การปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิตจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำโดยใช้ขี้เลื่อยไม้ยางพาราเป็นสารเสริมแรง

PROPERTY MODIFICATION OF COMPOSITES FROM POLYMER BLENDS BETWEEN POLY (VINYL CHLORIDE) AND LOW-DENSITY POLYETHYLENE USING SAWDUST (*HEVEA BRASILIENSIS*) AS REINFORCEMENT

ศิริกาญจน์ ขันสัมฤทธิ์
SIRIKARN KHUNSUMLED

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2550

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิตจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำโดยใช้ขี้เลื่อยไม้ยางพาราเป็นสารเสริมแรง

PROPERTY MODIFICATION OF COMPOSITES FROM POLYMER BLENDS BETWEEN POLY (VINYL CHLORIDE) AND LOW-DENSITY POLYETHYLENE USING SAWDUST (*HEVEA BRASILIENSIS*) AS REINFORCEMENT

ศิริกาญจน์ ขันสัมฤทธิ์

SIRIKARN KHUNSUMLED

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....74831
วัน,เดือน,ปี.....11 ต.ค. 2550

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

PROPERTY MODIFICATION OF COMPOSITES FROM POLYMER BLENDS BETWEEN POLY(VINYL CHLORIDE) AND LOW-DENSITY POLYETHYLENE USING SAWDUST (*HEVEA BRASILIENSIS*) AS REINFORCEMENT

SIRIKARN KHUNSUMLED

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN TECHNOLOGY POLYMER
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LARDKRABANG
2007

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิตจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำโดยใช้ขี้เลื่อยไม้ยางพาราเป็นสารเสริมแรง
นักศึกษา	นางสาวศิริกาญจน์ ขันสัมฤทธิ์
รหัสประจำตัว	47064207
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำโดยใช้ขี้เลื่อยไม้ยางพาราเป็นสารเสริมแรงโดยทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวและเครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง ขึ้นรูปโดยการอัดขึ้นรูป จากการศึกษาพบว่าสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิต พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นจากการใช้สารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) 2 ชนิด คือ ไซเลน A-137 (Octyltriethoxysilane) และ ไซเลน A-1100 (γ-Aminopropyltriethoxysilane) และสารช่วยผสมมาเลอิกแอนไฮดรายด์กราฟต์พอลิเอทิลีน (MAPE) จากการทดสอบโดยใช้เทคนิค FTIR พบว่าอินฟราเรดสเปกทรัมของพอลิไซลอกเซนและพันธะเอสเทอร์ที่เกิดจากเซลลูโลสทำปฏิกิริยากับสารคู่ควบไซเลนและสารช่วยผสม MAPE ตามลำดับ ส่วนการศึกษาสัณฐานวิทยาของจากเทคนิค SEM แสดงให้เห็นว่าการใช้สารคู่ควบสามารถปรับปรุงความสามารถในการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์และส่วนเสริมแรง สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตศึกษาด้วยเทคนิค TGA และ DMA พบว่าอุณหภูมิการสลายตัว (T_d) และอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) มีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงทั้งพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบชนิดเดียวและที่ใช้สารคู่ควบผสม นอกจากนี้การใช้สารช่วยผสม MAPE ให้สมบัติเชิงกลสูงกว่าการใช้สารคู่ควบไซเลน สำหรับการใช้สารคู่ควบผสม พบว่าสารคู่ควบผสมระหว่างไซเลน A-137:MAPE ให้สมบัติเชิงกล สูงกว่าการใช้สารคู่ควบผสมระหว่างไซเลน A-1100:MAPE

Thesis Title	Property modification of Composites from Polymer Blends between Poly(vinyl chloride) and Low-Density polyethylene using sawdust (*Hevea brasiliensis*) as reinforcement
Student	Ms. Sirikarn Khunsumled
Student ID.	47064207
Degree	Master of Science
Program	Polymer Technology
Year	2007
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Jutarat Prachayawarakorn
Thesis Co-Advisor	Prof.Dr. Narongrit Sombatsompop

ABSTRACT

This research aimed to study properties of polymer composites prepared from polymer blend between poly(vinyl chloride) and low-density polyethylene reinforced by *Hevea brasiliensis* sawdust. The composites were compounded by a single-screw extruder and a two-roll mill and then compressed into testing specimens using a compression moulding machine. The mechanical properties of the polymer composites using silane A-137 (Octyltriethoxysilane), silane A-1100 (γ-Aminopropyltriethoxysilane) or MAPE (maleic anhydride graft polyethylene) were clearly improved. In addition, FTIR showed the IR spectra of the polysiloxane and ester linkage from the reactions between cellulose with silane coupling agent or with MAPE, respectively. Morphology of the composites from SEM technique revealed that the use of the three coupling agents improved the interfacial adhesion between the matrix and the reinforcement. Thermal properties of the composites were examined by TGA and DMA. The results did not change of T_d and T_g. Moreover, MAPE showed greater effect on mechanical properties enhancement than Silane. In addition, mechanical properties of composites using Silane A-137:MAPE showed greater mechanical property improvement than those of Silane A-1100:MAPE.

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์นี้ สำเร็จได้เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ ความร่วมมือ ตลอดจนคำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์แก่ผู้ทำงานวิจัยจากบุคคลและองค์กรต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร และ ศ.ดร. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ ที่ให้คำปรึกษาและให้ความช่วยเหลือในการดำเนินวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ รศ.ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย ผศ.ดร. ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และ รศ.ดร. วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์ คณะกรรมการ ที่ช่วยตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกต้องสมบูรณ์มากขึ้น

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยไต่ถาม เป็นห่วง และเป็นกำลังใจตลอดเวลา ตลอดจนเพื่อนๆ และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีทุกท่านที่คอยช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทำงานวิทยานิพนธ์

นอกจากนี้ยังมีบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลืออีกมากมายที่ยังไม่ได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ผู้ทำงานวิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ศิริกาญจน์ ขันสัมฤทธิ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VIII

สารบัญรูป.....IX

สัญลักษณ์และคำย่อ.....XII

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....3

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....4

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....4

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....5

2.1 พอลิเมอร์ผสม.....5

2.1.1 การแบ่งชนิดของพอลิเมอร์.....5

2.1.2 ความสามารถในการเข้ากันได้.....6

2.2 คอมโพสิต.....7

2.2.1 เมทริกซ์.....8

2.2.2 ส่วนเสริมแรง.....12

2.2.3 การประยุกต์ใช้งานคอมโพสิต.....14

2.3 เส้นใยธรรมชาติ.....15

2.3.1 เส้นใยไม้.....16

2.3.1.1 ไม้ยืนต้น.....16

2.3.1.2 ไม้ล้มลุก.....16

2.3.2 องค์ประกอบทางเคมีของไม้.....17

2.3.2.1 เซลลูโลส.....17

2.3.2.2 เฮมิเซลลูโลส.....19

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.2.3 ลิกนิน....19
2.3.2.4 เพคติน....21
2.3.2.5 สารอินทรีย์อื่น ๆ....21
2.3.3 ไม้ยางพารา....21
2.4 การปรับปรุงสภาพพื้นผิวของเส้นใย....22
2.4.1 วิธีทางกายภาพ....22
2.4.2 วิธีทางเคมี....22
2.4.3 สารคู่ควบ....23
2.4.4 สารช่วยผสม....28
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง....30

บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย....35
3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย....36
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย....39
3.3 วิธีการทดลอง....41
3.3.1 คอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยสารคู่ควบไซเลน....41
3.3.1.1 การเตรียมชิ้นเลื่อย....41
3.3.1.2 ขั้นตอนการทำพอลิเมอร์คอมโพสิต....41
3.3.2 คอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วย MAPE....43
3.3.2.1 การเตรียมชิ้นเลื่อย....43
3.3.2.2 ขั้นตอนการทำพอลิเมอร์คอมโพสิต....43
3.3.3 คอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยสารคู่ควบผสม....44
3.4 วิธีการทดสอบ....45
3.4.1 สมบัติเชิงกล....45
3.4.1.1 ความแข็งแรงดึง มอดุลัส และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด....45
3.4.1.2 ความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอ....46
3.4.1.3 ความแข็งแรงกระแทก....48
3.4.2 อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี....49

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.3 สัณฐานวิทยา....49

3.4.4 สมบัติทางความร้อน....50

3.4.4.1 Thermogravimatric Analysis (TGA)....50

3.4.4.2 Dynamic Mechanical Analyzer (DMA)....50

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง....51

4.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR....58

4.1.1 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบ....58

4.1.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบผสม....61

4.2 สัณฐานวิทยา....63

4.2.1 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบ....63

4.2.2 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบผสม....66

4.3 การศึกษาสมบัติทางความร้อน....68

4.3.1 อุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition temperature, T_d)....68

4.3.1.1 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบ....68

4.3.1.2 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบผสม....69

4.3.2 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition Temperature, T_g)....70

4.3.2.1 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบ....70

4.3.2.2 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบผสม....73

4.4 สมบัติเชิงกล....76

4.4.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบ....76

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.1.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วย สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 72

4.4.1.2 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วย สารคู่ควบไซเลน ชนิด A-1100 80

4.4.1.3 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วย สารช่วยผสม MAPE 85

4.4.2 การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วย สารคู่ควบผสม 93

4.4.2.1 การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ ปรับปรุงด้วย A-137:MAPE 93

4.4.2.2 การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ ปรับปรุงด้วย A-1100: MAPE 96

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 104

5.1 สรุปผลการวิจัย 104

5.2 ข้อเสนอแนะ 105

เอกสารอ้างอิง 107

ภาคผนวก 111

ประวัติผู้เขียน 139

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ข้อดีและข้อเสียของพอลิเมอร์คอมโพสิต	14
2.2	ส่วนประกอบต่าง ๆ ของไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน	15
3.1	ส่วนประกอบของ PVC Compound	36
3.2	สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	36
3.3	สมบัติของพอลิเมอร์ร่วมระหว่างเมทิลเมทาไครเลต และบิวทิลอะไครเลต (PA20)	37
3.4	สมบัติของสารคู่ควบไซเลน Silquest A-137	37
3.5	สมบัติของสารคู่ควบไซเลน Silquest A-1100	38
3.6	สมบัติของ Fusabond ®MB100D	38
3.7	ส่วนผสมต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำคอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยสารคู่ควบไซเลน	41
3.8	ส่วนผสมต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำคอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วย MAPE	43
3.9	ส่วนผสมต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำคอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยสารคู่ควบผสม	44
3.10	มาตรฐานต่าง ๆ ในการทดสอบพอลิเมอร์คอมโพสิต	45
4.1	ตำแหน่งสเปกทรัมของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงด้วยสารคู่ควบ	60
4.2	อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์คอมโพสิต ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบชนิดต่าง ๆ	69
4.3	อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์คอมโพสิต ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสม	69
4.4	อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์คอมโพสิต ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบชนิดต่าง ๆ	71
4.5	อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์คอมโพสิต ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยด้วยสารคู่ควบผสม	73
4.6	สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิต (PVC 100 : LDPE 40: PA20 15: SD 30) เมื่อปรับปรุงด้วยสารคู่ควบชนิดและปริมาณต่าง ๆ กันโดยเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อย	90
4.7	สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตเมื่อปรับปรุงด้วยสารคู่ควบผสมระหว่าง A-137:MAPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ กัน	100
4.8	สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตเมื่อปรับปรุงด้วยสารคู่ควบผสมระหว่าง A-1100 :MAPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ กัน	101

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	แผนภาพปริมาณขยะพลาสติกแต่ละชนิด	2
2.1	รูปร่างของสารตัวเติม (ก) อนุภาค (ข) เส้นใยสั้น และ (ค) แผ่น	8
2.2	ประเภทของวัสดุคอมโพสิตโดยแบ่งตามลักษณะของส่วนเสริมแรง	9
2.3	รูปแบบการจัดเรียงตัวของเทอร์โมเซต	10
2.4	รูปแบบการจัดเรียงตัวของเทอร์โมพลาสติก	11
2.5	การยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์	11
2.6	ตัวอย่างคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงต่างกัน	12
2.7	สูตรโครงสร้างของเซลลูโลส	17
2.8	แบบจำลองการจัดเรียงตัวของผลึกและอสัณฐานของเซลลูโลส	18
2.9	โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส	19
2.10	โครงสร้างของลิกนิน	20
2.11	การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในไม้	20
2.12	ลักษณะของต้นยางพารา	21
2.13	โครงสร้างของสารคู่ควบไซเลน	24
2.14	การเกิดปฏิกิริยาของสารคู่ควบไซเลน	24
2.15	กลไกการเกิดปฏิกิริยาของสารคู่ควบไซเลน	25
2.16	โครงสร้างของสารคู่ควบไซเลนโดยแบ่งตามหมู่อินทรีย์ (X)	26
2.17	โครงสร้างของสารคู่ควบไซเลนโดยแบ่งตามสารอินทรีย์ (R)	27
2.18	โครงสร้างของพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮดรายด์	29
2.19	การทำงานของพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮดรายด์	29
3.1	แผนการดำเนินงานในงานวิจัยนี้	41
3.2	ลักษณะชิ้นงานดัมเบลล์ที่นำมาทดสอบ	47
3.3	การทดสอบความแข็งแรงโค้งงอ	48
3.4	เครื่องมือทดสอบความแข็งแรงกระแทกแบบไอซอด	49
3.5	ชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงกระแทก	49
4.1	กลไกของปฏิกิริยาและอันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างพอลิเมอร์คอมโพสิต PVC 100: LDPE 40: PA 20 : SD และสารคู่ควบ 3 ชนิด คือ (ก) สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 (ข) สารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 และ (ค) สารช่วยผสม MAPE	53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.2 กลไกของปฏิกิริยาและอันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างพอลิเมอร์คอมโพสิต PVC 100: LDPE 40 :PA 20 : SD และสารคู่ควบผสม (ก) สารคู่ควบผสม A-137:MAPE และ (ข) สารคู่ควบผสม A-1100:MAPE 56

4.3 อินฟราเรดสเปกทราของ PVC 100: LDPE 40: PA 20 15: SD 30 (ก) ไม่ใช้สารคู่ควบ (ข) ใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 (3%) (ค) ใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 (3%) และ (ง) ใช้สารช่วยผสม MAPE (3%).....59

4.4 อินฟราเรดสเปกทรัมของ PVC 100: LDPE 40: PA 20 15: SD 30 โดยใช้อัตราส่วนของ A-137: MAPE เป็น (ก) 1:1 (ข) 1:2 และ (ค) 2:1.....61

4.5 อินฟราเรดสเปกทรัมของ PVC 100: LDPE 40: PA 20 15: SD 30 โดยใช้อัตราส่วนของ A-1100:MAPE เป็น (ก) 1:1 (ข) 1:2 และ (ค) 2:1.....62

4.6 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่กำลังขยาย 50 เท่า ของ PVC 100: LDPE 40: PA 20 15:SD 30 (ก)ไม่มีสารคู่ควบ (ข) ใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 (3%) (ค) ใช้สารคู่ควบ ไซเลนชนิด A-1100 (3%) และ (ง) ใช้สารช่วยผสม MAPE (3%) 64

4.7 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่กำลังขยาย 200 เท่าของ PVC100:LDPE 40: PA 20 15: SD 30 (ก) ไม่มีสารคู่ควบ (ข) ใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 (3%) (ค) ใช้สารคู่ควบ ไซเลนชนิด A-1100 (3%) และ (ง) ใช้สารช่วยผสม MAPE (3%) 65

4.8 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่กำลังขยาย 200 เท่าของ PVC 100:LDPE 40: PA 20 15: SD 30 ที่อัตราส่วนของ A-137:MAPE เป็น (ก) 1:2 (ข) 1:1 และ (ค) 2:1.....66

4.9 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่กำลังขยาย 200 เท่าของ PVC 100:LDPE 40: PA 20 15: SD 30 ที่อัตราส่วนของ A-1100:MAPE เป็น (ก) 1:2 (ข) 1:1 และ (ค) 2:1.....67

4.10 ค่า (ก) T_g (ข) Storage modulus และ(ค) Loss Modulus ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ ปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบชนิดต่าง ๆ.....72

4.11 ค่า (ก) T_g (ข) Storage modulus และ(ค) Loss Modulus ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ ปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมระหว่าง A-137: MAPE 74

4.12 ค่า (ก) T_g (ข) Storage modulus และ(ค) Loss Modulus ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ ปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมระหว่าง A-1100 :MAPE 75

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านแรงดึงและปริมาณสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137
(ก) มอดุลัส (ข) ความแข็งแรงดึง และ (ค) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด....77

4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านการโค้งงอและปริมาณสารคู่ควบไซเลน ชนิด A-137
(ก) ความแข็งแรงโค้งงอ และ (ข) มอดุลัสโค้งงอ....80

4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกระแทกและปริมาณสารคู่ควบไซเลน ชนิด A-137....82

4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านแรงดึงและปริมาณสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100
(ก) มอดุลัส (ข) ความแข็งแรงดึง และ (ค) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด....79

4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านการโค้งงอและปริมาณสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100
(ก) ความแข็งแรงโค้งงอ และ (ข) มอดุลัสโค้งงอ....84

4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกระแทกและปริมาณสารคู่ควบไซเลน
ชนิด A-1100....85

4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านแรงดึงและปริมาณสารช่วยผสม MAPE (ก) มอดุลัส
(ข) ความแข็งแรงดึง และ (ค) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด....86

4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านการโค้งงอและปริมาณสารช่วยผสม MAPE
(ก) ความแข็งแรงโค้งงอ และ (ข) มอดุลัสโค้งงอ....88

4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกระแทกและปริมาณสารช่วยผสม MAPE....89

4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านแรงดึงและสารคู่ควบผสม A-137: MAPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ
(ก) มอดุลัส (ข) ความแข็งแรงดึง และ (ค) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด....94

4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านการโค้งงอและสารคู่ควบผสม A-137: MAPE
ที่อัตราส่วนต่าง ๆ (ก) ความแข็งแรงโค้งงอ และ (ข) มอดุลัสโค้งงอ....95

4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกระแทกและสารคู่ควบผสม A-137: MAPE
ที่อัตราส่วนต่าง ๆ....96

4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านแรงดึงและสารคู่ควบผสม A-1100: MAPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ
(ก) มอดุลัส (ข) ความแข็งแรงดึง และ (ค) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด....97

4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านการโค้งงอและสารคู่ควบผสม A-1100: MAPE
ที่อัตราส่วนต่าง ๆ (ก) ความแข็งแรงโค้งงอ และ (ข) มอดุลัสโค้งงอ....98

4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกระแทกและสารคู่ควบผสม A-1100: MAPE
ที่อัตราส่วนต่าง ๆ....99

สัญลักษณ์และคำย่อ

A-137	Octyltriethoxysilane
A-171	Vinyltrimethoxy silane
A-172	Vinyl-tris-(2-methoxyethoxy) silane
A-1100	γ-Aminopropyltriethoxy silane
CPE	Chlorinated polyethylene
Elvaloy	Ethylene- co- methyl acrylate copolymer
HIPS	High Impact Polystyrene
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 20	Methyl methacrylate-*co*-butylacrylate copolymer
PE	Polyethylene
PP	Polypropylene
PVC	Poly (vinyl chloride)
SEM	Scanning Electron Microscopy
Silane	Silane coupling agents
TMP	Thermomechanical pulp

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของประชากรโลกและความเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจเป็นผลให้ความต้องการผลิตภัณฑ์ที่ใช้ไม้เป็นวัตถุดิบเพิ่มขึ้น เพราะไม้สามารถนำไปใช้งานด้านต่าง ๆ ได้อย่างหลากหลาย เช่น วัสดุในการก่อสร้าง เฟอร์นิเจอร์ เครื่องมือและเครื่องใช้ต่าง ๆ ทำให้ความต้องการใช้ไม้เป็นวัตถุดิบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้พื้นที่ป่าลดลงอย่างรวดเร็ว จากปัญหาต่าง ๆ จึงได้มีการผลิตวัสดุอื่นเพื่อใช้ทดแทนไม้ โดยวัสดุที่นิยมนำมาแทนไม้ คือ พอลิเมอร์ เนื่องจากพอลิเมอร์จัดเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย และมีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์ซึ่งยังคงมีการพัฒนาปรับปรุงสมบัติอยู่เสมอเพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติดียิ่งขึ้น

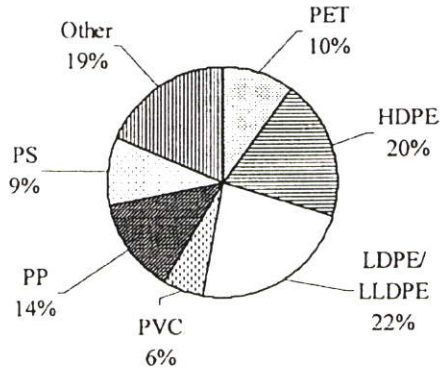
จากการศึกษาพบว่าแนวทางหนึ่งในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์และลดต้นทุนการผลิต คือ การทำไม้พอลิเมอร์คอมโพสิต (Wood-Polymer Composite, WPC) เพื่อทดแทนไม้ธรรมชาติขึ้น ซึ่งวัสดุคอมโพสิตนี้มีสมบัติที่สำคัญ คือ มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความแข็งแรงสูงแต่มีน้ำหนักเบาเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่น สามารถเลือกชนิดพอลิเมอร์และชนิดของไม้เพื่อเตรียมเป็นคอมโพสิต ซึ่งมีสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานได้ โดยพอลิเมอร์คอมโพสิตประกอบด้วยวัสดุสองชนิด คือ พอลิเมอร์เมทริกซ์ (Matrix) และส่วนเสริมแรง (Reinforcement) ซึ่งส่วนเสริมแรงที่นิยมใช้ คือ เส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยคาร์บอน เส้นใยแก้ว เป็นต้น แต่เส้นใยเหล่านี้มีราคาแพง จึงได้มีการนำเส้นใยจากธรรมชาติ (Natural fibers) มาใช้แทน เช่น จากไม้หรือ ขี้เลื่อย ซึ่งมีข้อดีหลายอย่าง เช่น หาง่าย ราคาถูก ช่วยลดต้นทุนการผลิต น้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ ไม่ทำให้เครื่องจักรเกิดการสึกกร่อนเนื่องจากการขัดถูระหว่างกระบวนการผลิต สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และยังเป็นการลดวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมไม้แปรรูปได้อีกด้วย

เส้นใยธรรมชาติจากไม้ยางพารา (*Hevea brasiliensis*) เป็นไม้ชนิดหนึ่งที่น่าสนใจที่จะนำมาทำไม้พอลิเมอร์คอมโพสิตเนื่องจากปัจจุบันประเทศไทยมีการส่งออกผลิตภัณฑ์จากไม้ยางพาราเป็นจำนวนมาก และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นทุกปี ไม้ยางพาราที่มีอายุ 20-25 ปีจะถูกตัดและนำเข้าสู่อุตสาหกรรมไม้ เพื่อแปรรูปเป็นเฟอร์นิเจอร์ เครื่องเรือน เครื่องใช้ โดยในปี พ.ศ. 2546 ประเทศไทยส่งออกผลิตภัณฑ์จากไม้ยางพาราคิดเป็นมูลค่า 5,983 ล้านบาท ปี พ.ศ. 2547 เพิ่มขึ้นเป็น 8,317 ล้านบาท [1] ซึ่งเห็นได้ว่าปริมาณไม้ยางพาราที่มีเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณขี้เลื่อยไม้ยางพาราเหลือมากขึ้นด้วย ดังนั้นการนำเศษไม้และขี้เลื่อยที่เหลือจากการแปรรูปมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไม้พอลิเมอร์คอมโพสิต จะทำให้สามารถเพิ่มมูลค่าของเศษวัสดุไม้เหล่านี้ด้วย อย่างไรก็ดี การใช้ประโยชน์จากเส้นใยธรรมชาติ ยังมีข้อจำกัดบางประการเนื่องจากสมบัติของเส้นใยเอง เช่น ทนความร้อนได้ต่ำกว่า

เส้นใยสังเคราะห์ มีสมบัติดูดความชื้น และปัญหาที่สำคัญ คือ เมื่อทำการผสมเส้นใยลงไปในพอลิเมอร์เมทริกซ์ การกระจายตัวของเส้นใยและการยึดติดกับพอลิเมอร์ไม่ดีพอ อีกทั้งสมบัติด้านความเหนียวและความสามารถในการทนต่อแรงดึงลดลง โดยเฉพาะเมื่อใช้พอลิเมอร์เมทริกซ์ เช่น พอลิเอทิลีน (PE) และพอลิพรอพิลีน (PP)

แต่ปัญหาเหล่านี้สามารถแก้ไขได้โดยการใช้สารคู่ควบ (Coupling agents) สารช่วยผสม (Compatibilizers) หรือการปรับสภาพผิวเส้นใยโดยการต่อกิ่ง (Grafting) ซึ่งวิธีการใช้สารคู่ควบเป็นที่นิยมเนื่องจากสะดวกและทำได้ง่าย โดยการเลือกใช้สารคู่ควบสำหรับระบบพอลิเมอร์คอมโพสิตระบบใดระบบหนึ่งจะต้องเลือกสารคู่ควบที่สามารถเข้ากันได้ดีทั้งกับเมทริกซ์และเส้นใยไม้ที่ใช้ จึงสามารถปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิตให้เหมาะสมกับการใช้งานมากยิ่งขึ้น

ปัจจุบันพลาสติกได้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่สำคัญอย่างยิ่งในชีวิตประจำวัน และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณขยะที่เกิดจากพลาสติกมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ซึ่งปริมาณขยะที่เกิดจากพลาสติกแสดงได้ดังรูปที่ 1 พบว่ามีขยะที่เกิดจาก LDPE / LLDPE สูงถึง 22 % [2] นอกจากนี้ยังพบพลาสติกผสมระหว่าง LDPE และ PVC ที่นำมาใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ อีกเป็นจำนวนมาก [3] เนื่องจากขยะพลาสติกส่วนใหญ่มาจากบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ ทางเลือกหนึ่งในการกำจัดขยะพลาสติก คือ การนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) [4] ซึ่งเป็นทางเลือกที่ให้ประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุดทางหนึ่ง อย่างไรก็ตาม การนำพลาสติกกลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่นั้น สิ่งสำคัญอยู่ที่การแยกประเภทของพลาสติกก่อนที่จะนำกลับมาใช้ใหม่ และการกำจัดสิ่งที่ไม่ต้องการออกไป ซึ่งกระบวนการและเทคโนโลยีในการแยกวัสดุค่อนข้างยุ่งยาก จึงได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการนำไปใช้ในรูปของพลาสติกผสม



รูปที่ 1.1 แผนภาพปริมาณขยะพลาสติกแต่ละชนิด [2]

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [5] มีการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และLDPE โดยใช้สารช่วยผสม 3 ชนิด คือ คลอริเนเตดพอลิเอทิลีน (Chlorinated polyethylene, CPE) พอลิเมอร์ร่วมระหว่างเมทิลเมทาไครเลต และบิวทิลอะไครเลต (Methyl

methacrylate-*co*-butyl acrylate, PA 20) และ พอลิเมอร์ร่วมระหว่างเอทิลีนและเมทิลเมทาไครเลต (Ethylene and methyl acrylate copolymer, Elvaloy) พบว่าสารช่วยผสมทั้ง 3 ชนิดทำให้สมบัติโดยรวมของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น โดยชนิดและปริมาณของสารช่วยผสมที่เหมาะสมในการนำพอลิเมอร์ผสมไปทำพอลิเมอร์คอมโพสิต คือ PA 20 ปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก LDPE เนื่องจากให้สมบัติโดยรวมสูงกว่าเมื่อนำมาทำเป็นวัสดุคอมโพสิตโดยใช้ขี้เลื่อยไม้ยางพาราเป็นวัสดุเสริมแรง นอกจากนี้เมื่อเพิ่มปริมาณขี้เลื่อยทำให้ความแข็งแรงดึง ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงโค้งงอ และความแข็งแรงกระแทก มีค่าลดลง เนื่องจากความสามารถในการยึดเกาะกันระหว่างวัฏภาคของขี้เลื่อยกับเมทริกซ์ลดลง ประกอบกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณขี้เลื่อยทำให้เกิดการกระจายตัวที่ไม่ดี บางส่วนมีการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน ทำให้เป็นบริเวณที่ไม่มีการยึดเกาะกับเมทริกซ์เกิดเป็นตำหนิในชิ้นงาน

ในงานวิจัยนี้จึงเกี่ยวข้องกับการเตรียม การตรวจวิเคราะห์และการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิต โดยใช้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE มีขี้เลื่อยไม้ยางพาราเป็นส่วนเสริมแรง โดยเน้นเรื่องการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้สารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) 2 ชนิด คือ ไซเลน A-137 และไซเลน A-1100 และสารช่วยผสมชนิดมาเลอิกแอนไฮดรายด์กราฟต์พอลิเอทิลีน (Maleic anhydride-*g*-polyethylene, MAPE) ชนิด Fusabond ® MB100D มีค่า MFI 2 g/10 min เพื่อช่วยปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างพื้นผิวเส้นใยกับเมทริกซ์ให้มีการยึดเกาะที่ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ได้จากการใช้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE โดยใช้ขี้เลื่อยไม้ยางพาราเป็นสารเสริมแรง

2. เพื่อศึกษาแนวทางในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมได้ โดยใช้สารคู่ควบไซเลน และ/หรือ สารช่วยผสม MAPE

3. เพื่อศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิต เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ผลิตได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2. ศึกษาถึงผลกระทบของชนิดและปริมาณของสารคู่ควบไซเลน และสารช่วยผสม MAPE ที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต

3. ศึกษาถึงผลของอัตราส่วนระหว่างสารคู่ควบไซเลน และสารช่วยผสม MAPE ที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต

4. ศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิต เช่น สมบัติด้านแรงดึง (Tensile properties) สมบัติด้านการโค้งงอ (Flexural properties) ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength)

5. ศึกษาสัณฐานวิทยาและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิต

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถผลิตคอมโพสิตจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และLDPE โดยมีขี้เลื่อยไม้ยางพาราอยู่ทำให้สมบัติโดยรวมดีขึ้น

2. เพิ่มมูลค่าให้กับขี้เลื่อยที่ได้จากอุตสาหกรรมผลิตผลิตภัณฑ์ไม้ให้สามารถใช้ประโยชน์ในการเสริมแรงพลาสติกได้มากขึ้น

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 พอลิเมอร์ผสม (Polymer Blend) [6]

ในอดีตมีการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่เพื่อตอบสนองการนำไปใช้ประโยชน์เฉพาะทาง แต่ในปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ได้เริ่มมีการนำพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ที่มีอยู่มาทำการผสมแทนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ และเป็นที่รู้จักกันในชื่อของ พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) ซึ่งหมายถึง พอลิเมอร์ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปที่นำมาผสมกันเพื่อทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่หรือเพื่อแก้ไขสมบัติที่ไม่ดีของพอลิเมอร์เดิม ทั้งนี้มีประโยชน์หลายประการด้วยกัน คือ

- หลีกเลี่ยงปัญหาของความยุ่งยากจากการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่
- ไม่ต้องลงทุนผลิตพอลิเมอร์ใหม่เพื่อนำไปใช้ประโยชน์เฉพาะทาง
- สามารถนำพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเด่นแต่ละชนิดมาผสมกันได้ เช่น การทำพอลิเมอร์ผสมของเทอร์โมพลาสติก ซึ่งมีความเปราะและมีความทนทานแรงกระแทกได้สูง กับอิลาสโตเมอร์ ซึ่งไม่เปราะ แต่มีความแข็งต่ำ (Stiffness) เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ใหม่ ที่มีสมบัติรวมของพอลิเมอร์ที่นำมาผสม ซึ่งจะแตกต่างจากสมบัติของพอลิเมอร์หลักที่นำมาผสมกัน โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น สภาวะในการผสม สมบัติการไหล สัณฐานวิทยา ซึ่งมีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ได้และการนำไปใช้งานของพอลิเมอร์ผสมตามต้องการ
- เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการอุตสาหกรรม

2.1.1 การแบ่งชนิดของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์ผสมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. พอลิเมอร์ผสมเป็นเนื้อเดียว (Miscible blend) หมายถึง พอลิเมอร์ที่นำมาผสมมีค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลาย (Solubility parameter, δ) ใกล้เคียงกันเป็นผลให้พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันไปจนถึงระดับโมเลกุลซึ่งมีพลังงานอิสระของการผสม (Free energy of mixing,ΔG_m) $\Delta G_m < 0$

2. พอลิเมอร์ผสมไม่รวมเป็นเนื้อเดียว (Immiscible blend) หมายถึง พอลิเมอร์ผสมที่มี$\Delta G_m > 0$ ซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการเทอร์โมไดนามิกส์

$$\Delta G_{mix} = \Delta H_{mix} - T\Delta S_{mix}$$

เมื่อ ΔG คือ พลังงานอิสระกิบส์

ΔH คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการผสม

ΔS คือ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีในการผสม

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

เนื่องจากพอลิเมอร์ส่วนมากเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ (Macromolecule) มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เป็นสาเหตุทำให้มีค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีในการผสมต่ำ ส่วนค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการผสมมักมีค่าเป็นบวก ทำให้ค่าพลังงานอิสระกิบส์ของพอลิเมอร์ผสมมีค่ามากกว่าศูนย์ เป็นผลให้พอลิเมอร์ผสมไม่รวมเป็นเนื้อเดียว หรือกล่าวได้ว่า พอลิเมอร์ที่นำมาผสมนั้นมีค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลาย (Solubility parameter, δ) ต่างกันมาก เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียว สามารถแบ่งได้เป็น 2 วัฏภาค คือ พอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของพอลิเมอร์ผสม เรียกว่า วัฏภาคหลัก (Matrix phase) ส่วนพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบส่วนน้อย เรียกว่า วัฏภาคกระจาย (Dispersed phase) ซึ่งสามารถตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาได้ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM)

2.1.2 ความสามารถในการเข้ากันได้

จากการศึกษาพบว่าพอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่เป็นแบบพอลิเมอร์ผสมที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียว จึงเป็นผลให้พอลิเมอร์ผสมมีข้อบกพร่อง ดังนี้ [7]

- มีสมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาคที่ไม่ดี
- มีค่าความตึงผิวที่พื้นผิวระหว่างสองวัฏภาค (Interfacial tension) สูง
- มีสัณฐานวิทยา (Morphology) ที่ไม่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป

จากข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นนั้น ทำให้นักวิทยาศาสตร์มีความสนใจในการแก้ไขข้อบกพร่องดังกล่าวด้วยการนำสารช่วยผสม (Compatibilizer) มาใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ (Compatibility) และให้ผลในการช่วยลดความตึงผิวที่พื้นผิวระหว่างสองวัฏภาค ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีสัณฐานวิทยาที่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป มีวัฏภาคกระจายที่มีขนาดเล็ก และทำให้สมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาคดีขึ้น ซึ่งมีวิธีการที่สามารถทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ดีขึ้น แบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

2.1.2.1 Non-reactive Blending คือ การเติมสารช่วยผสมลงในพอลิเมอร์ผสมแบบไม่เกิดปฏิกิริยา ทั้งนี้สารช่วยผสมที่ใช้ควรมีสูตรโครงสร้างที่เหมือนกับพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันเพื่อให้เกิดการเกี่ยวพัน (Entanglement) กับวัฏภาคทั้งสองชนิดของพอลิเมอร์ผสม ดังนั้นสารช่วยผสมนิยมใช้คือ พอลิเมอร์ร่วม ซึ่งมีหลายชนิด คือ พอลิเมอร์ร่วมแบบไดบล็อก แบบไตรบล็อก แบบกราฟต์หรือแบบสุ่ม

2.1.2.2 Reactive Blending เป็นวิธีการที่เติมสารช่วยผสมลงในพอลิเมอร์ผสมแบบเกิดปฏิกิริยาเคมี เนื่องจากพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันนั้นมีหมู่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีขณะทำการ

ผสม หรือทำให้เกิดการกราฟต์พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งให้มีหมู่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ตัวอย่างเช่น การกราฟต์พอลิเอทิลีนด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์ (Maleic anhydride) หรืออะคริลิกแอซิด (Acrylic acid) ซึ่งทำให้มีหมู่คาร์บอกซิลที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเอไมด์

ดังนั้นความสามารถในการเข้ากันได้ หมายถึงความสามารถในการเกี่ยวพัน หรือการทำปฏิกิริยาเคมีขณะที่ทำการผสมกันของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน แต่ไม่ใช่ความสามารถในการละลายรวมเป็นเนื้อเดียวกัน

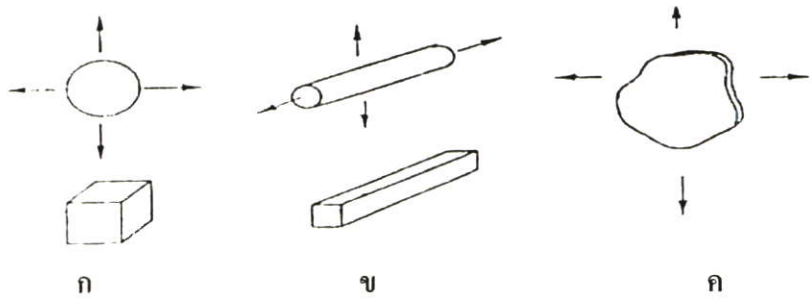
2.2 คอมโพสิต (Composites) [9]

วัสดุคอมโพสิตหรือวัสดุประกอบ (Composites) หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยส่วนประกอบอย่างน้อยสองชนิดที่มีสมบัติต่างกัน โดยจะแยกกันอยู่คนละวัฏภาค และทำให้วัสดุที่ได้มีสมบัติดีขึ้น มีความแข็งแรงมากกว่าแต่ละองค์ประกอบย่อย วัสดุประกอบหรือคอมโพสิตจัดเป็นวัสดุที่มีความสำคัญมากในปัจจุบันโดยเป็นที่นิยมและมีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากคอมโพสิตมีข้อดีหลายประการ เช่น มีความแข็งแรงสูง แต่มีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับวัสดุอื่น ๆ ค่ามอดุลัสต่อน้ำหนักสูง ขึ้นรูปได้ง่าย ความเสถียรในรูปร่าง และต้นทุนการผลิตต่ำ ประกอบกับคอมโพสิตหลายชนิดหลายรูปแบบ สามารถเลือกใช้ ออกแบบ และสร้างวัสดุคอมโพสิตให้เหมาะสมกับการใช้งานได้ ทำให้มีการประยุกต์ใช้งานกันอย่างกว้างขวางแทนวัสดุอื่น ๆ เช่น โลหะ เซรามิก เป็นต้น คอมโพสิตสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดใหญ่ ๆ แสดงดังรูปที่ 2.1-2.2 ดังนี้

1. คอมโพสิตแบบเส้นใย (Fibrous composites) คือ คอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใย (Fibers) อาจเป็นเส้นใยสั้น (Staple fibers) หรือเส้นใยยาวต่อเนื่อง (Filament fibers) มักเป็นเส้นใยขนาดเล็ก มีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง ทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรง ตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยสูงกว่าแนวอื่น ๆ

2. คอมโพสิตแบบแผ่นหรือลามิเนต (Laminar composites) คือ คอมโพสิตที่ประกอบด้วยชั้น หรือแผ่นของวัสดุที่ยึดติดกันด้วยตัวเชื่อมเมทริกซ์ มีลักษณะเป็นชั้น ๆ คล้ายแผ่นประกบ หรือเป็นโครงสร้างคล้ายรังผึ้ง (Honeycomb)

3. คอมโพสิตแบบเป็นก้อน (Particulate composites) คือ คอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเม็ด (Beads) แผ่น (Flake) หรือผง (Powder) ที่มีขนาดเล็ก (มักมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน)



รูปที่ 2.1 รูปร่างของสารตัวเติม (ก) อนุภาค (ข) เส้นใยสั้น และ (ค) แผ่น [9]

นอกจากนี้ ยังสามารถแบ่งชนิดของคอมโพสิตได้ตามลักษณะการเกิดของคอมโพสิต คือ

1. คอมโพสิตจากธรรมชาติ (Natural composites) คือ วัสดุคอมโพสิตที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ไม้ ฟัน และกระดูก ตัวอย่างเช่น ไม้เป็นคอมโพสิตที่มีเส้นใยเซลลูโลสเป็นส่วนเสริมแรง โดยมีสารจำพวกลิกนินเป็นเมทริกซ์ยึดเซลลูโลสไว้ด้วยกัน ส่วนกระดูกและฟันเป็นคอมโพสิตของผลึกแข็งอนินทรีย์ คือ ไฮดรอกซีแอปาไทต์ (Hydroxyapatite) ที่อยู่ในเมทริกซ์ของคอลลาเจนที่เป็นสารอนินทรีย์เหนียว เป็นต้น

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

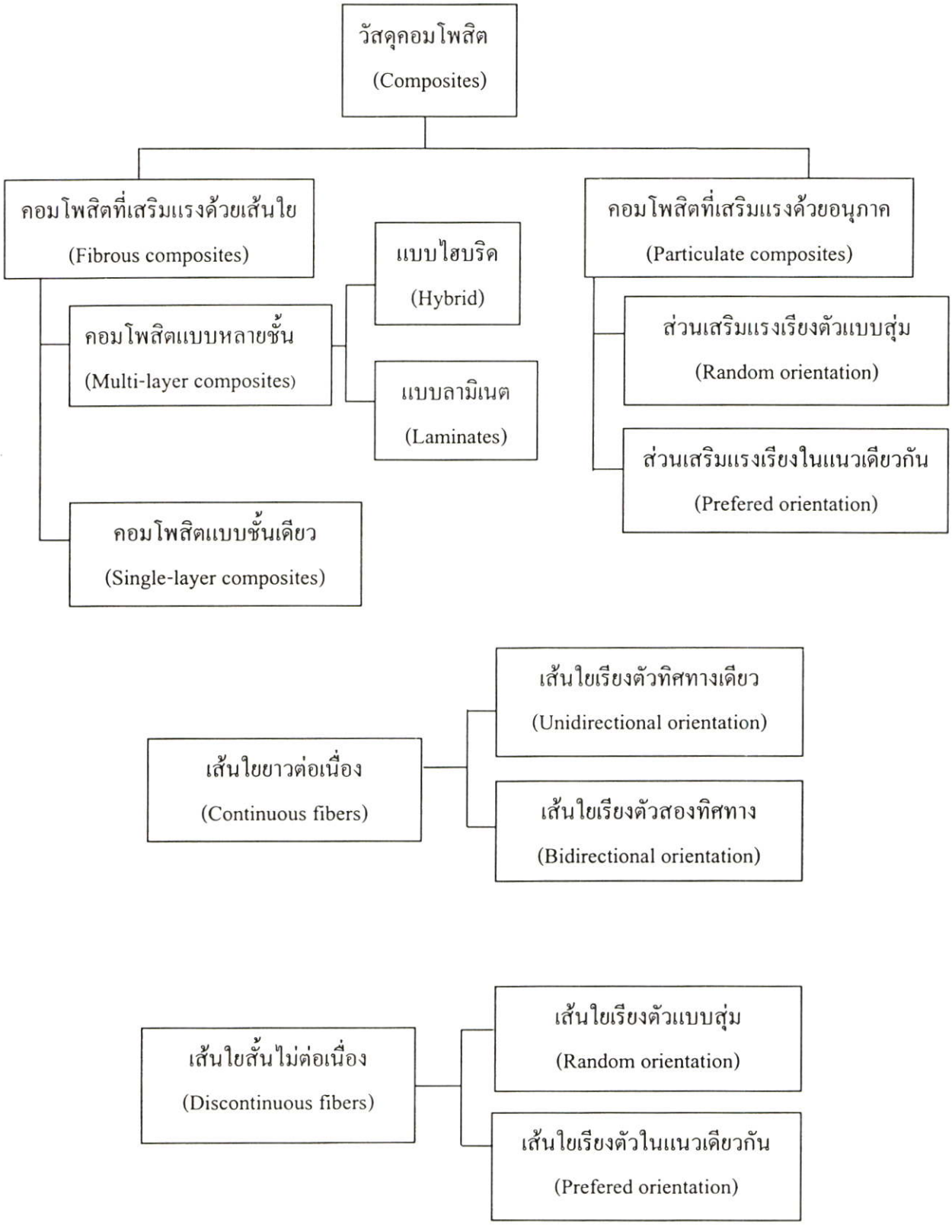
นอกจากนี้ ยังสามารถแบ่งชนิดของคอมโพสิตได้โดยแบ่งตามลักษณะของส่วนเสริมแรงตามรูปที่ 2.2

คอมโพสิตมีองค์ประกอบหลัก คือ

2.2.1 เมทริกซ์ (Matrix)

เป็นวัสดุที่เป็นองค์ประกอบหลักที่เป็นโครงสร้างของคอมโพสิตทำหน้าที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกัน ให้อยู่ในตำแหน่งและการเรียงตัวที่กำหนด โดยจะล้อมรอบและปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียสภาพ เนื่องจากสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ฯลฯ มักมีความแข็งแรงและมอดุลัสน้อยกว่าส่วนเสริมแรง เมทริกซ์เป็นองค์ประกอบที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางถ่ายเทแรงที่ได้รับ (Load transfer medium) ไปสู่ส่วนเสริมแรงและทำหน้าที่ปกป้องผิวนอกของคอมโพสิต 2 วัสดุเมทริกซ์ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่

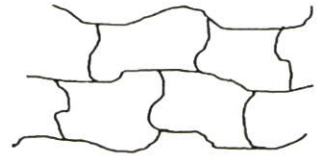
- พอลิเมอร์ เรียกคอมโพสิตชนิดนี้ว่า "Polymer composites" สามารถใช้ได้ทั้งพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) และเทอร์โมเซต (Thermosets)
- โลหะ เรียกคอมโพสิตชนิดนี้ว่า "Metal composites"
- เซรามิก เรียกคอมโพสิตชนิดนี้ว่า "Ceramic composites"



รูปที่ 2.2 ประเภทของวัสดุคอมโพสิตโดยแบ่งตามลักษณะของส่วนเสริมแรง [10]

พอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ใช้โดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 ประเภทได้แก่

1. เทอร์โมเซต (Thermoset) พอลิเมอร์กลุ่มนี้เมื่อผ่านกระบวนการวิธีผลิตจะมีรูปร่างถาวร ผลิตผลที่ได้นำไปหลอมขึ้นรูปใหม่อีกไม่ได้และไม่ละลายในตัวทำละลาย คือ ไม่เกิดกระบวนการย้อนกลับ ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าก่อนผ่านกระบวนการโครงสร้างของพอลิเมอร์ยังไม่เป็นร่างแห แต่เมื่อผ่านกระบวนการให้ความร้อน หรือให้ความดันเข้าไป จะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ในโครงสร้างเกิดการเชื่อมโยง (Crosslinking) ระหว่างสายโซ่โมเลกุลมีลักษณะเป็นระบบสามมิติ มีการสร้างพันธะโควาเลนต์ระหว่างสายโซ่โมเลกุล ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความคงทนไม่หลอมละลาย ถ้าให้ความร้อนมาก ๆ จะไหม้เกรียม และสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม เทอร์โมเซตที่ใช้เป็นเมทริกซ์ส่วนใหญ่ ได้แก่ พอลิเอสเทอร์ ไวนิลเอสเทอร์ อิพอกซี พอลิอิมิดและฟีนอลิก การเชื่อมโยงของเมทริกซ์ชนิดเทอร์โมเซตทำให้เกิดการเชื่อมต่อของสายโซ่ การต่อกิ่ง และการเชื่อมโยง ซึ่งทำให้ได้วัสดุมีความแข็ง มีสมบัติเชิงกลที่ดี ทนทานต่อตัวทำละลาย มีเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันและทนต่ออุณหภูมิสูง สมบัติของเทอร์โมเซต จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงและน้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่ระหว่างการเชื่อมโยง ถ้าเกิดการเชื่อมโยงสูงจะส่งผลให้เมทริกซ์มีความแข็งและมอดุลัสสูง แต่จะมีน้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่ระหว่างการเชื่อมโยงน้อยทำให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลเกิดได้ยาก ส่งผลต่อการถ่ายเทพลังงานที่ได้รับ เป็นผลให้วัสดุแข็งแต่เปราะ แตกหักง่ายที่เปอร์เซ็นต์การดึงยืดต่ำ และมีความทนทานต่อแรงกระแทกต่ำ รูปแบบการจัดเรียงตัวของเทอร์โมเซตแสดงได้ดังรูปที่ 2.3

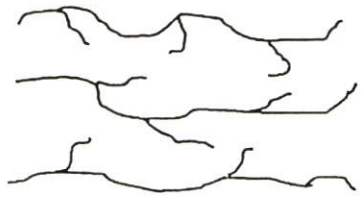


รูปที่ 2.3 รูปแบบการจัดเรียงตัวของเทอร์โมเซต [11]

2. เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ละลายได้ดีในตัวทำละลายบางชนิด เมื่อได้รับความร้อนสามารถหลอมตัวได้ เมื่อเย็นลงจะแข็งตัว สามารถหลอมและแข็งตัวหลาย ๆ ครั้งโดยไม่ทำให้สมบัติทางเคมีเปลี่ยนแปลงไป อาจแยกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มเทอร์โมพลาสติกอสัณฐาน (Amorphous thermoplastic) และเทอร์โมพลาสติกที่มีผลึกบางส่วน (Semi-crystalline thermoplastic)

เทอร์โมพลาสติกไม่จำเป็นต้องทำให้เกิดการเชื่อมโยงโครงสร้างก่อนการใช้งาน ดังนั้นความแข็งแรงจึงต้องเป็นผลโดยตรงมาจากสมบัติของสายโซ่พอลิเมอร์ และการพันกันของสายโซ่ ดังนั้นเทอร์โมพลาสติกที่นำมาใช้งานเป็นเมทริกซ์สำหรับคอมโพสิต จะต้องมีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก หรือมีความยาวสายโซ่มากพอที่จะเกิดการพันกัน ข้อเสียของพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงคือมีความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวสูงทำให้ไหลยาก จึงเป็นอุปสรรคในการขึ้นรูป ตัวอย่าง

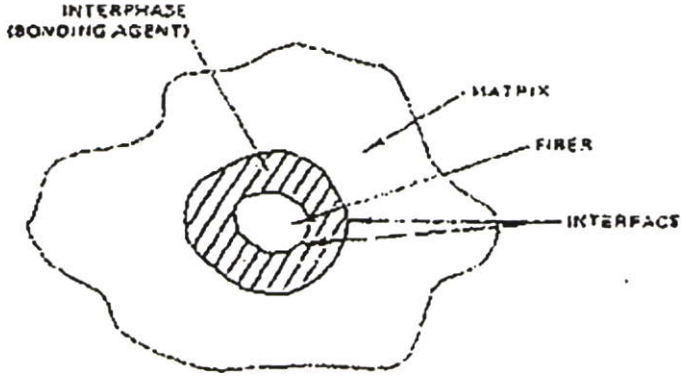
เทอร์โมพลาสติก เช่น พอลิเอไมด์ (PA) พอลิสไตรีน (PS) พอลิพรอพิลีน (PP) พอลิเอทิลีน (PE) เป็นต้น รูปแบบการจัดเรียงตัวของเทอร์โมพลาสติกแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 สำหรับการยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์แสดงได้ในดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 รูปแบบการจัดเรียงตัวของเทอร์โมพลาสติก [11]

