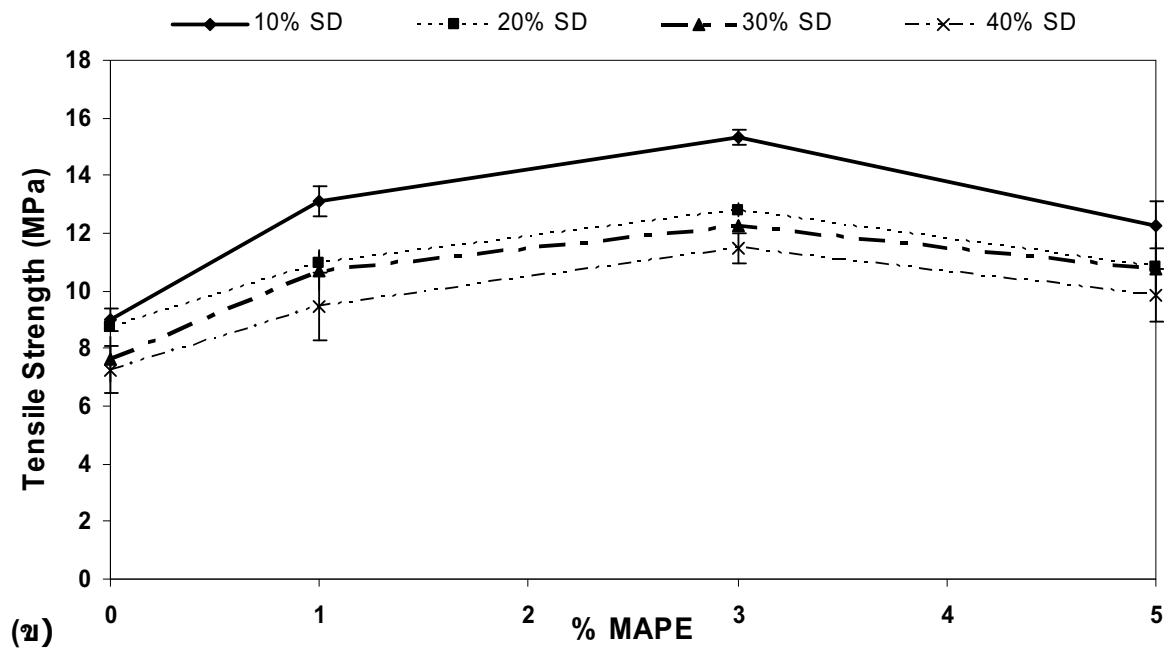


รูปที่ 4.29 ความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิตที่ใช้ Silane A-1100 เป็นสารคู่ควบ

4.3.3 ผลของสารช่วยผสม MAPE ที่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของคอมโพสิต



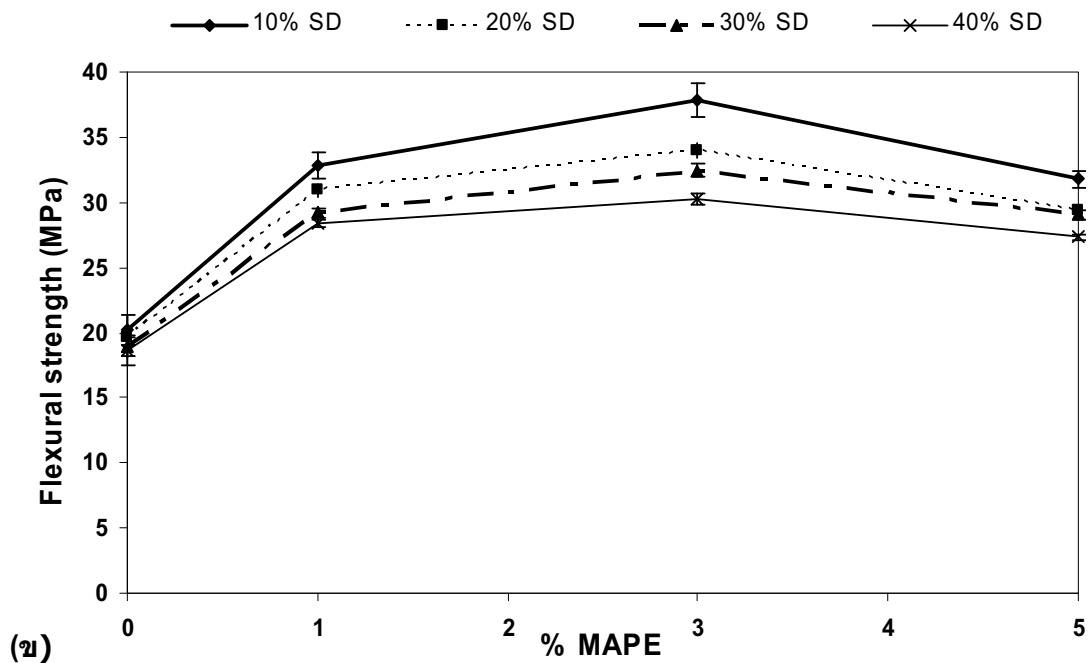
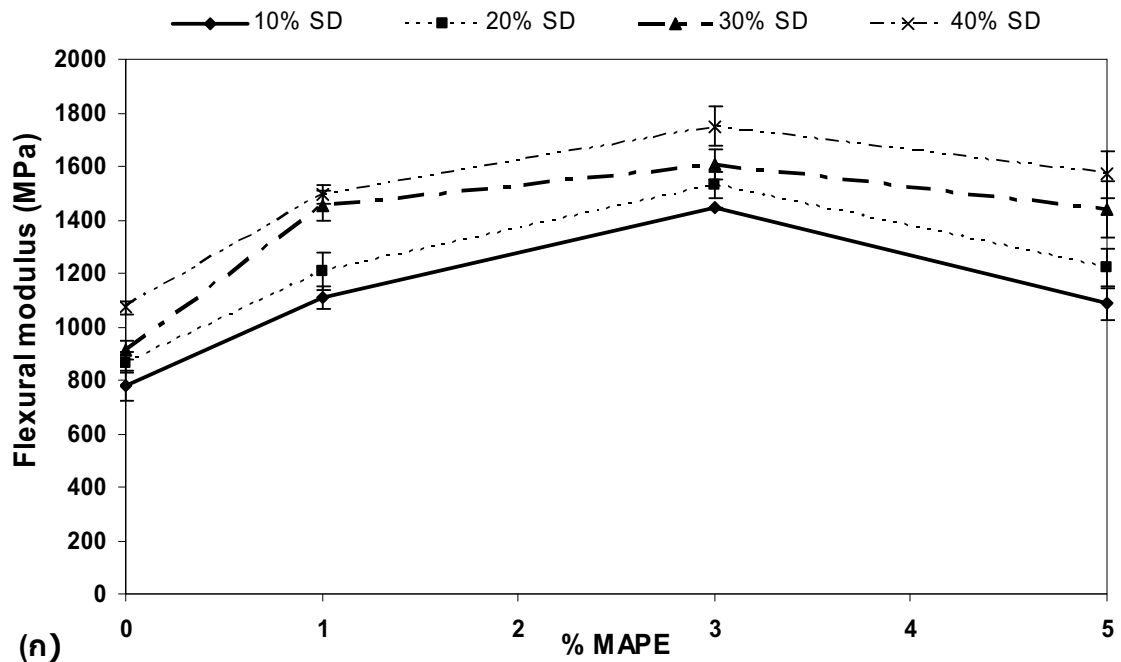
(จ)



รูปที่ 4.30 สมบัติด้านแรงดึงของคอมโพสิตที่ใช้ MAPE เป็นสารช่วยผสม (ก) มอดุลัส (ข) ความแข็งแรงดึง และ (ค) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด

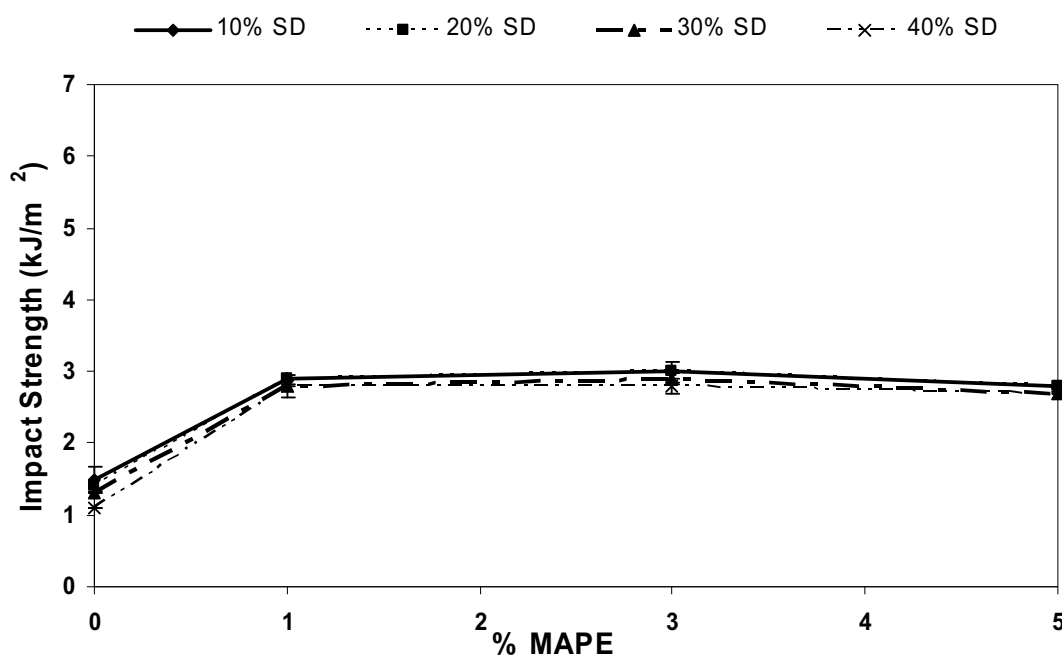
สมบัติด้านความแข็งแรงดึงของคอมโพสิตที่มีการใช้ MAPE เป็นสารช่วยผสมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.30 จากผลการทดลองพบว่าการใช้ MAPE ทำให้มอดุลัส ความแข็งแรงดึงและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น โดยปริมาณ MAPE ที่ให้ค่าสมบัติเชิงกลดีที่สุด คือ ปริมาณ 3% โดยน้ำหนักของซีลี้อย การเพิ่มขึ้นของสมบัติด้านแรงดึงเกิดขึ้นเนื่องจากการที่โมเลกุลของ MAPE ที่ปลายด้านหนึ่งเป็น

ส่วนที่ไม่มีขั้ว (ส่วนของ MAPE) และปลายอีกด้านหนึ่งเป็นส่วนมีขั้ว (ส่วนของมาลิก แอนไฮไดรต์) ซึ่งสามารถเกิดการเกี่ยวพันกับพอลิเมอร์ผสมและเกิดการเชื่อมโยงแบบไดโพลกับส่วนของขี้เลื่อยตามลำดับ



รูปที่ 4.31 สมบัติด้านการโค้งงอของคอมโพสิตที่ใช้ MAPE เป็นสารช่วยผสม (ก) มอดุลัสโค้งงอ และ (ข) ความแข็งแรงโค้งงอ

สมบัติด้านการโค้งงอของคอมโพสิตที่ใช้ MAPE เป็นสารคู่ควบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.31 พบว่า การใช้ MAPE ทำให้มอดุลัสโค้งงอและความแข็งแรงโค้งงอเพิ่มขึ้น โดยปริมาณ MAPE 3% ให้ค่ามากที่สุดในทุก ๆ ปริมาณซีลี้อยที่ทำการศึกษา



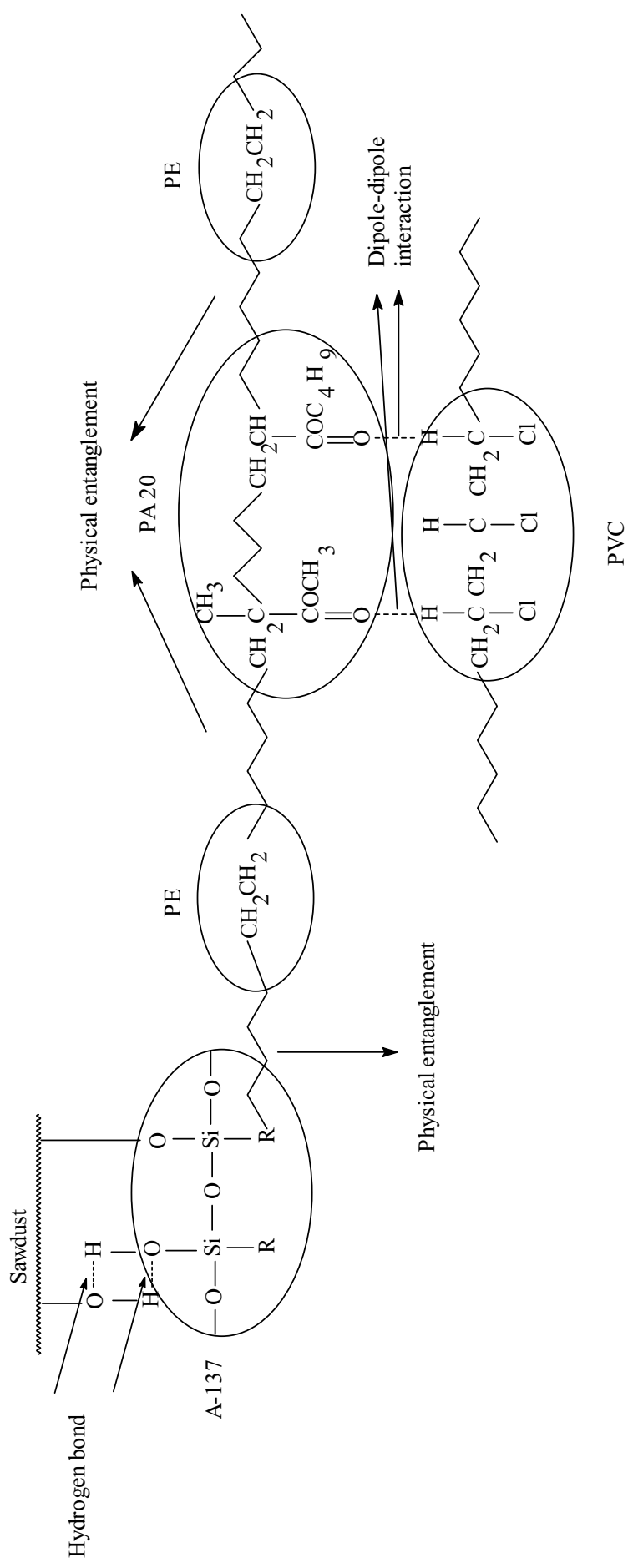
รูปที่ 4.32 ความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิตที่ใช้ MAPE เป็นสารช่วยผสม

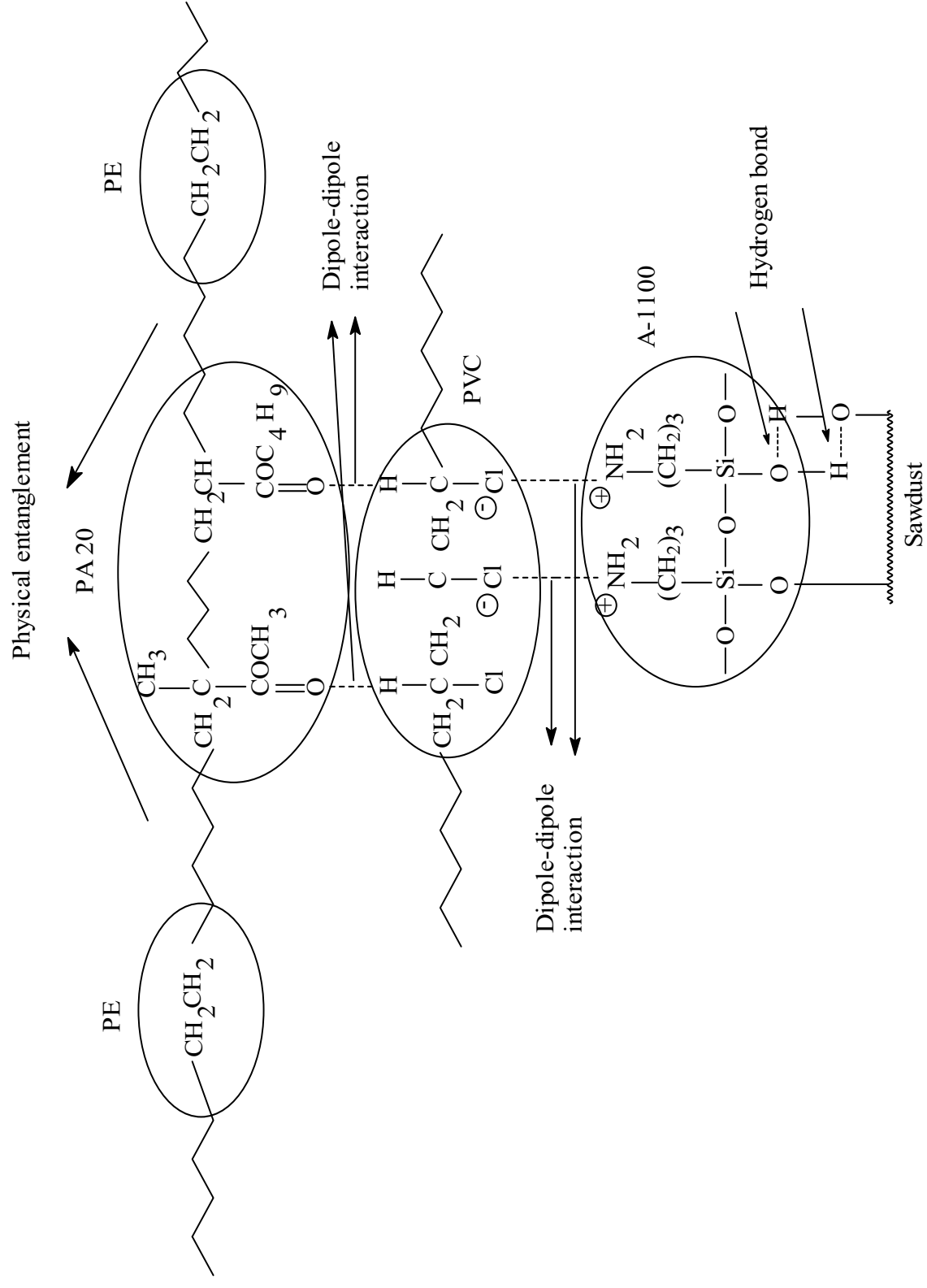
ความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิตสามารถปรับปรุงได้โดยการใช้ MAPE โดยปริมาณ MAPE ที่ 3% ให้ค่าความแข็งแรงกระแทกสูงที่สุดโดยเฉพาะเมื่อใช้ปริมาณซีลี้อย 10% ให้ค่าความแข็งแรงกระแทกมากกว่าเมื่อใช้ซีลี้อยในปริมาณที่เพิ่มขึ้น

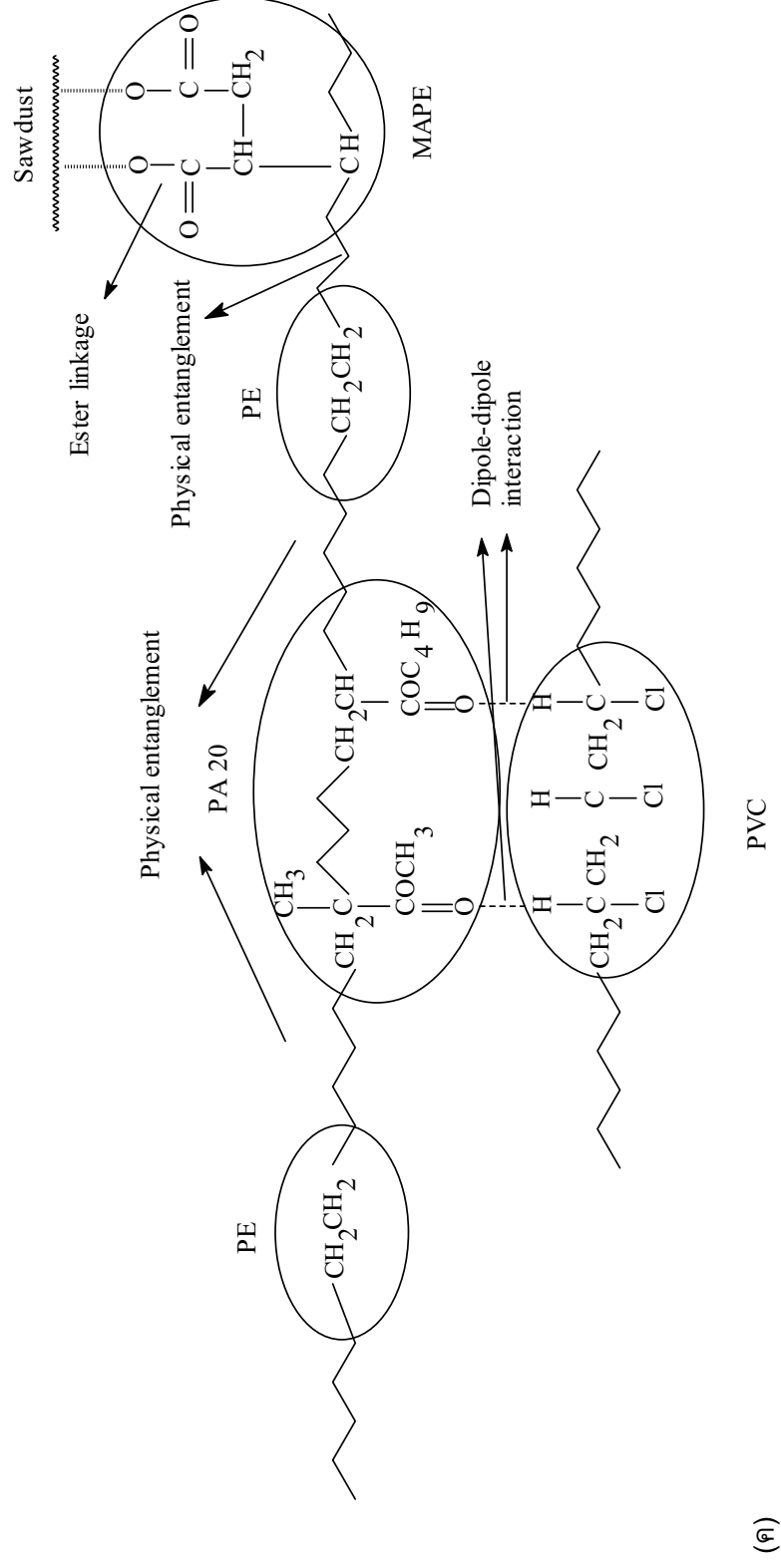
อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบคอมโพสิตที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE ที่มี PA20 เป็นสารช่วยผสม ซีลี้อยและสารคู่ควบและ/หรือสารช่วยผสมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.33 สำหรับ Silane A-137 นั้นอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นในส่วนที่ไม่มีซีว คือ การพันเกี่ยวเชิงกล (Physical entanglement) เกิดการเกี่ยวพันกับพอลิเมอร์ผสม ส่วนปลายที่มีซีวของหมู่ไฮดรอกซิลสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนหรือแรงยึดเหนี่ยวแบบไดโพลกับหมู่ไฮดรอกซิลของซีลี้อย ในทำนองเดียวกันการใช้ Silane A-1100 ส่วนที่มีซีวของโมเลกุล Silane หรือหมู่ไฮดรอกซิลสามารถเกิดการสร้างพันธะกับซีลี้อยได้เช่นเดียวกับการเกิดของ Silane A-137 แต่ปลายอีกด้านที่มีซีวสามารถเกิดแรงยึดเหนี่ยวแบบไดโพลกับองค์ประกอบของ PVC ในพอลิเมอร์ผสมได้ เมื่อพิจารณา MAPE พบว่าหมู่แอนไฮดรายด์ของ MAPE สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีกับซีลี้อย และส่วนที่เป็นพอลิเอทิลีนของ MAPE สามารถเกิดการเกี่ยวพันเชิงกลได้กับโมเลกุลของพอลิเมอร์ผสมที่แสดงถึงความไม่มีซีว

เมื่อเปรียบเทียบผลของสารคู่ควบ Silane A-137 Silane A-1100 และ MAPE พบว่าการใช้สารคู่ควบ MAPE ให้การเพิ่มขึ้นของสมบัติเชิงกลโดยรวมมากกว่าการใช้สารคู่ควบ Silane A-137 และ Silane A-1100 เมื่อเปรียบเทียบในปริมาณการใช้ที่เท่ากัน เนื่องจาก MAPE สามารถสร้างพันธะโควาเลนต์กับซีลีเนียมได้ จากปฏิกิริยาระหว่าง MA และ OH group นอกจากนี้ยังเกิดขึ้นเนื่องจากความยาวของสายโซ่ของ PE ใน MAPE มีมากกว่าความยาวสายโซ่ของหมู่ไฮโดรคาร์บอนในโครงสร้างของ Silane A-137 ทำให้เกิดการพันเกี่ยวเชิงกลได้มากกว่า

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารคู่ควบ Silane ด้วยกันเองพบว่า Silane A-137 ซึ่งมีหมู่ปลายข้างหนึ่งเป็นส่วนไม่มีขั้ว ให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีกว่าการใช้ Silane A-1100 ซึ่งมีหมู่ปลายข้างหนึ่งเป็นส่วนที่มีขั้ว (หมู่อะมิโน) ทั้งนี้เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE นั้นส่วนของ LDPE สามารถเกิดแรงยึดเหนี่ยวกับส่วนที่ไม่มีขั้วใน Silane A-137 ได้แต่ในกรณีของ Silane A-1100 ส่วนของ PE ไม่สามารถเข้ากันได้กับ Silane A-1100 ดังนั้นเมื่อใช้ MAPE หรือ Silane A-137 ที่มีปลายข้างหนึ่งเป็นส่วนที่ไม่มีขั้ว จึงให้สมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดีกว่าการใช้ Silane A-1100 ที่ปลายทั้งสองข้างเป็นส่วนที่มีขั้ว นอกจากนี้ปริมาณของ Silane A-137 A-1100 และ MAPE ที่ให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด คือ 3% โดยน้ำหนักของซีลีเนียม



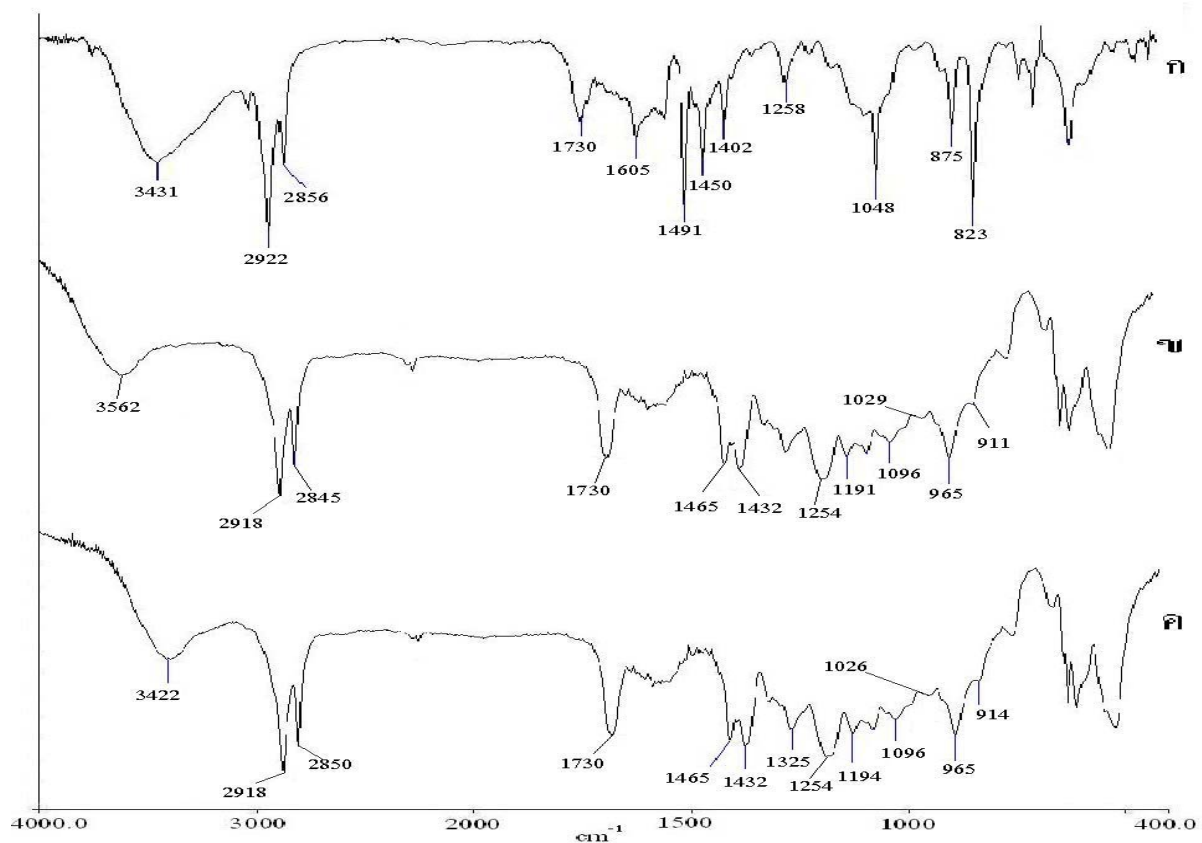




รูปที่ 4.33 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในคอมโพสิตจากการใช้ (ก) Silane A-137 (ข) Silane A-1100 และ (ค) MAPE

4.3.4 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของคอมโพลีเมอร์ที่ใช้ Silane และ MAPE

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาถึงผลของสมบัติเชิงกลของคอมโพลีเมอร์ที่ใช้สารคู่ควบและสารช่วยผสมในปริมาณคงที่ที่ 3% ในอัตราส่วนต่าง ๆ ได้แก่ Silane A-137: MAPE Silane A-1100:MAPE 1:1 1:2 และ 2:1 โดยใช้ปริมาณซีลีเนียมร้อยละ 10 20 30 และ 40