เมทริกซ์มีหน้าที่ต่าง ๆ ดังนี้

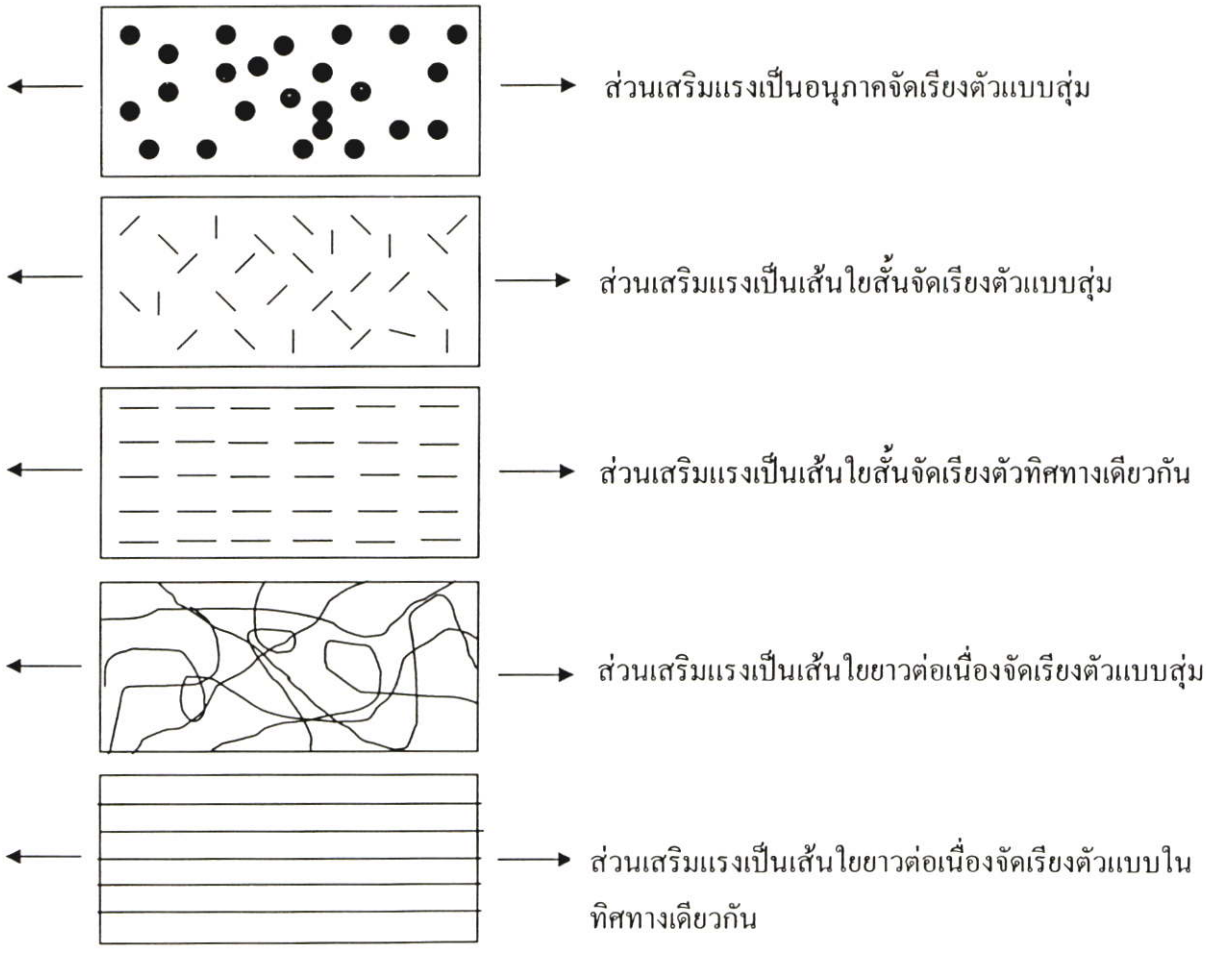
1. ทำหน้าที่ถ่ายเทความเค้น (Transfer stresses) ที่ได้รับไปยังเส้นใยเสริมแรง และถ่ายเทความเค้นระหว่างเส้นใย
2. ป้องกันส่วนเสริมแรงจากการเสียสภาพเนื่องจากสภาวะแวดล้อม
3. รักษาเสถียรทางรูปร่างและขนาดของวัสดุคอมโพสิต
4. รักษาการกระจายตัวของเส้นใยและป้องกันการรวมตัวของเส้นใย
5. ป้องกันเส้นใยจากการขัดถูเสียดสี
6. ช่วยให้คอมโพสิตมีเสถียรภาพในตัวกลางต่าง ๆ



รูปที่ 2.5 การยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ [9]

2.2.2 ส่วนเสริมแรง

ส่วนเสริมแรง (Reinforcement) คือ ส่วนที่เป็นโครงสร้างที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุคอมโพสิต หมายถึง เป็นส่วนรับแรงหลักของวัสดุคอมโพสิต วัสดุที่เป็นส่วนเสริมแรงจะมีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง มักเป็นส่วนที่ไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous phase) ส่วนเสริมแรงมีลักษณะรูปร่างได้หลายแบบอาจเป็นแผ่น เส้นใย หรืออนุภาคเล็ก ๆ ส่วนเสริมแรงที่นิยมใช้มีลักษณะเป็นเส้นใย (Fibers) ชนิดต่าง ๆ เช่น เส้นใยแก้ว (Glass fibers) เส้นใยคาร์บอน (Carbon fibers) เส้นใยธรรมชาติ (Natural Fibers) ฯลฯ อาจเป็นเส้นใยยาว (Filament fibers) หรือเส้นใยสั้น (Staplefibers) ก้อน (Particulates) เป็นแผ่น (Lamellar) นอกจากนี้อาจเป็นเส้นใยพันกันหรือทอ (Weaves) ให้มีโครงสร้างแบบต่าง ๆ และมีการจัดเรียง (Orientation) ของส่วนเสริมแรงแบบต่าง ๆ ส่วนเสริมแรงจะเป็นส่วนรับแรงหลัก (Principle load-carrying members) ของวัสดุคอมโพสิต รูปที่ 2.6 แสดงตัวอย่างคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงต่างกัน



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงต่างกัน [12]

สมบัติของเส้นใยที่เหมาะสมสำหรับใช้เสริมแรงควรมีลักษณะ ดังนี้

- เส้นใยควรมีมอดุลัสยืดหยุ่นสูงเพื่อประสิทธิภาพในการเสริมแรง
- เส้นใยควรมีความแข็งแรงสูง
- ความแข็งแรงของเส้นใยแต่ละเส้นไม่ควรแตกต่างกันมาก
- เส้นใยควรจะเสถียร และรับความแข็งแรงขณะจัดเก็บ และขึ้นรูปได้
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และพื้นผิวของเส้นใยควรมีลักษณะเหมือนกัน

ปัจจัยสำคัญของเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิต ได้แก่

- เส้นผ่านศูนย์กลาง
- ความยาวของเส้นใย
- ปริมาตรของเส้นใย
- ลักษณะรูปร่างของเส้นใย
- การจัดเรียงตัวของเส้นใยในคอมโพสิต

โดยทั่วไปเส้นใยที่ใช้เป็นสารเสริมแรงในคอมโพสิต สามารถแบ่งเป็น

1. เส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) เส้นใยแก้ว (Glass fiber) เส้นใยเคฟลาร์ (Kevlar fiber) เมื่อผสมลงในพอลิเมอร์จะทำให้ได้ความแข็งแรงสูงขึ้น
2. เส้นใยธรรมชาติ จะได้พอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงไม่ดีเท่าเส้นใยสังเคราะห์ แต่สามารถย่อยสลายได้

การผสมเส้นใยช่วยเพิ่มสมบัติต่าง ๆ ให้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ เช่น

- ความแข็งแรง
- ความเหนียว
- ความเสถียรภาพของรูปร่าง
- การคืบ (Creep)
- ความทนทานต่อการใช้งาน

สมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

- การยึดเกาะ (Interfacial bonding) ระหว่างเมทริกซ์ และสารเสริมแรง
- สมบัติของเมทริกซ์ และสารเสริมแรง
- ปริมาณสารเสริมแรง
- ขนาด และรูปร่างของสารเสริมแรง
- กระบวนการผลิต
- การจัดเรียงตัว และการกระจายตัวของสารเสริมแรง

- ตำหนิ (Flaws) หรือช่องว่าง (Voids) ภายในวัสดุคอมโพสิต

ข้อดีและข้อเสียของพอลิเมอร์คอมโพสิตแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของพอลิเมอร์คอมโพสิต [9]

ข้อดี	ข้อเสีย
1. มีสมบัติต่อน้ำหนักสูง เช่น ความแข็งแรงจำเพาะเนื่องจากวัสดุคอมโพสิตมีความหนาแน่นต่ำ น้ำหนักเบา 2. ช่วยลดน้ำหนักของวัสดุ 3. มีสมบัติหลากหลาย 4. มีอายุการใช้งานยาวนาน ต้านทานการสึกกร่อนดี 5. สมบัติการรับแรงและแดมปิ้ง (Damping) ดี 6. ความทนทานต่อการล้าดี 7. มีเสถียรภาพทางรูปร่างสูง เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำเมื่อเทียบกับวัสดุอื่น เช่น โลหะ	1. ต้นทุนการผลิตสูง เนื่องจากราคาของวัตถุดิบและเครื่องมือการขึ้นรูปคอมโพสิต 2. มักมีสมบัติแต่ละทิศทางไม่เท่ากันหรือมีสมบัติแอนไอโซโทรปี (Anisotropy) เนื่องจากมีการจัดเรียงตัว (Orientation) ของส่วนเสริมแรง 3. การต่อ (Attaching) หรือเชื่อมติดกับวัสดุอื่นทำได้ยาก 4. การตรวจวิเคราะห์สมบัติของคอมโพสิตทำได้ยาก 5. การทำลายและนำกลับมาใช้ใหม่หรือรีไซเคิล (Recycle) ทำได้ยาก

2.2.3 การประยุกต์ใช้งานคอมโพสิต [13]

ในการประยุกต์ใช้งานวัสดุคอมโพสิตนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์เมทริกซ์และส่วนเสริมแรงว่าเหมาะสมกับการใช้งานในด้านใด วัสดุคอมโพสิตมักนิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่นำมาใช้งานแทนโลหะ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ เครื่องบิน ยานอวกาศ อุปกรณ์กีฬา เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานคอมโพสิต เช่น

เครื่องบิน	พบใน ประตู ปีก ใบพัด หางเสือ ตัวเครื่อง
ยานยนต์	พบใน ตัวถังรถยนต์ กันชน ส่วนประกอบเครื่องยนต์
เรือ	พบใน ตัวถังเรือ ดาดฟ้าเรือ
อุปกรณ์กีฬา	พบใน ไม้เทนนิส ไม้แบดมินตัน ก้านไม้กอล์ฟ หมวกกันกระแทก

วัสดุที่ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมต่าง ๆ ต้องการวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงมากจึงมักใช้เส้นใยที่สามารถรับแรงกระแทกได้อย่างดี ตัวอย่างเช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบคอมโพสิตจากเส้นใยไม้ พบได้ในบานประตู (Door panels) ซึ่งเป็นคอมโพสิตแบบลามิเนต หรือการใช้ป่าน (Flax) เสริมแรงอิพอกซีเรซินหรือพอลิยูรีเทนในหลังคารถยนต์ เป็นต้น

2.3 เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers) [12]

เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers) เป็นเส้นใยที่ได้จากพืช สัตว์ หรือแร่ธาตุ เป็นอินทรียวัตถุที่สำคัญ หาได้ง่ายในธรรมชาติ สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้ และมีราคาถูกกว่าเส้นใยสังเคราะห์ ตัวอย่างของเส้นใยธรรมชาติ เช่น ป่าน (Flax) ฝ้าย (Cotton) ปอกระเจา (Jute) เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วเส้นใยธรรมชาติมีความเหมาะสมในการใช้เป็นสารเสริมแรงพลาสติกทั้งเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซต เนื่องจากมีความแข็งแรงและความแข็งเปราะสูง ความหนาแน่นต่ำ การประยุกต์ใช้งานคอมโพสิตในปัจจุบันมีการใช้เส้นใยธรรมชาติแทนการใช้เส้นใยแก้วมากยิ่งขึ้น จุดประสงค์เพื่อลดต้นทุนการผลิตเป็นหลัก นอกจากนี้เส้นใยธรรมชาติยังมีข้อดีอีกหลายอย่างที่เหนือกว่าเส้นใยแก้ว คือ

- เส้นใยธรรมชาติเป็นเส้นใยที่ได้จากพืช สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้ และหาได้ง่าย
- เส้นใยธรรมชาติมีความทนทานต่อการเสียดสีกันเองตามธรรมชาติมากกว่าเส้นใยแก้ว ซึ่งทำให้ง่ายสำหรับกระบวนการนำเส้นใยธรรมชาติกลับมาใช้ใหม่ (Recycling) ของพลาสติกคอมโพสิต
- หากนำเส้นใยธรรมชาติเสริมแรงพอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายทาง ชีวภาพ (Biodegradable polymers) ได้ดีจะไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม และยังสามารถหมักไว้ใช้เป็นปุ๋ยได้อีกด้วย
- เส้นใยธรรมชาติมีน้ำหนักเบากว่าเส้นใยแก้วมาก ทำให้สมบัติความแข็งแรงจำเพาะ (Specific strength) มากกว่าเส้นใยแก้ว

ด้วยเหตุนี้เส้นใยธรรมชาติจึงนิยมใช้เป็นสารเสริมแรงในพลาสติก โดยอาจเป็นทั้งสารตัวเติมและสารเสริมแรง เพื่อลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มปริมาณการผลิต

เส้นใยธรรมชาติเป็นอินทรียวัตถุที่สำคัญ หาได้ง่ายในธรรมชาติ มีปริมาณมาก สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้ และมีราคาถูกกว่าเส้นใยสังเคราะห์ ด้วยเหตุนี้เส้นใยธรรมชาติจึงเป็นที่นิยมใช้เป็นสารตัวเติมในพลาสติกโดยอาจเป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรง (Reinforcing fillers) เพื่อช่วยในการลดต้นทุน เพิ่มปริมาณการผลิต และเสริมแรงแก่ผลิตภัณฑ์ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของเส้นใยที่นำมาใช้

2.3.1 เส้นใยไม้ (Wood) [14]

ไม้เป็นวัสดุธรรมชาติที่มีความสำคัญมากเนื่องจากไม้มีประโยชน์มากมาย เช่น ทำกระดาษ เครื่องเรือน เครื่องใช้ หรือใช้เป็นแหล่งพลังงาน เราสามารถจำแนกไม้ออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ

2.3.1.1 ไม้ยืนต้น

ไม้ยืนต้นแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

(ก) ไม้เนื้ออ่อน (Softwood) เป็นไม้จำพวกสน Coniferous หรือ Gymnosperm ใบมีลักษณะเรียวเล็ก (Needle leaves) ผลมีลักษณะเป็นรูปทรงกรวย (Cone) ไม้เนื้ออ่อนไม่มีส่วนที่เป็นท่อลำเลียงน้ำในโครงสร้างของเนื้อเยื่อ ในประเทศไทยมีเพียง 2 ชนิด คือ สนสองใบ และสนสามใบ เส้นใยของไม้เนื้ออ่อนมีความยาวเฉลี่ยประมาณ 3 มม. เส้นใยที่ได้จากไม้เนื้ออ่อน เรียกว่า เส้นใยยาว และชื่อเรียกทางการค้ามักมีอักษร "N" (Needle) นำหน้า เช่น NBKP (Needle bleached kraft pulp) เพื่อระบุว่าเป็นเส้นใยยาว

(ข) ไม้เนื้อแข็ง (Hardwood) เป็นไม้จำพวก Angiosperm โดยทั่วไปมีใบกว้าง (Broad leaves) ยกเว้นไม้บางชนิด เช่น สนทะเลและสนปดิพัทธ์ มีท่อลำเลียงน้ำมัดรวมอยู่ในโครงสร้างของเนื้อเยื่อพืช ในเขตอบอุ่นไม้พวกนี้จะผลัดใบ (Deciduous) ตัวอย่างไม้เนื้อแข็ง เช่น ไม้เต็ง ไม้สัก เส้นใยของไม้เนื้อแข็ง เรียกว่า เส้นใยสั้น และชื่อเรียกทางการค้ามักมีอักษร "L" (Leaved) นำหน้า เช่น LBKP (Leaved bleached kraft pulp) เพื่อระบุว่าเป็นเส้นใยสั้น

2.3.1.2 ไม้ล้มลุก (Non-wood) เส้นใยที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ได้จาก

- เส้นใยที่เหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว ชานอ้อย
- พืชตระกูลหญ้า เช่น ไม้ไผ่ หญ้าแฝก
- พืชที่มีเส้นใยต่าง ๆ เช่น ปอกระเจา ปอแก้ว ป่านศรนารายณ์ ฝ้าย

สำหรับส่วนประกอบต่าง ๆ ของไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อนแสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน [15]

ส่วนประกอบ	ไม้เนื้อแข็ง	ไม้เนื้ออ่อน
เซลลูโลส	31-64	30-61
เฮมิเซลลูโลส	15-35	20-32
ลิกนิน	14-35	22-37
แพนโตซาน	13-32	4.5-17.5
ขี้เถ้า	0.1-5.4	0.02-1.1

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

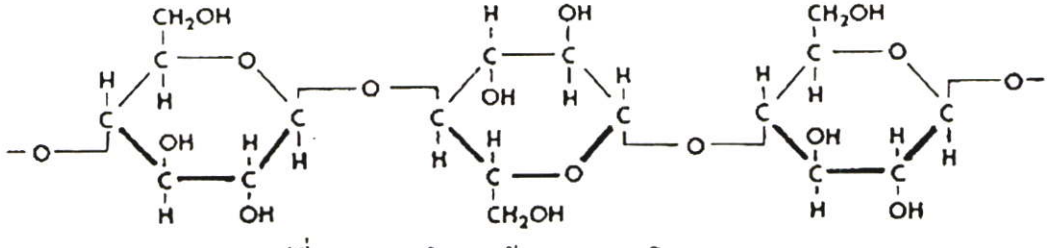
2.3.2 องค์ประกอบทางเคมีของไม้ [16]

องค์ประกอบทางเคมี (Chemical compositions) ที่สำคัญของไม้ ได้แก่ คาร์บอน (C) 49-50% ไฮโดรเจน (H) 6% และออกซิเจน (O) 44-45% นอกจากนี้ยังมีไนโตรเจน (N) 0.1-1 % และแร่ธาตุปริมาณน้อย เช่น แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) และโพแทสเซียม (K) ที่พบในเถ้าไม้อีกด้วย

โครงสร้างของเส้นใยธรรมชาติประกอบไปด้วย เซลลูโลส (Cellulose) เป็นส่วนใหญ่ที่เหลือเป็นเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) นอกจากนี้ยังมีสารเพกติน (Pectin) ปริมาณเล็กน้อยอีกด้วย

2.3.2.1 เซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นสารประกอบพอลิแซกคาไรด์ (Polysaccarides)ที่ประกอบด้วยหน่วยซ้ำ ๆ กัน ของกลูโคสที่มีสูตรเคมี $C_6H_{12}O_6$ เป็นโมโนแซกคาไรด์ (Monosaccarides) ที่เกิดผ่านการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) ในบรรยากาศของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กลูโคสเป็นโครงสร้างในเนื้อเยื่อพืช โดยพบรวมกับลิกนิน (Lignin) เพนโตซาน (Pentosan) กัม (Gum) แทนนิน (Tannin) ไขมัน (Fat) สารที่ทำให้เกิดสี เป็นต้น เซลลูโลสมีความเป็นผลึกประมาณร้อยละ 60-80 เป็นส่วนประกอบหลักในเนื้อไม้ ซึ่งมีอยู่ประมาณ 40-50 % โดยพบอยู่ที่ผนังเซลล์ของไม้ โครงสร้างของเซลลูโลสแสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างของเซลลูโลส [17]

เซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลถึง 3 หมู่ สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสจึงมีมาก และโครงสร้างของเซลลูโลสยังจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ จึงทำให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูงมาก อุณหภูมิการหลอมตัวจึงสูงมาก มักจะเกิดการสลายตัวก่อนถึงอุณหภูมิหลอมตัว และมีความสามารถในการละลายต่ำ เซลลูโลสธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยต่างกัน การกระจายน้ำหนักโมเลกุลของเซลลูโลสมีความสำคัญต่อสมบัติทางกายภาพ ส่วนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะส่งผลให้สมบัติทางกายภาพต่ำ

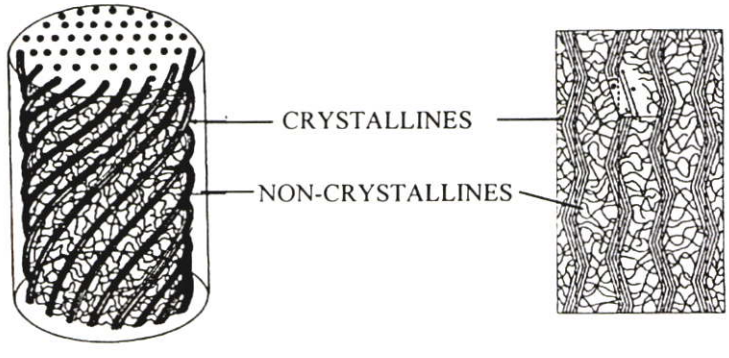
สมบัติทางกายภาพของเซลลูโลส

- การละลาย เซลลูโลสไม่ละลายน้ำ แต่จะละลายในกรดเข้มข้น เช่น 40 % ของกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) 72 % ของกรดซัลฟุริก (Sulfuric acid) เป็นต้น โดยเซลลูโลสจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอย่างรวดเร็วในสารละลายกรด ที่อุณหภูมิห้อง แต่จะหยุดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำ เซลลูโลสบวมตัวในสารละลายของเกลือเข้มข้นบางชนิด เช่น สารละลายอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali hydroxide) บางครั้งทำให้เซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถละลายได้

- ความหนืด เป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของเซลลูโลส โดยถ้าเราเพิ่มความเข้มข้นของเซลลูโลส ความหนืดก็จะเพิ่มขึ้นอย่างเร็ว ทำให้มีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น

- การดูดซับความชื้น เซลลูโลสส่วนใหญ่จะมีการดูดซับ หรือการคายไอน้ำ หรือของเหลวอื่น ๆ ในบรรยากาศรอบตัวของมันจนกระทั่งถึงจุดสมดุล โดยสมดุลของความชื้นของเซลลูโลสจะแปรเปลี่ยนไปตามความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศนั้น ปริมาณความชื้นของเซลลูโลสมีผลต่อสมบัติทางกายภาพบางประการ เช่น เมื่อความชื้นสูงขึ้น ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) จะมีค่าเพิ่มขึ้น

- ความหนาแน่น เซลลูโลสที่เป็นเส้นใยเดี่ยว จะไม่มีค่าความหนาแน่นที่แน่นอนค่าความหนาแน่นจะแปรเปลี่ยนไปตามแหล่งที่มา หรืออาจเปลี่ยนไป เนื่องจากการปรับปรุงทางเคมีเซลลูโลสเป็นของแข็งไม่มีสีรูปที่ 2.8 แสดงการจัดเรียงตัวของผลึกและอสัณฐานในโครงสร้างของเซลลูโลส

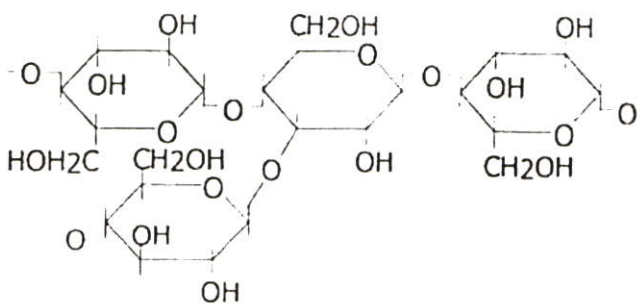


รูปที่ 2.8 แบบจำลองการจัดเรียงตัวของผลึกและอสัณฐานของเซลลูโลส [12]

2.3.2.2 เฮมิเซลลูโลส

โครงสร้างเฮมิเซลลูโลสจะประกอบด้วยพอลิแซกคาไรด์คล้ายกับเซลลูโลส แต่อย่างไรก็ตาม เฮมิเซลลูโลสยังมีข้อแตกต่างจากเซลลูโลส 3 ข้อด้วยกัน คือ ประการที่หนึ่งเฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด เช่น กลูโคส (Glucose) แมนโนส (Mannose) ไซโลส (Xylose) และอราบิโนส (Arabinose) ในขณะที่เซลลูโลสจะประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสชนิดเดียวเป็นส่วนใหญ่ ประการที่สองสายโซ่พอลิเมอร์ของเฮมิเซลลูโลสส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นสายโซ่กิ่ง ในขณะที่สายโซ่พอลิเมอร์ของเซลลูโลสมีลักษณะเป็นสายโซ่ตรง และประการที่สามระดับการเกิดพอลิแซกคาไรด์จากน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (Degree of polymerization) ของเซลลูโลสสูงกว่าเฮมิเซลลูโลส

สูตรเคมีของเฮมิเซลลูโลส คือ $(C_6H_{12}O_5)_{2n}$ โดย n คือ จำนวนหน่วยซ้ำของเฮมิเซลลูโลส โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลสแสดงได้ดังรูปที่ 2.9

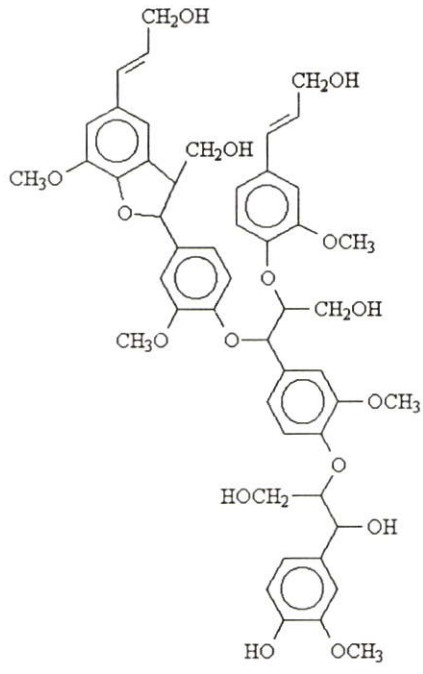


รูปที่ 2.9 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส [17]

เฮมิเซลลูโลสพบในเนื้อเยื่อของพืชโดยรวมอยู่กับสารอื่น ๆ เช่น ลิกนิน เซลลูโลส เป็นโครงสร้างของผนังเซลล์พบมากในแกลบ ซังข้าวโพด

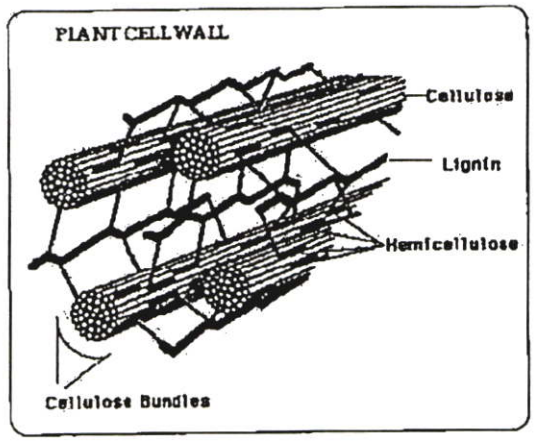
2.3.2.3 ลิกนิน

ลิกนินเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเชิงซ้อน มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ โครงสร้างของลิกนินประกอบด้วยสารอะลิฟาติกและอะโรมาติกอยู่รวมกัน โดยสารประกอบอะโรมาติกในโครงสร้างของลิกนินทำให้ลิกนินมีเสถียรภาพสูงและไม่ละลายน้ำ นอกจากนี้ลิกนินยังเป็นส่วนสำคัญที่ทำหน้าที่ยึดเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเข้าไว้ด้วยกัน ทำให้พืชที่มีปริมาณลิกนินอยู่มากจะมีความแข็ง ทนทานต่อดินฟ้าอากาศสูงมากด้วย ซึ่งไม้ต่างชนิดกันจะมีลิกนินอยู่ในโครงสร้างในรูปที่แตกต่างกันด้วย ตัวอย่างของลิกนินแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของลิกนิน [17]

ไม้แต่ละชนิดจะมีอัตราส่วนระหว่างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับชนิดและอายุของไม้ สำหรับไม้ชนิดเดียวกันนั้นไม้ที่มีอายุมากจะมีปริมาณลิกนินมาก โดยการจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในไม้จะแสดงได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในไม้ [16]

2.3.2.4 เพกติน

เพกตินเป็นคาร์โบไฮเดรต รู้จักกันในชื่อของ เฮเทอโรพอลิแซกคาไรด์ (Heteropolysaccarides) ซึ่งมีองค์ประกอบที่สำคัญ คือ กรดโพลิกาแลกทูรอน (Polygalacturon acid) โดยเพกตินจะละลายในน้ำหลังจากการทำให้เป็นกลางบางส่วน (Partial neutralization) ด้วยด่างหรือแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์

2.3.2.5 สารอินทรีย์อื่น ๆ

สารอินทรีย์ซึ่งสามารถสกัดได้ด้วยน้ำ หรือแอลกอฮอล์ เช่น แวกซ์ อัลคาลอยด์ โปรตีน ฟีนอลิก เพกติน กาว เรซิน ไกลโคไซน์ สารเหล่านี้ทำหน้าที่เหมือนเป็นตัวกลางในกระบวนการเมตาบอลิซึมของต้นไม้ ทำหน้าที่เก็บสะสมพลังงานและต่อต้านจุลินทรีย์ ชนิดของไม้ที่ใช้ในการทำโครงงานวิจัยนี้ คือ ไม้ยางพารา ซึ่งจัดเป็นไม้เนื้ออ่อน

2.3.3 ไม้ยางพารา [18-19]

ชื่อทางพฤกษศาสตร์	*Hevea brasiliensis*
วงศ์	Enphorbiaceae
ชื่อพื้นเมือง	Rubbertree , Jebe , Arbre De Para , Parakautschukbaum , Siringa , Seringueira-branca
ลักษณะและสถานที่เกิด	เป็นไม้ยืนต้นประเภทเนื้ออ่อน สูงใหญ่ อายุยืนเมื่อโตเต็มที่มีความสูงประมาณ 25-30 เมตร เนื้อไม้มีสีขาวอมเหลือง เนื้อไม้ละเอียดปานกลาง และบิดตัวง่าย มีมากมายหลายพันธุ์ ซึ่งให้ปริมาณน้ำยางและองค์ประกอบของน้ำยางแตกต่างกัน ต้นกำเนิดในทวีปอเมริกาใต้ ลักษณะของต้นยางพาราดังรูปที่ 2.12
ประโยชน์	ผลิตภัณฑ์ที่สำคัญคือ น้ำยาง และใช้ไม้ทำเฟอร์นิเจอร์ ใช้ในอุตสาหกรรมยางรถยนต์ และอื่น ๆ

รูปที่ 2.12 ลักษณะของต้นยางพารา [20]

2.4 การปรับปรุงสภาพพื้นผิวของเส้นใย [12]

ประสิทธิภาพของการยึดเกาะระหว่างพื้นผิวเส้นใยและเมทริกซ์นั้นเป็นส่วนสำคัญที่จะชี้บอกความสามารถในการนำพลาสติกคอมโพสิตไปประยุกต์ใช้งานเพื่อให้มีความหลากหลาย ดังนั้นการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยก่อนนำมาผลิตพลาสติกคอมโพสิตเพื่อเพิ่มการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์จึงเป็นที่นิยมกันในปัจจุบัน วิธีการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยมี 2 วิธี คือ วิธีทางกายภาพ (Physical methods) และวิธีทางเคมี (Chemical methods) ซึ่งแต่ละวิธีจะให้ประสิทธิภาพการยึดเกาะที่แตกต่างกัน

2.4.1 วิธีทางกายภาพ (Physical methods)

การปรับปรุงพื้นผิวทางกายภาพทำได้หลายวิธี เช่น การปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้ความร้อน (Thermotreatment) การทำด้ายผสม (Hybrid yarns) วิธีที่ระบุข้างต้นเหล่านี้จะไม่ทำให้องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยเปลี่ยนแปลงไป แต่อย่างไรก็ตามยังมีการปรับปรุงพื้นผิวทางกายภาพอื่น ๆ ที่ทำให้องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยเปลี่ยนแปลงไปซึ่งจะมีผลต่อพันธะเชิงกลของเส้นใยและเมทริกซ์พอลิเมอร์ วิธีดังกล่าวได้แก่

2.4.1.1 วิธีการปลดปล่อยพลังงานไฟฟ้า (Electric discharge) ได้แก่ โคโรนา (Corona) พลาสมา (Plasma) เป็นวิธีการที่ทำให้พื้นผิวของเส้นใยมีองค์ประกอบทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงไปทำให้สามารถยึดเกาะกับเมทริกซ์ได้ดียิ่งขึ้น

2.4.1.2 วิธีโคโรนา เป็นเทคนิคที่ได้รับความสนใจมากที่สุด เป็นการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่พื้นผิวของเส้นใยโดยใช้พลังงานไฟฟ้า กระบวนการนี้จะเปลี่ยนแปลงพลังงานบนพื้นผิวของเส้นใย ทำให้เกิดอนุมูลอิสระที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์เมทริกซ์ และทำให้มีหมู่อัลดีไฮด์มากขึ้น

วิธีการปลดปล่อยพลังงานไฟฟ้านั้นจะมีประสิทธิภาพดีมากสำหรับพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ไม่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เช่น พอลิสไตรีน พอลิพรอพิลีน พอลิเอทิลีน ฯลฯ

นอกจากนี้ การชุบมัน (Mercerization) ซึ่งใช้กันอย่างกว้างขวางกับเส้นใยฝ้ายนั้น เป็นการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยเซลลูโลสด้วยด่าง ประสิทธิภาพของวิธีนี้จะขึ้นอยู่กับชนิด และความเข้มข้นของสารละลายด่าง อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ หากใช้สภาวะที่เหมาะสมแล้วจะช่วยปรับปรุงสมบัติการทนแรงดึงและการดูดซับน้ำของเส้นใยฝ้ายได้

2.4.2 วิธีทางเคมี (Chemical methods)

เนื่องจากเส้นใยเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ในโครงสร้างจึงทำให้เส้นใยเซลลูโลสมีขั้วมาก จึงเป็นเหตุให้ไม่สามารถเข้ากันได้ (Incompatibility) กับพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วหรือมีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เช่น พอลิพรอพิลีน ความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์กับเส้นใยสามารถปรับปรุงได้โดยการใช้สารคู่ควบ (Coupling agents) ซึ่งสารคู่ควบจะเป็นตัวกลางเชื่อมระหว่าง

วัสดุทั้งสอง สารคู่ควบมีหลายชนิดแตกต่างกันตามหน้าที่ในการเชื่อมโยง หน้าที่ของสารคู่ควบมีหลายประการดังนี้

- สารคู่ควบจะปรับปรุงสมบัติการเปียกผิว (Wettability) ระหว่างพอลิเมอร์กับสารตั้งต้น โดยจะเพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างพื้นผิว (Surface tension)
- สารคู่ควบจะปรับปรุงพื้นผิวระหว่างวัฏภาคที่ไม่แข็งแรงของพลาสติกคอมโพสิต
- สารคู่ควบจะเพิ่มความเหนียวและความสามารถในการโค้งงอให้กับวัสดุ
- สารคู่ควบจะสร้างพันธะโควาเลนต์ให้เกิดขึ้นระหว่างวัสดุทั้งสอง
- สารคู่ควบจะเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดของพื้นผิวสารตั้งต้น

การใช้สารคู่ควบเป็นวิธีการปรับปรุงการยึดเกาะของพื้นผิวระหว่างเส้นใยและพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่สำคัญ นั่นคือพื้นผิวของเส้นใยจะเกิดพันธะเคมีเชื่อมโยงกับเมทริกซ์ ซึ่งกลไกการปรับสภาพพื้นผิวเส้นใยทางเคมีมีหลายวิธี สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการปรับสภาพพื้นผิวเส้นใยเซลลูโลสด้วยการใช้วิธีพอลิเมอร์ร่วมและการใช้สารคู่ควบประเภทออกาโนไซเลน

2.4.3 สารคู่ควบ (Coupling agent) [9, 21]

เมื่อสารตัวเติมและเส้นใยอนินทรีย์ถูกทำให้กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์พอลิเมอร์ที่เป็นสารอินทรีย์ ทำให้รอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interphase) ไม่แข็งแรง เนื่องจากความแตกต่างของมอดุลัส สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ความมีขั้ว การดึงดูดทางเคมี และความว่องไวทางเคมี จึงทำให้เกิดปัญหาในทางปฏิบัติมากมาย ดังนี้

1. การกระจายตัว (Dispersion) ของสารตัวเติมที่เป็นของแข็งในเมทริกซ์ของเหลว ทำได้ยากทำให้อัตราการกระจายตัวช้าลง และลดการกระจายตัวที่สมดุล จึงมีผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์สุดท้าย

2. ความแข็งแรง (Strength) หมดไป เนื่องจากความไม่แข็งแรงตรงผิวรอยต่อ

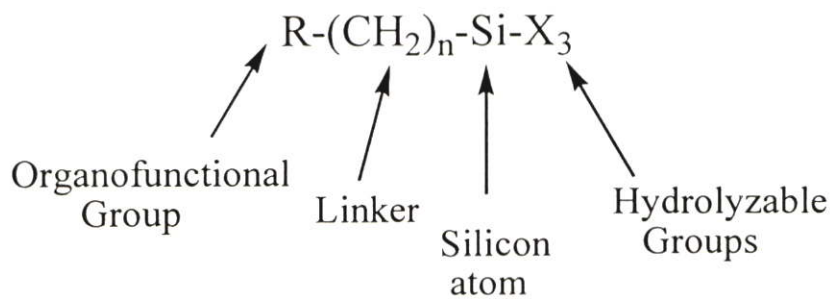
3. ความทนต่อแรงกระแทก (Impact Strength) ลดต่ำลงอย่างมากเพราะเกิดความไม่แข็งแรงตรงผิวรอยต่อ

4. รอบทางความร้อน (Thermal Cycling) ทำให้เกิดความไม่เข้ากัน (Mismatch) ระหว่างอนุภาคของสารอนินทรีย์ที่มีการขยายตัวทางความร้อนต่ำกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่มีการขยายตัวทางความร้อนสูงทำให้เกิดความล้มเหลวตรงบริเวณรอยต่อ

5. การให้สี (Pigmentation) ทำให้เกิดการแยกตัวและการกระจายตัวของอนุภาคที่มีสีแต่ละชนิดได้อย่างเหมาะสม

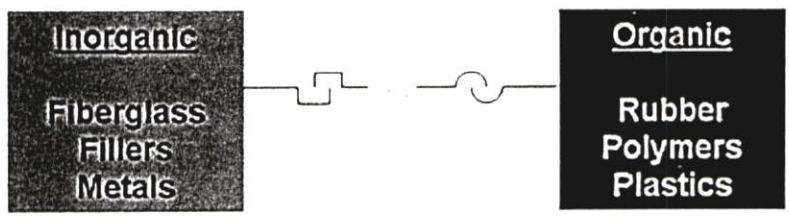
6. ความชื้น (Humidity) ส่งผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างการขยายตัวและการหดตัวของ 2 วัฏภาค เกิดความไม่เหมาะสมตรงผิวรอยต่อในช่วงที่มีความชื้น โดยความชื้นจะเข้ามาตามรอยต่อทำให้เกิดความไม่แข็งแรงตรงผิวรอยต่อ

ด้วยเหตุผลทั้งหมด จึงเกิดความแตกต่างที่เห็นได้ชัดตรงรอยต่อระหว่างพอลิเมอร์และสารตัวเติม ทำให้เกิดปัญหาขึ้นมากมาย แต่ปัญหาเหล่านี้จะแก้ไขได้โดยการใช้สารคู่ควบ (Coupling agents) เพื่อช่วยให้สารตัวเติมผสมเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ วัสดุคอมโพสิตที่มีคุณภาพสูงจำเป็นที่ต้องรองรับความเครียดระหว่างวัฏภาคโดยมีแรงยึดระหว่างผิว การปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบที่เหมาะสมจะส่งเสริมแรงกระทำทางเคมีและกายภาพกับพอลิเมอร์ สารคู่ควบชนิดต่าง ๆ ที่นิยมใช้เช่น สารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agents) จัดเป็นสารคู่ควบที่นิยมใช้กันมานาน ซึ่งมีสูตรโครงสร้างทั่วไปดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของสารคู่ควบไซเลน [22]

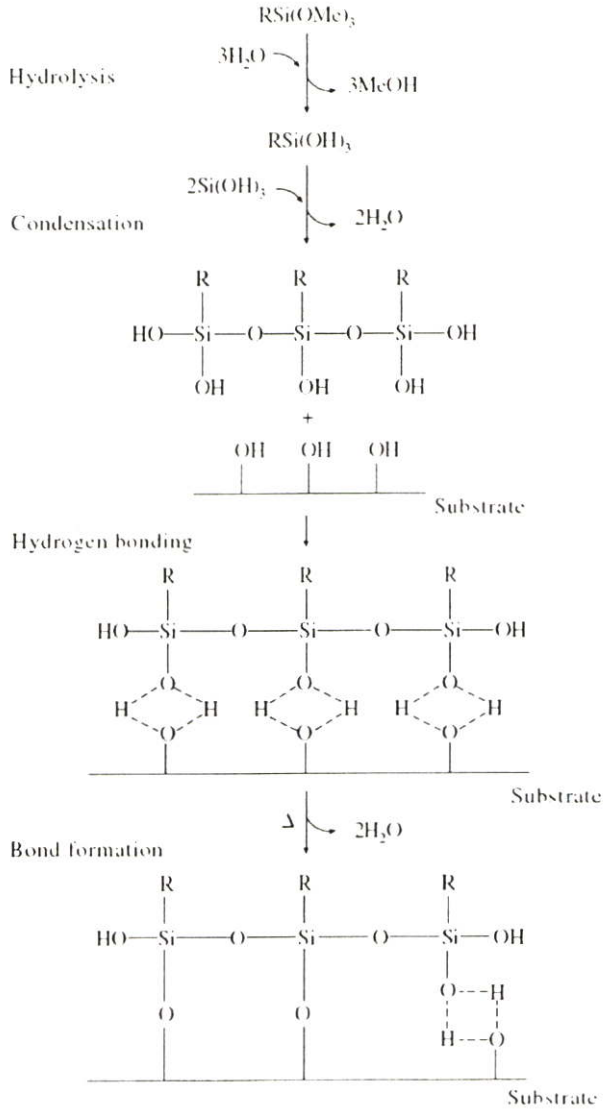
โครงสร้างของสารคู่ควบไซเลนประกอบด้วยซิลิคอน (Si) เป็นจุดศูนย์กลางของโมเลกุลโดยจะจับกับหมู่ของสารอินทรีย์ (R) เช่น หมู่ไวนิล หมู่อะมิโน หมู่คลอไรด์ หมู่เมอแคปแทน และหมู่อิพอกซีเป็นต้น โดยจะทำหน้าที่ยึดติดกับเมทริกซ์พอลิเมอร์ และในส่วนของหมู่อนินทรีย์ (X) เช่น เมทอกซีหรือเอทอกซีจะสามารถยึดติดกับสารอนินทรีย์ แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การเกิดปฏิกิริยาของสารคู่ควบไซเลน [23]

หมู่อนินทรีย์ (X) จะถูกไฮโดรไลซ์ด้วยน้ำกลายเป็นหมู่ไซเลนอล (Silanol, -O-Si) โดยจะทำปฏิกิริยากับผิวหน้าของสารตัวเติม และสารคู่ควบเองเกิดเป็นพันธะระหว่างสารตัวเติมกับสารคู่ควบ ขณะที่สารอินทรีย์ (R) เกิดปฏิกิริยากับเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ประเภทสารอินทรีย์ด้วยพันธะโควาเลนต์

และ/หรือการสร้างโครงร่างแหเชื่อมโยงภายในโครงสร้าง (Interpenetrating networks) ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่าง สารคู่ควบไซเลน กับหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยเซลลูโลสนั้นจะเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะกันกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งการเลือกใช้สารคู่ควบไซเลนสามารถออกแบบพันธะสารอินทรีย์ (R) ให้เหมาะสมกับเมทริกซ์พอลิเมอร์ที่แตกต่างกันไป เช่น หมู่ไวนิล หมู่อิพอกซี หมู่เอมีน หมู่เมอร์แคปแทน เป็นต้น ด้วยเหตุนี้สารตัวเติม สารคู่ควบ และ เมทริกซ์พอลิเมอร์ ทั้งหมดจึงกลายเป็นโมเลกุลโควาเลนต์ขนาดใหญ่หนึ่งโมเลกุล โดยอัลคอกซีไซเลน (Alkoxy silanes, R-Si-OH) จะเกิดพันธะกับหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวเส้นใย แสดงดังรูปที่ 2.15

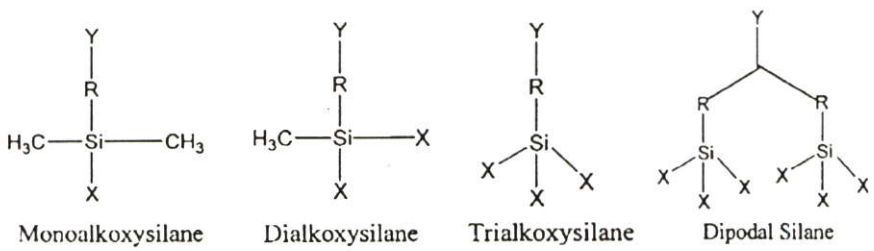


รูปที่ 2.15 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของสารคู่ควบไซเลน [24]

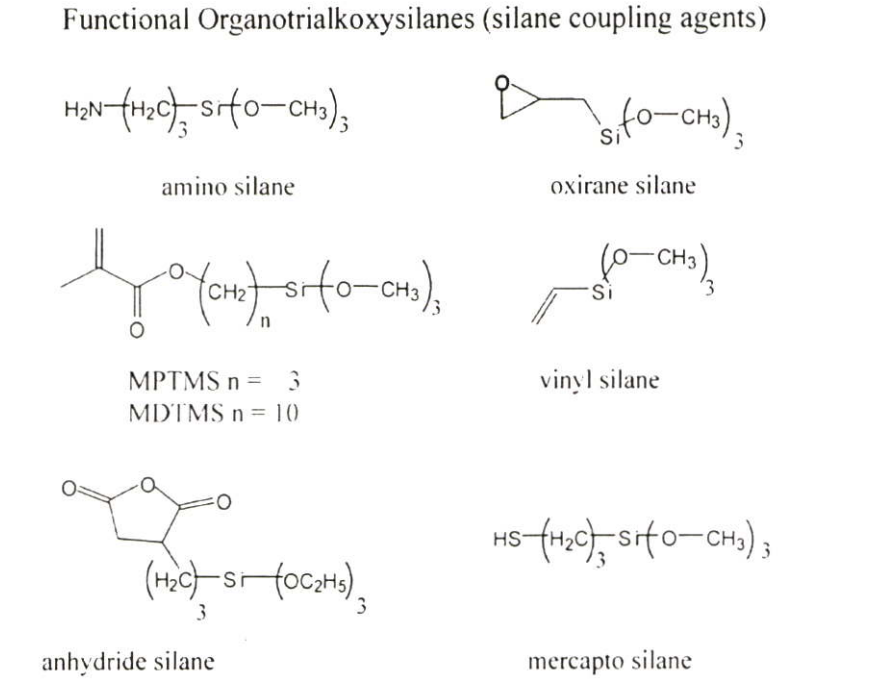
อัลคอกซีไซเลนเกิดผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ทำให้เกิดหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างและสามารถเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นต่อกับหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยเซลลูโลสได้โมเลกุลน้ำเป็นผลพลอยได้ซึ่งจะเกิดพันธะโควาเลนท์ขึ้น นอกจากนี้ปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไซเลนอล (Silanols, Si-OH) กับ

หมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยแล้วยังเกิดโครงสร้างพอลิไซลอกเซน (Polysiloxane structure, $(RSi\text{-}(OR')_n)$ ขึ้นด้วย ซึ่งโครงสร้างนี้จะเชื่อมโยงระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์ให้สามารถยึดเกาะและเข้ากันได้ดียิ่งขึ้นนั่นเอง

นอกจากนี้โครงสร้างของสารคู่ควบไซเลนสามารถแบ่งตามจำนวนพันธะหมู่ อนินทรีย์ (X) ได้เป็น 4 แบบ คือ โมโนอัลคอกซีไซเลน (Monoalkoxysilane) ไดอัลคอกซีไซเลน (Dialkoxysilane) ไตรอัลคอกซีไซเลน (Trialkoxysilane) และไดโพดอลไซเลน (Dipodal Silane) แสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 โครงสร้างของสารคู่ควบไซเลนโดยแบ่งตามหมู่อนินทรีย์ (X) [25]



รูปที่ 2.17 โครงสร้างของสารคู่ควบไซเลนโดยแบ่งตามสารอินทรีย์ (R) [25]

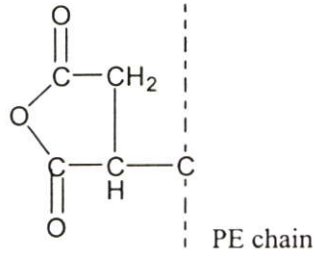
2.4.4 สารช่วยผสม (Compatibilizer) [12, 26]

การเติมสารช่วยผสมเป็นวิธีการหนึ่งในการปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสมซึ่งมีผลให้

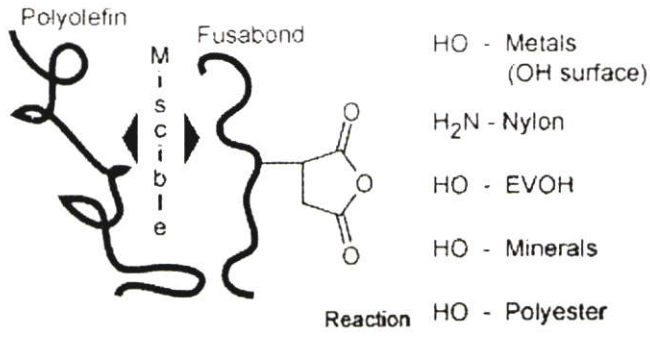
- แรงตึงผิว (Interfacial tension) ของพอลิเมอร์หลอมเหลวมีค่าลดลง ทำให้การกระจายตัวในวัฏภาคดีขึ้น
- เพิ่มแรงยึดติด (Adhesion) ระหว่างผิวสัมผัส ทำให้การถ่ายเทความเค้น (Stress transfer) เกิดได้ดีขึ้น
- ช่วยลดความตึงผิวที่พื้นผิวระหว่างสองวัฏภาค ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีสัณฐานวิทยาที่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป

โดยสารช่วยผสมอาจเป็นพอลิเมอร์ร่วมชนิดบล็อกหรือกราฟต์ ซึ่งสามารถแทรกซึมผ่านเข้าไปในวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสม ทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น ในการเลือกพอลิเมอร์ร่วมเพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสมต้องคำนึงถึงน้ำหนักโมเลกุลในแต่ละส่วนของพอลิเมอร์ร่วม คือ ถ้ามีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ความยาวของสายโซ่สั้น ทำให้การแทรกซึมผ่านไปในพอลิเมอร์ผสมได้น้อย ส่งผลให้การยึดติดระหว่างผิวสัมผัสต่ำ แต่ถ้าน้ำหนักโมเลกุลสูงมากเกินไป ทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ยาก การแทรกซึมผ่านไปในพอลิเมอร์ผสมก็ต่ำเช่นเดียวกัน ในงานวิจัยนี้ใช้ มาเลอิกแอนไฮดรายด์กราฟต์พอลิเอทิลีน (Maleic anhydride grafted Polyethylene:MAPE) โครงสร้างดังรูปที่ 2.18 เป็นสารช่วยผสม พอลิเอทิลีนเป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วส่งผลให้เมื่อทำการผสมกับวัสดุอื่นที่มีขั้ว มักมีสมบัติด้านแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวไม่ดี แต่สามารถที่จะทำการแก้ไขได้โดยการเติมสารอีกชนิดหนึ่งลงไปเพื่อเพิ่มสมบัติการเข้ากันได้

มาเลอิกแอนไฮดรายด์กราฟต์พอลิเอทิลีนเป็นการต่อกิ่งพอลิเอทิลีนซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่เสถียรแล้ว ซึ่งจะทำให้สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ (Physical chemical) ดีขึ้น โดยการเพิ่มความเป็นขั้วของพอลิเอทิลีนโดยทำให้ความเป็นบวกเพิ่มขึ้น และความสามารถในการยึดติดเพิ่มขึ้น พบว่าแอนไฮดรายด์เป็นส่วนที่เกิดการเชื่อมโยง เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เพิ่มความสามารถในการต้านทานความร้อนและเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้กับพอลิเมอร์อื่น รวมทั้งสารตัวเติม (Additive) ได้เป็นอย่างดี การทำงานแสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮดรายด์ [27]



รูปที่ 2.19 การทำงานของพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮดรายด์ [27]

กระบวนการนำไปใช้

(ก) สารละลายในน้ำ (Aqueous solution)

เป็นวิธีที่ใช้กันทั่วไปโดยนำสารตัวเติมผสมกับน้ำเป็นของเหลวข้นแล้วเติมสารคู่ควบในขณะที่ไฮโดรไลซ์เป็นหมู่ไซเลนอล (Silanol) โดยจะทำปฏิกิริยากับผิวของสารตัวเติมและสารคู่ควบเกิดเป็นพันธะระหว่างสารตัวเติม สารคู่ควบ และพอลิเมอร์ออร์แกโนซิลิโคน ต่อจากนั้นผิวที่มีสารตัวเติมอยู่จะถูกทำให้กระจายตัวในพอลิเมอร์

(ข) การผสมแห้ง (Dry blending)

เป็นวิธีที่ทำโดยนำสารตัวเติมมาผสมกับสารคู่ควบได้โดยตรง โดยที่ผิวของสารตัวเติมแห้ง จัดเป็นเทคนิคที่ทำได้ยากมาก

(ค) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายใน (In situ reaction)

การทำเช่นนี้เป็นการลดค่าใช้จ่าย โดยในขั้นตอนการปรับปรุงพื้นผิวซึ่งเป็นขั้นตอนพิเศษจะต้องให้สารตัวเติมและสารคู่ควบกระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ โดยสารคู่ควบจะเคลื่อนที่ไปยังผิวของสารตัวเติมและทำปฏิกิริยากันอย่างเหมาะสมตรงบริเวณรอยต่อ ซึ่งจำเป็นต้องใช้สารคู่ควบชนิดพิเศษ และต้องมีขั้นตอนการปรับปรุงก่อน (Pre-treating) การนำไปใช้ในทางการค้ายังไม่เป็นที่รู้จัก

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จีราภรณ์ คำศรี [5] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE โดยใช้อัตราส่วน PVC 100 : LDPE 10 และ 40 phr ศึกษาถึงผลของการปรับปรุง สมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้สารช่วยผสม 3 ชนิด คือ CPE Elvaloy และ PA 20 ปริมาณที่ศึกษาคือ 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนักของ LDPE โดยทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว เครื่องผสมชนิด 2 ลูกกลิ้ง และขึ้นรูปโดยการอัดขึ้นรูป พบว่าสารช่วยผสมทั้ง 3 ชนิดทำให้สมบัติโดยรวมของพอลิเมอร์ผสมสูงขึ้น โดยชนิดและปริมาณของสารช่วยผสมที่เหมาะสมในการนำพอลิเมอร์ผสมไปทำวัสดุคอมโพสิต คือ PA 20 ปริมาณ 15 % โดยน้ำหนักของ LDPE เนื่องจากให้สมบัติโดยรวมสูงที่สุด และทำการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของ คอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมกับขี้เลื่อยไม้ยางพารา โดยใช้อัตราส่วน PVC 100 : LDPE 10 และ 40 phr สารช่วยผสม 3 ชนิด PA 20 ปริมาณ 15 %โดยน้ำหนักของ LDPE และปริมาณขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ศึกษา คือ 10 20 30 40 และ 50 % โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งพบว่า เมื่อปริมาณไม้มากขึ้นมอดุลัสสูงขึ้น แต่ความแข็งแรงดึง ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงโค้งงอ และความแข็งแรงกระแทกลดลง โดยพบว่าคอมโพสิตของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC 100 : LDPE 10 ให้สมบัติที่ดีกว่าคอมโพสิตของพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วน PVC 100 : LDPE 40 จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต เพื่อศึกษาการกระจายตัวของขี้เลื่อยในพอลิเมอร์ผสมและการยึดเกาะกันระหว่างสองวัฏภาคพบว่าที่ PVC100 : LDPE 10: PA 20 15 % : ขี้เลื่อย 10 % มีการกระจายตัวของขี้เลื่อยดีกว่าคอมโพสิตที่มีขี้เลื่อย 50 % เนื่องจากการเกาะกลุ่มกันของขี้เลื่อยเพราะพันธะไฮโดรเจนที่อยู่ในเนื้อไม้ ทำให้ความสามารถในการส่งผ่านแรงต่ำลง และช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคของขี้เลื่อยและพอลิเมอร์ผสมมีขนาดกว้างขึ้น และจากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิตพบว่า อุณหภูมิในการสลายตัวของ PVC ลดลงเมื่อปริมาณขี้เลื่อยเพิ่มขึ้น แต่เมื่อใช้สารช่วยผสม PA 20 พบว่าอุณหภูมิในการสลายตัวของ PVC สูงขึ้น เนื่องจากส่วนที่มีขั้วใน PA 20 จะยึดเหนี่ยวกับส่วนที่ไม่มีขั้วใน PVC ทำให้ Cl มีโอกาสเกิดพันธะกับไฮโดรเจนน้อยลง ส่วนอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึกของ LDPE ในคอมโพสิตเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อใช้สารช่วยผสม และปริมาณขี้เลื่อยเพิ่มขึ้น

วรรณิยา ชาญณรงค์ [28] ได้ศึกษาถึงแนวทางการผลิตไม้เทียมจากวัสดุคอมโพสิตระหว่าง PVC กับเส้นใยไม้ยางพารา ที่เตรียมด้วยกระบวนการทางความร้อนเชิงกล (Thermomechanical pulp: TMP) โดยการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยการอัดขึ้นรูป ซึ่งพบว่าการเพิ่มปริมาณของเส้นใยไม้ยางพาราในวัสดุคอมโพสิตทำให้ค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัสที่ 3 % ค่าความแข็งแรงกระแทก ความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอสูงขึ้น แต่สมบัติดังกล่าวมีแนวโน้มลดลงเมื่อเกินความสามารถในการเข้ากันได้ของเส้นใยกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ แต่ในส่วนของค่าความแข็งกด มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น ในส่วนของปริมาณพลาสติไซเซอร์ ซึ่งใช้ไดออกทิลพทาเลต (DOP) เมื่อใช้ในปริมาณที่สูงขึ้นทำให้ค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัสที่ 3% ความแข็งแรงโค้งงอ มอดุลัสโค้งงอและค่าความแข็งกดลดลง ในขณะที่

ค่าความแข็งแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากในการเติมพลาสติไซเซอร์ทำให้วัสดุคอมโพสิตนิ่มลงและมีความเป็นพลาสติกมากขึ้น

เกรียงไกร อารีพูนสิริ และคณะ [29] ได้ศึกษาถึงพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทก (High Impact Polystyrene; HIPS) โดยมีเส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียม ด้วยวิธีเชิงกล (Mechanical pulp , MP) เป็นสารตัวเติม โดยศึกษา HIPS 2 เกรด คือ ชนิดผสมสารหน่วงไฟ (Flame retardent) และไม่ผสมสารหน่วงไฟ เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ ในปริมาณ HIPS 100 phr ปริมาณหญ้าแฝกที่ใช้ คือ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 phr ขนาด 20-50 เมช และ เติมสารคู่ควบไซเลน 2 ชนิด คือ ไซเลน A-171 (Vinyltrimethoxy silane) และไซเลน A-1100 (γ-Aminopropyltriethoxy silane) ปริมาณ 3 % โดยน้ำหนักหญ้าแฝก โดยมีการศึกษาผลของปริมาณเส้นใยหญ้าแฝก ชนิดของสารคู่ควบ และชนิดของพอลิเมอร์เมทริกซ์ทั้ง 2 ชนิด พบว่าปริมาณหญ้าแฝก 30 phr ให้สมบัติเชิงกล คือ ความแข็งแรงดึงมอดุลัส ความแข็งแรงโค้งงอดีที่สุดและความแข็งแรงกดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อหญ้าแฝกเพิ่มขึ้น ส่วน % การดึงยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลง เมื่อปริมาณหญ้าแฝกเพิ่มขึ้น การเพิ่มปริมาณหญ้าแฝกไม่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนและการติดไฟ แต่การดูดซับน้ำ ความหนาแน่นและความทนทานต่อปลวกเพิ่มขึ้น การผสมไซเลน A-171 ปริมาณ 3 % โดยน้ำหนักหญ้าแฝกที่ 30 phr ให้มอดุลัส % การดึงยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงโค้งงอสูงกว่า A-1100 ส่วนความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงกดและความแข็งแรงกระแทกของไซเลนทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน ค่ามอดุลัสโค้งงอมีค่ามากกว่าเมื่อเติมไซเลน A-1100 การใช้สารคู่ควบไซเลนต่างชนิดกันไม่มีผลต่อสมบัติทางความร้อน การติดไฟ การดูดซับน้ำ ความหนาแน่นและความทนทานต่อปลวก ส่วนสัณฐานวิทยาพบว่าไซเลน A-171 มีการยึดเกาะระหว่างวัฏภาคดีกว่า การใช้ HIPS ที่ผสมสารหน่วงไฟ (HIPS-FR) ให้สมบัติทนทานต่อการติดไฟดีเยี่ยมแม้ใช้เส้นใยปริมาณมาก แต่โดยรวมมีสมบัติเชิงกลต่ำกว่าคอมโพสิตที่ใช้ HIPS ที่ไม่ผสมสารหน่วงไฟ

กนิษฐา อังกุรรัชต์ [30] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของพอลิพรอพิลีนโดยใช้ขี้เลื่อยจากไม้เต็งนอกเป็นสารเสริมแรงโดยใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด A-172 (Vinyl-tris-(2-methoxyethoxy) silane) และมาเลอิกแอนไฮดรายด์กราฟต์พอลิพรอพิลีน (MAPP) เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้และการยึดเกาะกันของเมทริกซ์และส่วนเสริมแรง พบว่า สารคู่ควบทั้ง 2 ชนิด ช่วยทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงโค้งงอของคอมโพสิตเพิ่มขึ้น และการใช้สารคู่ควบไซเลน ให้สมบัติเชิงกลสูงกว่าการใช้ MAPP สำหรับการใช้สารคู่ควบทั้งสองชนิดร่วมกันช่วยปรับปรุงสมบัติด้านโค้งงอดีกว่าการใช้สารคู่ควบชนิดเดียว นอกจากนี้ การใช้สารคู่ควบผสมที่อัตราส่วน MAPP : Silane เท่ากับ 1:1 เหมาะสมที่สุด ส่วนสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตจากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นว่าการใช้สารคู่ควบสามารถปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัฏภาคทั้งสองที่แตกต่างกันได้

M.B.Fernanda และคณะ [31] ได้ศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยไม้ที่ได้จากเยื่อไม้ของต้นสน (Aspen) ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยสนกับเมทริกซ์ที่เป็นพอลิ-

พรอพิลีนหรือ MAPP นอกจากนี้ยังศึกษาภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการผสมเพื่อเตรียมพลาสติกคอมโพสิตโดยทำการผสม PP และเส้นใยสนที่อุณหภูมิต่าง ๆ คือ 170 180 และ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 และ 15 นาที ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที ทำการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยไม้ด้วยสารคู่ควบไซเลนโดยมีชนิดของสารคู่ควบไซเลน ปริมาณสารคู่ควบไซเลนและกระบวนการเคลือบบนพื้นผิวเมทริกซ์ของ PP หรือ MAPP ที่แตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิและเวลาในการผสมที่เหมาะสม คือ 180 องศาเซลเซียสและ 10 นาที ตามลำดับ ในขณะที่การปรับปรุงสภาพผิวเส้นใยไม้ด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด A-172 ในปริมาณ 4% โดยน้ำหนัก ที่เคลือบด้วย MAPP 2 %w/v และปริมาณเส้นใยไม้ที่ 10 % w/w ให้ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัส และค่าความทนทานต่อการโค้งงอสูงที่สุด

K.Rajeev และคณะ [32] ได้ศึกษาคอมโพสิตระหว่างไอโซแทกติกพอลิพรอพิลีนและเส้นใยปอกระเจา (Kenaf fiber)โดยใช้ MAPP เป็นสารช่วยผสมในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่และฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน นอกจากนี้ยังศึกษาคอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยสารละลาย Amino-ethyl-amino-propyltirmethoxysilane ในน้ำและทดสอบสมบัติเชิงกลต่าง ๆ จากผลงาน วิจัยพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ MAPP 2-5 % ทำให้ค่าสมบัติด้านแรงดึงและสมบัติด้านโค้งงอเพิ่มขึ้นแต่ความแข็งแรงกระแทกและความเหนียว (Toughness) ลดลง นอกจากนี้ สมบัติต่าง ๆ ของคอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน ที่ปริมาณเส้นใยเท่ากันเปรียบเทียบกับการใช้ MAPP นั้น พบว่าการใช้สารคู่ควบไซเลนให้ค่าสมบัติด้านแรงดึง สมบัติด้านโค้งงอ และความแข็งแรงกระแทกสูงกว่าการใช้ MAPP

P.W. Balasuriya และคณะ [33] ได้ศึกษาถึงวิธีการปรับปรุงพื้นผิวของคอมโพสิตระหว่าง HDPE และเศษไม้ (Wood flakes) ด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์ (MA) ผสมในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) และSilane (*N*-(4-vinylbenzyl)-N'-(3-trimethoxysilypropyl-ethyl)enediamine, CVBS) จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC และ FTIR สามารถพบโครงสร้างที่เกิดจาก HDPE และสารคู่ควบไซเลน ต่อกิ่งด้วยเส้นใยไม้ที่ตำแหน่งสเปกทรัม 1111 และ 1032 cm^{-1} เป็นโครงสร้างของพอลิไซลอกเซน และพบพีกที่ตำแหน่ง 1865, 1786, 1795-1775 cm^{-1} เป็นหมู่แอนไฮดรายด์ นอกจากนี้ที่ตำแหน่ง 1305 และ 1220 cm^{-1} ของ C-O Stretching ของ Cyclic anhydride ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างเส้นใยไม้และ PE จากผลของสมบัติเชิงกลแสดงว่าคอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนและ MA นั้นสามารถปรับปรุงความแข็งแรงดึง ความเหนียว และความแข็งแรงกระแทกแบบไอซอด โดยพบว่าการปรับปรุงพื้นผิวด้วย MA 1-2 % โดยน้ำหนักขี้เลื่อย และสารคู่ควบไซเลน 1-3 % โดยน้ำหนักขี้เลื่อย ให้สมบัติเชิงกลที่เหมาะสมที่สุด

A.C. Miller และ J.C. Berg [34] ได้ศึกษาถึงผลของสารคู่ควบไซเลนที่เคลือบบนเม็ดดูดซับที่เป็นแก้วที่มีการยึดติดกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ คือ Polyvinylbutyral โดยฝังเม็ดแก้วที่ปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนลงบนพอลิเมอร์ ซึ่งสารคู่ควบไซเลนแบ่งเป็นชนิดโมโนอัลคอกซีไซเลน (Monoalkoxy silane) ไดอัลคอกซีไซเลน (Dialkoxy silane) และไตรอัลคอกซีไซเลน (Trialkoxy

silane) จากการทดสอบพบว่าโมโนอัลคอกซีไซเลนมีสมบัติการ ยึดติดที่ผิวพอลิเมอร์ต่ำที่สุด ทำให้มีสมบัติทนต่อแรงกระแทกต่ำสุด ในขณะที่ไดอัลคอกซีไซเลนและไตรอัลคอกซีไซเลน มีการยึดติดที่แข็งแรงมากขึ้นตามลำดับ เนื่องจากมีพันธะที่แข็งแรงระหว่างวัฏภาคของพื้นผิวแก้วกับพอลิเมอร์เมทริกซ์มากขึ้น

K.L. Pickering และคณะ [35] ได้ศึกษาถึงผลของสารคู่ควบไซเลนที่มีต่อคอมโพสิตระหว่างเส้นใยต้นสนกับ PE ซึ่งสารคู่ควบไซเลนที่ใช้คือ แกมมา-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (γ-Aminopropyltrimethoxy silane) ซึ่งทำหน้าที่ปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใย โดยเปรียบเทียบเส้นใยที่ปรับปรุงด้วย 2 % NaOH ก่อนแล้วจึงปรับปรุงด้วยสารคู่ควบไซเลน กับเส้นใยที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบไซเลนอย่างเดียว จากผลของ X-ray photoelectron spectroscopy และ NMR ที่ใช้ศึกษาลักษณะของเส้นใยพบว่า เส้นใยที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบไซเลนอย่างเดียวให้สมบัติเชิงกลต่ำกว่าในขณะที่เส้นใยที่ปรับปรุงด้วย NaOH ก่อนให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่า เนื่องจาก NaOH ช่วยทำให้เกิดการเชื่อมต่อพันธะได้ดีกว่า

B.F. Abu-Sharkh และ H. Hamid [36] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลและความคงทนต่อสภาพอากาศของวัสดุคอมโพสิตระหว่างเส้นใยจากปาล์มกับ PP โดยใช้มาลิอิกแอนไฮดรายด์ เป็นสารช่วยผสม และใช้ Tinuvin เป็นสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนปริมาณ 0.5 % โดยน้ำหนัก การผสมทำโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว 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

N. Sombatsompop and K.Chaochanchaikul [37] ได้ศึกษาแรงบิด (Torque) ในการผสม สมบัติด้านแรงดึง แรงกระแทก และสมบัติด้านความร้อนของคอมโพสิตระหว่าง PVC และขี้เลื่อยโดยใช้สารคู่ควบไซเลน 3 ชนิด คือ KBM602 (*N*-2 (aminoethyl) 3-aminopropylmethyl dimethoxysilane) KBM603 (*N*-2 (aminoethyl) 3-aminopropyl trimethoxysilane) และ KBE603 (*N*-2 (aminoethyl) 3-aminopropyl triethoxysilane) การปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยทำได้โดยใช้สารคู่ควบไซเลนแต่ละชนิดปริมาณที่ใช้ คือ 0-2 %โดยน้ำหนักของขี้เลื่อย จากนั้นผสมขี้เลื่อยและ PVC คอมปาวด์ในเครื่องผสมชนิดความเร็วสูงเป็นเวลา 5 นาที และผสมต่อด้วยเครื่องผสมชนิดเกลียวหนอนคู่ โดยในการทดลองนี้ศึกษาปริมาณขี้เลื่อยที่ 9.1 % โดยน้ำหนัก และ 41.2 % โดยน้ำหนัก พบว่าแรงบิดในการผสมคอมโพสิตของขี้เลื่อยที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนมีค่าสูงกว่าคอมโพสิตของขี้เลื่อยที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนและแรงบิดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารคู่ควบไซเลนเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้น

อย่างชัดเจนในคอมโพสิตที่ใช้ขี้เลื่อย 41.2 % โดยน้ำหนัก แรงบิดที่เพิ่มขึ้น แสดงถึงการเกิดอันตรกิริยาระหว่างพื้นผิวของขี้เลื่อยและสารคู่ควบไซเลนนอกจากนี้สมบัติด้านความแข็งแรงดึงและมอดุลัสของคอมโพสิตมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณ สารคู่ควบไซเลนเพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดในช่วง 0.5-1 % โดยน้ำหนักของคอมโพสิตที่ใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด KBM 603 ให้สมบัติด้านแรงดึงสูงที่สุด ส่วน KBE 603 ให้สมบัติแรงกระแทกสูงสุดที่ สารคู่ควบไซเลนปริมาณ 1.5 % โดยน้ำหนัก สำหรับสมบัติทางความร้อนของ PVC ในคอมโพสิตพบว่า เมื่อปริมาณ Silane เพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของ PVC ไม่เปลี่ยนแปลง จากผลการทดลองแสดงว่าโครงสร้างและปริมาณของสารคู่ควบไซเลนที่ต่างกันมีผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต

บทที่ 3
การดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE โดยใช้ขี้เลื่อยไม้ยางพาราเป็นสารเสริมแรง ซึ่งเป็นงานต่อเนื่องจากงานวิจัยของจีราภรณ์ คำศรี [5] ที่ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE ซึ่งใช้อัตราส่วนในการผสม PVC 100: LDPE 10 20 30 40 และ 50 phr โดยศึกษาการใช้สารช่วยผสมเพื่อปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสม 3 ชนิด คือ CPE PA 20 และ Elvaloy ในปริมาณ 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนักของ LDPE พบว่าสารช่วยผสมชนิด PA 20 ปริมาณ 15 %โดยน้ำหนักของ LDPE ให้สมบัติเชิงกลโดยรวมสูงกว่าสารช่วยผสมชนิดอื่น นอกจากนี้ได้ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมซึ่งใช้อัตราส่วนในการผสม PVC 100: LDPE 10 และ 40 phr สารช่วยผสมชนิด PA 20 15 % โดยน้ำหนักของ LDPE ปริมาณขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ศึกษา 10 20 30 40 และ50 % โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม พบว่า คอมโพสิตของพอลิเมอร์ผสมอัตราส่วน PVC 100 : LDPE 10 phr ให้สมบัติที่ดีกว่าคอมโพสิตของพอลิเมอร์ผสมอัตราส่วน PVC 100 : LDPE 40 phr และการเติมขี้เลื่อยลงในพอลิเมอร์ผสมทำให้ความแข็งแรงดึง ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงโค้งงอและความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลง เนื่องจากความสามารถในการยึดเกาะกันระหว่างวัฏภาคของขี้เลื่อยกับเมทริกซ์ลดลง นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของปริมาณขี้เลื่อย ทำให้เกิดการกระจายตัวที่ไม่ดี บางส่วนมีการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน ทำให้เป็นบริเวณที่ไม่มีการยึดเกาะกับเมทริกซ์เกิดเป็นตำหนิในชิ้นงาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมอัตราส่วน PVC 100: LDPE 40 phr ใช้สารช่วยผสมชนิด PA 20 ปริมาณ 15 % โดยน้ำหนักของ LDPE ปริมาณขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ศึกษา 10 20 30 และ40 %โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมเนื่องจากให้สมบัติเชิงกลที่ต่ำกว่าอัตราส่วน PVC 100: LDPE 10 phr มาทำการปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้น โดยมีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้สารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) 2 ชนิด คือ ไซเลน A-137 และไซเลน A-1100 และสารช่วยผสมชนิดมาเลอิกแอนไฮดรายด์กราฟต์พอลิเอทิลีน (Maleic anhydride-*g*-polyethylene, MAPE) ชนิด Fusabond ® MB100D มีค่า MFI 2 g/10 min เพื่อช่วยปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างพื้นผิวเส้นใยกับเมทริกซ์ให้มีการยึดเกาะที่ดีขึ้นเพื่อเพิ่มสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิต

3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

1. พอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly(vinyl chloride)) : B0401 CLA จากบริษัทไทยพลาสติกและเคมีภัณฑ์ 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 จากบริษัทไทยพอลิเอทิลีน จำกัด มีสมบัติดังนี้

ตารางที่ 3.2 สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ*

สมบัติ	หน่วย	Test Method	LD1905F
อัตราการไหล (Melt flow rate)	g/10 min	ASTM D 1238	5.0
ความหนาแน่น (Density)	g/cm^3	ASTM D 1505	0.919
ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break)	kg/cm^2	ASTM D 638	MD: 210 TD : 170
ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)	%	ASTM D 638	MD: 200 TD : 720
มอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus)	kg/cm^2	ASTM D 790	2,100
ความแข็งผิวหน้า (Hardness)	-	ASTM D 2240	46
จุดหลอมเหลว (Melting point)	$^{\circ}C$	ASTM D 2117	110

* ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3. พอลิเมอร์ร่วมระหว่างเมทิลเมทาไครเลต และบิวทิลอะไครเลต (Methyl methacrylate-*co*-butyl acrylate) : PA 20 ของบริษัท Srithepthai, Co. Ltd

ตารางที่ 3.3 สมบัติของพอลิเมอร์ร่วมระหว่างเมทิลเมทาไครเลต และบิวทิลอะไครเลต (PA 20)*

สมบัติ	Test Method	PA 20
Aparent Specific Gravity (ASG)	JIS K6721	0.42 - 0.52
Particle Size Distribution (%)	Wet Sieve Methode	16 mesh
Specific Viscosity (η_{sp})	200 mg material in 50 ml Toluene	0.84 - 1.15
Thermal Stability	Geer Oven (190 ^{O}C)	Equal to STD

* ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

4. สารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent)

4.1 Silquest A-137 (Octyltriethoxysilane) ของบริษัท Sigma-aldrich, Co. Ltd

$$CH_3(CH_2)_7Si(OCH_2CH_3)_3$$

Molecular Weight 276.5 g/mol

ตารางที่ 3.4 สมบัติของ Silquest A-137

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

* ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

4.2 Silquest A-1100 (γ-Aminopropyltriethoxysilane) ของบริษัท Optimal Tech, Co. Ltd

$$H_2NCH_2CH_2CH_2Si(OCH_2CH_3)_3$$

Molecular Weight 221.37 g/mol

ตารางที่ 3.5 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 ^{O}C	ASTM D 93	0.946
Boiling Point at 760 mm Hg, ^{O}C	ASTM D 93	217
Refractive Index	ASTM D 93	1.420
Flash point, ^{O}C	ASTM D 93	96

* ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

5. มาเลอิกแอนไฮดรายด์กราฟต์พอลิเอทิลีน (Maleic anhydride-*g*-polyethylene, MAPE) : Fusabond ® MB100D ของบริษัท Chemical Innovation, Co. Ltd.

ตารางที่ 3.6 สมบัติของ Fusabond ® MB100D*

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

* ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

6. กรดอะซิติก (Acetic acid) ความเข้มข้น 1 %w/w : จากบริษัท Carlo Erba เกรดปฏิบัติการ

7. เมทานอล (Methanol) : จากบริษัท Lab scan เกรดปฏิบัติการ

8. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water : DI) :จากบริษัท BEC Thai Bangkok Equipment and chemical, Co. Ltd.

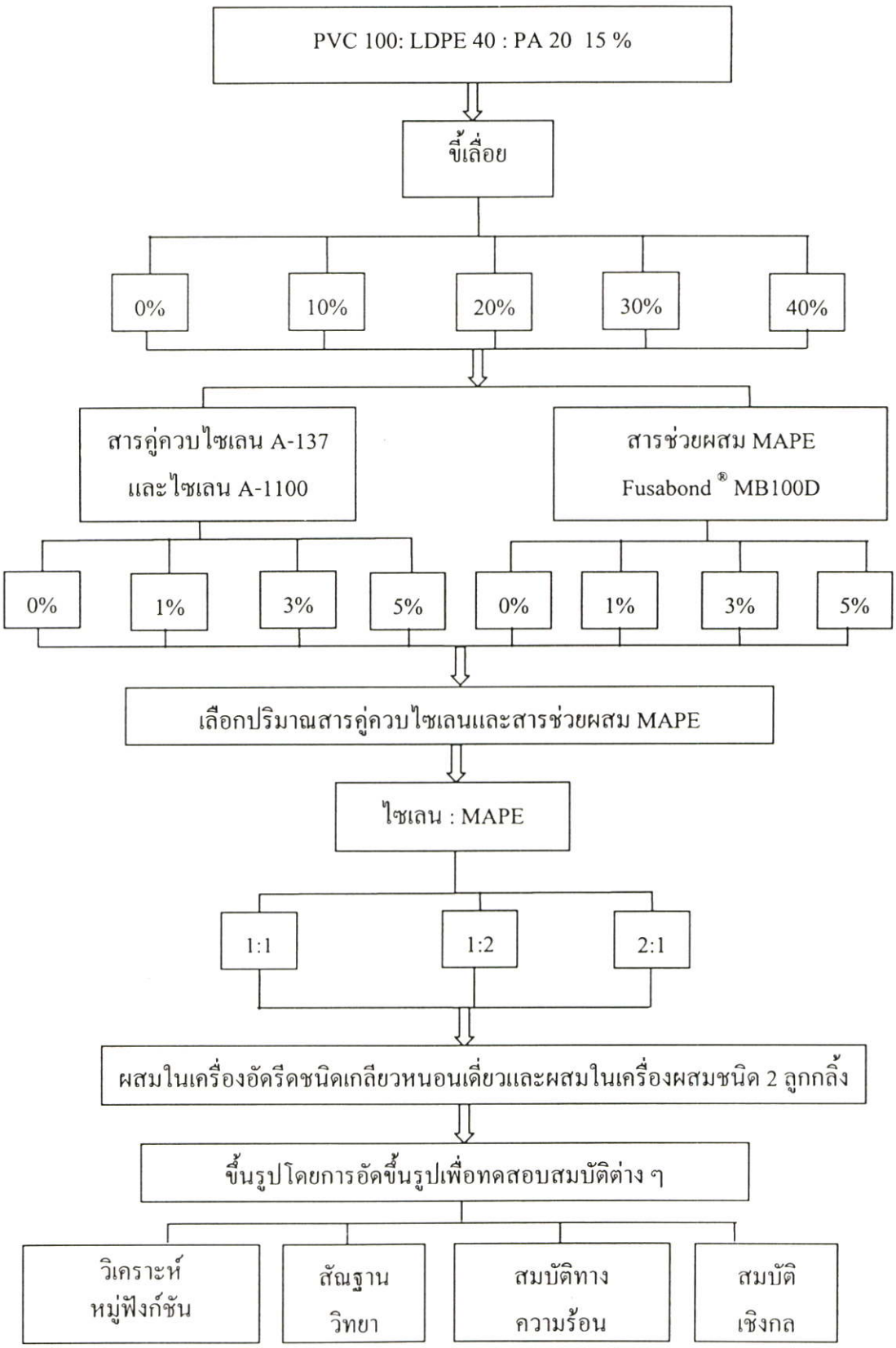
9. ขี้เลื่อยจากไม้ยางพารา (*Hevea brasiliensis*) : จากโรงทำเฟอร์นิเจอร์

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) : Thermo Haake Poly Drive
2. เครื่องบดพลาสติก (Grinder) : Bosco Engineering
3. เครื่องผสมชนิด 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll-mill) : LABTECH ENGINEERING รุ่น LRM 110
4. เครื่องขึ้นรูปแบบอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) :LABTECH ENGINEERING รุ่น LP 20
5. เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง (Universal testing mechine) : LLYOD INSTRUMENT LTD. รุ่น LR 5K
6. เครื่องทดสอบความแข็งแรงกระแทก (Izod impact tester) : บริษัท Yasuda Seiki Seisakusho รุ่น 258-PC IMPACT TESTER
7. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) : LEO รุ่น 1455 VP
8. เครื่องทดสอบทางความร้อน TGA (Thermogravimetric analyzer) : Parkin Elmer Instrument Co.,Ltd รุ่น Pyris I TGA HT
9. เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrophotometer, FTIR) : Perkin Elmer รุ่น FTIR Spectrum GX
10. เครื่องร่อนแยกขนาด
11. ตะแกรงมาตรฐานขนาด 50 และ 80 เมช
12. ตู้อบ
13. เกรียง
14. เครื่องชั่ง
15. ถุงมือกันความร้อน
16. เวอร์เนียร์
17. ไมโครมิเตอร์
18. เครื่องแก้วต่าง ๆ เช่น บีกเกอร์ หลอดหยดสาร แท่งแก้วคนสาร เป็นต้น

แผนการดำเนินงานสามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.1

แผนการดำเนินงาน



รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงานในงานวิจัยนี้

3.2 วิธีการทดลอง

3.3.1 คอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยสารคู่ควบไซเลน

3.3.1.1 การเตรียมขี้เลื่อย

1. นำขี้เลื่อยผ่านเครื่องแยกขนาดโดยใช้ตะแกรงขนาด 50 และ 80 เมช โดยสัมพันธ์กับความยาวในช่วง 180 ถึง 300 ไมครอน
2. นำขี้เลื่อยเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
3. ปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 หรือ A-1100 โดยการละลายในตัวทำละลาย โดยใช้สารคู่ควบไซเลนในปริมาณ 1 3 และ 5 % โดยน้ำหนักขี้เลื่อย

3.1 วิธีการเตรียมการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 ใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 ละลายในเมทานอลปริมาณ 100 % w/w โดยน้ำหนักสารคู่ควบไซเลนปั่นกวนด้วยความเร็วรอบ 2,000-3,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที

3.2 วิธีการเตรียมการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 ใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 ละลายใน 1% กรดอะซิติกที่อัตราส่วน 1:1 จากนั้น ละลายในน้ำปราศจากไอออน (Deionized water :DI) 100 % w/w โดยน้ำหนักสารคู่ควบไซเลน ปั่นกวนด้วยความเร็วรอบ 2,000- 3,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที

4. นำขี้เลื่อยที่ได้เข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง
5. นำขี้เลื่อยที่ได้ไปใช้ในการผสมและเตรียมคอมโพสิตต่อไป

3.3.1.2 ขั้นตอนการทำพอลิเมอร์คอมโพสิต

1. ผสมขี้เลื่อยที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวแล้วกับส่วนผสมต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ส่วนผสมต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำคอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยสารคู่ควบไซเลน

ปริมาณ					
PVC (phr)	LDPE (phr)	PA 20 (%/wt LDPE)	ขี้เลื่อย (%/wt PVC+LDPE)	ไซเลน A-137 (%/wt ขี้เลื่อย)	ไซเลน A-1100 (%/wt ขี้เลื่อย)
100	40	15	10	0,1,3,5 %	-
100	40	15	20	0,1,3,5 %	-
100	40	15	30	0,1,3,5 %	-
100	40	15	40	0,1,3,5 %	-

ตารางที่ 3.7 (ต่อ)

ปริมาณ					
PVC (phr)	LDPE (phr)	PA 20 (%/wt LDPE)	ขี้เลื่อย (%/wt PVC+LDPE)	ไซเลน A-137 (%/wt ขี้เลื่อย)	ไซเลน A-1100 (%/wt ขี้เลื่อย)
100	40	15	10	-	0,1,3,5 %
100	40	15	20	-	0,1,3,5 %
100	40	15	30	-	0,1,3,5 %
100	40	15	40	-	0,1,3,5 %

2. นำส่วนผสมทั้งหมดผสมในเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) โดยใช้อุณหภูมิ 170 180 190 และ190 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิในช่วงป้อนสาร (Feed section) ช่วงการส่งผ่านสาร (Transition section) และช่วงการผสมและแม่พิมพ์ (Metering section) ตามลำดับ ใช้ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที

3. นำของผสมที่ได้ไปบดด้วยเครื่องบด

4. นำของผสมที่บดแล้วมาผสมด้วยเครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll-mill) โดยใช้อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการผสม 10 นาที

5. นำไปขึ้นรูปโดยการอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) โดยใช้อุณหภูมิในการอัดร้อน 200 องศาเซลเซียส และความดัน 1,300 kg/cm^3 เป็นเวลา 8 นาที และใช้เวลาในการอัดเย็น 4 นาที

6. นำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้แก่

6.1. ทดสอบสมบัติเชิงกล

- ทดสอบสมบัติแรงดึง จะได้ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัส และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด
- ทดสอบสมบัติการโค้งงอ ได้ค่าความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอ
- ความแข็งแรงกระแทก

6.2. ศึกษาสมบัติทางความร้อน

- TGA

6.3. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของคอมโพสิตโดยใช้ FTIR

6.4. ศึกษาสัณฐานวิทยา

- SEM

7. เปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิตจากการใช้สารคู่ควบไซเลนทั้ง 2 ชนิด

3.3.2 คอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยสารช่วยผสม MAPE

3.3.2.1 การเตรียมขี้เลื่อย

1. นำขี้เลื่อยผ่านเครื่องแยกขนาดโดยใช้ตะแกรงขนาด 50 และ 80 เมช
2. นำขี้เลื่อยเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
3. ผสมขี้เลื่อยกับสารช่วยผสม MAPE ชนิด Fusabond ® MB100D ใช้ในปริมาณ 1 3 และ 5 % โดยน้ำหนักขี้เลื่อย โดยใช้เครื่องผสมความเร็วสูง (High-speed mixer) ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที
4. นำขี้เลื่อยที่ได้ไปใช้ในการผสมและเตรียมคอมโพสิตต่อไป

3.3.2.2 ขั้นตอนการทำพอลิเมอร์คอมโพสิต

1. ชั่งส่วนผสมต่าง ๆ ตามตารางที่ 3.8
2. ขั้นตอนการทำคอมโพสิตตามหัวข้อ 3.3.1.2 ในข้อ 2-5

ตารางที่ 3.8 ส่วนผสมต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำคอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยสารช่วยผสม MAPE

PVC (phr)	LDPE (phr)	PA 20 (%/wt LDPE)	ขี้เลื่อย (%/wt PVC+LDPE)	MAPE (%/wt ขี้เลื่อย)
100	40	15	10	0,1,3,5 %
100	40	15	20	0,1,3,5 %
100	40	15	30	0,1,3,5 %
100	40	15	40	0,1,3,5 %

3. ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ตามหัวข้อ 3.3.1.2 ในข้อ 6
4. เปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิตจากการใช้สารช่วยผสม MAPE กับสารคู่ควบไซเลน
5. ศึกษาสมบัติต่าง ๆ โดยการเปรียบเทียบสูตรผสมต่าง ๆ คือ
   - ศึกษาสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วย MAPE เปรียบเทียบกับที่ใช้สารคู่ควบไซเลนปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยในข้อ 3.3.1

3.3.3 คอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยสารคู่ควบผสม

1. ปรับปรุงพื้นผิวขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบไซเลน ตามหัวข้อ 3.3.1.1 โดยใช้ปริมาณสารคู่ควบที่เหมาะสมที่ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด
2. ชั่งสารต่าง ๆ ตามตารางที่ 3.9 และ 3.10

ตารางที่ 3.9 สูตรผสมต่าง ๆ ที่ใช้ในคอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสม

ปริมาณ							
PVC (phr)	LDPE (phr)	PA 20 (%/wt LDPE)	ไซเลน A-137 (%/wt ขี้เลื่อย)	ไซเลน A-1100 (%/wt ขี้เลื่อย)	MAPE (%/wt ขี้เลื่อย)	ขี้เลื่อย (%/wt PVC+LDPE)	สัดส่วน ไซเลน: MAPE
100	40	15	(3)*	-	(3)***	10,20,30,40 %	1: 1
100	40	15	(3)*	-	(3)***	10,20,30,40 %	1: 2
100	40	15	(3)*	-	(3)***	10,20,30,40 %	2: 1
100	40	15	-	(3)**	(3)***	10,20,30,40 %	1: 1
100	40	15	-	(3)**	(3)***	10,20,30,40 %	1: 2
100	40	15	-	(3)**	(3)***	10,20,30,40 %	2: 1

หมายเหตุ * คือ ปริมาณสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 ที่ให้สมบัติโดยรวมดีที่สุด

** คือ ปริมาณสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 ที่ให้สมบัติโดยรวมดีที่สุด

*** คือ ปริมาณสารช่วยผสม MAPE ที่ให้สมบัติโดยรวมดีที่สุด

3. ขั้นตอนการทำคอมโพสิตตามหัวข้อ 3.3.1.2 ในข้อ 2-5
4. ทดสอบสมบัติต่าง ๆ ตามหัวข้อ 3.3.1.2 ในข้อ 6
5. เปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิตจากการใช้สารคู่ควบผสม

3.4 วิธีการทดสอบ

สมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิตได้ทำการทดสอบตามมาตรฐานต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 มาตรฐานต่าง ๆ ในการทดสอบพอลิเมอร์คอมโพสิต

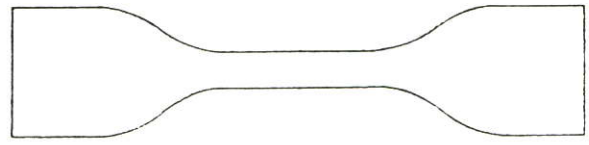
สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยที่รายงาน
ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)	ASTM D 638	MPa
มอดุลัส การดึง (Tensile Modulus)	ASTM D 638	MPa
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break)	ASTM D 638	%
ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength)	ASTM D 256	kJ/m^2
ความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength)	ASTM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

3.4.1 สมบัติเชิงกล

3.4.1.1 ความแข็งแรงดึง มอดุลัส และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด

การทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เป็นไปดังมาตรฐาน ASTM D638 [38] ใช้เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal testing machine) และโปรแกรม WINDAP ในการคำนวณ ชิ้นงานตัวอย่างอยู่ในรูปดัมเบลล์ดังรูปที่ 3.2 ใช้ชิ้นงานตัวอย่าง 10 ชิ้นในแต่ละสูตรและใช้ภาวะในการทดสอบดังนี้

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



รูปที่ 3.2 ลักษณะชิ้นงานดัมเบลล์ที่นำมาทดสอบ [38]

ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัส และค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength, σ) $= \dfrac{F_1}{A}$

ค่ามอดุลัส (Tensile modulus, E) $= \dfrac{((F_3/A)-(F_2/A))}{1/100}$

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

เมื่อ F_1 คือแรงที่ใช้ในการดึงยืดชิ้นงานตัวอย่าง ณ จุดสูงสุด (หน่วยเป็นนิวตัน ; N)

F_2 และ F_3 คือแรงที่ใช้ในการดึงยืดชิ้นงานตัวอย่างที่ 2 และ 3 % ความเครียด (N)

A คือพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (หน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร ; mm^2)

l คือระยะห่างระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงชิ้นงานตัวอย่าง ณ จุดขาด (หน่วยเป็นมิลลิเมตร ; mm)

l_0 คือระยะที่ชิ้นงานตัวอย่างแคบที่สุดและมีพื้นที่หน้าตัดขนานกัน (Gauge length หน่วยเป็นมิลลิเมตร ; mm)

3.4.1.2 ความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอ

การทดสอบหาค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) และมอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus) เป็นไปดังมาตรฐาน ASTM D790 [39] โดยการทดสอบแต่ละครั้งใช้ชิ้นงานตัวอย่าง 10 ชิ้น รูปที่ 3.3 เป็นภาพการทดสอบความแข็งแรงโค้งงอ สภาวะที่ใช้ในการทดสอบเป็นดังนี้

-โหลดเซลล์ (Load)	5	กิโลนิวตัน (kN)
-ความเร็วในการกด (Compression speed)	5	มิลลิเมตร/นาที
-ระยะห่างของขารองรับชิ้นงาน (Span length)	40	มิลลิเมตร

-Grammage	1.0	กรัม/ตารางเมตร
-ระดับเซลล์ (Cell class)	0.5	

สูตรที่ใช้ในการคำนวณค่าความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอมีดังนี้

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

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

เมื่อ F คือ แรงกดสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานโค้งงอ (หน่วยเป็นนิวตัน ; N)

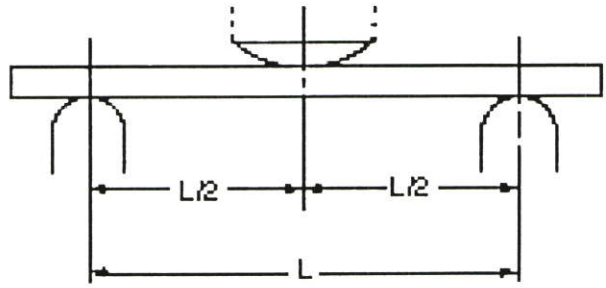
L คือ Span length (หน่วยเป็นมิลลิเมตร ; mm)

b คือ ความกว้างของตัวอย่าง (หน่วยเป็นมิลลิเมตร ; mm)

h คือ ความหนาของตัวอย่าง (หน่วยเป็นมิลลิเมตร ; mm)

ΔF คือ ผลต่างของแรงกด ณ จุดเริ่มต้นถึงแรงกดที่ 20 N ในช่วงความชันเป็นเส้นตรง (หน่วยเป็นนิวตัน ; N)

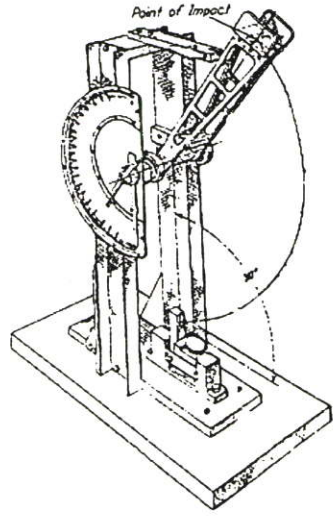
Δd คือ ระยะกดโค้งงอในช่วงแรงกด 0-20 N (หน่วยเป็นมิลลิเมตร ; mm)



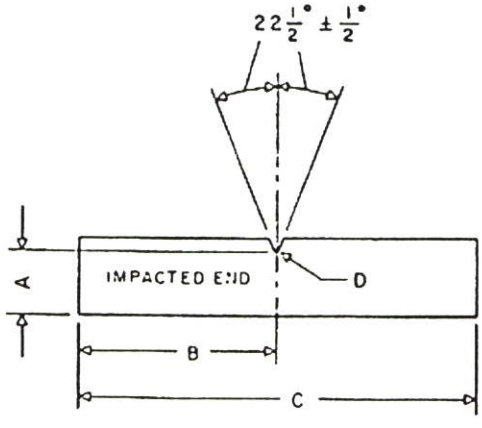
รูปที่ 3.3 การทดสอบความแข็งแรงโค้งงอ [39]

3.4.1.3 ความแข็งแรงกระแทก

การทดสอบความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) เป็นไปดังมาตรฐาน ASTM D256 [40] โดยในการทดสอบจะใช้มาตรฐานแบบไอซอด (Izod type) ใช้ชิ้นงานตัวอย่าง 10 ชิ้นในแต่ละสูตร รูปที่ 3.4 แสดงเครื่องมือ Izod impact ที่ใช้ในการทดสอบและรูปที่ 3.5 แสดงชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.4 เครื่องมือทดสอบความแข็งแรงกระแทกแบบไอซอด [40]



รูปที่ 3.5 ชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงกระแทก [40]

โดย A แสดงความยาว 10.16 ± 0.05 มิลลิเมตร

B แสดงความยาว 31.5 - 32.00 มิลลิเมตร

C แสดงความยาว 60.30 – 63.50 มิลลิเมตร

D แสดงมุมรูปตัว V เท่ากับ $22.5^{\circ} \pm 0.5^{\circ}$

ค่าความแข็งแรงกระแทกสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

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

เมื่อ IS คือ ค่าความแข็งแรงกระแทก (หน่วยเป็นกิโลจูลต่อตารางเมตร ; kJ/m^2)

W คือ ค่าพลังงานกระแทก (หน่วยเป็นกิโลจูล ; kJ)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (ตารางเมตร ; m^2)

3.4.2 อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

การทดสอบทำได้โดยนำสารตัวอย่างที่ผ่านการผสมด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยว แล้วบดด้วยเครื่องบดหยาบ นำไปแช่ในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) ประมาณ 10 นาที จากนั้นบดละเอียดต่อไปด้วยเครื่องบดความเร็วสูง (14000 รอบต่อนาที) ทำให้ได้สารตัวอย่างที่มีขนาดอนุภาคเล็กผ่านตะแกรงร่อนขนาด 0.025 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปบดกับ KBr วิเคราะห์ด้วยเครื่องอินฟราเรด-สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ในช่วงเลขคลื่น 4000-400 cm^{-1} resolution เท่ากับ 4 และจำนวนรอบของการ scan เท่ากับ 16

3.4.3 สัณฐานวิทยา

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ใช้นำมาศึกษาลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ที่แตกหักที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) การเตรียมตัวอย่างทำได้โดยนำชิ้นงานตัวอย่างมาแช่ในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) และทำการหักทันที หลังจากนั้นนำมาเคลือบด้วยทองและนำเข้าเครื่อง SEM ต่อไป โดยจะทำการศึกษาการกระจายตัวของเส้นใยและศึกษาการยึดติดระหว่างเส้นใยไม้กับพอลิเมอร์

3.4.4 สมบัติทางความร้อน

3.4.4.1 Thermogravimatric Analysis (TGA)

เป็นการศึกษาสมบัติทางความร้อนและอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมและคอมโพสิต ซึ่งจะเป็นการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจนชิ้นงานเกิดการเสียสภาพ โดยศึกษาอุณหภูมิเทียบกับน้ำหนักที่หายไป ภาวะที่ใช้ในการทดสอบ คือ อัตราการให้ความร้อน 10 ^{0}C/นาที ในช่วงอุณหภูมิ 50-600 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจน

3.4.4.2 Dynamic Mechanical Analyzer (DMA)

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

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

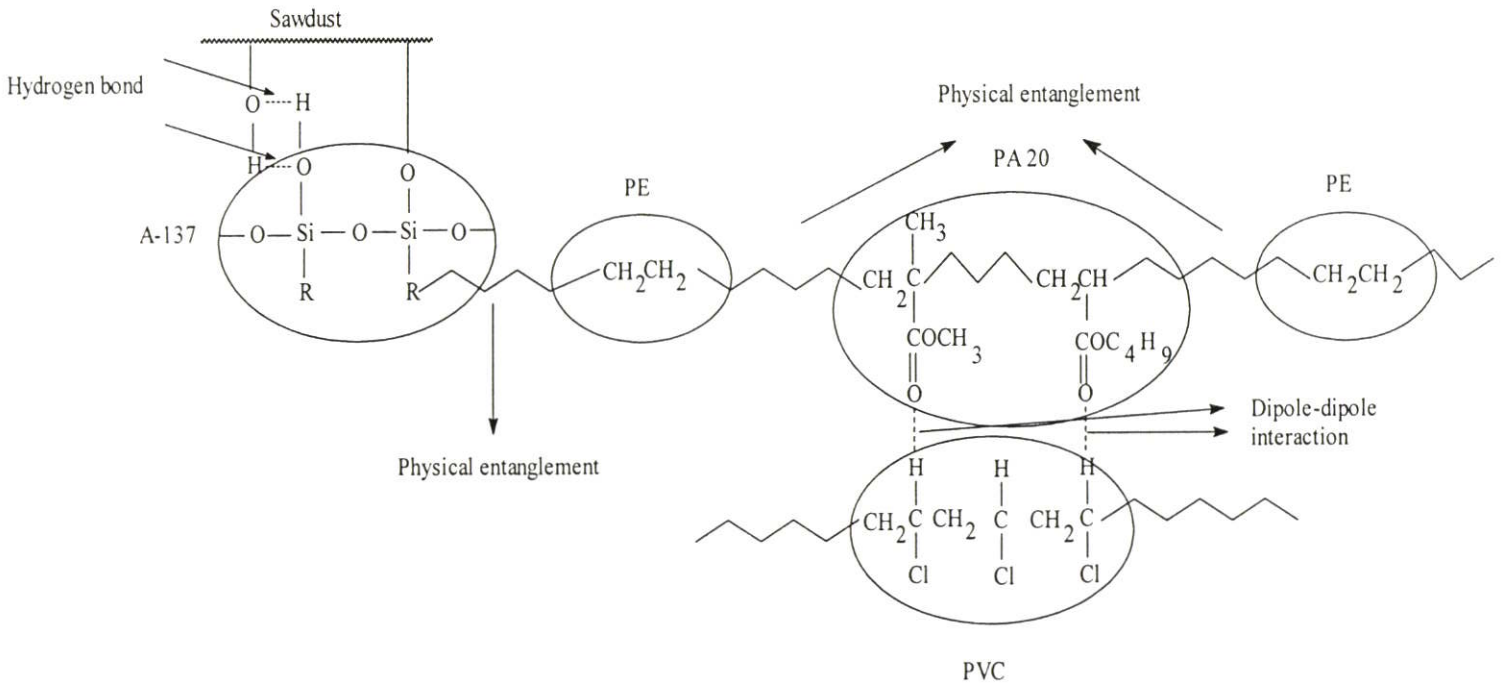
งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสม PVC และ LDPE โดยใช้ขี้เลื่อยไม้ยางพาราเป็นสารเสริมแรง ซึ่งเป็นงานต่อเนื่องจากงานวิจัยของจีราภรณ์ คำศรี [5] ที่ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE ซึ่งใช้อัตราส่วนในการผสม PVC 100 : LDPE 10 20 30 40 และ 50 phr โดยศึกษาการใช้สารช่วยผสมเพื่อปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสม 3 ชนิด คือ CPE PA 20 และ Elvaloy ในปริมาณ 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนักของ LDPE พบว่าสารช่วยผสมชนิด PA 20 ปริมาณ 15 % โดยน้ำหนักของ LDPE ให้สมบัติเชิงกลโดยรวมสูงกว่าสารช่วยผสมชนิดอื่น นอกจากนี้ได้ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมเสริมแรงโดยใช้ขี้เลื่อยไม้ยางพารา ซึ่งใช้อัตราส่วนในการผสม PVC 100 : LDPE 10 และ 40 phr สารช่วยผสมชนิด PA 20 15% โดยน้ำหนักของ LDPE ปริมาณขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ศึกษา 10 20 30 40 และ 50 % โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม พบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตของพอลิเมอร์ผสมอัตราส่วน PVC 100: LDPE 10 phr ให้สมบัติที่ดีกว่าพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วน PVC 100: LDPE 40 phr และการเติมขี้เลื่อยลงใน พอลิเมอร์ผสมทำให้ความแข็งแรงดึง ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงโค้งงอ และความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลง เนื่องจากความสามารถในการยึดเกาะกันระหว่างวัฏภาคของขี้เลื่อยกับเมทริกซ์แย่ลง นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของปริมาณขี้เลื่อยทำให้เกิดการกระจายตัวที่ไม่ดี บางส่วนมีการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน ทำให้เป็นบริเวณที่ไม่มีการยึดเกาะกับเมทริกซ์เกิดเป็นตำหนิในชิ้นงาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน PVC 100: LDPE 40 phr เนื่องจากให้สมบัติที่ต่ำกว่าการใช้พอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วน PVC 100: LDPE 10 phr และเพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการในการลดปริมาณขยะพลาสติก โดยใช้สารช่วยผสมชนิด PA 20 ปริมาณ 15 % โดยน้ำหนักของ LDPE ปริมาณขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ศึกษาคือ 10 20 30 และ 40 % โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม โดยมีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้สารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) 2 ชนิด คือ ไซเลน A-137 (Octyltriethoxysilane) และไซเลน A-1100 (γ-Aminopropyltriethoxysilane) และสารช่วยผสมชนิดมาเลอิกแอนไฮดรายด์กราฟท์พอลิเอทิลีน (Maleic anhydride-*g*-polyethylene, MAPE) คือ Fusabond ®MB100D มีค่า MFI 2 g/10 min นอกจากนี้ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้สารคู่ควบผสมระหว่างสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 กับสารช่วยผสม MAPE และสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 กับสารช่วยผสม MAPE ซึ่งให้ผลการทดลองดังต่อไปนี้ โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นได้ระหว่างพอลิเมอร์คอมโพสิตและสารคู่ควบได้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งกลไกที่คาดว่าน่าจะเกิดขึ้นในการใช้