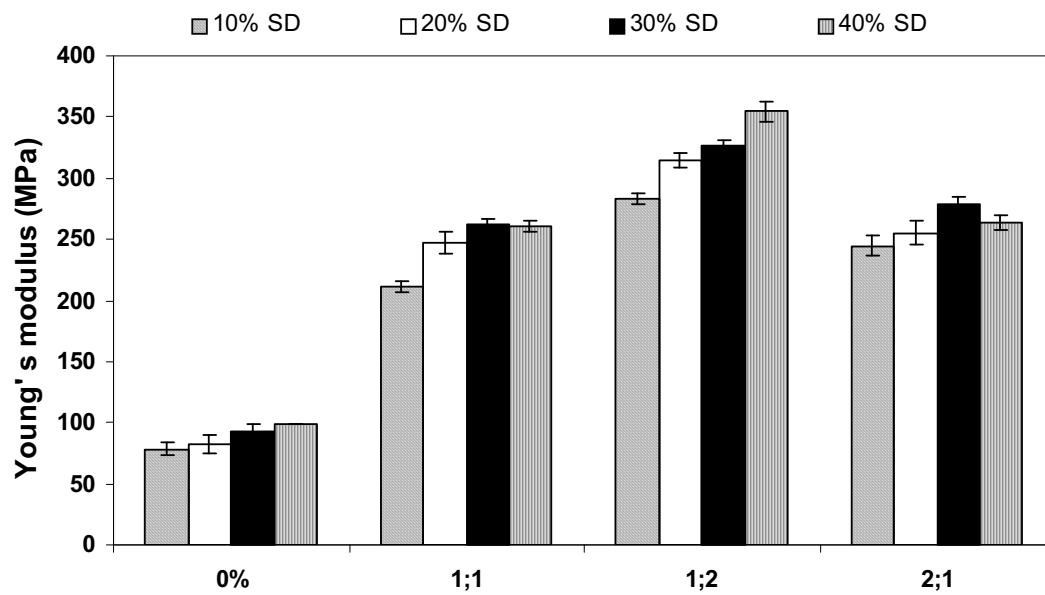


รูปที่ 4.34 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสม PVC/LDPE/PA20 (ก) ไม่มี Silane หรือ MAPE (ข) ผสม Silane A-137 และ MAPE (1:1) และ (ค) Silane A-1100 และ MAPE (1:1)

จากรูปที่ 4.34 พบว่าการใช้สารคู่ควบ Silane A-137 และสารช่วยผสม MAPE ให้พีกที่เหมือนกับการใช้สารคู่ควบ Silane A-137 หรือสารช่วยผสม MAPE เพียงสารเดียว กล่าวคือ ให้พีกที่ตำแหน่ง $1020-1030\text{ cm}^{-1}$, $1095-1190\text{ cm}^{-1}$ และ 1734 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากการสั่นของ Si-O-C stretching, Si-OH stretching และ C=O stretching ตามลำดับ สำหรับการใส่สารคู่ควบ Silane A-1100 และสารช่วยผสม MAPE แสดงพีกที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับการใช้ Silane A137 และ MAPE

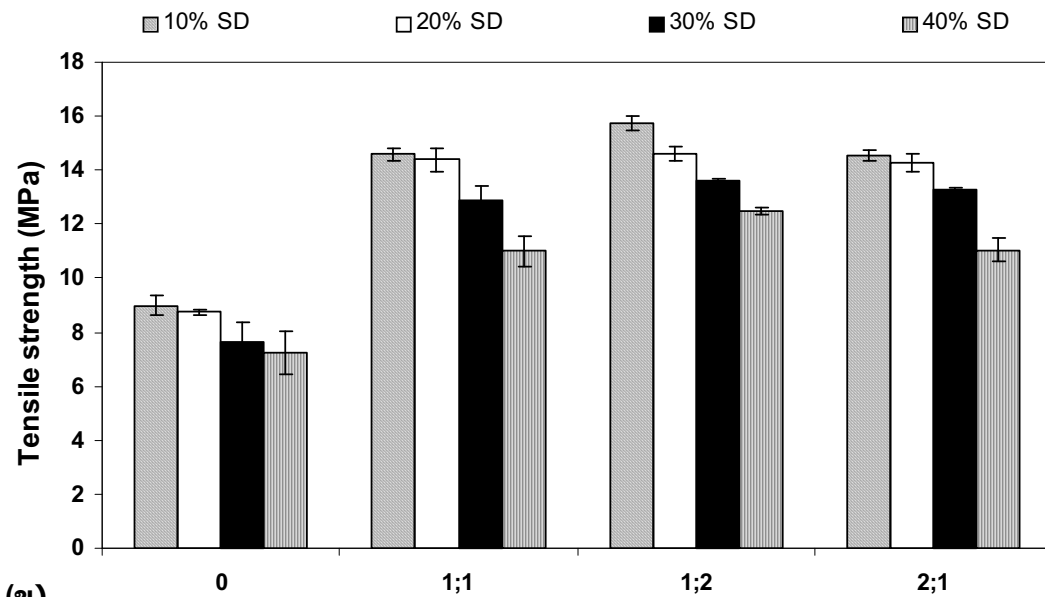
4.3.5 ผลของ Silane:MAPE ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต

(ก) Silane A-137:MAPE



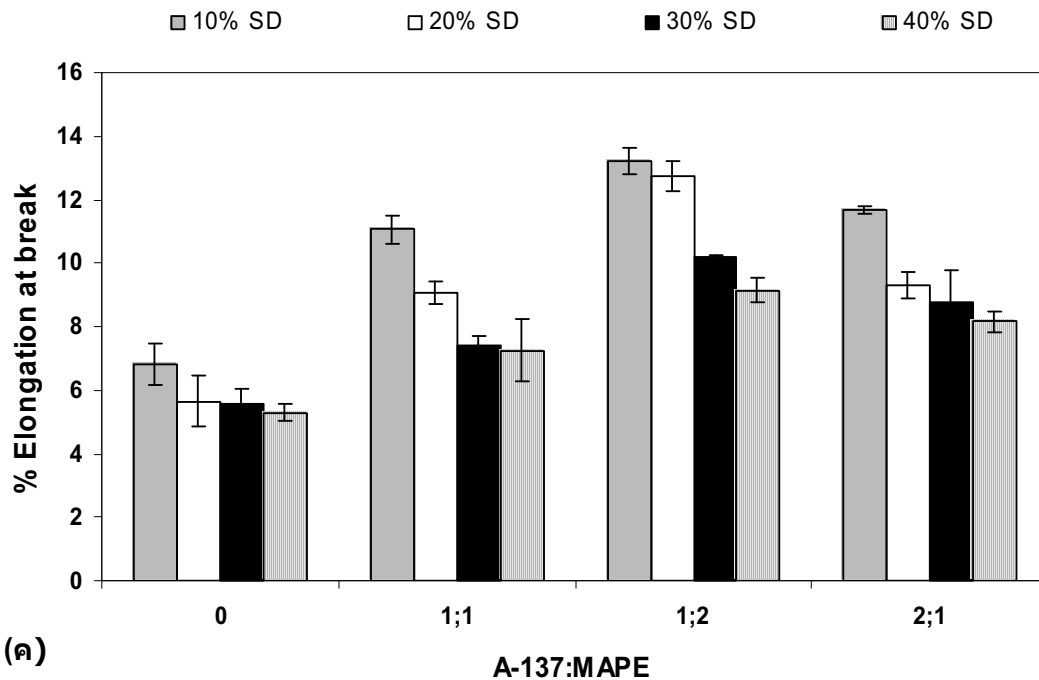
(ก)

A-137: MAPE



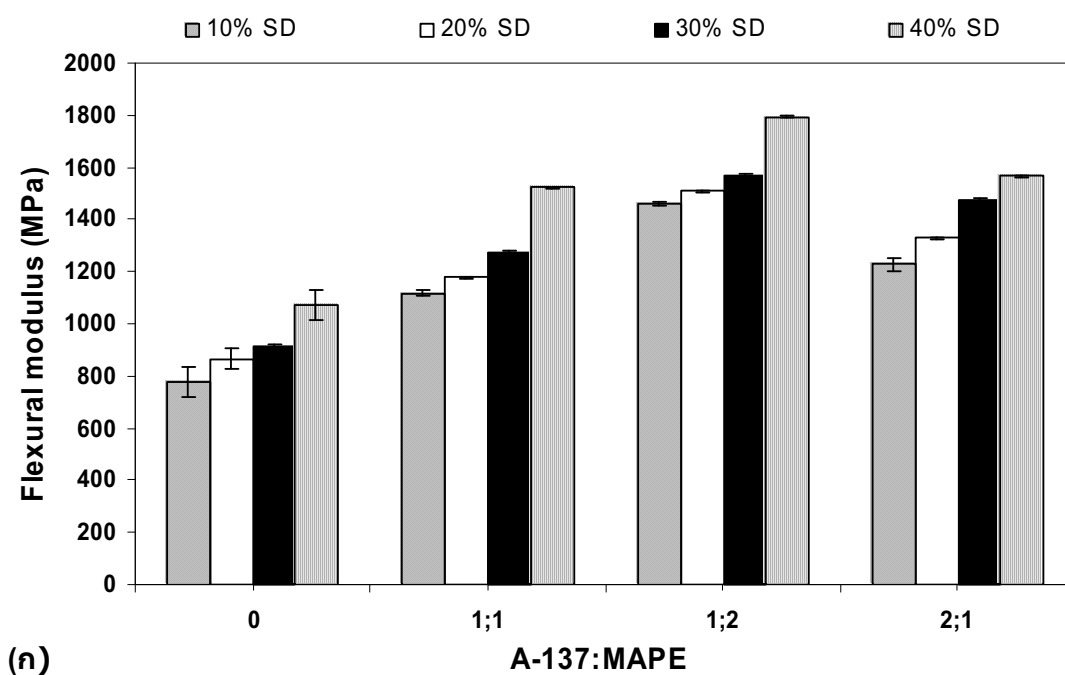
(ข)

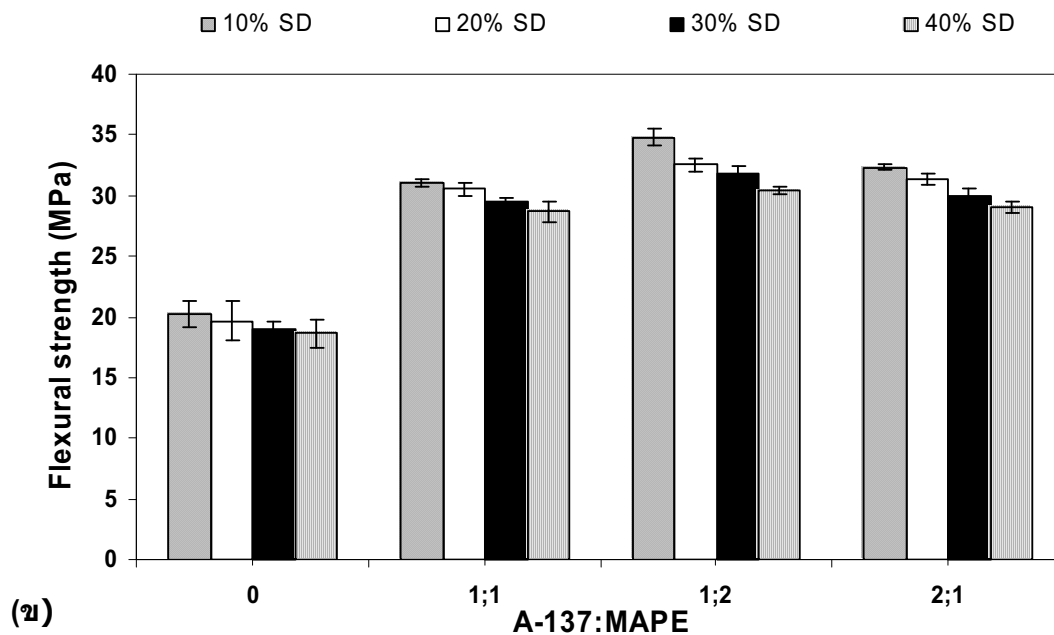
A-137: MAPE



รูปที่ 4.35 สมบัติด้านแรงดึงของคอมโพสิตที่ใช้ Silane A-137:MAPE (ก) มอดุลัส (ข) ความแข็งแรงดึง และ (ค) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด

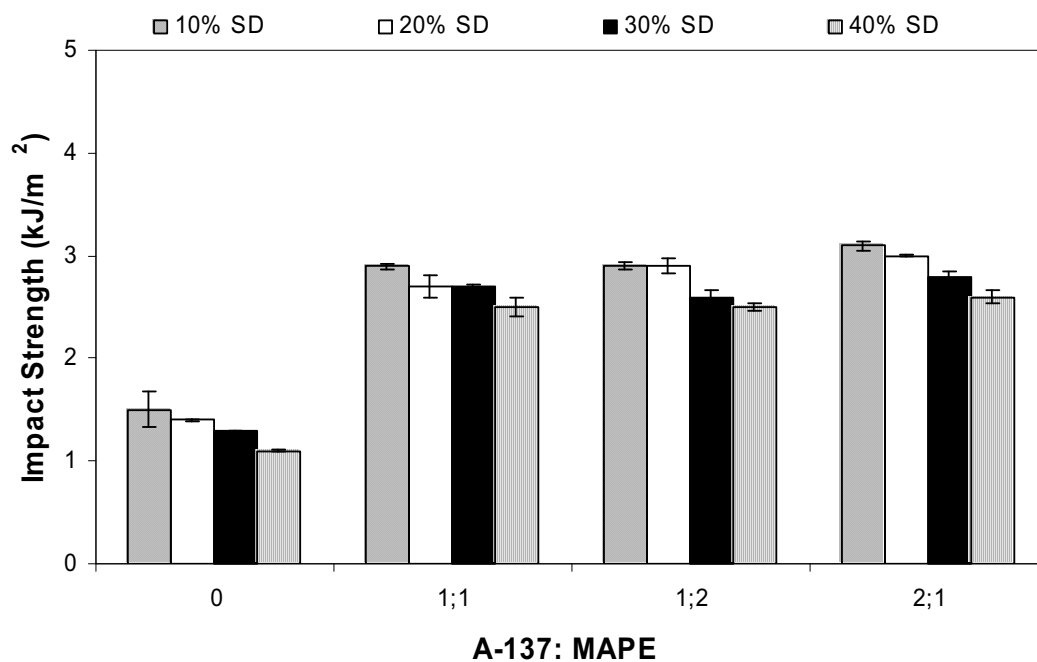
รูปที่ 4.35 แสดงสมบัติด้านแรงดึง ได้แก่ มอดุลัส ความแข็งแรงดึงและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของคอมโพสิตที่ใช้ Silane A-137:MAPE ในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า อัตราส่วนของ Silane A-137:MAPE ต่าง ๆ ทำให้สมบัติด้านแรงดึงของคอมโพสิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สำหรับปริมาณซีลี้อยที่แตกต่างกันให้ผลการทดลองในทำนองเดียวกัน





รูปที่ 4.36 สมบัติด้านการโค้งงอของคอมโพสิตที่ใช้ Silane A-137:MAPE (ก) มอดุลัสโค้งงอ และ (ข) ความแข็งแรงโค้งงอ

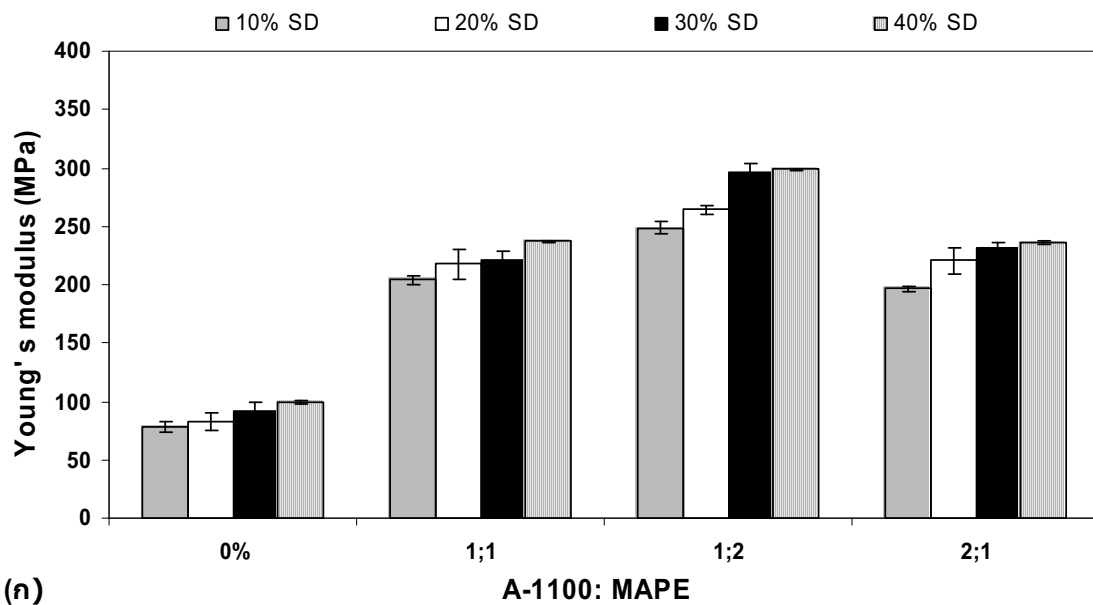
สมบัติด้านการโค้งงอของคอมโพสิตสามารถปรับปรุงได้โดยใช้ Silane A-137:MAPE ในอัตราส่วนต่าง ๆ ในทุก ๆ ปริมาณขี้เลื่อย (รูปที่ 4.36) โดยการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งแรงโค้งงอให้ผลที่เด่นชัดกว่าค่ามอดุลัสโค้งงอ



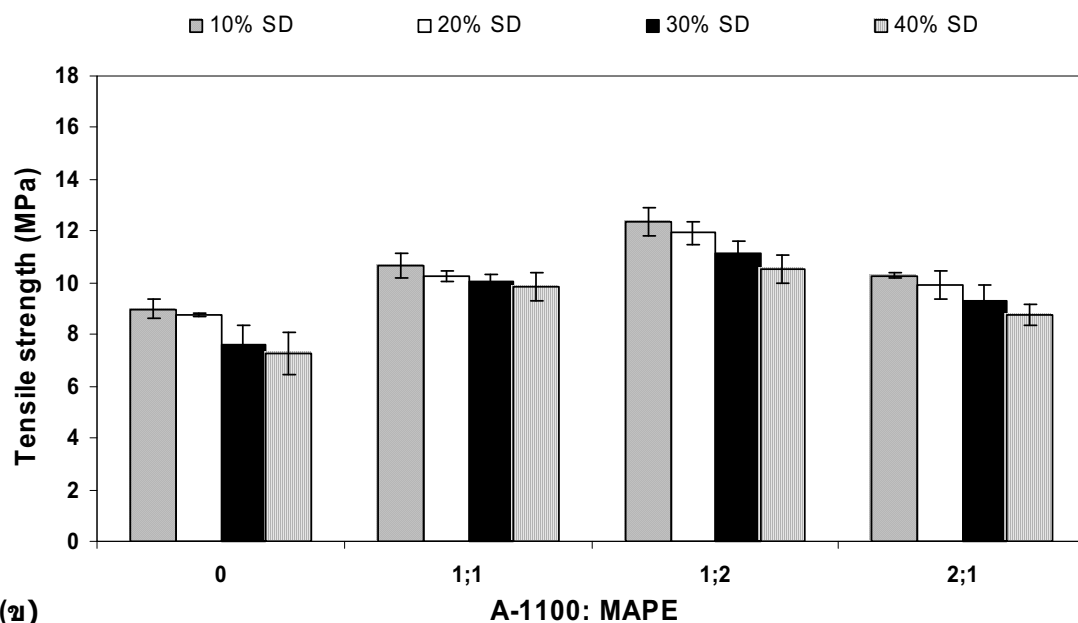
รูปที่ 4.37 ความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิตที่ใช้ Silane A-137:MAPE

ความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้นจากการใช้สารคู่ควบและสารช่วยผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.37 โดยที่ปริมาณซีลี้อย 10% ให้ค่าความแข็งแรงกระแทกที่สูงที่สุดจากการปรับปรุงด้วยสารคู่ควบและสารช่วยผสม Silane A-137:MAPE ในอัตราส่วนต่าง ๆ

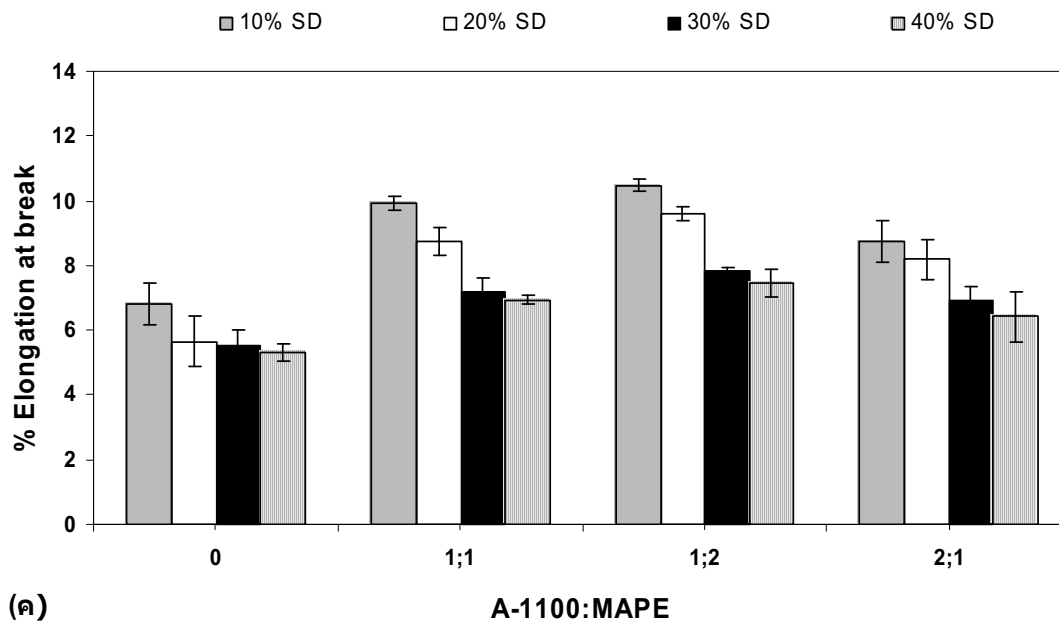
(ข) Silane A-1100:MAPE



(ก)

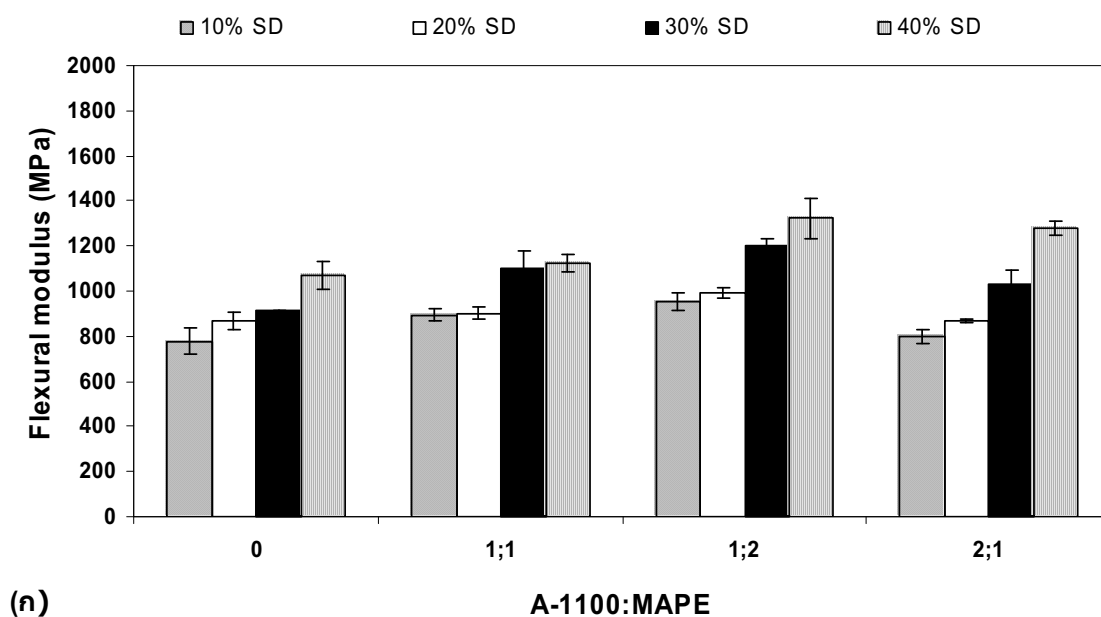


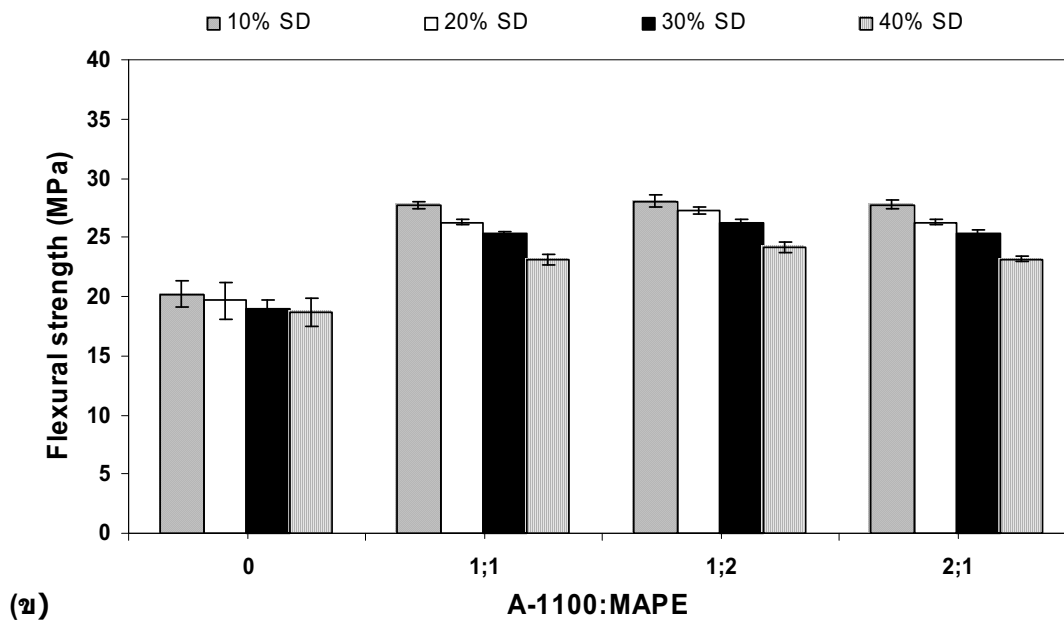
(ข)



รูปที่ 4.38 สมบัติด้านแรงดึงของคอมโพสิตที่ใช้ Silane A-1100:MAPE (ก) โมดูลัส (ข) ความแข็งแรงดึง และ (ค) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด

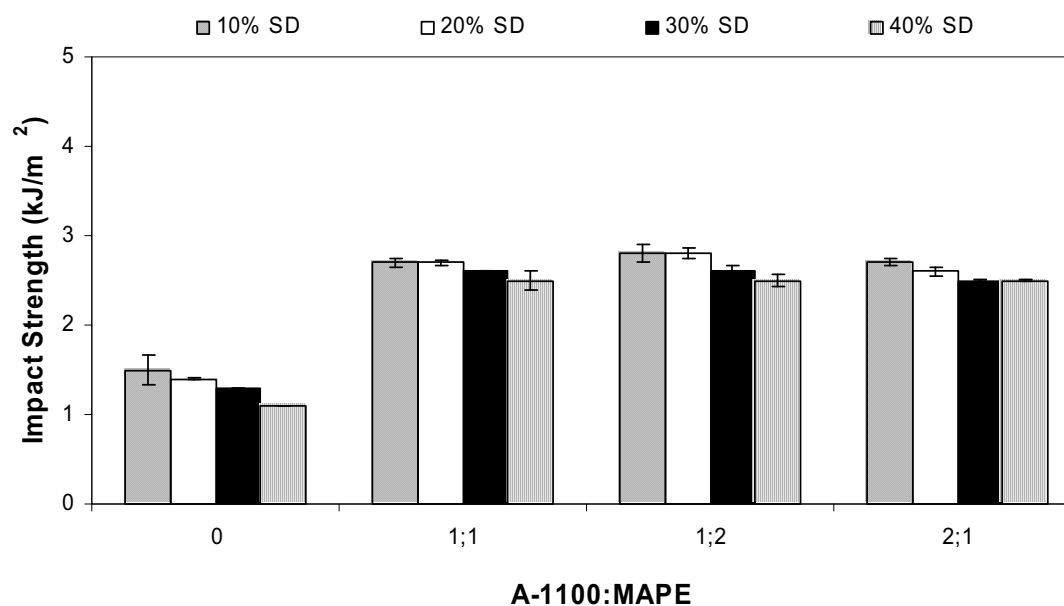
รูปที่ 4.38 แสดงค่าโมดูลัส ความแข็งแรงดึงและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของคอมโพสิตที่ใช้ Silane A-1100:MAPE ในอัตราส่วน 1:1 1:2 และ 2:1 พบว่าที่อัตราส่วนต่าง ๆ ให้ค่าสมบัติด้านแรงดึงที่เพิ่มขึ้นในทุก ๆ ปริมาณขึ้นเรื่อยเมื่อเปรียบเทียบกับคอมโพสิตที่ไม่มีการใช้สารคู่ควบและ/หรือสารช่วยผสม





รูปที่ 4.39 สมบัติด้านการโค้งงอของคอมโพสิตที่ใช้ Silane A-1100:MAPE (ก) มอดุลัสโค้งงอ และ (ข) ความแข็งแรงโค้งงอ

สมบัติด้านการโค้งงอมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากการใช้สารคู่ควบและสารช่วยผสม Silane A-1100:MAPE ในอัตราส่วนต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.39



รูปที่ 4.40 ความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิตที่ใช้ Silane A-1100:MAPE

ความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้นจากการใช้ Silane A-1100:MAPE ในอัตราส่วนต่าง ๆ (รูปที่ 4.40) เช่นเดียวกับสมบัติด้านแรงดึงและสมบัติด้านการโค้งงอ

จากการใช้สารคู่ควบต่อสารช่วยผสม Silane A-137:MAPE และ Silane A-1100:MAPE ในอัตราส่วน 1:1 1:2 และ 2:1 พบว่าแนวโน้มสมบัติเชิงกลโดยรวมของคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้นในทุก ๆ อัตราส่วน โดยการใช้ Silane A-137:MAPE ในทุก ๆ อัตราส่วนให้สมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดีกว่าการใช้ Silane A-1100:MAPE ดังแสดงในตารางที่ 4.11-4.14 ทั้งนี้เนื่องจากความไม่มีขั้วของ Silane A-137 ที่เข้ากันได้กับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE ที่ใช้เป็นเมทริกซ์ ซึ่งสัมพันธ์กับการใช้ Silane A-137 เพียงอย่างเดียวในหัวข้อที่ 4.3.2.1 ที่ให้สมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดีกว่าการใช้ Silane A-1100 ในหัวข้อที่ 4.3.2.2 นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราส่วนของ Silane A-137:MAPE หรือ Silane A-1100:MAPE ที่ 1:2 ให้แนวโน้มที่ดีกว่าการใช้ที่อัตราส่วน 1:1 หรือ 2:1 ซึ่งคาดว่าเกิดจากปริมาณ MAPE ที่มากกว่าส่งผลให้ความไม่มีขั้วของสารช่วยผสมมากกว่าจึงเข้ากันกับพอลิเมอร์ผสมได้มากกว่า สมบัติเชิงกลโดยรวมจึงดีกว่าการใช้ในอัตราส่วนอื่น ๆ