สารช่วยผสมชนิด PA 20 พบว่าจากโครงสร้างของ PA 20 ประกอบด้วยพอลิเมทิลเมทาไครเลตและบิวทิลอะไครเลต จะสามารถเกิดอันตรกิริยากับ PVC ได้โดยใช้สมบัติความมีขั้วของหมู่อะไครเลต ส่วน LDPE เกิดการเกี่ยวพันกับ CH_2 ที่มีอยู่ในโครงสร้าง [5]

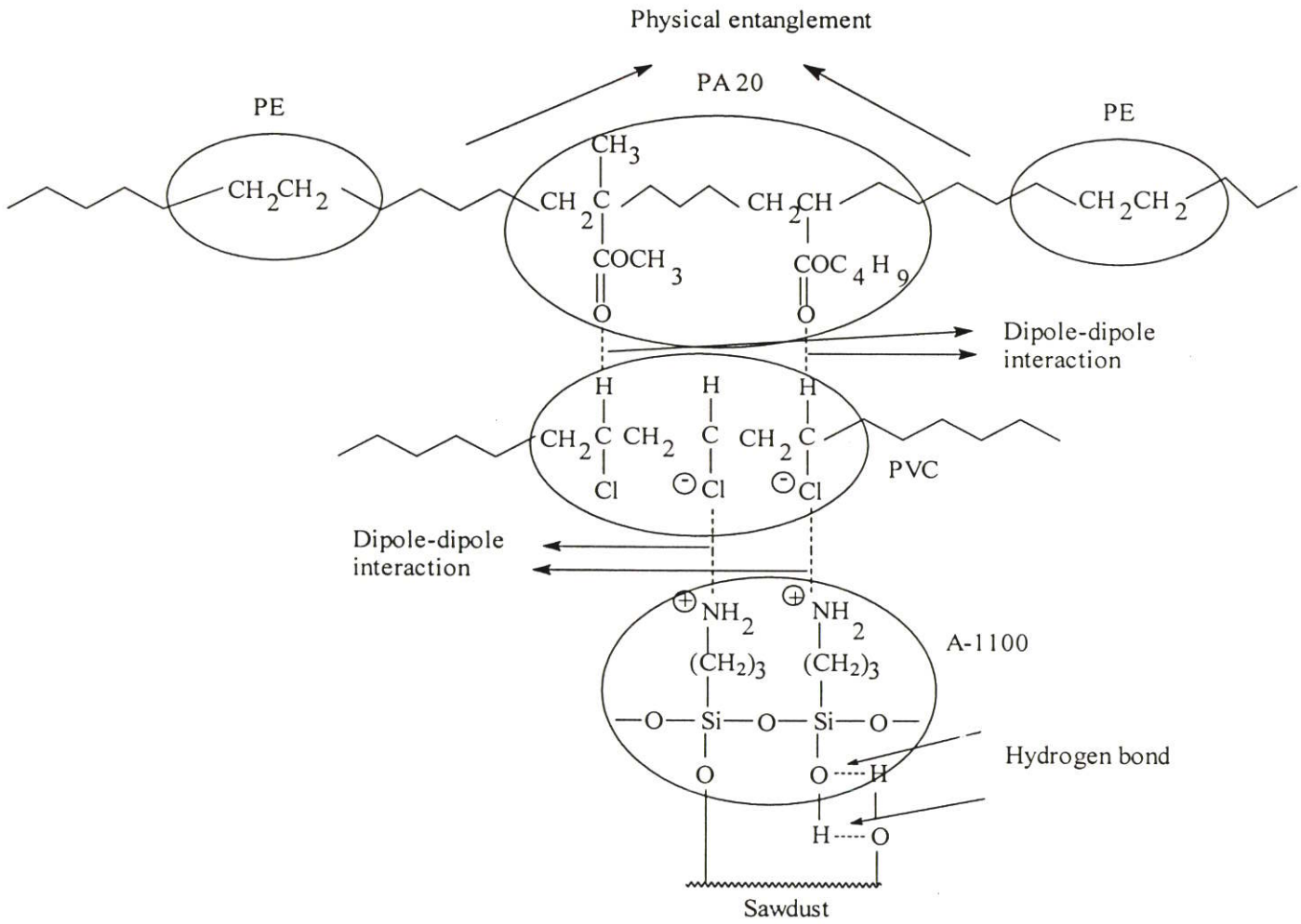
จากรูปที่ 4.1 (ก) เป็นกลไกที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 จะเห็นได้ว่า สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 เป็นสารคู่ควบไซเลนชนิดไฮโดรคาร์บอนไซเลน ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่ไม่มีขั้วซึ่งมีโครงสร้างเป็นไฮโดรคาร์บอน สามารถที่จะไปเกิดการเกี่ยวพันกับสายโซ่ (Chain entanglement) ของพอลิเอทิลีนในพอลิเมอร์ผสม และส่วนที่มีขั้วซึ่งมีโครงสร้างเป็น $(-Si-OCH_2CH_3)_3$ สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่หมู่เอทอกซี $(-OCH_2CH_3)$ ได้เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีหมู่ไซลานอล 3 หมู่ $(-SiOH)$ สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของขี้เลื่อยได้

สำหรับรูปที่ 4.1 (ข) เป็นกลไกที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 จะเห็นได้ว่า สารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 เป็นสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโนไซเลน โครงสร้างของสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 ประกอบด้วยส่วนที่มีขั้วทั้ง 2 ส่วน คือ คือ มีโครงสร้างเป็นหมู่อะมิโน สามารถเกิดการยึดกันโดยความมีขั้ว (Dipole-dipole interaction) กับพอลิไวนิลคลอไรด์ในพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากสภาพขั้ว และหมู่ $(-Si-OCH_2CH_3)_3$ โดยหมู่เอทอกซี $(-OCH_2CH_3)$ สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีหมู่ไซลานอล 3 หมู่ $(-SiOH)$ สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของขี้เลื่อยได้

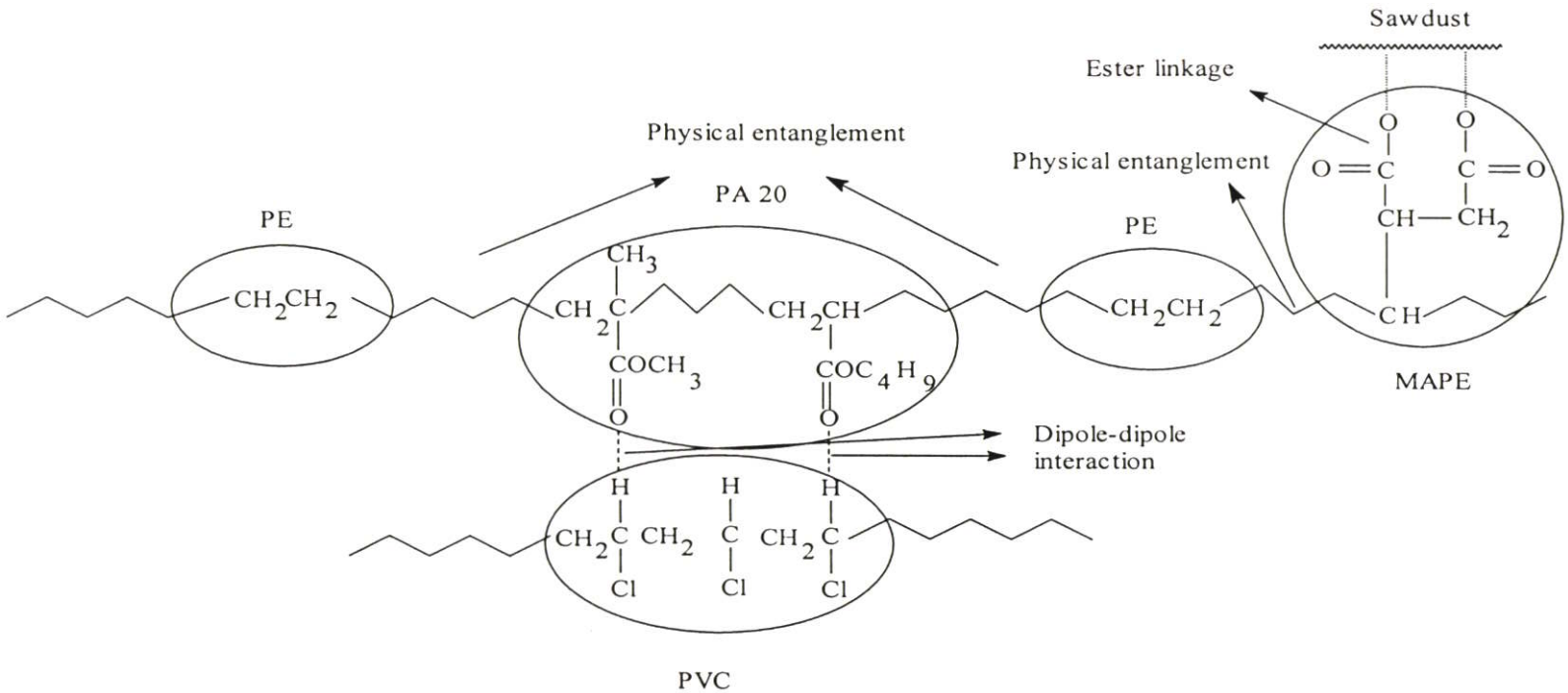
และสำหรับรูปที่ 4.1 (ค) เป็นกลไกที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารช่วยผสม MAPE ซึ่งสารช่วยผสม MAPE ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ มาเลอิกแอนไฮดรายด์ ซึ่งเป็นส่วนที่มีขั้วสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของขี้เลื่อยเกิดเป็นพันธะเอสเทอร์ (Ester linkages) บริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาค และมีสายโซ่พอลิเอทิลีนที่เป็นส่วนที่ไม่มีขั้ว ซึ่งมีโครงสร้างเหมือนกับพอลิเอทิลีนในพอลิเมอร์ผสม ทำให้สามารถเกิดการเกี่ยวพันกันระหว่างสายโซ่ (Chain entanglement) กับสายโซ่พอลิเอทิลีนในพอลิเมอร์ผสม [41] ช่วยเพิ่มความแข็งแรงบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์คอมโพสิต ส่วนความสัมพันธ์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นได้ระหว่างพอลิเมอร์คอมโพสิตและสารคู่ควบผสมแสดงได้ดังรูปที่ 4.2


Sawdust
Hydrogen bond
A-137
PE
Physical entanglement
PA 20
Physical entanglement
PE
Dipole-dipole
interaction
PVC

(ก)

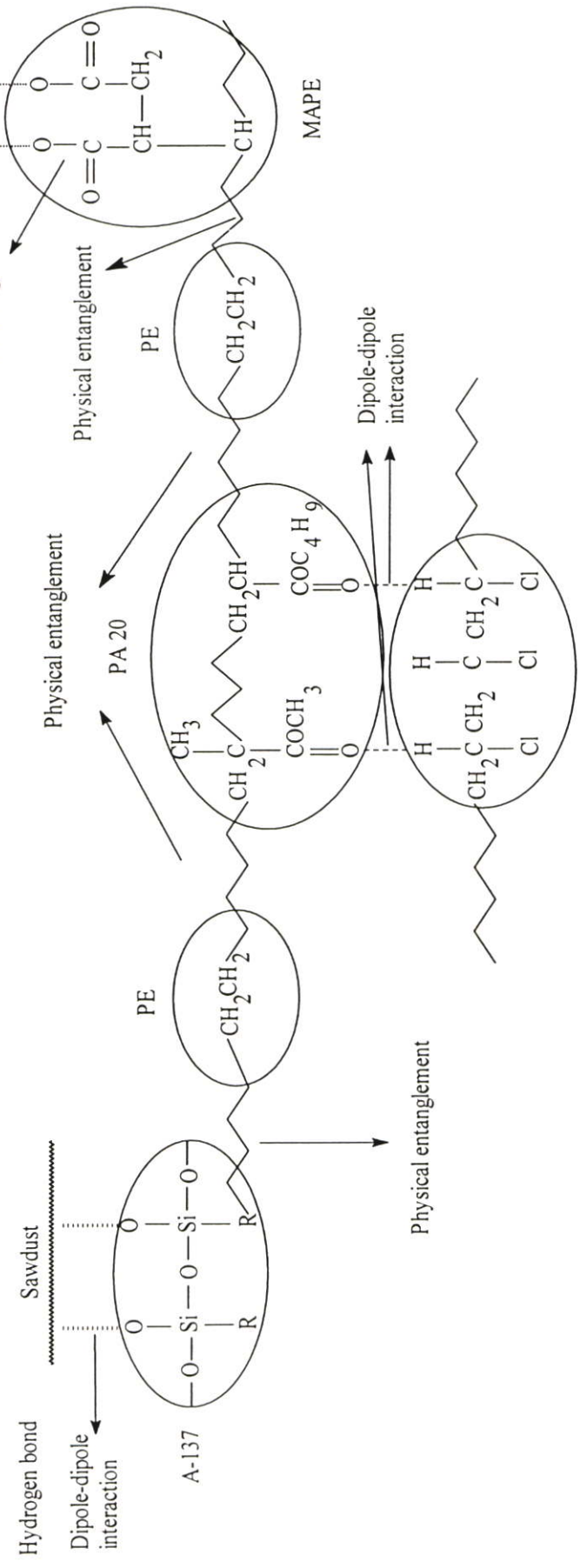

Physical entanglement
PA 20
PE
PE
Dipole-dipole interaction
PVC
Dipole-dipole interaction
A-1100
Hydrogen bond
Sawdust

(ข)

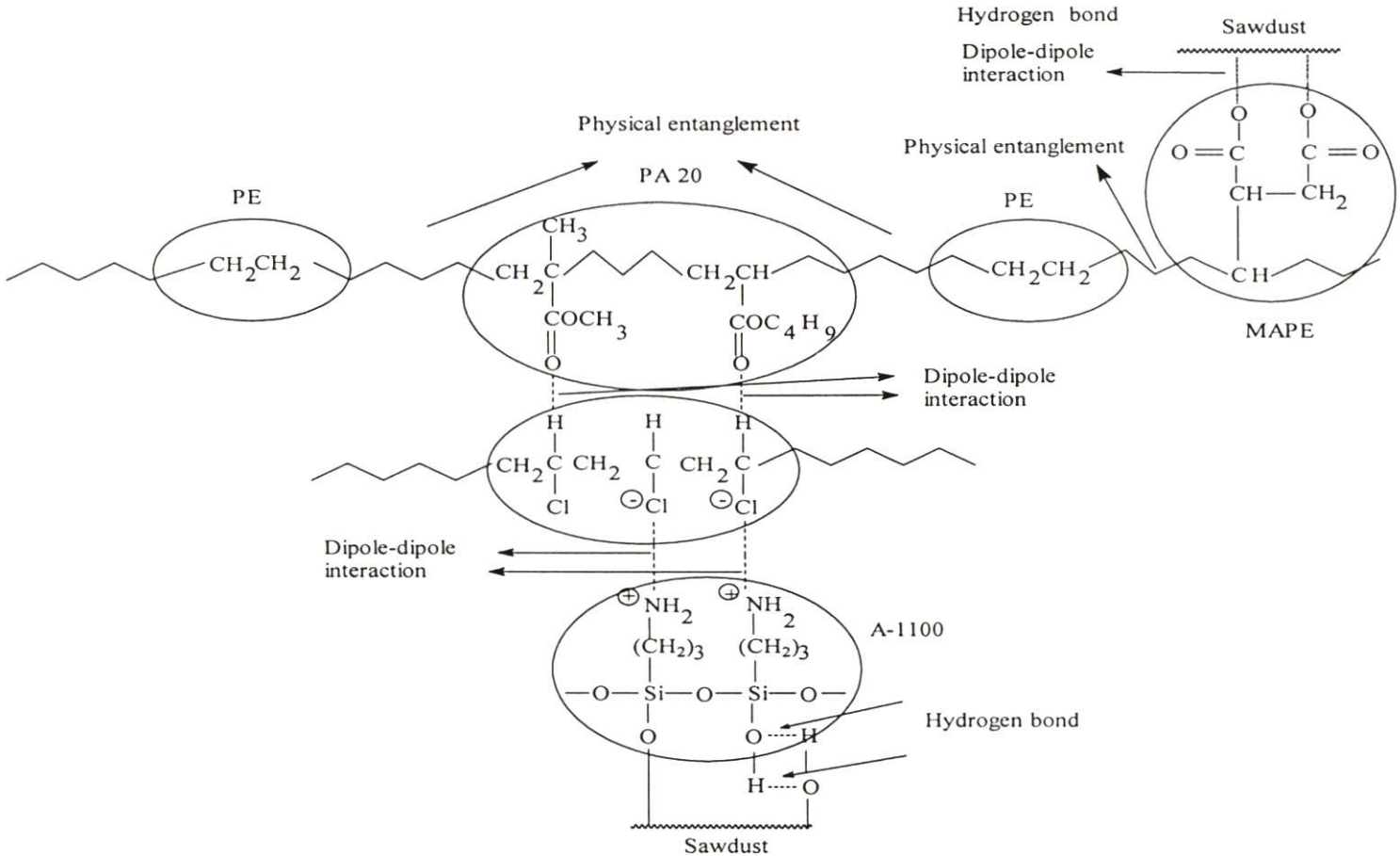


(ค)

รูปที่ 4.1 กลไกของปฏิกิริยาและอันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างพอลิเมอร์คอมโพสิต PVC 100: LDPE 40: PA 20: SD และสารคู่ควบ 3 ชนิด คือ (ก) สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 (ข) สารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 และ (ค) สารช่วยผสม MAPE


Sawdust
Hydrogen bond
Dipole-dipole interaction
A-137
Sawdust
Ester linkage
MAPE
Physical entanglement
PE
PA 20
Physical entanglement
Dipole-dipole interaction
PE
PVC
Physical entanglement

(f)



(ข)

รูปที่ 4.2 กลไกของปฏิกิริยาและอันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างพอลิเมอร์คอมโพสิต PVC 100 : LDPE 40 :PA 20 : SD และสารคู่ควบผสม (ก) สารคู่ควบผสมไซเลน A-137: MAPE และ (ข) สารคู่ควบผสมไซเลน A-1100: MAPE

จากรูปที่ 4.2 (ก) เป็นกลไกที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมไซเลน A-137: MAPE จะเห็นได้ว่า สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 สามารถเกิดการเกี่ยวพัน (Chain entanglement) กับพอลิเอทิลีนในพอลิเมอร์ผสม และมีหมู่ไซลานอล 3 หมู่ (-Si̤OH) สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของขี้เลื่อยได้ และในส่วนของสารช่วยผสม MAPE มีมาเลอิกแอนไฮดรายด์ ซึ่งเป็นส่วนที่มีขั้วสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของขี้เลื่อยเกิดเป็นพันธะเอสเทอร์ (Ester linkages) และมีสายโซ่พอลิเอทิลีนที่เป็นส่วนที่ไม่มีขั้ว ซึ่งมีโครงสร้างคล้ายกับพอลิเอทิลีนในพอลิเมอร์ผสม ทำให้สามารถเกิดการเกี่ยวพันกันระหว่างสายโซ่ (Chain entanglement) กับพอลิเอทิลีนในพอลิเมอร์ผสม

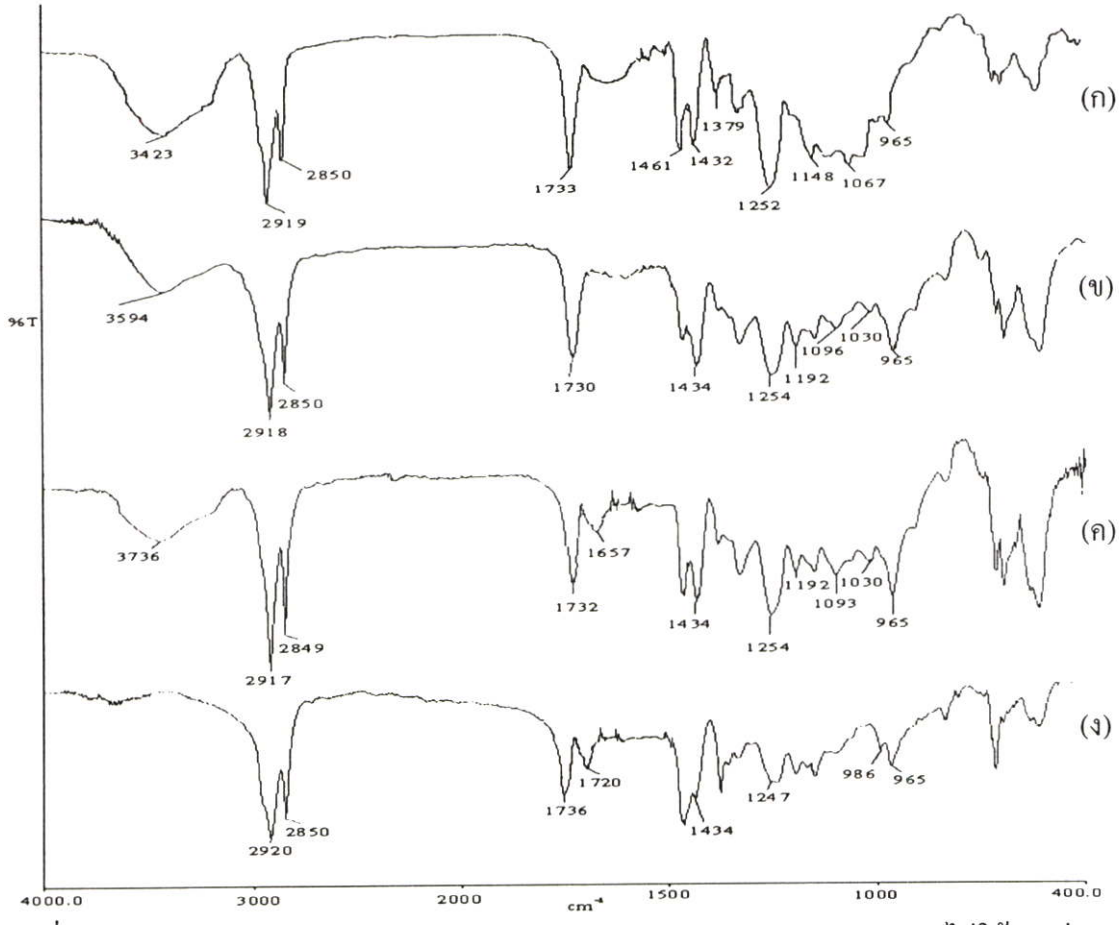
จากรูปที่ 4.2 (ข) เป็นกลไกที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมไซเลน A-1100: MAPE พบว่าสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 สามารถเกิดการยึดกันโดยความมีขั้ว (Dipole-dipole interaction) กับสายโซ่พอลิไวนิลคลอไรด์ของพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากสภาพขั้ว และมีหมู่ไซลานอล 3 หมู่ (-Si̤OH) สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของขี้เลื่อย ในส่วนของสารช่วยผสม MAPE จะเกิดเป็นพันธะเอสเทอร์ (Ester linkages) กับขี้เลื่อย และเกิดการเกี่ยวพันกันระหว่างสายโซ่ (Chain entanglement) กับสายโซ่พอลิเอทิลีนในพอลิเมอร์ผสม แต่เนื่องจากในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [5] ซึ่งอธิบายได้ว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE ไม่เกิดการต่อกิ่ง (Graft) หรือไม่เกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างพอลิเมอร์ผสม โดย LDPE จะห่อหุ้ม PVC ไว้ ทำให้โอกาสที่สารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยากับ PVC มีโอกาสเกิดปฏิกิริยาได้น้อยกว่าการใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยากับ LDPE

4.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีบนพื้นผิวคอมโพสิตทำได้โดยการใช้เครื่อง FTIR (Fourier transform infrared spectrophotometer) โดยพิจารณาจากพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ 3 ชนิด ที่ร้อยละต่อน้ำหนักขี้เลื่อยเท่ากัน และพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบผสม ที่สัดส่วนต่าง ๆ กัน เปรียบเทียบกับพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวขี้เลื่อย

4.1.1 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบ

จากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบ 3 ชนิด คือ สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 สารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 และสารช่วยผสม MAPE โดยศึกษาที่อัตราส่วน PVC 100 phr : LDPE 40 phr : PA 20 15 %โดยน้ำหนักของ LDPE : ขี้เลื่อย 30 โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม : สารคู่ควบ 3 % โดยน้ำหนักของขี้เลื่อย ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 อินฟราเรดสเปกทราของ PVC 100: LDPE 40: PA 20 15: SD 30 (ก) ไม่ใช้สารคู่ควบ (ข) ใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 (3%) (ค) ใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 (3%) และ (ง) ใช้สารช่วยผสม MAPE (3%)

จากรูปที่ 4.3 แสดงสเปกทรัมของร้อยละการส่งผ่านแสงของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 สารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 และสารช่วยผสม MAPE และไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบ จากสเปกทรัมในรูปพบพีกอินฟราเรดสเปกทรัมช่วง 3100-2600 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบ CH-stretching ของ CH_2 และ/หรือ CH_3 ของสายโซ่พอลิเอทิลีน แถบพีกช่วง 1400-1300 cm^{-1} เป็นลักษณะการเปลี่ยนรูป (Deformation) ของ CH_2 และ/หรือ CH_3 ของ พอลิเอทิลีนและเส้นใยไม้ ลักษณะพีกกว้างในช่วง 1700-1750 cm^{-1} ซึ่งเป็นลักษณะการสั่นแบบ C=O Stretching ของคาร์บอนิลซึ่งมีอยู่ในโครงสร้างของเส้นใยไม้ นอกจากนี้ยังมีพีกการยืดตัวของวงแหวนอะโรมาติกซึ่งมีอยู่ในโครงสร้างของลิกนินที่มีอยู่ในเส้นใยไม้เป็นพีกใหญ่ในช่วง 1650-1450 cm^{-1} ส่วนการสั่นแบบ O-H Stretching พบในช่วง 3450 – 3500 cm^{-1} ซึ่งมีอยู่ในโครงสร้างของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินที่มีอยู่ในเนื้อไม้ สำหรับ พอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวขี้เลื่อยด้วย สารคู่ควบไซเลน จากรูปที่ 4.3 (ข)-(ค) พบพีกสำคัญที่ 3600-3700 cm^{-1} และ 1020-1030 cm^{-1} [42] เป็นตำแหน่งของพีกเกิดจากการ

เชื่อมโยงระหว่างหมู่ไซลอกเซนของสารคู่ควบไซเลนและเซลลูโลสของขี้เลื่อย (-Si-OH) พีกที่ประมาณ 1192 cm^{-1} เป็นตำแหน่งของพอลิไซลอกเซน (-Si-O-Si-) และ -Si-O-C_{wood} [43] สอดคล้องกับความสัมพันธ์ที่คาดว่าเกิดขึ้นเมื่อมีการใช้สารคู่ควบไซเลน โดยพบพีกที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ของหมู่เอทอกซี (-OCH_2CH_3) ได้เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีหมู่ไซลานอล 3 หมู่ (-SiOH) สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของขี้เลื่อยได้ นอกจากนี้ยังพบพีกที่ประมาณ 1095 cm^{-1} เป็นลักษณะของ -Si- O-CH_2 [42-43] อีกด้วย

จากรูปที่ 4.3 (ง) พบพีกที่สำคัญที่ 1730 cm^{-1} เป็นตำแหน่งของการสั่นแบบ C=O Stretching ของคาร์บอนิลซึ่งมีอยู่ในมาเลอิกแอนไฮดรายด์ในสารช่วยผสม MAPE ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับ C=O Stretching ของคาร์บอนิลซึ่งมีอยู่ในโครงสร้างของเส้นใยไม้ นอกจากนี้ยังพบหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์ (C=O Stretching) ขึ้นที่พีกใกล้ ๆ 1750-1720 cm^{-1} [45-46] ในงานวิจัยนี้เกิดที่ตำแหน่งพีกประมาณ 1720 cm^{-1}

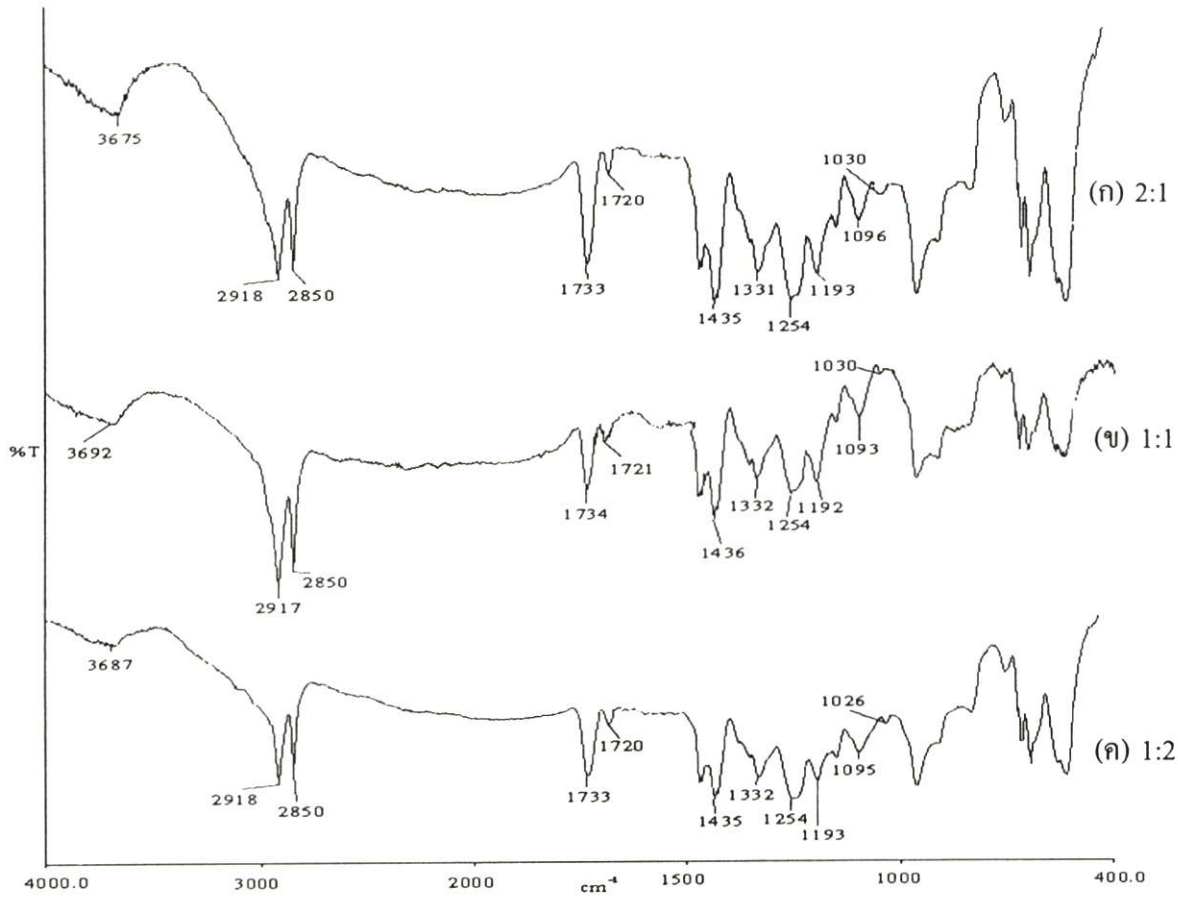
ตำแหน่งของสเปกทรัมที่สำคัญของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตำแหน่งสเปกทรัมของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงด้วยสารคู่ควบ

ตำแหน่งพีก (cm^{-1})	ลักษณะการสั่น	เอกสารอ้างอิง
3600-3700	Si-OH	42
3450-3500	O-H Stretching	42
3100-2600	CH-stretching ของ CH_2 และ/หรือ CH_3	42-43
1750-1700	C=O Stretching ของหมู่คาร์บอนิล	43
1750-1720	C=O Stretching ของหมู่เอสเทอร์	42,44-45
1450-1650	วงแหวนอะโรมาติก	45
1430-1470	C-H bending ของ CH_2	44-45
1300-1400	C-H Deformation ของ CH_2	44-45
600-800	C-Cl Stretching	44-45
1192	Si-O-Si และ Si-O-C_{wood} Stretching	42
1095	Si- O-CH_2 Stretching	42-423
1020-1030	Si-OH	43

4.1.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบผสม

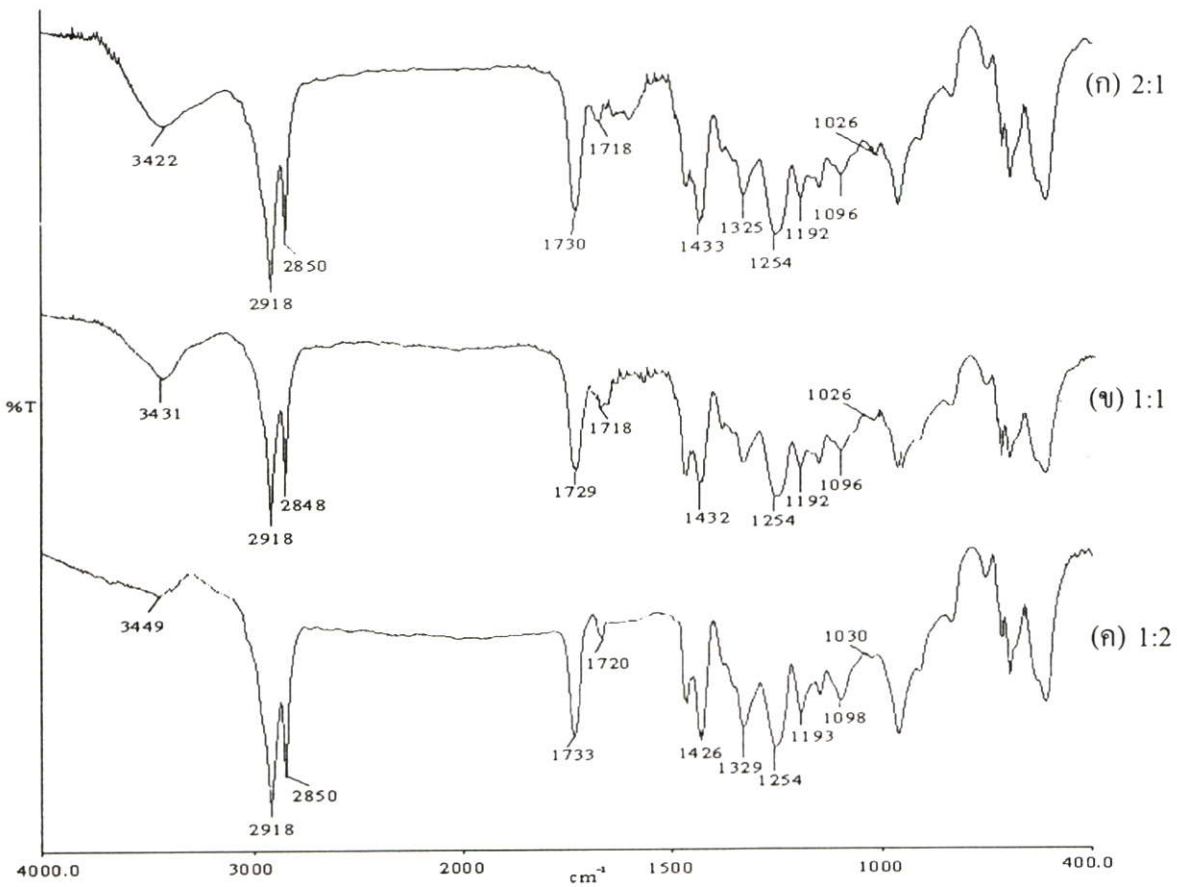
จากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบ 2 ชนิดร่วมกัน ระหว่างสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 กับสารช่วยผสม MAPE (A-137:MAPE) และสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 กับสารช่วยผสม MAPE (A-1100: MAPE) โดยใช้ปริมาณสารคู่ควบผสมที่ 3%โดยน้ำหนักของขี้เลื่อย ศึกษาที่อัตราส่วน 2:1 (2%:1%) 1:1 (1.5%:1.5%) และ1:2 (1%:2%)โดยใช้ PVC 100: LDPE 40: PA 20 15 %โดยน้ำหนักของ LDPE และขี้เลื่อย 30 %โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 อินฟราเรดสเปกทรัมของ PVC 100: LDPE 40: PA 20 15: SD 30 โดยใช้อัตราส่วนของสารคู่ควบผสมไซเลน A-137: MAPE เป็น (ก) 2:1 (ข) 1:1 และ (ค) 1:2

จากรูปที่ 4.4 (ก)-(ค) แสดงสเปกทรัมของร้อยละการส่งผ่านแสงของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบผสมระหว่างสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 กับสารช่วยผสม MAPE เพื่อปรับปรุงพื้นผิวขี้เลื่อย โดยใช้ปริมาณไซเลน A-137: MAPE ปริมาณ 3% โดยน้ำหนักของขี้เลื่อยในอัตราส่วนของไซเลน A-137: MAPE เท่ากับ 2:1 1:1 และ 1:2 จากสเปกทรัมในรูปพบพีกอินฟราเรดสเปกทรัมช่วงเดียวกับที่พบในพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 และสารช่วยผสม MAPE โดยพบพีกที่ตำแหน่ง 1026-1030 cm^{-1} [42] ซึ่งเป็นตำแหน่งของ

พีกเกิดจากการเชื่อมโยงระหว่างหมู่ไซลอกเซนของสารคู่ควบไซเลนและเซลลูโลสของขี้เลื่อย (-Si-OH) นอกจากนี้ยังพบพีกที่ตำแหน่ง 1718-1720 cm^{-1} ที่แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์ที่ได้จากสารช่วยผสม MAPE ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นเมื่อมีการใช้สารคู่ควบผสม ดังรูปที่ 4.2 (ก)



รูปที่ 4.5 อินฟราเรดสเปกทรัมของ PVC 100: LDPE 40: PA 20 15: SD 30 โดยใช้อัตราส่วนของสารคู่ควบผสมไซเลน A-1100: MAPE เป็น (ก) 2:1 (ข) 1:1 และ (ค) 1:2

จากรูปที่ 4.5 (ก)-(ค) แสดงสเปกทรัมของร้อยละการส่งผ่านแสงของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบผสมระหว่างสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 กับสารช่วยผสม MAPE เพื่อปรับปรุงพื้นผิวขี้เลื่อย โดยใช้ปริมาณไซเลน A-1100:MAPE ปริมาณ 3% ในอัตราส่วนของ A-1100: MAPE เท่ากับ 2:1 1:1 และ 1:2 จาก สเปกทรัมในรูปพบพีกอินฟราเรดสเปกทรัมช่วงเดียวกับที่พบในพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 และสารช่วยผสม MAPE โดยพบพีกที่ตำแหน่ง 1026-1030 cm^{-1} [42] ซึ่งเป็นตำแหน่งของพีกเกิดจากการเชื่อมโยงระหว่างหมู่ไซลอกเซนของสารคู่ควบไซเลนและเซลลูโลสของขี้เลื่อย (-Si-OH) และยังพบพีกที่ตำแหน่ง 1718-1720 cm^{-1} ที่แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์ที่ได้จากสารช่วยผสม MAPE ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นเมื่อมีการใช้สารคู่ควบผสมดังรูปที่ 4.2 (ข)

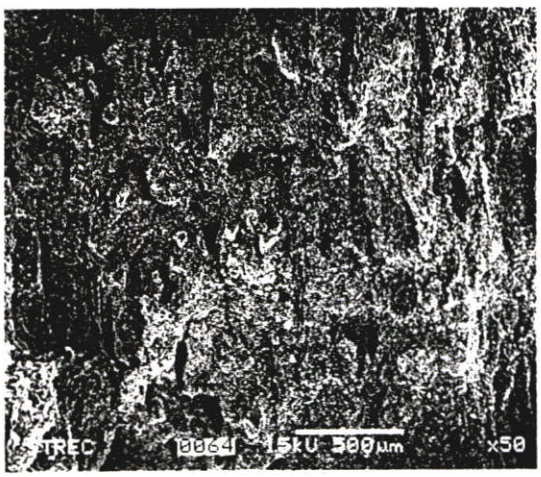
4.2 สัณฐานวิทยา

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตทำได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) เพื่อศึกษาถึงลักษณะการกระจายตัวของขี้เลื่อยในพอลิเมอร์เมทริกซ์ และลักษณะการยึดเกาะกันระหว่างทั้งสองวัฏภาค โดยพิจารณาจากพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ 3 ชนิด ที่ร้อยละต่อน้ำหนักขี้เลื่อยเท่ากัน และพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบผสม ที่สัดส่วนต่าง ๆ กัน เปรียบเทียบกับพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวขี้เลื่อย

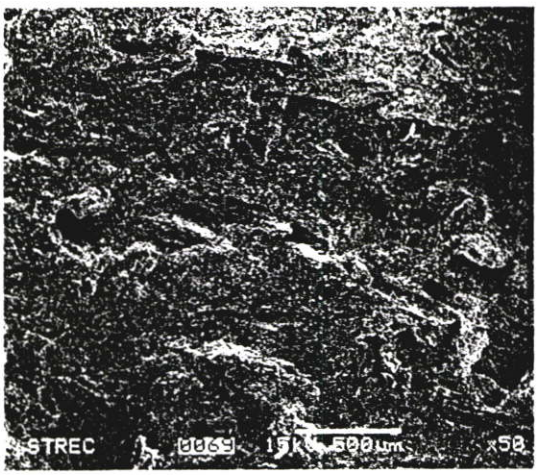
4.2.1 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบ

การศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพื่อศึกษาถึงลักษณะการกระจายตัว (Dispersion) ของขี้เลื่อยในพอลิเมอร์ผสมและลักษณะพื้นผิวระหว่างวัฏภาค (Interfacial surface) โดยพิจารณาในอัตราส่วนระหว่าง PVC 100: LDPE 40 : PA20 15 % : ขี้เลื่อย 30 % โดยน้ำหนักพอลิเมอร์ผสม และมีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยโดยใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137, สารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 และ สารช่วยผสม MAPE ที่ปริมาณ 3 %โดยน้ำหนักของขี้เลื่อยที่กำลังขยาย 50 และ 200 เท่า แสดงผลดังรูปที่ 4.6

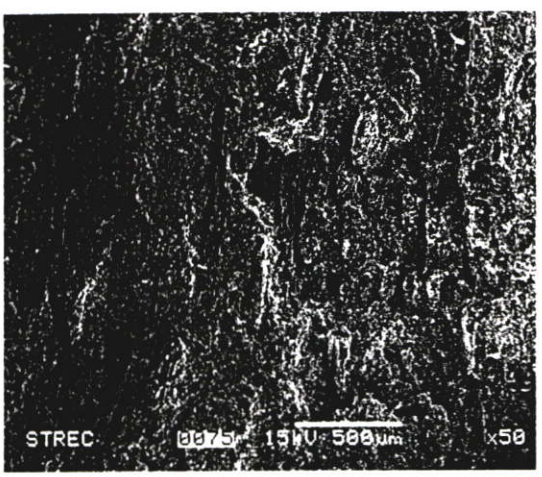
จากรูปที่ 4.6 (ก)-(ง) ซึ่งแสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 50 เท่าของพอลิเมอร์คอมโพสิต พบว่ารูปที่ 4.6 (ก) พอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อย พบหลุมลึกซึ่งเป็นร่องรอยของขี้เลื่อยที่หลุดออกจากวัฏภาคของพอลิเมอร์เมทริกซ์มากกว่าคอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ เนื่องจากความไม่เข้ากันระหว่างความไม่มีขั้วของพอลิเมอร์เมทริกซ์และความมีขั้วของขี้เลื่อย ทำให้การยึดเกาะระหว่างสองวัฏภาคไม่ดี มีการกระจายตัวที่ไม่ดี มีการยึดเกาะกัน ต่ำ ทำให้ขี้เลื่อยเกิดการหลุดออก (Pull-out) จากวัฏภาค ส่วนในรูปที่ 4.6 (ข)-(ง) มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยโดยใช้สารคู่ควบชนิดต่าง ๆ พบว่า ลักษณะการกระจายตัวของขี้เลื่อยไม่แตกต่างกันมาก พบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อย กระจายตัวได้ดีกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ได้มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อย เนื่องจากสารคู่ควบจะทำหน้าที่ในการเชื่อมโยง ระหว่าง พอลิเมอร์เมทริกซ์ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่มีขั้ว กับขี้เลื่อยซึ่งเป็นส่วนที่มีขั้วทำให้ความเข้ากันได้ระหว่างวัฏภาคทั้งสองดีขึ้น



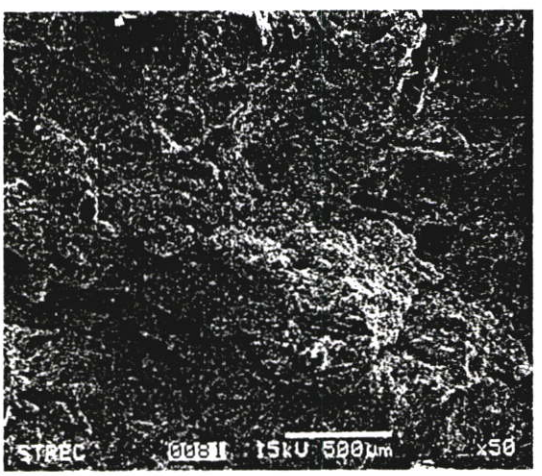
(ก)



(ข)



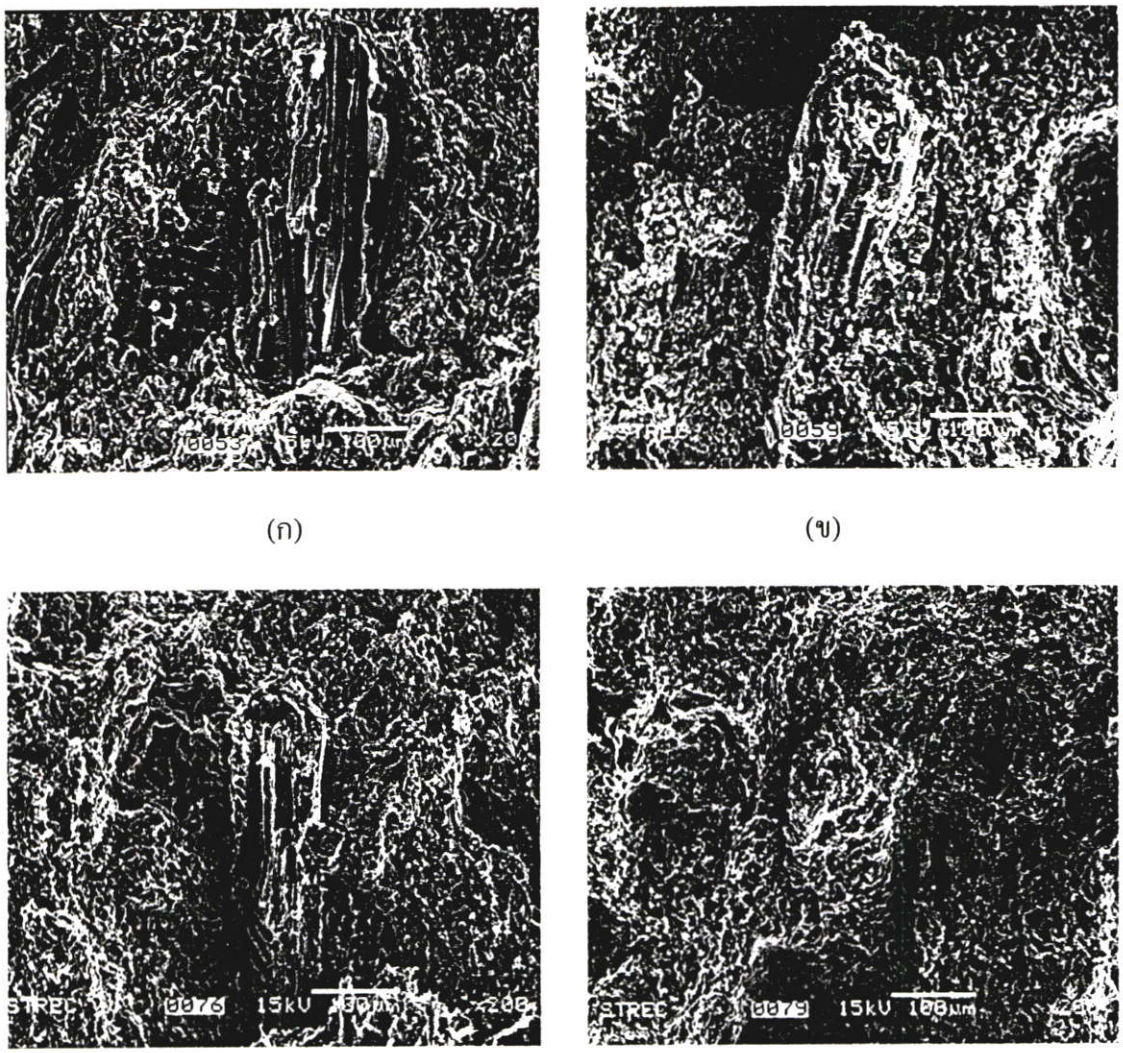
(ค)



(ง)

รูปที่ 4.6 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่กำลังขยาย 50 เท่าของ PVC 100: LDPE 40: PA 20 15: SD 30 (ก) ไม่มีสารคู่ควบ (ข) ใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 (3%) (ค) ใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 (3%) และ (ง) ใช้สารช่วยผสม MAPE (3%)

จากรูปที่ 4.7 (ก)-(ง) ซึ่งแสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 200 เท่า ในรูปที่ 4.7 (ก) แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ได้มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อย พบว่า การยึดเกาะของขี้เลื่อยกับพอลิเมอร์เมทริกซ์มีความสามารถในการยึดเกาะกันระหว่างวัฏภาคต่ำ สังเกตได้จากช่องว่างที่เกิดจากรอยต่อระหว่างวัฏภาคทั้งสอง แสดงให้เห็นว่า วัฏภาคทั้งสองมีความสามารถในการยึดเกาะกันต่ำ เนื่องจากความแตกต่างของความมีขั้วของสองวัฏภาค เปรียบเสมือนจุดบกพร่องภายในชิ้นงาน



(ก) (ข)

(ค) (ง)

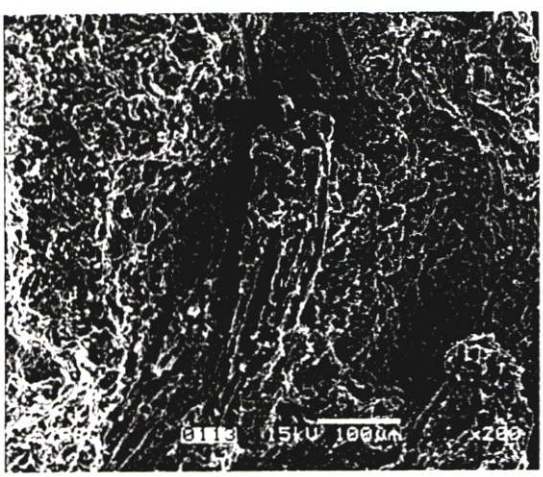
รูปที่ 4.7 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่กำลังขยาย 200 เท่า ของ PVC 100: LDPE 40: PA 20 15: SD 30 (ก) ไม่มีสารคู่ควบ (ข) ใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 (3%) (ค) ใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 (3%) และ (ง) ใช้สารช่วยผสม MAPE (3%)

จากรูปที่ 4.7 (ข)-(ง) พบว่าสารคู่ควบไซเลน ชนิด A-137, สารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 และสารช่วยผสม MAPE ทำให้เกิดการปกคลุมพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยพอลิเมอร์ (Wetting) ซึ่งสอดคล้องกับกลไกของปฏิกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นกับพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบทั้ง 3 ชนิด ที่คาดว่าสามารถเกิดการเกี่ยวพันกันระหว่างสายโซ่ (Chain entanglement) ในพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 และสารช่วยผสม MAPE รวมถึงการยึดกันโดยความมีขั้ว (Dipole-dipole interaction) ในพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบไซเลน

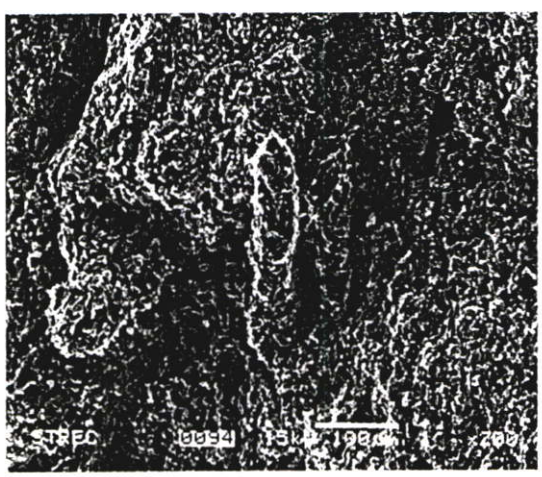
ชนิด A-1100 นอกจากนี้ยังไม่พบความแตกต่างของสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตจากการใช้สารคู่ควบต่างชนิดกัน

4.2.2 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบผสม

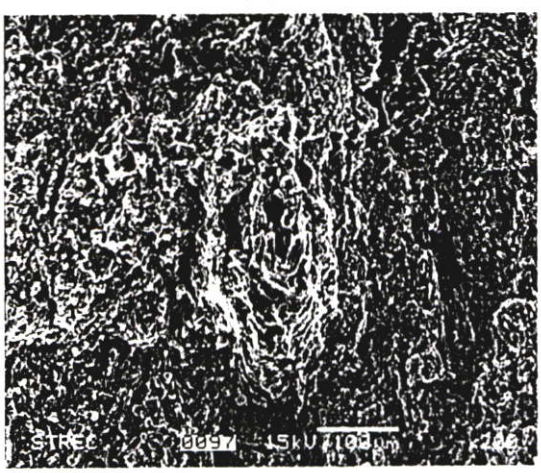
จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบ 2 ชนิดร่วมกันระหว่างสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 กับสารช่วยผสม MAPE (A-137: MAPE) และสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 กับสารช่วยผสม MAPE (A-1100: MAPE) โดยใช้ปริมาณสารคู่ควบผสมที่ 3 %โดยน้ำหนักของขี้เลื่อย ศึกษาที่อัตราส่วน 2:1 (2%: 1%) 1:1 (1.5%: 1.5%) และ 1:2 (1%: 2%) โดยใช้ PVC 100: LDPE 40: PA 20 15 % และขี้เลื่อย 30 %โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.8-4.9



(ก)



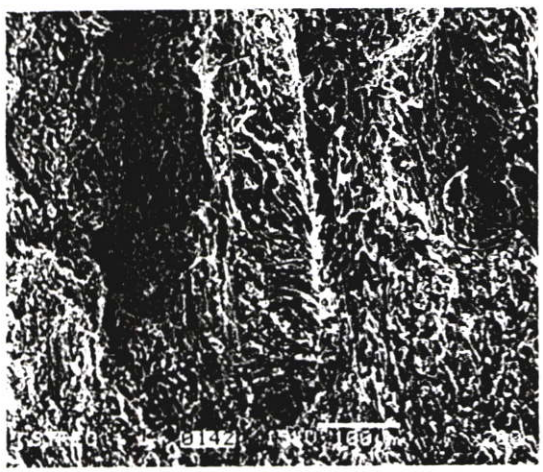
(ข)



(ค)

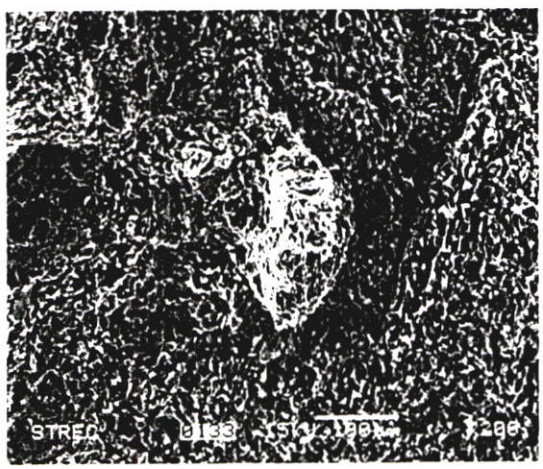
รูปที่ 4.8 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่กำลังขยาย 200 เท่าของ PVC 100: LDPE 40: PA 20 15: SD 30 ที่อัตราส่วนของ ไซเลน A-137: MAPE เป็น (ก) 2: 1 (ข) 1: 1 และ (ค) 1: 2

จากรูปที่ 4.8 (ก)-(ค) แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยโดยใช้สารคู่ควบผสมระหว่างไซเลน A-137: MAPE ปริมาณ 3 % โดยน้ำหนักของขี้เลื่อย ศึกษาการใช้สารคู่ควบผสมในอัตราส่วน 2:1 1:1 และ1:2 ที่ปริมาณขี้เลื่อย 30% โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม พบว่าสำหรับคอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบผสมนั้น ลักษณะพื้นผิวไม่แตกต่างมากนักกับคอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบเพียงชนิดเดียว และในอัตราส่วนต่าง ๆ กันของสารคู่ควบผสม ทั้งนี้สังเกตเห็นว่าขี้เลื่อยถูกปกคลุมด้วยพอลิเมอร์เมทริกซ์ แสดงถึงการยึดเกาะกันระหว่างพอลิเมอร์ผสมและขี้เลื่อยดีขึ้นซึ่งสอดคล้องกับปฏิกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นเมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมไซเลน A-137 : MAPE ที่สามารถจะเกิดการเกี่ยวพันเชิงกลและการยึดเกาะเชิงเคมีระหว่างสารคู่ควบผสมไซเลน A-137 และสารช่วยผสม MAPE กับพอลิเมอร์เมทริกซ์และขี้เลื่อย



(ก)

(ข)



(ค)

รูปที่ 4.9 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่กำลังขยาย 200 เท่าของ PVC 100: LDPE 40: PA 20 15: SD 30 ที่อัตราส่วนของไซเลน A-1100: MAPE เป็น (ก) 2:1 (ข) 1:1 และ (ค) 1:2

จากรูปที่ 4.9 (ก)-(ค) แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยโดยใช้สารคู่ควบผสมระหว่างไซเลน A-1100: MAPE พบว่า ลักษณะพื้นผิวไม่แตกต่างมากนักกับพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบเพียงชนิดเดียว สังเกตเห็นขี้เลื่อยถูกปกคลุมด้วยพอลิเมอร์เมทริกซ์ แสดงถึงการยึดเกาะกันระหว่างพอลิเมอร์ผสมและขี้เลื่อยดีขึ้น ซึ่งอธิบายได้ทำนองเดียวกันกับการใช้สารคู่ควบผสมไซเลน A-137: MAPE

จากลักษณะสัณฐานวิทยาสามารถบอกได้ว่าการเติมสารคู่ควบเพื่อช่วยปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยทำให้ขี้เลื่อยสามารถยึดเกาะกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้มากขึ้น

4.3 การศึกษาสมบัติทางความร้อน

สมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาถึงตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

1. ศึกษาอุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition temperature, T_d) โดยเทคนิค TGA

2. อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition Temperature, T_g) ค่า E' (Storage modulus) และ E'' (Loss modulus) โดยเทคนิค DMA

4.3.1 อุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition temperature, T_d)

การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์คอมโพสิตทำได้โดยการใช้เครื่อง TGA (Thermogravimetric analyzer) โดยพิจารณาจากพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ 3 ชนิด ที่ร้อยละต่อน้ำหนักขี้เลื่อยเท่ากัน และพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบผสม ที่สัดส่วนต่าง ๆ กัน เปรียบเทียบกับพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวขี้เลื่อย

4.3.1.1 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบ

การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์คอมโพสิต ในการทดสอบจะศึกษาช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 50-600 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ศึกษาในอัตราส่วน PVC 100: LDPE 40 : PA20 15% : ขี้เลื่อย 30 % โดยน้ำหนักพอลิเมอร์ผสม และผลการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยโดยใช้ สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137, สารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 และ สารช่วยผสม MAPE ที่ปริมาณ 3 %โดยน้ำหนักของขี้เลื่อย ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์คอมโพสิต ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบชนิดต่าง ๆ

ชนิดของพอลิเมอร์คอมโพสิต	อุณหภูมิการสลายตัว (°C)
PVC : LDPE : PA 20: SD 30	230
PVC : LDPE : PA 20: SD 30: 3% A-137	237
PVC : LDPE : PA 20: SD 30: 3% A-1100	231
PVC : LDPE : PA 20: SD 30: 3% MAPE	235

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบทั้ง 3 ชนิด อุณหภูมิการสลายตัวมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง หรือกล่าวได้ว่าเสถียรภาพทางความร้อนไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเติมสารคู่ควบไม่ได้ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวพอลิเมอร์คอมโพสิตเปลี่ยนแปลง

4.3.1.2 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบผสม

จากการศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบ 2 ชนิดร่วมกัน ระหว่างสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 กับสารช่วยผสม MAPE (A-137:MAPE) และสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 กับสารช่วยผสม MAPE (A-1100:MAPE) โดยใช้ปริมาณสารคู่ควบผสมที่ 3 %โดยน้ำหนักของขี้เลื่อย ศึกษาที่อัตราส่วน 2:1 (2%:1%) 1:1 (1.5%:1.5%) และ 1:2 (1%:2%) โดยใช้ PVC 100: LDPE 40: PA 20 15 %โดยน้ำหนักของ LDPE และ ขี้เลื่อย 30 %โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม ได้ผลการทดลอง ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์คอมโพสิต ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสม

ชนิดของพอลิเมอร์คอมโพสิต	อุณหภูมิการสลายตัว (°C)
PVC: LDPE: PA 20: SD 30	230
PVC: LDPE: PA 20: SD 30: (2:1) A-137 :MAPE	239
PVC: LDPE: PA 20: SD 30: (1: 1) A-137 :MAPE	232
PVC: LDPE: PA 20: SD 30: (1:2) A-137 :MAPE	236

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

PVC: LDPE: PA 20: SD 30: (2:1) A-1100 :MAPE	233
PVC: LDPE: PA 20: SD 30: (1:1) A-1100 :MAPE	239
PVC: LDPE: PA 20: SD 30: (1:2) A-1100 :MAPE	237

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งให้ผลการทดลองที่เหมือนกับพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบชนิดเดียว โดยพบว่าการใช้สารคู่ควบผสมระหว่าง A-137: MAPE และ A-1100: MAPE ทุกอัตราส่วน ส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวมีค่าใกล้เคียงกับพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อย ซึ่งอธิบายได้ว่าการใช้สารคู่ควบผสมทั้ง 2 ชนิด และที่อัตราส่วนต่าง ๆ กันไม่มีผลต่ออุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์คอมโพสิต

4.3.2 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition Temperature, T_g)

การศึกษาอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์คอมโพสิตทำได้โดยการใช้เครื่อง DMA (Dynamic Mechanical Analyzer) โดยพิจารณาจากพอลิเมอร์พอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ 3 ชนิด ที่ร้อยละต่อน้ำหนักขี้เลื่อยเท่ากัน และพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบผสมที่สัดส่วนต่าง ๆ กัน เปรียบเทียบกับพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวขี้เลื่อย

4.3.2.1 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบ

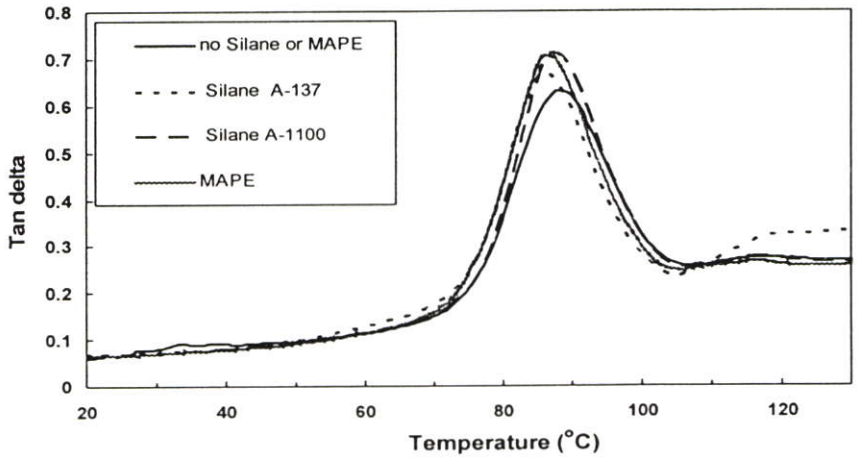
การศึกษาอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ค่า E' (Storage modulus) และ E'' (Loss modulus) ของพอลิเมอร์คอมโพสิต ในการทดสอบจะศึกษาช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 20-130 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 4 องศาเซลเซียสต่อนาที ใช้ความถี่ 1 Hz เลือกศึกษาในอัตราส่วน PVC 100: LDPE 40 : PA20 15 % : ขี้เลื่อย 30 %โดยน้ำหนักพอลิเมอร์ผสม และศึกษาถึงผลการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยโดยใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137, สารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 และสารช่วยผสม MAPE ที่ปริมาณ 3 %โดยน้ำหนักของขี้เลื่อย ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์คอมโพสิต ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบชนิดต่าง ๆ

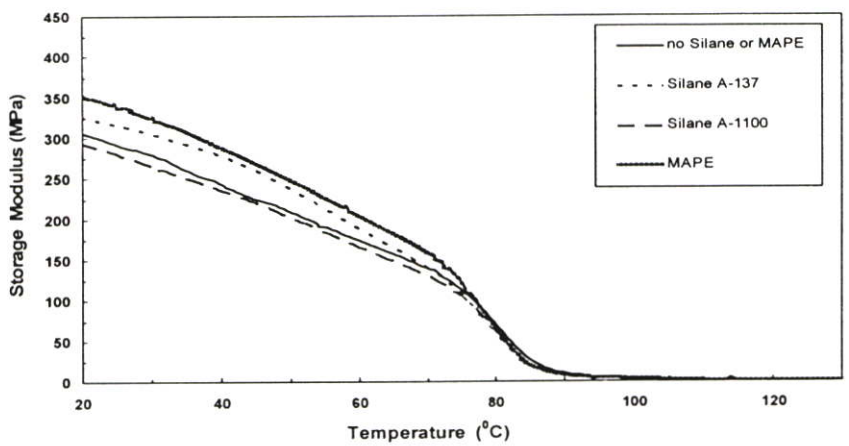
ชนิดของพอลิเมอร์คอมโพสิต	T_g (°C)
PVC : LDPE : PA 20: SD 30	88.2
PVC : LDPE : PA 20: SD 30: 3% A-137	86.5
PVC : LDPE : PA 20: SD 30: 3% A-1100	87.4
PVC : LDPE : PA 20: SD 30: 3% MAPE	86.0

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบทั้ง 3 ชนิด อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งมีหลายปัจจัยที่มีผลต่ออุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Tan δ_{max}) โดยเฉพาะปัจจัยทางโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ได้แก่ น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) องศาความเป็นกิ่ง (Degree of branching) องค์ประกอบของอะตอมในสายโซ่หลัก หรือความแข็งของสายโซ่ (Chain stiffness) พันธะระหว่างสายโซ่ (Intermolecular interaction) และชนิดและหมู่ข้างเคียง (Type and size of side groups) [45] เป็นต้น โดยพบว่าชนิดของสารคู่ควบไม่มีผลต่อ T_g ของพอลิเมอร์คอมโพสิต

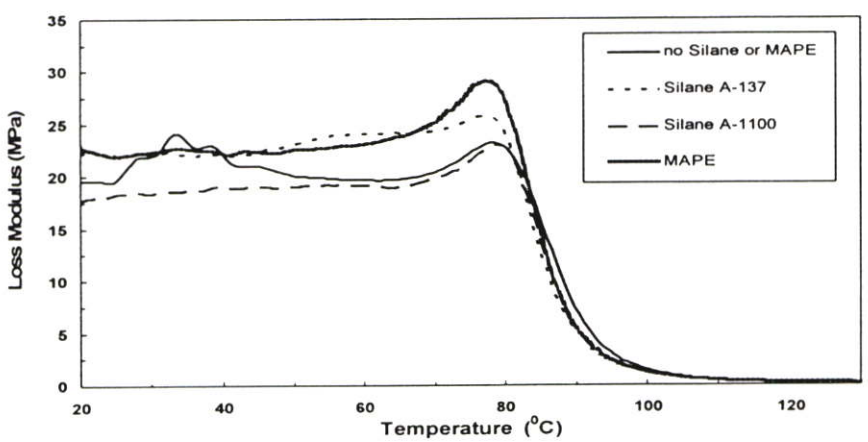
เมื่อพิจารณาจากค่า E′ (Storage modulus) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงพลังงานที่เก็บสะสมไว้เมื่อมีการให้แรงและสั่นเป็นจังหวะพร้อมทั้งให้ความร้อน โดยจะเป็นค่าที่บอกถึงความแข็งแรง (Strength) ของชิ้นงาน ส่วนค่า E″ (Loss modulus) เป็นค่าที่แสดงถึงพลังงานที่สูญเสียไปเมื่อมีการให้แรงและสั่นเป็นจังหวะพร้อมทั้งให้ความร้อนโดยจะเป็นค่าที่บอกถึงความยืดหยุ่น (Flexible) ของชิ้นงาน โดยค่า Tan δ_{max} เป็นค่าที่ใช้บอก T_g ซึ่งค่า Tan δ หาได้จากอัตราส่วนระหว่าง E″ กับ E′ [46] ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าการใช้สารคู่ควบผสมทั้ง 3 ชนิด ให้ผล Tan δ ที่ใกล้เคียงกัน จากผลการทดลองพบว่าค่า E′ (Storage modulus) ของชิ้นงานที่มีการเติมสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 , สารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 และสารช่วยผสม MAPE มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าสารคู่ควบสามารถสร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัฏภาคได้เพิ่มขึ้น [46-47]



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.10 ค่า (ก) T_g (ข) Storage modulus และ(ค) Loss Modulus ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบชนิดต่าง ๆ

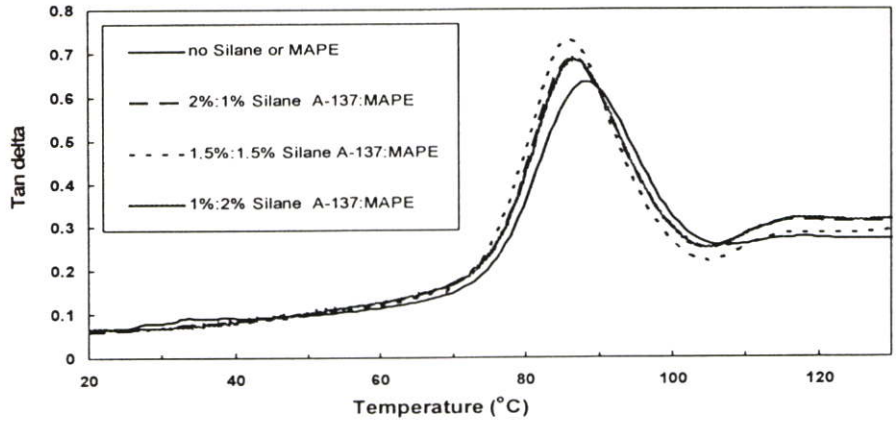
4.3.2.2 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบผสม

จากการศึกษาอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบ 2 ชนิดร่วมกัน ระหว่างสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 กับสารช่วยผสม MAPE (A-137: MAPE) และสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 กับสารช่วยผสม MAPE (A-1100: MAPE) โดยใช้ปริมาณสารคู่ควบผสมที่ 3 %โดยน้ำหนักของขี้เลื่อย ศึกษาที่อัตราส่วน 2:1 (2%:1%) 1:1 (1.5%:1.5%) และ 1:2 (1%:2%) โดยใช้ PVC 100 : LDPE 40 : PA 20 15 % โดยน้ำหนักของ LDPE และขี้เลื่อย 30 %โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.5

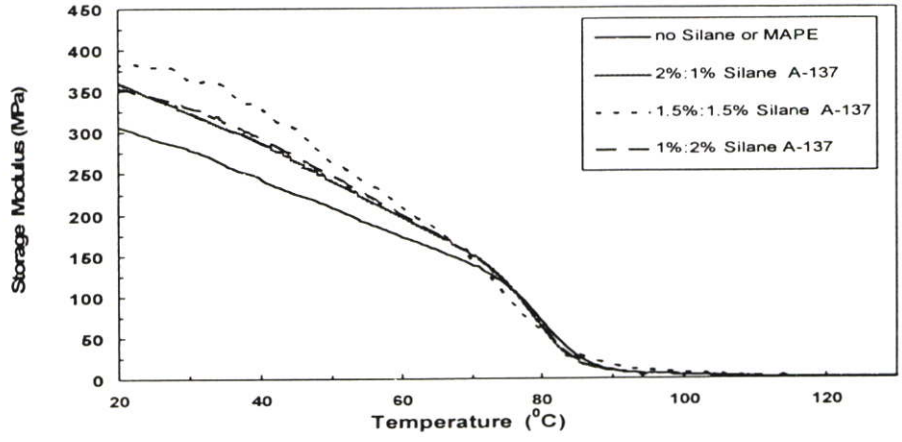
ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์คอมโพสิต ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยด้วยสารคู่ควบผสม

ชนิดของพอลิเมอร์คอมโพสิต	T_g (°C)
PVC: LDPE: PA 20: SD 30	88.2
PVC: LDPE: PA 20: SD 30: (2: 1) A-137 :MAPE	86.3
PVC: LDPE: PA 20: SD 30: (1: 1) A-137 :MAPE	86.5
PVC: LDPE: PA 20: SD 30: (1: 2) A-137 :MAPE	86.4
PVC: LDPE: PA 20: SD 30: (2: 1) A-1100 :MAPE	85.8
PVC: LDPE: PA 20: SD 30: (1: 1) A-1100 :MAPE	85.8
PVC: LDPE: PA 20: SD 30: (1: 2) A-1100 :MAPE	85.3

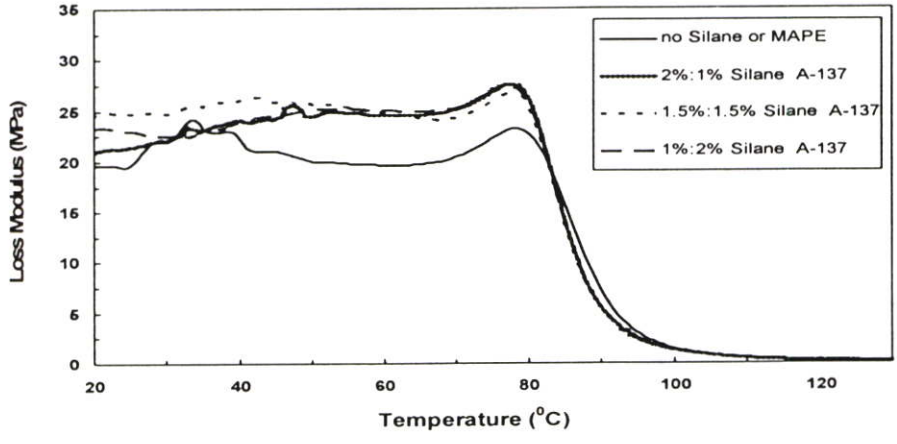
จากผลการทดลองพบว่าเมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมทั้งชนิด A-137: MAPE และ A-1100: MAPE ทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง โดยที่อัตราส่วนต่าง ๆ กันของสารคู่ควบไม่มีผลต่ออุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว



(ก)



(ข)

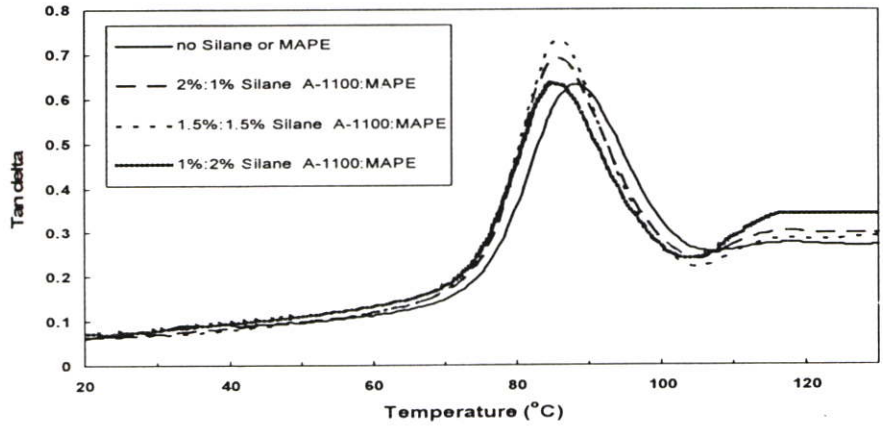


(ค)

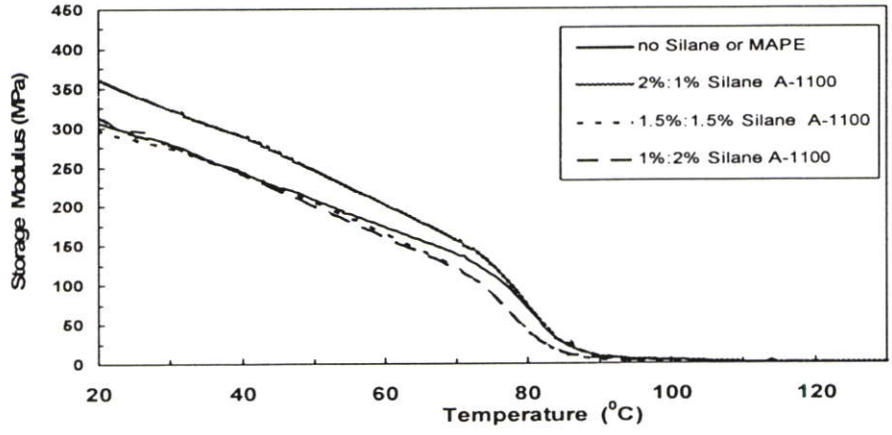
รูปที่ 4.11 ค่า (ก) T_g (ข) Storage modulus และ(ค) Loss Modulus ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมระหว่าง A-137: MAPE

จากผลการทดสอบพบว่าการใช้สารคู่ควบผสมระหว่าง A-137: MAPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ให้ผล Tan δ ที่ใกล้เคียงกัน จากผลการทดลอง (รูปที่ 4.11) พบว่าค่า E'' (Loss modulus) ของ

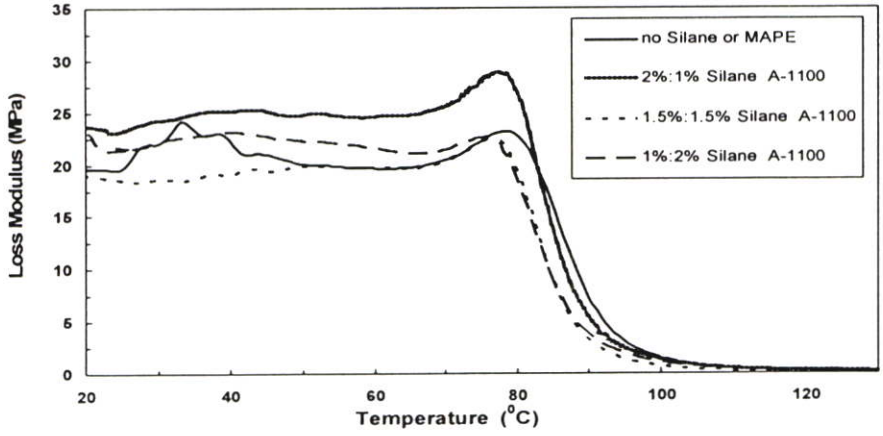
ชิ้นงานที่มีการใช้สารคู่ควบผสมระหว่าง A-137: MAPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกับการใช้สารคู่ควบชนิดเดียว



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.12 (ก) T_g (ข) Storage modulus และ(ค) Loss Modulus ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมระหว่าง A-1100 :MAPE

จากผลการทดสอบพบว่าการใช้สารคู่ควบผสมระหว่าง A-1100: MAPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ให้ผล Tan δ ที่ ใกล้เคียงกัน จากผลการทดลองพบว่าค่า E'' (Loss modulus) ของชิ้นงานที่มีการเติมสารคู่ควบผสมระหว่าง A-1100: MAPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกับการใช้สารคู่ควบชนิดเดียว

4.4 สมบัติเชิงกล

ในการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตนั้น ได้แบ่งการศึกษาออกดังนี้

ศึกษาผลของสารคู่ควบเพียงชนิดเดียว คือ สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 สารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 และสารช่วยผสม MAPE โดยศึกษาปริมาณสารคู่ควบที่เพิ่มขึ้น ผลของปริมาณขี้เลื่อยที่เพิ่มขึ้น และศึกษาผลของการใช้สารคู่ควบผสมระหว่างสารคู่ควบไซเลนและสารช่วยผสม MAPP ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ที่มีต่อสมบัติเชิงกล

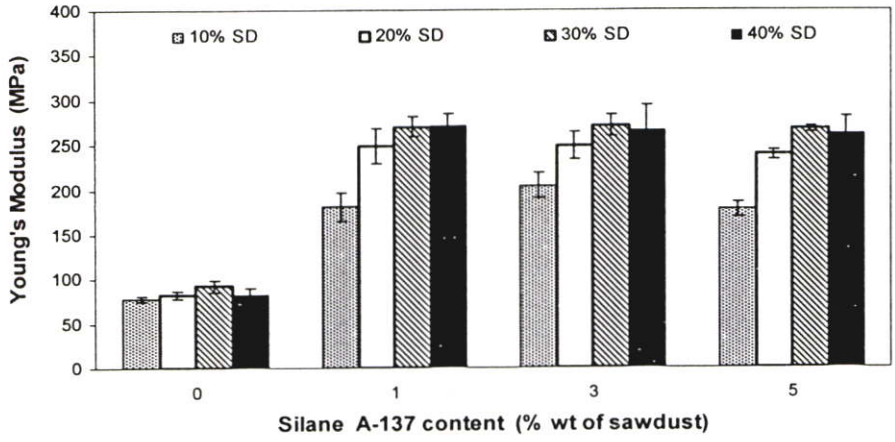
จากสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ที่ศึกษาให้ผลการทดลองดังนี้

4.4.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบ

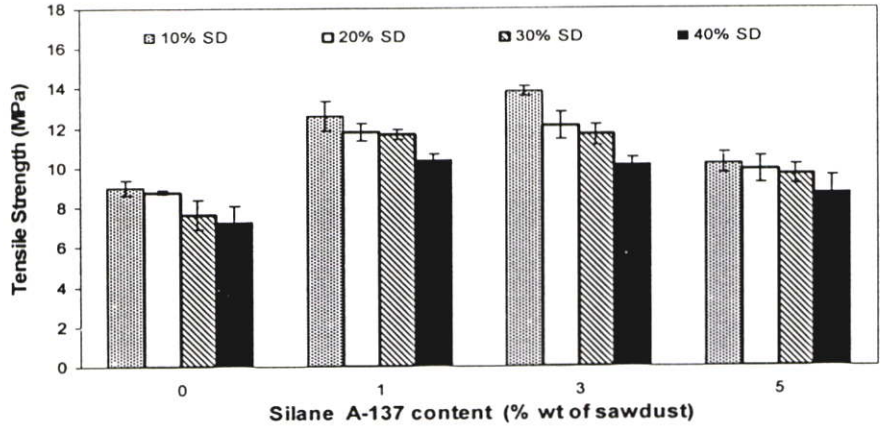
จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบ 3 ชนิด คือ สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 สารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 และสารช่วยผสม MAPE โดยศึกษาที่อัตราส่วน PVC 100: LDPE 40: PA 20 15%โดยน้ำหนักของ LDPE : ขี้เลื่อย 10 20 30 และ 40 % โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม และทำการศึกษาการเติมปริมาณสารคู่ควบที่ปริมาณต่าง ๆ คือ 0 1 3 และ 5% โดยน้ำหนักของขี้เลื่อย

4.4.1.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137

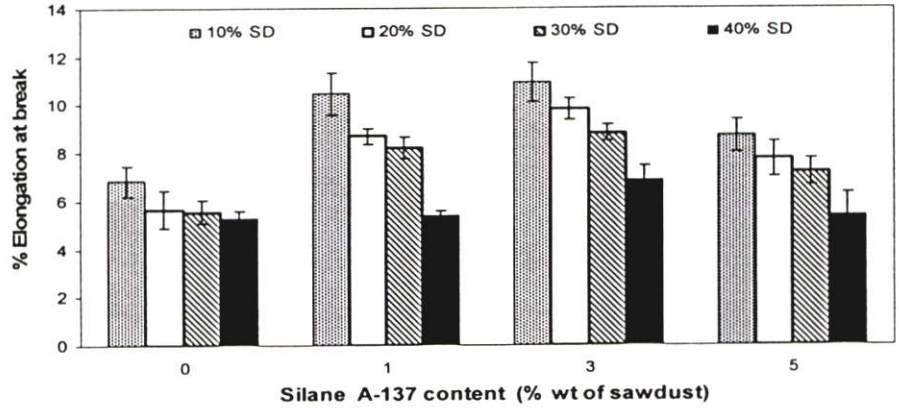
สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 โดยศึกษาที่อัตราส่วน PVC 100: LDPE 40: PA 20 15 %โดยน้ำหนักของ LDPE : ขี้เลื่อย 10 20 30 และ 40 %โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม และศึกษาปริมาณสารคู่ควบที่ปริมาณ 0 1 3 และ 5% โดยน้ำหนักของขี้เลื่อย ได้ผลดังนี้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านแรงดึงและปริมาณสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 (ก) มอดุลัส (ข) ความแข็งแรงดึง และ (ค) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด

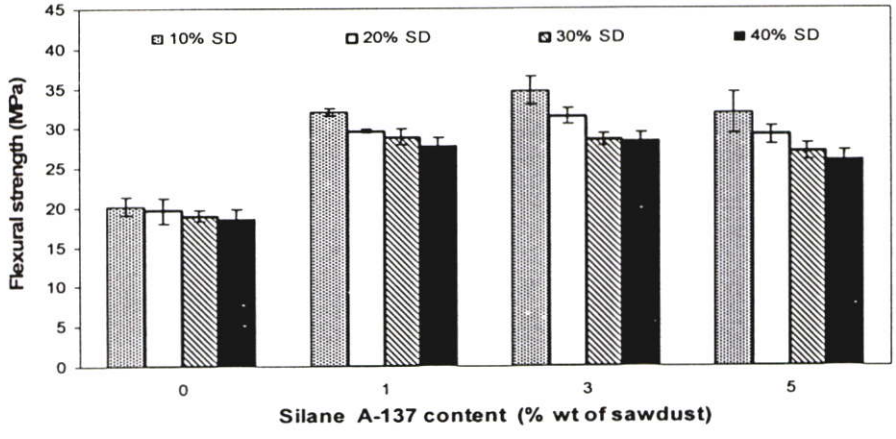
จากรูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัส ความแข็งแรงดึง และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดกับปริมาณสารคู่ควบไซเลน ชนิด A-137 พบว่าเมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วย

สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 ทำให้สมบัติด้านแรงดึงมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ได้มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อย เนื่องจากสมบัติด้านแรงดึงนั้นเป็นการศึกษาพฤติกรรมของพอลิเมอร์เมื่อมีการให้ความเค้น (Stress) ดึงให้พอลิเมอร์ยืดยาวออกจนถึงจุดที่พอลิเมอร์เกิดการเสียสภาพและขาดออกจากกันในที่สุด เมื่อพอลิเมอร์ได้รับแรงดึงสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์จะเคลื่อนที่ตามแนวแรงถูกดึงยืดยาวออกที่ความเครียดมากขึ้น เมื่อพอลิเมอร์ถูกดึงยืดจนเกิดการเสียสภาพในช่วงที่ความเครียดสูง ๆ หลังจากจุดคราก (Yield point) สายโซ่พอลิเมอร์จะเกิดการไหลเลื่อนหลุดออกจากการยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่ (Slip) เกิดการเสียสภาพแบบพลาสติก (Plastic Deformation) สายโซ่พอลิเมอร์ไม่สามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้ [47] เมื่อมีการเติมขี้เลื่อยซึ่งเป็นวัฏภาคที่มีความแข็งแรง (Strength) และมอดุลัส (Modulus) มากกว่าพอลิเมอร์เมทริกซ์ทำให้คอมโพสิตเกิดการแตกหักได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้เมื่อให้แรงดึงแก่ชิ้นงาน บริเวณที่ขี้เลื่อยติดต่อกับวัฏภาคเมทริกซ์นั้นเป็นบริเวณที่มีความเค้นสูง (Stress concentration) มีการยึดเกาะต่ำระหว่างขี้เลื่อยที่มีสมบัติมีขั้วและเมทริกซ์ที่มีสมบัติไม่มีขั้วเกิดเป็นรอยตำหนิ (Defects) ขึ้นทำให้สายโซ่พอลิเมอร์สามารถเลื่อนหลุดออกจากกันได้ง่ายขึ้น เมื่อมีการปรับปรุงความแข็งแรงบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคจะช่วยต้านทานการเสียรูปหรือการหลุดเลื่อนของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อได้รับแรงดึง เนื่องจากสายโซ่มีการเกี่ยวพันกันทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ยาก อธิบายได้จากโครงสร้างของสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 ซึ่งโครงสร้างประกอบด้วยส่วนที่มีขั้ว และส่วนที่ไม่มีขั้วโดยส่วนที่มีขั้วสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่หมู่เอทอกซี ($-OCH_2CH_3$) ได้เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีหมู่ไซลานอล 3 หมู่ ($-SiO-$) ซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของขี้เลื่อยได้ และส่วนที่ไม่มีขั้วซึ่งมีโครงสร้างเป็นไฮโดรคาร์บอนไปยึดเหนี่ยวกับส่วนที่ไม่มีขั้วของพอลิเมอร์คอมโพสิต ทำให้ช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะระหว่างพื้นผิว มีผลให้รอยตำหนิของชิ้นงานลดลง ทำให้สามารถส่งผ่านแรงได้อย่างต่อเนื่อง จึงทำให้ค่ามอดุลัส ความแข็งแรงดึง และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีการปรับปรุงความแข็งแรงบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคโดยใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137

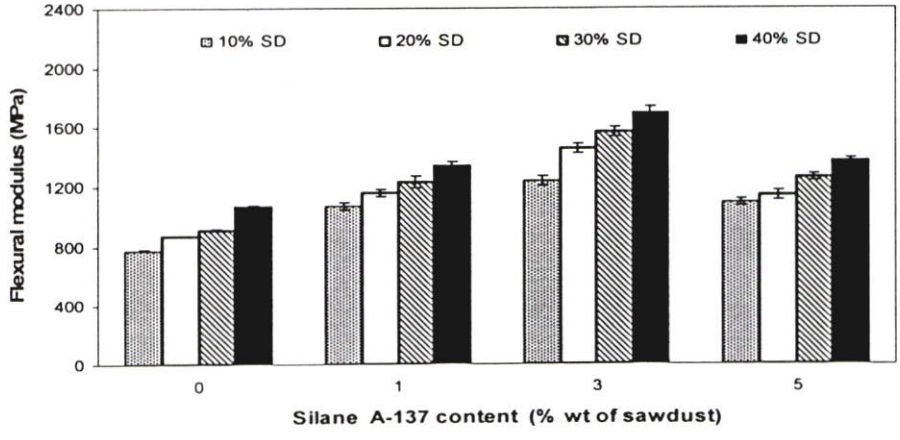
พบว่าสารคู่ควบไซเลน ชนิด A-137 ที่ปริมาณ 3% มีผลให้ค่ามอดุลัส ความแข็งแรงดึง และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดสูงสุด ทั้งนี้อาจเนื่องจากปริมาณการเติมสารคู่ควบไซเลน ชนิด A-137 ปริมาณ 1% น้อยเกินไป ไม่เพียงพอต่อการเปียกผิวบนพื้นผิวขี้เลื่อย ส่วนปริมาณการเติมสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 ปริมาณ 5% มากเกินไปทำให้สารคู่ควบไซเลนสามารถเกิด self condensation ได้ทำให้ได้โครงสร้างของพอลิไซลอกเซน ซึ่งถ้ามีมากเกินไปพอลิไซลอกเซนจะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (Lubicant) ทำให้สมบัติทางด้านแรงดึงต่ำลง เช่นเดียวกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของ N. Sombatsompop และคณะ [37] ซึ่งได้ศึกษาพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง PVC และขี้เลื่อยโดยใช้สารคู่ควบไซเลน 3 ชนิด พบว่าเมื่อปริมาณสารคู่ควบไซเลนเพิ่มขึ้นมากกว่า 1% ส่งผลให้สมบัติเชิงกลต่ำลง

ในส่วนของปริมาณขี้เลื่อยที่เพิ่มขึ้น พบว่าเมื่อปริมาณขี้เลื่อยเพิ่มขึ้นค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น เนื่องจากขี้เลื่อยมีค่ามอดุลัสสูงกว่าพอลิมอร์เมทริกซ์ เมื่อเติมปริมาณขี้เลื่อยเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สามารถเข้าไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของพอลิมอร์เมทริกซ์มากขึ้น ทำให้ความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของพอลิมอร์เมทริกซ์ลดลง ค่ามอดุลัสจึงเพิ่มขึ้น

สำหรับความแข็งแรงดึง และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีปริมาณขี้เลื่อยเพิ่มขึ้นพบว่า มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากปริมาณขี้เลื่อยที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interphase) ของพอลิเมอร์ผสมกับขี้เลื่อยมากขึ้น ทำให้การยึดเกาะระหว่างขี้เลื่อยและเมทริกซ์ลดลงส่งผลให้ชิ้นงานมีรอยตำหนิ ดังนั้นเมื่อให้แรงดึงแก่ชิ้นงาน บริเวณที่ขี้เลื่อยติดต่อกับวัฏภาคเมทริกซ์นั้นเป็นบริเวณที่มีความเค้นสูงทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ผสมเลื่อนหลุดออกจากกันได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ปริมาณขี้เลื่อยที่เพิ่มขึ้นอาจกระจายตัวได้ไม่ดี บางส่วนมีการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งเป็นบริเวณที่ไม่มีการยึดเกาะกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ ทำให้เกิดเป็นตำหนิในชิ้นงาน ส่งผลให้พอลิเมอร์คอมโพสิตรับแรงได้น้อยลง



(ก)

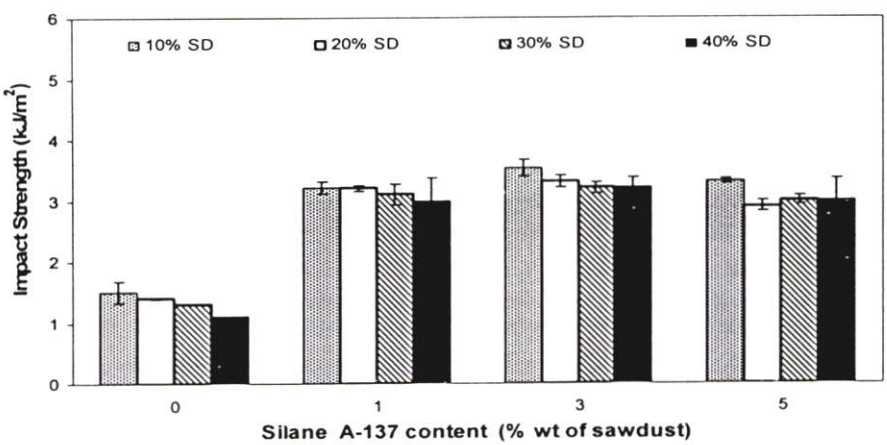


(ข)

รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านการโค้งงอและปริมาณสารคู่ควบไซเลน ชนิด A-137 (ก) ความแข็งแรงโค้งงอ และ (ข) มอดุลัสโค้งงอ

จากรูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงโค้งงอ มอดุลัสโค้งงอ กับปริมาณสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 พบว่าเมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 ทำให้สมบัติด้านการโค้งงอมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ได้มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อย เนื่องจากความสามารถในการยึดเกาะระหว่างวัฏภาคเพิ่มมากขึ้นมีผลให้รอยตำหนิของชิ้นงานลดลงทำให้สามารถส่งผ่านแรงได้อย่างต่อเนื่อง จึงทำให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอมอดุลัสโค้งงอเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 ปริมาณ 3% มีผลให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอมอดุลัสโค้งงอ สูงสุดเช่นเดียวกับสมบัติด้านแรงดึง สำหรับความแข็งแรงโค้งงอของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีปริมาณขี้เลื่อยเพิ่มขึ้น พบว่ามีแนวโน้มลดลง แต่มอดุลัสโค้งงอมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณขี้เลื่อยเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกระแทกและปริมาณสารคู่ควบไซเลน ชนิด A-137

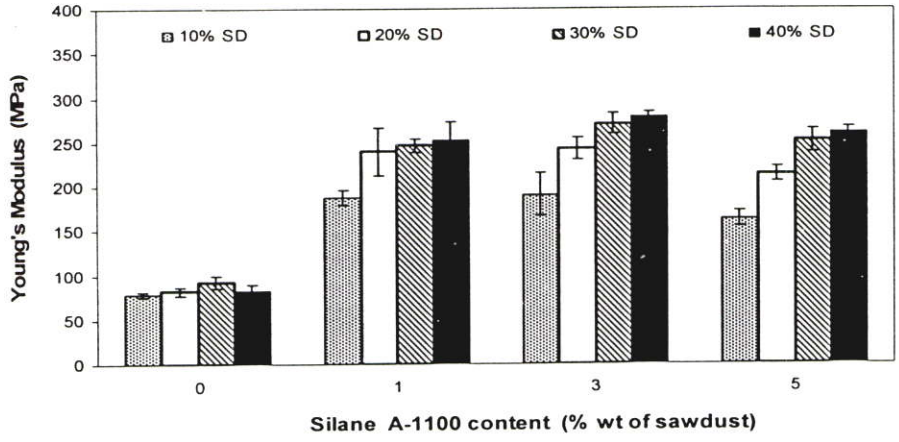
จากรูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกระแทกกับปริมาณสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 พบว่าเมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วย สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 ทำให้ความแข็งแรงกระแทกมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ได้มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อย เนื่องจากค่าความแข็งแรงกระแทกเป็นการให้พลังงานแก่ชิ้นงานทันทีก่อนที่จะเกิดการแตกหักอย่างถาวรเกิดความเค้นบริเวณรอยบากของชิ้นงานในวัสดุภายใต้แรงเป็นบริเวณที่มีความเค้นสูง สายโซ่โมเลกุลเริ่มแตกหลุดออกจากกันเกิดการแตกหักเริ่มต้น (Crack initiation) แล้วปลดปล่อยพลังงานออกมาเกิดการแตกหักต่อเนื่อง (Crack propagation) พบว่าการเติมสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 มีผลต่อค่าความแข็งแรงกระแทก อธิบายได้จากโครงสร้างของสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่มีขั้ว และส่วนที่ไม่มีขั้ว โดยส่วนที่มีขั้วจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่หมู่เอทอกซี ($-OCH_2CH_3$)ได้เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีหมู่ไซลานอล 3 หมู่ ($-\dot{S}iO-$) ซึ่งสามารถ

เกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของขี้เลื่อยได้ จากนั้นจะหันส่วนที่ไม่มีขั้วซึ่งมีโครงสร้างเป็นไฮโดรคาร์บอนไปยึดเหนี่ยวกับส่วนที่ไม่มีขั้ว ของพอลิเมอร์คอมโพสิตทำให้ช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะระหว่างพื้นผิว มีผลให้รอยตำหนิของชิ้นงานลดลงทำให้การถ่ายเทความเค้น (Stress transfer) จากเมทริกซ์สู่ขี้เลื่อย ข้ามผ่านบริเวณรอยต่อนี้ดีขึ้น สามารถต้านทานพลังงานกระแทกได้ดีขึ้น

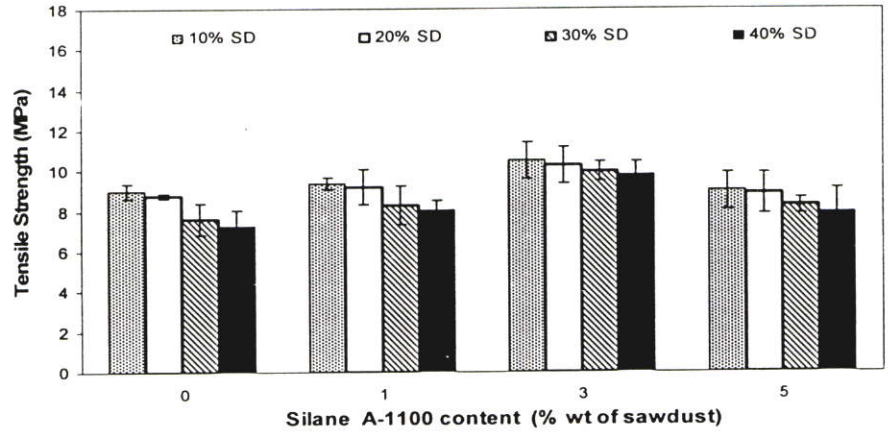
จากผลของการใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 เพื่อปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยในพอลิเมอร์คอมโพสิต พบว่าปริมาณสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 ที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อความแข็งแรงกระแทก แต่อย่างไรก็ตามการเติมสารคู่ควบไซเลน ชนิด A-137 ทำให้ความแข็งแรงกระแทกโดยรวมดีกว่าคอมโพสิตที่ไม่ได้เติมสารคู่ควบไซเลน โดยพบว่าสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 ปริมาณ 3% มีผลให้ค่าความแข็งแรงกระแทกสูงสุด นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณขี้เลื่อยที่เพิ่มขึ้นทำให้ความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลงเล็กน้อย

4.4.1.2 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100

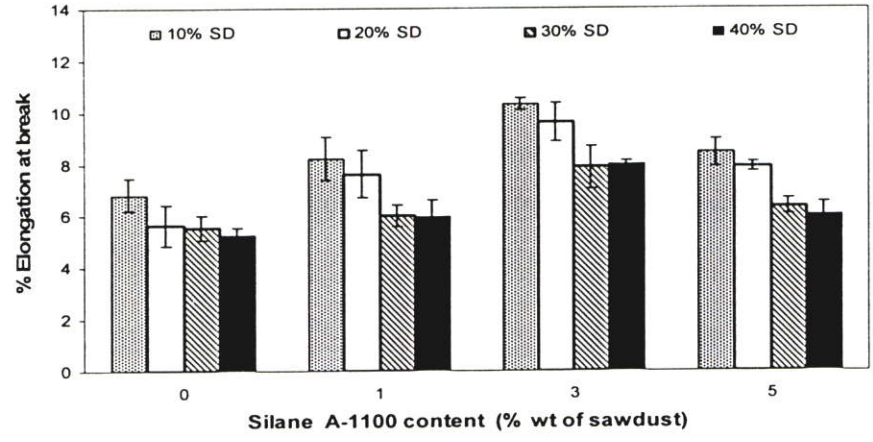
สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 โดยศึกษาที่อัตราส่วน PVC 100: LDPE 40: PA 20 15 %โดยน้ำหนักของ LDPE : ขี้เลื่อย 10 20 30 และ 40 %โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม และศึกษาปริมาณสารคู่ควบที่ปริมาณ 0 1 3 และ 5% โดยน้ำหนักของขี้เลื่อย ได้ผลดังนี้



(ก)



(ข)



(ค)

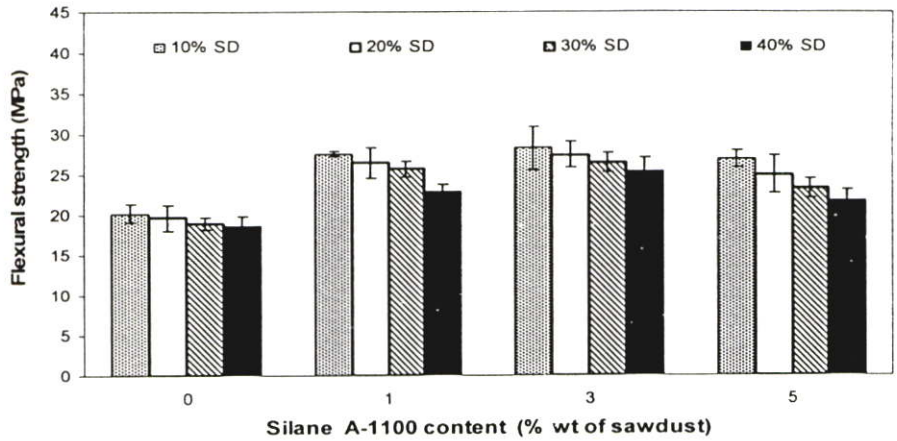
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านแรงดึงและปริมาณสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 (ก) มอดุลัส (ข) ความแข็งแรงดึง และ (ค) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด

จากรูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัส ความแข็งแรงดึง และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด กับปริมาณสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 พบว่าเมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 ทำให้สมบัติด้านแรงดึงมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ได้มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อย เนื่องจากเมื่อทำการปรับปรุงความแข็งแรงบริเวณพื้นผิวระหว่างวัฏภาคจะช่วยต้านทานการเสียรูปหรือการหลุดเลื่อนของสายโซ่เมื่อได้รับแรงดึงทำให้การเสียสภาพแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) เป็นไปได้ยากขึ้น เนื่องจากสายโซ่มีการเกี่ยวพันกันทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ยาก คือ มีความแข็ง (Stiffness) ค่ามอดุลัสจึงมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับค่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของ พอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกัน เนื่องจากการปรับปรุงการยึดติด (Adhesion) ระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ผสมกับขี้เลื่อยมีผลให้รอยตำหนิของชิ้นงานลดลง ดังนั้นเมื่อได้รับแรงดึงจึงสามารถส่งผ่านแรงได้อย่างต่อเนื่องสมบัติทางด้านแรงดึงจึงสูงขึ้น