ตารางที่ 4.11 สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตจาก PVC/LDPE ที่ใช้ซีลี้อยปริมาณ 10% และมีการใช้สารคู่ควบ Silane A-137 และ/หรือสารช่วยผสม MAPE ในปริมาณต่าง ๆ

Mechanical properties	A-137:MAPE					
	0:0	1:0	0:1	1:1	1:2	2:1
Young's modulus (MPa)	78.4	204.0	273.9	211.3	283.7	244.8
Tensile strength (MPa)	8.9	13.8	15.3	14.6	15.7	14.5
%Elongation at break	6.8	10.9	10.6	11.1	13.2	11.7
Flexural strength (MPa)	20.2	34.7	37.9	31.0	34.8	32.3
Flexural modulus (MPa)	777.1	1239.3	1442.4	1118.4	1457.5	1227.6
Impact strength (kJ/m ²)	1.5	3.5	3.0	2.9	2.9	3.1

ตารางที่ 4.12 สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตจาก PVC/LDPE ที่ใช้ซีลี้อยปริมาณ 30% และมีการใช้สารคู่ควบ Silane A-137 และ/หรือสารช่วยผสม MAPE ในปริมาณต่าง ๆ

Mechanical properties	A-137:MAPE					
	0:0	1:0	0:1	1:1	1:2	2:1
Young's modulus (MPa)	92.3	283.5	337.9	261.6	326.7	278.9
Tensile strength (MPa)	7.6	11.7	12.3	12.9	13.6	13.3
%Elongation at break	5.6	8.8	8.6	7.4	10.2	8.8
Flexural strength (MPa)	19.0	28.5	32.4	29.6	31.8	30.0
Flexural modulus (MPa)	913.7	1567.8	1607.1	1276.6	1566.9	1475.6
Impact strength (kJ/m ²)	1.3	3.2	2.9	2.7	2.6	2.8

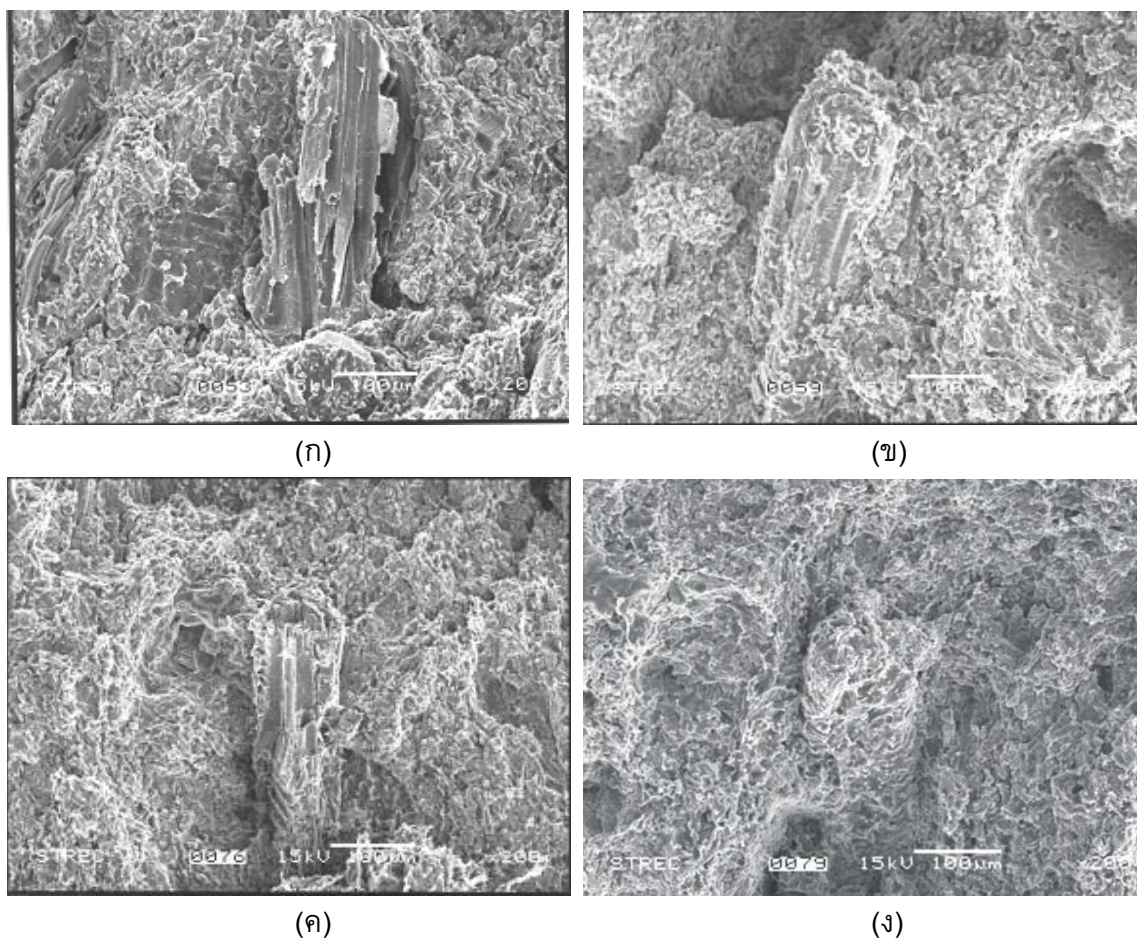
ตารางที่ 4.13 สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตจาก PVC/LDPE ที่ใช้ซีลี้อยู่ปริมาณ 10% และมีการใช้สารคู่ควบ Silane A-1100 และ/หรือสารช่วยผสม MAPE ในปริมาณต่าง ๆ

Mechanical properties	A-1100:MAPE					
	0:0	1:0	0:1	1:1	1:2	2:1
Young's modulus (MPa)	78.4	190.9	273.9	204.19	248.7	196.3
Tensile strength (MPa)	8.9	10.5	15.3	10.6	12.4	10.3
%Elongation at break	6.8	10.3	10.4	9.9	10.5	8.8
Flexural strength (MPa)	20.2	28.3	37.9	27.7	28.1	27.8
Flexural modulus (MPa)	777.1	1145.4	1442.4	897.4	952.5	797.3
Impact strength (kJ/m ²)	1.5	3.2	3.0	2.7	2.8	2.7

ตารางที่ 4.14 สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตจาก PVC/LDPE ที่ใช้ซีลี้อยู่ปริมาณ 30% และมีการใช้สารคู่ควบ Silane A-1100 และ/หรือสารช่วยผสม MAPE ในปริมาณต่าง ๆ

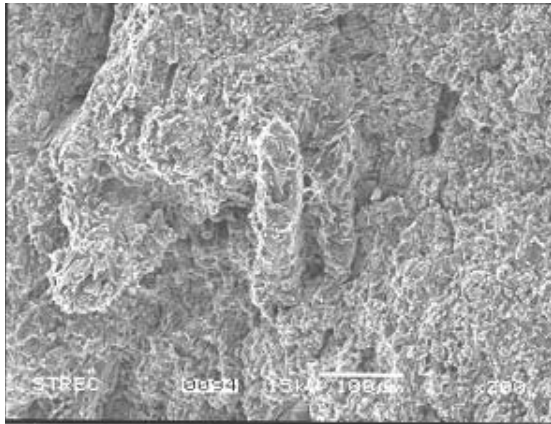
Mechanical properties	A-1100:MAPE					
	0:0	1:0	0:1	1:1	1:2	2:1
Young's modulus (MPa)	92.3	270.7	337.9	220.8	297.0	231.1
Tensile strength (MPa)	7.6	10.0	12.3	10.1	11.2	9.3
%Elongation at break	5.6	7.9	8.6	7.2	7.8	6.9
Flexural strength (MPa)	19.0	26.5	32.4	25.3	26.2	25.3
Flexural modulus (MPa)	913.7	1350.6	1607.1	1102.8	1204.8	1028.3
Impact strength (kJ/m ²)	1.3	3.1	2.9	2.6	2.6	2.5

4.3.6 ผลของ Silane และ/หรือ MAPE ที่มีผลต่อสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต

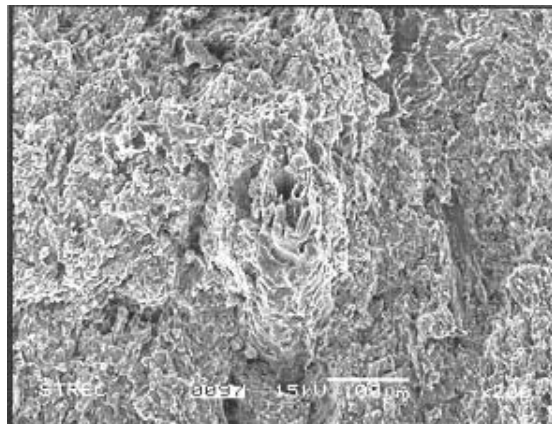


รูปที่ 4.41 สัณฐานวิทยาของคอมโพสิตระหว่าง PVC/LDPE ที่ใช้ PA20 (ก) ไม่มีการใช้สารคู่ควบ และสารช่วยผสม (ข) ใช้สารคู่ควบ Silane A-137 (3%) (ค) ใช้สารคู่ควบ Silane A-1100 (3%) และ (ง) ใช้สารช่วยผสม MAPE (3%)

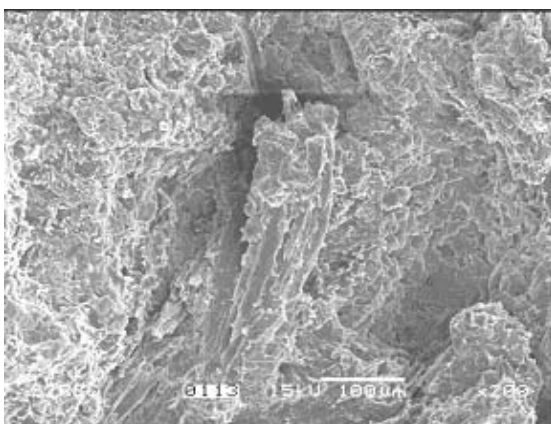
จากสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตในรูปที่ 4.41 พบว่าคอมโพสิตที่ไม่มีการใช้สารคู่ควบ Silane และสารช่วยผสม MAPE (รูปที่ 4.42 (ก)) แสดงถึงวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสมที่เป็นเมทริกซ์ที่ค่อนข้างหยาบเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารคู่ควบ Silane และ/หรือสารช่วยผสม MAPE (รูปที่ 4.42 (ข)-(ง)) ที่แสดงถึงวัฏภาคของเมทริกซ์ที่ละเอียดกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้สารคู่ควบ Silane และ/หรือสารช่วยผสม MAPE ทำให้มีพอลิเมอร์มาปกคลุมพื้นผิวของซีลื้อยซึ่งไม่พบในตัวอย่างที่ไม่มีการใช้และไม่พบความแตกต่างทางสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตจากการใช้สารคู่ควบ Silane และ/หรือสารช่วยผสม MAPE



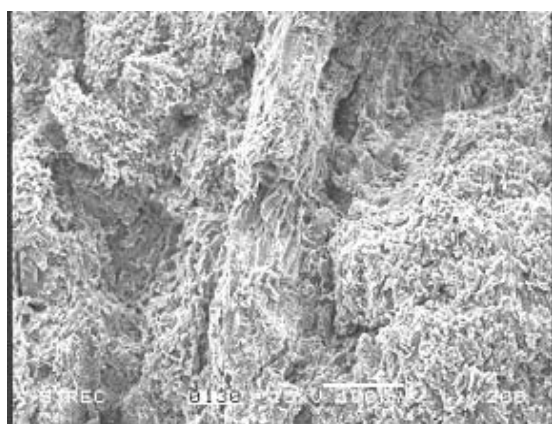
(ก)



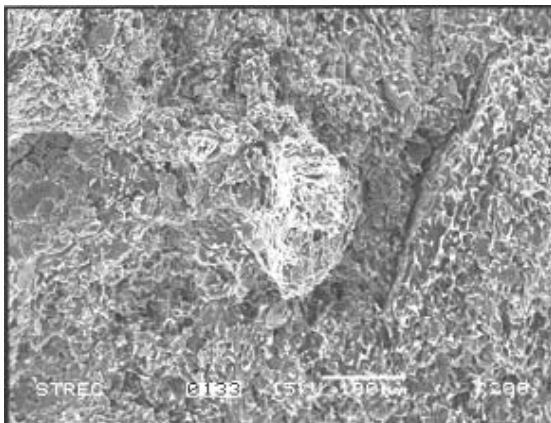
(ข)



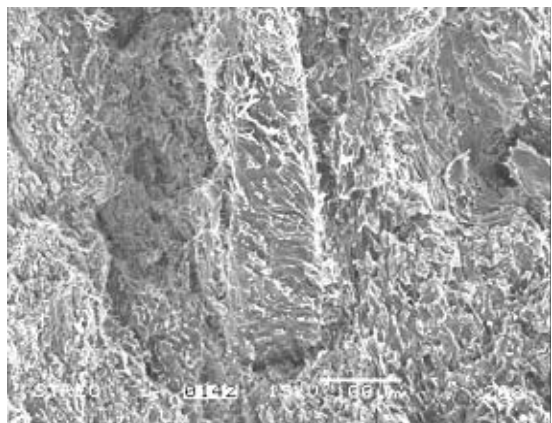
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 4.42 สัณฐานวิทยาของคอมโพสิตระหว่าง PVC/LDPE (100/40) ที่ใช้ PA20 โดยใช้สารคู่ควบ Silane และสารช่วยผสม MAPE ในอัตราส่วนต่าง ๆ (ก) Silane A-137:MAPE 1:1 (ข) Silane A-137:MAPE 1:2 (ค) Silane A-137:MAPE 2:1 (ง) Silane A-1100:MAPE 1:1 (จ) Silane A-1100:MAPE 1:2 และ (ฉ) Silane A-1100:MAPE 2:1

จากการใช้สารคู่ควบ Silane และ/หรือสารช่วยผสม MAPE ในรูปสารผสมพบว่า สันฐานวิทยาของตัวอย่างคอมโพสิตมีลักษณะคล้ายกับตัวอย่างคอมโพสิตที่มีการใช้สารคู่ควบหรือสารช่วยผสมเพียงชนิดเดียว กล่าวคือ มีการปกคลุมพื้นผิวของซีเมนต์ด้วยพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังไม่พบความแตกต่างจากการใช้อัตราส่วนของสารผสมที่อัตราส่วนแตกต่างกัน (1:1, 1:2 หรือ 2:1) ดังแสดงในรูปที่ 4.42

4.3.7 ผลของ Silane และ/หรือ MAPE ที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิต

ตารางที่ 4.15 อุณหภูมิการสลายตัวของ PVC ในคอมโพสิตที่ปริมาณซีเมนต์ 10% และ 30% ที่มีการใช้สารคู่ควบและ/หรือสารช่วยผสมที่ปริมาณ 3%

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัว (°C)			
	10% SD		30% SD	
	Onset	peak	Onset	peak
PVC 100 %	272.6	283.2	272.6	283.2
Sawdust	251.9	271.3	251.9	271.3
PVC : LDPE : PA 20	240.3	261.5	230.5	250.3
PVC : LDPE : PA 20 : 3% A-137	245.9	268.5	237.4	258.9
PVC : LDPE : PA 20 : 3% A-1100	250.4	269.3	240.2	262.9
PVC : LDPE : PA 20 : 3% MAPE	251.3	274.4	250.8	274.2

ตารางที่ 4.16 อุณหภูมิการสลายตัวของ PVC ในคอมโพสิตที่ปริมาณซีเมนต์ 10% และ 30% ที่มีการใช้สารคู่ควบและ/หรือสารช่วยผสมที่ปริมาณ 5%

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัว (°C)			
	10% SD		30% SD	
	Onset	peak	Onset	peak
PVC 100 %	272.6	283.2	272.6	283.2
Sawdust	251.9	271.3	251.9	271.3
PVC : LDPE : PA 20	240.3	261.5	230.5	250.3
PVC : LDPE : PA 20 : 5% A-137	241.0	262.7	237.7	256.9
PVC : LDPE : PA 20 : 5% A-1100	243.5	268.5	252.8	265.8
PVC : LDPE : PA 20 : 5% MAPE	252.9	271.7	248.0	267.5

จากตารางที่ 4.15 และ 4.16 พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวของ PVC ในคอมโพลีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีการใช้สารคู่ควบ Silane A-137 Silane A-1100 และสารช่วยผสม MAPE ทั้งการใช้ในปริมาณ 3% และ 5% โดยคาดว่าเกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดอัตรากิริยาระหว่างพอลิเมอร์ผสม สารคู่ควบและ/หรือสารช่วยผสม และซีลี้อย เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิการสลายตัวของ Silane A-137 Silane A-1100 และ MAPE พบว่าการใช้สารคู่ควบหรือสารช่วยผสมให้อุณหภูมิการสลายตัวของ PVC ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.17 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ PVC ในคอมโพลีจากพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณซีลี้อย 30%ที่มีการใช้สารคู่ควบและ/หรือสารช่วยผสมที่ปริมาณ 3%

ตัวอย่าง	T_g ($^{\circ}\text{C}$)
PVC/LDPE/PA20/SD	88.2
PVC/LDPE/PA20/SD + Silane A-137	86.5
PVC/LDPE/PA20/SD + Silane A-1100	87.4
PVC/LDPE/PA20/SD + MAPE	86.0
PVC/LDPE/PA20/SD + (1:1) Silane A-137:MAPE	86.5
PVC/LDPE/PA20/SD + (1:2) Silane A-137:MAPE	86.4
PVC/LDPE/PA20/SD + (2:1) Silane A-137:MAPE	86.3
PVC/LDPE/PA20/SD + (1:1) Silane A-1100:MAPE	85.8
PVC/LDPE/PA20/SD + (1:2) Silane A-1100:MAPE	85.3
PVC/LDPE/PA20/SD + (2:1) Silane A-1100:MAPE	85.8

จากการทดสอบหาอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของตัวอย่างคอมโพลีจากเทคนิค DMA ในตารางที่ 4.17 พบว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของคอมโพลีที่มีการใช้สารคู่ควบ Silane A-137 Silane A-1100 หรือสารช่วยผสม MAPE มีค่าต่ำกว่าคอมโพลีที่ไม่มีการใช้สารคู่ควบ Silane A-137 Silane A-1100 หรือสารช่วยผสม MAPE นอกจากนี้การใช้สารผสมทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงทั้งในกรณีของการใช้ Silane A-137 และ MAPE รวมถึง Silane A-1100 และ MAPE ส่วนอัตราส่วนและชนิดของสารคู่ควบส่งผลให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกันทั้งในอัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 2:1 เนื่องจากอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ PVC เกิดขึ้นจากแรงยึดเหนี่ยวแบบไดโพลภายในโมเลกุล ดังนั้นการลดลงของอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วอาจเกิดขึ้นเนื่องจากการลดลงของแรงยึดเหนี่ยวแบบไดโพลซึ่งเกิดจากการเกิดการเชื่อมโยงระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์และส่วนเสริมแรงในคอมโพลี

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE โดยใช้ซีลี้อย่างพาราเป็นสารเสริมแรง ศึกษาวิธีการผสมระหว่างการใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวเพียงขั้นตอนเดียวและการเพิ่มขั้นตอนการผสมโดยใช้เครื่องผสมชนิด 2 ลูกกลิ้ง การใช้สารช่วยผสม ได้แก่ คลอรีเนเตดพอลิเอทิลีน (CPE) พอลิเมอร์ร่วมระหว่างเมทิลเมทาไครเลต และ บิวทิลอะไครเลต (PA 20) และพอลิเมอร์ร่วมระหว่างเอทิลีนและเมทิลอะไครเลต (Elvaloy) ในการปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสมเพื่อให้สมบัติโดยรวมดีขึ้น นอกจากนี้ได้ศึกษาสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมและซีลี้อย่างพารา และศึกษาผลของสารคู่ควบ Silane และ/หรือสารช่วยผสม MAPE ที่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของคอมโพสิต ซึ่งสรุปผลงานวิจัยได้ดังนี้

1. การศึกษาวิธีการผสมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC 100 phr และ LDPE 10 20 30 40 และ 50 phr พบว่าการผสม 2 ขั้นตอน คือ ผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวและเครื่องผสมชนิด 2 ลูกกลิ้งให้สมบัติเชิงกลที่สูงกว่าการผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวเพียงขั้นตอนเดียว และจากการตรวจสอบโครงสร้างของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้อัตราส่วน PVC100 : LDPE10 ด้วยเทคนิค ¹³C-NMR พบว่า PVC ไม่เกิดการตอ้งกับ LDPE ภายใต้สภาวะที่ใช้ในการผสมสำหรับในงานวิจัยนี้

2. การศึกษาผลของการปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้สารช่วยผสม 3 ชนิด คือ CPE PA 20 และ Elvaloy ปริมาณที่ศึกษา 5 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE ซึ่งพบว่าสารช่วยผสมทั้ง 3 ชนิดทำให้สมบัติโดยรวมของพอลิเมอร์ผสมสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับฐานวิทยาศาสตร์ของพอลิเมอร์ผสม คือ เมื่อใช้สารช่วยผสมทำให้ขนาดของ LDPE เล็กลงและสามารถกระจายตัวใน PVC ซึ่งเป็นเมทริกซ์ได้ดีขึ้นโดยชนิดและปริมาณของสารช่วยผสมที่เหมาะสมในการนำพอลิเมอร์ผสมไปทำวัสดุคอมโพสิต คือ PA 20 ปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก LDPE เนื่องจากให้สมบัติโดยรวมสูงกว่า โดยเฉพาะความแข็งแรงกระแทกสูงซึ่งเป็นสมบัติที่จำเป็นในการนำไปทำเป็นวัสดุคอมโพสิตต่อไป

3. การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวของ PVC ในพอลิเมอร์ผสมและคอมโพสิตโดยเทคนิคเทอร์มัลกราวิเมตริกพบว่าที่อัตราส่วนของ PVC100 : LDPE10 อุณหภูมิการสลายตัวของ PVC มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาถ่ายโอนอนุมูลอิสระของพอลิเมอร์ผสมซึ่งเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผสม แต่เมื่อมีสารช่วยผสมหรือซีลี้อย่างพาราให้อุณหภูมิในการสลายตัวมีค่าต่ำลง

4. การศึกษาอุณหภูมิการหลอมเหลว อุณหภูมิการตกผลึกและองค์ความเป็นผลึกของ LDPE ในพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน PVC100 : LDPE10 ระหว่างการผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวเพียงอย่างเดียวและเพิ่มขั้นตอนการผสมโดยใช้เครื่องผสมชนิด 2 ลูกกลิ้ง พบว่าสมบัติดังกล่าวมี

แนวโน้มนำใกล้เคียงกันและเมื่อใช้สารช่วยผสมในพอลิเมอร์ผสมสมบัติที่ได้มีผลใกล้เคียงกับเมื่อยังไม่ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสม

5. การศึกษาสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมและซีลี้อย่างพารา โดยใช้อัตราส่วน PVC100 : LDPE 10 และ 40 phr สารช่วยผสมชนิด PA 20 15 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของ LDPE และปริมาณซีลีอที่ศึกษา คือ 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งพบว่าเมื่อปริมาณไม่มากขึ้นมอดูลัสสูงขึ้น แต่ความแข็งแรงดึงร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงโค้งงอ ความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลง โดยพบว่าคอมโพสิตของพอลิเมอร์ผสมอัตราส่วน PVC100 : LDPE10 ให้สมบัติที่ดีกว่าคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม PVC100 : LDPE40 และคอมโพสิตที่มีสารช่วยผสมให้สมบัติโดยรวมสูงกว่าคอมโพสิตที่ไม่มีสารช่วยผสมเล็กน้อย

6. จากการปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิต PVC100 : LDPE40 (PA20) เสริมแรงด้วยซีลีอในปริมาณต่าง ๆ พบว่าการใช้ Silane A-137, Silane A-1100 หรือ MAPE ทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมของคอมโพสิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัด นอกจากนี้การใช้ Silane A-137 หรือ MAPE ทำให้คอมโพสิตมีสมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดีกว่าการใช้ Silane A-1100 สำหรับการใช้ Silane และ MAPE ร่วมกันทำให้แนวโน้มสมบัติเชิงกลโดยรวมของคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้นในทุก ๆ อัตราส่วน โดยการใช้ Silane A-137:MAPE ในทุก ๆ อัตราส่วน (1:1, 1:2 และ 2:1) ให้สมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดีกว่าการใช้ Silane A-1100:MAPE และอัตราส่วนของ Silane A-137:MAPE หรือ Silane A-1100:MAPE ที่ 1:2 ให้แนวโน้มที่ดีกว่าการใช้ที่อัตราส่วน 1:1 หรือ 2:1

7. สันฐานวิทยาของคอมโพสิตที่มีการเติม Silane A-137, Silane A-1100 หรือ MAPE แสดงถึงการมีพอลิเมอร์มาปกคลุมพื้นผิวของซีลีอ และมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการเติม Silane และ MAPE ร่วมกัน ในอัตราส่วนต่าง ๆ

8. จากสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิตพบว่า อุณหภูมิการสลายตัวของ PVC ในคอมโพสิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีการใช้สารคู่ควบ Silane A-137 Silane A-1100 และสารช่วยผสม MAPE สำหรับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ PVC ในคอมโพสิตมีแนวโน้มลดลงจากการใช้ Silane A-137, Silane A-1100 หรือ MAPE ทั้งในกรณีของการใช้เพียงชนิดเดียวและ 2 ชนิดร่วมกันในอัตราส่วนต่าง ๆ

5.2 ข้อเสนอแนะ

ศึกษาเพิ่มเติมในด้านการทดสอบคุณภาพของชิ้นงานคอมโพสิตในด้านการใช้งานจริง เช่น ทดสอบการทนต่อแสง UV การเปลี่ยนสีของชิ้นงานและการทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศ เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Fang Z., Ma G., Shentu B., Ca B. and Xu C. "Influence of Viscosity Ratio on Morphology of PVC/PE Blend" **Journal of European Polymer**, 36, 2000. 2309-2311.
- [2] Sombatsompop N., Sungsanit K. and Thongpin C. "Analysis of Low-Density Polyethylene-g-Poly(vinyl chloride) Copolymers Formed in Poly(vinyl chloride)/Low-Density Polyethylene Melt Blends with Gel Permeation Chromatography and Solid-State ¹³C-NMR" **Journal of Applied Polymer Science**, 92, 2004. 3167-3172.
- [3] Fang Z., Ma G., Liu C. and Xu C. "Morphology Evolution of Immiscible LDPE/PVC Blends in the Presence of Compatibilizer and Phase Dispersant" **Journal of Applied Polymer Science**, 91, 2004. 763-772.
- [4] Xu C., Fang Z. and Zhong J. " Study on phase dispersion-crosslinking synergism in binary blends of poly(vinyl chloride) with low density polyethylene" **Journal of Polymer**, 38, 1997. 155-158.
- [5] Sombatsompop N., Sungsanit K. and Thongpin C. "Structural Changes of PVC in PVC/LDPE Melt-Blends: Effects of LDPE Content and Number of Extrusion" **Polymer Engineering and Science**, 44, 2004. 487-495.
- [6] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2549. ไม้ยางพารา. [Online]. Available : www.oae.go.th/statistic/export/1301PR.xls
- [7] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. เอกสารประกอบการสอน วิชา สารปรับแต่งพอลิเมอร์. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [8] Paul D.R. and Bucknall C.B. **Polymer Blends** Vol 1. New York : John Wiley & Son. 2000.
- [9] Work W.J. "Defination of Terms Related to Polymer Blends, Composites, and Multiphase Polymeric Materials" **Pure Applied Chemical**, 76, 2004. 1985-2007.
- [10] Jacqueline I. and Kroschwitz. **High performance Polymers and Composite**. New York. 1995.
- [11] Paul D.R. and Bucknall C.B. **Polymer Blends** Vol 2. New York : John Wiley & Son. 2000.
- [12] Dupont company. "DuPont Polymer Modifiers." [Online]. Available : <http://www.DuPont Polymer Modifiers - Compatibilizing polymer blends.htm>.1995
- [13] อิทธิพล แจ่มชัด. เอกสารประกอบการสอนวิชาพอลิเมอร์คอมโพสิต. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [14] M. M. Schwartz . **Composite Materials**. Vol 1. New Jersey : Prentice Hall PTR. 1996.

- [15] กรมป่าไม้. “หลักเกณฑ์การแบ่งไม้เนื้ออ่อนไม้เนื้อแข็งตามมาตรฐานของกรมป่าไม้.” [Online]. Available : <http://www.หลักเกณฑ์การแบ่งไม้เนื้ออ่อนไม้เนื้อแข็งตามมาตรฐานของกรมป่าไม้.htm>. 2004.
- [16] Fung J., Li B., Sun S. and Zeng C. “**Hardwood vs Softwood – Chemistry Aspect.**” [Online]. Available : <http://www.alumni.ca/~libe4b0/chemistry.html>. 2004.
- [17] ESB, Porto, Portugal. “**Hemicellulose.**”[Online]. Available : [www. Hemicellulose.htm](http://www.Hemicellulose.htm). 1996.
- [18] Lignin Chemistry. “**The structure of softwood lignin.**” [Online]. Available : [http://www. The structure of softwood lignin.htm](http://www.The structure of softwood lignin.htm). 2005.
- [19] สุรัชย์ มัจฉาชีพ. **พืชเศรษฐกิจในประเทศไทย**. กรุงเทพมหานคร : แพรวพิทยา. 2535.
- [20] วิชิต สุวรรณปรีชา. ยางพารา. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานกองทุนสงเคราะห์การทำสวนยางกระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2541.
- [21] บัณฑิต ปิยะศิลป์. ไม้ยางพารา. [Online]. Available : <http://www.ThaiNGO.org>. 2549.
- [22] Jones F.R.. **Handbook of polymer-Composites**. Longman Scientifi &Technical. London. 1994.
- [23] TechDirect. **Silane Coupling Agents**. [Online]. Available : <http://www.specialchem4polymers.com/tc/Adhesion-Promoters/index>. 2006.
- [25] Pothan L.A., Thomas S. and Groeninckx. G. “The role of fibre/matrix interactions on the dynamic mechanical properties of chemically modified banana fibre/polyester composites”. **Composites: Part A** ; 37(9) : 2006. 1260-1269.
- [25] P.K. Mallich. **Fiber-reinforced Composites : Material, Manufacturing and Desing**. 2nd ed. Marcel Dekker. New York. 1993.
- [26] Antonucci J.M., Dickens S.H., Fowler B.O., Xu H.H.K. and. McDon W.G. “Chemistry of Silanes: Interfaces in Dental Polymers and Composites”. **Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology**; 110: 2005. 541-558.
- [27] DuPont Polymer Modifiers. **Compatibilizers improve the value of blended or recycled polymers**. [Online]. Available : www.dupont.com/industrial-polymer/plastic/polymers/fusabond.html 2006.
- [28] Ma G., Fang Z. and Xu C. “Phase Dispersion-Crosslinking Synergism in Binary Blend of Poly(vinyl chloride) with Low-Density Polyethylene: Entrapping Phenomenon in PVC/LDPE/DCP Blend” **Journal of Applied Polymer Science**, 88, 2003. 1296-1303.