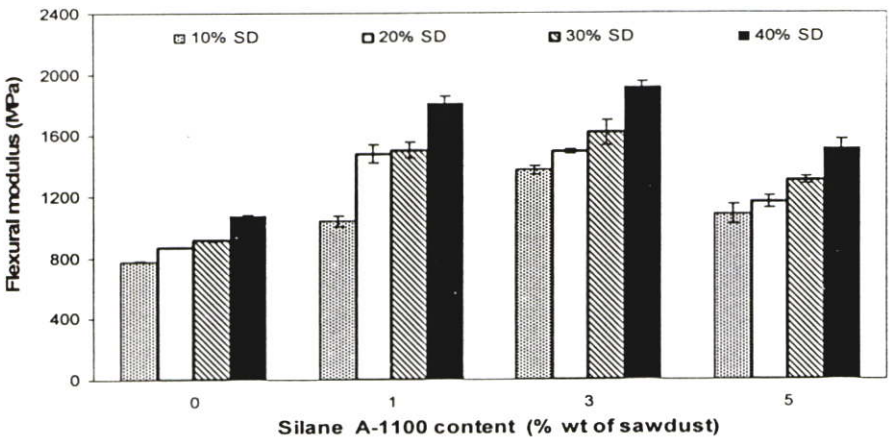
ในส่วนของปริมาณการใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 ในพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปริมาณสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 ที่ปริมาณ 1 3 และ 5 %โดยน้ำหนักของขี้เลื่อยพบว่าสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 ปริมาณ 3% มีผลให้ค่ามอดุลัส ความแข็งแรงดึง และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดสูงสุด ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137

ในส่วนของปริมาณขี้เลื่อยที่เพิ่มขึ้น พบว่าเมื่อปริมาณขี้เลื่อยเพิ่มขึ้นค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น เนื่องจากขี้เลื่อยมีค่ามอดุลัสสูงกว่าพอลิมอร์เมทริกซ์ เมื่อเติมปริมาณขี้เลื่อยเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สามารถเข้าไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของพอลิมอร์เมทริกซ์มากขึ้น ทำให้ความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของพอลิมอร์เมทริกซ์ลดลง ค่ามอดุลัสจึงเพิ่มขึ้น

สำหรับร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีปริมาณขี้เลื่อยเพิ่มขึ้น พบว่า มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากปริมาณขี้เลื่อยที่เพิ่มขึ้น ในส่วนของความแข็งแรงดึง มีแนวโน้มใกล้เคียงกันแม้ว่าจะเพิ่มปริมาณของขี้เลื่อย



(ก)

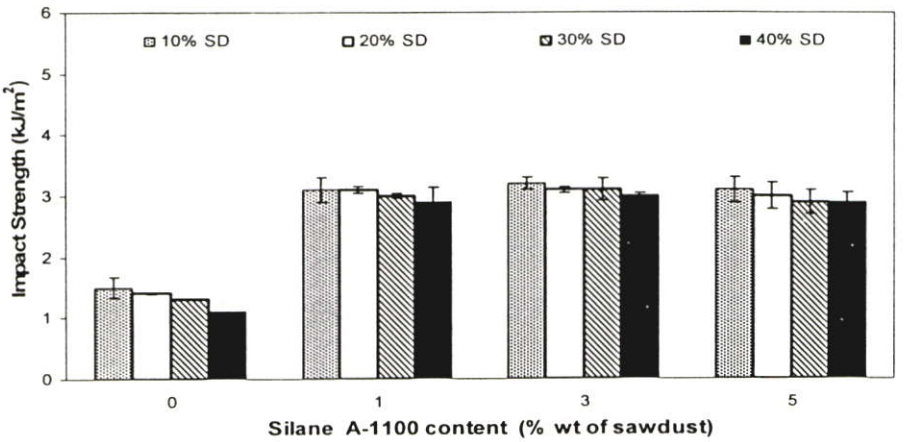


(ข)

รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านการโค้งงอและปริมาณสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 (ก) ความแข็งแรงโค้งงอ และ (ข) มอดุลัสโค้งงอ

จากรูปที่ 4.17 พบว่าสมบัติด้านการโค้งงอของพอลิเมอร์คอมโพสิตเป็นไปในแนวทางเดียวกับสมบัติด้านแรงดึง คือ เมื่อปรับปรุงด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 ทำให้มอดุลัสโค้งงอและความแข็งแรงโค้งงอมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อมีการปรับปรุงความแข็งแรงระหว่างวัฏภาค ทำให้เมื่อรับแรงกดสามารถกระจายแรงได้อย่างต่อเนื่อง สำหรับปริมาณการใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 พบว่ามีลักษณะเหมือนกับสมบัติด้านแรงดึง คือ ความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอมีค่าสูงสุดที่สารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 ปริมาณ 3 %โดยน้ำหนักขี้เลื่อย

สำหรับความแข็งแรงโค้งงอ ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีปริมาณขี้เลื่อยเพิ่มขึ้นพบว่ามีแนวโน้มลดลงเนื่องจากปริมาณขี้เลื่อยที่เพิ่มขึ้น ในส่วนของมอดุลัสโค้งงอ พบว่าเมื่อปริมาณขี้เลื่อยเพิ่มขึ้น ค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น

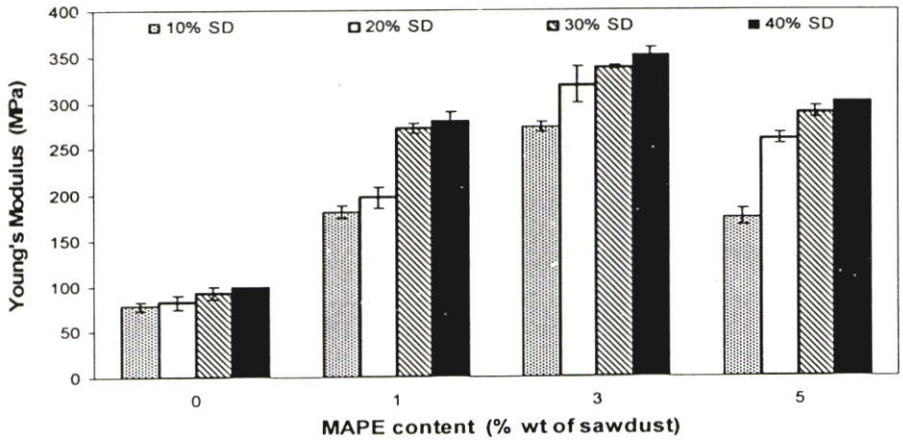


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกระแทกและปริมาณสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100

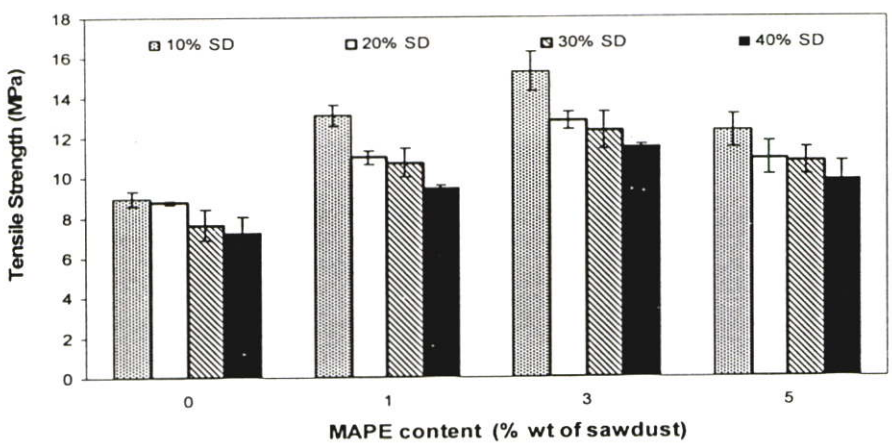
จากรูปที่ 4.18 พบว่าเมื่อปรับปรุงการยึดติดระหว่างวัฏภาคด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 ทำให้พอลิเมอร์คอมโพสิตสามารถถ่ายเทความเค้น (Stress transfer) ระหว่างรอยต่อวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสมได้ ทำให้ต้านทานแรงกระแทกได้ดีขึ้นเล็กน้อย โดยปริมาณสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 ที่ปริมาณต่าง ๆ ไม่มีผลต่อความแข็งแรงกระแทก และเมื่อปริมาณขี้เลื่อยเพิ่มขึ้น พบว่า ความแข็งแรงกระแทกมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย อธิบายได้เช่นเดียวกับ การเติมสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137

4.4.1.3 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสม MAPE

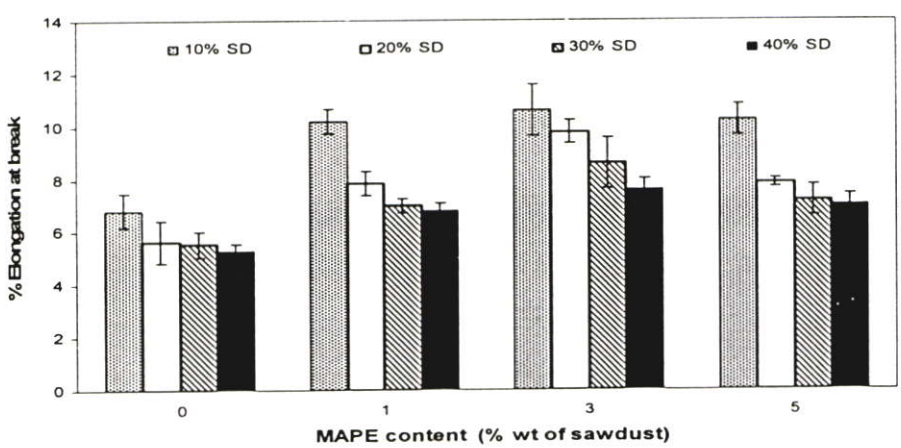
สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสม MAPE โดยศึกษาที่อัตราส่วน PVC 100: LDPE 40: PA 20 15 %โดยน้ำหนักของ LDPE : ขี้เลื่อย 10 20 30 และ 40 % โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม และศึกษาปริมาณสารคู่ควบที่ปริมาณ 0 1 3 และ 5% โดยน้ำหนักของขี้เลื่อย ได้ผลดังนี้



(ก)



(ข)

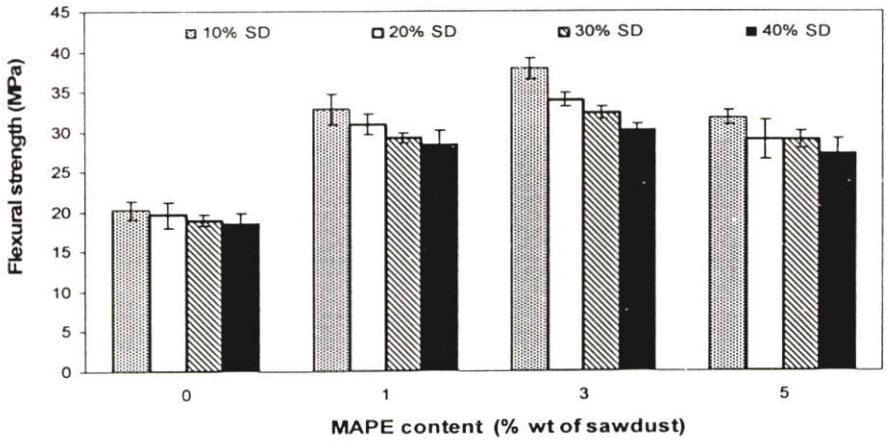


(ค)

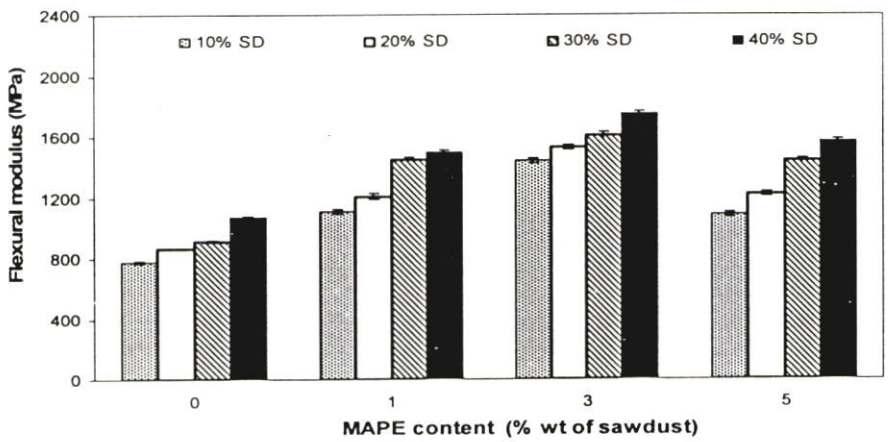
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านแรงดึงและปริมาณสารช่วยผสม MAPE (ก) มอดุลัส (ข) ความแข็งแรงดึง และ (ค) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด

จากรูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัส ความแข็งแรงดึง และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดกับปริมาณสารช่วยผสม MAPE พบว่าเมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารช่วยผสม MAPE ทำให้สมบัติด้านแรงดึงมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ได้มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อย อธิบายได้จากโครงสร้างของสารช่วยผสม MAPE ที่ประกอบด้วยหมู่แอนไฮดรายด์ซึ่งเป็นส่วนที่มีขั้ว และสายโซ่พอลิเอทิลีนซึ่งเป็นส่วนที่ไม่มีขั้ว เมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยทำให้หมู่แอนไฮดรายด์จากสารช่วยผสม MAPE ช่วยให้เกิดการยึดติดเชิงเคมี (Chemical bonding) ขึ้น โดยเกิดพันธะเอสเทอร์กับหมู่ไฮดรอกซิลของขี้เลื่อย และสายโซ่พอลิเอทิลีนในโมเลกุลของสารช่วยผสม MAPE สามารถเกิดการเกี่ยวพันกันระหว่างสายโซ่ (Chain entanglement) กับพอลิเอทิลีนในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มความแข็งแรงบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคของคอมโพสิต ช่วยลดรอยตำหนิที่เกิดขึ้นทำให้การถ่ายเทแรงจากเมทริกซ์ไปสู่เส้นใยมีประสิทธิภาพมากขึ้น สำหรับค่ามอดุลัส เป็นการศึกษาความต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างในช่วงยืดหยุ่น เป็นช่วงที่สายโซ่พอลิเมอร์สามารถคืนกลับรูปร่างเดิมได้เมื่อปล่อยแรง ซึ่งการปรับปรุงความแข็งแรงบริเวณพื้นผิวระหว่างวัฏภาคจะช่วยต้านทานการเสียรูปหรือการหลุดเลื่อนของสายโซ่เมื่อได้รับแรงดึงได้มากขึ้น ค่ามอดุลัสจึงเพิ่มขึ้นเมื่อเติมสารช่วยผสม MAPE ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีการปรับปรุงความแข็งแรงบริเวณพื้นผิวระหว่างวัฏภาค

นอกจากนี้สารช่วยผสม MAPE ปริมาณ 3% มีผลให้ค่ามอดุลัส ความแข็งแรงดึง และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดสูงสุด เมื่อปริมาณขี้เลื่อยเพิ่มขึ้น พบว่าค่ามอดุลัสมีแนวโน้มสูงขึ้น สำหรับความแข็งแรงดึงและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์คอมโพสิต มีแนวโน้มลดลง



(ก)



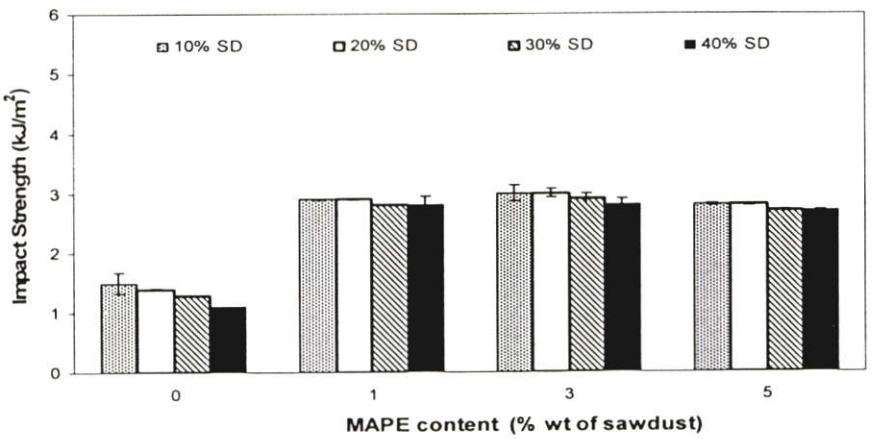
(ข)

รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านการโค้งงอและปริมาณสารช่วยผสม MAPE (ก) ความแข็งแรงโค้งงอ และ (ข) มอดุลัสโค้งงอ

จากรูปที่ 4.20 พบว่าสมบัติด้านการโค้งงอของพอลิเมอร์คอมโพสิตเป็นไปในแนวทางเดียวกับสมบัติด้านแรงดึง คือ เมื่อปรับปรุงด้วยสารช่วยผสม MAPE ทำให้มอดุลัสโค้งงอและความแข็งแรงโค้งงอมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อมีการปรับปรุงความแข็งแรงระหว่างวัฏภาค ทำให้เมื่อรับแรงกดสามารถกระจายแรงได้อย่างต่อเนื่อง สารช่วยผสม MAPE ช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนรูปของคอมโพสิตเมื่อได้รับแรงกดมากขึ้น อธิบายได้จากโครงสร้างของสารช่วยผสม MAPE ซึ่งมีหมู่แอนไฮดรายด์ที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของขี้เลื่อยเกิดเป็นพันธะเอสเทอร์บริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคช่วยลดรอยตำหนิหรือช่องว่าง (Void) บริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคได้ดีขึ้น การปรับปรุงพื้นผิวขี้เลื่อยทำให้พอลิเมอร์คอมโพสิตมีความแข็งแรงมากขึ้นจึงสามารถทนต่อการรับแรงกดเพื่อให้เกิดการเสียรูปได้ดียิ่งขึ้น

สำหรับสารช่วยผสม MAPE ปริมาณ 3% มีผลให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอ ค่ามอดุลัสโค้งงอสูงสุด และความแข็งแรงโค้งงอ ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีปริมาณขี้เลื่อยเพิ่มขึ้นพบว่า

มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากปริมาณขี้เลื่อยที่เพิ่มขึ้น ในส่วนของมอดุลัสโค้งงอ พบว่าเมื่อปริมาณขี้เลื่อยเพิ่มขึ้น ค่ามอดุลัสโค้งงอเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกระแทกและปริมาณสารช่วยผสม MAPE

จากรูปที่ 4.21 พบว่าเมื่อปรับปรุงการยึดติดระหว่างวัฏภาคด้วยสารช่วยผสม MAPE ทำให้พอลิเมอร์คอมโพสิตสามารถถ่ายเทความเค้น (Stress transfer) ระหว่างรอยต่อวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสมได้ ทำให้ต้านทานแรงกระแทกได้ดีขึ้นเล็กน้อย โดยปริมาณสารช่วยผสม MAPE ที่ปริมาณต่าง ๆ ไม่มีผลต่อความแข็งแรงกระแทก เมื่อปริมาณขี้เลื่อยเพิ่มขึ้นพบว่าความแข็งแรงกระแทกมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เนื่องจากผลของสารช่วยผสม PA 20 มีอิทธิพลมากกว่าผลของขี้เลื่อย ซึ่งอธิบายได้เช่นเดียวกับ การปรับปรุงด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137

จากการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 สารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 และสารช่วยผสม MAPE สามารถแสดงสมบัติเชิงกลได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิต (PVC 100: LDPE 40: PA20 15%: SD 30%) เมื่อปรับปรุงด้วยสารคู่ควบชนิดและปริมาณต่าง ๆ กันโดยเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อย

Mechanical properties	0 %	A-137			A-1100			MAPE		
		1%	3%	5%	1%	3%	5%	1%	3%	5%
Young's modulus (MPa)	92	270	284	268	247	271	252	272	**338**	289
Tensile strength (MPa)	7.6	11.7	11.7	9.6	8.3	10.0	8.3	10.7	**12.3**	10.8
%Elongation at break	5.6	7.2	**8.8**	7.3	6.0	7.9	6.4	7.0	8.6	7.7
Flexural strength (MPa)	19.0	28.9	28.5	27.0	25.7	26.5	23.3	29.2	**32.4**	29.0
Flexural modulus (MPa)	914	1234	1568	1262	1153	1351	1201	1451	**1607**	1439
Impact strength (kJ/m^2)	1.3	3.1	**3.2**	3.0	3.0	3.1	2.9	2.8	2.9	2.7

ตารางที่ 4.6 แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตอัตราส่วน PVC 100: LDPE 40: PA20 15% ปริมาณขี้เลื่อย 30 %โดยน้ำหนักพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงด้วยสารคู่ควบทั้ง 3 ชนิด คือ สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 สารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 และสารช่วยผสม MAPE พบว่าการปรับปรุงด้วยสารคู่ควบทั้ง 3 ชนิดทำให้สมบัติเชิงกลมีค่าสูงขึ้นซึ่งดูได้จากการศึกษา

ลักษณะสัณฐานวิทยาที่พบว่าเกิดการปกคลุมพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยพอลิเมอร์ (Wetting) แสดงถึงความสามารถในการยึดเกาะกันระหว่างวัฏภาคของขี้เลื่อยกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่เพิ่มขึ้น โดยพบว่าเมื่อปริมาณสารคู่ควบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สมบัติเชิงกลสูงขึ้น และหลังจากนั้นสมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณสารคู่ควบสูงขึ้น ซึ่งดูได้จากตารางที่ 4.6 ซึ่งพบว่าการใช้สารคู่ควบที่ปริมาณ 3 % โดยน้ำหนักขี้เลื่อยให้สมบัติเชิงกลดีที่สุดและลดลง เมื่อมีการใช้สารคู่ควบที่ปริมาณ 5 %โดยน้ำหนักขี้เลื่อย เนื่องจากเมื่อปริมาณสารคู่ควบไซเลนสูงขึ้น สารคู่ควบไซเลนสามารถเกิด self condensation ได้ทำให้ได้โครงสร้างของพอลิไซลอกเซน ซึ่งพอลิไซลอกเซนจะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (Lubicant) ทำให้สมบัติเชิงกลต่ำลง [37] ส่วนในกรณีของสารช่วยผสม MAPE เมื่อปริมาณเพิ่มขึ้น สารช่วยผสม MAPE สามารถจับตัวรวมกันเป็นกลุ่มก้อนทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสมกับสารช่วยผสม MAPE ทำให้เกิดเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงานทำให้สมบัติเชิงกลต่ำลง [41]

เมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยโดยใช้สารคู่ควบทั้ง 3 ชนิด พบว่าการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยโดยใช้การสารช่วยผสม MAPE และสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 ให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าการใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 เนื่องจากโครงสร้างของสารคู่ควบไซเลนที่ต่างกันทำให้เกิดปฏิกิริยาและอันตรกิริยาที่ต่างกัน

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 และสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 พบว่า สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 ให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าการใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 เนื่องจากความสัมพันธ์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นได้ระหว่างพอลิเมอร์คอมโพสิตและสารคู่ควบไซเลนที่แสดงดังรูปที่ 4.1 (ก) และ (ข) พบว่า สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 เป็นสารคู่ควบไซเลนชนิดไฮโดรคาร์บอนไซเลน ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่ไม่มีขั้วซึ่งมีโครงสร้างเป็นไฮโดรคาร์บอน สามารถที่จะไปเกิดการเกี่ยวพันกับสายโซ่ (Chain entanglement) ของพอลิเอทิลีนในพอลิเมอร์ผสม และส่วนที่มีขั้วซึ่งมีโครงสร้างเป็น $(-Si-OCH_2CH_3)_3$ สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่หมู่เอทอกซี ($-OCH_2CH_3$) ได้เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีหมู่ไซลานอล 3 หมู่ ($-SiOH$) สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของขี้เลื่อยได้ ส่วนสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 เป็นสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโนไซเลน โครงสร้างของสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 ประกอบด้วยส่วนที่มีขั้วทั้ง 2 ส่วน คือ มีโครงสร้างเป็นหมู่อะมิโนสามารถเกิดการยึดกันโดยความมีขั้ว (Dipole-dipole interaction) กับ พอลิไวนิลคลอไรด์ของพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากสภาพขั้ว และหมู่ $(-Si-OCH_2CH_3)_3$ โดยหมู่เอทอกซี ($-OCH_2CH_3$) สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีหมู่ไซลานอล 3 หมู่ ($-SiOH$) สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของขี้เลื่อยได้ แต่เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยส่วนที่มีขั้วทั้งสองส่วนทำให้โอกาสที่สารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 จะสามารถเกิดการยึดเกาะกับพอลิเอทิลีนในพอลิเมอร์ผสม ซึ่งไม่มีขั้วได้น้อยกว่าสารคู่ควบไซเลน

ชนิด A-137 ทำให้สมบัติเชิงกลของ พอลิเมอร์คอมโพสิตต่ำกว่าการใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 และสารช่วยผสม MAPE พบว่า สารช่วยผสม MAPE ให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าการใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 เนื่องจากความสัมพันธ์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นได้ระหว่างพอลิเมอร์คอมโพสิตและสารคู่ควบที่แสดงดังรูปที่ 4.1 (ก) และ (ค) พบว่า สารช่วยผสม MAPE ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ มาเลอิกแอนไฮดรายด์ ซึ่งเป็นส่วนที่มีขั้วสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของขี้เลื่อยเกิดเป็นพันธะเอสเทอร์ (Ester linkages) บริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาค และมีสายโซ่พอลิเอทิลีนที่เป็นส่วนที่ไม่มีขั้ว ซึ่งมีโครงสร้างเหมือนกับพอลิเอทิลีนในพอลิเมอร์ผสม ทำให้สามารถเกิดการเกี่ยวพันกันระหว่างสายโซ่ (Chain entanglement) กับสายโซ่พอลิเอทิลีนในพอลิเมอร์ผสม ซึ่งพันธะเอสเทอร์ (Ester linkages) ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคเป็นพันธะที่มีความแข็งแรงมากกว่าพันธะไฮโดรเจนที่เกิดในสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 และโครงสร้างของสารช่วยผสม MAPE มีสายโซ่ของพอลิเอทิลีนที่ยาวกว่าหมู่ไฮโดรคาร์บอนในสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 ทำให้การเกี่ยวพันกันระหว่างสายโซ่ (Chain entanglement) ของสารช่วยผสม MAPE มีความแข็งแรงมากกว่า ส่งผลให้การใช้สารช่วยผสม MAPE มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าการใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137

ผลการศึกษาถึงอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารคู่ควบที่ต่าง ๆ กันต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง PVC 100: LDPE 40: PA20 15% และขี้เลื่อยที่ปริมาณ 10 20 30 และ 40 % สรุปได้ว่าการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยโดยสารคู่ควบทั้ง 3 ชนิดทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตสูงขึ้นกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อย โดยสารช่วยผสม MAPE และสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 ให้สมบัติเชิงกลสูงกว่าการใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 และสารคู่ควบที่ปริมาณ 3 %โดยน้ำหนักขี้เลื่อยให้สมบัติเชิงกลดีที่สุดและมีแนวโน้มลดลง เมื่อมีการใช้สารคู่ควบที่ปริมาณ 5 %โดยน้ำหนักขี้เลื่อย และในหัวข้อ 4.4.2 ได้ทำการศึกษาต่อถึงผลของการใช้สารคู่ควบผสมทั้งสองชนิด ที่อัตราส่วนต่าง ๆ กัน ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต

4.4.2 การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบผสม

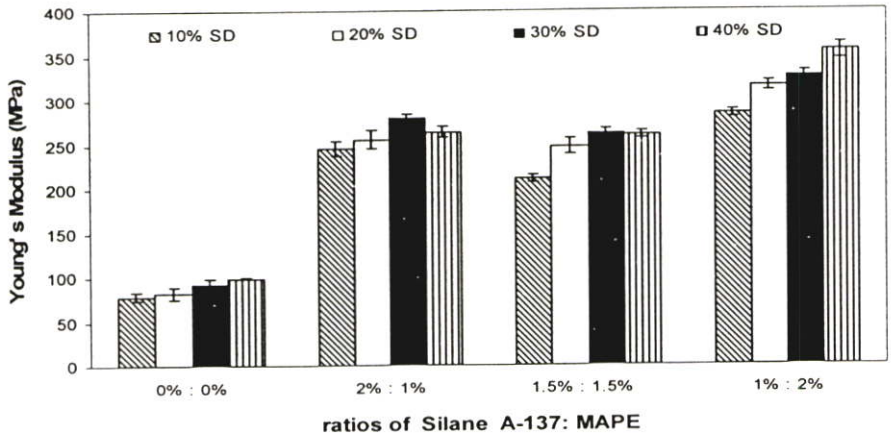
ในหัวข้อนี้เป็นผลการศึกษาการใช้สารคู่ควบ 2 ชนิดร่วมกัน ระหว่างสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 กับสารช่วยผสม MAPE (A-137: MAPE) และสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 กับสารช่วยผสม MAPE (A-1100: MAPE) ในสัดส่วนต่าง ๆ กันเพื่อปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อย โดยใช้ปริมาณสารคู่ควบผสมที่ 3 %โดยน้ำหนักของขี้เลื่อย ซึ่งเป็นปริมาณสารคู่ควบที่ให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด ศึกษาที่อัตราส่วน 2:1 (2%:1%) 1:1 (1.5%:1.5%) และ1:2 (1%:2%) โดยจะศึกษาขี้เลื่อยที่ปริมาณ 10 20 30 และ 40 %โดยน้ำหนักพอลิเมอร์ผสม ได้ผลการทดลองดังนี้

4.4.2.1 การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วย A-137: MAPE

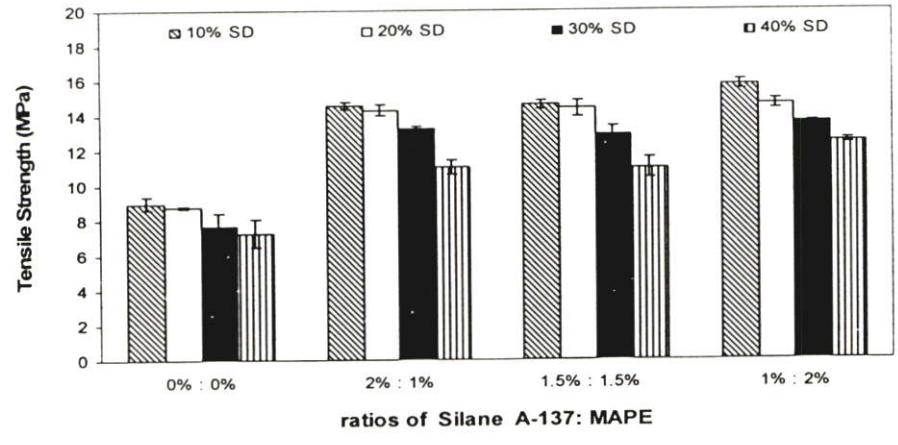
สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบผสมระหว่าง A-137: MAPE โดยศึกษาที่อัตราส่วน PVC 100: LDPE 40: PA 20 15 % ขี้เลื่อย 10 20 30 และ 40 % โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม และศึกษาที่อัตราส่วน 2:1 (2%:1%) 1:1 (1.5%:1.5%) และ 1:2 (1%:2%) ได้ผลดังนี้

รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัส ความแข็งแรงดึง และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด กับสารคู่ควบผสม ไซเลน A-137: MAPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าเมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมที่อัตราส่วนต่าง ๆ ทำให้สมบัติด้านแรงดึงมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ได้มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.4.1 ที่เมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยโดยใช้สารคู่ควบชนิดเดียว มีผลให้สมบัติด้านแรงดึงมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ได้มีการปรับปรุง นอกจากนี้การใช้สารคู่ควบ 2 ชนิดในการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อย ทำให้โอกาสที่วัฏภาคระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์กับขี้เลื่อยสามารถเข้ากันได้มีมากขึ้นเนื่องจากทั้งสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 และสารช่วยผสม MAPE สามารถเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์เมทริกซ์และขี้เลื่อยได้ทั้งคู่ ทำให้วัฏภาคทั้งสองสามารถเข้ากันได้มากขึ้น ทำให้สมบัติด้านแรงดึงมีค่าสูงขึ้นกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ได้มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อย

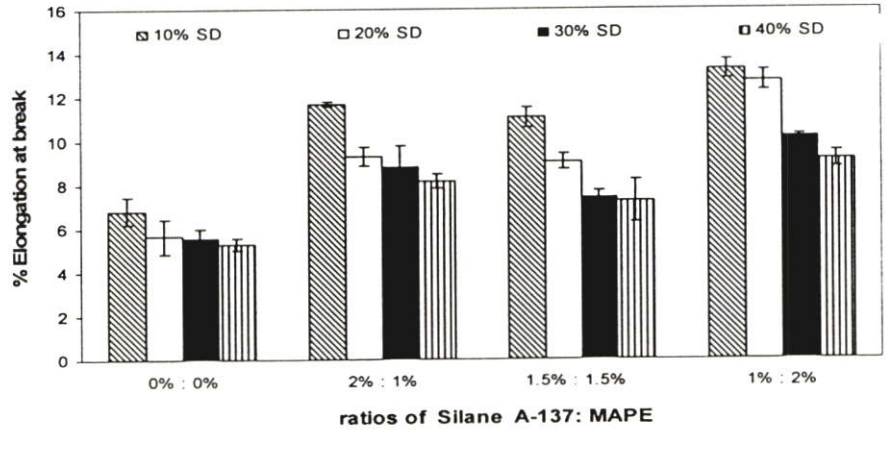
ในส่วนของสารคู่ควบผสมไซเลน A-137: MAPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าที่อัตราส่วน 1:2 (1%:2% A-137: MAPE) ให้สมบัติด้านแรงดึงสูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากหัวข้อที่ 4.4.1 โดยพบว่าการใช้สารช่วยผสม MAPE ในการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยให้ค่าสมบัติเชิงกลสูงสุด ทำให้เมื่อปริมาณการใช้สารช่วยผสม MAPE เพิ่มขึ้น สมบัติด้านแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตสูงขึ้น ส่วนปริมาณขี้เลื่อยที่เพิ่มขึ้นให้ผลในทำนองเดียวกันกับการใช้สารคู่ควบชนิดเดียว



(ก)

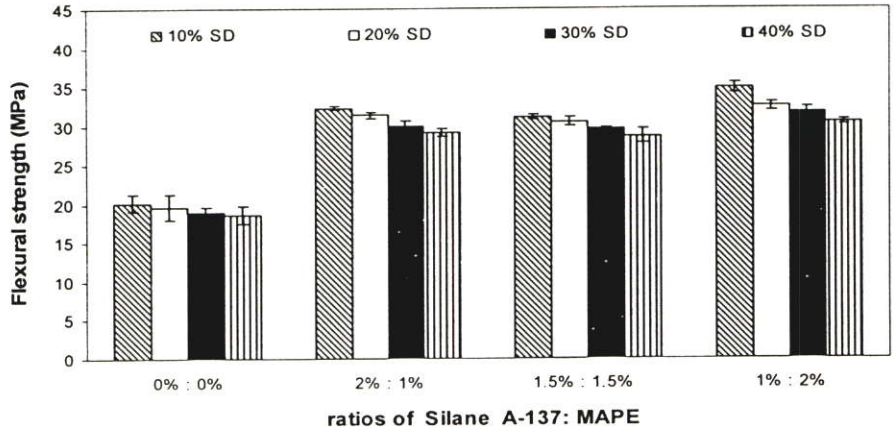


(ข)

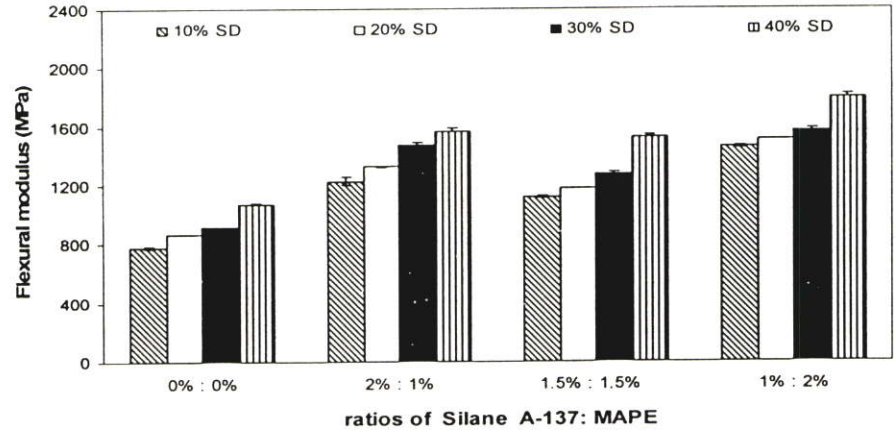


(ค)

รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านแรงดึงและสารคู่ควบผสมไซเลน A-137: MAPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ (ก) มอดุลัส (ข) ความแข็งแรงดึง และ(ค) ร้อยละการดึงยืดณ จุดขาด



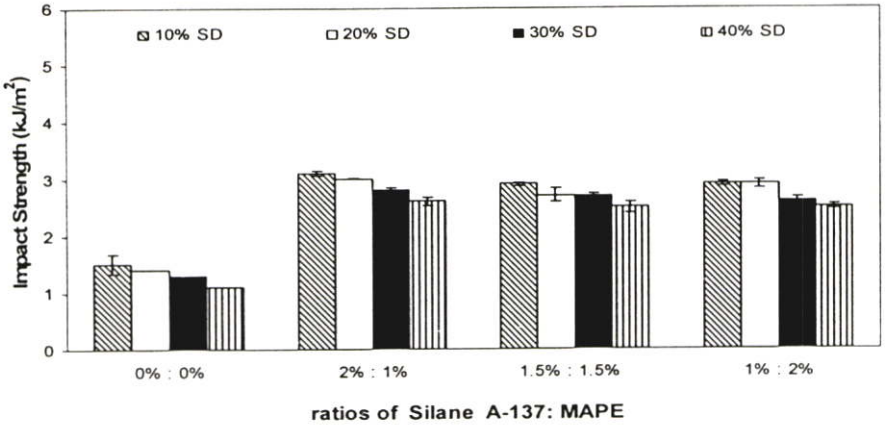
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านการโค้งงอและสารคู่ควบผสมไซเลน A-137: MAPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ (ก) ความแข็งแรงโค้งงอ และ (ข) มอดุลัสโค้งงอ

จากรูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงโค้งงอ มอดุลัสโค้งงอ กับปริมาณสารคู่ควบผสม ไซเลน A-137: MAPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าเมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมที่อัตราส่วนต่าง ๆ ทำให้สมบัติด้านการโค้งงอมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ได้มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อย ในส่วนของสารคู่ควบผสมไซเลน A-137: MAPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าที่อัตราส่วน 1:2 (1%:2% A-137: MAPE) ให้สมบัติด้านการโค้งงอสูงที่สุด



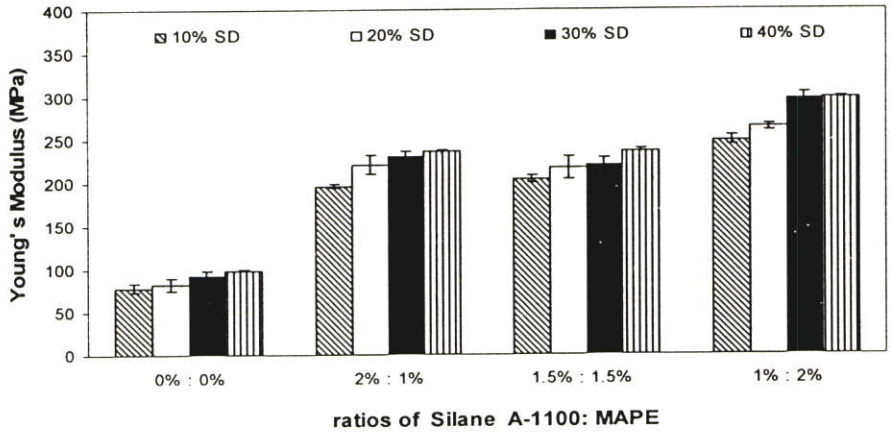
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกระแทกและสารคู่ควบผสมไซเลน A-137: MAPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกระแทกกับปริมาณสารคู่ควบผสมไซเลน A-137: MAPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าเมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมที่อัตราส่วนต่าง ๆ ทำให้สมบัติความแข็งแรงกระแทกมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ได้มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อย

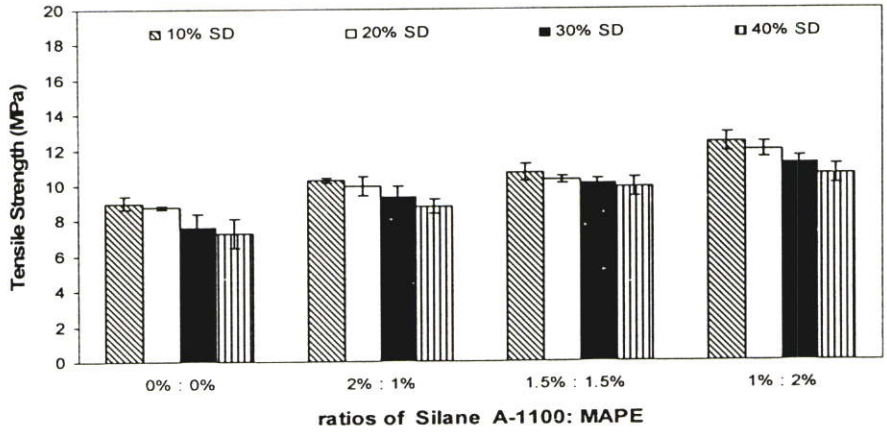
ในส่วนของสารคู่ควบผสมไซเลน A-137: MAPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าความแข็งแรงกระแทกที่อัตราส่วนต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าปริมาณการเติมสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 หรือสารช่วยผสม MAPE เพิ่มขึ้นในสารคู่ควบผสมไม่มีอิทธิพลต่อสมบัติความแข็งแรงกระแทก เนื่องจากมีค่าใกล้เคียงกัน

4.4.2.2 การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วย A-1100: MAPE

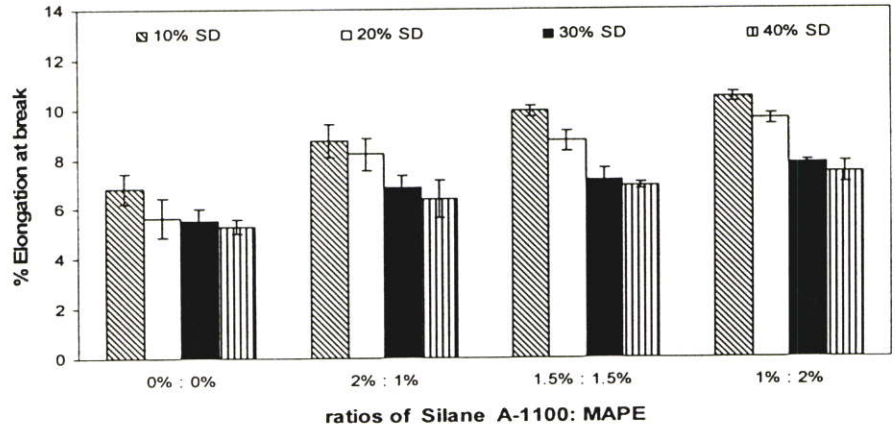
สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบผสมระหว่างไซเลน A-1100: MAPE โดยศึกษาที่อัตราส่วน PVC 100: LDPE 40: PA 20 15% ขี้เลื่อย 10 20 30 และ 40 %โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม และศึกษาที่อัตราส่วน 2:1 (2%:1%) 1:1 (1.5%:1.5%) และ1:2 (1%:2%) ได้ผลดังนี้



(ก)



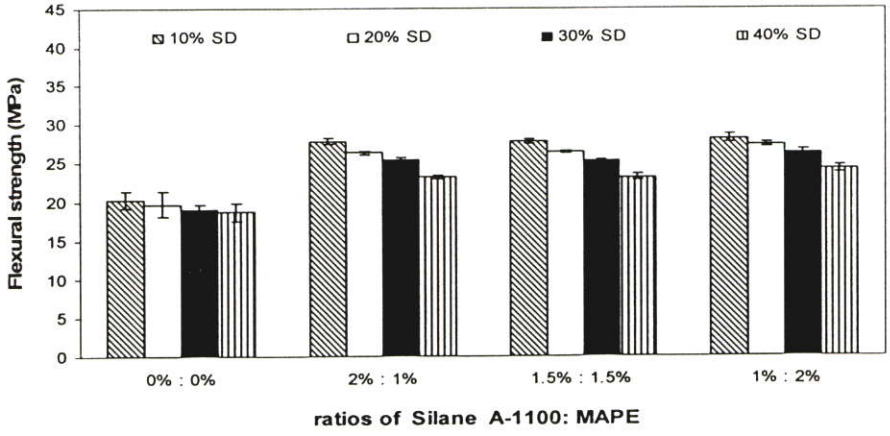
(ข)



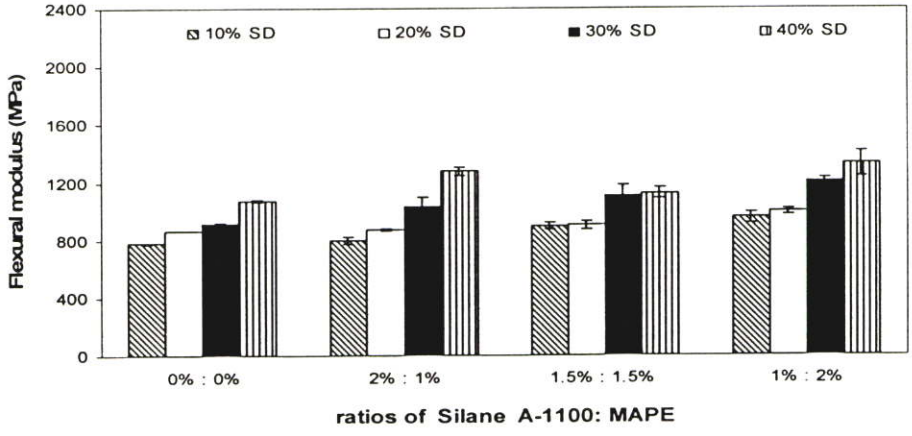
(ค)

รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านแรงดึงและสารคู่ควบผสมไซเลน A-1100: MAPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ (ก) มอดุลัส (ข) ความแข็งแรงดึง และ(ค) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด

จากรูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัส ความแข็งแรงดึง และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดกับสารคู่ควบผสมไซเลน A-1100: MAPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าเมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมไซเลนที่อัตราส่วนต่าง ๆ ทำให้สมบัติด้านแรงดึงมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ได้มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.4.2.2 โดยที่อัตราส่วน 1:2 (1%:2% A-1100: MAPE) ให้สมบัติด้านแรงดึงสูงที่สุด



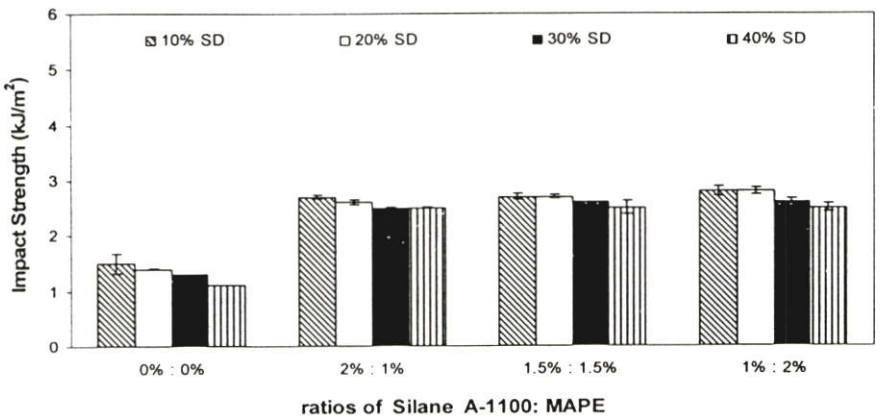
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านการโค้งงอและสารคู่ควบผสมไซเลน A-1100: MAPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ (ก) ความแข็งแรงโค้งงอ และ (ข) มอดุลัสโค้งงอ

จากรูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงโค้งงอ มอดุลัสโค้งงอ กับปริมาณสารคู่ควบผสมไซเลน A-1100: MAPE พบว่าเมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วย สารคู่ควบผสมไซเลน A-1100: MAPE ทำให้สมบัติด้านการโค้งงอมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ได้มีการปรับปรุงโดยที่อัตราส่วนต่าง ๆ กันของสารคู่ควบผสมไซเลนให้สมบัติด้านการโค้งงอใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกระแทกและสารคู่ควบผสมไซเลน A-1100: MAPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกระแทกกับกับปริมาณสารคู่ควบผสมไซเลน A-1100: MAPE พบว่าเมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วย สารคู่ควบผสมไซเลน A-1100: MAPE ทำให้ความแข็งแรงกระแทกมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ได้มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อย โดยที่อัตราส่วนต่าง ๆ กันของสารคู่ควบผสมไซเลนให้ความแข็งแรงกระแทกใกล้เคียงกัน

จากการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์พอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้สารคู่ควบผสมระหว่าง A-137: MAPE และA-1100: MAPE สามารถแสดงสมบัติเชิงกลได้ดังตารางที่ 4.7 และ 4.8

ตารางที่ 4.7 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตเมื่อปรับปรุงด้วยสารคู่ควบผสมระหว่าง A-137: MAPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ กัน

Mechanical properties	**PVC : LDPE : PA20 : SD 30 % สัดส่วน A-137 : MAPE**					
	0:0	**1:0**	**0:1**	**1:1**	**1:2**	**2:1**
Young's modulus (MPa)	92	284	338	262	**327**	279
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)	914	1568	1607	1277	**1567**	1476
Impact strength (kJ/m^2)	1.3	3.2	2.9	2.7	**2.6**	2.8

จากตารางที่ 4.7 ผลของการศึกษาสมบัติเชิงกลที่มีต่อพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารคู่ควบผสมระหว่าง A-137: MAPE พบว่าการใช้สารคู่ควบผสมให้ค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ที่สูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ได้มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อย และยังพบว่าการใช้สารคู่ควบผสมให้ค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ใกล้เคียงกับพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อย

โดยใช้สารคู่ควบชนิดเดียว ยกเว้นค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ที่มีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยโดยใช้สารคู่ควบชนิดเดียว นอกจากนี้ในอัตราส่วนต่าง ๆ ของสารคู่ควบผสมพบว่า ปริมาณการเติมสารช่วยผสม MAPE มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกล ส่งผลให้ที่อัตราส่วน 1:2 (1%:2% A-137:MAPE) ให้สมบัติเชิงกลสูงสุด เนื่องจากมีปริมาณสารช่วยผสม MAPE 2 ส่วน ซึ่งอธิบายได้จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่าง สารช่วยผสม MAPE กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ และขี้เลื่อย

ตารางที่ 4.8 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตเมื่อปรับปรุงด้วยสารคู่ควบผสมระหว่าง A-1100: MAPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ กัน

Mechanical properties	**PVC : LDPE : PA20 : SD 30 % สัดส่วน A-1100 : MAPE**					
	0:0	**1:0**	**0:1**	**1:1**	**1:2**	**2:1**
Young's modulus (MPa)	92	271	338	221	**297**	231
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)	914	1351	1607	1103	**1205**	1028
Impact strength (kJ/m^2)	1.3	3.1	2.9	2.6	**2.6**	2.5

จากตารางที่ 4.8 ผลของการศึกษาสมบัติเชิงกลที่มีต่อพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารคู่ควบผสมระหว่าง A-1100: MAPE พบว่าการใช้สารคู่ควบผสมให้ค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ที่สูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ได้มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อย ยังพบว่าการใช้สารคู่ควบผสมให้ค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ใกล้เคียงกับพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยโดยใช้สารคู่ควบชนิดเดียว นอกจากนี้ในอัตราส่วนต่าง ๆ ของสารคู่ควบผสมพบว่า ปริมาณการเติมสารช่วยผสม MAPE มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกลส่งผลให้ที่อัตราส่วน 1:2 (1%:2% A-1100: MAPE) ให้สมบัติเชิงกลสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาสมบัติเชิงกลโดยใช้สารคู่ควบชนิดเดียว

เมื่อมีการการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยโดยใช้สารคู่ควบผสม พบว่าการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยโดยใช้สารคู่ควบผสม A-137: MAPE ให้สมบัติเชิงกลดีที่กว่า การใช้ A-1100: MAPE เนื่องจากโครงสร้างของสารคู่ควบไซเลนที่ต่างกัน ทำให้เกิดอันตรกิริยาที่ต่างกัน โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นได้ระหว่างพอลิเมอร์คอมโพสิต และสารคู่ควบได้ดังรูปที่ 4.2 (ก) และ (ข) กลไกที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมไซเลน A-137:MAPE พบว่าสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 สามารถเกิดการเกี่ยวพัน (Chain entanglement) กับพอลิเอทิลีนในพอลิเมอร์ผสม และมีหมู่ไซลานอล 3 หมู่ (-Si$\dot{}$OH) สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของขี้เลื่อยได้ และในส่วนของสารช่วยผสม MAPE มีมาเลอิกแอนไฮดรายด์ ซึ่งเป็นส่วนที่มีขั้วสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของขี้เลื่อยเกิดเป็นพันธะเอสเทอร์ (Ester linkages) และมีสายโซ่พอลิเอทิลีที่เป็นส่วนที่ไม่มีขั้ว เกิดการเกี่ยวพันกันระหว่างสายโซ่ (Chain entanglement) กับพอลิเอทิลีนในพอลิเมอร์ผสม ส่วนกลไกที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมไซเลน A-1100:MAPE พบว่าสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 สามารถเกิดการยึดกันโดยความมีขั้ว (Dipole-dipole interaction) กับพอลิไวนิลคลอไรด์ของพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากสภาพขั้ว และมีหมู่ไซลานอล 3 หมู่ (-Si$\dot{}$OH) สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของขี้เลื่อย ในส่วนของสารช่วยผสม MAPE จะเกิดเป็นพันธะเอสเทอร์ (Ester linkages) กับขี้เลื่อย และเกิดการเกี่ยวพันกันระหว่างสายโซ่ (Chain entanglement) กับพอลิเอทิลีนในพอลิเมอร์ผสม แต่เนื่องจากในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [5] ซึ่งอธิบายได้ว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และLDPE ไม่เกิดการต่อกิ่ง (Graft) หรือไม่เกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างพอลิเมอร์ผสม โดย LDPE จะเกิดการห่อหุ้ม PVC ไว้ ทำให้โอกาสที่สารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยากับ PVC มีโอกาสเกิดปฏิกิริยาได้น้อยกว่าการใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยากับ LDPE ทำให้การใช้สารคู่ควบผสมไซเลน A-1100: MAPE ให้สมบัติเชิงกลต่ำกว่าการใช้สารคู่ควบผสมไซเลน A-137: MAPE

นอกจากนี้ในอัตราส่วนต่าง ๆ ของสารคู่ควบผสมพบว่า ปริมาณการเติมสารช่วยผสม MAPE มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกลมากกว่าการใช้สารคู่ควบไซเลน เนื่องจากสารช่วยผสม MAPE สามารถเกิดพันธะเอสเทอร์ (Ester linkages) ซึ่งมีความแข็งแรงของพันธะมากกว่าพันธะไฮโดรเจนที่เกิดจากสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 ส่งผลให้ที่อัตราส่วน 1:2 (1%:2%) ให้สมบัติเชิงกลสูงกว่า 1:1 (1.5%:1.5%) และ 2:1 (2%:1%) ตามลำดับ เนื่องจากมีปริมาณสารช่วยผสม MAPE 2 ส่วนซึ่งอธิบายได้จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสารช่วยผสม MAPE กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ (PVC/LDPE) และขี้เลื่อย

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน PVC 100 : LDPE 40 phr ใช้สารช่วยผสมชนิด PA 20 15 % โดยน้ำหนักของ LDPE ปริมาณขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ศึกษา คือ 10 20 30 และ 40 %โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม โดยมีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้สารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) 2 ชนิด คือสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 (Octyltriethoxysilane) และสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 (γ-Aminopropyltriethoxysilane) และสารช่วยผสมชนิดมาเลอิกแอนไฮดรายด์กราฟต์พอลิเอทิลีน (Maleic anhydride-*g*-polyethylene, MAPE) คือ Fusabond ® MB100D มีค่า MFI 2 g/10 min ที่ปริมาณ 1 3 และ 5 %โดยน้ำหนักของขี้เลื่อย นอกจากนี้ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้สารคู่ควบผสมระหว่าง สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 กับสารช่วยผสม MAPE และสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 กับสารช่วยผสม MAPE ที่อัตราส่วน 2:1 (2%:1%) 1:1 (1.5%:1.5%) และ1:2 (1%:2%) ซึ่งสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. การศึกษาผลของการปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137, สารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 และสารช่วยผสม MAPE พบว่าสารคู่ควบทั้ง 3 ชนิด ทำให้สมบัติโดยรวมของพอลิเมอร์คอมโพสิตสูงขึ้น โดยที่ปริมาณสารคู่ควบ 3 %โดยน้ำหนักของขี้เลื่อยให้สมบัติเชิงกลสูงที่สุด

2. การปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยโดยใช้สารช่วยผสม MAPE ให้สมบัติเชิงกลสูงกว่าการใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 และสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 ตามลำดับ เนื่องจากอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสารคู่ควบทั้ง 3 กับพอลิเมอร์เมทริกซ์และขี้เลื่อยต่างกัน

3. การศึกษาผลของการใช้สารคู่ควบผสมในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต พบว่า สารคู่ควบผสมระหว่างไซเลน A-137: MAPE และไซเลน A-1100: MAPE ให้สมบัติเชิงกลสูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ได้มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อย โดยการใช้สารคู่ควบผสมระหว่างไซเลน A-137: MAPE ให้สมบัติเชิงกลสูงกว่าการใช้สารคู่ควบผสมระหว่างไซเลน A-1100: MAPE

4. การศึกษาปริมาณการใช้สารคู่ควบผสมที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าสมบัติเชิงกลจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติมสารช่วยผสม MAPE โดยที่อัตราส่วน 1:2 (1%:2%) ให้สมบัติเชิงกลสูงสุด

5. การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัว (T_d) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยเทคนิค TGA พบว่า T_d มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยโดยใช้สารคู่ควบทั้ง 3 ชนิด ส่วนการใช้

สารคู่ควบผสมที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า T_d มีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งให้ผลการทดลองที่เหมือนกับพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบชนิดเดียวและพบว่าที่อัตราส่วนต่าง ๆ ของสารคู่ควบผสมไม่มีผลต่อค่า T_d

6. การศึกษาอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ค่า E' (Storage modulus) และ E'' (Loss modulus) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยเทคนิค DMA พบว่า T_g มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบทั้ง 3 ชนิด และชนิดของสารคู่ควบไม่มีผลต่อ T_g ของพอลิเมอร์คอมโพสิต เมื่อพิจารณาจากค่า E' (Storage modulus) พบว่าค่า E' มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบทั้ง 3 ชนิด แสดงว่าสารคู่ควบสามารถสร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัฏภาคได้เพิ่มขึ้น ส่วนการใช้สารคู่ควบผสมที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า T_g มีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงและ E' มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งให้ผลการทดลองที่เหมือนกับพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบชนิดเดียว และพบว่าที่อัตราส่วนต่าง ๆ ของสารคู่ควบผสมไม่มีผลต่อค่า T_g

จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบช่วยเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างขี้เลื่อยและพอลิเมอร์เมทริกซ์ และเกิดปฏิกิริยาเคมีเชื่อมโยงระหว่างสารคู่ควบกับวัฏภาคทั้งสองช่วยเพิ่มการยึดเกาะบริเวณรอยต่อได้ ซึ่งช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการใช้สารคู่ควบที่มีลักษณะโครงสร้างทางเคมีที่มีหมู่อินทรีย์ (R) ที่แตกต่างกันออกไป เช่น หมู่ไวนิล หมู่คลอไรด์ เป็นต้น

2. เนื่องจากชิ้นงานคอมโพสิตที่ได้มีสีน้ำตาล อาจมีการศึกษาต่อไปถึงวิธีการปรับปรุงสีที่ได้ของพอลิเมอร์คอมโพสิต เช่น การกำจัดหรือเติมสีต่าง ๆ เพื่อประโยชน์ในการใช้งานของพอลิเมอร์คอมโพสิตได้หลากหลายต่อไป

3. ศึกษาสมบัติทางกายภาพ เช่น ร้อยละการดูดซับน้ำ ความทนทานต่อการทำลายของปลวก เป็นต้น

4. เปรียบเทียบสมบัติโดยรวมกับไม้คอมโพสิตที่ผลิตขายตามท้องตลาด

5. ศึกษาถึงราคาในการผลิตเปรียบเทียบกับไม้จริง

Output ที่ได้จากวิทยานิพนธ์

J. Prachayawarakorn, S. Khunsumled, C. Thongpin, A. Kositchaiyong and N. Sombatsompop, ***Property modification of Composites from Polymer Blends between Poly(vinyl chloride) and Low-Density polyethylene using sawdust (Hevea brasiliensis) as reinforcement***, Journal of applied Polymer Science, Submitted for publication.

S. Khunsumled, J. Prachayawarakorn, C. Thongpin, A. Kositchaiyong and N. Sombatsompop ***Property Modification of Composites between Poly(vinyl chloride)/Low-Density Polyethylene Polymer Blends Reinforced by Hevea brasiliensis Sawdust***, 1 st Polymer Graduate Conference of Thailand, Mahidol University Salaya Nakhonpathom, May 10-11, 2007

เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2549. **ไม้ยางพารา.** [Online]. Available : www.oae.go.th/statistic/export/1301PR.xls

[2] S.E. Selke and I. Wichman. 2004. "Wood fiber/polyolefin composites" *Composites: Part A* ; 35(3) : 321-326.

[3] Z.F. Fang, G.W. MA, B.Q. Shentu and C.W.Xu. 2000. "Influence of viscosity Ratio on Morphology of PVC/PE Blend " *Journal of European Polymer*; 36: 2309-2311

[4] วิวรรณ ธรรมมงคล. 2549. **พลาสติกรีไซเคิล.** [Online]. Available : http://kanchanapisek.or.th/kp11/articles/article-2.th.html

[5] จีราภรณ์ คำศรี. 2549. "สมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยใช้ขี้เลื่อยไม้ยางพาราเป็นสารเสริมแรง" *วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*

[6] Modern Plactic. 1994. **Plastic Handbook**. McGraw-Hill. USA

[7] D.R. Paul. and C.B. Bucknall. 2000. **Polymer Blends.** Vol.1. John Wiley & Sons. New York

[8] D.R. Paul. and C.B. Bucknall. 2000. **Polymer Blends.** Vol.2. John Wiley & Sons. New York

[9] อิทธิพล แจ้งชัด. 2544. **พอลิเมอร์คอมโพสิต.** กรุงเทพฯ : เอกสารประกอบคำสอนวิชาพอลิเมอร์คอมโพสิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[10] มาลินี ชัยศุภกิจสินธ์. 2543. **เคมีพอลิเมอร์.** พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง: 65-96

[11] F.L. Methews and R.D. Rawlings. 1994. *Composite Material : Engineering and Science.* CHAPMAN & HALL. London

[12] P.K. Mallich. 1993. **Fiber-reinforced Composites : Material, Manufacturing and Desing**. 2nd ed. Marcel Dekker. New York

[13] A.K. Blendzki and J.Gassan. 1999. "Composites reinforced with cellulose based fibers". *Progress in Polymer Science*; 24(2): 225-243.

[14] B.T. Astrom. 1997. **Manufacturing of Polymer Composites.** 1st ed. Chapman & Hall. London

[15] รุ่งอรุณ วัฒนวงศ์. 2545. **ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับกระดาษ.** กองการวิจัย กรมวิทยาศาสตร์บริการ

[16] S. Eero. 1993. **Wood Chemistry : Fundamentals and Applications.** 2nd ed. Academic Press . San diego

[17] W.B. Banks and J.M. Lawther. 1994. "Derivatization of Wood in Composition". *Cellulose* ***Polymers Blends and Composites.*** Hanser Publishers. New York

[18] J.I. Kroschwitz. 1990. **Encyclopedia of Polymer Science and Engineering.** 2nded. Vol. 6. John Wiley and Sons. New York.

[19] สุรชัย มัจฉาชีพ. 2535. **พืชเศรษฐกิจในประเทศไทย.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ. แพร่วิทยา

[20] วิชิต สุวรรณปรีชา. **ยางพารา.** สำนักงานกองทุนสงเคราะห์การทำสวนยาง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

[21] บัณฑิต ปิยะศิลป์. 2549. **ไม้ยางพารา.** [Online]. Available : **http://www.ThaiNGO.org**

[22] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2547. **สารปรับแต่งพอลิเมอร์.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ . บุ๊คเน็ท

[23] F.R. Jones. 1994. **Handbook of polymer-Composites**. Longman Scientific & Technical. London

[24] E.P. Plueddeman. 1991. **Silane Coupling Agents**. 2nd ed. Plenum. New York.

[25] L.A. Pothan, S. Thomas and G. Groeninckx. 2006. "The role of fibre/matrix interactions on the dynamic mechanical properties of chemically modified banana fibre/polyester composites". *Composites: Part A* ; 37(9) : 1260-1269.

[26] J.M. Antonucci, S.H. Dickens, B.O. Fowler, H.H.K. Xu and W.G. McDon. 2005. "Chemistry of Silanes: Interfaces in Dental Polymers and Composites". *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*; 110: 541-558.

[27] DuPont Polymer Modifiers. 2006. **Compatibilizers improve the value of blended or recycled polymers.** [Online]. Available : **www.dupont.com/industrial-polymer/plastic/polymers/fusabond.html**

[28] วรรณิยา ชาญณรงค์. 2545. "ผลของปริมาณไม้และพลาสติไซเซอร์ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตจากเส้นใยไม้ยางพาราและพีวีซี". *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*

[29] เกรียงไกร อารีพูนสิริ, นำโชค พิบูลย์ศิลป์ และหทัยกาญจน์ สราวรรณ. 2546. "วัสดุทดแทนไม้จากพอลิเมอร์คอมโพสิตพอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกและหญ้าแฝก". *โครงงานพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*

[30] กนิษฐา อังกุรรัชต์. 2546. "การศึกษาสมบัติของพอลิพรอพิลีนโดยใช้ขี้เลื่อยจากไม้เต็งนอกเป็นเป็นสารเสริมแรง." *วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*

[31] M.B. Fernanda, T.H.S. Costa and D.L. Carvalho. 1997. "Polypropylene-Wood Fiber Composites: Effect of Treatment and Mixing Conditions on Mechanical Properties". *Journal of Applied Polymer Science*; 65 :1227-1235.

[32] K.Rajeev, K.Mohan and N.Ramani. 1997. "Biofiber - Reinforced Polypropylene Composites". *Journal of Polymer Engineering and Science*; 37(2) :476-483.

[33] P.W. Balasuriya, L.Ye, Y.W.Mai and J.Wu. 2002. "Mechanical Properties of Wood Flake- Polyethylene Composites. ll. Interface Modification". *Journal of Applied Polymer Science*; 83 :2505-2521.

[34] A.C. Miller and J.C. Berg. 2003. "Effect of silane coupling agent adsorbate structure on adhesion performance with a polymeric matrix".*Composites: Part A*; *34(4)*: 327-332

[35] K.L. Pickering, A. Abdalla, A.G. Mcdonald and R.A. Franich. 2003. "The effect of silane coupling agents on radiate pine fibre for use in thermoplastic matrix composites". *Composites: Part A*; *34(10)*:915-926

[36] B.F. Abu-Sharkh and H. Hamid. 2004. "Degradaion study of date palm fibre/ polypropylene composites in natural and artificial weathering : mechanical and thermal analysis". *Polymer Degradation and Stability*; 85(3) : 967-975.

[37] N. Sombatsompop and K.Chaochanchaikul. 2005. "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 : 213-221.

[38] ASTM D 638. 1996. "Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastic (Metric)". *Philadephia : American Society for Testing and Materials.*

[39] ASTM D 790. 1996. "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials". *Philadephia*: *American Society for Testing and Materials.*

[40] ASTM D 256. 1996. "Standard Test Methods for Impact Resistance of Plastics and Electrical Insulating Materials". *Philadephia : American Society for Testing and Materials*

[41] A.K. Rana , A. Mandal, B.C. Mitra, R. Jacobson, R. Rowell,and A.N. Banerjee. 1997. "Short Jute Fiber-Reinforced Polypropylene Composits : Effect of Compatibilizer". *Journal of Applied Polymer Science*; 69 : 329-338

[42] Lin-Vien D., N.B. Colthup, W.G. Fateley, and J.G. Grasselli. 1999. **The Handbook of Infrared and Raman Characteristic Frequencies of Organic Molecules**. Academic Press. New York.

[43] K. Sirisinya and S. Chimdist. 2006. "Comparison of techniques for determining crosslinking in silane-water crosslinked materials". *Polymer Testing*; 25: 518-526

[44] M. Kazayawoko, J.J. Balatinecz and R.T. Woodhams. 1997. "Diffuse Reflectance Fourier Transform Infrared Spectra of Wood Fibers Treated with Maleated Polypropylenes". *Journal of Applied Polymer Science*; 66: 1163-1173.

[45] แม้น อมรสิทธิ์และอมร เพชรสม.2539. **หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ.** กรุงเทพฯ. ชวนพิมพ์

[46] ปิ่นสุภา ปีติรักษ์สกุล. 2545. **การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์**. ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

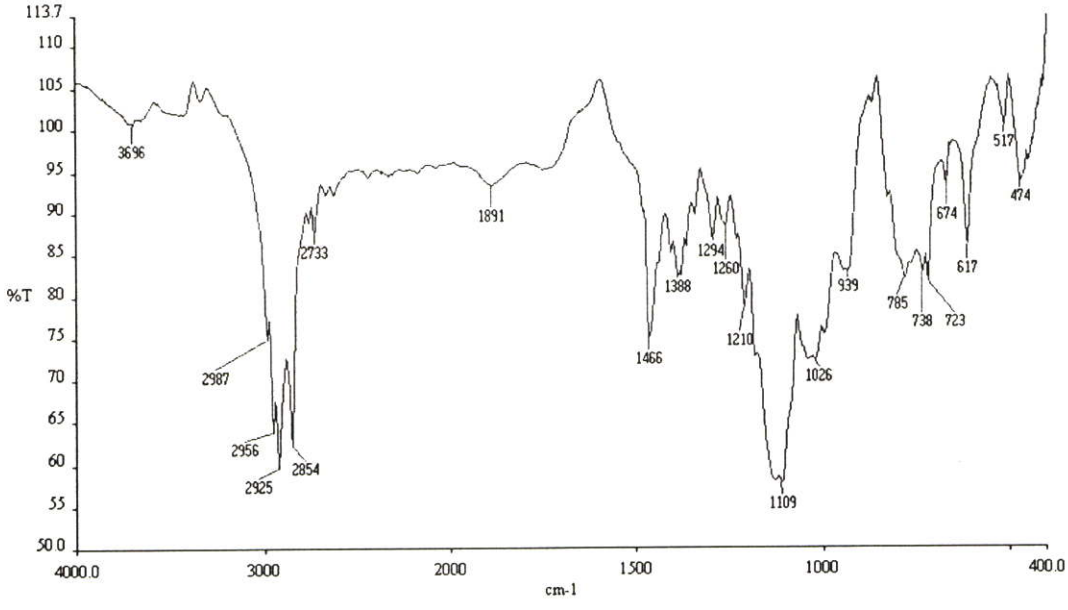
[47] S. Mohanty, S. K. Verma and S.K. Nayak. 2006. "Dynamic mechanical and thermal properties of MAPE treated jute/HDPE composites". *Composites Science and Technology*; 66: 538-547

[48] จินตมัย สุวรรณประทีป.2547. **การทดสอบสมบัติทางกลของพลาสติก**. กรุงเทพฯ. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)

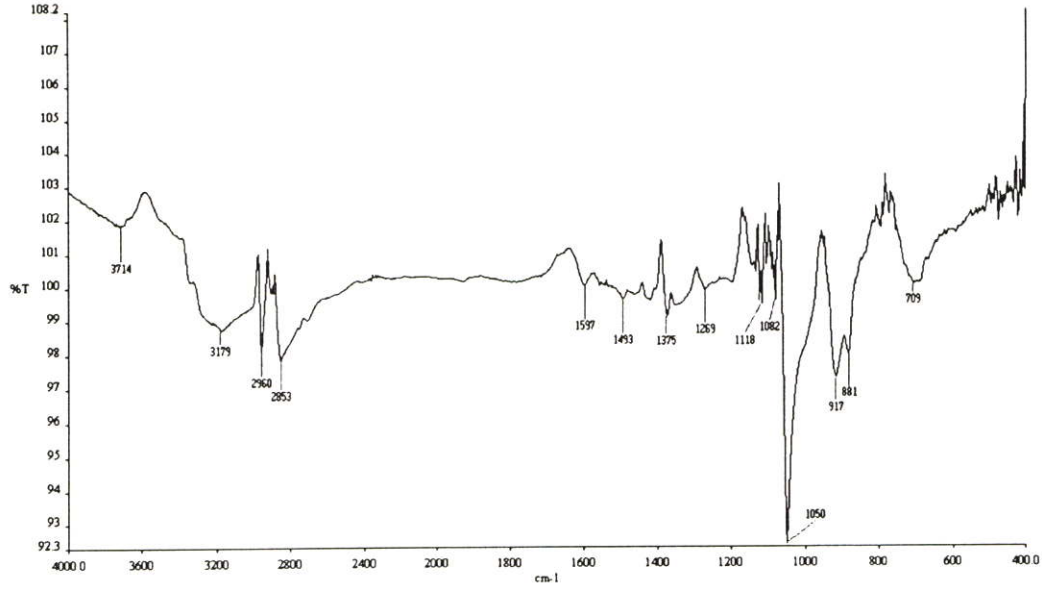
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

อินฟราเรดสเปกทราของสารคู่ควบไซเลน



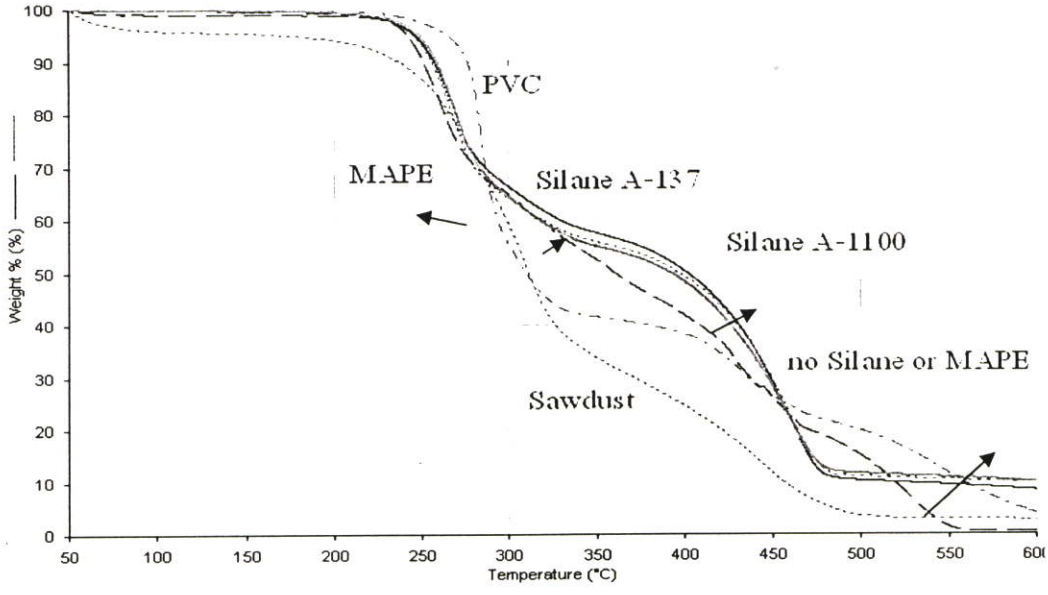
รูปที่ ก.1 อินฟราเรดสเปกทราของสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137



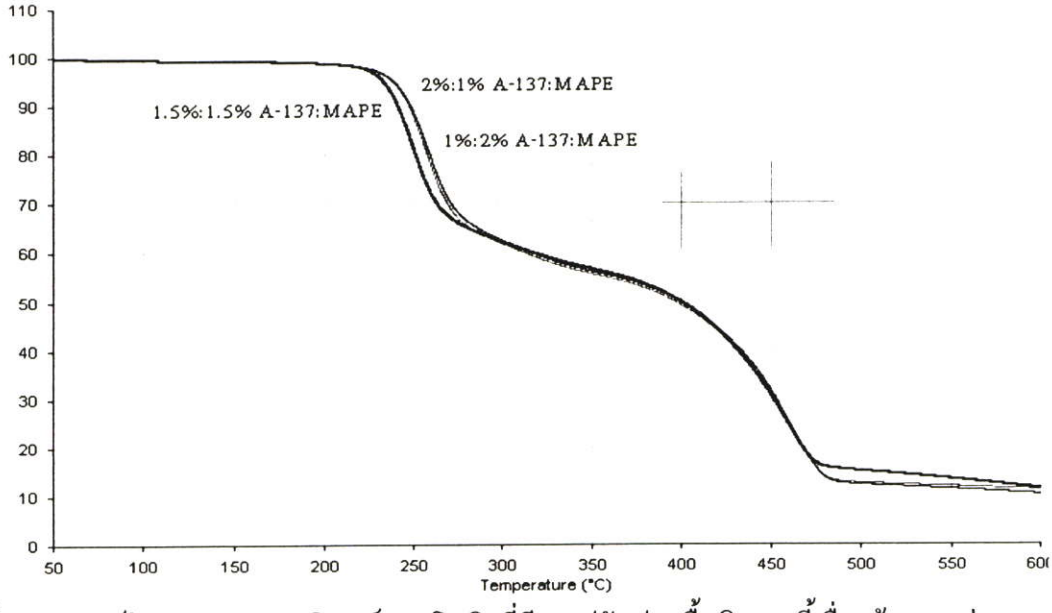
รูปที่ ก.2 อินฟราเรดสเปกทราของสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100

ภาคผนวก ข

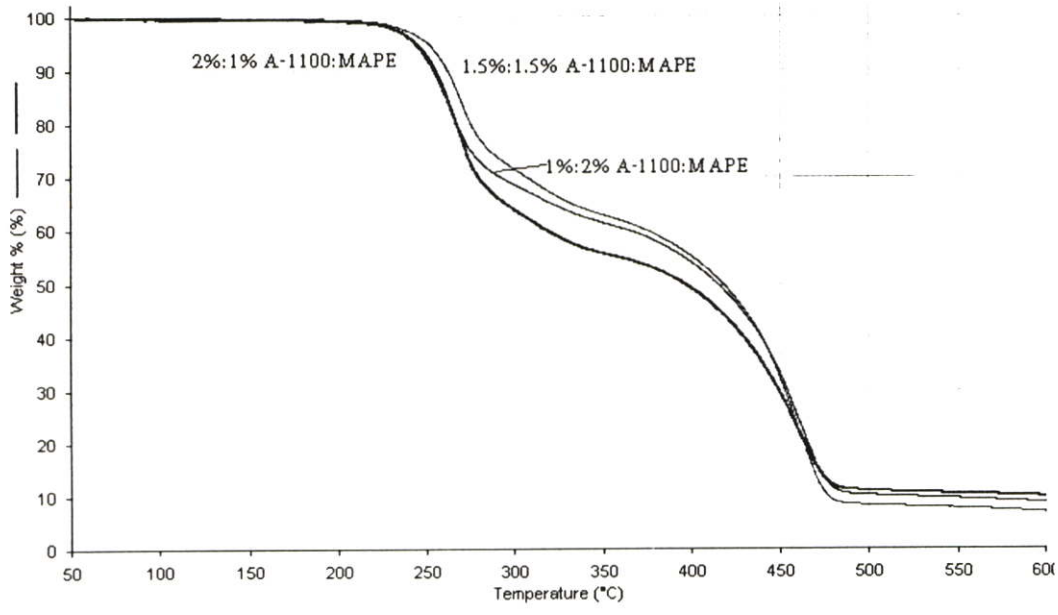
TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบ



รูปที่ ข.1 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137 สารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100 และสารช่วยผสม MAPE



รูปที่ ข.2 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมระหว่าง A-137: MAPE

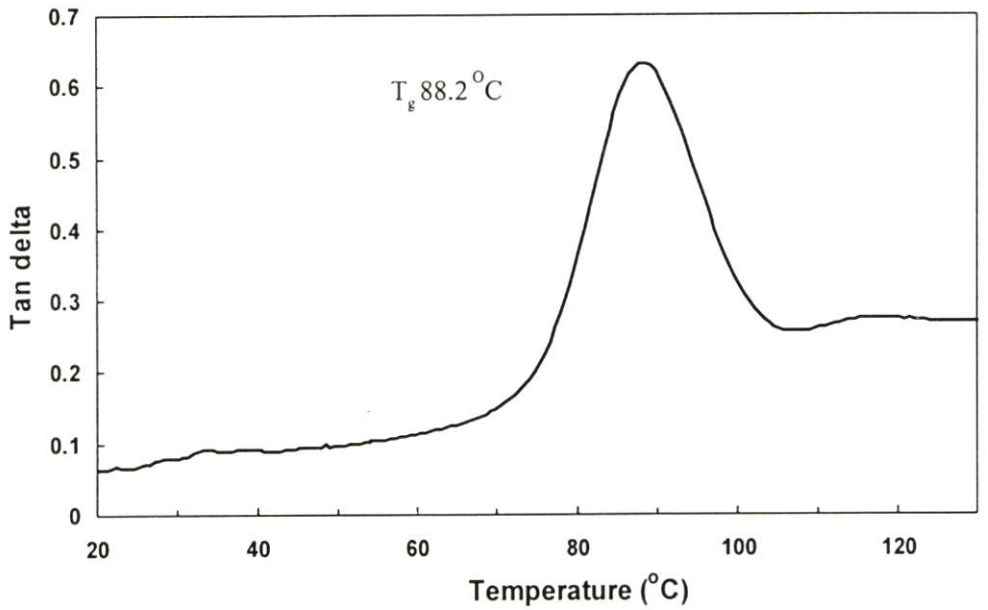


รูปที่ ข.3 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมระหว่าง A-1100: MAPE

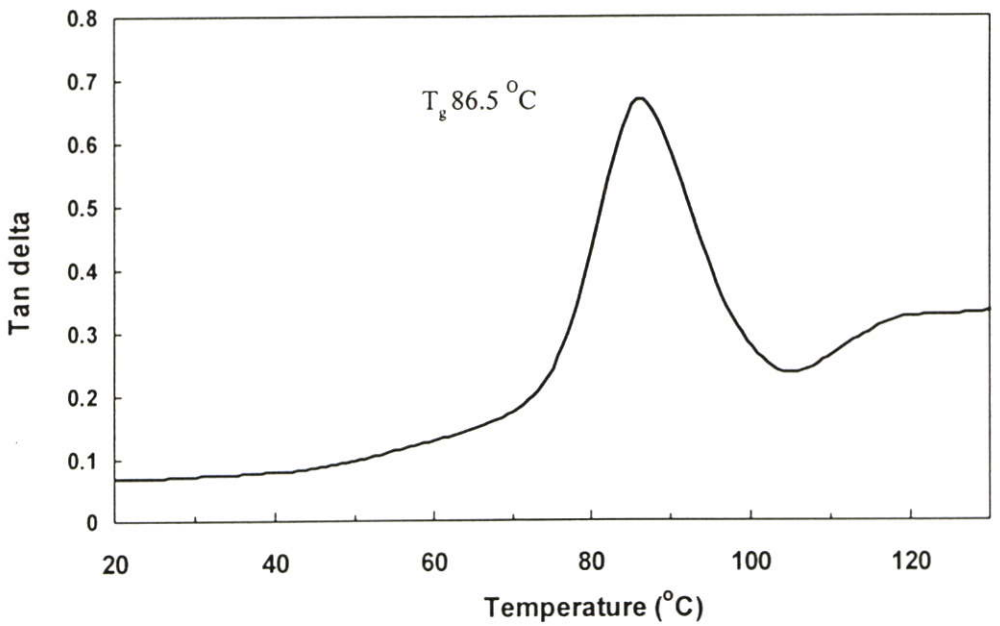
ภาคผนวก ค

DMA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบ

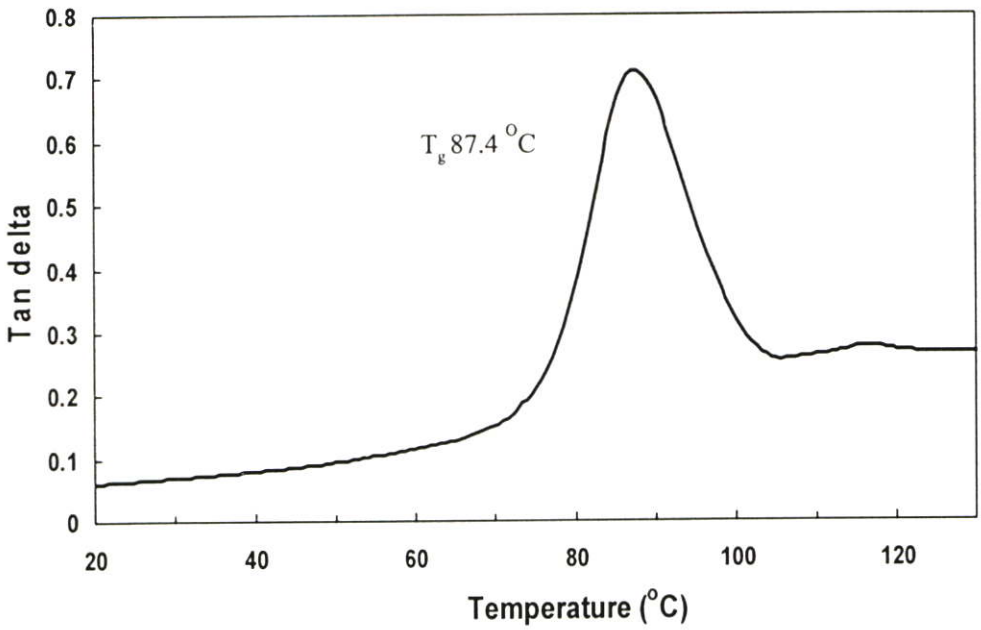
Tan δ



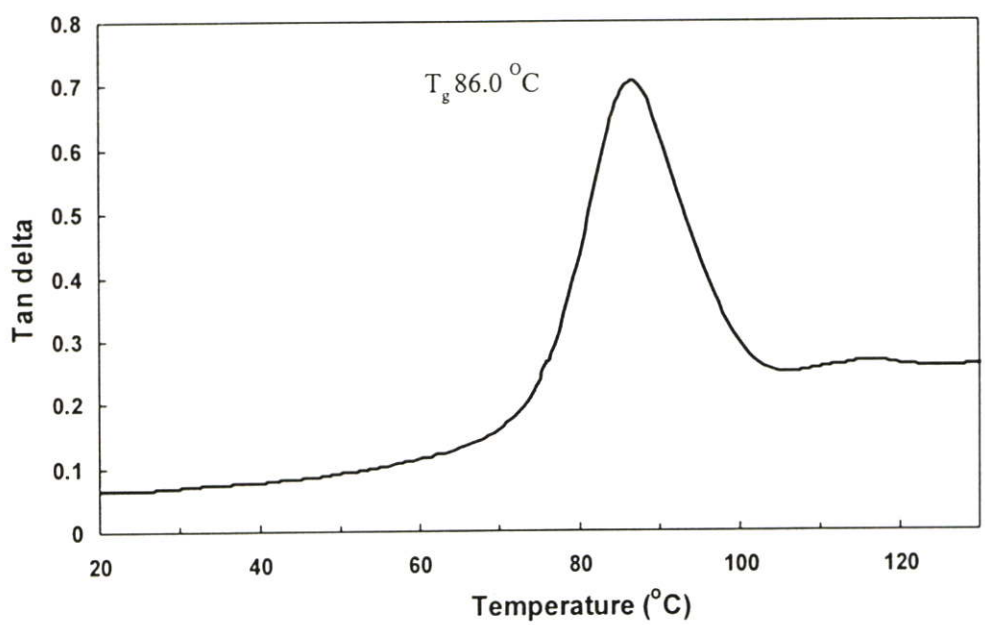
รูปที่ ค.1 ค่า T_g ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ได้มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อย



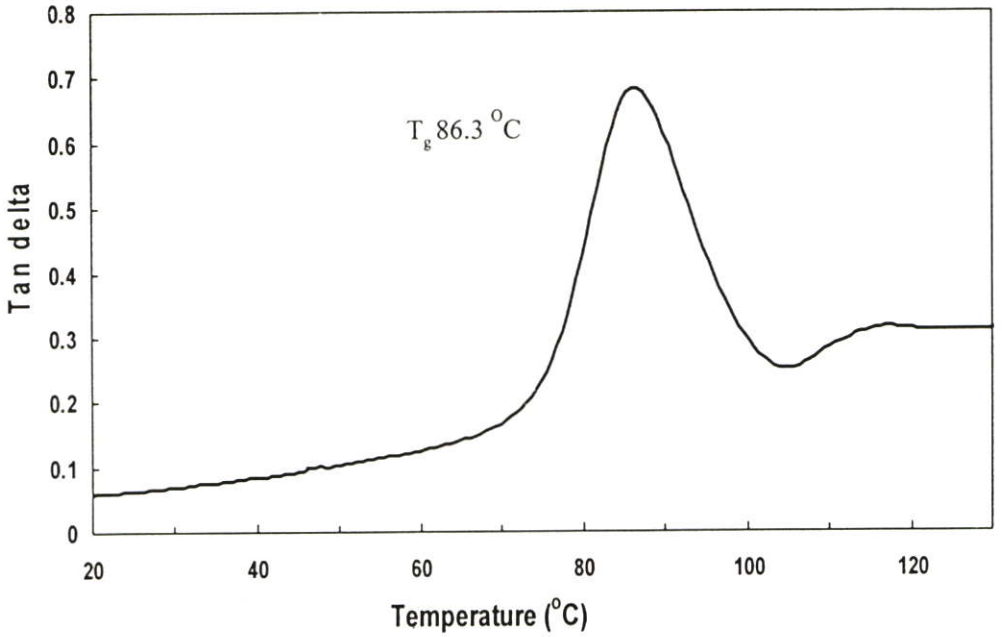
รูปที่ ค.2 ค่า T_g ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137



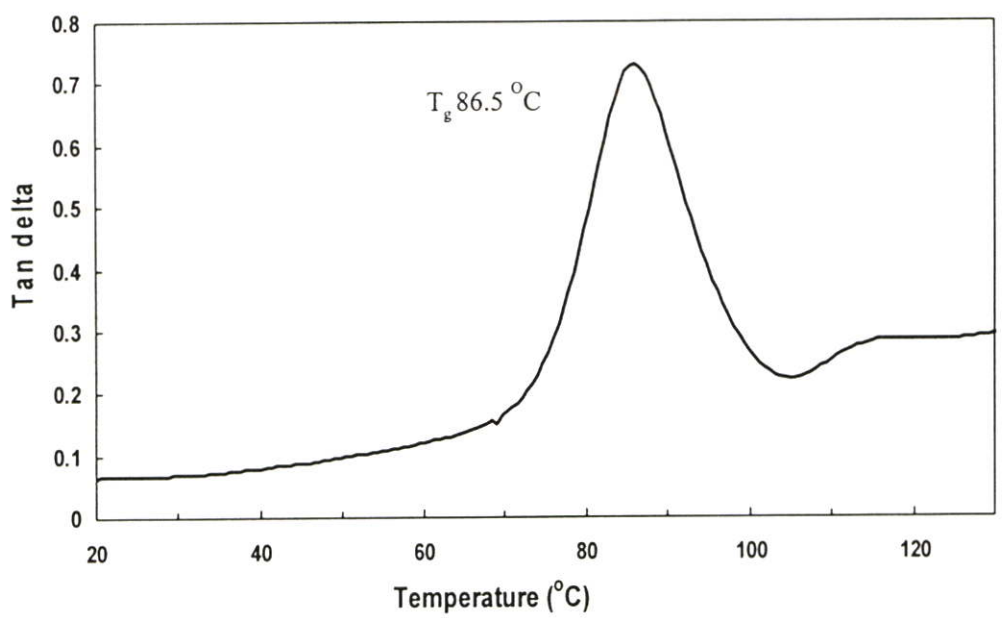
รูปที่ ค.3 ค่า T_g ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100



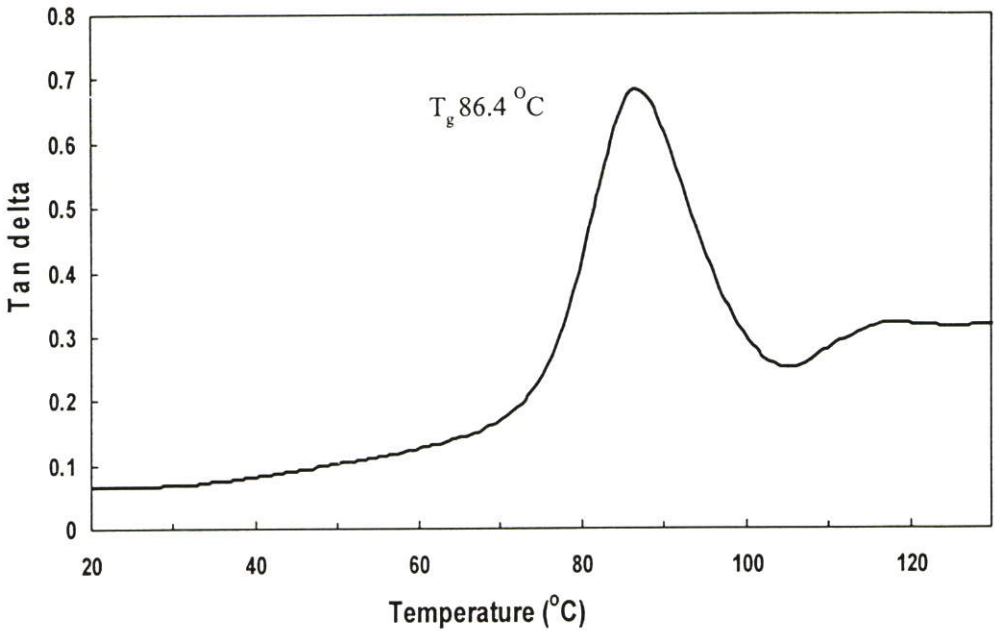
รูปที่ ค.4 ค่า T_g ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารช่วยผสมMAPE



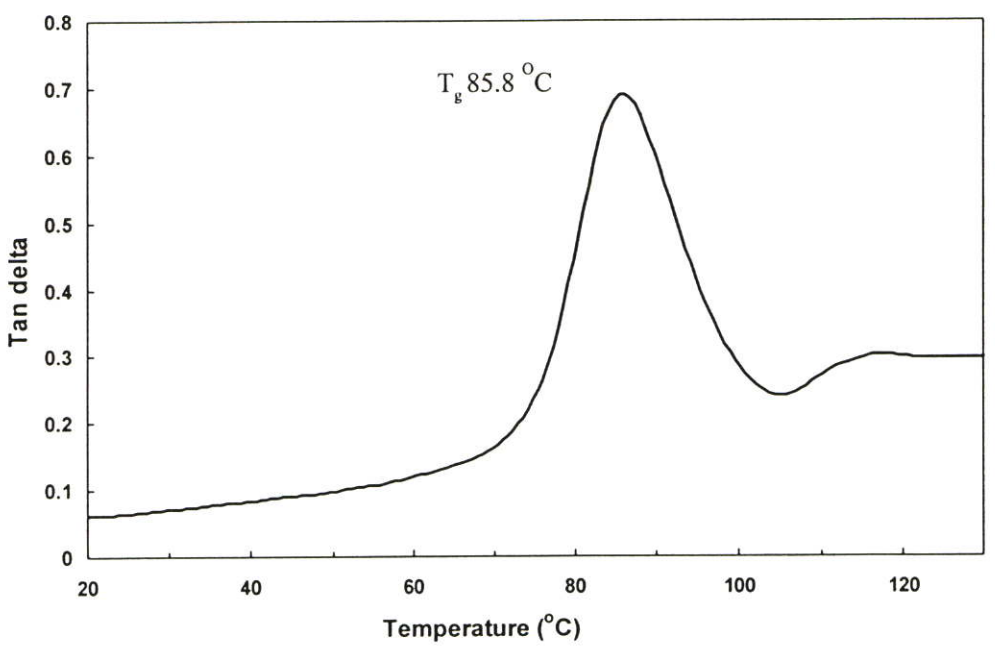
รูปที่ ค.5 ค่า T_g ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมระหว่าง A-137: MAPE ที่อัตราส่วน 2:1



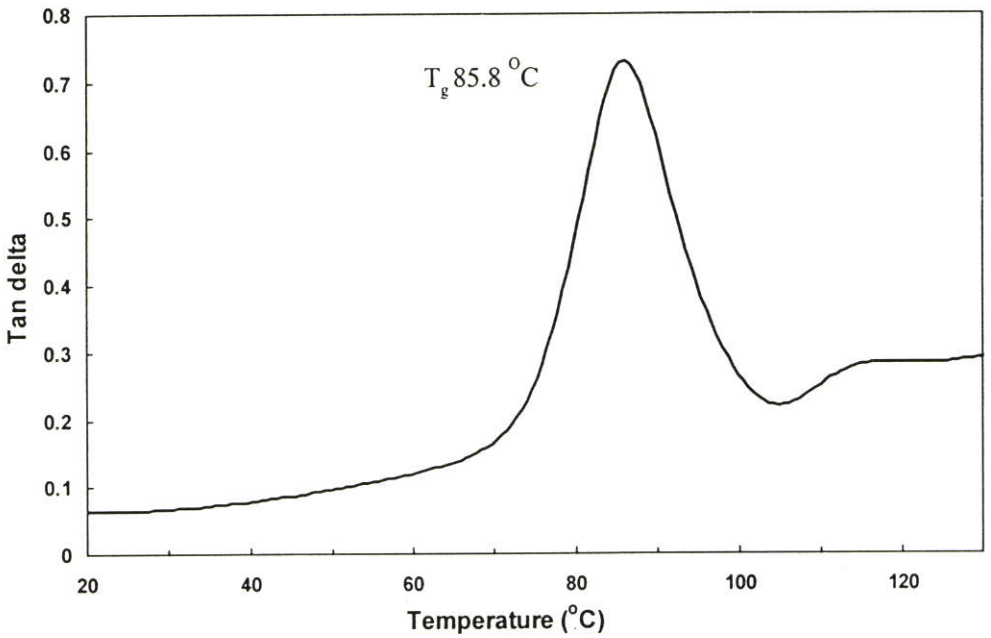
รูปที่ ค.6 ค่า T_g ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมระหว่าง A-137: MAPE ที่อัตราส่วน 1:1



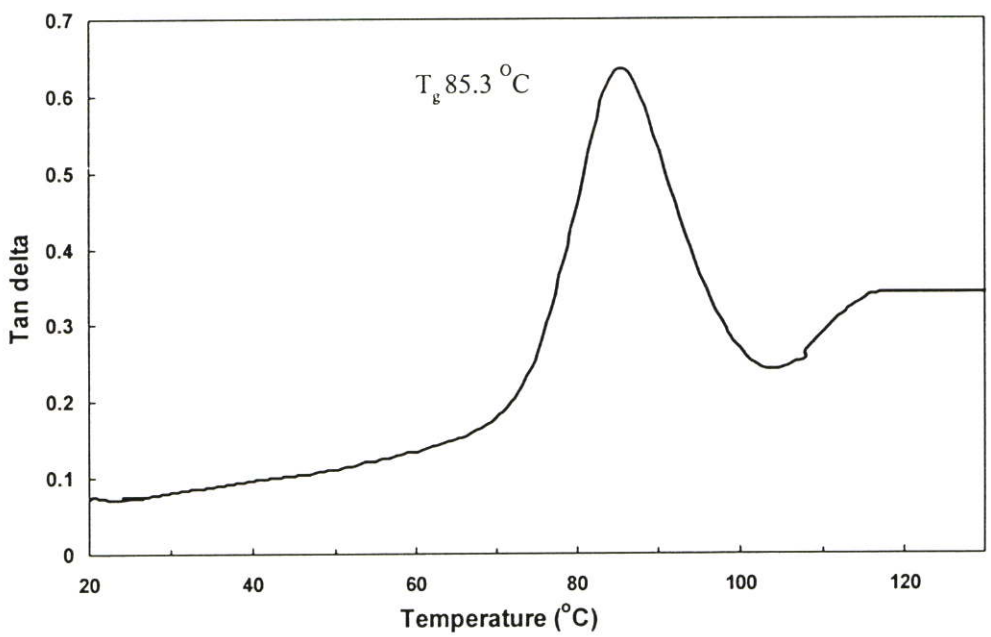
รูปที่ ค.7 ค่า T_g ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมระหว่าง A-137: MAPE ที่อัตราส่วน 1:2



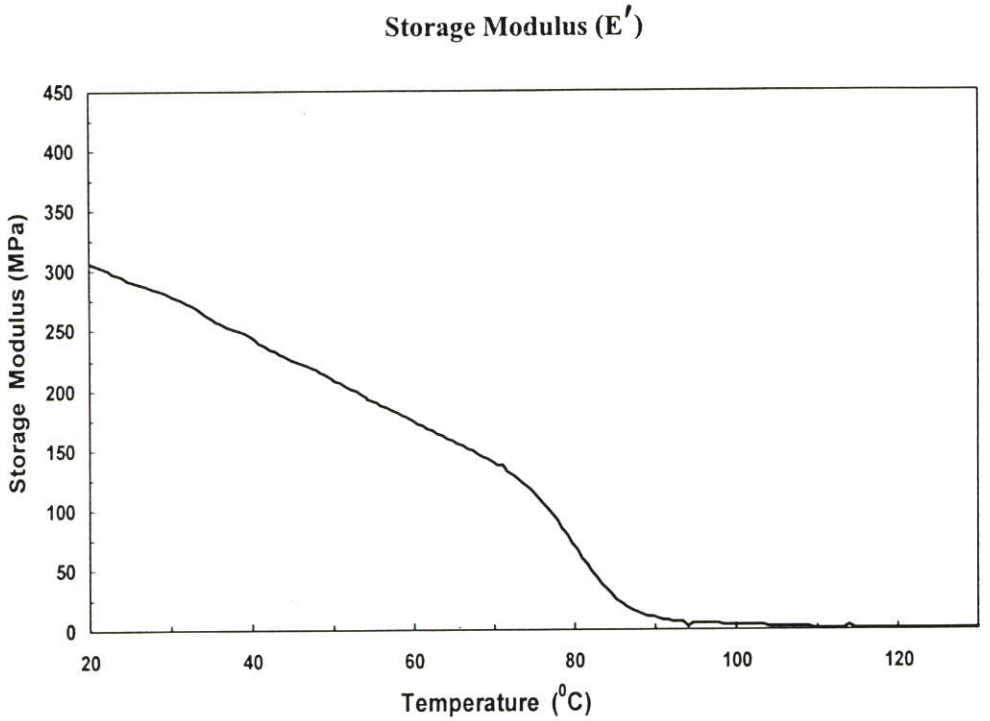
รูปที่ ค.8 ค่า T_g ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมระหว่าง A-1100: MAPE ที่อัตราส่วน 2:1



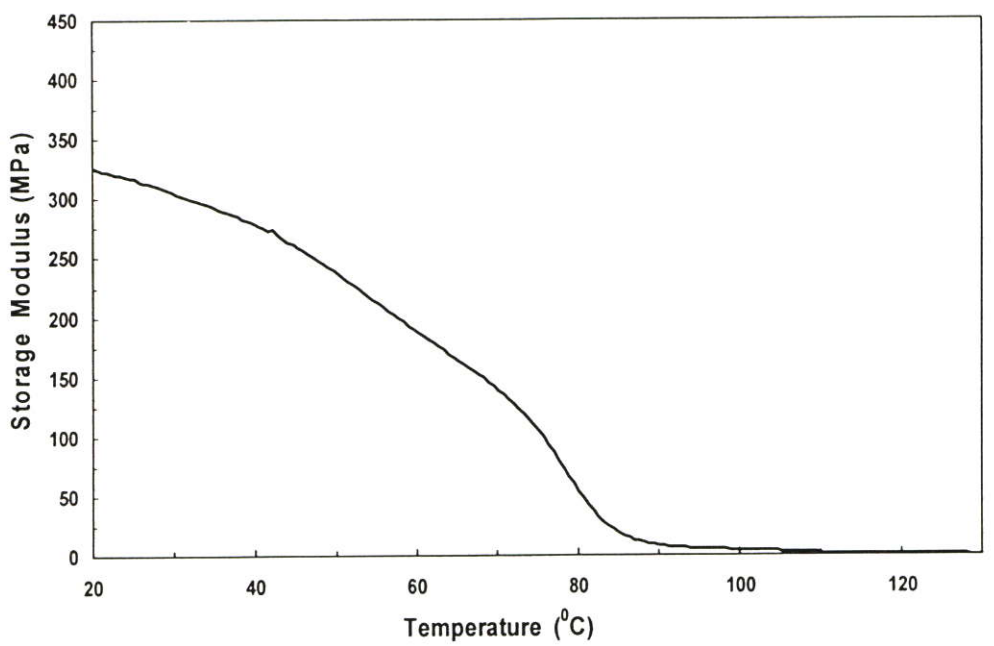
รูปที่ ค.9 ค่า T_g ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมระหว่าง A-1100: MAPE ที่อัตราส่วน 1:1