- [29] Norma E. M. and Marcelo A. V. "Thermal and Mechanical Characterization of Linear LowDensity Polyethylene/Wood Flour Composites" **Journal of Applied Polymer Science**, 90, 2003. 2775-2784.
- [30] Rozman H.D., Kon B. K., Abusamah A., Kumar R. N. and Mohd. Ishak Z. A. "Rubberwood– High-Density Polyethylene Composite: Effect of Filler Size and Coupling Agents on Mechanical Properties" **Journal of Applied Polymer Science**, 69, 1998. 1993-2004.
- [31] Liao B., Huang Y. and Cong G. "Influence of Modified Wood Fibers on the Mechanical Properties of Wood Fiber-Reinforced Polyethylene" **Journal of Applied Polymer Science**, 66, 1997. 1561-1568.
- [32] Zhang F., Qiu W., Yang L., Endo T. and Hirotsu T. "Crystallization and Melting Behaviors of Maleated Polyethylene and Its Composite with Fibrous Cellulose" **Journal of Applied Polymer Science**, 89, 2003. 3292-3300.
- [33] Canche'-Escamilla G., Cauich-Cupul J.I., Mendiza'bal E., Puig J.E., Va'zquez-Torres H. and Herrera-Franco P.J. "Mechanical properties of acrylate-grafted henequen cellulose fiber and their application in composites" **Composite Part A**, 30, 1999. 349-359.
- [34] Sombatsompop N. and Chaochanchaikul K. "Average Mixing Torque, Tensile and Impact Properties and Thermal Stability of Poly(vinyl chloride)/Sawdust Composites with Different Silane Coupling Agents" **Journal of Applied Polymer Science**, 96, 2005. 213-221.
- [35] กนิษฐา อังกรรัตน์. "การศึกษาสมบัติของพอลิพรอพิลีนโดยใช้ซีลี้อยจากไม้เต็งนอกเป็นเป็นสารเสริมแรง." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.
- [36] Fernanda M.B., Costa T.H.S. and Carvalho D.L. "Polypropylene-Wood Fiber Composites: Effect of Treatment and Mixing Conditions on Mechanical Properties". **Journal of Applied Polymer Science**; 65 : 1997.1227-1235.
- [37] Rajeev K., Mohan K. and Ramani N. "Biofiber - Reinforced Polypropylene Composites". **Journal of Polymer Engineering and Science**; 37(2) : 1997.476-483.
- [38] Balasuriya P.W., Ye L., Mai Y.W and Wu J. "Mechanical Properties of Wood Flake-Polyethylene Composites. II. Interface Modification". **Journal of Applied Polymer Science**; 83 : 2002.2505-2521.

- [39] Miller A.C. and Berg J.C. "Effect of silane coupling agent adsorbate structure on adhesion performance with a polymeric matrix". **Composites: Part A**; **34(4)** : 2003. 327-332.
- [40] Pickering K.L., Abdalla A., McDonald A.G. and Franich R.A. "The effect of silane coupling agents on radiata pine fibre for use in thermoplastic matrix composites". **Composites: Part A**; **34(10)**: 2003. 915-926.
- [41] Abu-Sharkh B.F. and Hamid H. "Degradation study of date palm fibre/polypropylene composites in natural and artificial weathering: mechanical and thermal analysis". **Polymer Degradation and Stability**; 85(3): 2004. 967-975.
- [42] ASTM D 638, "Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastic (Metric)" **American Society for Testing and Materials**. Philadelphia. 1993.
- [43] ASTM D 790, "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastic and Electrical Insulating Materials" **American Society for Testing and Materials**. Philadelphia. 1993.
- [44] ASTM D 256, "Standard Test Methods for Impact Resistance of Plastic and Electrical Insulating Materials" **American Society for Testing and Materials**. Philadelphia 1993.
- [45] Specialchem S.A. "**Tin Stabilizers Center-Thermal oxidative degradation of PVC.**" [Online]. Available : <http://www.specialchem4polymers.com/home/forgot/index.aspx>. 2505.
- [46] Galen W.E. **Instrumental Methods of Chemical Analysis**. United States of America 1985. 95-98.
- [47] Skoog D.A., Holler F.J. and Nieman T.A. **Principles of Instrumental Analysis**. United States of America 1998. 410-411.
- [48] Mengeloglu F., Matuana L.M. and King J.A. **Journal of Vinyl Additive Technology**, 6, 2000. pp. 153.
- [49] Sombatsompop N. and Phromchirasuk C. "Effects of Acrylic Based Processing Aids on Processability, Rheology, Thermal and Structural Stability, and Mechanical Properties of PVC/Wood Sawdust Composites" **Journal of Applied Polymer Science**, 92, 2004. 782-790.
- [50] Thongpin C., Santavitee O. and Sombatsompop N. **Journal of Vinyl and Additive Technology**, (submitted).
- [51] Sombatsompop N. and Chaochanchaikul K. "Effect of Moisture Content on Mechanical Properties, Thermal and Structural Stability, and Extrudate Texture of PVC/Wood

- Sawdust Composites" **Polymer International**, 53, 2004. 1210-1218.
- [52] Sombatsompop N. and Chaochanchaikul K., Phromchirasuk C. and Thongsang S. "Effect of Wood Sawdust Content on Rheological and Structural Changes, and Thermo-Mechanical Properties of PVC/Sawdust Composites" **Polymer International**, 52, 2003. 1847-1855.
- [53] Schultz J.M. "Polymer Crystallization : The Development of Crystalline Order in Thermoplastic Polymers" **American Chemistry Society**. Washington D.C. 2001. 57-92.

Output จากโครงการวิจัย

ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ

1. J. Prachayawarakorn, J. Khamsri, K. Chaochanchaikul and N. Sombatsompop. "Effects of Compatibilizer Type and Rubber-Wood Sawdust Content on the Mechanical, Morphological and Thermal Properties of PVC/LDPE Blend". Journal of Applied Polymer Science. (2006) 102 (1) 598-606.
2. J. Prachayawarakorn, S. Khunsumled, C. Thongpin, A. Kositchaiyong and N. Sombatsompop "Effects of silane and MAPE coupling agents on the properties and interfacial adhesion of wood-filled PVC/LDPE blend", Journal of Applied Polymer Science, Submitted for publication.
3. J. Prachayawarakorn and K. Boonsawat "Physical, Chemical and Dyeing Properties of Bombyx mori Silks grafted by 2-Hydroxy ethylmethacrylate (HEMA) and Methyl methacrylate (MMA)". Journal of Applied Polymer Science, Submitted for publication.

การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

- เชิงวิชาการ คือ การสร้างนักวิจัยใหม่ในระดับปริญญาโทจำนวน 2 คน คือ

1. นางสาวจิราภรณ์ คำศรี
2. นางสาวศิริกาญจน์ ชันสัมฤทธิ์

ภาคผนวก

Effects of Compatibilizer Type and Rubber-Wood Sawdust Content on the Mechanical, Morphological, and Thermal Properties of PVC/LDPE Blend

J. Prachayawarakorn,¹ J. Khamtri,¹ K. Chaochanchaikul,² N. Sombatsompop²

¹Department of Chemistry, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL), Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

²Polymer Processing and Flow (P-PROF) Group, School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT), Bangmod, Bangkok 10140, Thailand

Received 27 September 2005; accepted 2 December 2005

DOI 10.1002/app.24324

Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com).

ABSTRACT: This article aimed to investigate the mechanical, morphological and thermal properties of PVC/LDPE blend with and without the addition of compatibilizers. The effects of LDPE content, compatibilizer type and rubber-wood sawdust loading on the properties of the blend were evaluated. The experimental results suggested that as the LDPE content was increased the mechanical properties of PVC-LDPE blend progressively decreased due to poor interfacial adhesion. The continuity and compatibility between PVC and LDPE phases could be improved through three different types of compatibilizers which included chlorinated polyethylene (CPE) poly(methyl-methacrylate-co-butyl acrylate) (PA20) and poly(ethylene-co-methacrylate) (Elvaloy). The PA20 was found to be the most suitable

compatibilizer for the blend. A radical transfer reaction was proposed in this work to explain the structure and thermal changes of the PVC in PVC-LDPE blend. The decomposition temperature of PVC in the blend decreased with the loading of the PA20 and the wood sawdust. As the sawdust content was increased the tensile and flexural moduli increased with considerable decreased in the tensile, flexural and impact strength, a slight improvement being achieved if the PA20 was incorporated in the composite. © 2006 Wiley Periodicals, Inc. *J Appl Polym Sci* 102: 598–606, 2006

Key words: polymer blend; poly(vinyl chloride); composite; wood sawdust; mechanical properties

INTRODUCTION

Wood has been used as a building and engineering material and offers several advantages of not just being esthetically pleasing but also renewable and recyclable. Wood and natural fibers have a number of benefits as reinforcements for synthetic polymers because of their high specific strength and stiffness, relatively low density, biodegradability, and low cost.¹ In addition, wood fibers contribute to the solution of environmental problems caused by the disposing of large volumes of nonbiodegradable materials.¹ Wood-based composites with a continuous polymer phase are now gaining interest, giving the opportunity to process the composite by using conventional thermoplastic processing equipment. The processing of wood composites also minimizes abrasion of the equipment

due to the low hardness of wood compared to inorganic fillers used in a great number before. Many researchers have studied on composites of homo-polymer and wood or cellulose fibers, the homo-polymers including poly(vinyl chloride),^{2–7} polyethylene,^{8–11} and polypropylene.^{12–15} The main drawback of natural fiber-reinforced polymers is the lack of good interfacial adhesion between fiber and matrix, which results in poor properties of the final products. Therefore, to develop such composites with good mechanical properties, it is necessary to use coupling agents or compatibilizers in the composite systems, the widely used coupling agents including silane coupling agents,^{5,9,16–18} maleic-anhydride-grafted-polymers.^{8,11,13–15}

It is well known that the binary blend of PVC and LDPE is typically immiscible at molecular level and causes a poor interphase structure and mechanical properties. In this respect, enhancing the compatibility of PVC and LDPE is one of the key technologies to obtain polymer blends with desirable properties. The ideal compatibilizer should contain two domains: one domain being able to form entanglements or segmental crystallization within the polymer matrices and the other being able to form a strong adhesive bond with

Correspondence to: J. Prachayawarakorn (ksjutara@kmutl.ac.th) or N. Sombatsompop (narongrit.som@kmutt.ac.th).

Contract grant sponsors: Thailand Research Fund (TRF) and the Commission on Higher Education, Ministry of Education; contract grant number: MRG4780091.

other type of materials. Two possible ways to improve the mechanical properties of PVC/LDPE blend are to add a compatibilizer^{19–21} and/or to cocrosslink these two components.^{22–24} Ghaffar et al. and Hajian et al.^{19,20} suggested that the use of solid phase dispersants such as chlorinated polyethylene (CPE), ethylene-propylene-diene rubber (EPDM), acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer (ABS), and polyurethane (PU) could improve the tensile properties of PVC/LDPE and PVC/PS blends. Sombatsompop et al. reported that loading LDPE into PVC led to the formation short-chain LDPE-grafted PVC copolymers through a macroradical cross-recombination reaction.²³ Besides, phase dispersion-crosslinking synergism in the binary blend of PVC/LDPE coexisted with the presence of both dicumyl peroxide (DCP) initiator and solid phase dispersant.²² The cocrosslinking products and the entrapping phenomenon were also proposed for PVC/LDPE/DCP system.²⁴ The grafting, cocrosslinking, and entrapping phenomena brought about the improvement of the mechanical and thermal properties in the PVC/LDPE blend.^{19–24}

In literatures, either PVC or LDPE has been used separately as a continuous phase and is reinforced by wood and cellulose fibers,^{19–23} but the properties of PVC and PE blend incorporating with wood fibers have never been reported. This is very important since PVC is often used as a blend with other types of plastics such as polyethylene in packaging applications. Thus, it is of great interest to examine the properties of PVC/LDPE blend incorporated with natural fibers. This article focused on PVC/LDPE blend and their composite with rubber-wood sawdust. To improve compatibility between PVC and LDPE binary polymer blend, three different types of compatibilizers were used. Mechanical, morphological, and thermal properties of PVC/LDPE blend with and without compatibilizers were then determined. The effects of LDPE and wood sawdust contents on such properties were also studied.

EXPERIMENTAL

Raw materials

Poly(vinyl chloride) (PVC, B0504BLA suspension grade, K value = 66) was supplied by Thai Plastics and Chemicals (Bangkok, Thailand). The compound composed of 1.2 phr calcium stearate, 1.2 phr tetrabasic lead sulfate, 0.1 phr polyethylene wax, and 4 phr calcium carbonate. Low-density polyethylene (LDPE, LD1905F) with MFI of 5 (tested at 21.6 N and 190°C) was obtained from Thai Polyethylene (Bangkok, Thailand). Three compatibilizers were chlorinated polyethylene (CPE-135A with Cl content of 35%), poly(methyl methacrylate-*co*-butyl acrylate) (Acrylic-PA20), and poly(ethylene-*co*-methacrylate) (Elvaloy-1125AC with

25% methacrylate), which were supplied from Serichemical (Bangkok, Thailand), Srithepthai (Bangkok, Thailand), and Chemical Innovation (Bangkok, Thailand), respectively. Rubber-wood sawdust (*Hervea Brasiliensis*), collected from local furniture factory, was sieved through standard sieve of 50–80 mesh, corresponding to the particle length of 180–300 μm . The sieved sawdust was dried in an oven at 105°C for 2 h before use.

Blend preparation and experimental design

Melt-blending of PVC with LDPE was performed using a single-screw extruder (Thermo Haake Poly Drive) using a screw speed of 60 rpm and a temperature range from 170 to 190°C, starting from feed zone to die zone. The obtained extrudates were further compounded in a two-roll mill (LabTech Engineering, LRM 110) for 10 min using the temperature of 165°C before transferring into a compression molding machine (LabTech Engineering, LP 20). The compressing temperature and time were set at 200°C and 8 min, respectively.

Since this work aimed to study the effects of compatibilizer type and rubber-wood sawdust contents on the properties of the PVC-LDPE blends, the following subworks are noted. Firstly, the amount of the LDPE was varied at 0, 10, 20, 30, 40, and 50 phr to study the effect of LDPE content on the properties of the PVC/LDPE blends. Secondly, three different compatibilizers, including CPE, PA20, and Elvaloy-1125AC, were used and added at a fixed amount of 15% by weight into the PVC-LDPE blend having a constant LDPE amount of 10 phr. Finally, the wood sawdust content was varied from 0 to 50%.

Mechanical properties

All mechanical tests were carried out at the temperature of $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ and relative humidity of $(50 \pm 5)\%$. Tensile test was conducted according to ASTM D-638. The tensile measurements from dumbbell specimens were carried out using Universal Testing Machine (LLOYD Instrument, LR 5k) using WINDAP software with 5 kN load cell and a crosshead speed of 5 mm/min. For flexural property, ASTM D-790 was used as a reference. Three-point bending test was set up in the Universal Testing Machine to examine the flexural modulus and strength of the PVC-LDPE blends and sawdust-PVC-LDPE composites using a rectangular specimen. Span length used was 40 mm and the compression speed was 5 mm/min using 5 kN load cell. Izod impact tester (Yasuda Seiki Seisakusho, 258-PC) was used to evaluate the impact strength of the blends and the composites. The notched testing specimens were used following the ASTM D-256. The impact property results were reported in terms of impact

TABLE I
Mechanical Properties of PVC/LDPE Binary Blend with Different Contents of LDPE

PVC/LDPE ratio	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation-at-break (%)	Flexural modulus (MPa)	Flexural strength (MPa)	Impact strength (kJ/m ²)
100/0	72 ± 18	38.6 ± 1.6	178.2 ± 38.7	2763 ± 386	67.1 ± 6.6	78.5 ± 6.1
100/10	45 ± 15	31.5 ± 1.5	57.7 ± 21.8	2599 ± 216	47.3 ± 3.3	58.9 ± 5.8
100/20	41 ± 14	21.5 ± 2.7	29.8 ± 11.8	1010 ± 133	40.4 ± 3.1	4.6 ± 1.4
100/30	34 ± 12	16.1 ± 1.6	28.3 ± 4.5	653 ± 28	25.3 ± 1.7	2.7 ± 0.6
100/40	33 ± 11	12.6 ± 1.5	18.9 ± 3.0	645 ± 70	23.4 ± 1.2	2.0 ± 0.5
100/50	31 ± 10	8.0 ± 1.3	17.1 ± 3.3	585 ± 69	15.9 ± 1.4	1.9 ± 0.4

energy divided by the area of the specimen (kJ/m²). It should be noted that the mechanical property results of the composites reported in this work were obtained by averaging from ten independent tested specimens.

Thermal properties

Glass transition temperatures of the samples were evaluated using a shear-bending mode dynamic mechanical analyzer (DMA, Merrier Teledo DMA/SDTA 861) at a temperature range from 20 to 130°C with a heating rate of 4°C/min and a fixed frequency of 1 Hz. In addition, thermal decomposition temperatures of the blends and the composites were carried out using thermal gravimetry TGA (Perkin-Elmer, Pyris 1). The specimen was tested under nitrogen atmosphere using a temperature range of 35–700°C and a heating rate of 10°C/min. The thermal degradation temperatures were reported by the onset temperature where the weight loss started to occur.

Scanning electron microscopy

A LEO 1455 VP scanning electron microscopy was employed to study the interfacial morphology and phase dispersion of the PVC/LDPE blends and their composites. The samples were immersed in a nitrogen liquid before fractured. After that the samples were sputter-coated with a thin layer of gold to prevent electrical charging during the observation. The surface characteristics were examined and operated at 6 kV accelerating voltage.

RESULTS AND DISCUSSION

Effect of compatibilizer type in PVC-LDPE blend

It is reasonable to assume that no chemical adhesion exists between PVC and LDPE in the blend.^{19–24} As can be seen in Table I, incorporation of LDPE into PVC resulted in significant changes in tensile, flexural, and impact properties. The Young's modulus of the blend decreased with increasing LDPE content. This was expected due to the fact that the LDPE is softer phase in nature as compared to PVC rigid phase. It was observed that the tensile strength and elongation at break of the blend progressively decreased with LDPE content due to poor interfacial adhesion, the LDPE phase acting as defects and disturbing the continuity of the PVC matrix phase. Similar to tensile properties, the flexural and impact properties of the blend significantly dropped as a result of increasing LDPE content in the PVC matrix. The reductions in the mechanical properties suggested poor interfacial adhesion between the PVC and LDPE phases. Considering the impact strength, which reflected an ability of the blend to receive and transfer a sudden shock load or mechanical energy across a given cross section to failure, it was observed that by adding LDPE content of greater than 10 phr, the reduction in the impact strength became more apparent. This was probably associated with phase compatibility or continuity level in the PVC-LDPE blend.

To overcome the poor interfacial bonding of the incompatible PVC and LDPE blend, three different compatibilizers were introduced; these being CPE,

TABLE II
Mechanical Properties of PVC/LDPE Binary Blend for Different Types of Compatibilizers

Mechanical properties	Compatibilizer in PVC/LDPE blend			
	No compatibilizer	15% CPE	15% PA20	15% Elvaloy
Young's modulus (MPa)	43.7 ± 8.3	124.9 ± 24.6	138.9 ± 46.9	121.1 ± 35.4
Tensile strength (MPa)	31.5 ± 1.5	33.4 ± 1.8	33.8 ± 1.4	32.0 ± 0.3
Elongation-at-break (%)	57.7 ± 21.8	133.3 ± 37.7	104.4 ± 38.3	138.7 ± 20.8
Flexural modulus (MPa)	1598 ± 315	1982 ± 137	1993 ± 169	1523 ± 400
Flexural strength (MPa)	47.3 ± 3.3	50.8 ± 1.5	48.6 ± 1.9	52.6 ± 3.4
Impact strength (kJ/m ²)	58.9 ± 5.8	64.6 ± 4.2	78.7 ± 6.9	70.1 ± 6.1

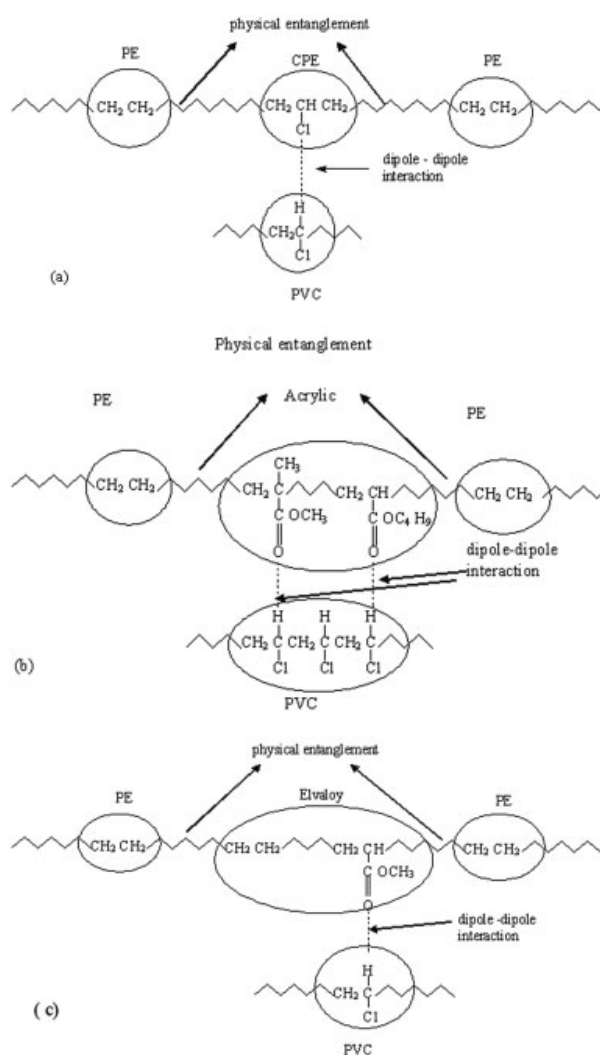


Figure 1 Proposed compatibilizing mechanism in PVC-LDPE blend system with various compatibilizers: (a) CPE, (b) PA20, and (c) Elvaloy.

PA20, and Elvaloy. The blend ratio of the PVC/LDPE was fixed at 100/10 and 15 wt % of the compatibilizers was used for each compatibilizer. Table II shows the effect of compatibilizer type on the mechanical prop-

TABLE IV
Effect of Compatibilizer Type on Glass-Transition Temperature of PVC in PVC/LDPE Blend

Blend system	Glass-transition temperature of PVC in PVC/LDPE blend (°C)
PVC	91.4
PVC/LDPE (100/10)	88.5
PVC/LDPE (100/10) + 15% CPE	87.7
PVC/LDPE (100/10) + 15% PA20	90.3
PVC/LDPE (100/10) + 15% Elvaloy	88.8

erties of the PVC-LDPE blend and suggested that all the compatibilizers improved the mechanical properties of the blend. This could be explained on the basis of the improved compatibility between PVC and LDPE phases. In this work, the compatibilizing mechanism of each compatibilizer in the PVC-LDPE blend was proposed as shown in Figure 1. The purpose of this was to explain the property differences of the blend caused by introducing different compatibilizers into the blend. It can be seen that the CPE has a similar chemical structure to both PVC and LDPE and it can form a dipole-dipole interaction with PVC and a physical chain entanglement with LDPE [Fig. 1(a)]. The PA20 in Figure 1(b) is composed of poly(methyl methacrylate) and poly(butyl acrylate) and the long vinyl chains in the molecule can be compatible with LDPE phase, while the polarity of the PMMA and PBA molecules form a dipole-dipole interaction with PVC phase. The Elvaloy is a copolymer between ethylene and methacrylate monomers, which can be compatible with LDPE and PVC as shown in Figure 1(c), respectively. Table III illustrates percentage differences in the mechanical properties of PVC/LDPE blend containing the three compatibilizers at 10 phr LDPE. In general, it was observed that the PA20 had more effect on the mechanical property improvement of the blend as compared with the other two compatibilizers. The compatibilizing effect of PA20 over that of CPE and Elvaloy can be supported by glass-transition temperature (T_g) results shown in Table IV. It can

TABLE III
Percentage Differences in Mechanical Properties of PVC/LDPE Binary Blend using Different Compatibilizers

Properties	Compatibilizer in PVC/LDPE blend ^a			
	15% CPE	15% PA20	15% Elvaloy	7.5% CPE and 7.5% PA20
Young's modulus	176	207	204	168
Tensile strength	5.90	7.30	1.40	1.80
Elongation at break	131	81	140	150
Flexural modulus	24	25	1.20	19.40
Flexural strength	7.50	2.70	11.10	7.30
Impact strength	9.70	34	17.10	19.10

^a Values given are percentage values.

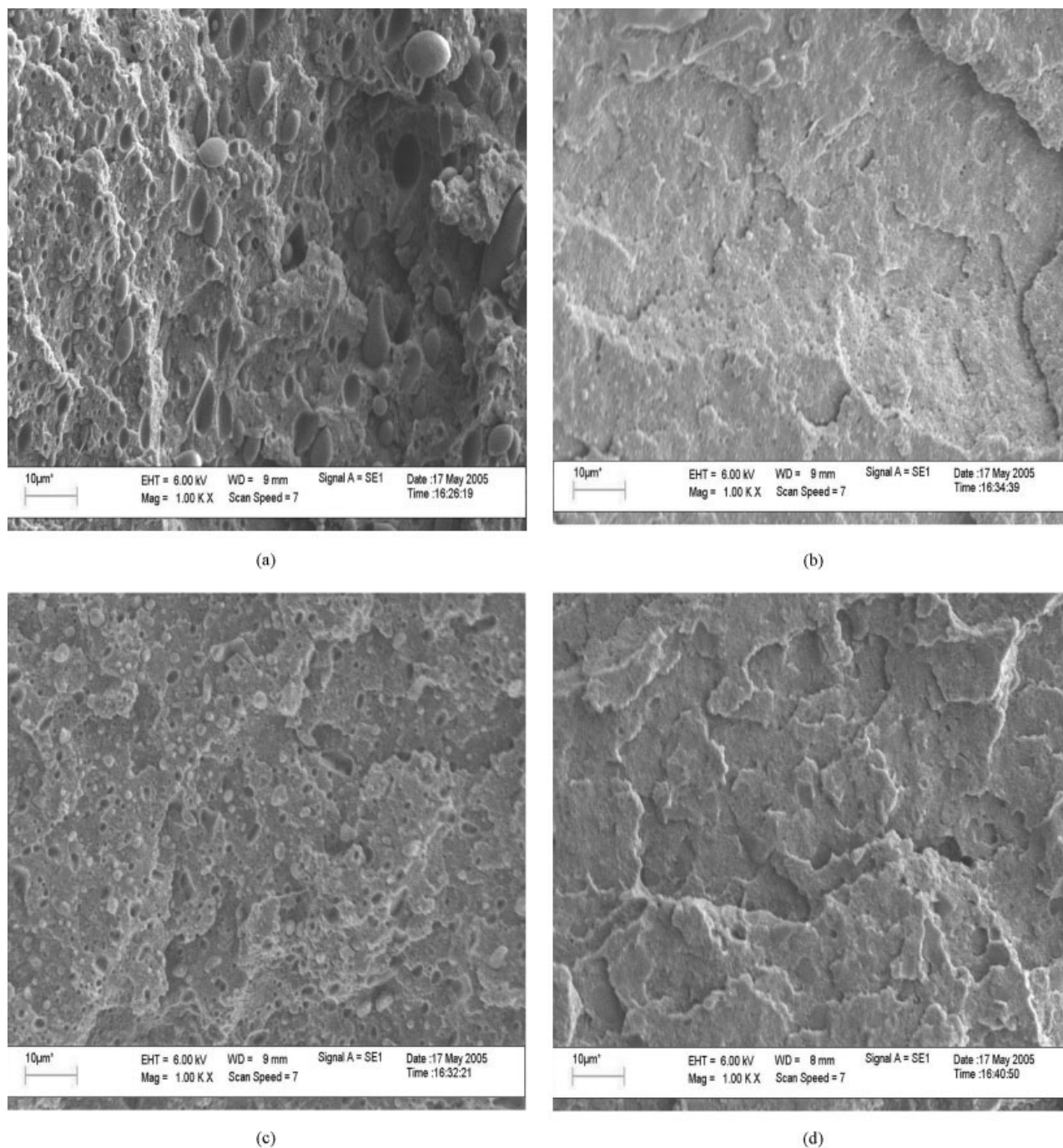


Figure 2 SEM micrographs of PVC/LDPE blend with different compatibilizers: (a) no compatibilizer, (b) CPE, (c) PA20, and (d) Elvaloy.

be seen that the addition of PA20 into the PVC/LDPE blend shifted the T_g to higher temperature about 2°C as compared to the blend without compatibilizers. This was not the case for the blends with CPE and Elvaloy compatibilizers. This suggested that PA20 could act as a better compatibilizer for the PVC/LDPE blend. It was also interesting to note that the T_g of the blend with PA20 was very close to that for neat PVC.

The effect of PA20 as a compatibilizer in PVC composites could further be substantiated by Mengeloglu et al.,²⁵ who observed that the impact strength of PVC/wood-fiber composites could be improved through an addition of acrylic-based modifier, and by Sombatsompop and Phromchirasuk,⁷ who found that incorporation of PA20 in PVC-wood composites enhanced the tensile and ultimate elongation of the com-

TABLE V
Effect of Compatibilizer Type on Decomposition
Temperature of PVC in PVC/LDPE Blend

Blend system	Decomposition temperature of PVC in PVC/LDPE blend (°C)
PVC	287.6
PVC/LDPE (100/10)	291.3
PVC/LDPE (100/10) + 15% CPE	284.0
PVC/LDPE (100/10) + 15% PA20	289.9
PVC/LDPE (100/10) + 15% Elvaloy	281.1

posites. Thus, it could be said that the PA20 was suitable and could be used as both compatibilizing and impact-modifying agents. When using a combination of the CPE and PA20 compatibilizers, the overall mechanical properties tended to follow those in the blend with CPE. As expected, the overall mechanical properties of the binary blend with Elvaloy compatibilizer fell in between those with CPE and PA20 compatibilizer, since Elvaloy structure is composed of ethylene and methacrylate monomers, roughly resembling the molecular structures of the CPE and PA20 compatibilizers. It was very important to highlight, since this article aimed to improve the compatibility of the PVC and LDPE phases incorporated with rubber-wood sawdust particles, the relevant mechanical properties probably involve elastic (tensile and flexural modulus) and impact strength. Taking the properties in Tables II and III into account, it can be preliminarily concluded that the compatibilizers could be used to improve the continuity and compatibility between PVC and LDPE phases and thus enhance mechanical properties, and the PA20 appeared to be the most suitable compatibilizer for these specific applications.

The improved continuity and compatibility between PVC and LDPE phases could be substantiated by considering the SEM micrographs of PVC-LDPE blends with and without the compatibilizers, whose results are shown in Figures 2(a)–2(d). Figure 2(a) represents the fracture surface of PVC-LDPE blend sample without the compatibilizers. It was observed that the LDPE as a disperse phase was located inside the empty voids of the PVC continuous phase, suggesting a poor compatibility between PVC and LDPE phases. When the three compatibilizers [CPE, PA20, and Elvaloy in Figs. 2(b)–2(d)] were used, the phase compatibility appeared to improve, which can be evidenced by smaller interphase boundary between PVC and LDPE components. It was also observed that the particle size of LDPE disperse phase in the PVC continuous phase was smaller than that presented in Figure 2(a). In addition, the fractured surface of the blend with the compatibilizers was smoother than that of the blend with no compatibilizers. This was why the over-

all mechanical properties of the PVC-LDPE blends were improved by the addition of the compatibilizers.

Table V shows the changes in decomposition temperature (T_d) of the PVC in PVC/LDPE blend with and without the compatibilizers. It can be seen that the decomposition temperature of the PVC increased when incorporating LDPE into the blend. In this present study, we proposed a unique explanation for the increase in T_d of the PVC to be associated with a radical transfer reaction between PVC to LDPE molecules during processing. The proposed radical transfer reaction is shown in Figure 3. It can be explained that the PVC macroradicals produced from a dehydrochlorination reaction during melt blending process has promoted degradation of long-chained PE and probably led to a hydrogen abstraction from the PE molecules. The PE macroradicals subsequently underwent a branching, which produced short-side chain formation in LDPE molecule of the blend. If this was the case, the dehydrochlorination of the PVC had less chance to occur and thus more stabilized PVC molecules in the blend.²⁶ It was interesting to note that the T_d of the PVC decreased when incorporating the three compatibilizers. This may be expected, since the PVC and LDPE phases became more attached to each other via the compatibilizers. If this was the case, the productions of LDPE and PVC radicals for the radical transfer reaction during processing became minimized, and thus the degradation of the PVC in the blend could take place more easily.

Effect of rubber-wood sawdust in PVC/LDPE blend

Two selected PVC/LDPE blend ratios (100/10 and 100/40) with PA20 compatibilizer were used to study

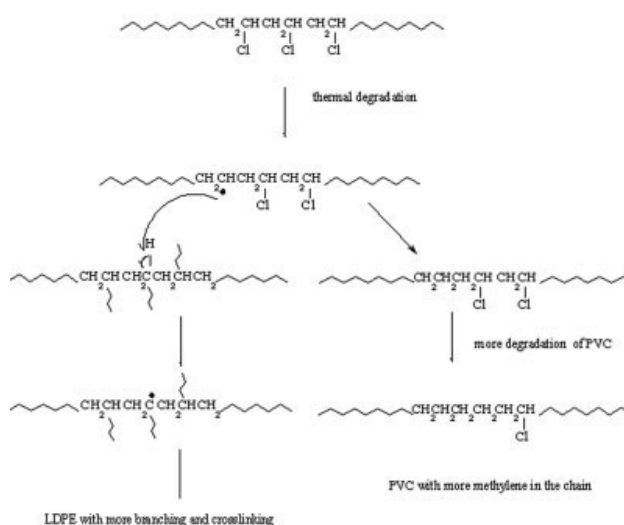


Figure 3 The proposed radical transfer reaction in PVC/LDPE blend.

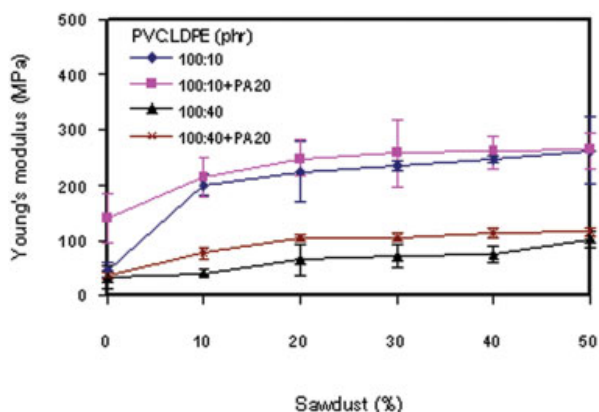


Figure 4 Young's modulus of PVC/LDPE blend with and without PA20 for different wood sawdust contents. [Color figure can be viewed in the online issue, which is available at www.interscience.wiley.com.]

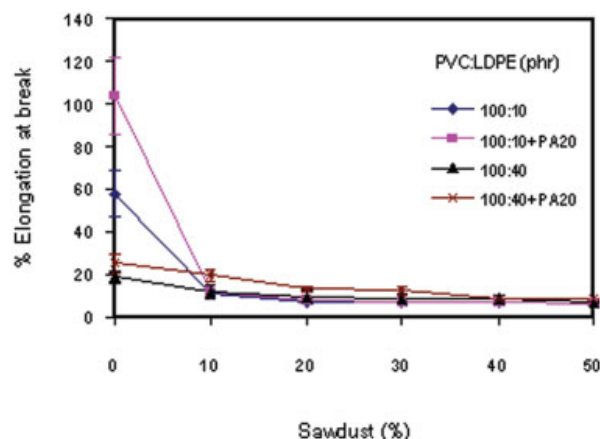


Figure 6 Elongation at break of PVC/LDPE blend with and without PA20 for different wood sawdust contents. [Color figure can be viewed in the online issue, which is available at www.interscience.wiley.com.]

the effect of rubber-wood sawdust content on the mechanical properties of the binary blends, the results being shown in Figures 4–9. The overall observations and explanations to the results are listed in fragmenting points as follows:

- The tensile and flexural moduli (Figs. 4 and 7, respectively) of the blends increased with increasing sawdust content. Tensile strength (Fig. 5) and elongation at break (Fig. 6), flexural strength (Fig. 8) and impact strength (Fig. 9) of the blends dramatically decreased with 10 phr rubber-wood sawdust content, the properties leveling-off at higher sawdust loadings. The increase in the moduli of the blend with increasing sawdust content was caused by the fact that the sawdust is more rigid phase as compared to the binary

blend. The sharp drops in tensile, flexural, and impact strengths were associated with poor dispersion of the sawdust particles in the blend matrix. It is widely known that the sawdust particles (fibers) tended to cling together due to strong interfiber hydrogen bonding, and resisted dispersion of the individual fiber in the polymer phase, and thus reduced mechanical strength of the blends.²⁷ It was worth taking note that the mechanical properties of the PVC-LDPE blend stabilized with sawdust loadings of greater than 10 phr. This could be of economical benefit to industries as one could add greater amounts of wood sawdust particles to replace the polymer phase without significant changes in mechanical properties, therefore leading to cost savings.

- The blends with PA20 compatibilizer appeared to have greater mechanical strength than those with-

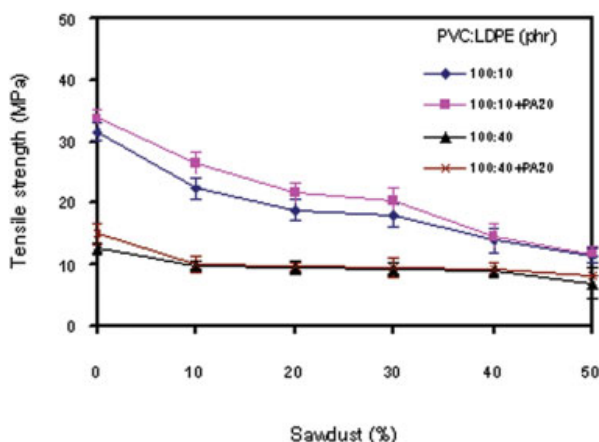


Figure 5 Tensile strength of PVC/LDPE blend with and without PA20 for different wood sawdust contents. [Color figure can be viewed in the online issue, which is available at www.interscience.wiley.com.]

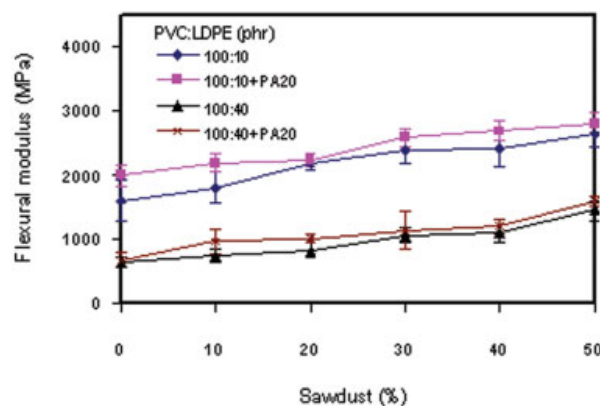


Figure 7 Flexural modulus of PVC/LDPE blend with and without PA20 for different wood sawdust contents. [Color figure can be viewed in the online issue, which is available at www.interscience.wiley.com.]

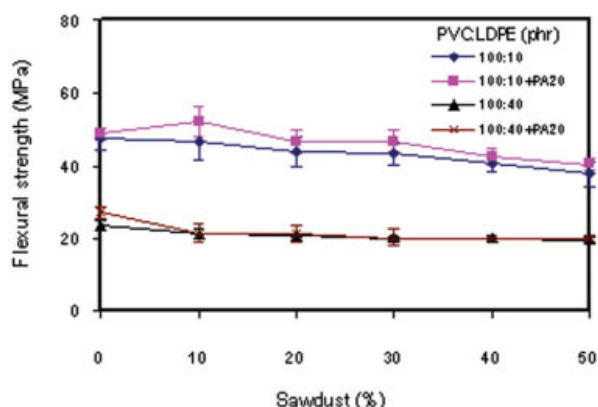


Figure 8 Flexural strength of PVC/LDPE blend with and without PA20 for different wood sawdust contents. [Color figure can be viewed in the online issue, which is available at www.interscience.wiley.com.]

out PA20. The compatibilizing mechanism has already been discussed earlier. It was also found that the PA20 could perform more effectively in improving the phase compatibility between PVC and LDPE in the absence of wood sawdust particles.

- The magnitude of the mechanical property reduction as a function of rubber-wood sawdust content of the blend with 10 phr LDPE were greater than those with 40 phr LDPE.

Table VI shows the changes in decomposition temperature (T_d) of the PVC in PVC/LDPE (100/10) blend affected by acrylic compatibilizer and wood sawdust. It can be seen that the addition of wood sawdust particles caused an enormous reduction in the T_d of the PVC to about 40°C. However, the decomposition temperature of the PVC in the composites was im-

TABLE VI
Effect of PA20 and Rubber-Wood Sawdust on Decomposition Temperature of PVC in PVC/LDPE Blend

Blend system	Decomposition temperature of PVC in PVC/LDPE blend (°C)
PVC	287.6
PVC/LDPE (100/10)	291.3
PVC/LDPE (100/10) + 15% PA20	289.9
PVC/LDPE (100/10) + 10% sawdust	243.7
PVC/LDPE (100/10) + 15% PA20 + 10% sawdust	254.0

proved by the addition of PA20. It was also noticeable that adding PA20 slightly increased the T_d of PVC in the PVC-LDPE blend, the T_d reduction being very remarkable in the wood-sawdust/PVC-LDPE composites. The sharp reduction in the T_d value by addition of wood sawdust was probably related to incompatibility between the hydrophilic wood sawdust and the hydrophobic PVC and LDPE molecules. Besides, previous work^{6,27} has suggested that increasing the sawdust content could result in a reduction of the decomposition temperature of the PVC, the reasons being associated with the hydrogen bonding in the hydrophilic sawdust, which could cleave Cl atom from the PVC and thus reduce thermal stability of the PVC in the blend.²⁷

CONCLUSIONS

The mechanical and thermal properties PVC/LDPE blends affected by additions of three different compatibilizers and rubber-wood sawdust were studied. It was found that the mechanical properties of PVC-LDPE blend decreased with increasing LDPE loadings due to phase incompatibility. All the compatibilizers (CPE, PA20, and Elvaloy) used in this work improved the continuity and compatibility between PVC and LDPE phases and thus enhanced the mechanical properties of the blend. The PA20 was found to be the most suitable compatibilizer for the blend. The structural and thermal changes of the PVC in the blend were explained via a radical transfer reaction. The decomposition temperature of the PVC in the blend decreased with the additions of the compatibilizer and the wood sawdust particles. As the sawdust content was increased, the tensile and flexural moduli increased with considerable decreases in the tensile, flexural, and impact strength, a marginal improvement being observed if the PA20 was incorporated. Adding PA20 into the blend decreased the T_d of PVC slightly in the PVC-LDPE blend, but remarkably in the wood-sawdust/PVC-LDPE composite. It was observed that the PA20 could perform more effectively

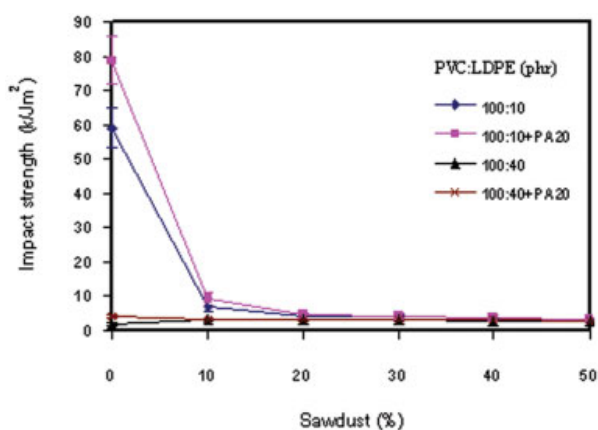


Figure 9 Impact strength of PVC/LDPE blend with and without PA20 for different wood sawdust contents. [Color figure can be viewed in the online issue, which is available at www.interscience.wiley.com.]

in improving the phase compatibility between PVC and LDPE in the absence of wood sawdust particles.

The authors would also like to thank Dr. Chanchai Thongpin for her valuable advice and comments during the preparation of the article.

References

- Bledzki, A. K.; Gassan, J. *Prog Polym Sci* 1999, 24, 221.
- Djidjelli, H. Kaci, M.; Vega, J. J.; Benachour, D. *Polym Int* 2004, 53, 1760.
- Djidjelli, H.; Vega, J.-J.; Farence, J.; Benachour, D. *Macromol Mater Eng* 2002, 287, 611.
- Matuana, L. M.; Kamdem, D. P.; Zhang, J. *J Appl Polym Sci* 2001, 80, 1943.
- Sombatsompop, N.; Chaochanchaikul, K. *J Appl Polym Sci* 2005, 96, 213.
- Sombatsompop, N.; Chaochanchaikul, K. *Polym Int* 2004, 53, 1210.
- Sombatsompop, N.; Phromchirasuk, C. *J Appl Polym Sci* 2004, 92, 782.
- Lai, S.-M.; Yeh, F.-C.; Wang, Y.; Chan, H. C.; Shen, H.-F. *J Appl Polym Sci* 2003, 87, 487.
- Colom, X.; Carrasco, F.; Pages, P.; Canavate, J. *Compos Sci Technol* 2003, 63, 161.
- Stark, N. M.; Matuana, L. M. *J Appl Polym Sci* 2003, 90, 2609.
- Zhang, F.; Qui, W.; Yang, L.; Endo, T.; Hirotsu, T. *J Appl Polym Sci* 2003, 89, 3292.
- Fung, K. L.; Xing, X. S.; Li, R. K. Y.; Tjong, S. C.; Mai, Y.-W. *Compos Sci Technol* 2003, 63, 1255.
- Nunez, A. J.; Strum, P. C.; Keny, J. M.; Aranguren, M. I.; Marcovich, N. E.; Reboredo, M. M. *J Appl Polym Sci* 2003, 88, 1420.
- Espert, A.; Camacho, W.; Karlson, S. *J Appl Polym Sci* 2003, 89, 2353.
- Sombatsompop, N.; Yotinwattanakumtorn, C.; Thongpin, C. *J Appl Polym Sci* 2005, 97, 475.
- Castellano, M.; Gandini, A.; Fabbri, P.; Belgaxem, M. N. *J Colloid Interface Sci* 2004, 273, 505.
- Abdelmouleh, M.; Boufi, S.; Belgacem, M. N.; Duarte, A. P.; Salah, A. B.; Gandini, A. *Int J Adhes Adhes* 2004, 24, 43.
- Pickering, K. L.; Abdalla, A.; Ji, C.; McDonald, A. G.; Franich, R. A. *Compos A* 2003, 34, 915.
- Ghaffar, A.; Sadrmohaghegh, C.; Scott, G. *Eur Polym J* 1981, 17, 941.
- Hajian, M.; Sadrmohaghegh, C.; Scott, G. *Eur Polym J* 1984, 20, 135.
- Francis, J.; George, K. E.; Joseph, R. *Eur Polym J* 1992, 28, 1289.
- Xu, C.; Fang, Z.; Zhong, J. *Polymer* 1997, 38, 155.
- Sombatsompop, N.; Sungsanit, K.; Thongpin, C. *Polym Eng Sci* 2004, 44, 487.
- Ma, G.; Fang, Z.; Xu, C. *J Appl Polym Sci* 2003, 88, 1296.
- Mengeloglu, F.; Matuana, L. M.; King, J. A. *J Vinyl Addit Technol* 2000, 6, 153.
- Thongpin, C.; Santavitee, O.; Sombatsompop, N. *J Vinyl Addit Technol*, accepted for publication.
- Sombatsompop, N.; Chaochanchaikul, K.; Phromchirasuk, C.; Thongsang, S. *Polym Int* 2003, 52, 1847.

Effects of silane and MAPE coupling agents on the properties and interfacial adhesion of wood-filled PVC/LDPE blend

J. Prachayawarakorn* and S. Khunsumled

Department of Chemistry, Faculty of Science,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL),
Ladkrabang, Bangkok 10520, THAILAND

Email: ksjutara@kmitl.ac.th

C. Thongpin

Faculty of Engineering and Industrial Technology,
Silpakorn University, Sanamchandra Palace Campus,
Nakorn Pathom, 73000, THAILAND

Email: chanchai@su.ac.th

A. Kositchaiyong and N. Sombatsompop*

Polymer Processing and Flow (P-PROF) Group,
School of Energy, Environment and Materials,
King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT),
Bangmod, Bangkok 10140, THAILAND

Email: narongrit.som@kmutt.ac.th

***corresponding authors: ksjutara@kmitl.ac.th and narongrit.som@kmutt.ac.th**

Abstract

Composite samples were prepared from PVC/LDPE blend, compatibilized by PA20 (methyl methacrylate-co-butyl acrylate copolymer), and reinforced by different levels of rubber-wood sawdust. In order to improve the mechanical properties of the composites, Silane A-137 (Octyltriethoxy silane), Silane A-1100 (γ -aminopropyltriethoxy silane) or MAPE (maleic anhydride-grafted-polyethylene) were introduced. It was found that the addition of Silane A-137, Silane A-1100 and MAPE could improve tensile, flexural and impact properties of the composites, regardless of the sawdust contents. Physical or chemical interactions for all coupling agents with the composites used were proposed in this work. Silane A-137 or MAPE tended to give better improvement in the mechanical properties of the composites than Silane A-1100, due to the presence of the non-polar chain ends of Silane A-137 or MAPE molecules. In addition, the addition of either Silane A-137 and MAPE or Silane A-1100 and MAPE at different ratios into the wood-PVC/LDPE composites was also studied. The experimental results suggested that the optimum mechanical properties could be obtained using MAPE at 3%wt sawdust for single coupling system, and Silane A-137:MAPE of 1%:2%wt sawdust for mixed coupling system. Moreover, morphological and thermal properties of the composites were examined using SEM, DMA and TGA techniques.

Key words:

polymer blend, poly(vinyl chloride), composite, wood sawdust, mechanical properties

Introduction

Polymer blend and composites have been studied extensively and the properties of polymer blends and composites can be determined by miscibility and structure of all components [1]. Three or more phases in polymer blend and composite systems have increasingly attracted the interests of researchers and industry, especially, in terms of efforts to improve and modify the composite properties.

Among polymer matrices used for wood-filled composites, poly(vinyl chloride) (PVC) is one of the most widely used thermoplastics in packaging and construction applications. PVC products are likely to be contaminated by olefin polymers such as polyethylene (PE) and polypropylene (PP) [2]. PVC/PE blend has been utilized in several applications such as, blister packing, electric cable sheathing, but its mechanical properties and service performance are much inferior because of their phase incompatibility. One of the most common method to improve the mechanical properties of the incompatible blend is to add a suitable compatibilizer. Previous work [2] has shown that mechanical, morphological and thermal properties of the PVC/LDPE blend were significantly improved by addition of poly(methyl methacrylate-co-butyl acrylate) (PA20).

In general, fiber reinforced polymer composites yield a unique combination of high performance, great versatility and processing advantages at favorable cost. Among other fillers used for such polymeric products, wood fibers become an important class of the reinforcing materials. They show many advantages, including low density, little demand during processing, little requirement on processing equipment, biodegradability, high stiffness and relatively low price [3]. However, the wood fibers

are incompatible with the polymer due to their hydrophilic character which results in uneven dispersion in the composites, thus a poor stress transfer between the matrix and the filler and unsatisfactory properties of the final produced [3]. As a consequence, research efforts have been focused on improving interfacial adhesion of the fiber and polymer phases, usually through use of coupling agents, such as silane coupling agents [4-10] and maleic anhydride-grafted-polymer [5-8,10-17]. The interfacial adhesion can be both chemical and physical, which are referred to covalent and hydrogen bonds, and molecular entanglements, respectively.

Our previous work [2] has shown that the compatibility between PVC and LDPE could be improved by incorporating poly(methyl-methacrylate-co-butyl acrylate) (PA20) which acted as phase compatibilizer, but the mechanical strength of PVC/LDPE blends decreased by addition of wood fibres. The work was now extended to improve the interfacial adhesion between the wood fiber and PVC/LDPE blend by introducing different chemical coupling agents at various dosages, PA20 being used as the compatibilizer for PVC and LDPE phases. The level of interfacial adhesion was evaluated through mechanical, morphological and thermal properties of the wood filled PVC/LDPE composites. Possible molecular interactions among materials phases (PVC, LDPE, wood, PA20) in the composites were also proposed.

Experimental

Raw materials

1. Poly(vinyl chloride) (PVC, B0504BLA suspension grade, K value = 66) was supplied by Thai Plastics and Chemicals, Co. Ltd (Bangkok, Thailand). The compound composed of 1.2 phr calcium stearate, 1.2 phr tetrabasic lead sulfate, 0.1 phr polyethylene wax and 4 phr calcium carbonate.
2. Low-density polyethylene (LDPE, LD1905F) with MFI of 5 (tested at 21.6 N and 190°C) was obtained from Thai Polyethylene, Co. Ltd (Bangkok, Thailand).
3. The compatibilizer used was poly(methyl methacrylate-co-butyl acrylate) (PA20), supplied from Srithepthai Co. Ltd (Thailand). In this work, PA20 was used as the compatibilizer for PVC and LDPE phases.
4. Rubber-wood sawdust (*Hervea Brasiliensis*), collecting from local furniture factory, was sieved through standard sieve of 50-80 mesh, corresponding to the particle length of 180-300 μm . The sieved sawdust was dried in an oven at 105°C for 2 h before use.
5. Octyltriethoxy (A-137) and γ -aminopropyltriethoxy (A-1100) silane coupling agents were supplied by Sigma-Aldrich, Co. Ltd. (Bangkok, Thailand) and Optimal Tech, Co. Ltd. (Bangkok, Thailand), respectively. The chemical structures of both silane coupling agents are given in **Table 1**. Maleic anhydride-grafted-polyethylene (MAPE - Fusabond MB100D) with MFI of 2g/10 min (tested at 21.6 N and 190°C) was supplied by Chemical Innovation, Co. Ltd. (Bangkok, Thailand).

Blend preparation and experimental design

Melt-blending of PVC with LDPE was performed using a single-screw extruder (Thermo Haake Poly Drive) using a screw speed of 60 rpm and a temperature range from 170 to 190 °C, starting from feed zone to die zone. The obtained extrudates were further compounded in a two-roll mill (LabTech Engineering, LRM 110) for 10 min using the temperature of 165 °C before transferring into a compression molding machine (LabTech Engineering, LP 20). The compressing temperature and time were set at 200 °C and 8 min, respectively. Since this work aimed to study the effect of coupling agent type and content on the mechanical properties of the PVC/LDPE blend filled with various contents of wood sawdust, the three steps of experimental procedures are noted.

- Firstly, the amount of the sawdust was varied at 10, 20, 30, 40 and 50% in order to study the effect of sawdust content on the properties of the PVC/LDPE (100/40) blends using PA20 for 15%wt of LDPE.
- Secondly, Silane A-137, Silane A-1100 and MAPE at 1.0, 3.0 and 5.0%wt of wood sawdust were used in order to improve properties of the composites.
- Finally, the influence of using mixed coupling agents(silane:MAPE) on interfacial strength was studied, the percentage ratios of Silane:MAPE used being 2:1, 1:1 and 1:2.

Mechanical properties

All mechanical tests was carried out at the temperature of 23±1 °C and relative humidity of 50±5%. It should be noted that the mechanical property results of the composites reported in this work were obtained by averaging from ten independent tested specimens. Tensile test was conducted according to ASTM D-638. The tensile

measurements from dumbbell specimens were carried out using Universal Testing Machine (LLOYD Instrument, LR 5k) using WINDAP software with 5 kN load cell and a crosshead speed of 5 mm/min. For flexural property, ASTM D-790 was used as a reference. Three-point bending test was set up in the Universal Testing Machine in order to examine the flexural modulus and strength of the PVC/LDPE blends and Sawdust/PVC/LDPEcomposites using a rectangular specimen. A span length used was 40 mm and a compression speed was 5 mm/min using 5 kN load cell. Izod impact tester (Yasuda Seiki Seisakusho, 258-PC) was used to evaluate the impact strength of the blends and the composites. The notched testing specimens were used, this following the ASTM D-256. The impact property results were reported in terms of impact energy divided by the area of the specimen (kJ/m^2).

SEM investigations

A LEO 1455 VP scanning electron microscopy was employed to study the interfacial morphology of the PVC/LDPE blends reinforced by wood fibers. The samples were immersed in a nitrogen liquid before fractured. After that the samples were sputter-coated with a thin layer of gold to prevent electrical charging during the observation. The surface characteristics were examined and operated at 6kV accelerating voltage.

Thermal properties

Glass transition temperatures of the samples were evaluated using a shear-bending mode Dynamic Mechanical Analyzer (DMA, Merrier Teledo DMA/SDTA 861) at a temperature range from 20 to 130°C with a heating rate of 4°C /min and a fixed frequency of 1 Hz. In addition, thermal decomposition temperatures of the blends and the composites were carried out using thermal gravimetry TGA (Perkin Elmer, Pyris

1). The specimen was tested under nitrogen atmosphere using a temperature range of 35-700°C and a heating rate of 10°C/min. The thermal degradation temperatures were reported by the onset temperature where the weight loss started to occur.

Results and Discussion

Effect of Coupling Agents on Mechanical Properties

Mechanical properties of the wood-PVC/LDPE composites for different wood and coupling agent contents are shown in **Figures 1-6**. It can be seen that the moduli (both tensile and flexural in **Figures 1 and 4**) increased with increasing wood contents while the opposite effect was observed for the ultimate properties (**Figures 2, 3 and 5**). These two effects were related to an increased stiffness of the composites, and the discontinuity of the polymer phases in the composite samples, respectively. It was interesting to mention the change of impact strength of the composites by varying wood contents as shown **Figure 6**. It can be seen that the impact strength did not change with increasing wood contents. This may be because the addition of PA20 which acted as a phase compatibilizer in PVC and LDPE matrices overruled the effect of wood sawdust. The obtained results were in good agreement with other reports [9-17] showing that coupling agents such as Silane or MAPE caused the improvement in mechanical properties of cellulose fiber-homopolymer composites.

Considering the effect of type and content of coupling agents, it was observed that all mechanical properties of the composites (**Figures 1-6**) tended to increase with increasing the coupling agents, and then decrease at higher loading of the coupling agents. The results showed that the addition of low loading of Silane or MAPE caused an improvement of the mechanical properties. This was due to chemical interactions between each coupling agent and PVC/LDPE blend as shown and will be detailed later in **Figure 7**. On the contrary, higher loadings of Silane and MAPE brought about an obvious reduction in the mechanical properties. This was because of a self-condensation reaction of the Silane coupling agent [4]. The results were found to be in

line with those reported by Sombatsompop *et al* [5] who used MAPP coupling agent in PP/wood sawdust composites.

When different coupling agent types were compared it was found that MAPE and Silane A-137 gave better improvement than Silane A-1100. The dosages for optimum mechanical properties for these three coupling agents were different, 3.0% for MAPE and 1.0% for Silane A-137 and Silane A-1100. The differences in required dosages may be related to levels of modifications and interactions of the coupling agents in the composites. The schematic diagrams of chemical and physical interactions between the PVC/LDPE matrix and the wood fiber reinforcement through the use of Silane coupling agents or MAPE are proposed in **Figure 7**. In the case of Silane A-137 (hydrocarbon silane) shown in **Figure 7(a)**, dipole-dipole interaction and hydrogen bonds can be formed between the coupling agent and the wood surfaces. Besides, the physical entanglement can be found between the hydrocarbon chain-ends of Silane A-137 and the PVC/LDPE blend. Similar schematic reactions for kenaf fiber reinforced polypropylene composites modified by silane coupling agent were reported by Karnani *et al.* [10]. For Silane A-1100 (amino silane) as shown in **Figure 7(b)**, the silanol groups in the Silane coupling agent and hydroxyl groups can be formed. However, neither the amino groups nor the hydroxyl groups at the both ends of the Silane A-1100 molecules can interact with PVC/LDPE phases. Similarly, MAPE coupling agent contains anhydride polar groups and PE non-polar part (**Figure 7(c)**) and the polar anhydride groups can form ester linkages with wood surfaces via strong covalent bonds while non-polar long-chain PE can perform physical entanglement with LDPE in PVC/LDPE matrix. This may be the reason why the mechanical property improvement using MAPE was more significant than that using Silane A-

137 or A-1100. Ester and physical linkages were also purposed for the cellulose fibers reinforced polypropylene composites modified by maleic anhydride copolymer [17].

Effect of Silane:MAPE ratio on Mechanical Properties

The effect of the use of mixed Silane and MAPE was examined by varying different ratios of Silane:MAPE, i.e. 2%:1%, 1%:1% and 1%:2%, the total content of Silane and MAPE being maintained at 3.0%wt sawdust. It can be seen in **Figures 8-13** that using both Silane and MAPE caused a significant enhancement in mechanical properties of the wood-PVC/LDPE composites. According to the results and explanations given when using single coupling agent in **Figure 7**, the use of mixed Silane A-137:MAPE or mixed Silane A-1100:MAPE still caused the physical and chemical linkages in different active sites. For mixed Silane A-137:MAPE, the dipole-dipole interaction and hydrogen bonds were probably formed on the polar ends of Silane A-137 with the sawdust surfaces, and the covalent bonds by ester linkages were given via anhydride part in MAPE and hydroxyl groups in the sawdust. At the same time, the physical entanglement was obtained on the non-polar ends of mixed Silane A-137 and MAPE with the PVC/LDPE matrix. For mixed Silane A-1100:MAPE, the sawdust reinforcement interacted with the PVC/LDPE matrix by dipole-dipole interaction from Silane A-1100, and the physical entanglement and covalent bonds were caused by presence of MAPE. It should be noted that the physical entanglement could not be obtained between the Silane A-1100 and the PVC/LDPE matrix since the chain ends of the Silane A-1100 molecules are polar, leading to less physical interaction between the matrix and the reinforcement, compared with that of using both Silane A-137 and MAPE. This explanation suggested that the mixed Silane A-137:MAPE resulted in better improvement in the

mechanical properties of the composites than the mixed Silane A-1100:MAPE. This was consistent with the mechanical properties of the composite using only Silane A-137, Silane A-1100 or MAPE (**Figures 1-6**).

When different ratio of mixed Silane A-137:MAPE and mixed Silane-A-1100:MAPE were taken into account, it was found that using the highest amount of MAPE (at the ratio of 1%:2% Silane:MAPE) led to the optimum mechanical properties of the composites. It was postulated that by the presence of MAPE the possibility of the self-condensation reaction in Silane A-137 became minimized, this leading to higher active sites of the Silane to interact with the PVC/LDPE matrix and the sawdust reinforcement.

Effect of Silane or MAPE on Morphological Properties

Morphological properties of the Sawdust/PVC/LDPEcomposites are shown in **Figure 14**. It can be seen in **Figure 14(a)** that the matrix of PVC and LDPE blend compatibilized by PA20 was rather rough because high amount of LDPE (40 phr) was added into the PVC phase. Besides, the sawdust dispersed in the matrix phase of PVC/LDPE blend shows poor interfacial adhesion. When using Silane A-137, Silane A-1100 or MAPE, the SEM micrographs in **Figures 14(b)-(d)** suggested that wetting phenomena was obtained, i.e. the wood particles were covered by the PVC/LDPE polymer matrix phase, indicating an improvement of the interfacial adhesion between the PVC/LDPE matrix and the wood reinforcement. The morphological results were in line with the improvement of mechanical properties of the composites by the presence of the three coupling agents.

Effect of Silane and/or MAPE on DMA and Thermal Properties

Thermal properties of the Sawdust/PVC/LDPE composites were examined using DMA and TGA techniques. The relationships between storage modulus and loss modulus with temperature of the composites using Silane and/or MAPE are shown in **Figure 15**. It can be seen that storage modulus or elastic energy of the composites with modifications by Silane A-137 and MAPE shifted upwards to higher values while that with Silane A-1100 remained the same as that without addition of coupling agents. The composites with different ratios of Silane A-137:MAPE or Silane A-1100:MAPE also showed an increase in storage modulus. The DMA results confirmed the property enhancement of the composites through the use of chemical coupling agents. Similar behavior was found for changes in loss modulus of the composites.

In general, the loss tangent or $\tan \delta$ is the ratio of the loss modulus to the storage modulus and the $\tan \delta_{\max}$ value could be used to give glass transition temperatures (T_g) of polymers. It was found that the $\tan \delta_{\max}$ decreased with addition of the three coupling agents although both storage and loss moduli increased accordingly. The values of T_g of the different composite samples obtained from DMA technique are shown in **Table 2**. The results suggested that the composites treated with Silane A-137, Silane A-1100 or MAPE had slightly lower T_g than the untreated composites, but the T_g values did not change with varying types and contents of the coupling agents. The evidence of the increase in storage modulus and the decrease in $\tan \delta$ indicates the reinforcement occurring in the composites. Thermal decomposition temperatures (T_d) of the wood-PVC/LDPE composites obtained from the onset temperature that the composites started to decompose, were tabulated in **Table 2**. A slight increase in the

T_d was observed for all treated composite, indicating the reinforcement of the composites by the use of the three coupling agents.

Conclusion

Composites from PVC/LDPE blend reinforced by rubber-wood sawdust were prepared and modified using three different coupling agents (Silane A-137, Silane A-1100 or MAPE). The effect of sawdust content, Silane or MAPE content and the ratio of Silane:MAPE were examined. It was found that mechanical properties i.e. tensile, flexural and impact properties of the composites were improved with addition of Silane or MAPE into the composites. Moreover, Silane A-137 and MAPE showed greater effect on mechanical property enhancement than Silane A-1100. Physical or chemical interactions in the composite systems were different for each coupling agent. Wetting phenomena was also observed in the composite samples, regardless of the types of the coupling agents. The experimental results suggested that the optimum mechanical properties could be obtained using MAPE at 3.0%wt sawdust for single coupling system, and Silane A-137:MAPE of 1%:2%wt sawdust for mixed coupling system. In addition, the slight increase of T_d and the slight decrease of T_g of the composites incorporated with Silane A-137, Silane A-1100 or MAPE were obtained.

Acknowledgements

This work was financially supported by Thailand Research Fund (TRF) and the Commission on Higher Education, Ministry of Education (Project code: MRG4780091). Special thanks to Department of Chemistry, Faculty of Science, KMITL for the processing and testing machines.

References

- [1] Miles, I.S.; Rostami, S. in “Multicomponent Polymer Systems”, Longman Scientific&Technical, 1992.
- [2] Prachayawarakorn, J.; Khamsri, J.; Chaochanchaikul, K; Sombatsompop, N. J Appl Polym Sci, 2006, 102, 598.
- [3] Bledzki, A.K.; Gassan, J. Prog Polym Sci, 1999, 24, 221.
- [4] Sombatsompop, N.; Chaochanchaikul, K. J Appl Polym Sci, 2005, 96, 213.
- [5] Sombatsompop, N.; Yotinwattanakumtorn, C.; Thongpin, C. J Appl Polym Sci, 2005, 97, 475.
- [6] Bikiaris, D.; Matzinos, P.; Larena, A.; Flaris, V.; Panayiotou, C. J Appl Polym Sci, 2001, 81, 701.
- [7] Matias, M.C.; Orden, M.U.; Sanchez, C.G.; Urreaga, J.M. J Appl Polym Sci, 2000, 75, 256.
- [8] Coutinho, F.M.B.; Costa T.H.S.; Carvalho, D.L. J Appl Polym Sci, 1997, 65, 1227.
- [9] Rozman, H.D.; Kon B.K.; Abusamah, A.; Kumar, R.N. J Appl Polym Sci, 1998, 69, 1993.
- [10] Karnani, R.; Krishnan, M.; Narayan R. Polym Eng Sci, 1997, 37, 476.
- [11] Keener, T.J.; Stuart, R.K.; Brown, T.K. Composites: Part A, 2004, 35, 357.
- [12] Harper, D.; Wolcott, M. Composites: Part A, 2004, 35, 385.
- [13] Marcovich, N.E.; Villar, M.A. J Appl Polym Sci, 2003, 90, 2775.
- [14] Zhang, F.; Endo, T.; Qiu, W.; Yang, L.; Hirotsu, T. J Appl Polym Sci, 2002, 84, 1971.
- [15] Colom, X.; Carrasco, F.; Pages, P.; Canavate, J. Comp Sci Tech, 2003, 63, 161.
- [16] Balasuriya, P.W.; Ye, L.; Mai, Y.-W.; Wu, J. J Appl Polym Sci, 2002, 83, 2505.

[17] Felix, J.M.; Gatenholm, P. JAppl Polym Sci, 1991, 42, 609.

List of Tables

Table No.	Captions
Table 1	Chemical structures and descriptions of Silane coupling agents
Table 2	Glass transition (T_g) and thermal decomposition (T_d) temperatures of the sawdust/PVC/LDPE composites using different types and ratio of Silane coupling agents or MAPE

List of Figures

Figure No.	Captions
Figure 1	Young's modulus of the sawdust/PVC/LDPE composites using different contents of Silane A-137, Silane A-1100 and MAPE
Figure 2	Tensile strength of the sawdust/PVC/LDPE composites using different contents of Silane A-137, Silane A-1100 and MAPE
Figure 3	Elongation at break of the sawdust/PVC/LDPE composites using different contents of Silane A-137, Silane A-1100 and MAPE
Figure 4	Flexural modulus of the sawdust/PVC/LDPE composites using different contents of Silane A-137, Silane A-1100 and MAPE
Figure 5	Flexural strength of the sawdust/PVC/LDPE composites using different contents of Silane A-137, Silane A-1100 and MAPE
Figure 6	Impact strength of the sawdust/PVC/LDPE composites using different contents of Silane A-137, Silane A-1100 and MAPE
Figure 7	Schematic diagram of the proposed interactions of the sawdust/PVC/LDPE composites using (a) Silane A-137 (b) Silane A-1100 and (c) MAPE
Figure 8	Young's modulus of the sawdust/PVC/LDPE composites using different ratios of Silane A-137:MAPE and Silane A-1100:MAPE
Figure 9	Tensile strength of the sawdust/PVC/LDPE composites using different ratios of Silane A-137:MAPE and Silane A-1100:MAPE
Figure 10	Elongation at break of the sawdust/PVC/LDPE composites using different ratios of Silane A-137:MAPE and Silane A-1100:MAPE
Figure 11	Flexural modulus of the sawdust/PVC/LDPE composites using different ratios of Silane A-137:MAPE and Silane A-1100:MAPE
Figure 12	Flexural strength of the sawdust/PVC/LDPE composites using different ratios of Silane A-137:MAPE and Silane A-1100:MAPE
Figure 13	Impact strength of the sawdust/PVC/LDPE composites using different ratios of Silane A-137:MAPE and Silane A-1100:MAPE
Figure 14	SEM micrographs of the sawdust/PVC/LDPE composites using (a) no Silane or MAPE (b) Silane A-137 (c) Silane A-1100 and (d) MAPE
Figure 15	(a) Storage modulus and (b) loss modulus of the sawdust/PVC/LDPE composites using different types and ratios of Silane or MAPE
Figure 16	Tan δ of the sawdust/PVC/LDPE composites using different types and

	ratios of Silane or MAPE
--	--------------------------

Table 1 Chemical structures and descriptions of Silane coupling agents

Silane types	Chemical description	Chemical structure
Silane A-137	Octyltriethoxy silane	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{Si}(\text{OCH}_2\text{CH}_3)_3$
Silane A-1100	γ -aminopropyltriethoxy silane	$\text{H}_2\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{Si}(\text{OCH}_2\text{CH}_3)_3$

Table 2 Glass transition (T_g) and thermal decomposition (T_d) temperatures of the Sawdust/PVC/LDPEcomposites using different types and ratios of Silane or MAPE

Samples	T_g (°C)	T_d (°C)
PVC/LDPE/PA20/SD	88.2	230
PVC/LDPE/PA20/SD + Silane A-137	86.5	237
PVC/LDPE/PA20/SD + Silane A-1100	87.4	231
PVC/LDPE/PA20/SD + MAPE	86.0	235
PVC/LDPE/PA20/SD + (2%:1%) Silane A-137:MAPE	86.3	239
PVC/LDPE/PA20/SD + (1%:1%) Silane A-137:MAPE	86.5	232
PVC/LDPE/PA20/SD + (1%:2%) Silane A-137:MAPE	86.4	236
PVC/LDPE/PA20/SD + (2%:1%) Silane A-1100:MAPE	85.8	233
PVC/LDPE/PA20/SD + (1%:1%) Silane A-1100:MAPE	85.8	239
PVC/LDPE/PA20/SD + (1%:2%) Silane A-1100:MAPE	85.3	237

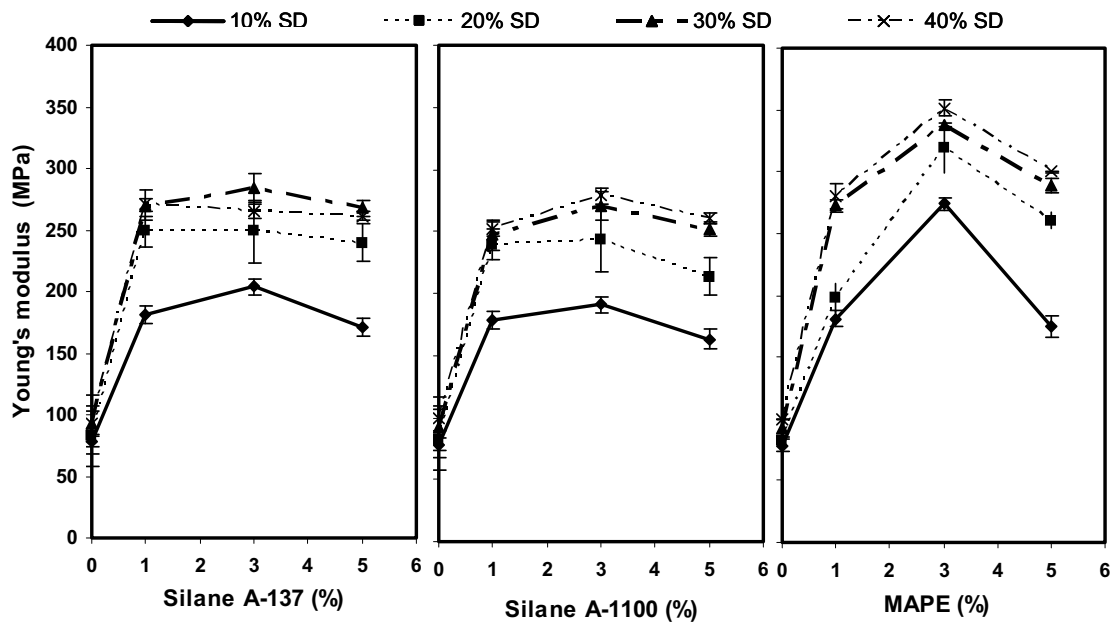


Figure 1 Young's modulus of the sawdust/PVC/LDPE composites using different contents of Silane A-137, Silane A-1100 and MAPE

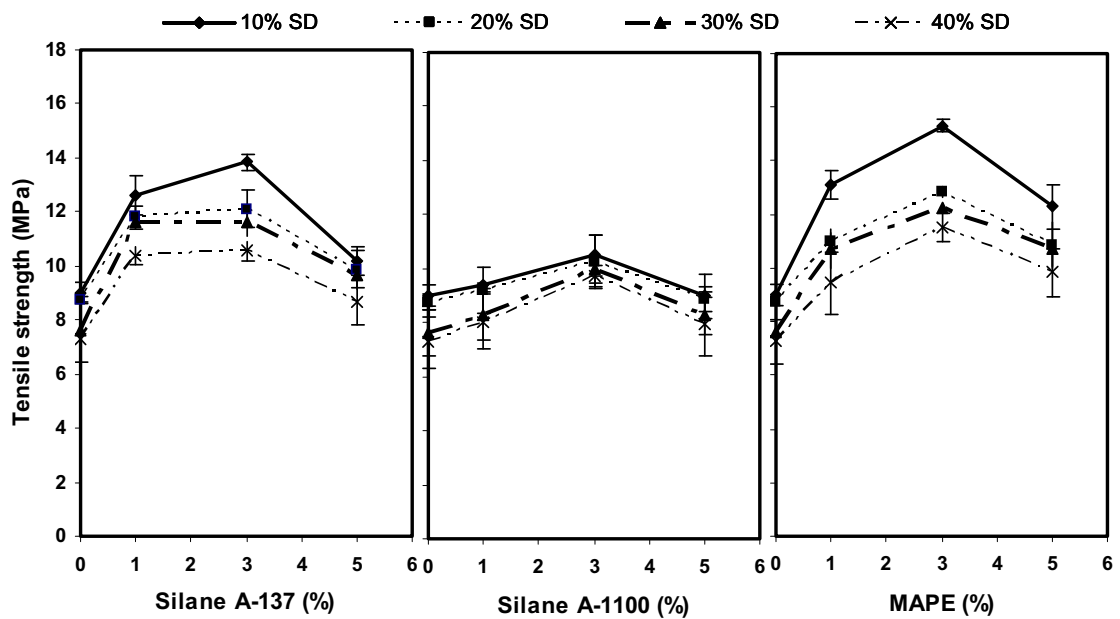


Figure 2 Tensile strength of the sawdust/PVC/LDPE composites using different contents of Silane A-137, Silane A-1100 and MAPE

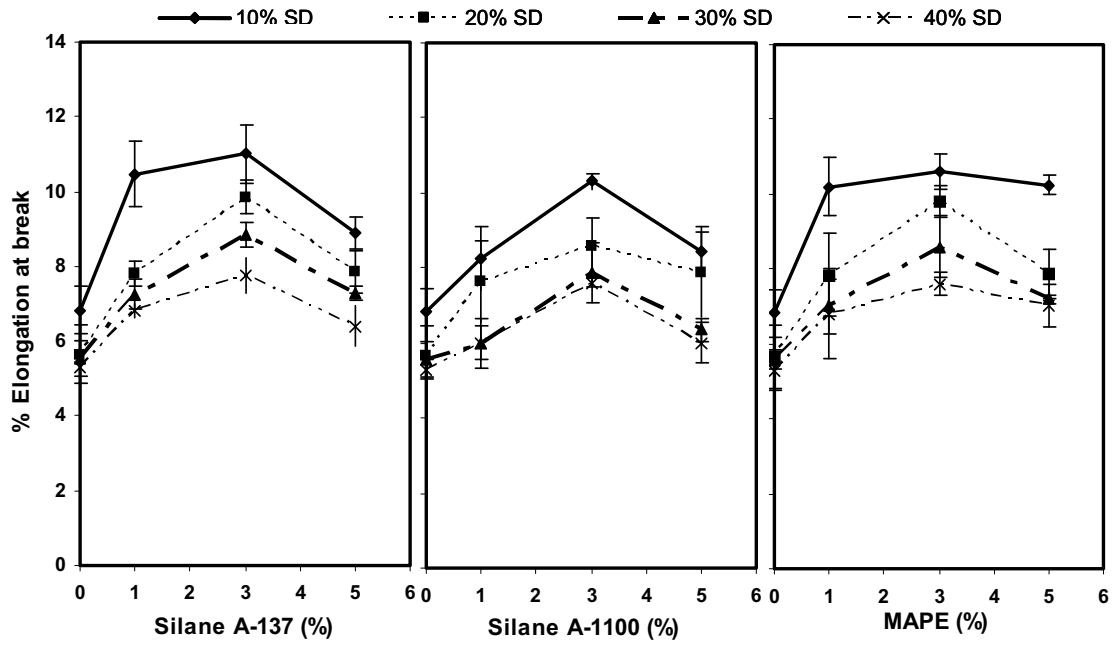


Figure 3 Elongation at break of the sawdust/PVC/LDPE composites using different contents of Silane A-137, Silane A-1100 and MAPE

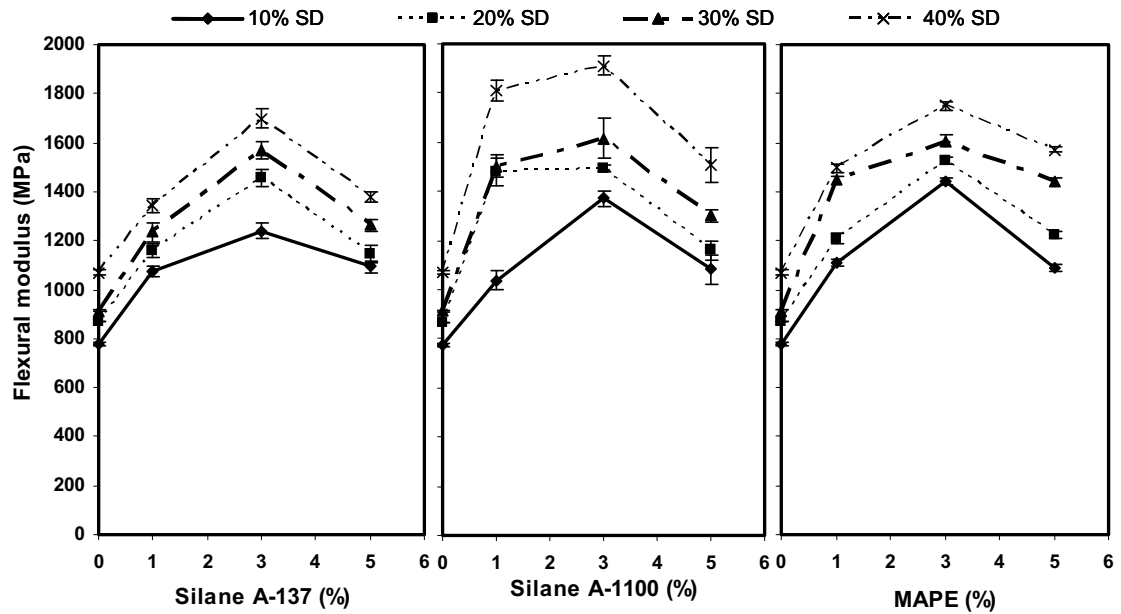


Figure 4 Flexural modulus of the sawdust/PVC/LDPE composites using different contents of Silane A-137, Silane A-1100 and MAPE

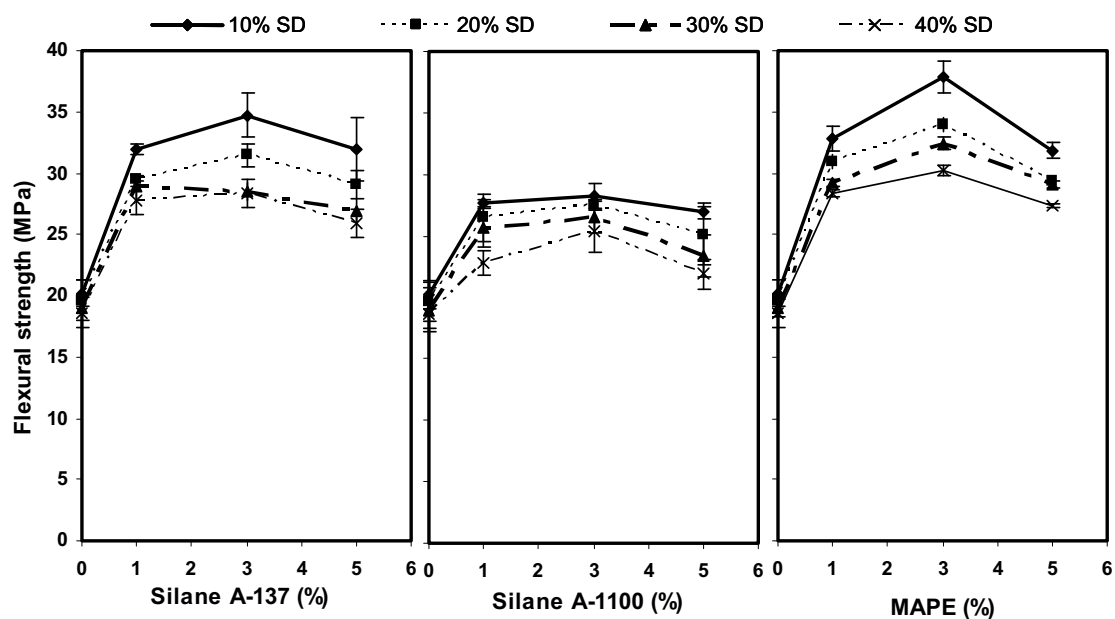


Figure 5 Flexural strength of the sawdust/PVC/LDPE composites using different contents of Silane A-137, Silane A-1100 and MAPE

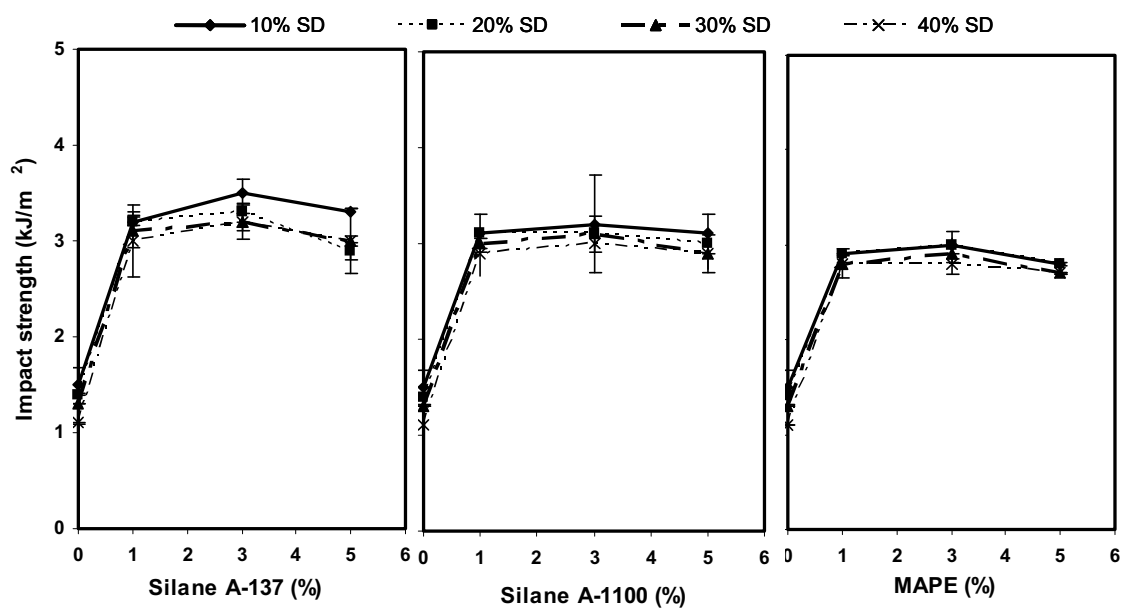
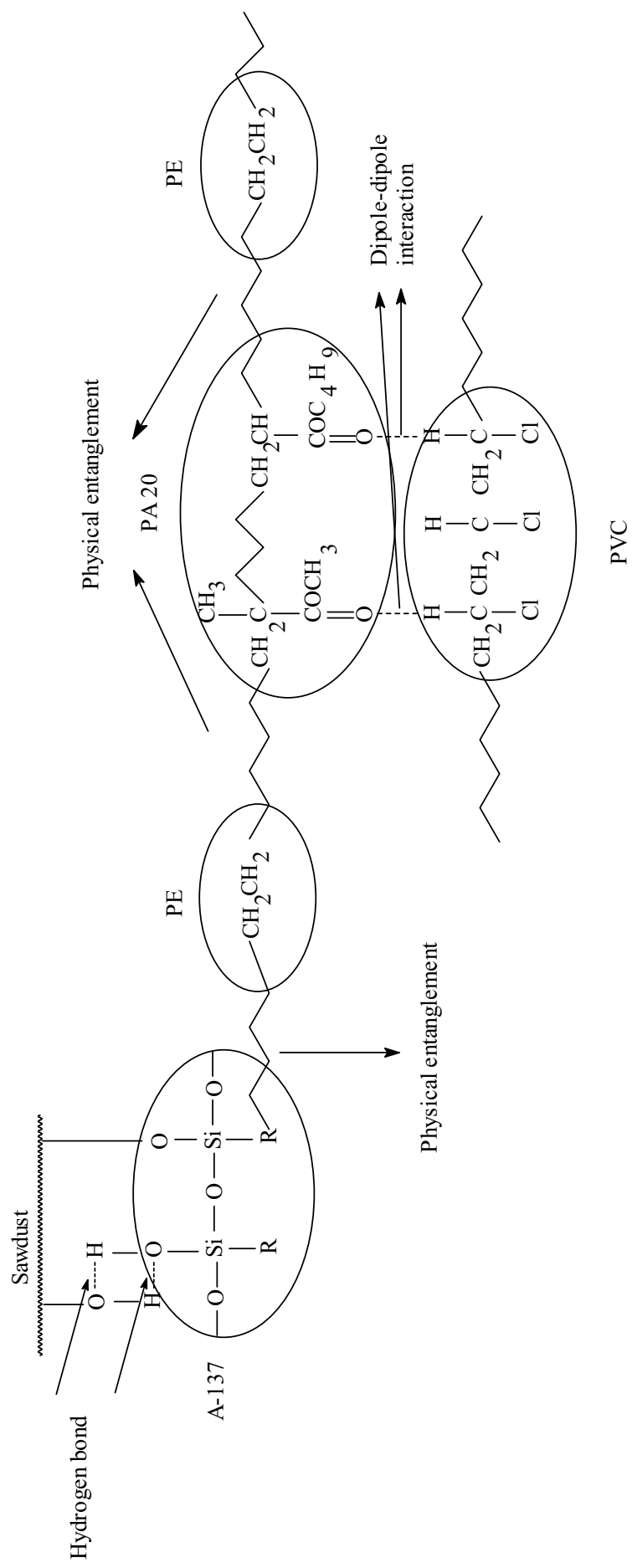
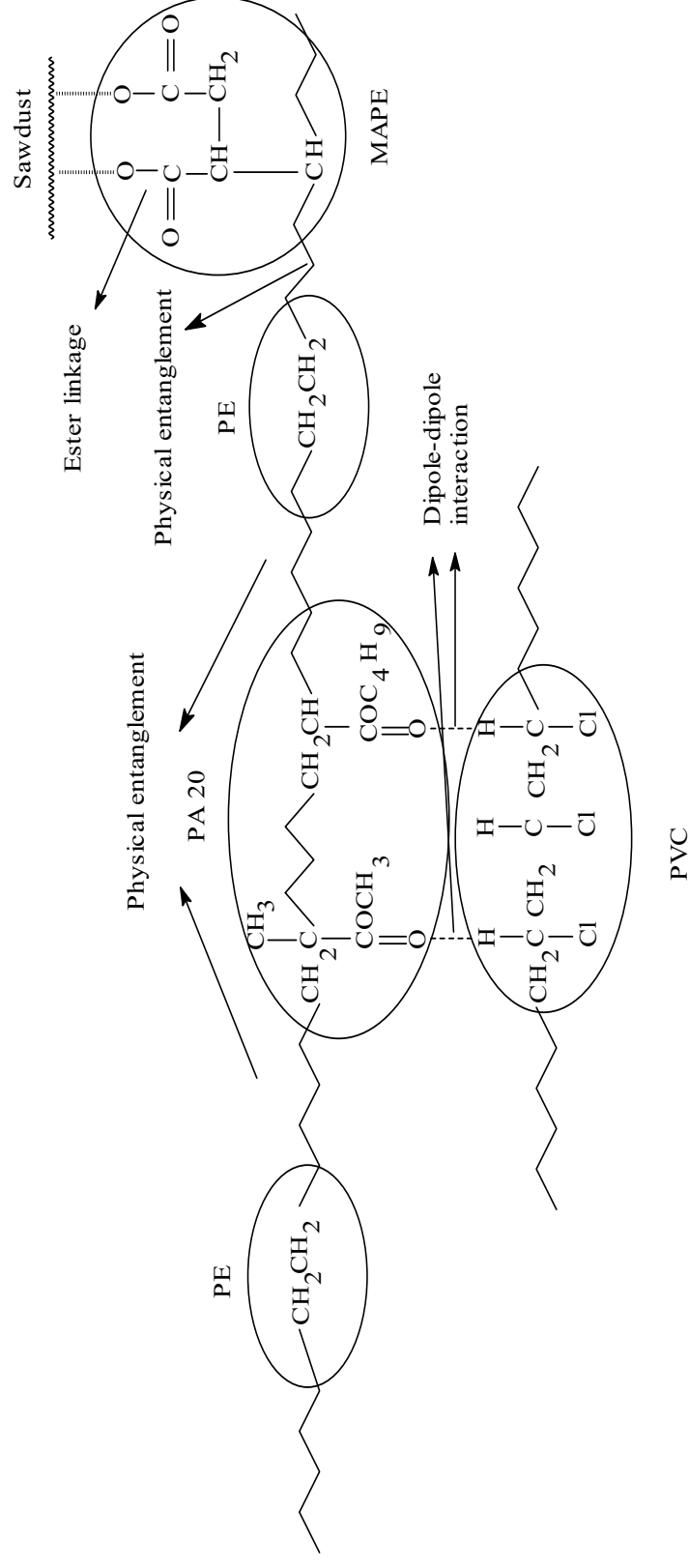


Figure 6 Impact strength of the sawdust/PVC/LDPE composites using different contents of Silane A-137, Silane A-1100 and MAPE



(a)



(c)

Figure 7 Schematic diagram of the proposed interactions of the sawdust/PVC/LDPE composites using (a) Silane A-137 (b) Silane A-1100 and (c) MAPE.

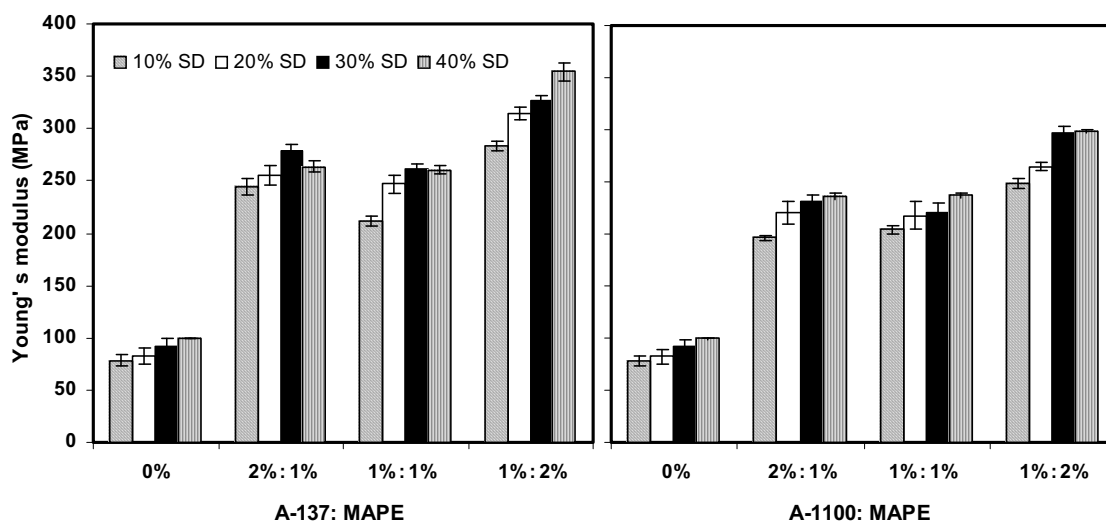


Figure 8 Young's modulus of the sawdust/PVC/LDPE composites using different ratios of Silane A-137:MAPE and Silane A-1100:MAPE

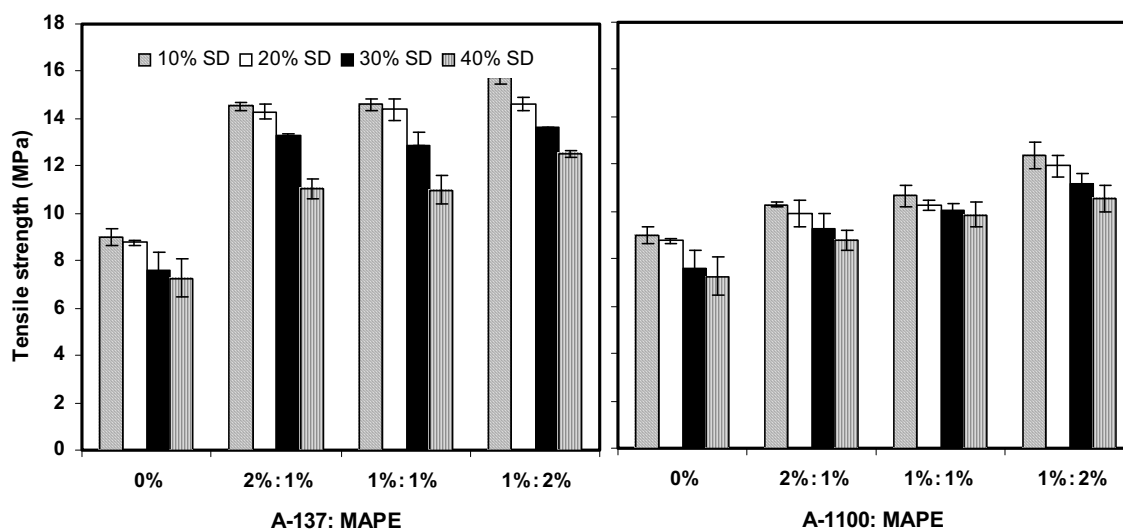


Figure 9 Tensile strength of the sawdust/PVC/LDPE composites using different ratios of Silane A-137:MAPE and Silane A-1100:MAPE

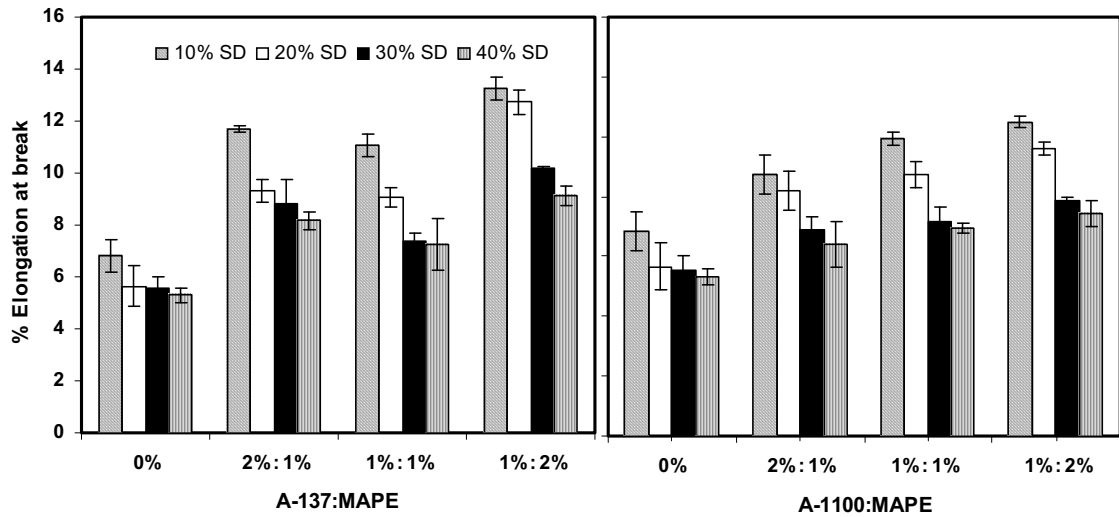


Figure 10 Elongation at break of the sawdust/PVC/LDPE composites using different ratios of Silane A-137:MAPE and Silane A-1100:MAPE

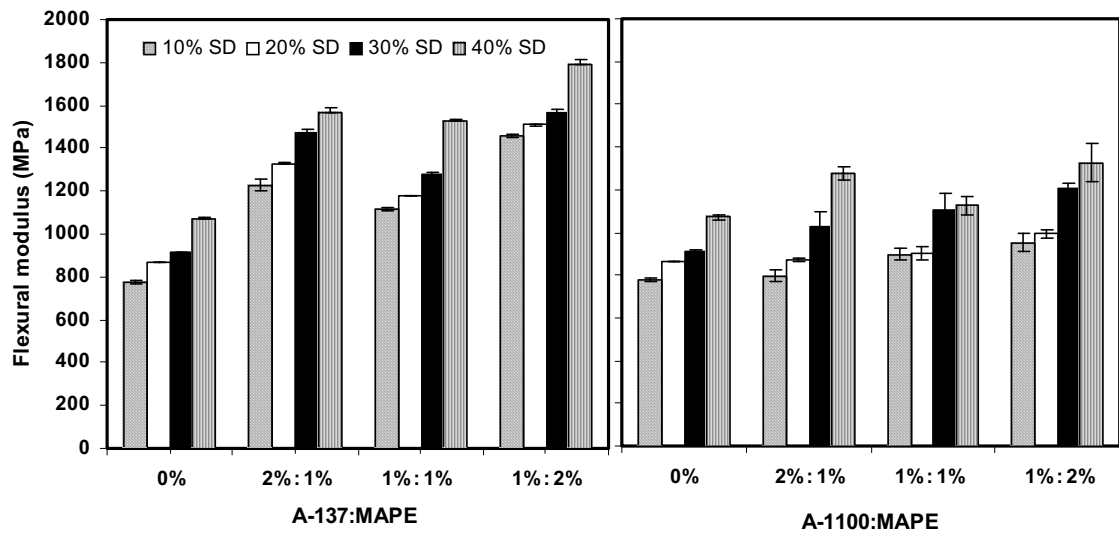


Figure 11 Flexural modulus of the sawdust/PVC/LDPE composites using different ratios of Silane A-137:MAPE and Silane A-1100:MAPE

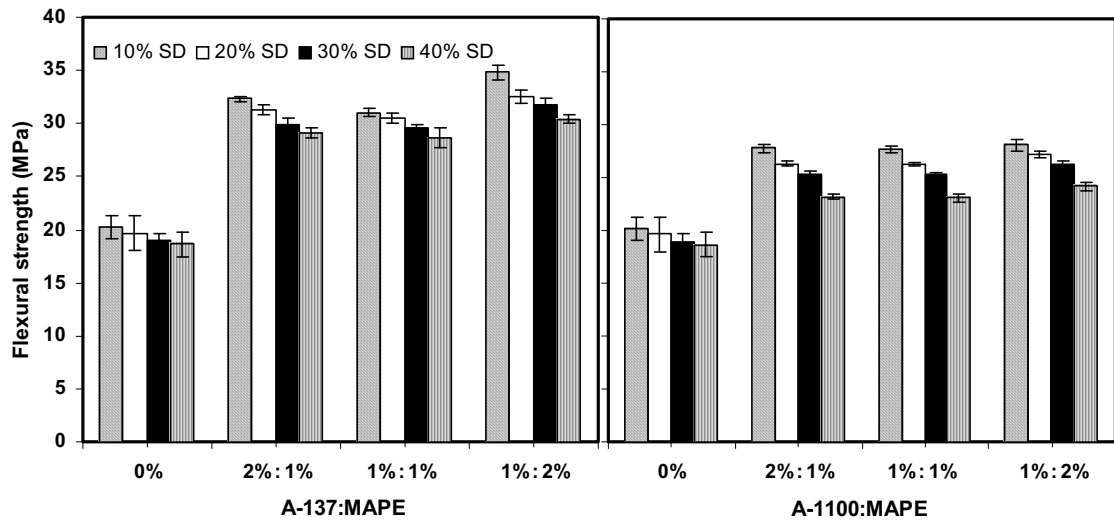


Figure 12 Flexural strength of the sawdust/PVC/LDPE composites using different ratios of Silane A-137:MAPE and Silane A-1100:MAPE

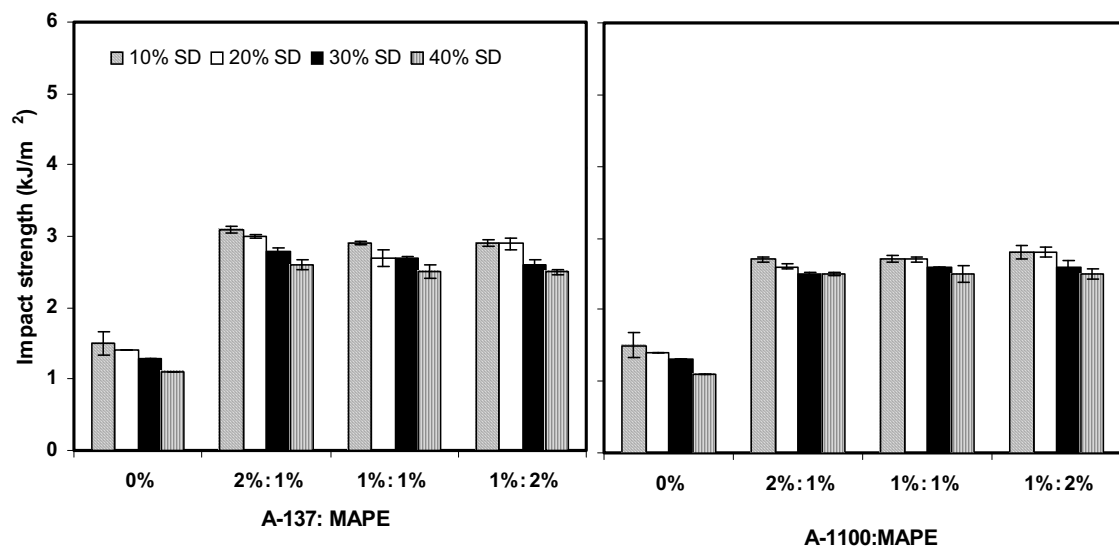


Figure 13 Impact strength of the sawdust/PVC/LDPE composites using different ratios of Silane A-137:MAPE and Silane A-1100:MAPE

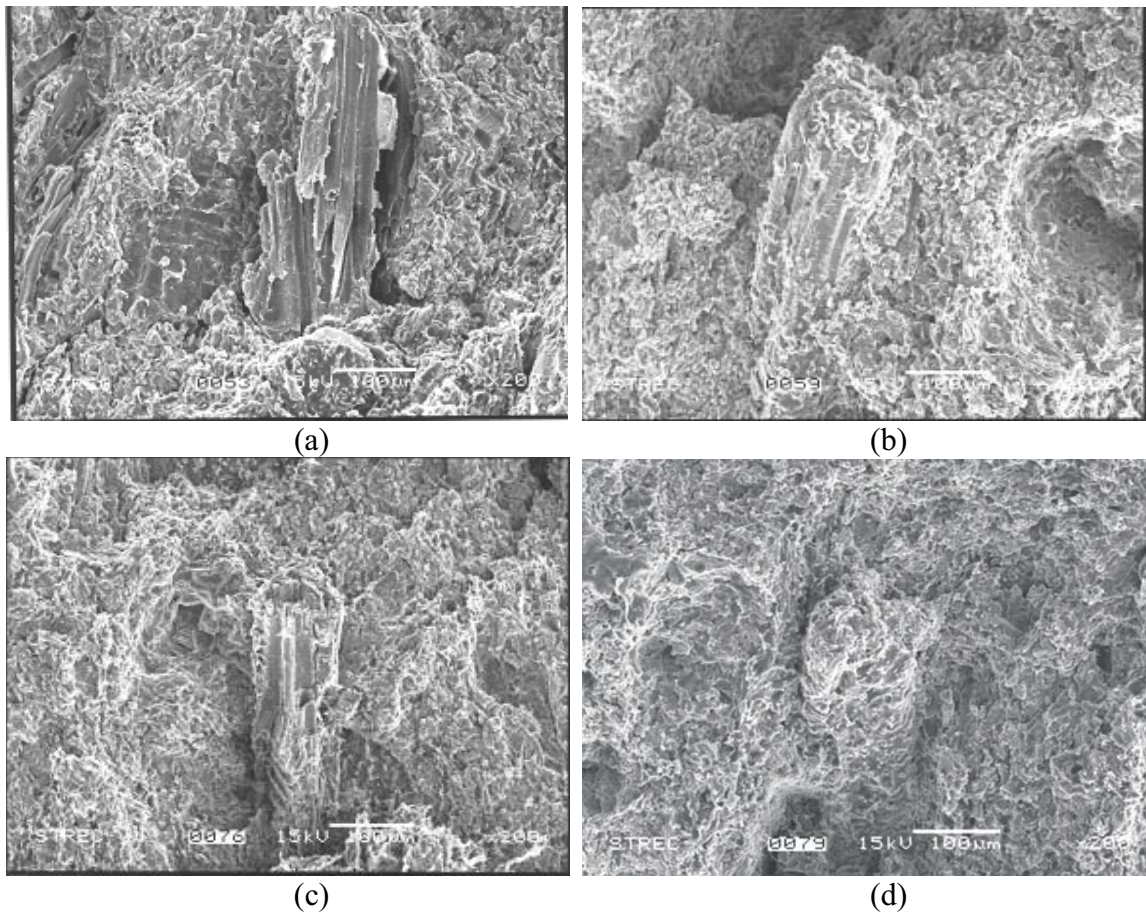


Figure 14 SEM micrographs of the sawdust/PVC/LDPE composites using (a) no Silane or MAPE (b) Silane A-137 (c) Silane A-1100 and (d) MAPE.

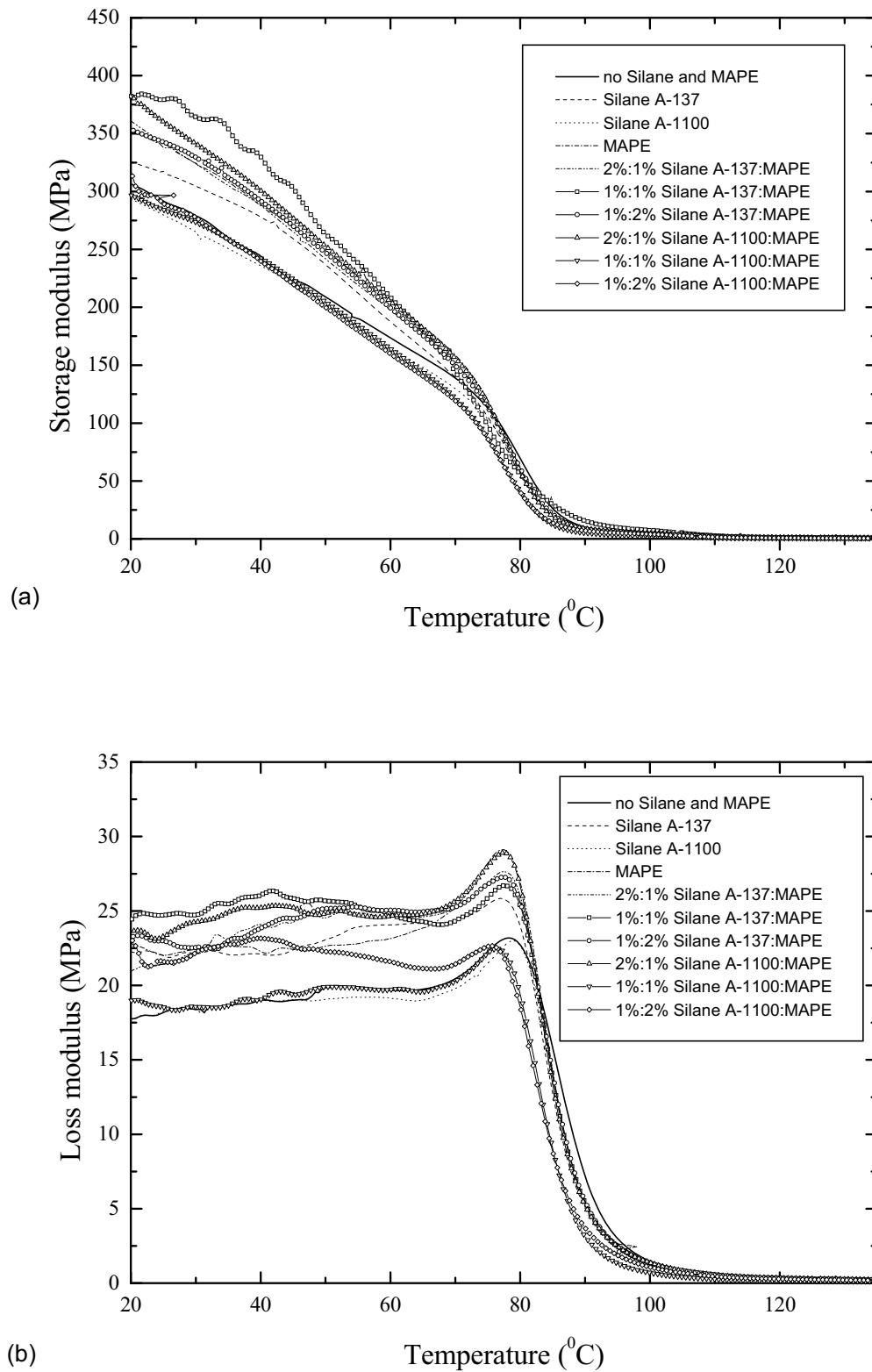


Figure 15 (a) Storage modulus and (b) loss modulus of the sawdust/PVC/LDPE composites using different types and ratio of Silane or MAPE

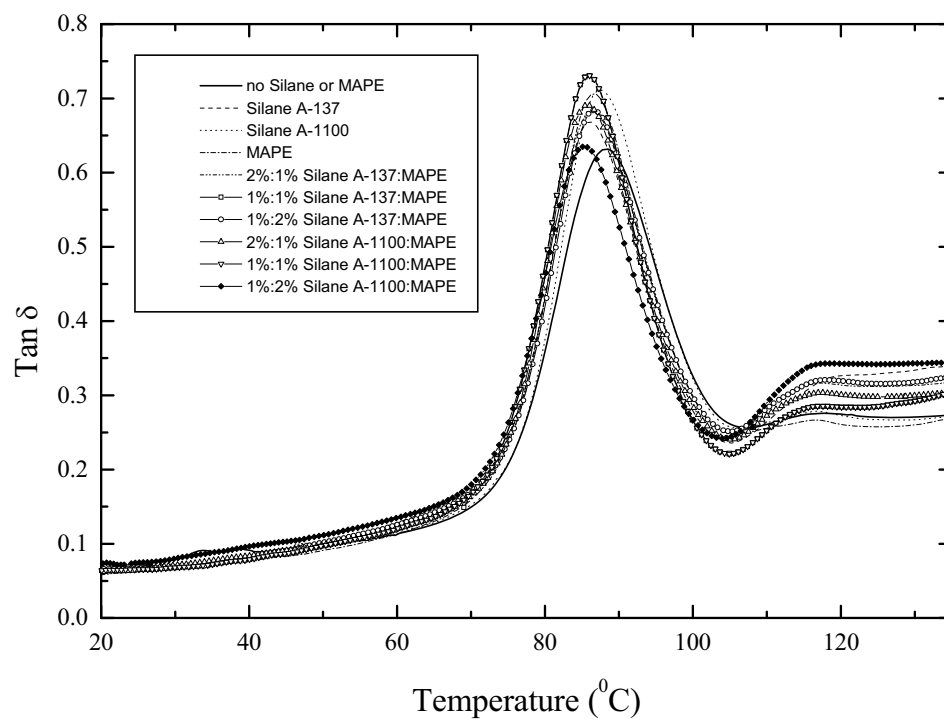


Figure 16 Tan δ of the sawdust/PVC/LDPE composites using different types and ratios of Silane or MAPE

Physical, Chemical and Dyeing Properties of *Bombyx mori* Silks grafted by 2-Hydroxy ethylmethacrylate (HEMA) and Methyl methacrylate (MMA)

J. Prachyawarakorn and K. Boonsawat*

Department of Chemistry, Faculty of Science,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL),
Bangkok 10520, Thailand. *e-mail: ksjutara@kmitl.ac.th

Abstract

To obtain silk weight gain and improve silk properties, *Bombyx mori* silks were grafted by either 2-hydroxy ethylmethacrylate (HEMA) or methyl methacrylate (MMA). It was found that moisture regain of the HEMA- and MMA-grafted silks depended on the hydrophilicity of the used monomers. Acid and alkaline resistances of the HEMA- and MMA-grafted silks were clearly improved. Both commercial synthetic dyes, i.e. acid and reactive dyes as well as natural dye extracted from turmeric, with potassium aluminum sulphate mordant, were used in this present study. The results suggested that % dye uptake was increased with the presence of PHEMA or PMMA in the silk fibroin structure, regardless of the types of the dyestuffs. Compared to the degummed silk, washfastness level of the HEMA-grafted silk dyed by acid and reactive dyes was similar to that of the degummed silk. However, colorfastness to washing of the MMA-grafted silk dyed by acid dyed was improved when % polymer add-on was 65%. In addition, washfastness for both of the grafted silks was improved when they were dyed with curcumin natural dyestuff. Acid and alkaline perspiration fastness properties were found to remain unchanged for the HEMA- and MMA-grafted silks when acid, reactive and curcumin dyes were applied.

Key words: Silks, Graft copolymers, Dyes, Colorfastness

INTRODUCTION

Bombyx mori silks are excellent fibers conventionally used for making yarns, cloths or decorative articles since silks present many outstanding attractions including strength, dyeability, luster, moisture absorption, etc. that distinguish them from other natural and synthetic fibers. However, silks still lack some important performances such as colorfastness properties, abrasion resistance, dimensional stability etc. and these properties are needed to improve. In recent years, graft copolymerization is a well-known technique to impart new property or heighten the existing properties in the parent polymer with minimum degradation of the original properties [1]. The nature of grafted copolymer is dependent on types of grafting monomer and degree of grafting [2].

There has been many researches focused on grafting technique onto silk fibroin using different types of vinyl monomers, i.e. methyl methacrylate (MMA) [3-6], methacrylamide (MAA) [5, 7], 2-hydroxy ethylmethacrylate (HEMA) [5, 7-8] and ethoxy ethylmethacrylate (ETMA) [9]. It was found [3-9] that silks grafted by vinyl monomers showed the improvement of thermal stability and wrinkle recovery; whereas % crystallinity of silk fibroin remained unchanged. Nevertheless, mechanical properties of grafted silks slightly dropped with the increase of % polymer add-on. T.K. Maji *et al.* [3] reported that moisture regain of MMA-grafted silk decreased because of the hydrophobicity of the MMA monomer. When potassium sulfate and tri-n-butylborane were used as the initiators for grafting silks with MMA monomer, it was found that [6] greater % polymer add-on caused greater weight-averaged molecular weight of the PMMA. M. Tsukada *et al.* [7] studied the structures and properties of tussah silks grafted by HEMA and MAA and the results suggested that very high weight gain of 175% could be obtained but high weight gain caused noticeable granules on the surface of the grafted silks. In addition, moisture regain of not only HEMA- but also MAA-grafted silks was higher than that of the degummed silk [5]. The effect of 3 different types of

the initiators, i.e. ammonium persulfate (APS), (2, 2'-azobis(2-amidinopropane) dihydrochloride (ADC) and 2,2'-azobisisobutyronitrile (AIBN) on properties of MMA-, MAA- and HEMA-grafted silks was also examined [5]. Furthermore, ETMA-grafted silks also showed the appearance of ETMA oligomers on the surface of the ETMA-grafted silk, especially when the % polymer add-on was more than 40% [9].

In general, silks used for textile application are necessary to be dyed for customer attraction. Textile fibers are expected to present good fastness properties to ensure that they remain in their natural state after dyeing process and normal daily life usage. Dye uptake is, therefore, the important parameter for dyeing procedure; whereas, colorfastness properties are the most essential aspects for fabric exploitations.

In the view of dyestuffs, synthetic dyes are commercially available due to various choices of color shades and ease of use but the major concern is the environmental problem. Natural dyes, as a result, become other options since they present environmental compatibility, low toxicity and low allergic reaction to fabric wearers. One of the popular natural bright yellow dyes is curcumin (1, 7-bis(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-1, 6-heptadiene-3, 5-dione) extracted from the root of turmeric, a perennial herb *Zingiber officinale*. The yellow colorant has been used as the natural dyestuff and also as the food colorant [11-12]. Nevertheless, the main problem with natural dyes is the poor fastness properties [13-14].

There are only a few researchers reported on dyeing properties of the grafted silks [9-10]. M. Tsukada *et al.* stated on the improvement of % dye uptake when the ETMA-grafted silk was dyed with acid dye [9]. Furthermore, fastness to washing and perspiration of the degummed silk dyed with acid, basic and curcumin dyes could be improved by grafting with MMA and MAA monomers with % grafting of approximately 45% [10]. Nevertheless, no research investigated on dyeing properties of the cultivated silk (*Bombyx mori*) grafted by

HEMA. In general, HEMA is one of the important vinyl monomers since it is usually used as daily wear contact lens due to its biocompatibility and hydrophilic property. Because of the hydrophilic property of HEMA, it can be used as the grafting monomer for silk fibroin that will lead to comfort during wearing silk fabric. Therefore, this paper was focused on dyeing properties, i.e. dye uptake, colour measurement and color fastness properties of the HEMA-grafted silk, compared with the MMA-grafted silk. Besides, physical and morphological properties of the HEMA- and MMA-grafted silks were also investigated.

EXPERIMENTAL

Materials

Raw silks (*Bombyx mori*) were supported by Jim Thompson, Thailand. Reagent grades of 2-hydroxy ethylmethacrylate (HEMA) and methyl methacrylate (MMA) monomers including formic acid were obtained from Merck, Co. Ltd. Ammonium persulfate (APS) was used as the initiator. Alkali solutions of both sodium carbonate and sodium bicarbonate as well as Sandopan 60 soap solution were used for degumming. Acid dye (Erionyl Yellow A-R, C.I. Acid Orange 67) and reactive dye (Cibacron Yellow W-R, C.I. Reactive Yellow 205) belonged to Ciba Specialty Chemicals, Thailand. Curcumin (*Curcuma longa*, C.I. Natural Yellow 3) was obtained locally and the mordant used for natural colorant dyeing was potassium aluminium sulphate from Fluka, Co. Ltd.

Degumming and Grafting

Raw silks were firstly degummed in an aqueous solution, containing 0.05 mol/l sodium carbonate, 0.05 mol/l sodium bicarbonate and soap, at 80°C for 30 min. Grafting was performed by immersing silks in the reaction system at pH 3 (adjusting with formic acid), containing 0.05 mol/l APS initiator as well as 0.8 mol/l of HEMA or MMA monomer. The material-to-liquor ratio during the treatment was maintained at 1:20. The temperature was gradually raised from room temperature to 80°C within 30 min and then maintained at this level for different periods of time. The grafted silks were thoroughly rinsed with acetone, followed by water and then vacuum dried. % weight gain was calculated from the weight difference of the dried silks before and after the graft treatment.

Dyeing

The degummed, HEMA- and MMA-grafted silks were dyed using exhaustion method with commercial acid and reactive dyestuffs in order to observe the dyeing characteristics of the silks. The concentration of the dyeing solution was kept at 3% o.w.f. and the ratio of dye solution to silk weight was maintained at 30:1. For acid dyeing, an initial temperature was 30°C and the dyeing temperature was then raised to 90°C within 30 min and the silks were further dyed at this temperature for 45 min. Reactive dyeing process started from dyeing at the temperature of 60°C for 45 min, followed by washing with cold and warm water until no change in color was obtained. Finally, the dyed silks for both acid and reactive dyes were dried at room temperature. It should be noted that dyeing condition and recipe conformed the manufacturer suggestions. Furthermore, natural colorant extracted from turmeric was prepared [10] by immersing turmeric in 75% ethanol solution, the suitable solvent for curcumin extraction, using the 1:20 material to liquid ratio for 1 h. The resulting filtrate was then used for further dyeing. The curcumin dyeing process was carried out using the dyeing temperature of 60°C for 10 min and the material to liquid ratio was maintained at 1:30. Potassium aluminium sulphate mordant (8% o.w.f.) was used during the dyeing procedure (metamordant) for curcumin dyeing. In addition, % dye uptake was examined from the increase in the weight gain before and after dyeing processes and 3 measurements were carried out for calculating and averaging % dye uptake values.

Morphology

A LEO 1455 VP scanning electron microscopy was employed to study surface morphology of the degummed and grafted silks. The samples were sputter-coated with a thin layer of gold to prevent electrical charging during the observation. The surface characteristics were examined and operated at 6kV accelerating voltage.

IR Spectroscopic Study

FTIR spectra of silk samples were recorded on a Spectrum 2000 GX spectrometer (Perkin-Elmer) using KBr disk technique with a resolution of 4 cm^{-1} in a spectral range of $4000\text{-}650\text{ cm}^{-1}$ using 16 scans per sample.

Moisture regain

The degummed and grafted silks were placed in a controlled room with the temperature of 21°C and 65% RH until the constant weight of the samples were obtained. The weight difference with the samples after drying in an oven at the temperature of 105°C for 2h was then calculated [15].

Chemical resistance

The silks were immersed in 3 M HCl and 0.1 M NaOH solutions at 65°C for 1 h, followed by washing in distilled water. The dried samples were then weighted and the weight loss was calculated in terms of percentage [15].

Color measurement

Color parameters i.e. L^* , a^* , b^* , C^* and H° were measured with the Miniscan XE plus Spectrophotometer using D65/10 $^{\circ}$ illuminant evaluated by CIE $L^* a^* b^*$ system. In this system, L^* represents lightness, a^* redness if positive and greenness if negative and b^* yellowness if positive and blueness if negative. In addition, C^* and H° showed chroma and color angle in color space of the samples, respectively. 5 measurements were carried out for each sample to obtain averaged color parameters.

Colorfastness

Colorfastness of the silk samples was performed for washing, acid and alkaline artificial perspiration solutions according to ISO 105 C01-C03 and ISO 105 E04, respectively. Colorfastness for washing and perspiration tests was carried out using both sample and standard (silk and cotton) fabrics that were sewn together and tested under the same conditions. For washing colorfastness, the sewn fabric was washed at 42°C for 30 min in a standard soap solution. Both fabrics were then separated and dried. For perspiration colorfastness testing, the sewn fabric were immersed in either acid (pH = 5.5) or alkaline (pH = 8.0) artificial perspiration solutions at room temperature for 30 min. Then, they were transferred into a perspirometer for pressing and the perspirometer was kept in an oven at the temperature of 37°C for 4 h and then the fabric was dried by air. It should be noted that washing and perspiration fastness levels, observed against greyscale, were classified as numbers ranging from 1 and 5, referring to poor to excellent fastness, respectively. In contrast, staining level on standard silk and cotton fabrics was labelled from 1 (the maximum stain) to 5 (the minimum stain).

RESULTS AND DISCUSSION

Grafted silks by HEMA and MMA vinyl monomers can be obtained via free radical polymerization using APS initiator. Two chemical reactions can take place i.e. grafting of monomers and macromonomers onto silk fibroin molecules and polymerization of individual monomers leading to homopolymers. For grafting technique, high polymer add-on as well as low level of homopolymerization is essential for industrial application.

Morphology

Surface morphology of the silks can be examined using SEM technique. **Figure 1** shows SEM micrographs of the degummed, HEMA- and MMA-grafted silks. The surface morphology revealed that the surface of the degummed silk was rather smooth as shown in **Figure 1(a)** but the rough surface of the HEMA- and MMA-grafted silks were obtained. The surface of the HEMA-grafted silks appeared to compose of polymer film coated on the silk (**Figure 1(b)**); however the surface of the MMA-grafted silks presented the granules of oligomer particles (**Figure 1(c)**). The observed surface morphology was due to the grafting process that caused bonding between the silk and the vinyl monomers.

IR Spectroscopic Study

The modifying agent used for chemical modification of silk fibroin can be examined using IR technique. IR spectra of the degummed and grafted silks are represented in **Figure 2**. IR spectrum of the degummed silk in **Figure 2(a)** showed the significant wavenumbers at 3411, 2921, 1646 and 1517 cm^{-1} , due to NH stretching, CH stretching, C=O stretching and NH bending in amides (amide I and amide II), respectively [4, 8]. The HEMA-grafted silks presented similar IR spectra to the degummed silk, except for the peak position of 3411 cm^{-1} , attributed to NH stretching, that shifted to higher wavenumber. The IR spectrum in **Figure**

2(b) of the HEMA-grafted silks presented the other absorption bands at the wavenumbers of 1728 and 1262 cm^{-1} , referred to C=O stretching of the ester groups in PHEMA. Moreover, additional absorption bands at 1738 and 1252 cm^{-1} , assigned for C=O stretching and C-O stretching of ester groups of PMMA, respectively; could be observed for the MMA-grafted silk (**Figure 2(C)**).

Moisture regain

Comfort during wearing silk fabrics is very important in views of textile application. Comfort can be indirectly determined via the ability of the textile to absorb moisture. Moisture regain of the degummed, HEMA- and MMA-grafted silks is represented in **Table 1**. Due to the hydrophilic characteristic of PHEMA, the moisture regain of the HEMA-grafted silk was dominantly higher than that of the degummed silk. As expected, greater content of PHEMA in the HEMA-grafted silk resulted in slightly higher % moisture regain. However, the MMA-grafted silk represented lower moisture regain than the degummed silk because of the hydrophobic nature of the PMMA, adhering on the surface of the MMA-grafted silk.

Chemical resistance

Acid and alkaline resistances can be expressed in terms of percentage of weight loss of the silks after the immersion of the samples in the specific solutions for a specific time. It can be seen in **Table 1** that % weight loss of the HEMA-grafted silk after acid and alkaline immersion were clearly decreased, probably due to the steric hindrance from the bulky group of the HEMA molecules, causing the difficulty for the proton from the acid to react with the fiber; and also, the hydrolysis by the alkaline became lower. Similar results (**Table 1**) could be obtained for the MMA-grafted silk showing that the weight loss decreased significantly,

indicating of the improvement of acid and alkaline resistances. This could be due to the hydrophobic property of the MMA monomer used for the grafting.

Dyeing Properties

In general, dyeing properties are unavoidably significant for textile utilization both for manufacturers and customers. The degummed silk was dyed with yellow commercial dyes of acid and reactive dyes including natural dye extracted from turmeric with the mordant.

Dye uptake

Both of the grafted silks showed greater % dye uptake than that of the degummed silk as shown in **Table 2** when acid, reactive and curcumin dyes were used. This could be because there is greater possibility of the dye molecule to penetrate into the silk amorphous area in the grafted silks, and therefore, the grafted chain can interact with the dye molecules in the opened amorphous area, leading to the enhancement of the amounts of the dyes in the opened boundary [10]. Besides, the increase of the % weight gain resulted in the increase of % dye uptake for the HEMA- and MMA-grafted silks.

For acid dyeing, cation of silk can attract to anion of acid dye; therefore, ionic bonding can mainly be formed. In contrast, chemical reaction is expected for the use of reactive dye. When curcumin dyestuff, the natural yellow colorant in flavonoid group, is applied, dipole-dipole interaction can be mainly formed between HEMA and MMA side group and the curcumin dyestuff, containing carbonyl, hydroxyl and methoxy groups [14].

Normally, salts of inorganic elements such as aluminium, iron, copper, etc., called mordant, are used with dyeing natural dyestuffs for improving not only interaction between dye and silk molecules but also color fastness properties of the resulted dyed material. In

addition, the formation of complex molecule could occur among the dyestuff, grafted silk fibroin and mordant molecules, brought about greater dyeing ability of the grafted silks.

Color parameters

Color difference in textile samples can be classified using spectrophotometer. **Table 3** presents color parameters obtained after color measurement, i.e. L^* , a^* , b^* , C^* and H° for the degummed and grafted silks, dyed with acid, reactive and curcumin dyes. It can be seen that for all of the grafted silks dyed with acid dye showed similar a^* and b^* values but L^* and C^* values for the HEMA- and MMA-grafted silk were higher than those of the degummed silk, showing greater brightness and chroma in the grafted silks. For the reactive dye, L^* and a^* values were approximately equal for all samples, b^* for both of the grafted silk was higher than that of the degummed silk and the HEMA-grafted silk with 75% polymer add-on presented the greatest b^* value, indicating of the most yellowness in the sample. In addition, C^* or chroma could be ranged in the following order: HEMA>MMA>degummed silks. Furthermore, L^* , b^* and C^* values for both of the grafted silks dyed by curcumin dyestuff were higher than the degummed silk.

Colorfastness properties

The ability of the dye molecules to retend within the fiber structure is an important aspect when dyed textile fabric is used. Better fastness properties results in the same color shade as the original state after the fabrics are used for a period of time. The important colorfastness properties are colorfastness to washing and perspiration. Colorfastness level and staining level on standard silk and cotton fabrics of the degummed, HEMA- and MMA-grafted silks were represented in **Tables 4 and 5**, respectively.

Colorfastness to Washing

Colorfastness to washing is very important for both dyeing and finishing processes. Washfastness test was performed by washing the standard and sample fabrics in the standard solution at the controlled temperature and time; after that, the color change was observed against grey scale and the washfastness level was reported from 1 to 5 as shown in **Table 4**. Washfastness property of the HEMA-grafted silk with % grafting of 28% and 75% dyed with acid dye was found to be in the same level as that of the degummed silks. Since the washing fastness level of the degummed silk was already in excellent level; therefore, the fastness to washing could be maintained by the grafting process using HEMA monomers. In addition, the staining level on silk and cotton standard fabrics was indicated as the fair level as presented in **Table 5**.

On the contrary, the MMA-grafted silk with % grafting of 65% dyed with acid dye showed better washfastness level than the degummed silk (**Table 4**) due to the ionic interaction between the carbonyl group of the MMA monomer and the anion of the dye molecule; therefore, the movement of the dye molecules was inhibited. In addition, stain on the standard silk and cotton fabrics was minimized with the 65% weight gain of the MMA-grafted silk (**Table 5**). However, low grafting level of approximately 12% of MMA does not result in the improvement of fastness to washing of the MMA-grafted silk (**Table 4**).

Because reactive dye can form covalent bond with silk fibroin, the degummed, HEMA- and MMA-grafted silks presented the excellent levels of fastness to washing as shown in **Table 4**. Besides, all the silk samples showed the least staining ability on the standard silk and cotton fabrics when reactive dye was used as indicated in **Table 5**.

When the curcumin was used, the colorfastness to washing (**Table 4**) of both of the grafted silks could be improved, because the HEMA- and MMA-grafted silks can interact with the curcumin dyestuff and form complex compounds between the dye, monomer and

mordant. Moreover, the improvement of colorfastness level to washing for both of the grafted silks, implied that, during the washing action, color maintenance capability was improved with the presence of PHEMA and PMMA molecules within the amorphous region of the grafted silk fibroin. On the contrary, great stain on the standard fabrics for all silks dyed with curcumin was obtained, as indicated by staining levels of 1 or 1-2 as shown in **Table 5**, even though colorfastness level for washing was increased by grafting with HEMA and MMA monomers.

Colorfastness to Perspiration

Each person excludes different chemical compositions of perspiration depending on body metabolism. In general, human perspiration can be divided into 2 different groups; i.e. acid and alkaline types, so 2 dissimilar tests were performed for the dyed silks, obtained from the degummed and grafted silks. **Table 4** present numerical levels of colorfastness for acid and alkaline artificial perspiration solutions, containing histidine monohydrochloride monohydrate, sodium chloride and sodium orthophosphate.

When acid dye was applied, it was found that colorfastness levels to both acid and alkaline perspiration solutions of HEMA-grafted silk were in the same level as that of the degummed silk and the staining levels were moderate (**Table 5**). Colorfastness properties to acid and alkaline perspiration as shown in **Table 4** for the MMA-grafted silk dyed with acid dye with % grafting of 65% showed better result, compared to the degummed silk, probably due to the formation of ionic bond between the MMA-grafted silk and the acid dye. On the other hand, the improvement of acid perspiration fastness for the MMA-grafted silk with 65% weight gain gave the same staining level on the standard fabrics as the MMA-grafted silk with 12% weight gain as represented in **Table 5**. Nevertheless, the fastness to acid and alkaline perspiration for the MMA-grafted silk with 12% grafting was similar to that of the degummed

silk. It was also shown in **Table 4** that all silks dyed by acid dye presented lower fastness to acid and alkaline perspiration solutions than the silks dyed by reactive dye, due to the covalent bond formation when reactive dye was used.

In the case of reactive and curcumin dyestuffs, colorfastness to acid as well as alkaline perspiration for the degummed, HEMA- and MMA-grafted silks was found to be in the same excellent level (**Table 4**), regardless of the % grafting, indicating that dye retention manners due to acid and alkaline perspiration solutions were maintained.

When staining level after acid and alkaline perspiration fastness tests was concerned, it was found in **Table 5** that all the samples dyed with reactive dye showed the highest staining level (the least stain) but the opposite results (the highest stain) was obtained when curcumin dye was used. The staining levels for all the samples tested for acid and alkaline perspiration could be ranged in the following order: reactive dye>acid dye>curcumin dye.

CONCLUSION

The HEMA-grafted silk showed higher moisture regain, acid and alkaline resistances than those of the degummed silk, regardless of % weight gain. Dye uptake of both of the HEMA- and MMA-grafted silks was increased when acid, reactive and curcumin dyes were applied. For colorfastness properties, the HEMA-grafted silk dyed with acid and reactive dyes presented the same fastness level to washing, acid and alkaline perspiration as the degummed silk. In contrast, colorfastness to washing of the MMA-grafted silk with 65% weight gain was better than that of the degummed silk when acid dye was applied. Nevertheless, washfastness of the degummed silks dyed with curcumin could be improved by grafting with HEMA and MMA monomers.

ACKNOWLEDGEMENT

This research work was financially supported by Thailand Research Fund (TRF) and the Commission on Higher Education, Ministry of Education (Project code: MRG4780091). The authors would also like to thank Jim Thompson and Ciba Specialty Chemicals, Thailand for kindly providing for the raw silks as well as acid and basic dyes, respectively.

REFERENCES

- [1] Khan, F., Chem Rev, 1993, 93, 267.
- [2] Ahmad, S.R.; Khan, F.; Kronfli, E., Adv Polym Tech, 2002, 21, 132.
- [3] Maji, T.K.; Basu, D.; Datta, C.; Banerjee, A., J Appl Polym Sci, 2002, 84, 969.
- [4] Tsukada, M.; Yamamoto, T; Nakabayashi, N., Ishikawa, H.; Freddi, G., J Appl Polym Sci, 1991, 43, 2115.
- [5] Tsukada, M.; Arai, T.; Freddi, G.; Imai, T.; Kasai, N., J Appl Polym Sci, 2001, 81, 1401.
- [6] Tsukada, M.; Goto, Y.; Freddi, G., J Appl Polym Sci, 1992, 44, 2197.
- [7] Tsukada, M.; Freddi, G.; Massafra, M. R.; Beretta, S., J Appl Polym Sci, 1998, 67, 1393.
- [8] Tsukada, M.; Freddi, G.; Monti, P.; Bertoluzza, A.; Shiozaki, H., J Appl Polym Sci, 1993, 49, 1835.
- [9] Tsukada, M.; Freddi, G.; Matsumura, M.; Shiozaki, H.; Kasai, N., J Appl Polym Sci, 1992, 44, 799.
- [10] Prachayawarakorn, J.; Kryratsamee, W., J Appl Polym Sci, 2006, 100, 1169.
- [11] Tsatsaroni, E.; Kyriakides, M.-L.; Eleftheriadis, I., Dyes and Pigments, 1998, 37, 307.
- [12] Popoola, A. J Appl Polym Sci, 2000, 77, 752.
- [13] Tsatsaroni, E.; Kyriakides, M.-L., Dyes and Pigments, 1995, 29, 203.
- [14] Lee, J. J.; Lee, H. H.; Eom, S. I.; Kim, J. P., Color Tech, 2001, 117, 134.

[15] Arai, T.; Ishikawa, H.; Freddi, G.; Winkler, S.; Tsukada, M., J Appl Polym Sci, 2001, 79, 1756.

Figure captions

- Figure 1 SEM micrographs of (a) degummed silk (b) HEMA-grafted silk (75% grafting) and (c) MMA-grafted silk (65% grafting).
- Figure 2 IR spectra of (a) degummed silk (b) HEMA-grafted silk (75% grafting) and (c) MMA-grafted silk (65% grafting).

Table captions

- Table 1 Moisture regain of the degummed, HEMA- and MMA-grafted silks.
- Table 2 % Dye uptake of the degummed, HEMA- and MMA-grafted silks using acid, reactive and curcumin dyestuffs.
- Table 3 Color parameters of the degummed, HEMA- and MMA-grafted silks using acid, reactive and curcumin dyestuffs.
- Table 4 Color fastness properties of the degummed, HEMA- and MMA-grafted silks using acid, reactive and curcumin dyestuffs.
- Table 5 Staining level on white standard fabrics of the degummed, HEMA- and MMA-grafted silks using acid, reactive and curcumin dyestuffs.

Table 1 Moisture regain, acid and alkaline resistances of the degummed, HEMA- and MMA-grafted silks

Samples	Weight gain (%)	Moisture regain (%)	Weight loss (%)	
			Acid	Alkaline
Degummed silk	-	4.7 ± 0.1	4.9 ± 0.1	3.6 ± 0.6
HEMA-grafted silk	27.6 ± 4.7	6.6 ± 0.1	4.2 ± 0.5	3.4 ± 0.2
	74.8 ± 4.4	7.0 ± 0.1	4.1 ± 0.4	3.2 ± 0.6
MMA-grafted silk	11.5 ± 1.0	4.3 ± 0.2	3.1 ± 0.3	1.5 ± 0.3
	65.3 ± 1.9	4.1 ± 0.1	2.0 ± 0.2	1.1 ± 0.5

Table 2 Percentage of dye uptake of the degummed, HEMA- and MMA-grafted silks using acid, reactive and curcumin dyestuffs

Samples	Weight gain (%)	Dye uptake (%)		
		Acid dye	Reactive dye	Curcumin dye
Degummed silk	-	37.5 ± 3.5	39.6 ± 3.9	14.6 ± 2.2
HEMA-grafted silk	27.6 ± 4.7	45.5 ± 3.8	5.0 ± 0.5	17.3 ± 2.8
	74.8 ± 4.4	50.3 ± 4.1	10.8 ± 0.3	29.8 ± 2.9
MMA-grafted silk	11.5 ± 1.0	45.8 ± 4.2	17.9 ± 0.5	27.5 ± 3.1
	65.3 ± 1.9	49.9 ± 5.3	N/A*	32.6 ± 2.5

N/A* was due to the hydrophobicity of the silks.

Table 3 Color parameters of the degummed, HEMA- and MMA-grafted silks using acid, reactive and curcumin dyestuffs

Dyestuffs	Samples	Weight gain (%)	Color parameters				
			L*	a*	b*	C*	H°
Acid dye	Degummed silk	-	44.0	36.1	79.3	83.5	68.9
	HEMA-grafted silk	27.6 ± 4.7	47.3	36.8	80.8	88.8	70.6
		74.8 ± 4.4	48.2	38.3	82.4	91.3	64.5
	MMA-grafted silk	11.5 ± 1.0	46.3	35.9	79.0	85.8	69.9
		65.3 ± 1.9	46.4	35.3	79.1	86.6	67.5
Reactive dye	Degummed silk	-	53.9	31.9	77.6	83.9	62.9
	HEMA-grafted silk	27.6 ± 4.7	54.9	29.5	86.7	91.6	62.9
		74.8 ± 4.4	55.5	31.6	91.5	96.7	63.9
	MMA-grafted silk	11.5 ± 1.0	55.7	29.2	83.4	87.7	64.1
		65.3 ± 1.9	N/A*	N/A*	N/A*	N/A*	N/A*
Curcumin	Degummed silk	-	51.3	14.3	78.5	80.8	79.8
	HEMA-grafted silk	27.6 ± 4.7	54.6	15.6	81.9	83.4	79.3
		74.8 ± 4.4	56.5	17.5	82.1	84.3	76.6
	MMA-grafted silk	11.5 ± 1.0	56.4	16.7	81.1	83.8	77.7
		65.3 ± 1.9	57.2	17.2	85.3	87.7	78.4

N/A* was due to the hydrophobicity of the silks.

Table 4 Colorfastness properties of the degummed, HEMA- and MMA-grafted silks using acid, reactive and curcumin dyestuffs

Fastness properties	Samples	Weight gain (%)	Color fastness level		
			Acid dye	Reactive dye	Curcumin
Washing	Degummed silk	-	4	4-5	3
	HEMA-grafted silk	27.6 ± 4.7	4	4-5	3-4
		74.8 ± 4.4	4	4-5	3-4
	MMA-grafted silk	11.5 ± 1.0	4	4-5	3-4
		65.3 ± 1.9	4-5	N/A	3-4
Acid perspiration	Degummed silk	-	4	4-5	4-5
	HEMA-grafted silk	27.6 ± 4.7	4	4-5	4-5
		74.8 ± 4.4	4	4-5	4-5
	MMA-grafted silk	11.5 ± 1.0	4	4-5	4-5
		65.3 ± 1.9	4-5	N/A	4-5
Alkaline perspiration	Degummed silk	-	4	4-5	4-5
	HEMA-grafted silk	27.6 ± 4.7	4	4-5	4-5
		74.8 ± 4.4	4	4-5	4-5
	MMA-grafted silk	11.5 ± 1.0	4	4-5	4-5
		65.3 ± 1.9	4-5	N/A	4-5

N/A* was due to the hydrophobicity of the silks.

Table 5 Staining level on white standard fabrics of the degummed, HEMA- and MMA-grafted silks using acid, reactive and curcumin dyestuffs

Fastness properties	Samples	Weight gain (%)	Staining level					
			Acid dye		Reactive dye		Curcumin	
			Silk	Cotton	Silk	Cotton	Silk	Cotton
Washing	Degummed silk	-	3	3-4	4-5	4-5	1	1-2
	HEMA-grafted silk	27.6 ± 4.7	3	3-4	4-5	4-5	1	1-2
		74.8 ± 4.4	3	3-4	4-5	4-5	1	1-2
	MMA-grafted silk	11.5 ± 1.0	3-4	3-4	4-5	4-5	1	1-2
		65.3 ± 1.9	4	4	N/A	N/A	1	1-2
Acid perspiration	Degummed silk	-	3-4	4	4-5	4-5	1	1-2
	HEMA-grafted silk	27.6 ± 4.7	3-4	4	4-5	4-5	1	1-2
		74.8 ± 4.4	3-4	4	4-5	4-5	1	1-2
	MMA-grafted silk	11.5 ± 1.0	3-4	4	4-5	4-5	1	1-2
		65.3 ± 1.9	3-4	4	N/A	N/A	1	1-2
Alkaline perspiration	Degummed silk	-	3	4	4	4	1	1-2
	HEMA-grafted silk	27.6 ± 4.7	3	3-4	4-5	4-5	1	1-2
		74.8 ± 4.4	3	3-4	4-5	4-5	1	1-2
	MMA-grafted silk	11.5 ± 1.0	3-4	3-4	4-5	4-5	1	1-2
		65.3 ± 1.9	3-4	3-4	N/A	N/A	1	1-2

N/A* was due to the hydrophobicity of the silks.

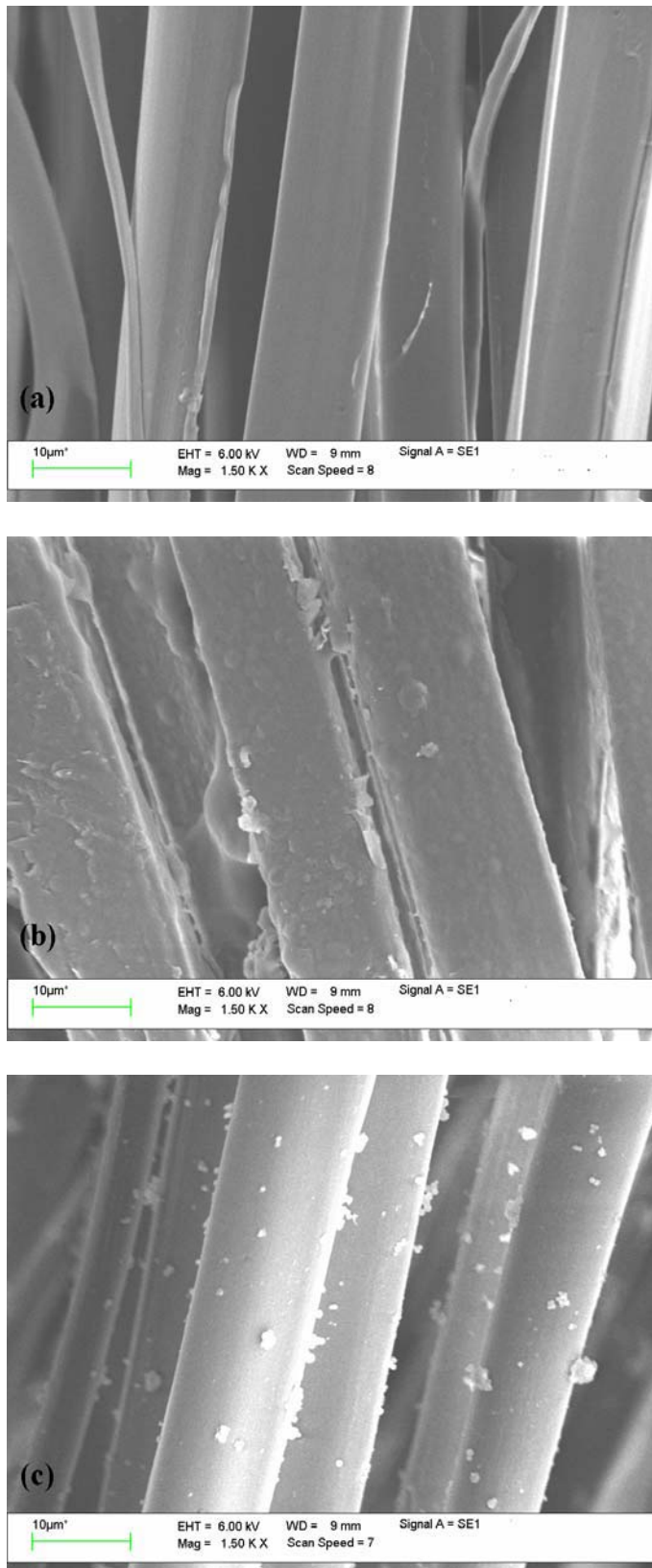


Figure 1 SEM micrographs of (a) degummed silk (b) HEMA-grafted silk (75% polymer add-on) and (c) MMA-grafted silk (65% polymer add-on)

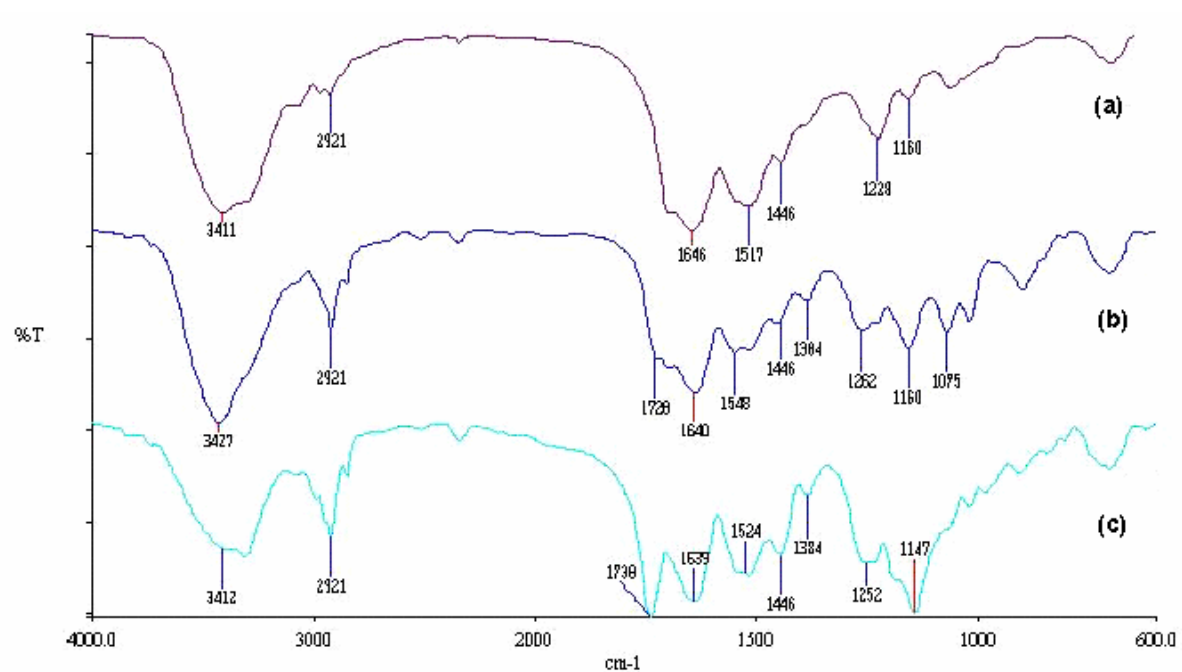


Figure 2 IR spectra of (a) degummed silk (b) HEMA-grafted silk (75% polymer add-on) and (c) MMA-grafted silk (65% polymer add-on)