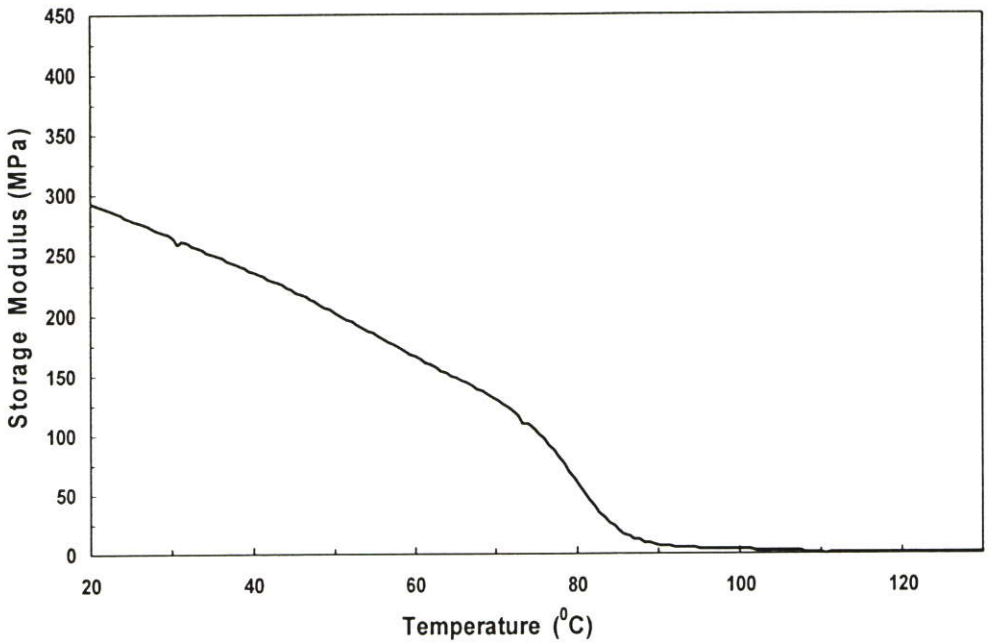
รูปที่ ค.10 ค่า T_g ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมระหว่าง A-1100: MAPE ที่อัตราส่วน 1:2



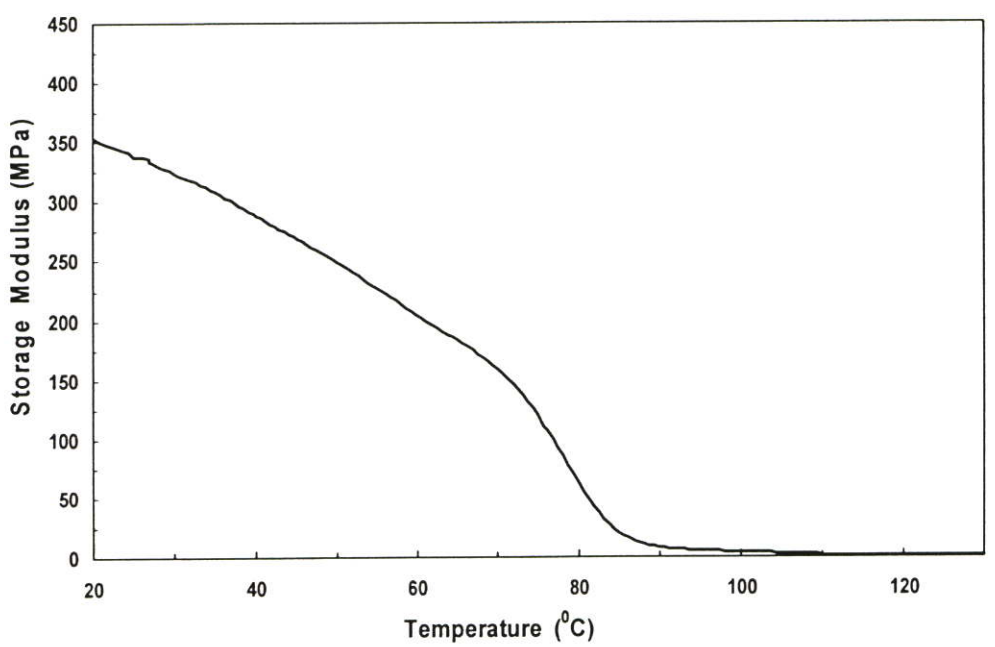
รูปที่ ค.11 ค่า Storage Modulus (E′) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ได้มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อย



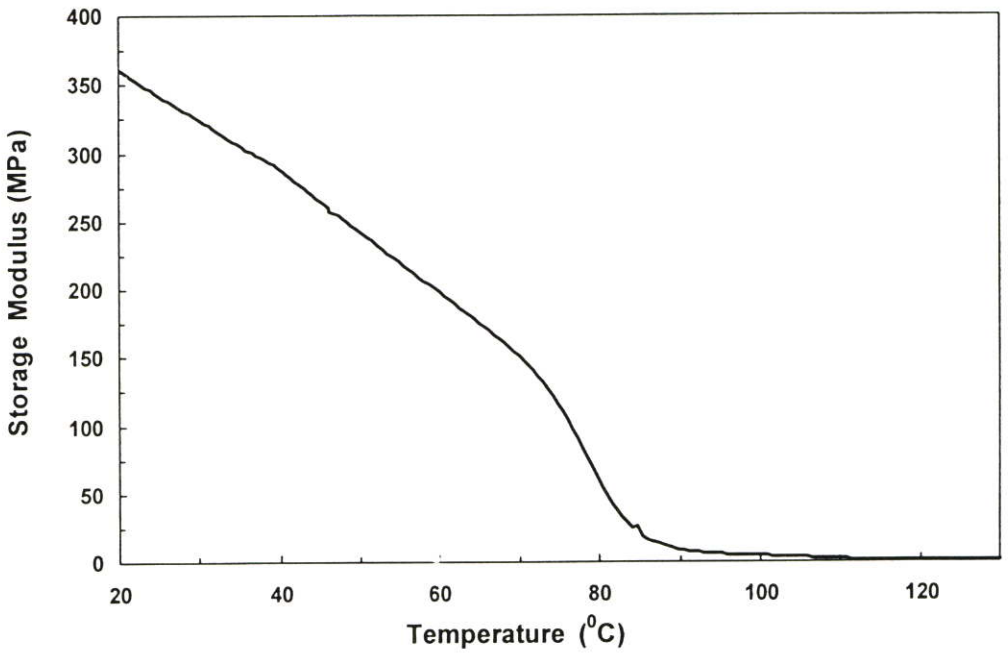
รูปที่ ค.12 ค่า Storage Modulus (E′) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137



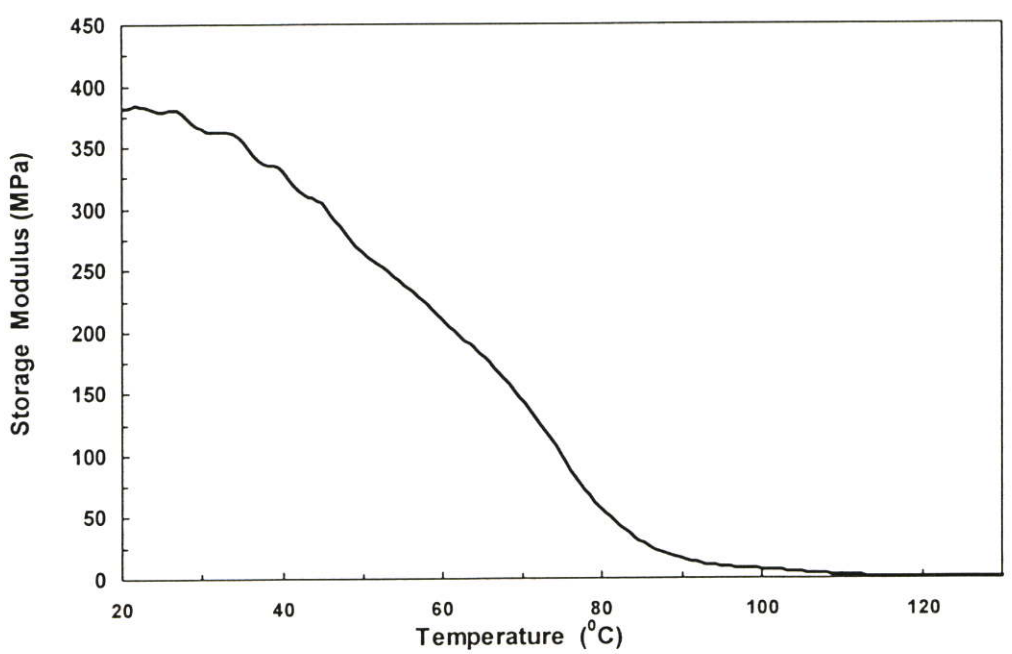
รูปที่ ค.13 ค่า Storage Modulus (E′) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100



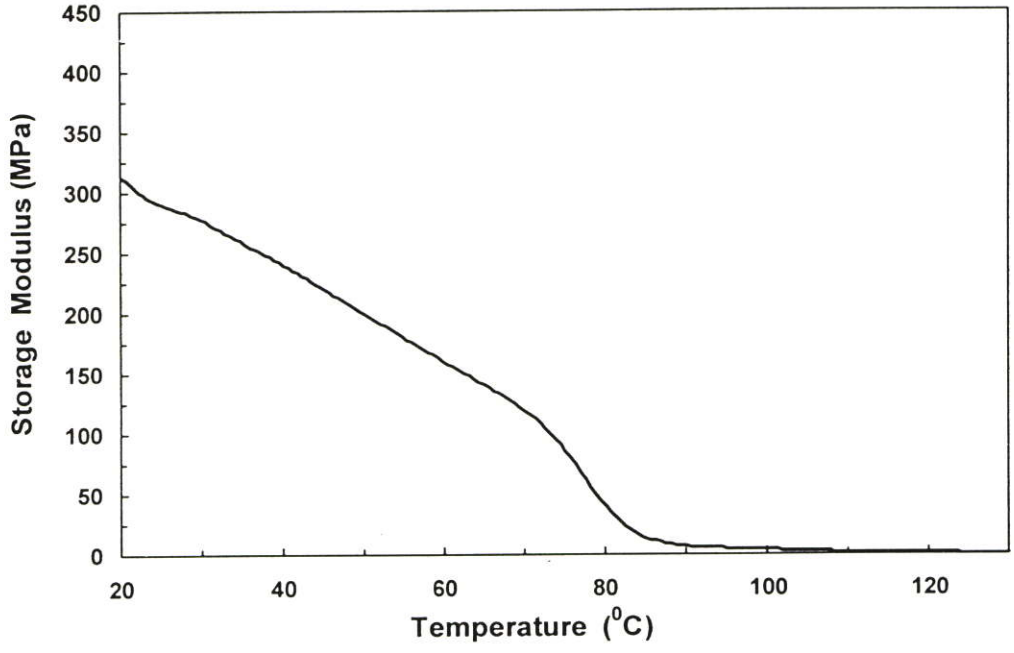
รูปที่ ค.14 ค่า Storage Modulus (E′) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารช่วยผสม MAPE



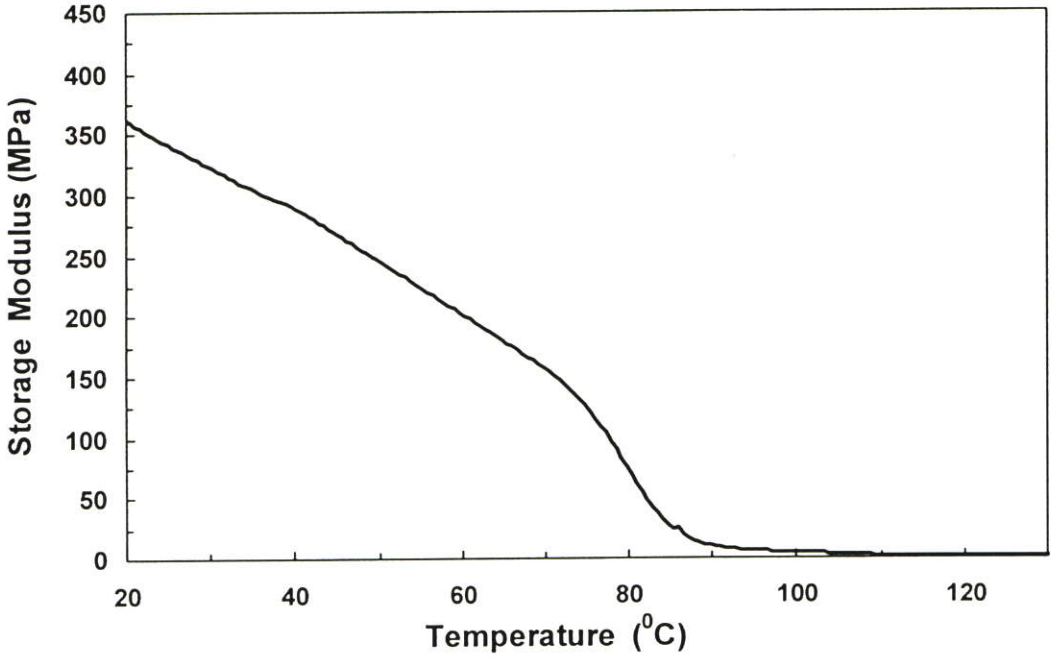
รูปที่ ค.15 ค่า Storage Modulus (E′) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมระหว่าง A-137: MAPE ที่อัตราส่วน 2:1



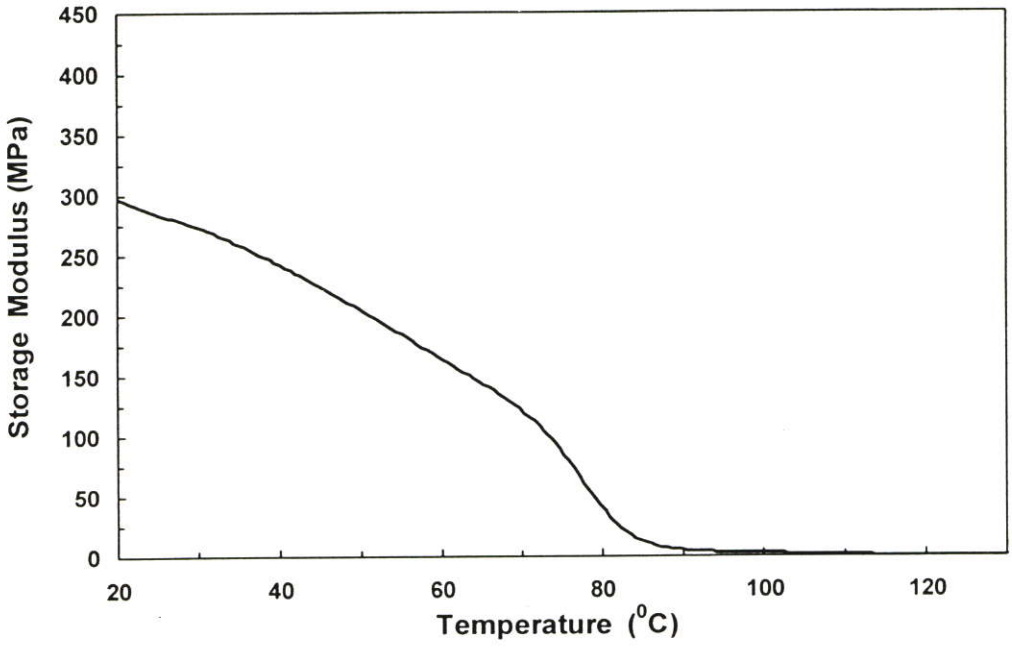
รูปที่ ค.16 ค่า Storage Modulus (E′) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมระหว่าง A-137: MAPE ที่อัตราส่วน 1:1



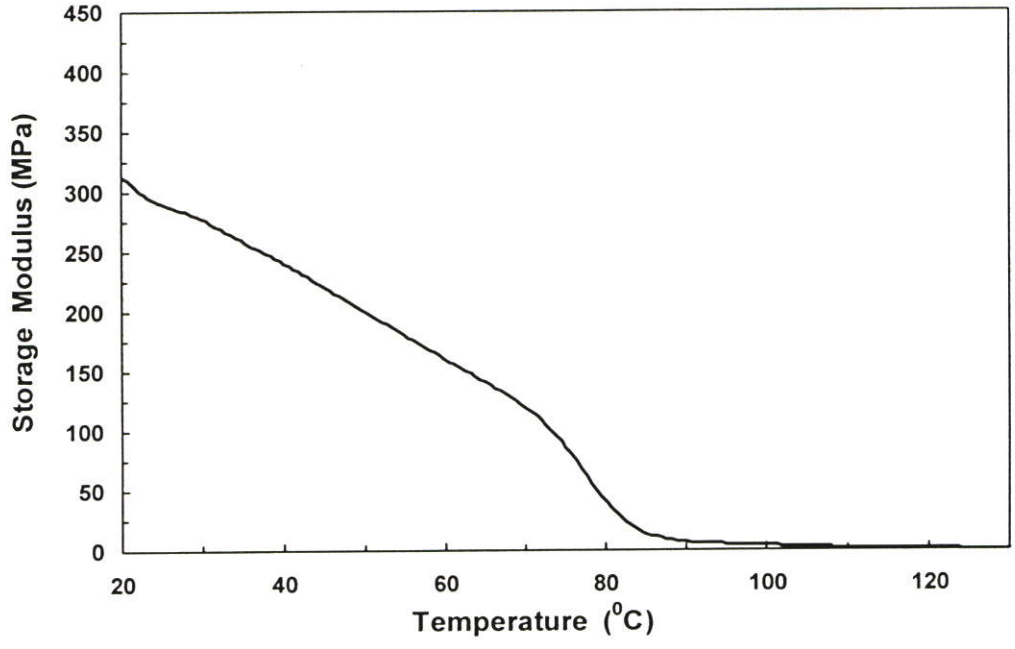
รูปที่ ค.17 ค่า Storage Modulus (E′) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมระหว่าง A-137: MAPE ที่อัตราส่วน 1:2



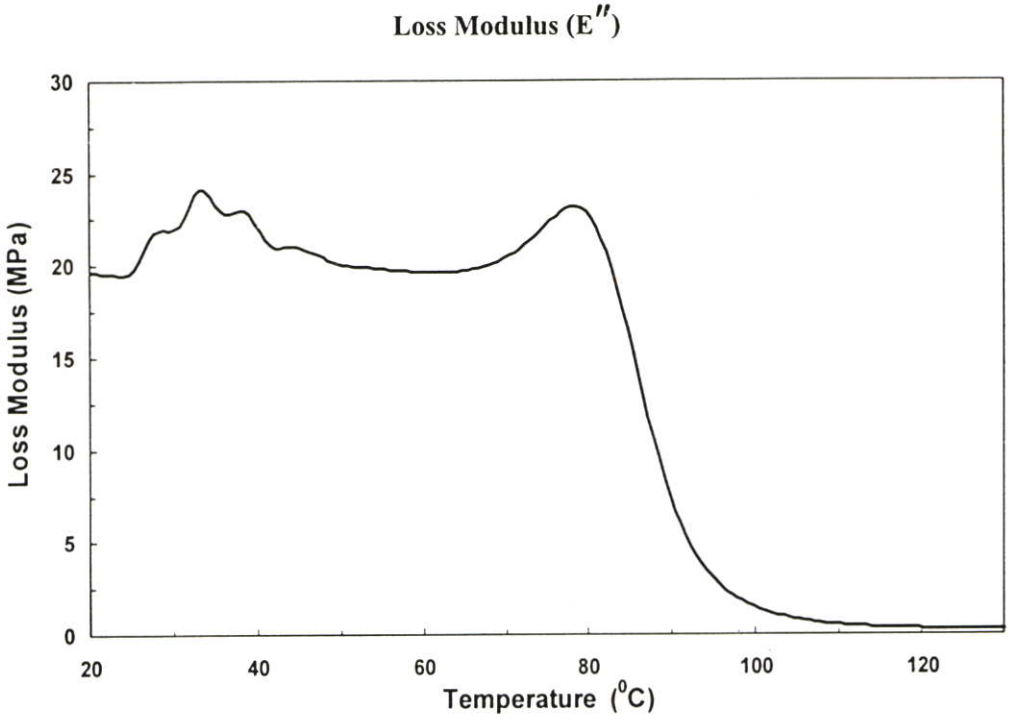
รูปที่ ค.18 ค่า Storage Modulus (E′) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมระหว่าง A-1100: MAPE ที่อัตราส่วน 2:1



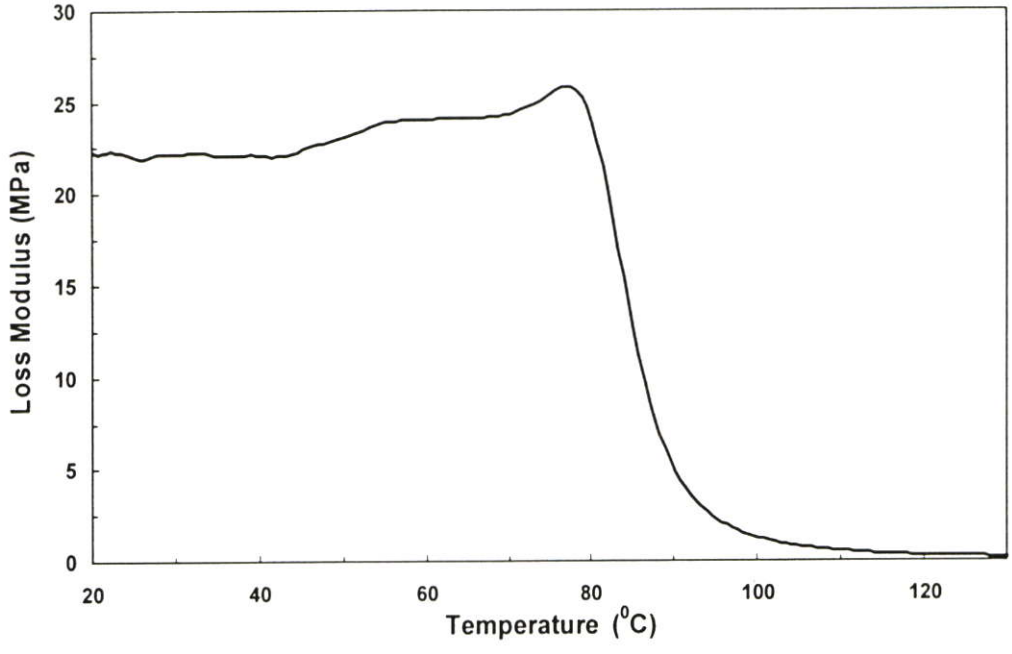
รูปที่ ค.19 ค่า Storage Modulus (E′) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมระหว่าง A-1100: MAPE ที่อัตราส่วน 1:1



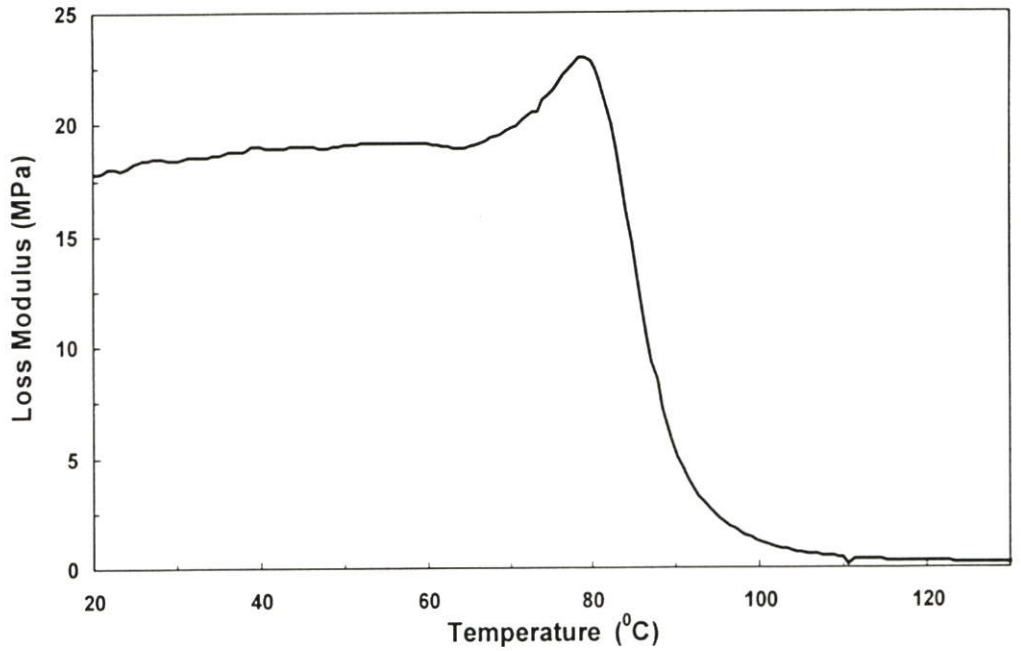
รูปที่ ค.20 ค่า Storage Modulus (E′) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมระหว่าง A-1100: MAPE ที่อัตราส่วน 1:2



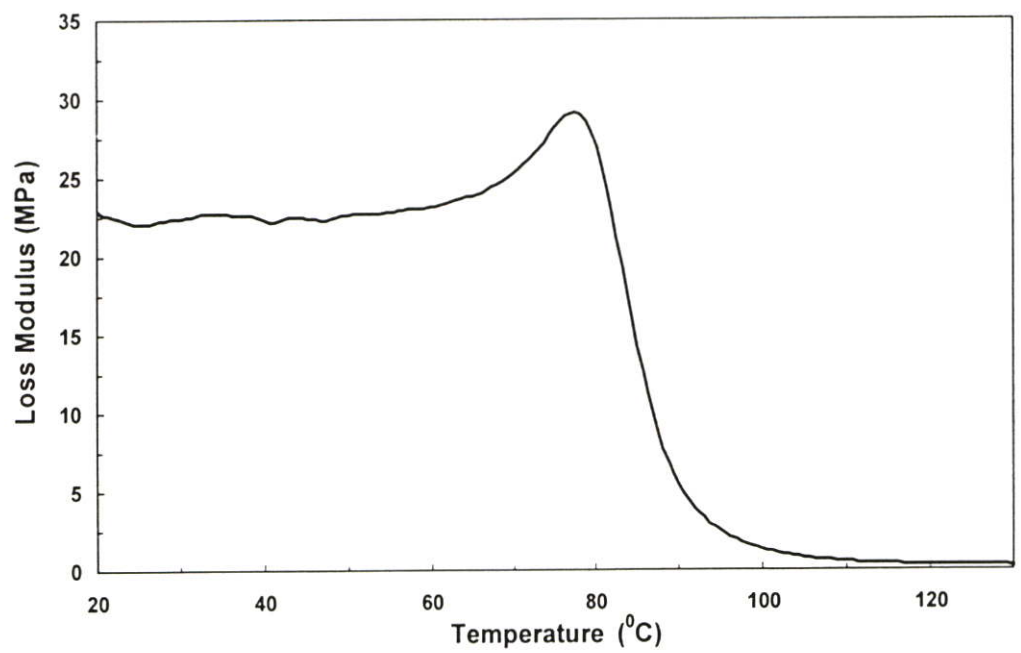
รูปที่ ค.21 ค่า Loss Modulus (E″) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ได้มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อย



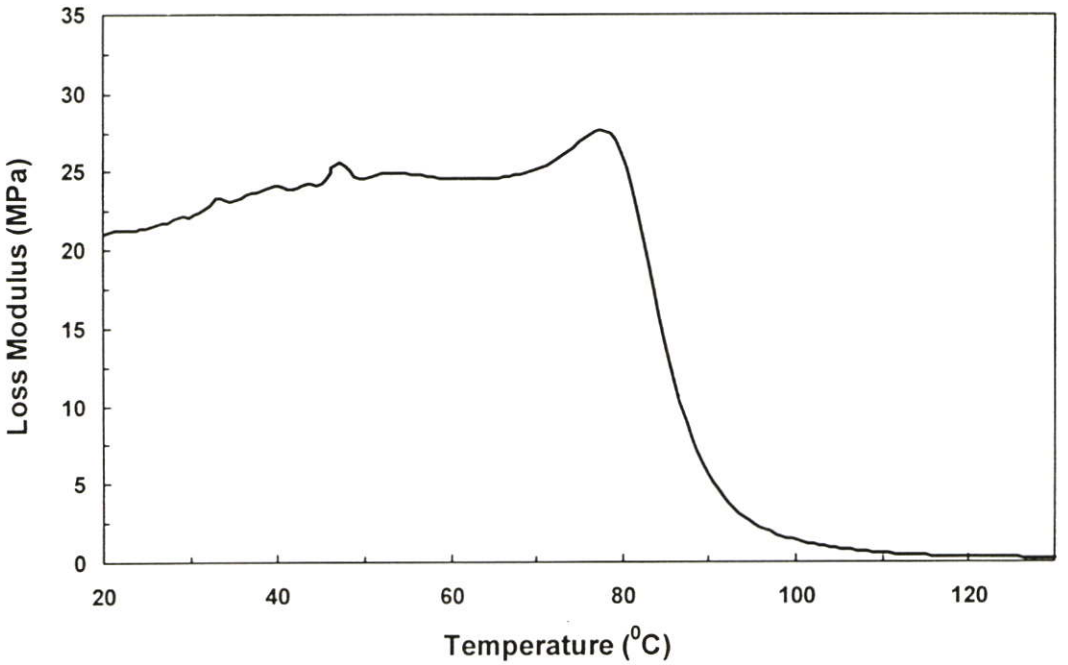
รูปที่ ค.22 ค่า Loss Modulus (E″) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด A-137



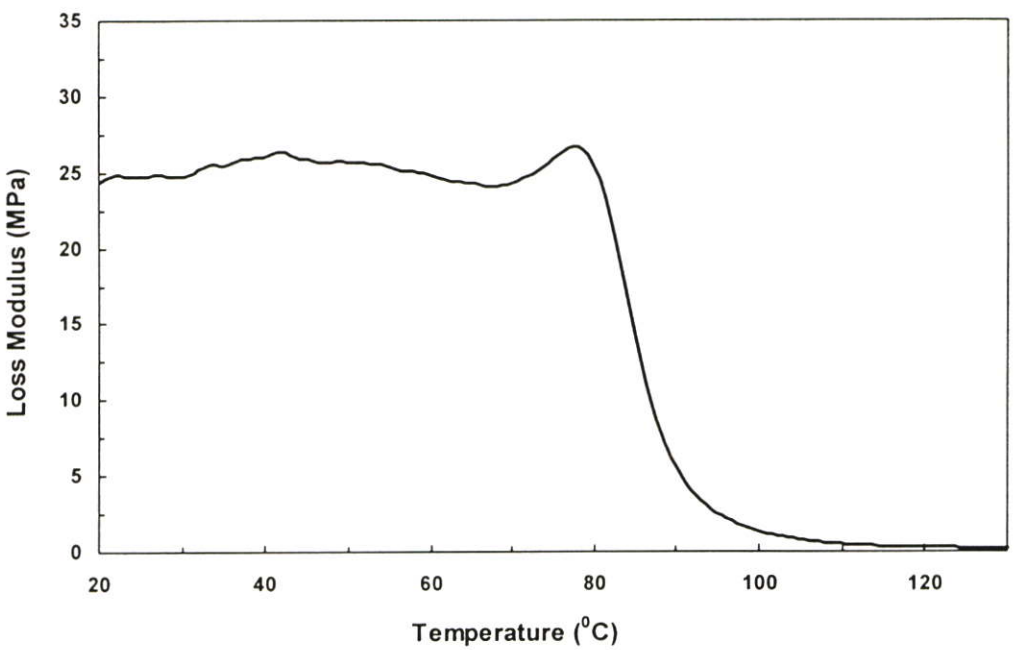
รูปที่ ค.23 ค่า Loss Modulus (E″) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด A-1100



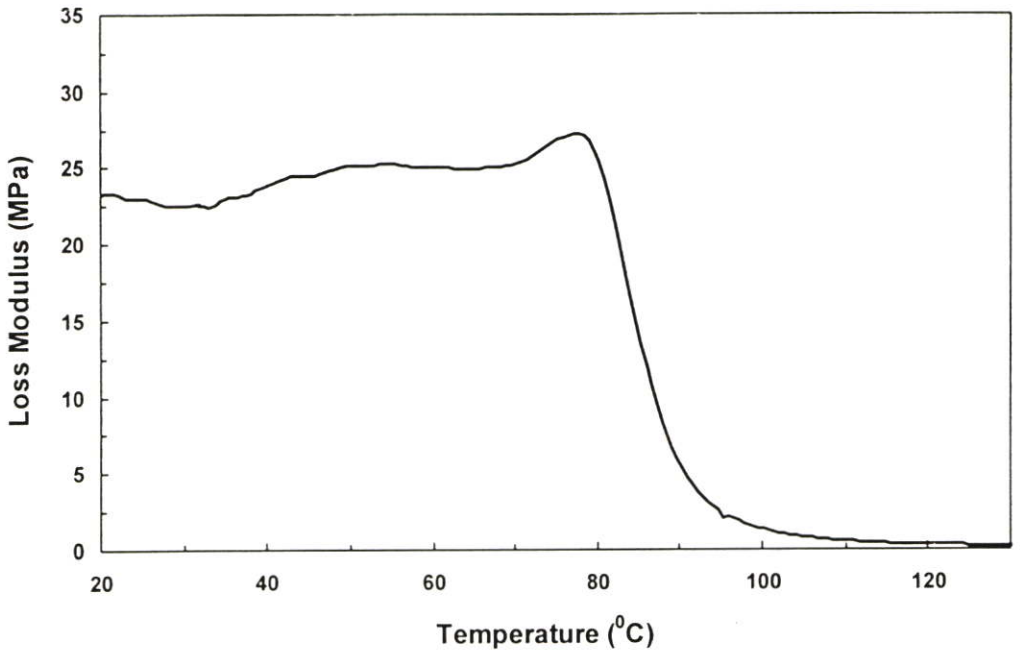
รูปที่ ค.24 ค่า Loss Modulus (E″) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารช่วยผสม MAPE



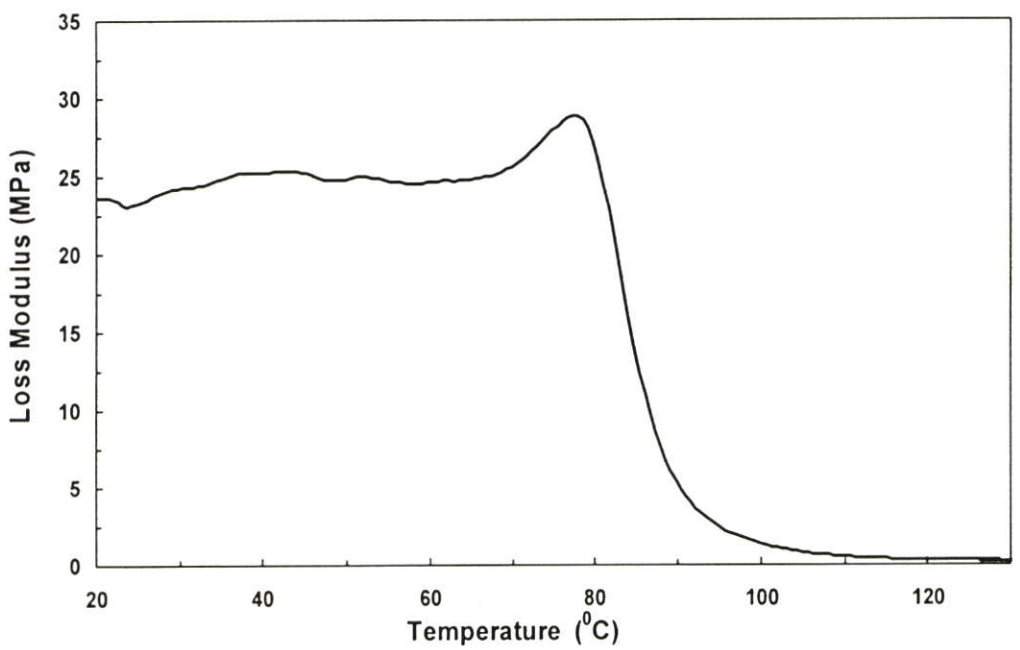
รูปที่ ค.25 ค่า Loss Modulus (E″) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมระหว่าง A-137: MAPE ที่อัตราส่วน 2:1



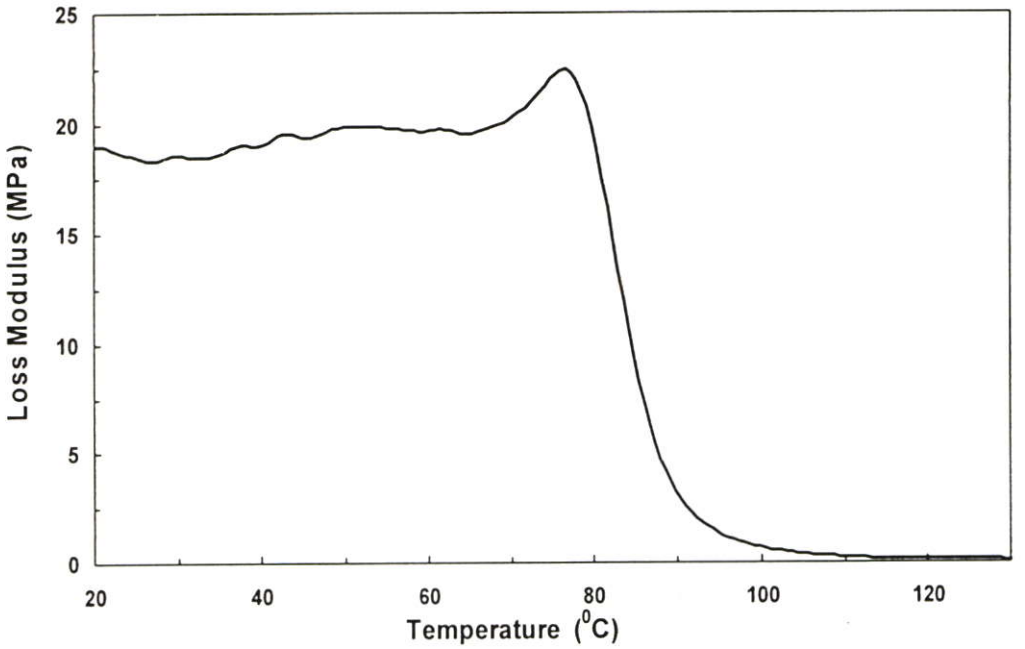
รูปที่ ค.26 ค่า Loss Modulus(E″) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมระหว่าง A-137: MAPE ที่อัตราส่วน 1:1



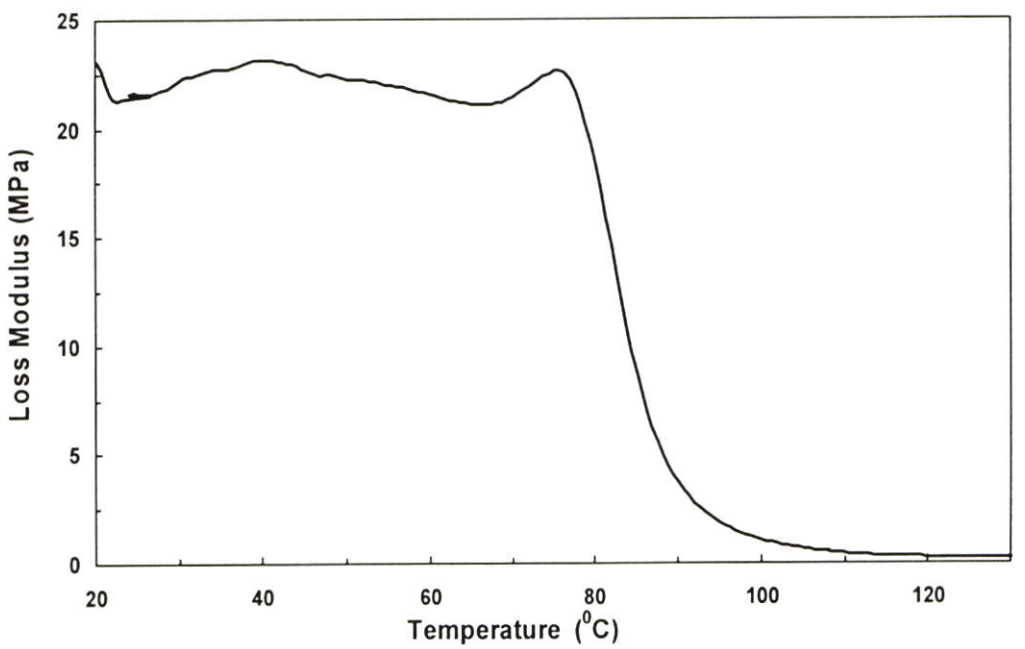
รูปที่ ค.27 ค่า Loss Modulus (E″) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมระหว่าง A-137: MAPE ที่อัตราส่วน 1:2



รูปที่ ค.28 ค่า Loss Modulus (E″) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมระหว่าง A-1100: MAPE ที่อัตราส่วน 2:1



รูปที่ ค.29 ค่า Loss Modulus (E″) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมระหว่าง A-1100: MAPE ที่อัตราส่วน 1:1



รูปที่ ค.30 ค่า Loss Modulus (E″) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบผสมระหว่าง A-1100: MAPE ที่อัตราส่วน 1:2

ภาคผนวก ง

ตารางแสดงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยด้วยสารคู่ควบ

ตารางที่ จ.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปริมาณขี้เลื่อย 10 %

ชิ้นทดสอบ	Young's modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)	% Elongation at break	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (MPa)	Impact Strength (kJ/m^2)
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 10	78 ± 2.9	8.9± 0.4	6.8±0.6	20.2±1.1	777±6.9	1.5±0.2
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 10:1% A-137	181 ± 15.5	12.6±0.7	10.5±0.9	32.0± 0.5	1073± 22.7	3.2±0.1
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 10:3% A-137	204 ± 14.2	13.8± 0.3	10.9± 0.8	34.7± 1.8	1239± 31.7	3.5±0.1
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 10:5% A-137	171 ± 8.4	10.2± 0.5	8.6± 0.7	31.9±2.6	1094±24.4	3.3±0
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 10:1% A-1100	178 ± 8.1	9.4± 0.3	8.2± 0.8	27.6± 0.3	1039± 36.1	3.1± 0.2
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 10:3% A-1100	191 ± 24.3	10.5 ± 0.9	10.3± 0.2	28.3± 2.7	1145± 29.6	3.2± 0.5
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 10:5% A-1100	163 ± 8.9	9.0± 0.9	8.4± 0.5	27.0± 1.1	1081± 36.6	3.1± 0.2
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 10:1% MAPE	181 ± 6.4	13.1±0.5	10.2±0.5	32.8± 1.9	1110± 16.8	2.9± 0
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 10:3% MAPE	274 ± 5.4	15.3± 1.0	10.6± 1.0	37.9± 1.3	1442± 14.7	3.0± 0.1
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 10:5% MAPE	175 ± 9.0	12.3± 0.8	10.3± 0.6	31.8± 0.9	1087± 16.0	2.8± 0

ตารางที่ จ.2 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปริมาณขี้เลื่อย 20 %

ชิ้นทดสอบ	Young's modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)	% Elongation at break	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (MPa)	Impact Strength (kJ/m^2)
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 20	82 ± 5.0	8.8±0.1	5.7±0.8	19.6±1.6	866± 0.2	1.4±0
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 20:1% A-137	249 ± 19.6	11.8±0.4	7.8±0.3	29.6± 0.2	1159± 26.5	3.2± 0
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 20:3% A-137	249 ± 14.0	12.1± 0.7	9.8± 0.4	31.5± 1.0	1456± 32.8	3.3± 0.1
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 20:5% A-137	240 ± 5.3	9.9± 0.7	7.9± 0.7	29.1±1.2	1146±33.0	2.9±0.1
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 20:1% A-1100	240 ± 26.5	9.2± 0.9	7.6± 1.1	26.5± 1.9	1080± 37.8	3.1± 0.1
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 20:3% A-1100	243 ± 12.2	10.3± 0.9	8.6± 0.7	27.5± 1.6	1192± 12.2	3.1± 0.1
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 20:5% A-1100	214 ± 8.6	8.9± 1.0	7.9± 1.2	25.1± 2.4	1160± 38.8	3.0± 0.2
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 20:1% MAPE	197 ± 11.5	11.0±0.3	7.8±0.4	30.9± 1.3	1207±21.2	2.9± 0
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 20:3% MAPE	320 ± 19.6	12.8± 0.4	9.8± 0.4	34.0± 0.9	1529± 13.5	3.0± 0.1
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 20:5% MAPE	260 ± 6.3	10.9± 0.8	7.9± 0.2	29.0± 2.4	1221± 15.3	2.8± 0

ตารางที่ จ.3 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปริมาณขี้เลื่อย 30 %

ชิ้นทดสอบ	Young's modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)	% Elongation at break	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (MPa)	Impact Strength (kJ/m^2)
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 30	92 ± 7.2	7.6±0.8	5.6±0.5	19.0±0.7	914±3.9	1.3±0
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 30:1% A-137	270 ± 11.3	11.7±0.2	7.2±0.4	28.9± 1.1	1234± 38.5	3.1± 0.2
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 30:3% A-137	284± 12.6	11.7± 0.5	8.8± 0.3	28.5± 0.7	1568± 32.9	3.2± 0.1
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 30:5% A-137	268 ± 3.8	9.6± 0.5	7.3± 0.6	27.0±1.0	1262±23.8	3.0±0.1
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 30:1% A-1100	247 ± 7.7	8.3± 1.0	6.0± 0.4	25.7± 0.9	1153 ±48.6	3.0± 0
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 30:3% A-1100	271 ± 11.9	10.0± 0.5	7.9± 0.8	26.5± 1.3	1351±31.6	3.1± 0.2
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 30:5% A-1100	252 ± 12.7	8.3± 0.4	6.4± 0.3	23.3± 1.2	2120± 15.6	2.9± 0.2
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 30:1% MAPE	272 ± 5.4	10.7±0.7	7.0±0.3	29.2± 0.6	1451± 11.1	2.8± 0.1
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 30:3% MAPE	338 ± 2.1	12.3± 1.0	8.6± 1.0	32.4± 0.8	1607± 25.7	2.9± 0.1
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 30:5% MAPE	289 ± 6.0	10.8± 0.7	7.7± 0.6	29.0± 1.1	1439± 15.9	2.7± 0

ตารางที่ จ.4 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปริมาณขี้เลื่อย 40 %

ชิ้นทดสอบ	Young's modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)	% Elongation at break	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (MPa)	Impact Strength (kJ/m^2)
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 40	99 ± 6.7	7.3±0.8	5.3±0.3	18.6±1.2	1070±9.3	1.1±0
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 40:1% A-137	271 ± 14.3	10.4±0.3	6.8±0.2	27.7± 1.2	1342± 27.9	3.0± 0.4
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 40:3% A-137	293 ± 17.5	10.6± 0.4	7.8± 0.6	28.3± 1.2	1698±39.8	3.2± 0.2
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 40:5% A-137	262 ± 20.6	8.7± 0.9	6.4± 0.9	26±1.1	1375±21.4	3.0±0.3
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 40:1% A-1100	252 ± 20.6	8.1± 0.5	6.0± 0.6	22.8± 1.0	1261±42.0	2.9± 0.2
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 40:3% A-1100	279 ±6.1	9.8± 0.7	7.6± 0.1	25.4± 1.7	1387±36.8	3.0± 0
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 40:5% A-1100	260 ± 6.9	7.9± 1.2	6.0± 0.6	21.9± 1.2	1256±29.1	2.9± 0.2
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 40:1% MAPE	280± 9.7	9.5±0.2	6.8±0.3	28.4± 1.7	1495±17.6	2.8± 0.2
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 40:3% MAPE	352 ± 7.0	11.5± 0.1	7.6± 0.4	30.2± 0.8	1450± 18.9	2.8± 0.1
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 40:5% MAPE	300 ± 0.5	9.8± 0.9	7.0± 0.4	27.3± 1.9	1571±11.0	2.7± 0

ตารางที่ จ.5 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยโดยใช้สารคู่ควบผสมที่ปริมาณขี้เลื่อย 10 %

ชิ้นทดสอบ	Young's modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)	% Elongation at break	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (MPa)	Impact Strength (kJ/m^2)
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 10	78±2.9	8.9± 0.4	6.8±0.6	20.2±1.1	777±6.9	1.5±0.2
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 10:(1%:2%) A-137:MAPE	284±8.0	15.7±0.2	13.2± 0.1	34.8± 0.3	1458±26.3	2.9±0
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 10:(1.5%:1.5%) A-137:MAPE	211± 4.4	14.6± 0.2	11.1± 0.5	31.0± 0.4	1118±8.5	2.9±0
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 10: (2%:1%) A-137:MAPE	245±4.3	14.5±0.3	11.7± 0.4	32.3± 0.7	1228±6.6	3.1±0.1
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 10:(1%:2%) A-1100:MAPE	249± 2.8	12.4± 0.1	10.5± 0.7	28.1± 0.4	953±28.5	2.8±0
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 10:(1.5%:1.5%) A-1100:MAPE	204± 4.0	10.6± 0.5	9.9± 0.2	27.7± 0.3	897±24.9	2.7±0
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 10: (2%:1%) A-1100:MAPE	296± 5.0	10.3± 0.5	8.8± 0.2	27.8± 0.6	797±25.1	2.7±0.1

ตารางที่ จ.6 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยโดยใช้สารคู่ควบผสมที่ปริมาณขี้เลื่อย 20 %

ชิ้นทดสอบ	Young's modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)	% Elongation at break	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (MPa)	Impact Strength (kJ/m^2)
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 20	82±5.0	8.8±0.1	5.7±0.8	19.6±1.6	866±0.2	1.4±0
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 20:(1%:2%) A-137:MAPE	315± 9.8	14.6±0.3	12.7± 0.4	32.6± 0.5	1509±3.7	2.9±0.1
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 20:(1.5%:1.5%) A-137:MAPE	247± 8.7	14.4± 0.4	9.1± 0.4	30.5± 0.5	1177±2.1	2.7±0.2
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 20: (2%:1%) A-137:MAPE	255± 6.1	14.3±0.3	9.3± 0.5	31.3± 0.6	1328±3.1	3.0±0.1
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 20:(1%:2%) A-1100:MAPE	264±10.9	12.0± 0.6	9.6± 0.6	27.2± 0.2	993±8.1	2.8±0.1
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 20:(1.5%:1.5%) A-1100:MAPE	218± 12.8	10.2± 0.2	8.7± 0.4	26.3± 0.2	902±28.1	2.7±0
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 20: (2%:1%) A-1100:MAPE	221± 4.0	10.0± 0.5	8.2± 0.2	26.3± 0.3	869±21.5	2.8±0.1

ตารางที่ จ.7 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยโดยใช้สารคู่ควบผสมที่ปริมาณขี้เลื่อย 30 %

ชิ้นทดสอบ	Young's modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)	% Elongation at break	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (MPa)	Impact Strength (kJ/m^2)
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 30	92±7.2	7.6±0.8	5.6±0.5	19.0±0.7	914±4.0	1.4±0
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 30:(1%:2%) A-137:MAPE	327± 5.3	13.6±0.1	10.2± 1.0	31.8± 0.6	1567±15.4	2.9±0.1
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 30:(1.5%:1.5%) A-137:MAPE	262± 5.3	12.9± 0.5	7.4± 0.3	29.6± 0.2	1277±12.4	2.7±0.2
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 30: (2%:1%) A-137:MAPE	279±4.5	13.3±0.1	8.8± 0.1	30.0± 0.7	1476±15.7	3.0±0.1
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 30:(1%:2%) A-1100:MAPE	297± 5.7	11.2± 0.6	7.8± 0.4	26.2±0.4	1205±25.8	2.8±0.1
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 30:(1.5%:1.5%) A-1100:MAPE	221± 8.2	10.1± 0.3	7.2± 0.5	25.3±0.2	1103±27.7	2.7±0
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 30: (2%:1%) A-1100:MAPE	231± 6.8	9.3± 0.4	6.9± 0.1	25.3±0.4	1028±24.3	2.8±0.1

ตารางที่ จ.8 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวของขี้เลื่อยโดยใช้สารคู่ควบผสมที่ปริมาณขี้เลื่อย 40 %

ชิ้นทดสอบ	Young's modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)	% Elongation at break	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (MPa)	Impact Strength (kJ/m^2)
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 40	99± 6.7	7.3±0.8	5.3±0.3	18.6±1.2	1070±9.3	1.3±0
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 40:(1%:2%) A-137:MAPE	354± 5.8	12.5±0.4	9.1± 0.3	30.4± 0.5	1794±22.6	2.6±0
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 40:(1.5%:1.5%) A-137:MAPE	261± 4.4	11.0± 0.6	7.6±1.0	28.7± 0.9	1524±13.7	2.7±0
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 40: (2%:1%) A-137:MAPE	264±8.8	11.1±0.1	8.1±0.4	29.1± 0.4	1566±22.7	2.8±0.1
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 40:(1%:2%) A-1100:MAPE	300± 2.5	10.5± 0.4	7.5±0.3	24.2± 0.3	1325±29.3	2.6±0
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 40:(1.5%:1.5%) A-1100:MAPE	237± 2.3	10.0± 0.5	6.9±0.4	23.1±0.4	1251±21.2	2.6±0
PVC 100 : LDPE 40 : PA20 15 : SD 40: (2%:1%) A-1100:MAPE	236± 1.6	8.8± 0.5	6.4±0.4	23.2±0.4	1277±29.4	2.5±0

ประวัติผู้ทำงานวิจัย

ชื่อ ศิริกาญจน์ ขันสัมฤทธิ์

วันเกิด 12 มีนาคม 2525

ภูมิลำเนา พิษณุโลก

ที่อยู่ 47/1 ม.3 ต.มะตูม อ. พรหมพิราม จ. พิษณุโลก 65150

การศึกษา
- ระดับมัธยม โรงเรียนเฉลิมขวัญสตรี
- ระดับปริญญาตรี (วท.บ.เคมี) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
- ระดับปริญญาโท (วท.ม.เทคโนโลยีพอลิเมอร์) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง