



รายงานการวิจัย

การปรับปรุงการต้านการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง  
พอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์  
(The improvement of flame retardancy of  
polypropylene/sisal composites)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การปรับปรุงการต้านการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง  
พอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์  
(The improvement of flame retardancy of  
polypropylene/sisal composites)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กษมา จารุกำจร  
สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์  
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิธินาถ ศุภกาญจน์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2553-2554

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง การปรับปรุงการต้านการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างพอลิโพรพิลีน และเส้นใยป่านศรนารายณ์ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี งบประมาณ 2553-2554 ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ช่วยวิจัย นายราชสิทธิ์ จีนเข้ม นักศึกษาสาขาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสุรนารี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัทเคมีคอล อินโนเวชัน จำกัด (Chemical Innovation Co., Ltd) ที่ให้ความอนุเคราะห์ Fusabond® P MZ109D บริษัทคลาเรียนท์ เคมีคอล (ประเทศไทย) จำกัด (Clariant Chemical (Thailand), Co., Ltd.) ที่ให้ความอนุเคราะห์ Exolit AP 765 บริษัทเบ็นไมเยอร์ เคมีคอล จำกัด (Behn Meyer Chemical Co., Ltd.) ที่ให้ความอนุเคราะห์ APYMAG® 40 และบริษัทเมทเลอร์ โทเลโด (ประเทศไทย) จำกัด (Mettler Toledo (Thailand), Co., Ltd.) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง thermo gravimetric analyzer



## บทคัดย่อ

วัสดุคอมโพสิตของพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์ถูกเตรียมโดยใช้เครื่องบดผสมภายใน เส้นใยป่านศรนารายณ์ถูกเตรียมเป็นเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับเปลี่ยนและเส้นใยที่ผ่านการปรับเปลี่ยนด้วยสารละลายต่าง ๆ ชิ้นงานทดสอบถูกขึ้นรูปโดยใช้เครื่องฉีดขึ้นรูป แอมโมเนียมโพลิฟอสเฟตใช้เป็นสารหน่วงไฟปรับปรุงสมบัติการต้านการติดไฟและความเสถียรทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยป่านศรนารายณ์โดยไม่ทำให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงไปอย่างมาก การเพิ่มปริมาณของแอมโมเนียมโพลิฟอสเฟตปรับปรุงสมบัติการต้านการติดไฟและความเสถียรทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิต ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงการกระจายตัวที่ไม่ดีของแอมโมเนียมโพลิฟอสเฟตในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์และการยึดติดที่ไม่ดีระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์และพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ นอกจากนี้การทำอัลคาไลน์เซชันไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติทางกลและการต้านการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิต พอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ไม่ผ่านการปรับเปลี่ยนที่มีการใส่แอมโมเนียมโพลิฟอสเฟตปริมาณ 40 ส่วนใน 100 ส่วนของพอลิโพรพิลีน แสดงสมบัติการต้านการติดไฟและความเสถียรทางความร้อนสูงสุด การใส่พอลิโพรพิลีนกราฟท์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ลงในพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ไม่ผ่านการปรับเปลี่ยน ส่งผลต่อการปรับปรุงค่าการทนต่อแรงดึง เนื่องจาก การปรับปรุงการยึดติดระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์และพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ การเติมพอลิโพรพิลีนกราฟท์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ไม่ส่งผลอย่างมากต่อสมบัติการต้านการติดไฟ สมบัติทางความร้อน และความหนืดของพอลิเมอร์คอมโพสิต แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์หรือซิงค์บอเรนนำไปใช้ร่วมกับแอมโมเนียมโพลิฟอสเฟต คอมโพสิตที่ใส่แอมโมเนียมโพลิฟอสเฟตและซิงค์บอเรนที่อัตราส่วน 30 ต่อ 10 แสดงสมบัติการต้านการติดไฟสูงสุด อย่างไรก็ตาม การใส่แอมโมเนียมโพลิฟอสเฟตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ในพอลิเมอร์คอมโพสิตส่งผลในทางลบต่อสมบัติการต้านการติดไฟ การใส่สารหน่วงไฟ 2 ชนิดร่วมกันคือ แอมโมเนียมโพลิฟอสเฟตกับแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์หรือแอมโมเนียมโพลิฟอสเฟตกับซิงค์บอเรนลงในคอมโพสิตส่งผลให้สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงเล็กน้อย ในขณะที่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญของสมบัติทางกลและความหนืด การใส่เส้นใยแก้วลงในพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ไม่ผ่านการปรับเปลี่ยนปรับปรุงสมบัติความเสถียรทางความร้อนและสมบัติการต้านการติดไฟ เมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใยแก้ว ค่าการทนต่อแรงดึง โมดูลัสแรงดึง และค่าการทนต่อแรงกระทำของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ไม่ผ่านการปรับเปลี่ยนมีค่าเพิ่มขึ้น

## Abstract

Composites based on polypropylene (PP) and sisal fiber were prepared by an internal mixer. Sisal fiber was prepared as an untreated fiber (UT) and an alkali treated fiber (AT). The test specimens were molded by an injection molding machine. Ammonium polyphosphate (APP) used as a flame retardant improved flame retardancy and thermal stability of PP/sisal composites without extreme deterioration of mechanical properties of the composites. With increasing APP content, flame retardancy and thermal stability of the composites were improved. Scanning electron micrographs revealed poor distribution of APP in PP matrix and poor adhesion between sisal fiber and PP matrix. In addition, alkalization showed no remarkable effect on the mechanical properties and flame retardancy of the composites. PP/UT composite containing 40 phr of APP showed the highest flame retardancy and thermal properties. Adding maleic anhydride grafted polypropylene (MAPP) into PP/UT composites resulted in improvement of tensile strength due to enhanced adhesion between sisal fiber and PP matrix. Flame retardancy, thermal properties, and viscosity of the composites were not much affected by the incorporation of MAPP. Magnesium hydroxide ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) or zinc borate (Zb) was used in combination with APP. The composite filled with APP/Zb at the ratio of 30/10 exhibited the highest flame retardancy. However, adding combination of APP and  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  into the composites gave a negative effect on flame retardancy. With incorporating combination of flame retardants, APP/ $\text{Mg}(\text{OH})_2$  or APP/Zb, into composites, thermal properties of the composites slightly decreased while mechanical properties and viscosity insignificantly changed. Incorporation of glass fiber into PP/UT composites improved thermal stability and flame retardancy. With increasing glass fiber content, tensile strength, tensile modulus, and impact strength of PP/UT composites were increased.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ .....	ซ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย .....	3
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	5
<b>บทที่ 2 ภูมิหลัง</b>	
2.1 สารหน่วงไฟสำหรับพอลิโพรพิลีน.....	6
2.1.1 สารประกอบฮาโลเจน (halogen compounds) .....	6
2.1.2 สารประกอบฟอสฟอรัส (phosphorus compounds).....	7
2.1.3 สารประกอบซิลิคอน (silicon compounds).....	7
2.1.4 โลหะไฮดรอกไซด์ (metal hydroxides).....	7
2.1.5 สารอนุภาคนาโน (nanoparticles).....	7
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลของสารหน่วงไฟต่อสมบัติทางกายภาพ ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการเสริมแรงด้วยสารตัวเติมเซลลูโลส .....	8
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลของการเติมเส้นใยแก้วต่อสมบัติ ทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการเสริมแรงด้วยสารตัวเติมเซลลูโลส.....	9
<b>บทที่ 3 วัสดุและการทดลอง</b>	
3.1 วัสดุ.....	12
3.2 การทดลอง .....	12
3.2.1 การเตรียมเส้นใย.....	12
3.2.2 การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต.....	13

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.3 การทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต .....	17
3.2.3.1 สมบัติการต้านการตีไฟ .....	17
3.2.3.2 สมบัติทางความร้อน .....	18
3.2.3.3 สมบัติทางกล .....	18
3.2.3.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา .....	18
3.2.3.3 สมบัติทางกระแสวิทยา .....	18
<b>บทที่ 4 ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง</b>	
4.1 ผลของสารหน่วงไฟและปริมาณสารหน่วงไฟต่อสมบัติทางกายภาพของ พอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์ .....	19
4.1.1 สมบัติการต้านการตีไฟ .....	19
4.1.2 สมบัติทางความร้อน .....	20
4.1.3 สมบัติทางกล .....	23
4.1.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา .....	27
4.1.5 สมบัติทางกระแสวิทยา .....	29
4.2 ผลของสารช่วยให้เข้ากันและปริมาณสารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติทางกายภาพ ของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์ .....	31
4.2.1 สมบัติการต้านการตีไฟ .....	31
4.2.2 สมบัติทางความร้อน .....	31
4.2.3 สมบัติทางกล .....	32
4.2.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา .....	35
4.2.5 สมบัติทางกระแสวิทยา .....	36
4.3 ผลของการใช้สารหน่วงไฟ 2 ชนิดร่วมกันและอัตราส่วนระหว่างสารหน่วงไฟ 2 ชนิดต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีน และเส้นใยป่านศรนารายณ์ .....	38
4.3.1 สมบัติการต้านการตีไฟ .....	38
4.3.2 สมบัติทางความร้อน .....	40
4.3.3 สมบัติทางกล .....	42
4.3.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา .....	44

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.5 สมบัติทางกระแสวิทยา .....	46
4.4 ผลของเส้นใยแก้วต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่าง พอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์ .....	48
4.4.1 สมบัติการต้านการตีไฟ.....	48
4.4.2 สมบัติทางความร้อน .....	48
4.4.3 สมบัติทางกล.....	49
4.4.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา.....	51
4.4.5 สมบัติทางกระแสวิทยา .....	53
บทที่ 5 บทสรุป .....	54
สรุปผลการวิจัย .....	54
บรรณานุกรม .....	56
ประวัติผู้วิจัย.....	60





## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ชื่อและส่วนประกอบของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพลีทที่มีการใส่แอมโมเนียม โพลีฟอสเฟตที่ปริมาณต่างๆ .....	14
3.2 ชื่อและส่วนประกอบของพอลิเมอร์คอมโพลีทที่มีการใส่พอลิโพรพิลีนกราฟท์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณต่างๆ .....	14
3.3 ชื่อและส่วนประกอบของพอลิเมอร์คอมโพลีทที่มีการใส่สารหน่วงไฟ 2 ชนิดที่อัตราส่วนต่างๆ .....	15
3.4 ชื่อและส่วนประกอบของพอลิเมอร์คอมโพลีทที่มีการใส่ เส้นใย 2 ชนิดที่อัตราส่วนต่างๆ .....	16
4.1 อัตราการเผาไหม้และอันดับการเผาไหม้ของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพลีทที่มีการใส่ APP ที่ปริมาณต่างๆ.....	19
4.2 สมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพลีทที่มีการใส่ APP ที่ปริมาณต่างๆ.....	22
4.3 สมบัติทางกลของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพลีทที่มีการใส่ APP ที่ปริมาณต่างๆ.....	25
4.4 อัตราการเผาไหม้และอันดับการเผาไหม้ของพอลิเมอร์คอมโพลีทที่มีการใส่ MAPP ที่ปริมาณต่างๆ.....	31
4.5 สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพลีทที่มีการใส่ MAPP ที่ปริมาณต่างๆ .....	32
4.6 สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพลีทที่มีการใส่ MAPP ที่ปริมาณต่างๆ.....	34
4.7 อัตราการเผาไหม้และอันดับการเผาไหม้ของพอลิเมอร์คอมโพลีทที่มีการใส่สารหน่วงไฟ 2 ชนิดร่วมกัน .....	39
4.8 สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพลีทที่มีการใส่สารหน่วงไฟ 2 ชนิดร่วมกัน.....	40
4.9 สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพลีทที่มีการใส่สารหน่วงไฟ 2 ชนิดร่วมกัน .....	42
4.10 อัตราการเผาไหม้และอันดับการเผาไหม้ของพอลิเมอร์คอมโพลีทที่มีการใส่เส้นใยปานสรนารายฉนวนและเส้นใยแก้วร่วมกัน.....	48
4.11 สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพลีทที่มีการใส่เส้นใย 2 ชนิดร่วมกัน.....	49
4.12 สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพลีทที่มีการใส่เส้นใย 2 ชนิดร่วมกัน .....	50

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
4.1 กราฟ TGA ของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยปานสรณารายณ์ที่ไม่ผ่านการปรับเปลี่ยน (PP/UT) ที่มีการใส่ APP ที่ปริมาณต่างๆ.....	22
4.2 กราฟ TGA ของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยปานสรณารายณ์ที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน (PP/AT) ที่มีการใส่ APP ที่ปริมาณต่างๆ .....	23
4.3 มอดูลัสแรงดึงของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ APP ที่ปริมาณต่างๆ .....	25
4.4 การทนต่อแรงดึงของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ APP ที่ปริมาณต่างๆ .....	26
4.5 การทนต่อแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ APP ที่ปริมาณต่างๆ .....	26
4.6 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ APP ที่ปริมาณต่างๆ (a) PP/UT (b) PP/AT (c) PP/UT/10APP (d) PP/AT/10APP (e) PP/UT/20APP (f) PP/AT/20APP (g) PP/UT/30APP (h) PP/AT/30APP (i) PP/UT/40APP (j) PP/AT/40APP .....	27
4.7 ความหนืดที่อัตราเฉือนต่างๆ ของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยปานสรณารายณ์ที่ไม่ผ่านการปรับเปลี่ยนที่มีการใส่ APP ที่ปริมาณต่างๆ .....	29
4.8 ความหนืดที่อัตราเฉือนต่างๆ ของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยปานสรณารายณ์ที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันที่มีการใส่ APP ที่ปริมาณต่างๆ .....	30
4.9 กราฟ TGA ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ MAPP ที่ปริมาณต่างๆ .....	32
4.10 แบบจำลองโครงสร้างของ MAPP และเส้นใยธรรมชาติที่อินเทอร์เฟส .....	33
4.11 สมบัติการทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ MAPP ที่ปริมาณต่างๆ ....	34
4.12 การทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ MAPP ที่ปริมาณต่างๆ.....	35

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ MAPP ที่ปริมาณต่างๆ (a) PP/UT/40APP (b) PP/UT/40APP/1MAPP (c) PP/UT/40APP/3MAPP (d) PP/UT/40APP/5MAPP.....	36
4.14 ความหนืดที่อัตราเฉือนต่างๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ MAPP ที่ปริมาณต่างๆ.	37
4.15 กราฟ TGA ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ APP และ Mg(OH) <sub>2</sub> ร่วมกัน .....	41
4.16 กราฟ TGA ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ APP และ Zb ร่วมกัน .....	41
4.17 การทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่สารหน่วงไฟ 2 ชนิดร่วมกัน ...	43
4.18 มอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่สารหน่วงไฟ 2 ชนิดร่วมกัน .....	43
4.19 การทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่สารหน่วงไฟ 2 ชนิดร่วมกัน .....	44
4.20 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่สารหน่วงไฟ 2 ชนิด ร่วมกัน (a) PP/UT/40APP/3MAPP (b) PP/UT/30APP/10Mg/ 3MAPP (c) PP/UT/20APP/20Mg/3MAPP (d) PP/UT/10APP/30Mg/3MAPP (e) PP/UT/40Mg/3MAPP(f) PP/UT/30APP/10Zb/3MAPP (g) PP/UT/20APP/20Zb/3MAPP (h) PP/UT/10APP/30Zb/3MAPP (i) PP/UT/40Zb/3MAPP .....	45
4.21 ความหนืดที่อัตราเฉือนต่างๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ APP และ Mg(OH) <sub>2</sub> ร่วมกัน.....	47
4.22 ความหนืดที่อัตราเฉือนต่างๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ APP และ Zb ร่วมกัน .....	47
4.23 กราฟ TGA ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่เส้นใย 2 ชนิดร่วมกัน .....	49
4.24 สมบัติการทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่เส้นใย 2 ชนิดร่วมกัน ...	50
4.25 การทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่เส้นใย 2 ชนิดร่วมกัน....	51
4.26 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่เส้นใย 2 ชนิดร่วมกัน (a) PP/30UT/30APP/10Zb/3MAPP (b) PP/20UT/10GF/30APP/10Zb/3MAPP (c) PP/15UT/15/GF/30APP/10Zb/3MAPP (d) PP/10UT/20GF/30APP/10Zb/3MAPP (e) PP/30GF/30APP/10Zb/3MAPP .....	52
4.27 ความหนืดที่อัตราเฉือนต่างๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่เส้นใย 2 ชนิดร่วมกัน....	53

## ประวัติผู้วิจัย

### หัวหน้าโครงการ

นางสาว กษมา จารุกัจฉ์ ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สถานที่ติดต่อ สาขาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000 การศึกษา พ.ศ. 2533 วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมี) เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง มหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ. 2536 วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์) มหาวิทยาลัยมหิดล และ พ.ศ. 2542 Ph.D. (Polymer Engineering) University of Akron, OH, USA สาขาวิชาการที่มีความสนใจ กระบวนการขึ้นรูปและตรวจสอบพอลิเมอร์ (polymer processing and characterization) และพอลิเมอร์ผสมและคอมโพสิต (polymer blend and composites) ผลงานทางวิชาการ ประกอบด้วย บทความทางวิชาการ 31 บทความ และรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ 5 ฉบับ

### ผู้ร่วมวิจัย

นางสาว นิธินาถ สุขกาญจน์ ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สถานที่ติดต่อ สาขาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000 การศึกษา พ.ศ. 2536 วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมี) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2538 วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์) วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ พ.ศ. 2542 Ph.D. (Macromolecular Science) University of Case Western Reserve, USA สาขาวิชาการที่มีความสนใจ การตรวจสอบพอลิเมอร์ (polymer characterization) และพอลิเมอร์คอมโพสิต (polymer composites) ผลงานทางวิชาการ ประกอบด้วย บทความทางวิชาการ 35 บทความ และรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ 8 ฉบับ

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

การนำเส้นใยธรรมชาติมาใช้ในการเสริมแรงของพอลิเมอร์ได้รับความสนใจมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่ต้องใช้เวลานานในการย่อยสลายตามธรรมชาติ ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม การนำเส้นใยธรรมชาติมาใช้ในพอลิเมอร์ นอกจากจะเป็นการลดปริมาณพอลิเมอร์ที่ใช้แล้ว ยังเป็นการปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆ ของพอลิเมอร์ เมื่อนำพอลิเมอร์นั้นมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ เส้นใยธรรมชาติจัดเป็นสินค้าเกษตรที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งของประเทศไทย ซึ่งในปัจจุบันการใช้ประโยชน์จากเส้นใยธรรมชาติในประเทศไทยนอกเหนือจากการส่งออกในรูปแบบผลิตภัณฑ์การเกษตรมีน้อยมาก จึงได้มีความพยายามในการนำเส้นใยธรรมชาติมาใช้เป็นสารเสริมแรงด้วยเหตุผลทางด้านเศรษฐศาสตร์และความปลอดภัยต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม การใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นสารเสริมแรงมีข้อดีต่างๆ เช่น เส้นใยธรรมชาติสามารถปลูกทดแทนได้ ราคาถูกหาได้ง่าย ความหนาแน่นต่ำ ย่อยสลายได้ในระบบชีวภาพ มีความแข็งแรงเฉพาะ (specific strength) ที่สูง และไม่อันตรายต่อเครื่องจักรและสุขภาพคนงาน เส้นใยธรรมชาติที่มีการศึกษาวิจัย เช่น เส้นใยจากปอควา (kenaf) ปอกระเจา (jute) ปอแก้ว (rosells) ปอลินิน (flax) กัญชง (hemp) ป่านศรนารายณ์ (sisal) ฝ้าย (cotton) ไม้ไผ่ (bamboo) หญ้าแฝก (vetiver grass) ต้นกล้วย (banana bast) ปาล์ม (palm) กาบมะพร้าว (coir) เป็นต้น ซึ่งเส้นใยเหล่านี้บางชนิดสามารถหาได้ในพื้นที่ต่างๆ ของประเทศไทย ดังนั้น แนวทางหนึ่งที่สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับเส้นใยธรรมชาติในประเทศไทย คือ การนำมาใช้เป็นสารเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตซึ่งเป็นการนำเอาสมบัติที่ดีของเส้นใยธรรมชาติมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด และเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับเส้นใยธรรมชาติอีกทางหนึ่ง

เส้นใยป่านศรนารายณ์เป็นเส้นใยธรรมชาติชนิดหนึ่งที่มีสมบัติเด่นด้านความเหนียว และมีพื้นที่เพาะปลูกส่วนหนึ่งอยู่ที่อำเภอด่านขุนทด จังหวัดนครราชสีมา ปัจจุบันพื้นที่ปลูกป่านศรนารายณ์ลดลงอย่างมาก เนื่องจากเกษตรกรประสบกับปัญหาผลผลิตราคาตกต่ำ การขาดแคลนแรงงานในการเก็บเกี่ยว รวมทั้งการเปลี่ยนไปปลูกพืชชนิดอื่นๆ ที่เกษตรกรเห็นว่าง่ายและมีรายได้มากกว่า [เอกสารแผนพัฒนาการผลิตป่านศรนารายณ์, 2545] การนำเส้นใยธรรมชาติชนิดนี้มาใช้เป็นสารตัวเติมหรือสารเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของรายได้ในภาคเกษตรกรรม ทั้งในรูปของการเพิ่มตลาดและการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลิตภัณฑ์เกษตร

พอลิโพรพิลีนเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีการใช้มากในการผลิตคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสั้น เนื่องจากมีข้อดีต่างๆ เช่น การขึ้นรูปง่าย อุณหภูมิในการขึ้นรูปไม่สูง สมบัติทางกลดี

ราคาไม่สูง ความหนาแน่นต่ำ เป็นต้น แต่เนื่องจากพอลิเมอร์และเส้นใยธรรมชาติจัดเป็นวัสดุอินทรีย์ จึงมีการต้านการติดไฟที่ต่ำ เป็นเชื้อเพลิงที่ดี การปรับปรุงสมบัติการต้านการติดไฟของวัสดุคอมโพสิตนี้จึงมีความสำคัญมาก เพื่อความปลอดภัยในการใช้งานของผลิตภัณฑ์ ซึ่งกระบวนการในการเผาไหม้ (burning) ประกอบด้วย 5 ขั้นตอน คือ การให้ความร้อน (heating) การเสื่อมสลาย (decomposition) การจุดติดไฟ (ignition) การไหม้ไฟ (combustion) และการแผ่ขยาย (propagation) [Hilaldo, 1998] การต้านการติดไฟ สามารถทำได้โดยการขัดขวางขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งในกระบวนการเผาไหม้ ที่จะส่งผลต่อการหยุดกระบวนการก่อนที่การจุดติดไฟจะเกิดขึ้น ซึ่งการใส่สารหน่วงไฟ (flame retardant) เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากและมีประสิทธิภาพ สารหน่วงไฟที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง เช่น สารประกอบอนินทรีย์ (inorganic compounds) สารประกอบฮาโลเจน (halogen compounds) สารประกอบฟอสฟอรัส (phosphorus compounds) [Rigolo and Woodhams, 1992] ในกรณีของพอลิโพลีเอทิลีน สารหน่วงไฟที่มีโบรมีน (bromine containing flame retardant) และระบบที่มีการใช้แอนติโมนี ไตรออกไซด์ (antimony trioxide) ร่วมกัน เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดและมีอัตราส่วนของสมบัติการต้านการติดไฟต่อราคาที่ดี แต่การใช้สารหน่วงไฟนี้มีข้อจำกัดเกี่ยวกับความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม สารหน่วงไฟประเภทสารประกอบอนินทรีย์ เช่น โลหะไฮดรอกไซด์ (metallic hydroxide) ได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากการตระหนักถึงปัญหาสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยทางสุขภาพ ซึ่งแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (magnesium hydroxide,  $Mg(OH)_2$ ) และอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (aluminium hydroxide,  $Al(OH)_3$ ) จัดเป็นสารหน่วงไฟชนิดโลหะไฮดรอกไซด์ที่มีการใช้กันมาก แต่อย่างไรก็ตาม สารหน่วงไฟสามารถส่งผลในทางลบต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ [Li and Xu, 2006] ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการหาปริมาณสารหน่วงไฟที่เหมาะสมในระบบพอลิเมอร์คอมโพสิตนั้น เนื่องจากสารหน่วงไฟแต่ละชนิดมีกลไกและประสิทธิภาพในการต้านการติดไฟต่างกัน การศึกษาผลของการเสริมกัน (synergistic effect) ของสารหน่วงไฟ 2 ชนิด เป็นหัวข้อที่น่าสนใจ ไม่ว่าจะเป็นการส่งผลต่อสมบัติการต้านการติดไฟ หรือสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิต แต่อาจส่งผลในทางต้นทุนการผลิตหรือความปลอดภัยในการผลิตและใช้งาน

ในโครงการวิจัยนี้คณะผู้วิจัยต้องการปรับปรุงสมบัติการต้านการติดไฟของวัสดุคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์ชนิดสั้น โดยศึกษาผลของสารหน่วงไฟและปริมาณของสารหน่วงไฟต่อสมบัติการต้านการติดไฟ สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกล สมบัติทางกระแสไฟฟ้า และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิต และมีการศึกษาสารช่วยให้เข้ากัน (compatibilizer) และปริมาณของสารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติการต้านการติดไฟ สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกล สมบัติทางกระแสไฟฟ้า และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิต นอกจากนี้มีผลการศึกษาผลการเสริมกันของสารหน่วงไฟ 2 ชนิด เพื่อหาปริมาณของสารหน่วงไฟที่เหมาะสมในระบบ และศึกษาผล

ของการใช้เส้นใยป่านสรนารายณ์ร่วมกับเส้นใยแก้วต่อสมบัติการด้านการติดไฟ สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกล สมบัติทางกระแสไฟฟ้า และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิต การพัฒนาวัสดุคอมโพสิตตามแนวทางการวิจัยนี้เป็นวิธีหนึ่งในการปรับปรุงการด้านการติดไฟของวัสดุคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านสรนารายณ์ชนิดสั้น ซึ่งวัสดุคอมโพสิตที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ จะเป็นผลิตภัณฑ์ต้นแบบในการพัฒนาสู่อุตสาหกรรมเฉพาะทางต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อให้ทราบถึงผลของสารหน่วงไฟต่อสมบัติการด้านการติดไฟ สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกล สมบัติทางกระแสไฟฟ้า และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านสรนารายณ์ชนิดสั้น

1.2.2 เพื่อให้ทราบถึงผลของการใช้สารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติการด้านการติดไฟ สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกล สมบัติทางกระแสไฟฟ้า และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านสรนารายณ์ชนิดสั้น

1.2.3 เพื่อให้ทราบถึงผลของการใช้สารหน่วงไฟ 2 ชนิด ต่อสมบัติการด้านการติดไฟ สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกล สมบัติทางกระแสไฟฟ้า และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านสรนารายณ์ชนิดสั้น

1.2.4 เพื่อให้ทราบถึงผลของการใช้เส้นใยแก้วต่อสมบัติการด้านการติดไฟ สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกล สมบัติทางกระแสไฟฟ้า และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านสรนารายณ์ชนิดสั้นที่มีการใส่สารหน่วงไฟ

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 เปรียบเทียบสมบัติการด้านการติดไฟ สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกล สมบัติทางกระแสไฟฟ้า และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปริมาณต่างๆ ของสารหน่วงไฟ

1.3.2 เปรียบเทียบสมบัติการด้านการติดไฟ สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกล สมบัติทางกระแสไฟฟ้า และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปริมาณต่างๆ ของสารช่วยให้เข้ากัน

1.3.3 เปรียบเทียบสมบัติการด้านการติดไฟ สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกล สมบัติทางกระแสไฟฟ้า และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใช้สารหน่วงไฟ 2 ชนิดร่วมกัน

1.3.4 ศึกษาสมบัติการด้านการติดไฟ สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกล สมบัติทางกระแสไฟฟ้า และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้เส้นใยป่านสรนารายณ์ และพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้เส้นใยป่านสรนารายณ์กับเส้นใยแก้ว และเปรียบเทียบสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ได้

## 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 เตรียมคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่มีการใส่สารหน่วงไฟชนิดแอมโมเนียม โพลีฟอสเฟต (ammonium polyphosphate, APP) ที่ปริมาณ 10 20 30 40 ส่วนใน 100 ส่วนของพอลิเมอร์ (part per hundred of resin, phr) ซึ่งเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ใช้ในการวิจัยนี้อยู่ในรูปเส้นใยสั้นซึ่งผ่านละไม่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน (alkalization) ปริมาณเส้นใยที่ใช้ คือ 30 phr การผสมทำในเครื่องบดผสมภายใน (internal mixer) นำพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมได้ไปขึ้นรูปโดยวิธีการฉีด (injection molding) เพื่อตรวจสอบสมบัติในข้อ 1.4.2.

### 1.4.2 ทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต

#### 1.4.2.1 สมบัติการต้านการติดไฟ

- อัตราการเผาไหม้ (vertical burning rate) โดยวิธีการทดสอบการเผาไหม้ทางแนวนอน (horizontal burning test)
- อันดับของการเผาไหม้ (horizontal burning rating) โดยวิธีการทดสอบการเผาไหม้ทางแนวตั้ง (vertical burning test)

#### 1.4.2.2 สมบัติทางความร้อน

- อุณหภูมิเสื่อมสลาย (decomposition temperature) โดยใช้เครื่อง thermo gravimetric analyzer

#### 1.4.2.3 สมบัติทางกล

- สมบัติการทนต่อแรงดึง โดยใช้เครื่อง universal testing machine
- สมบัติการทนต่อแรงกระแทก โดยใช้เครื่อง impact tester

#### 1.4.2.4 สัณฐานวิทยา

- ตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยใช้เครื่อง scanning electron microscope (SEM)

#### 1.4.2.5 สมบัติทางกระแสวิทยา

- การทดสอบค่าความหนืด (viscosity) ที่อัตราเลือนต่างๆ โดยทดสอบด้วยเครื่อง capillary rheometer

1.4.3 เตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่มีการใส่สารหน่วงไฟชนิด APP โดยเลือกปริมาณสารหน่วงไฟชนิด APP ที่เหมาะสมที่ได้จากหัวข้อ 1.4.1 มาศึกษาปริมาณของสารช่วยให้เข้ากันคือ พอลิโพรพิลีนกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride grafted polypropylene, MAPP) ที่ 1 3 และ 5 phr เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเมทริกซ์และเส้นใย การเตรียมและการทดสอบพอลิเมอร์คอมโพสิตอธิบายในหัวข้อ 1.4.1 และ 1.4.2 ตามลำดับ



1.4.4 เตรียมคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยป่านสรนารายณ์ที่มีการใส่สารหน่วงไฟชนิด APP และสารหน่วงไฟชนิดอื่น 1 ชนิด คือ ซิงค์บอเรท (zinc borate, Zb) หรือ  $Mg(OH)_2$  โดยเลือกปริมาณสารหน่วงไฟชนิด APP และสารช่วยให้เข้ากัน (MAPP) ที่เหมาะสมที่ได้จากหัวข้อ 1.4.3 มาศึกษาอัตราส่วนของสารหน่วงไฟทั้ง 2 ชนิด 3 อัตราส่วน การเตรียมและการทดสอบพอลิเมอร์คอมโพสิตอธิบายในหัวข้อ 1.4.1 และ 1.4.2 ตามลำดับ

1.4.5 เตรียมคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใย 2 ชนิดคือ เส้นใยป่านสรนารายณ์และเส้นใยแก้ว ซึ่งเส้นใยทั้ง 2 ชนิดจะอยู่ในรูปเส้นใยสั้น ปริมาณเส้นใยทั้งสองคงที่ที่ 30 phr ศึกษาผลของอัตราส่วนของเส้นใยทั้งสอง โดยพิจารณาผลของการใส่สารหน่วงไฟประกอบ ใช้ปริมาณสารหน่วงไฟที่เหมาะสมที่ได้จากผลการศึกษาในหัวข้อที่ 1.4.4 และปริมาณ MAPP ที่เหมาะสมที่ได้จากผลการศึกษาในหัวข้อที่ 1.4.3 การเตรียมและการทดสอบพอลิเมอร์คอมโพสิตอธิบายในหัวข้อ 1.4.1 และ 1.4.2 ตามลำดับ เปรียบเทียบสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ได้จากระบบที่มีเส้นใยชนิดเดียวกับพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ได้จากระบบที่มีเส้นใย 2 ชนิด

#### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

- 1.5.1 ได้พอลิเมอร์คอมโพสิตชนิดใหม่ที่มีแนวโน้มในการพัฒนาไปสู่การใช้งานจริง
- 1.5.2 เป็นองค์ความรู้สำหรับการวิจัยขั้นถัดไป ในด้านการพัฒนาพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้ผลิตผลทางการเกษตร
- 1.5.3 เป็นการเพิ่มประโยชน์การใช้งานและมูลค่าให้กับป่านสรนารายณ์
- 1.5.4 เป็นการส่งเสริมการพึ่งพาตนเองภายในประเทศจากการผลิตพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้วัตถุดิบจากทรัพยากรภายในประเทศ
- 1.5.5 เป็นการพัฒนาทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุของประเทศอย่างต่อเนื่อง
- 1.5.6 ได้เอกสารวิชาการที่ตีพิมพ์ระดับประเทศและ/หรือระดับนานาชาติ
- 1.5.7 เป็นการส่งเสริมและพัฒนาแก่นักวิจัยรุ่นใหม่

## บทที่ 2

### ภูมิหลัง

#### 2.1 สารหน่วงไฟสำหรับพอลิโพรพิลีน

กลไกการด้านการติดไฟของสารหน่วงไฟสำหรับพอลิโพรพิลีนมีดังนี้ [Jha, Misra, and Bajai, 1984]

(1) โดยการเปลี่ยนปฏิกิริยาไพโรไลซิส (pyrolysis reactions) ของพอลิโพรพิลีน ทำให้เกิดเป็นถ่านคาร์บอนเนเชียส (carbonaceous char) ซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนกันความร้อนและก๊าซที่สามารถติดไฟได้ให้กับพอลิโพรพิลีน

(2) โดยการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ (free-radicals) ไปเจือจางก๊าซที่สามารถติดไฟได้ในบริเวณที่ก่อนจะติดไฟ (pre-flame zone) และบริเวณที่มีการติดไฟ (flame zone)

(3) โดยการใส่สารเติมแต่งอนินทรีย์ชนิดไฮเดรต (hydrated inorganic additive) ซึ่งสลายตัวเป็นเถ้าและน้ำทำหน้าที่เป็นฉนวนกันความร้อนและลดความร้อนให้กับพอลิโพรพิลีน

(4) โดยการปรับแต่งโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ซึ่งทำให้กระบวนการสลายตัวของพอลิโพรพิลีนเปลี่ยนไปหรือไปปรับปรุงความเข้ากันได้กับสารหน่วงไฟชนิดอื่น เพื่อเสริมประสิทธิภาพการหน่วงไฟ

(5) โดยการใส่สารทำให้เกิดเถ้า (char-forming additive) โดยการเกิดเถ้าอินทูเมสเซนท์ (intumescent char-forming) ซึ่งเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีและกันก๊าซที่ติดไฟได้ให้กับพอลิโพรพิลีน

##### 2.1.1 สารประกอบฮาโลเจน (halogen compounds)

สารประกอบฮาโลเจนเป็นที่นิยมในการนำมาใช้เป็นสารหน่วงไฟของพอลิโพรพิลีนในช่วงหลายปีที่ผ่านมา เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดี เมื่อมีการเผาไหม้เกิดขึ้น สารประกอบฮาโลเจนเกิดการสลายตัวเป็นไฮโดรเจนเฮไลด์ (hydrogen halides) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอนอะตอมที่เกิดจากการสลายตัวของพอลิโพรพิลีนในระหว่างการเผาไหม้ได้เป็นก๊าซซึ่งสามารถเจือจางก๊าซที่สามารถติดไฟได้ให้กับพอลิโพรพิลีน เป็นการยับยั้งขั้นตอนการแผ่ขยายในกระบวนการเผาไหม้ได้ [Georlette, 2001] แต่อย่างไรก็ตาม การใช้สารประกอบฮาโลเจน เป็นสารหน่วงไฟ มีข้อเสียคือ มีควันมาก และมีการปลดปล่อยก๊าซที่เป็นพิษต่อมนุษย์ในระหว่างการเผาไหม้ซึ่งไม่เหมาะสมกับการใช้งานบางประเภท [Sen, Mukherjee, and Bhowmick, 1991]

### 2.1.2 สารประกอบฟอสฟอรัส (phosphorus compounds)

สารประกอบฟอสฟอรัสเป็นสารหน่วงไฟอีกชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในพอลิโพรพิลีน เนื่องจากไม่เป็นพิษ มีค่าน้อย ในระหว่างการเผาไหม้ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [Aston, 2005] สารประกอบฟอสฟอรัสได้แก่ แอมโมเนียม โพลีฟอสเฟต (ammonium polyphosphate, APP) เพนตาอีริทริทอล ฟอสเฟต (pentaerythritol phosphate) และเมลามีน ฟอสเฟต (melamine phosphate, MP) ซึ่งแต่ละชนิดมีกลไกที่ต่างกันและนิยมใช้ร่วมกัน เรียกว่า สารหน่วงไฟระบบอินทูเมสเซนซ์ (intumescent flame retardant) ในระหว่างการเผาไหม้ APP สลายตัวเป็นกรด แล้วทำปฏิกิริยากับสารประกอบคาร์บอนได้เป็นเถ้าซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนกันเปลวไฟ ความร้อนและก๊าซที่สามารถติดไฟ เพนตาอีริทริทอล ฟอสเฟต ทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบคาร์บอน (carbonization agent) และ MP ทำหน้าที่เป็นสารทำให้เกิดโฟม (blowing agent) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเป็นฉนวนกันความร้อน [Hendrickson and Connole, 1995]

### 2.1.3 สารประกอบซิลิคอน (silicon compounds)

สารประกอบซิลิคอน ได้แก่ ซิแลน (silanes) ซิลอกเซน (siloxane) และซิลิเซสคว็อกเซน (silsesquioxanes) เป็นสารหน่วงไฟที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ไม่เป็นพิษ มีประสิทธิภาพที่ดีในการปรับปรุงความเสถียรทางความร้อนของพอลิโพรพิลีน [Franz and Stein, 1975] กลไกหลักในการต้านการติดไฟของสารประกอบซิลิคอนคือ แตกตัวเป็นอนุโมลอิสระไปเจือจางก๊าซที่สามารถติดไฟในระหว่างการเผาไหม้ [Alberto, Hendrikus, Abbenhuis, and Giovanni, 2006] นอกจากนี้ สารประกอบซิลิคอนเป็นสารหน่วงไฟที่สามารถปรับปรุงการทนต่อแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนได้ [Zhang and horrocks, 2003]

### 2.1.4 โลหะไฮดรอกไซด์ (metal hydroxides)

สารหน่วงไฟชนิดโลหะไฮดรอกไซด์เป็นสารหน่วงไฟที่มีการใช้ในพอลิโพรพิลีน เนื่องจากมีค่าน้อย มีความเป็นพิษต่ำ ในระหว่างการเผาไหม้ [Sain, Park, Suhara, and Law, 2004] โลหะไฮดรอกไซด์ได้แก่ อลูมิเนียม ไฮดรอกไซด์ (aluminium hydroxide,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) แมกนีเซียมคาร์บอเนต (magnesium carbonate,  $\text{MgCO}_3$ ) และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (magnesium hydroxide,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) กลไกการต้านการติดไฟของโลหะไฮดรอกไซด์คือ ในระหว่างการเผาไหม้ โลหะไฮดรอกไซด์มีการสลายตัวเป็นเถ้าและน้ำซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนกันความร้อนและลดความร้อนให้กับพอลิโพรพิลีน [Jang and Lee, 2001]

### 2.1.5 สารอนุภาคนาโน (nanoparticles)

ในกรณีการต้านการติดไฟของพอลิโพรพิลีน มีการนำสารอนุภาคนาโนมาใช้เป็นสารหน่วงไฟเพิ่มขึ้น สารอนุภาคนาโนที่ใช้เป็นสารหน่วงไฟ ได้แก่ ซิลิกาฟุ้ง (silica fume) นาโนเคลย์ (nanoclay) และคาร์บอนนาโนทิวบ์ (carbon nanotube) [Zanetti, Camino, and Wilkie,

2002) กลไกการหน่วงไฟของสารอนุภาคนาโนคือ สารอนุภาคนาโนสลายตัวทำปฏิกิริยากับสารประกอบคาร์บอน เป็นเถ้าที่เรียกว่า คาร์บอนเนเชียส ซิลิเกต (carbonaceous silicate) ในระหว่างการเผาไหม้ ซึ่งเถ้านี้มีหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันการติดไฟของพอลิโพรพิลีน นอกจากนี้มีสมบัติในการหน่วงไฟแล้ว สารอนุภาคนาโน เช่น นาโนเคลย์ และคาร์บอนนาโนทิวบ์ มีประสิทธิภาพที่ดีในการปรับปรุงสมบัติทางกลของพอลิโพรพิลีน [Lee, Kang, and Wu, 2008]

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลของสารหน่วงไฟต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการเสริมแรงด้วยสารตัวเติมเซลลูโลส

Schartelel, Braun, Schwarz และ Reinemann ศึกษาสมบัติการต้านการติดไฟและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยพอลิโนลิน (flax fiber) โดยใส่สารหน่วงไฟ คือ แอมโมเนียมโพลีฟอสเฟต (ammonium polyphosphate, APP) และ กราไฟท์ที่สามารถขยายตัวได้ (expandable graphite) พบว่าการใส่ APP และกราฟท์ที่สามารถขยายตัวได้ ส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติการต้านการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยพอลิโนลิน การใส่สารหน่วงไฟชนิดพอลิออล (polyol) ร่วมกับ APP และกราฟท์ที่สามารถขยายตัวได้ลงในพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยพอลิโนลิน ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเสริมกัน (synergetic effect) ของการต้านการติดไฟ [Schartelel, Braun, Schwarz, and Reinemann, 2003]

Jang และ Lee ศึกษาการปรับปรุงการต้านการติดไฟของคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเยื่อกระดาษ (paper sludge) โดยสารหน่วงไฟที่ใช้คือ เอทิลีนบิสเพนตาโบรโมไดฟีนิลอีเทน (ethylenebispentabromodiphenylethane, Saytex8010) แมกนีเซียม ไฮดรอกไซด์ (magnesium hydroxide, Mg(OH)<sub>2</sub>) และแอนติโมนี ไตรออกไซด์ (antimony trioxide) พบว่าการใช้ Saytex8010 30 phr และแอนติโมนี ไตรออกไซด์ 10 phr ส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติการต้านการติดไฟ และเมื่อเพิ่มปริมาณแอนติโมนี ไตรออกไซด์ในระบบพบว่าค่าการทนต่อแรงดัด (flexural strength) เพิ่มขึ้น [Jang and Lee, 2001]

Sain, Park, Suhara และ Law พบว่าการใช้แมกนีเซียม ไฮดรอกไซด์ลดการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและขี้เลื่อย (sawdust) ลงเกือบ 50 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม การใส่แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ลดค่าการทนต่อแรงดึง (tensile strength) และค่าการทนต่อแรงดัดของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและขี้เลื่อย นอกจากนี้ พบว่าการใช้แมกนีเซียม ไฮดรอกไซด์ร่วมกับกรดบอริก (boric acid) และซิงค์บอเรท (zinc borate) ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเสริมกันของการต้านการติดไฟ [Sain, Park, Suhara, and Law, 2005]

Sain และ Kokta พบว่าการใส่โซเดียมบอเรท (sodium borate) กรดบอริกหรือฟีนอลิก เรซิน (phenolic resin) ลดอัตราการเผาไหม้ (burning rate) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและหนังสือพิมพ์เก่า (pulp) [Sain และ Kokta, 1994]

Matko และ คณะ ศึกษาสมบัติการติดไฟของคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเศษไม้ชิ้นเล็กๆ (wood flakes) โดยมีการใส่ APP จากการศึกษาคพบว่า APP ปริมาณ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt%) ลดสมบัติการติดไฟของคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเศษไม้ชิ้นเล็ก ๆ [Matko et al., 2005]

Lee, Kang และ Wu ศึกษาผลของนาโนเคลย์ต่อสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับผงไม้ (wood flour) พบว่านาโนเคลย์ ปริมาณ 1-5 phr เพิ่มอุณหภูมิเสื่อมสลาย (decomposition temperature) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับผงไม้ [Lee, Kang and Wu, 2008]

Suppakarn, Jarukumjorn และ Tananimit ศึกษาผลของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ต่อสมบัติการติดไฟและสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยป่านศรนารายณ์ (sisal fiber) พบว่าแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ลดสมบัติการติดไฟและเพิ่มอุณหภูมิเสื่อมสลายของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยป่านศรนารายณ์ [Suppakarn, Jarukumjorn, and Tananimit, 2008] นอกจากนี้ Suppakarn และ Jarukumjorn ศึกษาผลของการใช้สารหน่วงไฟร่วมกันระหว่างแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์กับซิงค์บอเรทต่อสมบัติการติดไฟ สมบัติทางความร้อนและสมบัติทางกลต่อพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยป่านศรนารายณ์ พบว่าการใช้แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับซิงค์บอเรทไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเสริมกันของสมบัติการต้านการติดไฟและสมบัติทางความร้อน แต่อย่างไรก็ตาม ไม่พบการลดลงของสมบัติการทนต่อแรงดึงและสมบัติการทนต่อแรงดัดของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยป่านศรนารายณ์เมื่อมีการใส่สารหน่วงไฟทั้ง 2 ชนิดนี้ร่วมกัน [Supakarn and Jarukumjorn, 2009]

Abu Bakar และคณะ พบว่า APP สามารถปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อน (thermal stability) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับผงไม้ นอกจากนี้ APP เป็นสารหน่วงไฟที่มีประสิทธิภาพที่ดีในการลดสมบัติการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับผงไม้ [Abu Bakar et al., 2010]

### 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลของการเติมเส้นใยแก้วต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการเสริมแรงด้วยสารตัวเติมเซลลูโลส

Sain, Suhara, Law และ Bouilloux ศึกษาสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยธรรมชาติ คือ หนังกื่อพิมพ์เก่า (kraft pulp) และเส้นใยกัญชง (hemp) มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเส้นใยและพอลิโพรพิลีน โดยใช้มาลีเอท พอลิโพรพิลีน (maleated polypropylene) พบว่าพอลิโพรพิลีนที่มีการใส่หนังกื่อพิมพ์เก่าและเส้นใยกัญชงมีค่าการทนแรงต่อแรงดึง ค่าการทนต่อแรงดัด ค่าการทนต่อแรงกระแทกชนิดไม่บากสูงกว่าพอลิโพรพิลีนที่มีการใส่เส้นใยแก้ว (glass fiber) ที่ปริมาณเส้นใยเท่ากัน พอลิเมอร์คอมโพสิตชนิดไฮบริดระหว่าง 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ

เส้นใยแก้วและ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเส้นใยัญชงมีสมบัติทางกลที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก [Sain, Suhara, Law, and Bouilloux, 2005]

Rozman และคณะ ศึกษาผลของการใช้เส้นใยมะพร้าว (coconut fiber) และเส้นใยแก้วร่วมกัน ต่อสมบัติทางกลของพอลิโพรพิลีน โดยมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเส้นใยผสมระหว่างเส้นใยมะพร้าวต่อเส้นใยแก้วคือ 1 ต่อ 3 1 ต่อ 1 และ 3 ต่อ 1 ปริมาณเส้นใยที่ใช้คือ 10 20 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าค่าการทนต่อแรงคด ค่าการทนต่อแรงดึง ค่าการทนต่อแรงกระแทก และค่าการดึงยืดของพอลิโพรพิลีนมีค่าลดลงเมื่อมีการใส่เส้นใยมะพร้าวและเส้นใยแก้วทุกอัตราส่วน เนื่องมาจากการไม่เข้ากันระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยและการมีขนาดเส้นใยที่ไม่คงที่ นอกจากนี้พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยผสมลงในพอลิเมอร์คอมโพสิต โมดูลัสแรงคดและโมดูลัสแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าการทนต่อแรงคด ค่าการทนต่อแรงดึง ค่าการทนต่อแรงกระแทก และค่าการดึงยืดมีค่าลดลงเล็กน้อย [Rozman et al., 1999] นอกจากนี้ Rozman และคณะศึกษาสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยผสมระหว่างเส้นใยปาล์ม (palm fiber) และเส้นใยแก้ว โดยมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเส้นใยผสมระหว่างเส้นใยปาล์มต่อเส้นใยแก้วคือ 1 ต่อ 3 1 ต่อ 1 และ 3 ต่อ 1 มีปริมาณเส้นใยที่ใช้คือ 10 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักลงในพอลิโพรพิลีน พบว่าการใส่เส้นใยผสมลงในพอลิโพรพิลีนส่งผลต่อการลดลงของค่าการทนต่อแรงคด และค่าการทนต่อแรงดึง และพบว่าโมดูลัสแรงคดและโมดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย นอกจากนี้ มีการศึกษาสารช่วยให้เข้ากัน 3 ชนิดคือ พอลิโพรพิลีนกราฟท์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ซึ่งมีชื่อทางการค้าคือ E-43 พอลิเมทิลีน พอลิฟีนิล ไอโซไซยาเนต (polymethylenepolyphenyl isocyanate, PMPPIC) และไตรเมทอกไซลิล โพรพิลเมทาคริเลต (trimethoxysilyl propylmethacrylate, TPM) ต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยผสมระหว่างเส้นใยปาล์มกับเส้นใยแก้ว พบว่า E-43 และ TPM เพิ่มสมบัติการทนต่อแรงดึง และสมบัติการทนต่อแรงคดของพอลิเมอร์คอมโพสิตอย่างมีนัยสำคัญ ในทางกลับกัน สมบัติการทนต่อแรงดึง และสมบัติการทนต่อแรงคดของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีการใส่ PMPPIC [Rozman et al., 2001]

Arbelaz และคณะ ศึกษาสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยปอลินี (flax) และเส้นใยแก้วโดยมีปริมาณเส้นใยคงที่ที่ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของเส้นใยแก้วต่อเส้นใยปอลินีคือ 1 ต่อ 3 1 ต่อ 1 และ 3 ต่อ 1 พบว่าค่าการทนต่อแรงดึงลดลงเมื่อมีปริมาณเส้นใยปอลินีมากขึ้น การใส่สารช่วยให้เข้ากันชนิดพอลิโพรพิลีนกราฟท์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride grafted polypropylene, MAPP) ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิต เนื่องจากมีการปรับปรุงการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างเส้นใยทั้งสองและเมทริกซ์ [Arbelaz et al., 2005]

Panthapulakkal และ Sain ศึกษาสมบัติทางกล และสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยผสมระหว่างเส้นใยกัญชง (hemp) กับเส้นใยแก้ว โดยใช้ปริมาณเส้นใยคงที่ที่ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณเส้นใยแก้วเป็น 5 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเส้นใยแก้วส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติการทนแรงดึง สมบัติการทนต่อแรงคด สมบัติการทนต่อแรงกระแทก สมบัติทางความร้อน และสมบัติการต้านทานการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยกัญชง นอกจากนี้ พบว่าสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติการต้านทานการดูดซับน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณเส้นใยแก้วในเส้นใยผสม [Panthapulakkal และ Sain, 2007]

Jarukumjorn และ Suppakarn ศึกษาผลของเส้นใยแก้วต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติการต้านทานการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์และพอลิโพรพิลีน ปริมาณเส้นใยผสมระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยแก้วที่ใส่ลงในพอลิโพรพิลีนคงที่ที่ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีการใช้ปริมาณเส้นใยแก้วเป็น 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พอลิเมอร์คอมโพสิทมีการใส่สารช่วยให้เข้ากันชนิดพอลิโพรพิลีนกราฟท์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณคงที่ที่ 3 phr พบว่าการใส่เส้นใยแก้วลงในพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์และพอลิโพรพิลีนส่งผลต่อการปรับปรุงค่าการทนต่อแรงดึง ค่าการทนต่อแรงคด และการทนต่อแรงกระแทก แต่ไม่มีผลต่อมอดูลัสแรงดึงและมอดูลัสแรงคด นอกจากนี้ พบว่าการเพิ่มปริมาณเส้นใยแก้วลงในพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์และพอลิโพรพิลีนทำให้ความเสถียรทางความร้อนและสมบัติการต้านทานการดูดซับน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น [Jarukumjorn and Suppakarn, 2009]

Thwe และ Liao ศึกษาสมบัติทางกลของพอลิโพรพิลีนมีการเสริมแรงด้วยเส้นใยไผ่ (bamboo fiber) และเส้นใยแก้วร่วมกัน โดยเส้นใยผสมระหว่างเส้นใยไผ่และเส้นใยแก้วที่ใส่ลงในพอลิเมอร์คอมโพสิทมีค่าคงที่ที่ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีการเปลี่ยนแปลงการใช้เส้นใยแก้วเป็น 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีการใส่สารช่วยให้เข้ากันชนิดพอลิโพรพิลีนกราฟท์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ลงในพอลิเมอร์คอมโพสิท พบว่าค่าการทนต่อแรงดึง และมอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิทมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณเส้นใยแก้ว การใส่สารช่วยให้เข้ากันชนิดพอลิโพรพิลีนกราฟท์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ปรับปรุงสมบัติทนต่อแรงดึง และมอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิทเนื่องจากการปรับปรุงการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างเส้นใยทั้งสองและเมทริกซ์ [Thwe and Liao, 2003]

## บทที่ 3

### วัสดุและการทดลอง

#### 3.1 วัสดุ

พอลิโพรพิลีน (polypropylene, PP) เกรด 700J ของบริษัทไทยพอลิโพรพิลีน จำกัด เส้นใย ป่านสรนารายณ์ (sisal fiber) อยู่ในรูปของเส้นใยยาว มีความยาวประมาณ 1-1.5 เมตร ซึ่งซื้อจาก กลุ่มแม่บ้านหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ ต. บ้านเก่า อ. ด่านขุนทด จ. นครราชสีมา ตัวทำละลายที่ใช้ในการทำอัลคาไลน์เซชัน (alkalization) คือ โซเดียม ไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) เส้นใยแก้วอยู่ในรูปเส้นใยสั้น (short glass fiber, Chop Vantage<sup>®</sup> HP 3610, PPG Fiber Glass) มีความยาวประมาณ 3 มิลลิเมตร ซึ่งซื้อมาจากบริษัทเบ็นไมเยอร์ เคมีคอล จำกัด สารหน่วงไฟได้แก่ แอมโมเนียม โพลีฟอสเฟต (ammonium polyphosphate, APP, Exolit AP 765, Clariant) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 ไมโครเมตร ได้รับจากบริษัทคลาเรียนท์ เคมีคอล (ประเทศไทย) จำกัด ซิงค์บอเรท (zinc borate, Zb, Firebrake<sup>®</sup> ZB, Rio Tinto Mineral) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 ไมโครเมตร ซึ่งซื้อมาจากบริษัทโกลบอล คอนเนคชั่นส์ มหาชน จำกัด และแมกนีเซียม ไฮดรอกไซด์ (magnesium hydroxide, Mg(OH)<sub>2</sub>, APYMAG<sup>®</sup> 40, Nabaltec AG) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ไมโครเมตร ซึ่งได้รับจากบริษัทเบ็นไมเยอร์ เคมีคอล จำกัด สารช่วยให้เข้ากันที่ใช้ในการศึกษา คือ พอลิโพรพิลีนกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride grafted polypropylene, MAPP, Fusabond<sup>®</sup> P MZ109D, DuPont) ซึ่งได้รับมาจากบริษัทเคมีคอล อิน โนเวชั่น จำกัด

#### 3.2 การทดลอง

##### 3.2.1 การเตรียมเส้นใย

กรณีของเส้นใยป่านสรนารายณ์ นำเส้นใยป่านสรนารายณ์มาตัดให้มีความยาวประมาณ 2 มิลลิเมตร ตัดเอาเฉพาะส่วนโคนประมาณ 2 ใน 3 ของความยาวทั้งหมด นำเส้นใยไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน จะได้เส้นใยที่ยังไม่ผ่านการปรับเปลี่ยน (untreated fiber, UT) จากนั้นนำเส้นใยนี้มาทำการปรับเปลี่ยนด้วยการทำอัลคาไลน์เซชันด้วยสารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์ โดยทำที่อุณหภูมิห้อง เริ่มจากการเตรียมสารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นนำเส้นใยมาแช่ในสารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนระหว่างสารละลายต่อเส้นใย คือ 10 ต่อ 1 (liquor ratio 10:1) โดยจะแช่เส้นใยเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อกำจัดองค์ประกอบพวกไขมัน (wax) และสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำเปล่าให้ได้ค่า pH เท่ากับ 7 เสร็จแล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน เส้นใยที่ได้คือ เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน (alkali treated fiber, AT)



กรณีของเส้นใยแก้ว นำเส้นใยแก้วไปกำจัดสารเคลือบผิวโดยนำเส้นใยแก้วไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

### 3.2.2 การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต

พอลิเมอร์คอมโพสิตเตรียมโดยใช้เครื่องบดผสมภายใน (internal mixer, Hakke Rheomix 3000p) ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที อุณหภูมิที่ใช้คือ 170 องศาเซลเซียส โดยขั้นแรกใส่พอลิโพรพิลีนลงไปเป็นเวลา 3 นาที ในกรณีของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่สารช่วยให้เข้ากันใส่สารช่วยให้เข้ากันพร้อมกับพอลิโพรพิลีน หลังจากนั้นใส่เส้นใย (UT, AT หรือ เส้นใยแก้ว) ลงไปในกรณีของคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยที่มีการใส่สารหน่วงไฟ ใส่สารหน่วงไฟหลังจากเวลาในการผสมทั้งหมดผ่านไปแล้ว 6 นาที และเวลาในการผสมทั้งหมดของคอมโพสิตทุกระบบ ใช้เวลา 13 นาที หลังจากนั้นนำพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ได้ไปบดและนำไปฉีดเป็นชิ้นทดสอบโดยเครื่องฉีด (injection molding machine, Chuan Lih Fa, CLF 80T)

ในการวิจัยนี้มีการแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาผลของสารหน่วงไฟคือ APP และปริมาณของสารหน่วงไฟ ที่ 10 20 30 และ 40 phr ต่อสมบัติการต้านการติดไฟ สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกล ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และสมบัติทางกระแสวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิต ชื่อและส่วนประกอบของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่สารหน่วงไฟที่ปริมาณต่างๆ แสดงในตารางที่ 3.1 ส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาผลของสารช่วยให้เข้ากัน คือ MAPP และปริมาณของสารช่วยให้เข้ากันที่ 1 3 และ 5 phr ต่อสมบัติการต้านการติดไฟ สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกล ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และสมบัติทางกระแสวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิต ชื่อและส่วนประกอบของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่สารช่วยให้เข้ากันที่ปริมาณต่างๆ แสดงในตารางที่ 3.2 ส่วนที่ 3 เป็นการศึกษาผลของการใส่สารหน่วงไฟ 2 ชนิดร่วมกัน คือ APP กับ  $Mg(OH)_2$  หรือ APP กับ Zb และอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารหน่วงไฟ 2 ชนิดที่ 10 ต่อ 30 20 ต่อ 20 และ 30 ต่อ 10 ต่อสมบัติการต้านการติดไฟ สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกล ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และสมบัติทางกระแสวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิต ชื่อและส่วนประกอบของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่สารหน่วงไฟ 2 ชนิด ที่อัตราส่วนต่างๆ แสดงในตารางที่ 3.3 ส่วนที่ 4 ศึกษาผลของเส้นใยแก้วต่อสมบัติการติดไฟ สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกล ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และสมบัติทางกระแสวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านสรนารายณ์ โดยกำหนดอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างเส้นใยแก้วและเส้นใยป่านสรนารายณ์ที่ 10 ต่อ 20 15 ต่อ 15 และ 20 ต่อ 10 ชื่อและส่วนประกอบของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่เส้นใย 2 ชนิดที่อัตราส่วนต่างๆ แสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.1 ชื่อและส่วนประกอบของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่แอมโมเนียม โพลีฟอสเฟตที่ปริมาณต่างๆ

Designation	PP (phr)	Untreated sisal fiber (phr)	Alkali treated sisal fiber (phr)	APP (phr)
PP	100	-	-	-
PP/UT	100	30	-	-
PP/UT/10APP	100	30	-	10
PP/UT/20APP	100	30	-	20
PP/UT/30APP	100	30	-	30
PP/UT/40APP	100	30	-	40
PP/AT	100	-	30	-
PP/AT/10APP	100	-	30	10
PP/AT/20APP	100	-	30	20
PP/AT/30APP	100	-	30	30
PP/AT/40APP	100	-	30	40

ตารางที่ 3.2 ชื่อและส่วนประกอบของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่พอลิโพรพิลีนกราฟท์ด้วย มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณต่างๆ

Designation	PP (phr)	Untreated sisal fiber (phr)	APP (phr)	MAPP (phr)
PP/UT/40APP	100	30	40	-
PP/UT/40APP/1MAPP	100	30	40	1
PP/UT/40APP/3MAPP	100	30	40	3
PP/UT/40APP/5MAPP	100	30	40	5

ตารางที่ 3.3 ชื่อและส่วนประกอบของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่สารหน่วงไฟ 2 ชนิด ที่อัตราส่วนต่างๆ

<b>Designation</b>	<b>PP (phr)</b>	<b>Untreated sisal fiber (phr)</b>	<b>APP (phr)</b>	<b>Mg(OH)<sub>2</sub> (phr)</b>	<b>Zb (phr)</b>	<b>MAPP (phr)</b>
PP/UT/40APP/3MAPP	100	30	40	-	-	3
PP/UT/30APP/10Mg/3MAPP	100	30	30	10	-	3
PP/UT/20APP/20Mg/3MAPP	100	30	20	20	-	3
PP/UT/10APP/30Mg/3MAPP	100	30	10	30	-	3
PP/UT/40Mg/3MAPP	100	30	-	40	-	3
PP/UT/30APP /10Zb/3MAPP	100	30	30	-	10	3
PP/UT/20APP /20Zb/3MAPP	100	30	20	-	20	3
PP/UT/10APP /30Zb/3MAPP	100	30	10	-	30	3
PP/UT/40Zb/3MAPP	100	30	-	-	40	3

ตารางที่ 3.4 ชื่อและส่วนประกอบของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ เส้นใย 2 ชนิด ที่อัตราส่วนต่างๆ

<b>Designation</b>	<b>PP (phr)</b>	<b>Untreated sisal fiber (phr)</b>	<b>Glass fiber (phr)</b>	<b>APP (phr)</b>	<b>Zb (phr)</b>	<b>MAPP (phr)</b>
PP/UT/30APP/10Zb/3MAPP	100	30	-	30	10	3
PP/20UT/10GF/30APP/10Zb/3MAPP	100	20	10	30	10	3
PP/15UT/15GF/30APP/10Zb/3MAPP	100	15	15	30	10	3
PP/10UT/20GF/30APP/10Zb/3MAPP	100	10	20	30	10	3
PP/GF/30APP/10Zb/3MAPP	100	-	30	30	10	3



### 3.2.3 การทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต

#### 3.2.3.1 สมบัติการต้านการติดไฟ

การทดสอบสมบัติการต้านการติดไฟ โดยทดสอบการเผาไหม้ทางแนวนอน (horizontal burning test) และทดสอบการเผาไหม้ทางแนวตั้ง (vertical burning test) ตามมาตรฐาน ASTM D635 และ ASTM D3801 ตามลำดับ กรณีการทดสอบการเผาไหม้ทางแนวนอน ยึดขึ้นทดสอบตามแนวนอน ปรับท่อไฟ (burning tube) ให้มีความยาวของไฟประมาณ 2 เซนติเมตร ท่อไฟทำมุมกับพื้น 45 องศา ท่อไฟจ่อที่ปลายขึ้นทดสอบ โดยให้ระยะห่างระหว่างปลายท่อไฟกับปลายขึ้นทดสอบเท่ากับ 1 เซนติเมตร ทำจุดอ้างอิงไว้ที่ขึ้นทดสอบสองจุด จุดแรกคือ ที่ 25 มิลลิเมตร จากจุดปลายของขึ้นทดสอบ จุดที่สองคือที่ จากจุดปลายของขึ้นทดสอบ นำท่อไฟออกจากขึ้นทดสอบ หลังจากไฟจ่อที่ปลายขึ้นทดสอบเป็นเวลา 30 นาที และเริ่มจับเวลาหลังจากการเผาไหม้ผ่านจุดอ้างอิงที่ 25 มิลลิเมตร จากจุดปลายของขึ้นทดสอบ บันทึกเวลาเมื่อการเผาไหม้ถึงจุดอ้างอิงที่ 100 มิลลิเมตรจากจุดปลายของขึ้นทดสอบ จากนั้นคำนวณอัตราการเผาไหม้ (burning rate) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อนาที (mm/min) โดยเป็นอัตราส่วนระหว่างระยะทางที่เผาไหม้ขึ้นทดสอบมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm) กับเวลาในการเผาไหม้มีหน่วยเป็นนาที (min) สมการการคำนวณอัตราการเผาไหม้แสดงดังนี้

$$V = L/t \quad (3.1)$$

จากสมการนี้  $V$  คือ อัตราการเผาไหม้ (มิลลิเมตรต่อนาที)  $L$  คือ ระยะทางในการเผาไหม้ซึ่งหมายถึงที่ระยะทาง 25 ถึง 100 มิลลิเมตรจากจุดปลายของขึ้นงานตัวอย่าง เท่ากับ 75 มิลลิเมตร และ  $t$  คือ เวลาในการเผาไหม้ที่ระยะทาง 25 ถึง 100 มิลลิเมตรจากจุดปลายของขึ้นงานตัวอย่างมีหน่วยเป็นนาที

กรณีการทดสอบการเผาไหม้ทางแนวตั้ง ยึดขึ้นทดสอบทางแนวตั้งโดยให้ความสูงจากพื้นซึ่งรองด้วยแผ่นเส้นใยฝ้ายเป็นระยะทาง 30 เซนติเมตร ปรับท่อไฟให้มีความยาวของไฟประมาณ 2 เซนติเมตร ท่อไฟทำมุมกับพื้น 90 องศา ท่อไฟจ่อที่ปลายขึ้นทดสอบ โดยให้ระยะห่างระหว่างปลายท่อไฟกับปลายขึ้นทดสอบเท่ากับ 1 เซนติเมตร นำท่อไฟออกจากขึ้นทดสอบ หลังจากไฟจ่อที่ปลายขึ้นทดสอบเป็นเวลา 10 วินาที จากนั้นจับเวลาและบันทึกเวลาเมื่อการเผาไหม้สิ้นสุดลง จากนั้นจัดอันดับการเผาไหม้ (burning rating) โดยมีการจัดอันดับดังนี้ V-0 คือ เวลาในการเผาไหม้ของขึ้นทดสอบน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 วินาทีหลังจากนั้นจะดับไฟด้วยตัวเอง และไม่มีลูกไฟหยดที่แผ่นเส้นใยฝ้าย V-1 คือ เวลาในการเผาไหม้ของขึ้นทดสอบน้อยกว่าหรือเท่ากับ 30 วินาทีหลังจากนั้นจะดับไฟด้วยตัวเอง และไม่มีลูกไฟหยดที่แผ่นเส้นใยฝ้าย V-2 คือ เวลาในการเผาไหม้ของขึ้นทดสอบน้อยกว่าหรือเท่ากับ 30 วินาทีหลังจากนั้นจะดับไฟด้วยตัวเอง แต่มีลูกไฟหยดที่แผ่นเส้นใยฝ้าย และ NC (no classification) คือ ไม่สามารถจัดอันดับได้เนื่องจากขึ้นทดสอบถูกเผาไหม้ทั้งหมด

### 3.2.3.2 สมบัติทางความร้อน

การทดสอบหาค่าอุณหภูมิการเสื่อมสลาย (decomposition temperature) ทำโดย นำพอลิเมอร์คอมโพสิตไปทดสอบด้วยเครื่อง thermo gravimetric analyzer (TGA, TA Instrument รุ่น SDT 2960) โดยให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง (10-20 มิลลิกรัม) ด้วยอัตราเร็ว 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 700 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะก๊าซไนโตรเจน

### 3.2.3.3 สมบัติทางกล

การทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึง (tensile properties) ทำโดยใช้เครื่อง universal testing machine (Instron, Model 5565) โดยใช้เซลล์วัดแรง (load cell) 5 กิโลนิวตัน (kN) ความยาวของเกต (gauge length) 80 เซนติเมตร ความเร็วในการดึง 10 มิลลิเมตรต่อนาที

การทดสอบการทนต่อแรงกระแทก (unnotch izod impact strength) ใช้เครื่อง basic pendulum impact tester (Atlas, model BPI) โดยใช้น้ำหนัก (load) 2.7 จูล (J)

### 3.2.3.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตใช้เครื่อง scanning electron microscope (JEOL, model JSM6400) ที่ 20 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) การเตรียมตัวอย่างทดสอบโดยนำพื้นผิวที่ได้จากการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึง (tensile fracture surface) ไปเคลือบทอง ก่อนนำไปศึกษา

### 3.2.3.5 สมบัติทางกระแสวิทยา

การทดสอบความหนืด (viscosity) ที่อัตราเฉือนต่างๆ โดยใช้เครื่อง capillary rheometer (Keyence, model D5052m) ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

## บทที่ 4

### ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลของสารหน่วงไฟและปริมาณสารหน่วงไฟต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านครนารายณ์

##### 4.1.1 สมบัติการต้านการติดไฟ

อัตราการเผาไหม้ (horizontal burning rate) ของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพสิตแสดงในตารางที่ 4.1 เมื่อใส่เส้นใยป่านครนารายณ์ที่ผ่านและไม่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันลงในพอลิโพรพิลีน ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการเผาไหม้ อย่างไรก็ตาม อัตราการเผาไหม้ของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยป่านครนารายณ์ลดลงเมื่อใส่ APP นอกจากนี้ พบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใส่ APP ปริมาณ 40 ส่วนใน 100 ส่วนของพอลิโพรพิลีนไม่ติดไฟภายใต้สภาวะทดสอบ ซึ่งชี้ให้เห็นว่า APP ปรับปรุงสมบัติการต้านการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยป่านครนารายณ์

ตารางที่ 4.1 อัตราการเผาไหม้และอันดับการเผาไหม้ของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพสิต มีการใส่ APP ที่ปริมาณต่างๆ

Designation	Horizontal burning rate (mm/min)	Vertical burning rating
PP	24.60 ± 1.02	NC
PP/UT	29.29 ± 0.83	NC
PP/UT/10APP	22.17 ± 1.27	NC
PP/UT/20APP	13.38 ± 0.68	NC
PP/UT/30APP	10.07 ± 1.06	NC
PP/UT/40APP	No burning	V-0
PP/AT	29.66 ± 0.54	NC
PP/AT/10APP	22.70 ± 0.38	NC
PP/AT/20APP	13.98 ± 0.61	NC
PP/AT/30APP	10.35 ± 0.62	NC
PP/AT/40APP	No burning	V-0

ผลจากอันดับการเผาไหม้ (vertical burning rating) ของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพสิตแสดงในตารางที่ 4.1 พอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใส่ APP ปริมาณ 10 20 และ 30 phr ไม่สามารถจัดอันดับการเผาไหม้ได้ เนื่องจากชิ้นงานไม่หยุดการเผาไหม้ ในทางกลับกัน พอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างโพรพิลีนกับเส้นใยปานสรนารายณ์ที่ใส่ APP 40 phr ติดไฟน้อยกว่า 10 วินาที จากนั้นจะดับไฟได้ด้วยตัวเอง ซึ่งจัดอันดับการเผาไหม้ ที่ V-0 ซึ่งแสดงว่าการใส่ APP 40 phr มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงสมบัติการต้านการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยปานสรนารายณ์

จากอัตราการเผาไหม้และอันดับการเผาไหม้ พบว่าการทำอัลคาไลน์เซชันของเส้นใยปานสรนารายณ์ไม่ส่งผลต่อสมบัติการต้านการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยปานสรนารายณ์

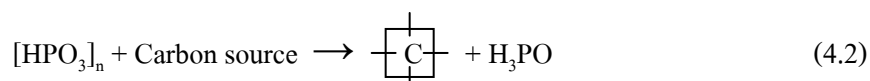
#### 4.1.2 สมบัติทางความร้อน

ประสิทธิภาพที่ดีของสารหน่วงไฟบ่งชี้ได้จากความเสถียรทางความร้อนที่สูงของพอลิเมอร์ ความเสถียรทางความร้อนนี้พิจารณาที่อุณหภูมิการสลายตัวที่ 5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่สูญเสียไปเนื่องจากความร้อน ( $T_{5\%}$ ) และอุณหภูมิการสลายตัวที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่สูญเสียไปเนื่องจากความร้อน ( $T_{50\%}$ ) นอกจากนี้ พิจารณาที่ปริมาณเถ้า (char residue) ที่เกิดขึ้นระหว่างการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ดังนั้น ค่า  $T_{5\%}$   $T_{50\%}$  และ ปริมาณเถ้ามีค่ามากแสดงว่า พอลิเมอร์นั้นมีความเสถียรทางความร้อนที่สูง

กราฟ TGA และสมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยปานสรนารายณ์ที่ไม่ผ่านการปรับเปลี่ยน (PP/UT) ที่มีการใส่ APP ที่ปริมาณต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.1 และ ตารางที่ 4.2 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส พบว่ามีการสลายตัวของ PP/UT ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งเกิดจากการระเหยของความชื้นที่มีอยู่ในเส้นใย  $T_{5\%}$  ของ PP/UT มีค่าน้อยกว่า  $T_{5\%}$  ของพอลิโพรพิลีน เป็นเพราะว่า เฮมิเซลลูโลส (hemicelluloses) ในเส้นใยปานสรนารายณ์มีการเสื่อมสลายที่อุณหภูมิต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิโพรพิลีน [Saheb and Jog, 1999] อย่างไรก็ตาม  $T_{5\%}$  ของ PP/UT มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใส่ APP และ  $T_{5\%}$  ของ PP/UT มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของ APP แสดงว่า APP ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเสถียรทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยปานสรนารายณ์ที่ไม่ผ่านการปรับเปลี่ยน จากตารางที่ 4.2 ค่า  $T_{50\%}$  ของ PP/UT มีค่ามากกว่า  $T_{50\%}$  ของพอลิโพรพิลีน เนื่องจากเส้นใยปานสรนารายณ์ที่ไม่ผ่านการปรับเปลี่ยนมีส่วนประกอบที่เรียกว่า ลิกนิน (lignin) ซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นเถ้าในระหว่างการสลายตัวทางความร้อนที่  $T_{50\%}$  ทำหน้าที่เป็นฉนวนด้านความร้อนซึ่งเพิ่มความเสถียรทางความร้อนให้กับพอลิโพรพิลีนได้ [Abu Bakar et al., 2010] การใส่ APP ใน PP/UT ส่งผลให้ค่า  $T_{50\%}$  ของ PP/UT มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากที่  $T_{50\%}$



กรดพอลิฟอสฟอริก (polyphosphoric acid) ซึ่งได้จากการสลายตัวของ APP ทำปฏิกิริยากับสารประกอบคาร์บอนเชิงส (carbonaceous compound) แล้วก่อตัวเป็นเถ้าที่เป็นโครงสร้างฟอสฟอริกคาร์บอนเชิงส (phosphorcarbonaceous structure) ซึ่งสมการการสลายตัวของ APP แสดงดังนี้



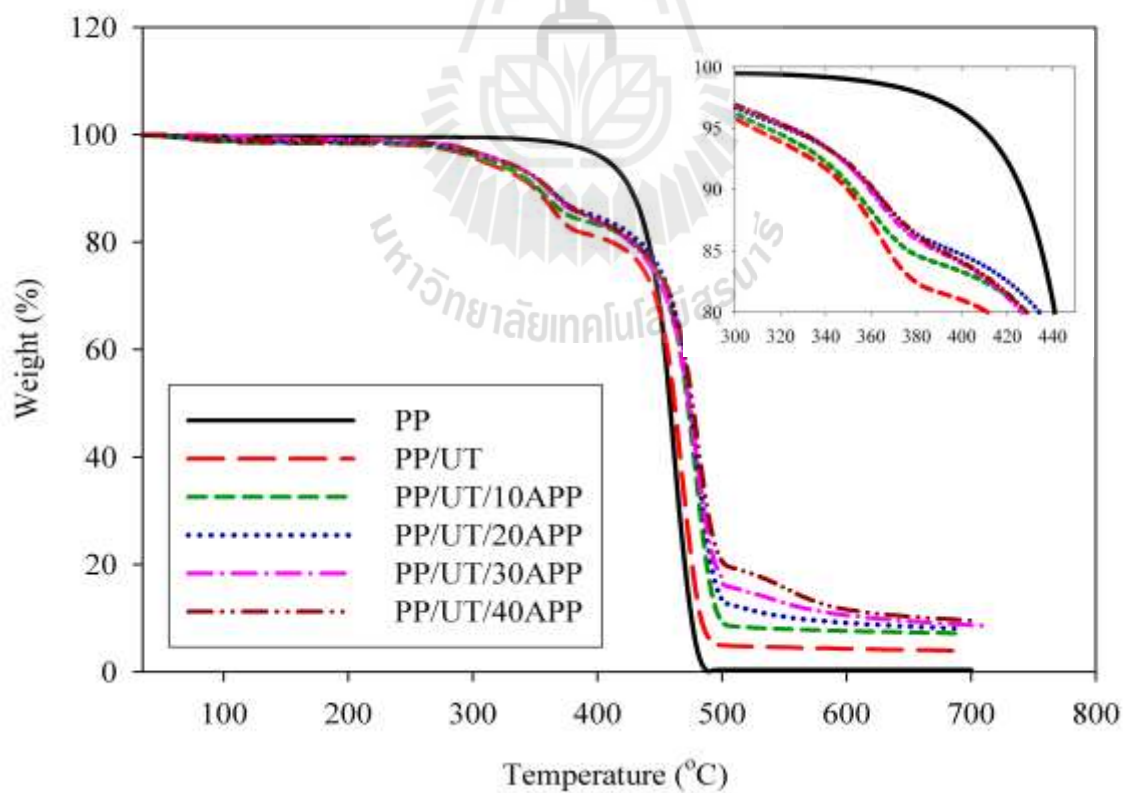
เถ้านี้ทำให้การสลายตัวของพอลิเมอร์คอมโพสิตช้าลงโดยทำหน้าที่เป็นฉนวนกันความร้อน และเมื่อเพิ่มปริมาณของ APP ลงใน PP/UT ค่า  $T_{50\%}$  ของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาปริมาณเถ้าที่เกิดขึ้นของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ APP ที่ปริมาณต่างๆ ดังแสดงในตาราง 4.2 พบว่าพอลิโพรพิลีนสลายตัวเนื่องจากความร้อน โดยไม่มีเถ้าหลงเหลืออยู่ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ส่วนปริมาณเถ้าของ PP/UT เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของ APP เนื่องจากมีการก่อตัวของโครงสร้างฟอสฟอริกคาร์บอนเชิงสในระหว่างที่ APP สลายตัว

กราฟ TGA และสมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน (PP/AT) ที่มีการใส่ APP ที่ปริมาณต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.2 ตามลำดับ พบว่า PP/AT มีค่า  $T_{5\%}$  มากกว่า PP/UT เป็นเพราะการทำอัลคาไลน์เซชันกำจัดสิ่งเจือปนและสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำซึ่งมีความเสถียรทางความร้อนที่ต่ำออกจากผิวของเส้นใย [Obi, Uma, Jeevan., and Varada, 2009] ดังนั้น PP/AT มีความเสถียรทางความร้อนมากกว่า PP/UT และพบว่าค่าของ  $T_{5\%}$  ของ PP/AT เพิ่มขึ้นเมื่อมีการใส่ APP อย่างไรก็ตาม ค่า  $T_{50\%}$  และปริมาณเถ้าของ PP/UT ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับ PP/AT และ ค่า  $T_{50\%}$  และปริมาณเถ้าของ PP/UT ที่มีการใส่ APP ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับ PP/AT ที่มีการใส่ APP เป็นเพราะว่าสิ่งเจือปนและสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่อยู่บนผิวของเส้นใยที่ยังไม่ได้ผ่านการปรับเปลี่ยนได้สลายตัวไปหมดแล้วที่  $T_{50\%}$  ดังนั้นที่  $T_{50\%}$  เส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับเปลี่ยนจึงมีส่วนประกอบทางเคมีเหมือนกับเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน

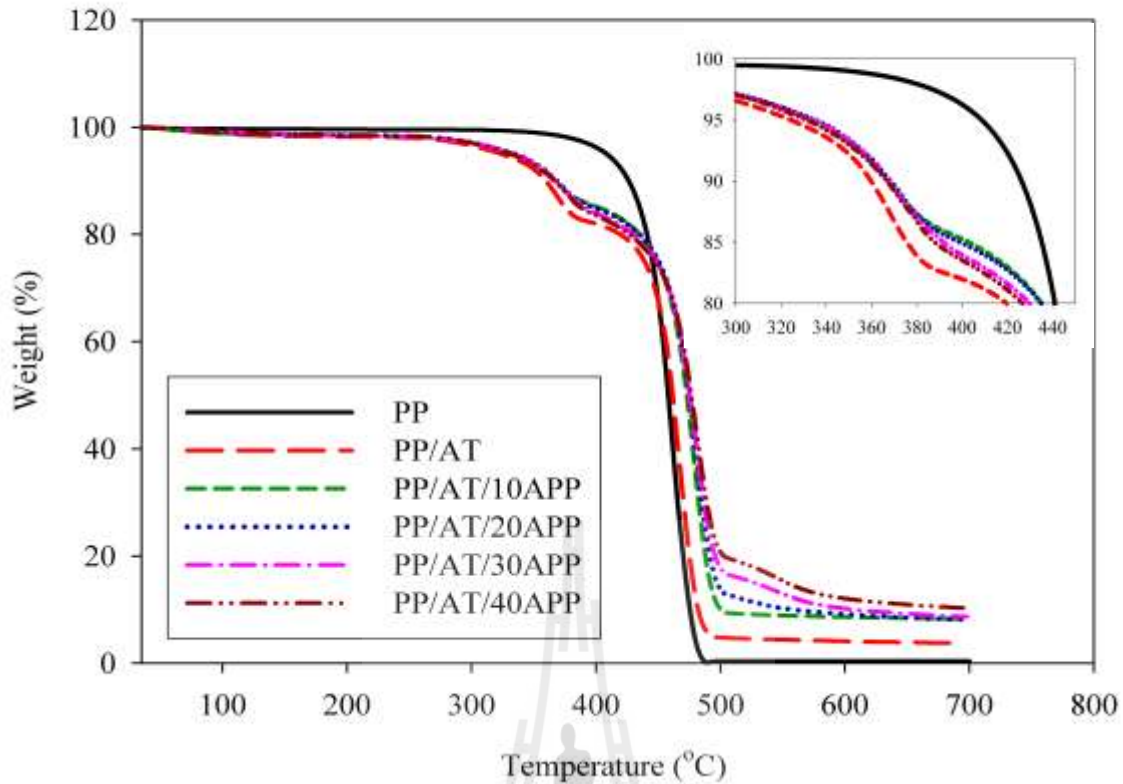
จากผลของ TGA พบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยป่านศรนารายณ์ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันที่มีการใส่ APP 40 phr มีความเสถียรทางความร้อนมากกว่าพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพสิตในระบบอื่นๆ

ตาราง 4.2 สมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ APP ที่ปริมาณต่างๆ

Designation	T <sub>5%</sub> (°C)	T <sub>50%</sub> (°C)	Char residue (%)
PP	408	458	0
PP/UT	308	461	4.31
PP/UT/10APP	314	470	7.62
PP/UT/20APP	322	472	9.14
PP/UT/30APP	324	473	10.55
PP/UT/40APP	324	476	11.61
PP/AT	324	461	4.11
PP/AT/10APP	333	471	8.62
PP/AT/20APP	334	473	9.16
PP/AT/30APP	334	474	10.18
PP/AT/40APP	334	476	12.06



รูปที่ 4.1 กราฟ TGA ของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใย ป่านสนรายฉัณฑ์ที่ไม่ผ่านการปรับเปลี่ยน (PP/UT) ที่มีการใส่ APP ที่ปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.2 กราฟ TGA ของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใย ป่านสรนารายณ์ที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน (PP/AT) ที่มีการใส่ APP ที่ปริมาณต่างๆ

#### 4.1.3 สมบัติทางกล

สมบัติทางกลของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพสิตแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญของค่ามอดูลัสแรงดึง (tensile modulus) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่และไม่ใส่ APP ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.3 PP/UT และ PP/AT มีค่าการทนต่อแรงดึง (tensile strength) และค่ามอดูลัสแรงดึงสูงกว่าพอลิโพรพิลีน แสดงว่าเส้นใยป่านสรนารายณ์เป็นตัวเสริมแรงที่ดีของพอลิโพรพิลีน การใส่ APP ลงในพอลิเมอร์คอมโพสิตทำให้ค่าการทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าลดลงเล็กน้อยดังแสดงในรูปที่ 4.4 นอกจากนี้ พบว่าค่าการทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงเมื่อมีการใส่ปริมาณ APP เพิ่มขึ้น เนื่องจากความไม่เข้ากันระหว่างพอลิโพรพิลีนและ APP โดยพิจารณาจากลักษณะสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิต ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (c-j)

ค่าการทนต่อแรงกระแทก (impact strength) ของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพสิตแสดงในรูปที่ 4.7 การใส่เส้นใยป่านสรนารายณ์ลงในพอลิโพรพิลีนส่งผลต่อการลดลงของค่าการทนต่อแรงกระแทก เนื่องจากเส้นใยเป็นบริเวณที่เกิดความเค้นสะสม (stress concentration) ซึ่งใช้พลังงานน้อยกว่าในการเริ่มการร้าว (cracking) [Mareri, Bastida, Binda., and

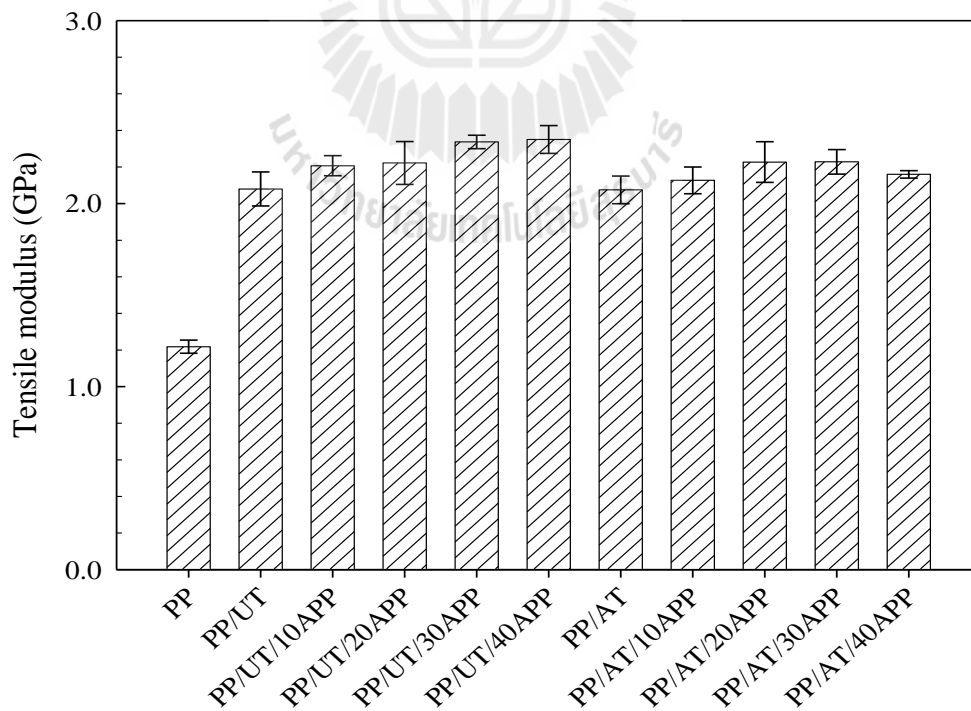
Crespy, 1998] และพบว่าการใช้ APP ในพอลิเมอร์คอมโพสิตไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าการทนต่อแรงกระแทก

โดยทั่วไป สารหน่วงไฟที่ใส่ในพอลิเมอร์ส่งผลต่อการลดลงของสมบัติการติดไฟของระบบ แต่อย่างไรก็ตาม สารหน่วงไฟมีผลในทางลบต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ ซึ่งมีการศึกษาโดย Sain, Park, Suhara และ Law พบว่า การใช้แมกนีเซียม ไฮดรอกไซด์ลดค่าการทนต่อแรงกระแทก ค่าการทนแรงดึง และค่าการทนแรงดัดของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและขี้เลื่อย [Sain, Park, Suhara, and Law, 2004] นอกจากนี้ Jang และ Lee พบว่าการใส่สารหน่วงไฟ คือ เอทิลีนบิสเพนตาโบรโมไดฟีนิลอีเทน (ethylenebispentabromodiphenylethane, Saytex8010) และ ไตรฟีนิล ฟอสเฟต (triphenylphosphate, TPP) ทำให้ค่าการทนแรงดัดของพอลิโพรพิลีนและเยื่อกระดาษ (paper sludge) ลดลง [Jang and Lee, 2001] อย่างไรก็ตาม สำหรับการศึกษาพบว่า APP ปรับปรุงสมบัติการต้านการติดไฟโดยไม่ทำให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยป่านศรนารายณ์ลดลงไปมาก

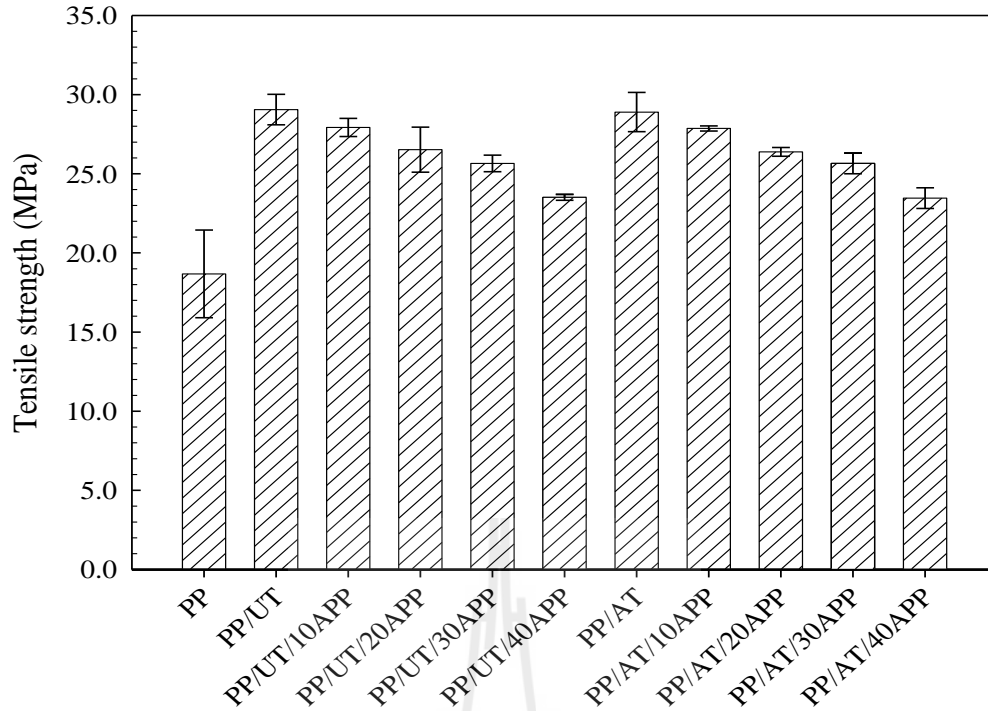
จากตารางที่ 4.3 พบว่าการทำอัลคาไลน์เซชันไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติการทนต่อแรงดึงและสมบัติการทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยป่านศรนารายณ์ ซึ่งตรงกันข้ามกับผลการศึกษาของ Gu โดยศึกษาผลของการทำอัลคาไลน์เซชันต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยกามมะพร้าว (coir fiber) พบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีค่าการทนต่อแรงดึงมากกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยกามมะพร้าวที่ไม่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน เนื่องจากมีการปรับปรุงการยึดติดระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ ซึ่งเป็นผลมาจากการทำอัลคาไลน์เซชันกำจัดเพคติน (pectin) และองค์ประกอบพวกไขมัน (wax) ออกจากผิวของเส้นใย [Gu, 2009]

ตารางที่ 4.3 สมบัติทางกลของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ APP ที่ปริมาณต่างๆ

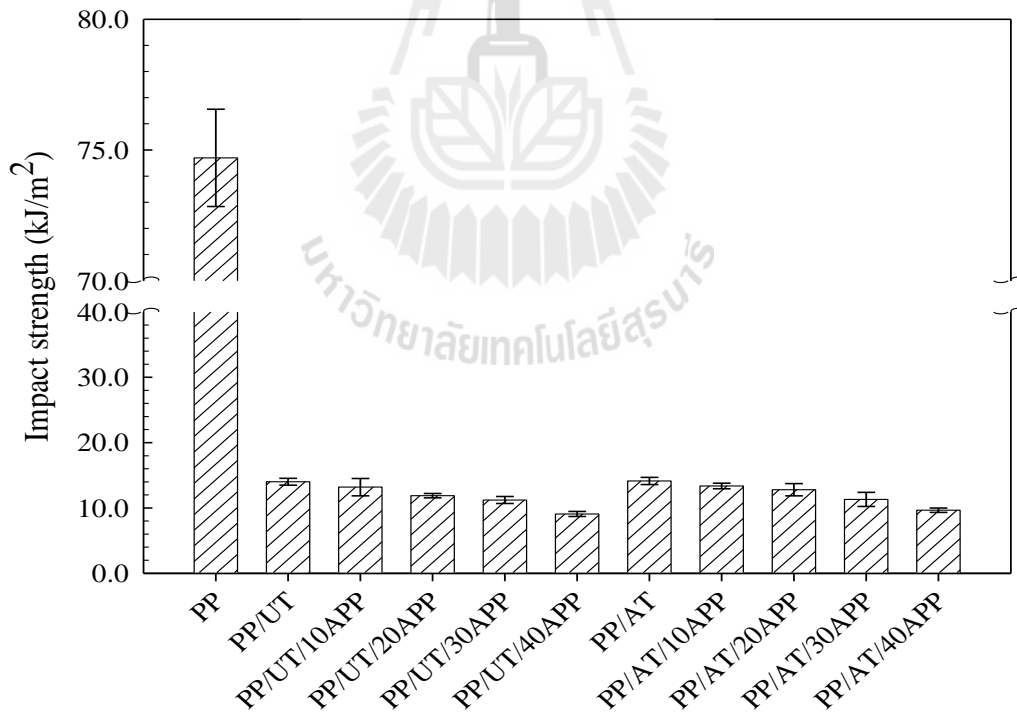
Designation	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Impact strength (kJ/m <sup>2</sup> )
PP	18.67 ± 2.77	1.22 ± 0.04	74.70 ± 1.86
PP/UT	29.05 ± 0.96	2.08 ± 0.09	14.02 ± 0.52
PP/UT/10APP	27.93 ± 0.57	2.21 ± 0.06	13.19 ± 1.33
PP/UT/20APP	26.52 ± 1.43	2.22 ± 0.12	11.89 ± 0.34
PP/UT/30APP	25.65 ± 0.52	2.34 ± 0.04	11.22 ± 0.54
PP/UT/40APP	23.52 ± 0.19	2.35 ± 0.07	8.48 ± 0.61
PP/AT	28.89 ± 1.24	2.08 ± 0.08	14.13 ± 0.55
PP/AT/10APP	27.86 ± 0.17	2.13 ± 0.07	13.38 ± 0.43
PP/AT/20APP	26.38 ± 0.28	2.23 ± 0.11	12.78 ± 0.93
PP/AT/30APP	25.65 ± 0.65	2.23 ± 0.07	11.32 ± 1.08
PP/AT/40APP	23.46 ± 0.65	2.16 ± 0.02	9.67 ± 0.34



รูปที่ 4.3 มอดูลัสแรงดึงของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ APP ที่ปริมาณต่างๆ



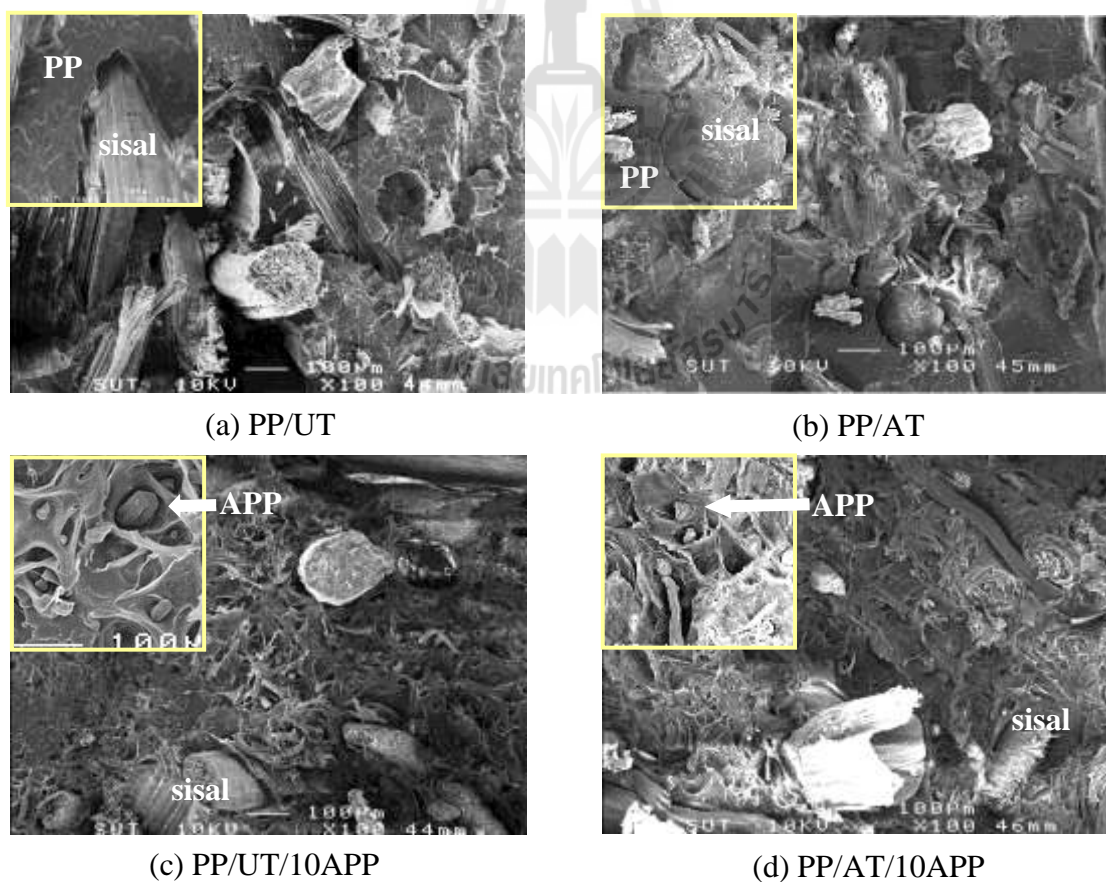
รูปที่ 4.4 ค่าการทนต่อแรงดึงของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ APP ที่ปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.5 ค่าการทนต่อแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ APP ที่ปริมาณต่างๆ

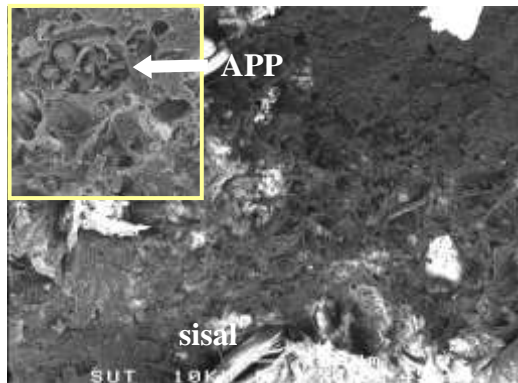
### 4.1.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ผลจากการทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ APP ที่ปริมาณต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงดังรูปที่ 4.6 รูปที่ 4.6 (a) และ 4.6 (b) แสดงพื้นผิวของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ไม่ผ่านการปรับเปลี่ยนและเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน พบว่ามีช่องว่างระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ ซึ่งชี้ให้เห็นว่ามีการยึดติดที่ไม่ดีระหว่างเส้นใยและพอลิโพรพิลีน จากรูปที่ 4.6 (c-j) พบว่า APP มีการกระจายตัวที่ไม่ดีในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ เนื่องจากพอลิโพรพิลีนและ APP ไม่เข้ากัน นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มปริมาณของ APP พบว่า APP มีการกระจายตัวที่ไม่ดีในเมทริกซ์ ผลของลักษณะทางสัณฐานวิทยาสอดคล้องกับผลของสมบัติการทนต่อแรงดึง ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ PP/UT และ PP/AT ไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการทำอัลคาไลน์เซชันของเส้นใยไม่มีผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิต ซึ่งตรงกันข้ามกับการศึกษาของ Paul และคณะ ผลการทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเส้นใยกล้วยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันยึดติดกับ พอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ดีกว่าเส้นใยกล้วยที่ไม่ได้ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน [Paul et al., 2008]

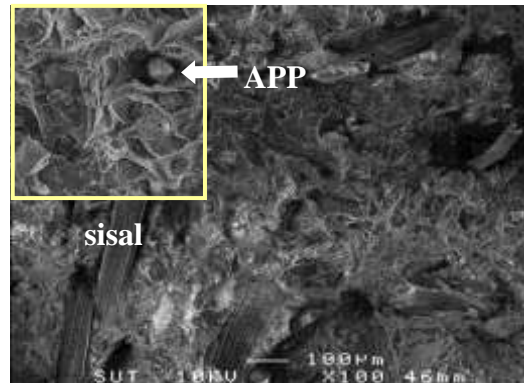


รูปที่ 4.6 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ APP ที่ปริมาณต่างๆ (a) PP/UT (b) PP/AT (c) PP/UT/10APP (d) PP/AT/10APP

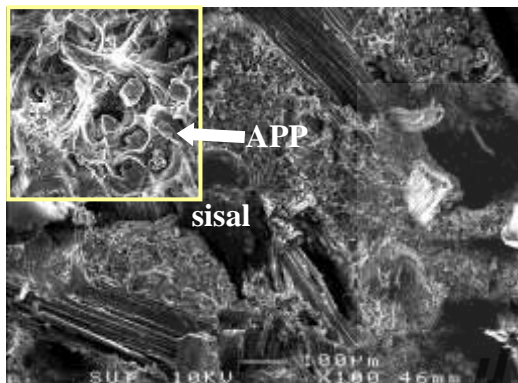




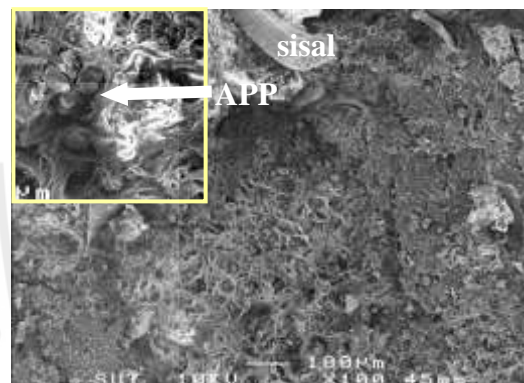
(e) PP/UT/20APP



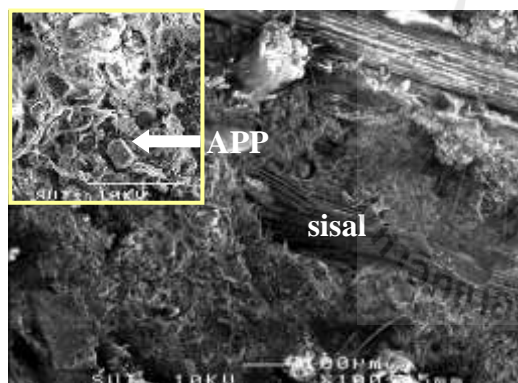
(f) PP/AT/20APP



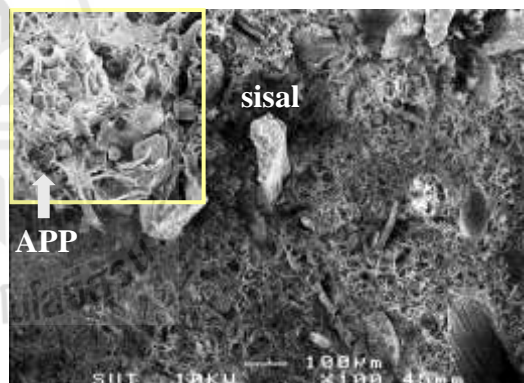
(g) PP/UT/30APP



(h) PP/AT/30APP



(i) PP/UT/40APP



(j) PP/AT/40APP

รูปที่ 4.6 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ APP ที่ปริมาณต่างๆ

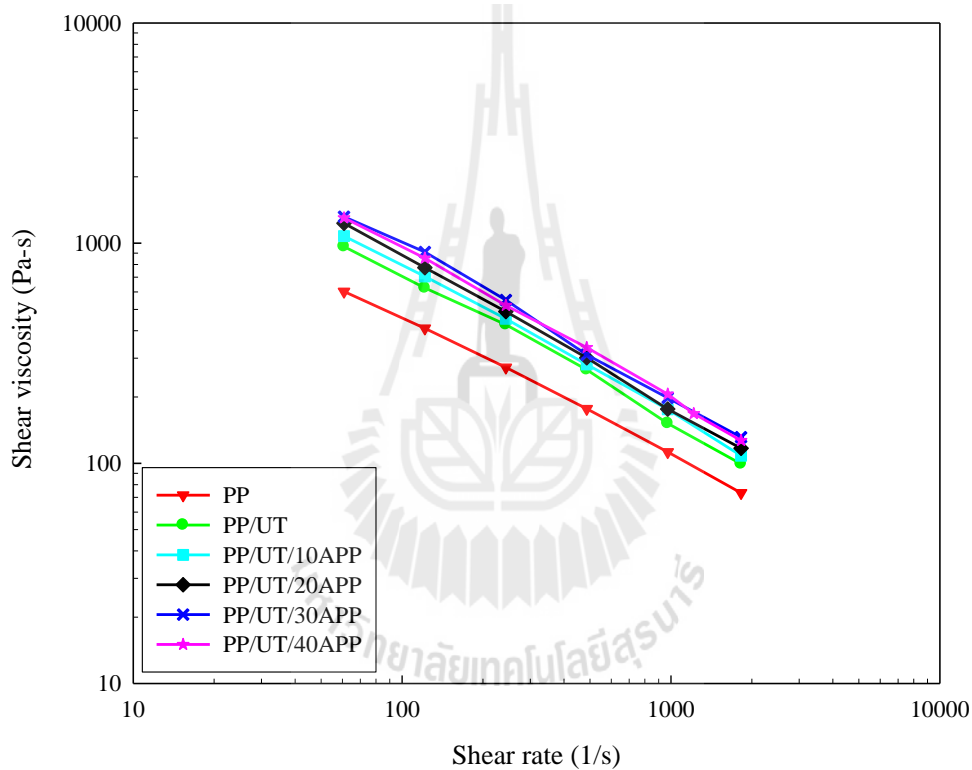
(e) PP/UT/20APP (f) PP/AT/20APP (g) PP/UT/30APP (h) PP/AT/30APP

(i) PP/UT/40APP (j) PP/AT/40APP (ต่อ)

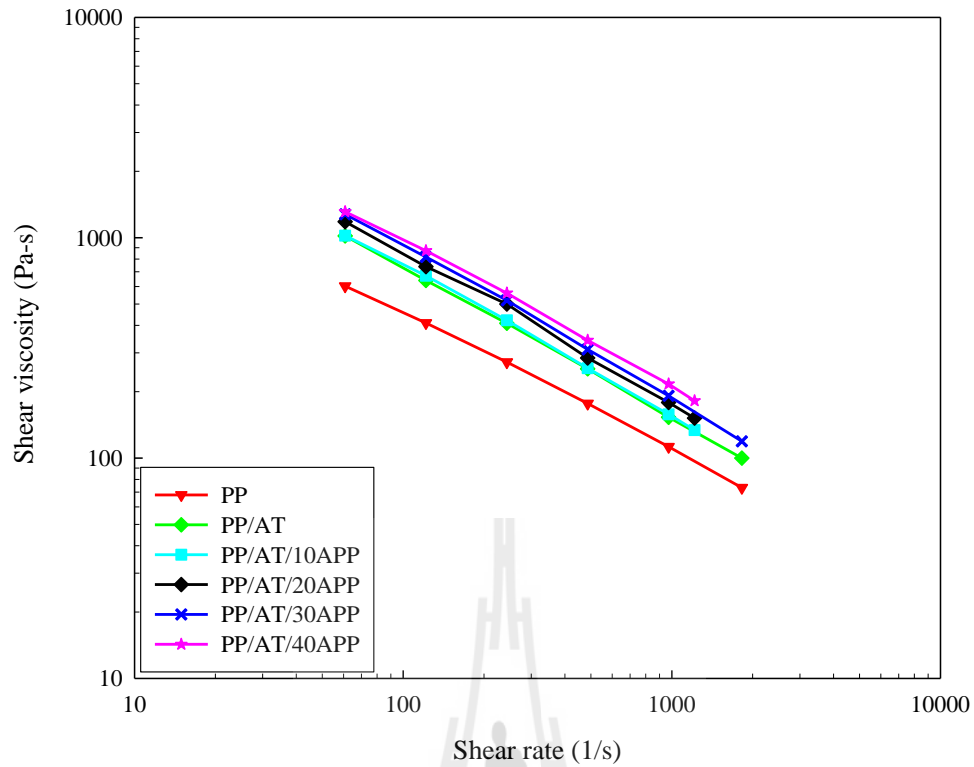


#### 4.1.3 สมบัติทางกระแสวิทยา

ความหนืดที่อัตราเฉือนต่างๆ ของ PP/UT มีการใส่ APP ที่ปริมาณต่างๆ และ PP/AT ที่มีการใส่ APP ที่ปริมาณต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ ค่าความหนืดของ PP/UT ที่มีการใส่ APP ที่ปริมาณต่างๆ มีค่าสูงกว่าค่าความหนืดของพอลิโพรพิลีนทุกอัตราเฉือน เนื่องมาจากเส้นใยไปรบกวนการไหลของพอลิเมอร์และไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของกลุ่มสายโซ่พอลิเมอร์ ความหนืดของ PP/UT เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณของ APP ดังนั้น การใส่ APP ไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์คอมโพสิต นอกจากนี้ การทำอัลคาไลน์เซชันไม่มีผลต่อความหนืดของพอลิเมอร์คอมโพสิต



รูปที่ 4.7 ความหนืดที่อัตราเฉือนต่างๆ ของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยปานครนารายณ์ที่ไม่ผ่านการปรับเปลี่ยนที่มีการใส่ APP ที่ปริมาณต่างๆ



**รูปที่ 4.8** ความหนืดที่อัตราเฉือนต่างๆ ของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยปานสรณารายณ์ที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีการใส่ APP ที่ปริมาณต่างๆ

จากการทดสอบสมบัติการต้านการติดไฟ สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางกลพบว่า PP/UT/40APP มีความเหมาะสมที่สุดที่นำมาศึกษาผลของ MAPP ซึ่งเป็นสารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิต

## 4.2 ผลของสารช่วยย้ําให้เข้ากันและปริมาณสารช่วยย้ําให้เข้ากันต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยปานครนารายณ์

### 4.2.1 สมบัติการต้านการติดไฟ

ผลจากอัตราการเผาไหม้และอันดับการเผาไหม้ของพอลิเมอร์คอมโพสิต แสดงในตาราง 4.4 พอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่และไม่ใส่ MAPP ไม่ติดไฟภายใต้สภาวะทดสอบ นอกจากนี้ จากผลอันดับการเผาไหม้ พอลิเมอร์คอมโพสิตทุกระบบติดไฟน้อยกว่า 10 วินาที จากนั้นจะดับไฟได้ด้วยตัวเอง ซึ่งจัดอันดับที่ V-0 จากผลการทดสอบสมบัติการต้านการติดไฟชี้ให้เห็นว่าการใส่ MAPP ไม่มีผลในทางลบต่อสมบัติการต้านการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิต

ตารางที่ 4.4 อัตราการเผาไหม้และอันดับการเผาไหม้ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ MAPP ที่ปริมาณต่างๆ

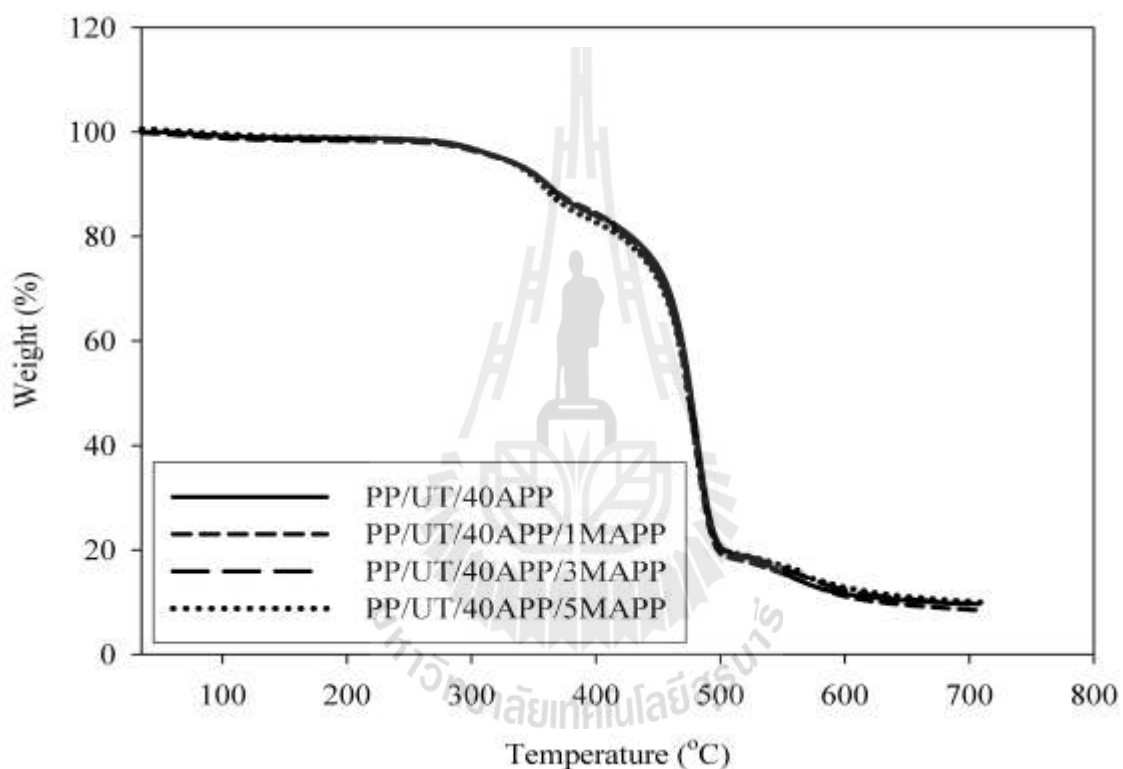
Designation	Horizontal burning rate (mm/min)	Vertical burning rating
PP/UT/40APP	No burning	V-0
PP/UT/40APP/1MAPP	No burning	V-0
PP/UT/40APP/3MAPP	No burning	V-0
PP/UT/40APP/5MAPP	No burning	V-0

### 4.2.2 สมบัติทางความร้อน

กราฟ TGA และสมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ MAPP ที่ปริมาณต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.9 และ ตารางที่ 4.5 ตามลำดับ เมื่อมีการใส่ MAPP 1 phr ใน PP/UT/40APP พบว่า  $T_{5\%}$  และ  $T_{50\%}$  ของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงเล็กน้อยแต่ปริมาณเถ้าที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสของพอลิเมอร์คอมโพสิตไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มปริมาณของ MAPP พบว่าปริมาณเถ้ามีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่  $T_{5\%}$  และ  $T_{50\%}$  ของพอลิเมอร์คอมโพสิตไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใส่ MAPP ไม่มีผลในทางลบต่อสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิต

ตาราง 4.5 สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ MAPP ที่ปริมาณต่างๆ

Designation	T <sub>5%</sub> (°C)	T <sub>50%</sub> (°C)	Char residue (%)
PP/UT/40APP	324	476	11.61
PP/UT/40APP/1MAPP	321	474	11.15
PP/UT/40APP/3MAPP	322	474	12.25
PP/UT/40APP/5MAPP	321	474	12.83

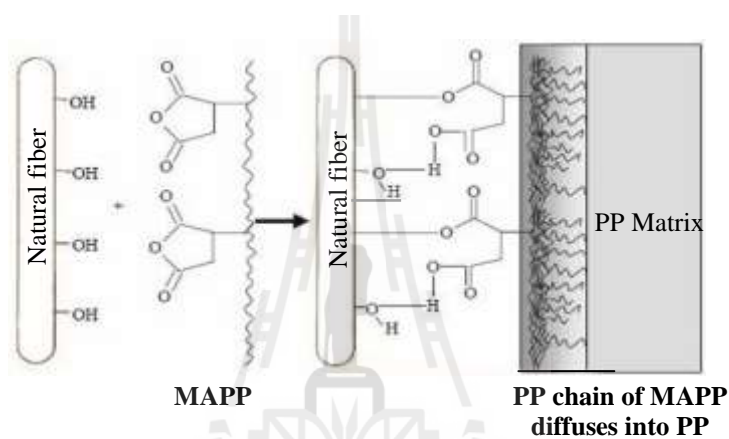


รูปที่ 4.9 กราฟ TGA ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ MAPP ที่ปริมาณต่างๆ

#### 4.2.3 สมบัติทางกล

สมบัติทางกลของ PP/UT/40APP ที่มีการใส่ MAPP แสดงในตารางที่ 4.6 ค่ามอดูลัสแรงดึงของ PP/UT/40APP ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีการใส่ MAPP ลงไป การใส่ MAPP 1 phr ลงใน PP/UT/40APP ไม่ทำให้ค่าการทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อใส่ MAPP 3 phr ลงใน PP/UT/40APP พบว่าค่าการทนแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Abu Barkar และคณะ พบว่า MAPP ปรับปรุงค่าการทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับผงไม้โดยมีการใส่ APP

[Abu Barkar et al., 2010] การใส่ MAPP ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าการทนต่อแรงดึงของ PP/UT/40APP เพิ่มขึ้นเนื่องจาก MAPP ปรับปรุงการยึดติดระหว่างเส้นใยกับพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ [Rana et al., 1998] ซึ่งอธิบายได้จากแบบจำลองโครงสร้างของ MAPP และเส้นใยธรรมชาติที่อินเทอร์เฟส ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ปฏิกริยาทางเคมีและทางกายภาพเกิดขึ้นระหว่างกลุ่มไฮดรอกซิล (hydroxyl groups) ของเส้นใยกับกลุ่มแอนไฮไดรด์ (anhydride groups) ของ MAPP ในขณะที่สายโซ่พอลิโพรพิลีนของ MAPP เข้าไปในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ ดังนั้น MAPP มีความสามารถในการปรับปรุงการยึดติดระหว่างพื้นผิวของเส้นใยกับพอลิโพรพิลีนซึ่งนำไปสู่การปรับปรุงสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิต [Doan, Gao., and Madar, 2006]



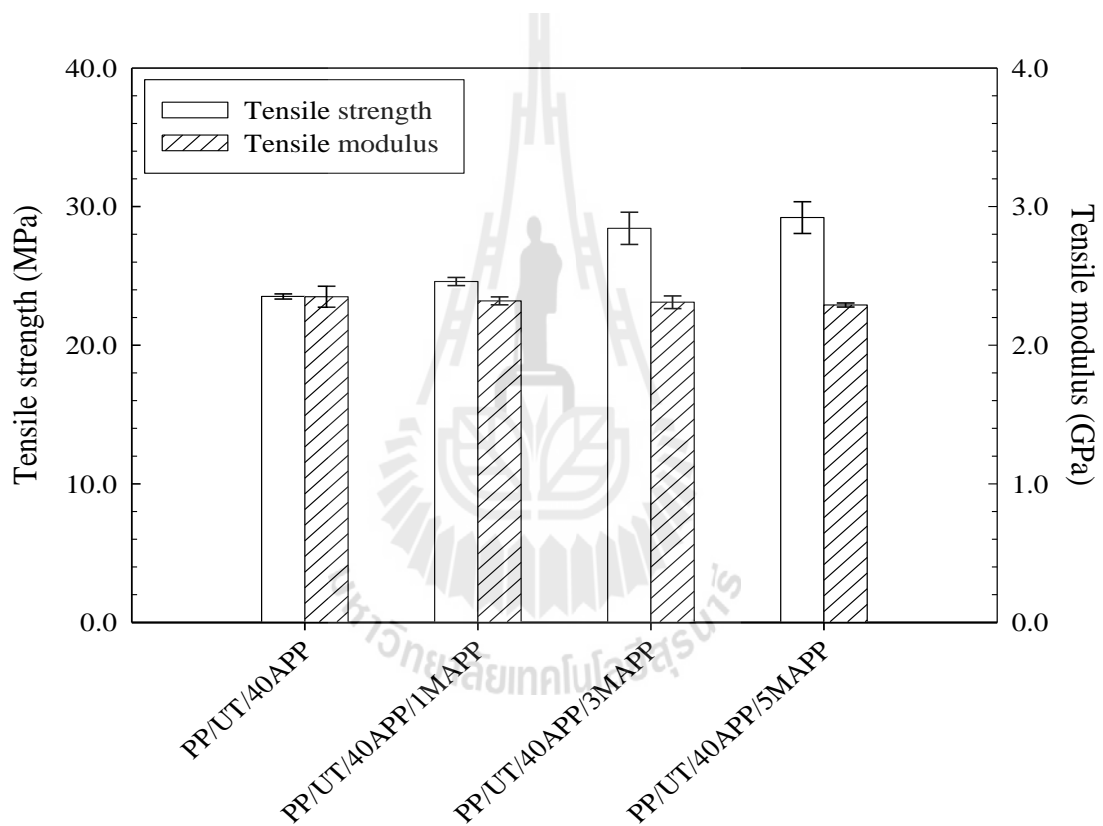
รูปที่ 4.10 แบบจำลอง โครงสร้างของ MAPP และเส้นใยธรรมชาติที่อินเทอร์เฟส (Doan et al., 2006)

อย่างไรก็ตาม ค่าการทนต่อแรงดึงของ PP/UT/40APP ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อใส่ MAPP มากกว่า 3 phr ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ปริมาณ MAPP ที่เหมาะสมสำหรับพอลิเมอร์คอมโพสิตคือ 3 phr

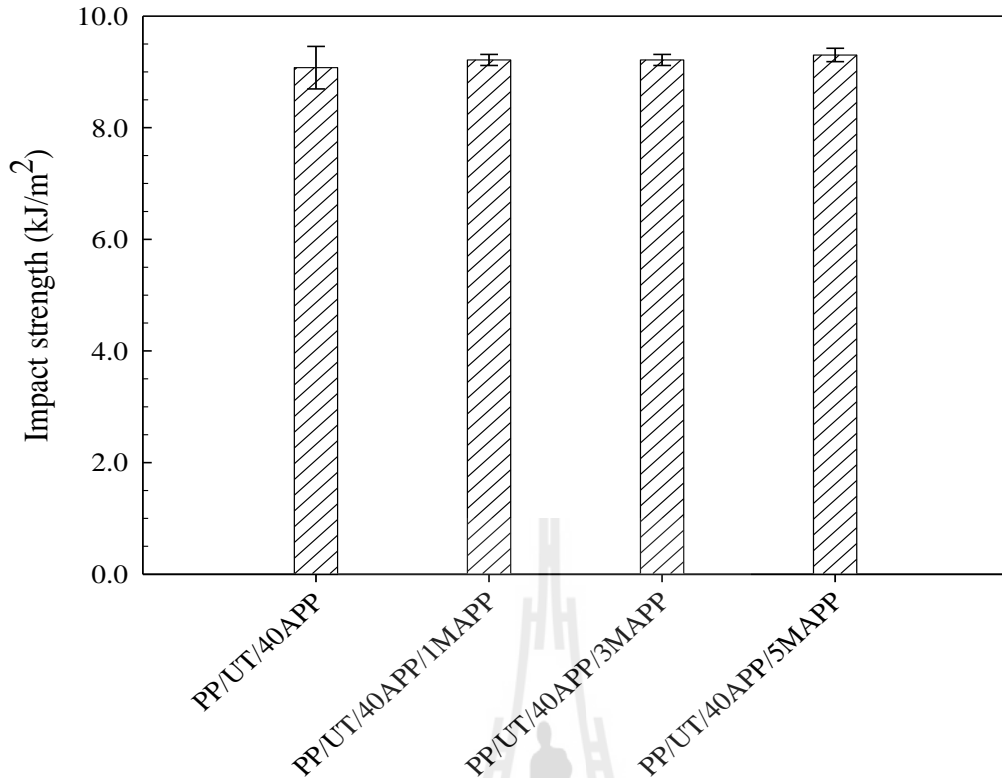
ค่าการทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตแสดงดังรูปที่ 4.12 จากรูปพบว่า MAPP ไม่ส่งผลต่อค่าการทนต่อแรงกระแทกของ PP/UT/40APP ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Yang และคณะ พบว่าเมื่อมีการใส่ MAPP การยึดติดระหว่างเฟสระหว่างสารตัวเติมและพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น แต่ค่าการทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับผงแคลบไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องมาจากเมื่อมีการให้แรงกระแทกกับพอลิเมอร์คอมโพสิต การร้าวจะไม่เกิดที่อินเทอร์เฟสแต่เกิดที่สารตัวเติมเอง [Yang et al., 2007]

ตารางที่ 4.6 สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ MAPP ที่ปริมาณต่างๆ

Designation	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Impact strength (kJ/m <sup>2</sup> )
PP/UT/40APP	23.52 ± 0.19	2.35 ± 0.07	9.08 ± 0.38
PP/UT/40APP/1MAPP	24.60 ± 0.29	2.32 ± 0.03	9.21 ± 0.98
PP/UT/40APP/3MAPP	28.43 ± 1.16	2.31 ± 0.05	9.21 ± 0.98
PP/UT/40APP/5MAPP	29.21 ± 1.14	2.29 ± 0.02	9.30 ± 0.12



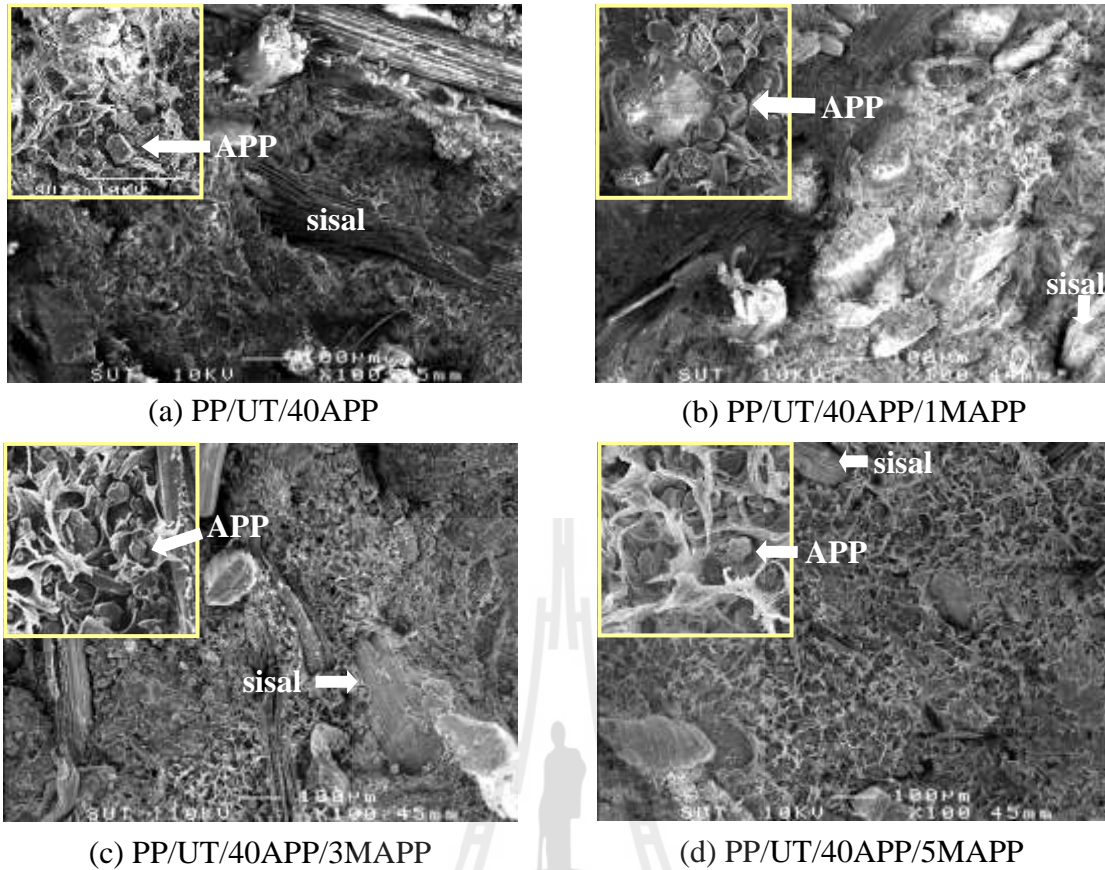
รูปที่ 4.11 สมบัติการทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ MAPP ที่ปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.12 ค่าการทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ MAPP ที่ปริมาณต่างๆ

#### 4.2.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ผลจากการทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ MAPP ที่ปริมาณต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงดังรูปที่ 4.13 รูปที่ 4.13(a) แสดงพื้นผิวของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยป่านสรนารายณ์ พบว่ามีช่องว่างระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ นอกจากนี้พบว่าการกระจายตัวที่ไม่ดีของ APP ในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ซึ่งมีลักษณะเดียวกันกับพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ MAPP 1 phr ดังแสดงในรูปที่ 4.13(b) ซึ่งให้เห็นว่าการใส่ MAPP 1 phr ไม่เพียงพอในการปรับปรุงการยึดติดระหว่างเฟสระหว่างสารตัวเติมและเมทริกซ์ ในทางตรงกันข้าม ในกรณีใส่ MAPP 3 phr ลงในพอลิเมอร์คอมโพสิตพบว่าไม่มีช่องว่างระหว่างเส้นใยกับพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์และมีการกระจายตัวที่ดีของ APP ในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ แสดงให้เห็นว่า MAPP 3 phr สามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างสารตัวเติมกับเมทริกซ์ แต่เมื่อใส่ MAPP 5 phr ไม่ได้ทำให้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ที่มีการใส่ MAPP 3 phr ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (c) และ 4.13 (d)



รูปที่ 4.13 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ MAPP ที่ปริมาณต่างๆ

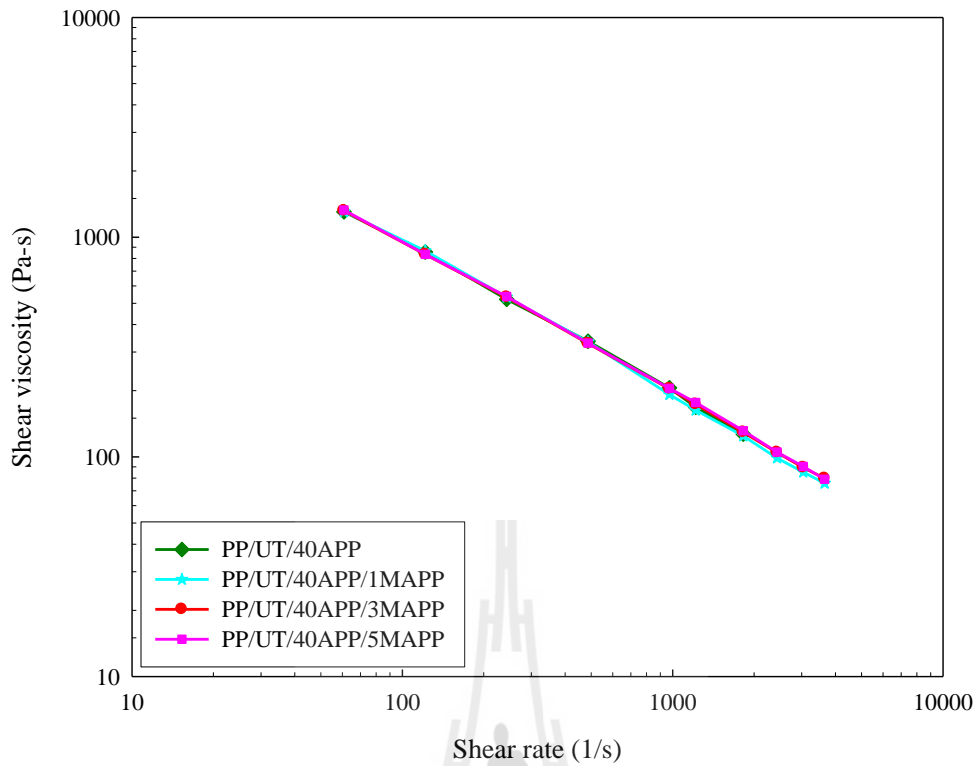
(a) PP/UT/40APP (b) PP/UT/40APP/1MAPP (c) PP/UT/40APP/3MAPP

(d) PP/UT/40APP/5MAPP

#### 4.2.5 สมบัติทางกระแสวิทยา

ความหนืดที่อัตราเฉือนต่างๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ MAPP ที่ปริมาณต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.14 ปริมาณของ MAPP ไม่มีผลกระทบต่อค่าความหนืดของพอลิเมอร์คอมโพสิต ซึ่งให้เห็นว่า MAPP ไม่มีผลต่อกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์คอมโพสิต





รูปที่ 4.14 ความหนืดที่อัตราเฉือนต่างๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ MAPP ที่ปริมาณต่างๆ

จากการทดสอบสมบัติการต้านการติดไฟ สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางกล พบว่า PP/UT/40APP/3MAPP มีความเหมาะสมที่สุดที่นำมาศึกษาผลของการใช้สารหน่วงไฟ 2 ชนิดต่อสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิต

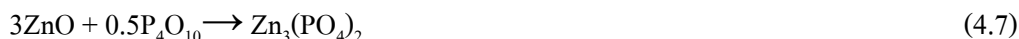
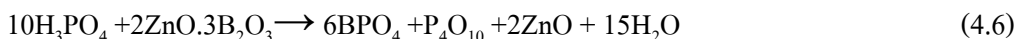
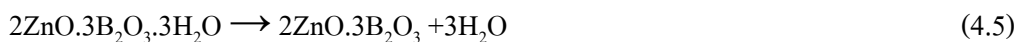
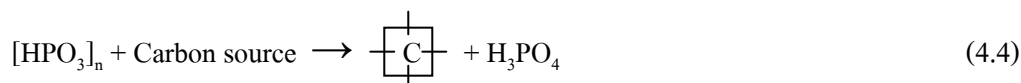
### 4.3 ผลของการใช้สารหน่วงไฟ 2 ชนิดร่วมกันและอัตราส่วนระหว่างสารหน่วงไฟ 2 ชนิดต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยปานครนารายณ์

#### 4.3.1 สมบัติการต้านการติดไฟ

อัตราการเผาไหม้ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่สารหน่วงไฟ 2 ชนิด แสดงดังตารางที่ 4.7 PP/UT/40APP/3MAPP ไม่ติดไฟภายใต้สภาวะทดสอบ PP/UT/40Mg/3MAPP มีอัตราการเผาไหม้สูงกว่า PP/UT/40APP/3MAPP นอกจากนี้พบว่า การใส่สารหน่วงไฟร่วมกัน 2 ชนิดคือ APP และ  $Mg(OH)_2$  ที่อัตราส่วนต่างๆ ได้แก่ 30 ต่อ 10 20 ต่อ 20 และ 10 ต่อ 30 ลงใน PP/UT/3MAPP มีอัตราการเผาไหม้สูงกว่า PP/UT/40APP/3MAPP ซึ่งชี้ให้เห็นว่า  $Mg(OH)_2$  ส่งผลในทางลบต่อสมบัติการต้านการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิตเมื่อมีการใช้ร่วมกันกับ APP PP/UT/40Zb/3MAPP มีค่าอัตราการเผาไหม้ใกล้เคียงกับ PP/UT/20APP/20Zb/3MAPP และ PP/UT/10APP/30Zb/3MAPP แต่มีค่ามากกว่า PP/UT/40APP/3MAPP ในทางตรงกันข้าม PP/UT/30APP/10Zb/3MAPP ไม่ติดไฟภายใต้สภาวะทดสอบ แสดงให้เห็นว่าการใส่ APP 30 phr และ Zb 10 phr ส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติการต้านการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยปานครนารายณ์

อันดับการเผาไหม้ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่สารหน่วงไฟ 2 ชนิด แสดงดังตารางที่ 4.7 PP/UT/40APP/3MAPP ติดไฟน้อยกว่า 10 วินาที จากนั้นจะดับไฟได้ด้วยตัวเอง ซึ่งจัดอันดับที่ V-0 อย่างไรก็ตาม พอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่  $Mg(OH)_2$  40 phr หรือการใส่ APP และ  $Mg(OH)_2$  ร่วมกันไม่สามารถจัดอันดับได้ เนื่องจากชิ้นงานไม่สามารถหยุดการเผาไหม้ได้ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการใช้ APP ร่วมกับ  $Mg(OH)_2$  ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเสริมกันของสมบัติการต้านการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิต การใส่ Zb 40 phr ลงใน PP/UT/3MAPP ไม่สามารถจัดอันดับได้ เนื่องจากชิ้นงานไม่สามารถหยุดการเผาไหม้ได้ ซึ่งได้ผลเช่นเดียวกับการใส่ APP และ Zb ที่อัตราส่วน 20:20 และ 10:30 ลงใน PP/UT/3MAPP ในทางตรงกันข้าม PP/UT/30APP/10Zb/3MAPP ติดไฟน้อยกว่า 10 วินาที จากนั้นจะดับไฟได้ด้วยตัวเอง ซึ่งจัดอันดับที่ V-0 ชี้ให้เห็นว่าการใส่ APP และ Zb ร่วมกันที่อัตราส่วนนี้สามารถปรับปรุงสมบัติการต้านการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยปานครนารายณ์

Jeencham, Suppakarn และ Jarukumjorn พบว่าการใส่ Zb ลงในพอลิโพรพิลีน มีประสิทธิภาพต่ำในการต้านการติดไฟของพอลิโพรพิลีน [Jeencham, Suppakarn and Jarukumjorn, 2009] อย่างไรก็ตาม พบว่าเมื่อมีการใส่ APP และ Zb ลงในพอลิโพรพิลีนส่งผลต่อประสิทธิภาพการเสริมกันต่อสมบัติการต้านการติดไฟของพอลิโพรพิลีน [Symyn, Bourbigot, Duquesne, and Delobel, 2004] การเสริมกันนี้เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง APP และ Zb และก่อให้เกิดซิงค์ไฟโรฟอสเฟต (zinc pyrophosphate,  $Zn_2P_2O_7$ ) ภายใต้อุณหภูมิที่สูง ปฏิกิริยาทั้งหมดแสดงดังนี้



การก่อตัวเป็น  $\text{Zn}_2\text{P}_2\text{O}_7$  เกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง APP กับ Zb ซึ่งเป็นเก้าอี้ที่มีประสิทธิภาพในการเป็นฉนวนกันความร้อนและก๊าซที่ติดไฟได้ให้กับพอลิเมอร์คอมโพสิต อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาพบว่า การใส่ Zb มากกว่า 10 phr ลงในพอลิเมอร์คอมโพสิตไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเสริมกันของสมบัติการต้านการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิต อาจเป็นเพราะความไม่สมดุลของปริมาณสัมพันธ์ระหว่าง APP และ Zb

ตาราง 4.7 อัตราการเผาไหม้และอันดับการเผาไหม้ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่สารหน่วงไฟ 2 ชนิดร่วมกัน

Designation	Horizontal burning rate (mm/min)	Vertical burning rating
PP/UT/40APP/3MAPP	No burning	V-0
PP/UT/30APP/10Mg/3MAPP	15.02 ± 0.71	NC
PP/UT/20APP/20Mg/3MAPP	21.74 ± 0.11	NC
PP/UT/10APP/30Mg/3MAPP	25.16 ± 0.99	NC
PP/UT/40Mg/3MAPP	16.75 ± 0.07	NC
PP/UT/30APP/10Zb/3MAPP	No burning	V-0
PP/UT/20APP/20Zb/3MAPP	27.39 ± 0.35	NC
PP/UT/10APP/30Zb/3MAPP	27.53 ± 0.60	NC
PP/UT/40Zb/3MAPP	27.95 ± 0.25	NC

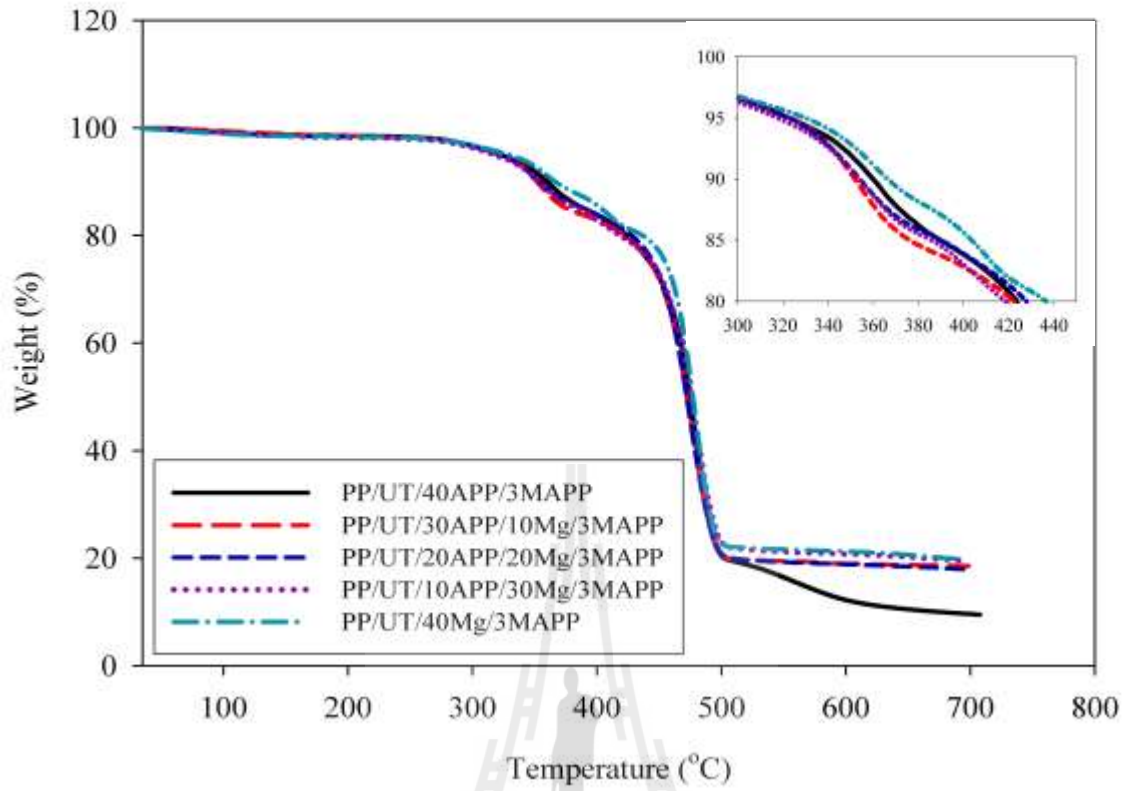
#### 4.3.2 สมบัติทางความร้อน

กราฟ TGA และสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ APP และ  $Mg(OH)_2$  ร่วมกันที่อัตราส่วนต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.15 และ ตารางที่ 4.8 ตามลำดับ พอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่  $Mg(OH)_2$  มีความเสถียรทางความร้อนสูงสุด เนื่องจากมีค่า  $T_{5\%}$   $T_{50\%}$  และ ปริมาณของเถ้าสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์คอมโพสิตระบบอื่น นอกจากนี้ เมื่อใส่  $Mg(OH)_2$  ลงในพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ APP พบว่าปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้น การใส่ APP และ  $Mg(OH)_2$  ร่วมกันในพอลิเมอร์คอมโพสิตทำให้สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงเล็กน้อย

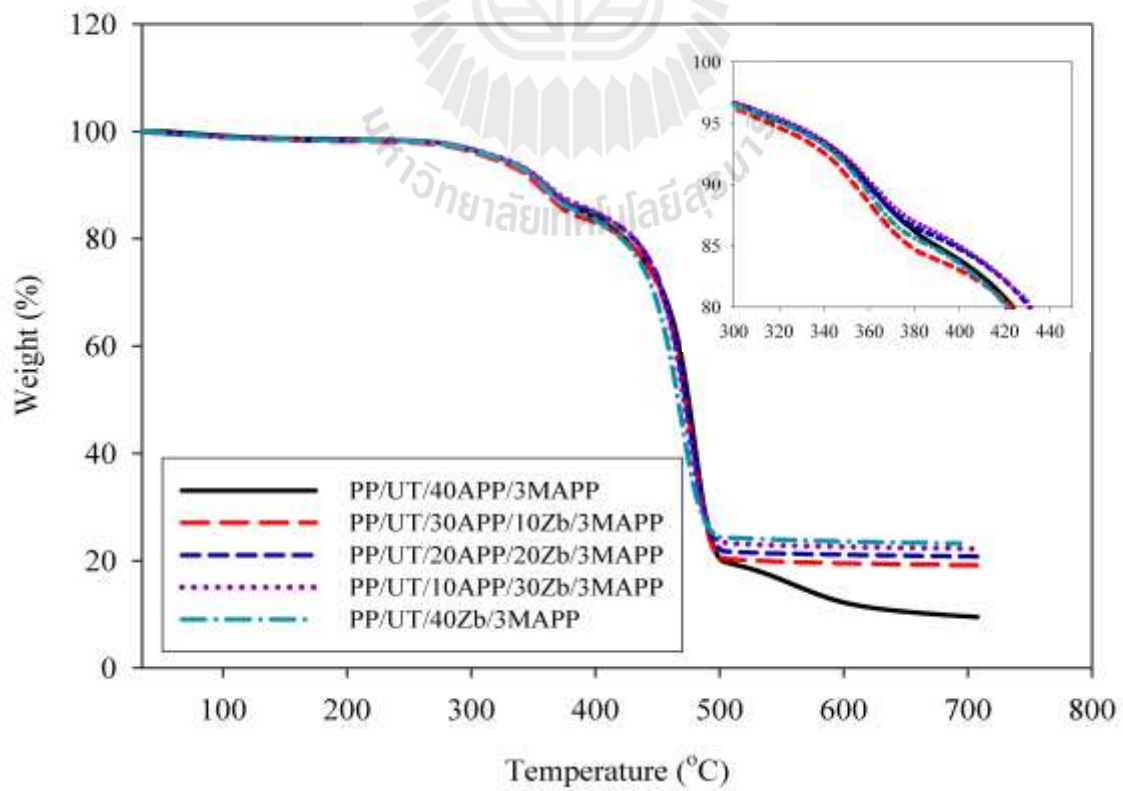
ในกรณีของการใส่ Zb 40 phr ลงในพอลิเมอร์คอมโพสิต พบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตมีความเสถียรทางความร้อนต่ำสุด เนื่องจากมีค่า  $T_{5\%}$  และ  $T_{50\%}$  ต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์คอมโพสิตในระบบอื่นแสดงดังรูปที่ 4.16 และตารางที่ 4.8 การใส่ APP และ Zb ร่วมกันทำให้สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงเล็กน้อย

ตาราง 4.8 สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่สารหน่วงไฟ 2 ชนิดร่วมกัน

Designation	$T_{5\%}$ (°C)	$T_{50\%}$ (°C)	Char residue (%)
PP/UT/40APP/3MAPP	322	474	12.25
PP/UT/30APP/10Mg/3MAPP	322	472	18.97
PP/UT/20APP/20Mg/3MAPP	322	472	18.88
PP/UT/10APP/30Mg/3MAPP	317	475	20.78
PP/UT/40Mg/3MAPP	329	477	21.27
PP/UT/30APP/10Zb/3MAPP	316	472	19.54
PP/UT/20APP/20Zb/3MAPP	323	472	21.13
PP/UT/10APP/30Zb/3MAPP	325	472	22.62
PP/UT/40Zb/3MAPP	320	466	23.60



รูปที่ 4.15 กราฟ TGA ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ APP และ Mg(OH)<sub>2</sub> ร่วมกัน



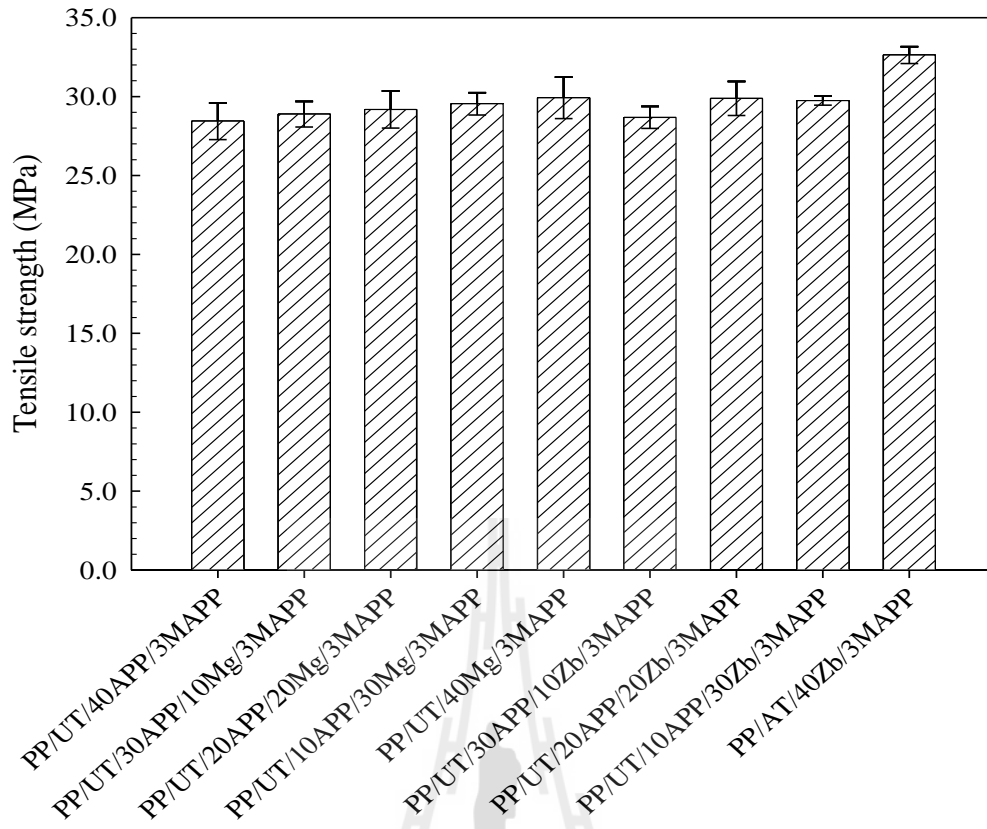
รูปที่ 4.16 กราฟ TGA ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ APP และ Zn ร่วมกัน

### 4.3.3 สมบัติทางกล

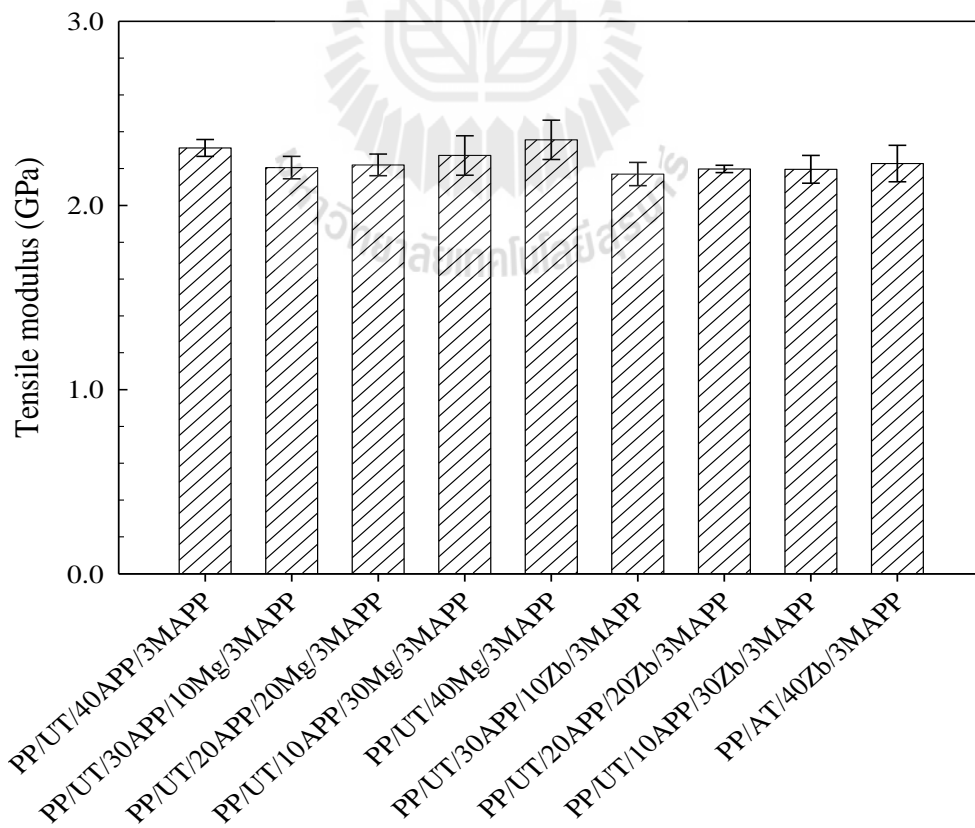
สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตแสดงในตารางที่ 4.9 การใส่ APP และ  $Mg(OH)_2$  ร่วมกันที่อัตราส่วนต่างๆ ลงในพอลิเมอร์คอมโพสิตไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติการทนต่อแรงดึงและค่าการทนต่อแรงกระแทกซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.17-4.19 นอกจากนี้พบว่า การใส่ APP และ Zb ร่วมกันไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิต พอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ Zb มีค่าการทนแรงดึงมากกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่สารหน่วงไฟชนิดอื่น เนื่องจาก Zb มีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระกว่า APP และ  $Mg(OH)_2$  แสดงดังรูปที่ 4.20 (a), 4.25 (e) และ 4.25 (i) ซึ่งลักษณะเช่นนี้อาจทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันทางกล (mechanical interlocking) ระหว่าง Zb และพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์

ตารางที่ 4.9 สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่สารหน่วงไฟ 2 ชนิดร่วมกัน

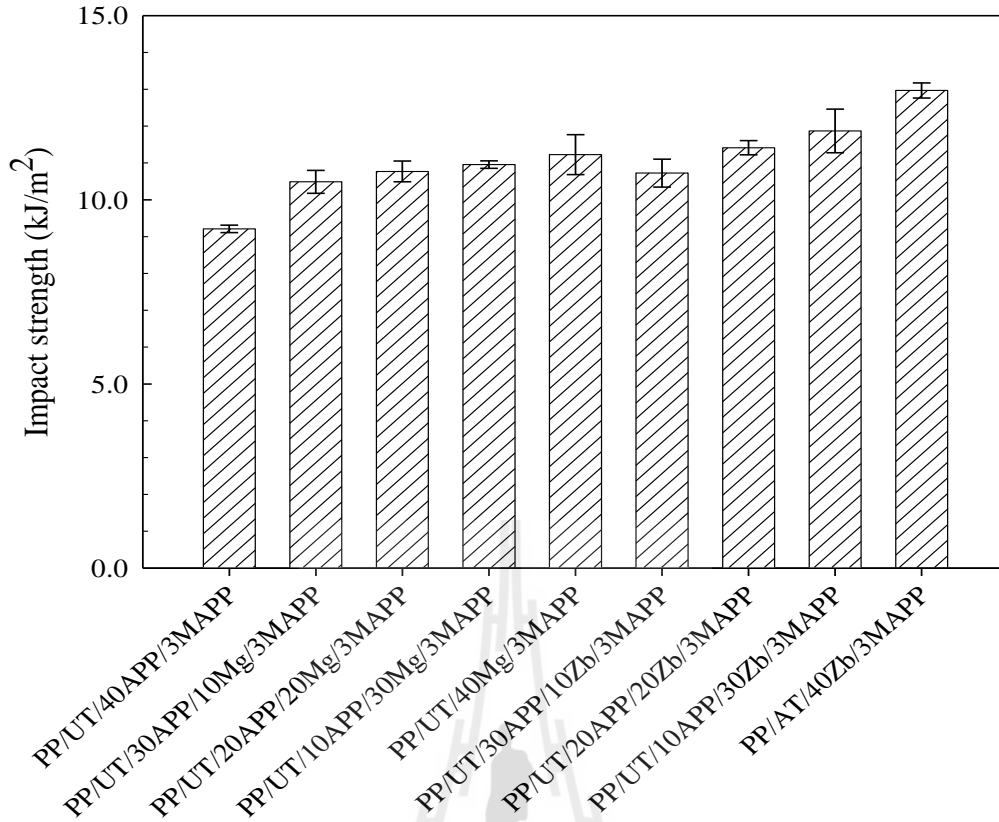
Designation	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Impact strength (kJ/m <sup>2</sup> )
PP/UT/40APP/3MAPP	28.43 ± 1.16	2.31 ± 0.05	9.21 ± 0.10
PP/UT/30APP/10Mg/3MAPP	28.88 ± 0.81	2.21 ± 0.06	10.49 ± 0.31
PP/UT/20APP/20Mg/3MAPP	29.18 ± 1.18	2.22 ± 0.06	10.77 ± 0.28
PP/UT/10APP/30Mg/3MAPP	29.54 ± 0.70	2.27 ± 0.11	10.95 ± 0.10
PP/UT/40Mg/3MAPP	29.92 ± 1.31	2.36 ± 0.11	11.22 ± 0.54
PP/UT/30APP/10Zb/3MAPP	28.66 ± 0.70	2.17 ± 0.06	10.72 ± 0.37
PP/UT/20APP/20Zb/3MAPP	29.88 ± 1.08	2.20 ± 0.02	11.41 ± 0.19
PP/UT/10APP/30Zb/3MAPP	29.74 ± 0.29	2.20 ± 0.08	11.86 ± 0.59
PP/UT/40Zb/3MAPP	32.62 ± 0.53	2.23 ± 0.10	12.96 ± 0.20



รูปที่ 4.17 การทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่สารหน่วงไฟ 2 ชนิดร่วมกัน



รูปที่ 4.18 โมดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่สารหน่วงไฟ 2 ชนิดร่วมกัน

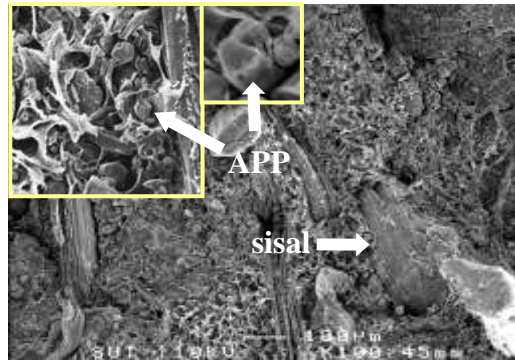


รูปที่ 4.19 การทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่สารหน่วงไฟ 2 ชนิดร่วมกัน

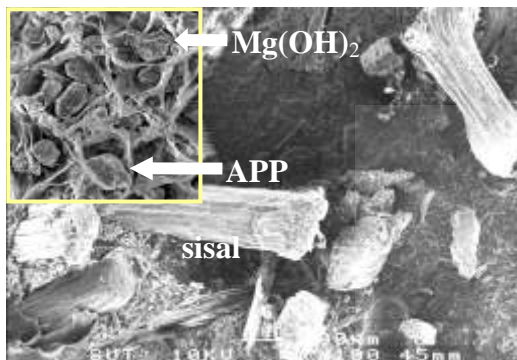
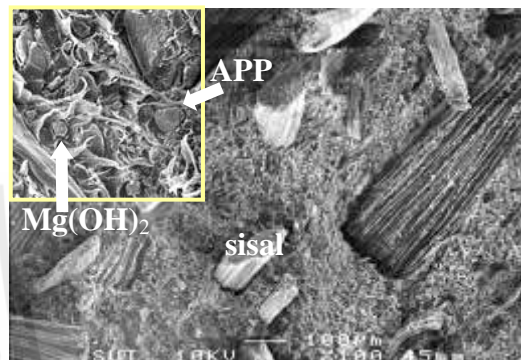
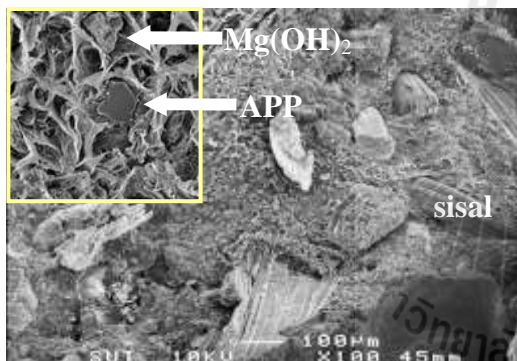
#### 4.3.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

รูปที่ 4.20 แสดงผลจากการทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่สารหน่วงไฟ 2 ชนิดร่วมกัน สำหรับ PP/UT/40APP/3MAPP แสดงดังรูปที่ 4.20 (a) พบว่าไม่มีช่องว่างระหว่างเส้นใยกับพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ และมีการกระจายตัวที่ดีของ APP ในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า MAPP 3 phr สามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างสารตัวเติมกับเมทริกซ์ จากรูปที่ 4.20 (b-i) พบว่ามีการยึดติดที่ดีระหว่างเฟสระหว่างเส้นใยป่านขนารายณ์และพอลิโพรพิลีน นอกจากนี้ APP Mg(OH)<sub>2</sub> และ Zb มีการกระจายตัวที่ดีในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ ซึ่งชี้ให้เห็นว่า MAPP ปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านขนารายณ์หรือสารหน่วงไฟ

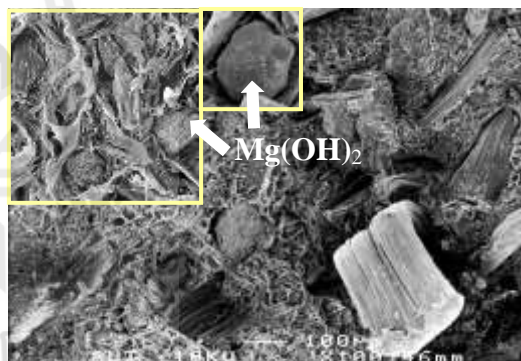




(a) PP/UT/40APP/3MAPP

(b) PP/UT/30APP/10Mg(OH)<sub>2</sub>/3MAPP(c) PP/UT/20APP/20Mg(OH)<sub>2</sub>/3MAPP

(d) PP/UT/10APP/30Mg/3MAPP



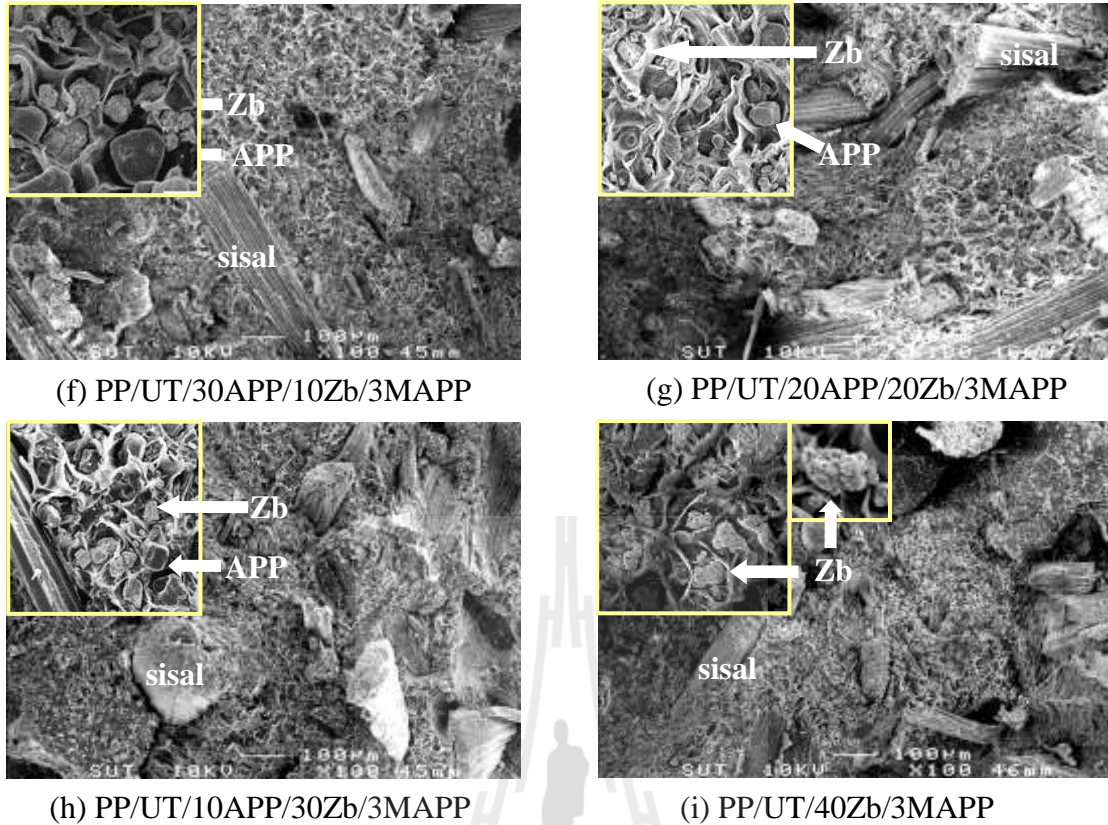
(e) PP/UT/40Mg/3MAPP

รูปที่ 4.20 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่สารหน่วงไฟ 2 ชนิดร่วมกัน

(a) PP/UT/40APP/3MAPP (b) PP/UT/30APP/10Mg/ 3MAPP

(c) PP/UT/20APP/20Mg/3MAPP (d) PP/UT/10APP/30Mg/3MAPP

(e) PP/UT/40Mg/3MAPP

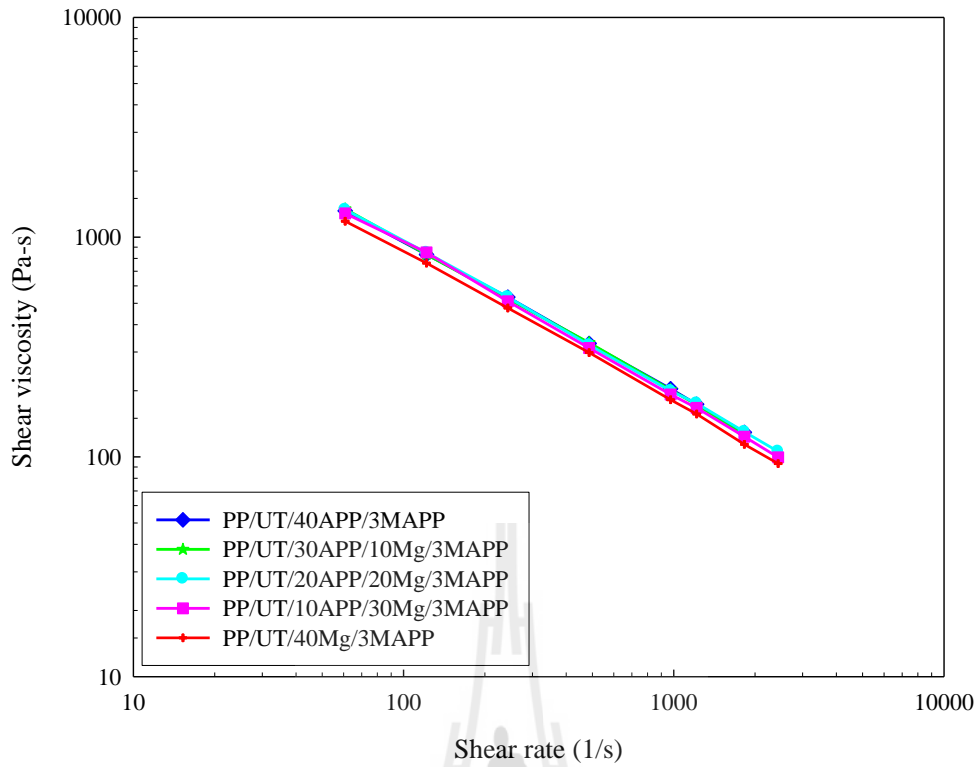


รูปที่ 4.20 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่สารหน่วงไฟ 2 ชนิดร่วมกัน  
 (f) PP/UT/30APP/10Zb/3MAPP (g) PP/UT/20APP/20Zb/3MAPP  
 (h) PP/UT/10APP/30Zb/3MAPP (i) PP/UT/40Zb/3MAPP (ต่อ)

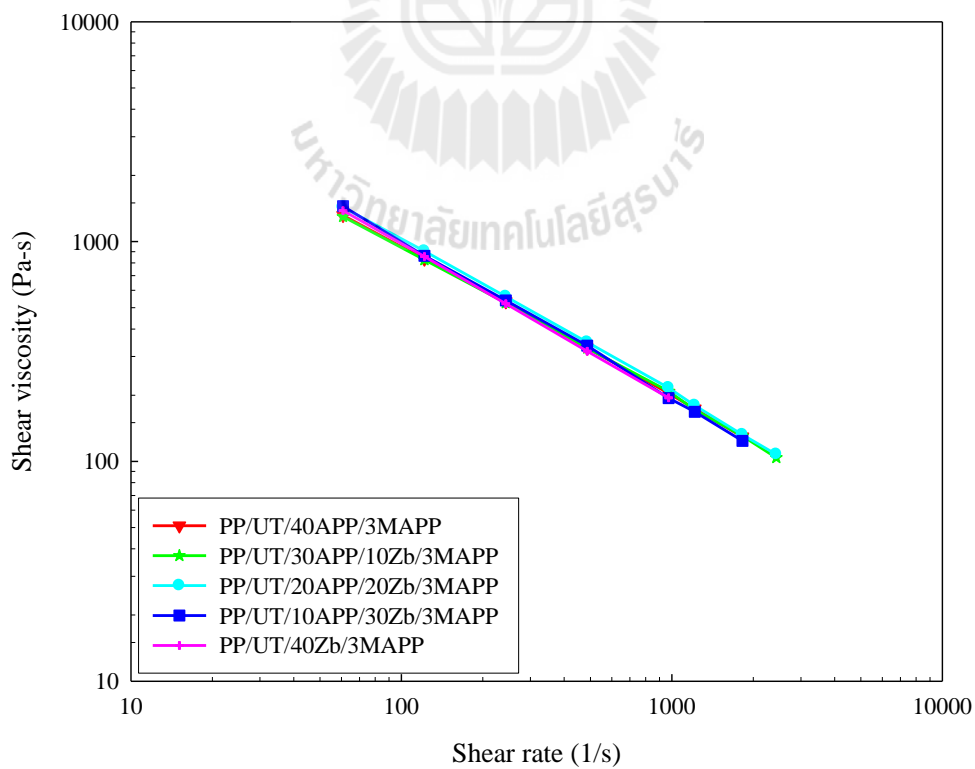
#### 4.3.5 สมบัติทางกระแสวิทยา

ความหนืดที่อัตราเฉือนต่างๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่สารหน่วงไฟ 2 ชนิดร่วมกัน คือ APP/Mg(OH)<sub>2</sub> และ APP/Zb แสดงดังรูปที่ 4.21 และ 4.22 ตามลำดับ พบว่าการใส่สารหน่วงไฟ 2 ชนิดไม่มีผลกระทบต่อค่าความหนืดของพอลิเมอร์คอมโพสิต ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการใส่สารหน่วงไฟ 2 ชนิดไม่มีผลต่อกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์

จากการทดสอบสมบัติการต้านการติดไฟ สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกล และการพิจารณาจากต้นทุนของสารหน่วงไฟ พบว่า PP/UT/30APP/10Zb/3MAPP มีความเหมาะสมที่สุดที่นำมาศึกษาผลของเส้นใยแก้วต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์



รูปที่ 4.21 ความหนืดที่อัตราเฉือนต่างๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ APP และ  $Mg(OH)_2$  ร่วมกัน



รูปที่ 4.22 ความหนืดที่อัตราเฉือนต่างๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ APP และ ZnO ร่วมกัน

#### 4.4 ผลของเส้นใยแก้วต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยปานสรนารายณ์

##### 4.4.1 สมบัติการต้านการติดไฟ

อัตราการเผาไหม้และอันดับการเผาไหม้ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่เส้นใยปานสรนารายณ์และเส้นใยแก้วร่วมกัน แสดงดังตารางที่ 4.10 พอลิเมอร์คอมโพสิตทุกระบบไม่ติดไฟภายใต้สภาวะทดสอบอัตราการเผาไหม้ นอกจากนี้ จากผลอันดับการเผาไหม้ พอลิเมอร์คอมโพสิตทุกระบบติดไฟน้อยกว่า 10 วินาที จากนั้นจะดับไฟได้ด้วยตัวเอง ซึ่งจัดอันดับที่ V-0 จากผลการทดสอบสมบัติการต้านการติดไฟชี้ให้เห็นว่าการใส่เส้นใยแก้วไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติการต้านการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยปานสรนารายณ์

ตารางที่ 4.10 อัตราการเผาไหม้และอันดับการเผาไหม้ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่เส้นใยปานสรนารายณ์และเส้นใยแก้วร่วมกัน

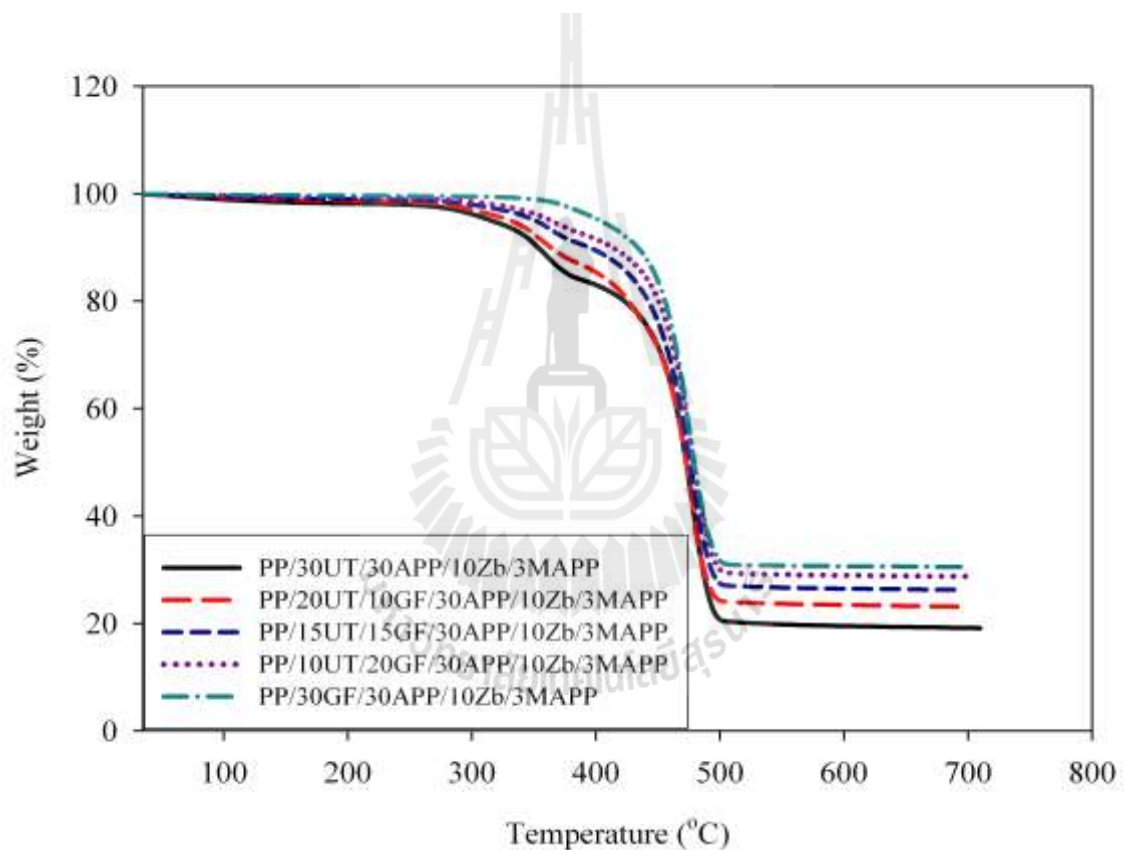
Designation	Horizontal burning rate (mm/min)	Vertical burning rating
PP/UT/30APP/10Zb/3MAPP	No burning	V-0
PP/20UT/10GF/30APP/10Zb/3MAPP	No burning	V-0
PP/15UT/15GF/30APP/10Zb/3MAPP	No burning	V-0
PP/10UT/20GF/30APP/10Zb/3MAPP	No burning	V-0
PP/GF/30APP/10Zb/3MAPP	No burning	V-0

##### 4.4.2 สมบัติทางความร้อน

กราฟ TGA และสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่เส้นใยปานสรนารายณ์และเส้นใยแก้วร่วมกันแสดงในรูปที่ 4.23 และ ตารางที่ 4.10 ตามลำดับ ในพอลิเมอร์คอมโพสิตทุกระบบ PP/GF/30APP/10Zb/3MAPP มีค่า  $T_{5\%}$ ,  $T_{50\%}$  และปริมาณเถ้าสูงสุด ในกรณีใส่เส้นใยแก้วร่วมกับเส้นใยปานสรนารายณ์ลงในพอลิเมอร์คอมโพสิต พบว่า  $T_{5\%}$ ,  $T_{50\%}$  และปริมาณเถ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเส้นใยแก้วที่ใส่ลงในพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้น ชี้ให้เห็นว่าเส้นใยแก้วปรับปรุงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยปานสรนารายณ์

ตาราง 4.11 สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่เส้นใย 2 ชนิดร่วมกัน

Designation	T <sub>5%</sub> (°C)	T <sub>50%</sub> (°C)	Char residue (%)
PP/UT/30APP/10Zb/3MAPP	316	472	19.54
PP/20UT/10GF/30APP/10Zb/3MAPP	330	473	23.45
PP/15UT/15GF/30APP/10Zb/3MAPP	350	475	26.50
PP/10UT/20GF/30APP/10Zb/3MAPP	363	478	28.96
PP/GF/30APP/10Zb/3MAPP	403	479	30.67



รูปที่ 4.23 กราฟ TGA ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่เส้นใย 2 ชนิดร่วมกัน

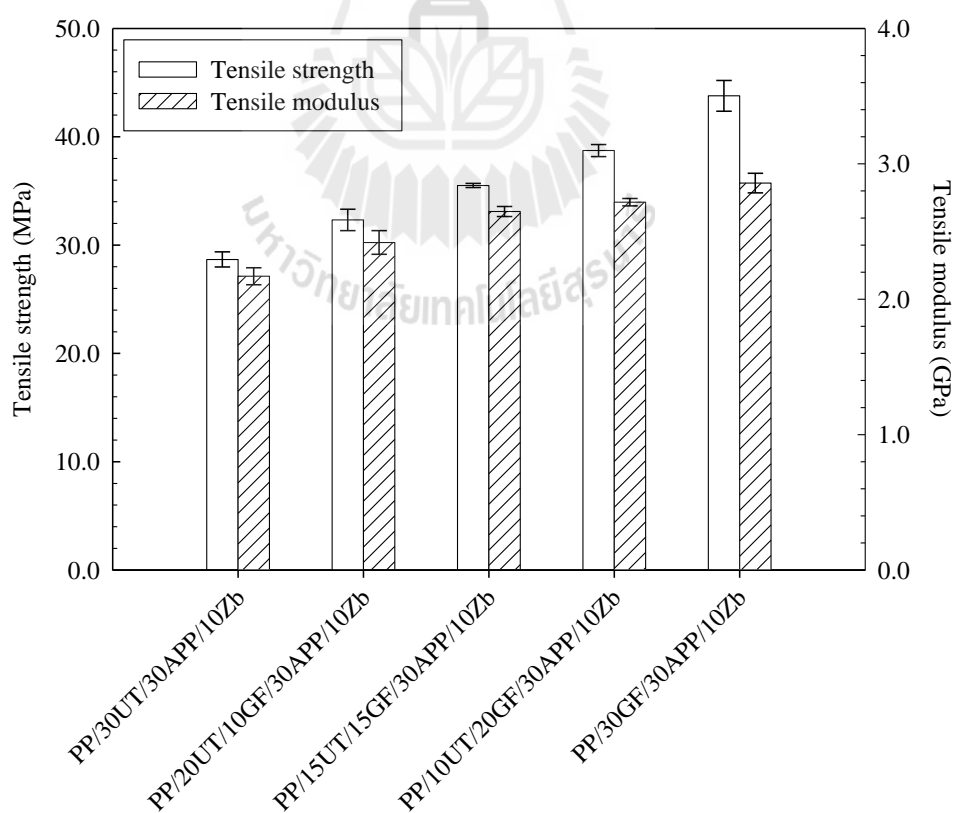
#### 4.4.3 สมบัติทางกล

สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่เส้นใย 2 ชนิดร่วมกันแสดงในตารางที่ 4.12 ในพอลิเมอร์คอมโพสิตทุกระบบ พบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยแก้วมีค่าการทนต่อแรงดึง ค่ามอดูลัสแรงดึง และค่าการทนต่อแรงกระแทกสูงสุด ในกรณีที่มีการใส่เส้นใยแก้วลงในพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านสรณารายณ์พบว่า

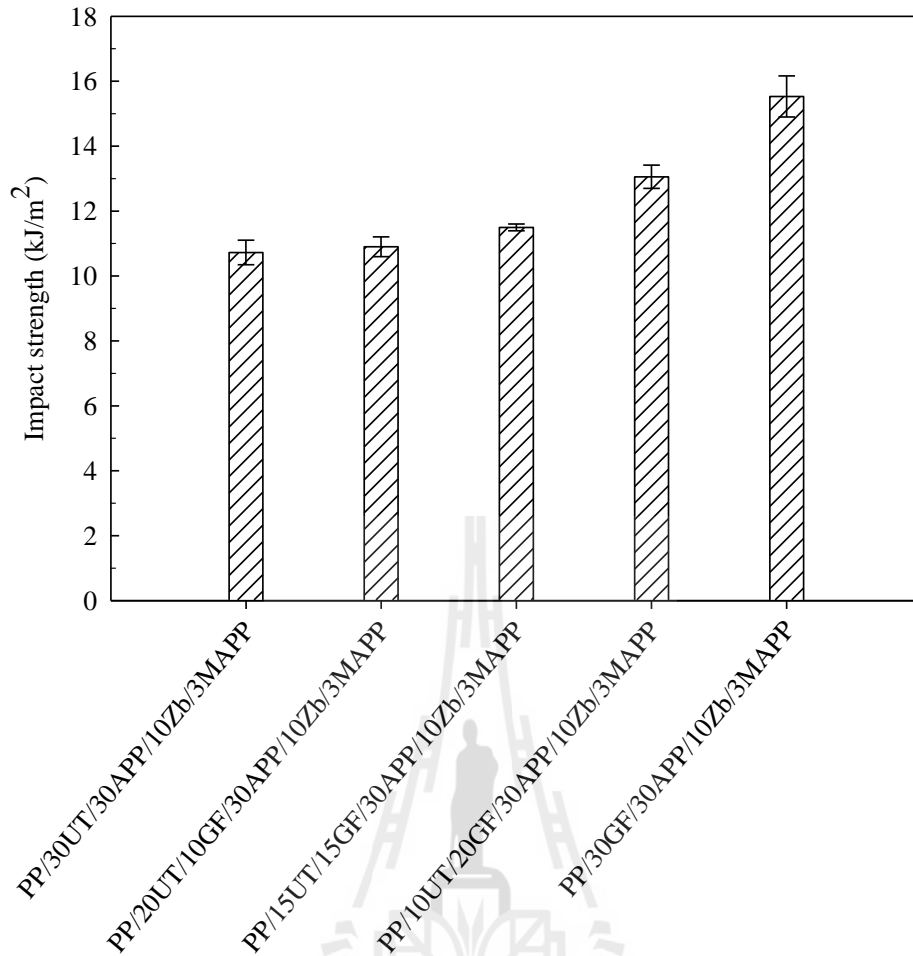
ค่าการทนต่อแรงดึง ค่ามอดูลัสแรงดึง และค่าการทนต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใยแก้วซึ่งแสดงในรูปที่ 4.24 และ 4.25 ตามลำดับ การใส่เส้นใยแก้วทำให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้นเนื่องจากเส้นใยแก้วมีความแข็งแรง (strength) และความแข็งดิ่ง (stiffness) สูงกว่าเส้นใยป่านศรนารายณ์

ตาราง 4.12 สมบัติทางความกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่เส้นใย 2 ชนิดร่วมกัน

Designation	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Impact strength (kJ/m <sup>2</sup> )
PP/UT/30APP/10Zb/3MAPP	28.67 ± 0.69	2.17 ± 0.06	10.72 ± 0.37
PP/20UT/10GF/30APP/10Zb/3MAPP	32.32 ± 0.98	2.41 ± 0.08	10.90 ± 0.30
PP/15UT/15GF/30APP/10Zb/3MAPP	35.50 ± 0.19	2.64 ± 0.03	11.49 ± 0.10
PP/10UT/20GF/30APP/10Zb/3MAPP	38.72 ± 0.55	2.71 ± 0.02	13.05 ± 0.35
PP/GF/30APP/10Zb/3MAPP	43.78 ± 1.41	2.85 ± 0.07	15.53 ± 0.63



รูปที่ 4.24 สมบัติการทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่เส้นใย 2 ชนิดร่วมกัน

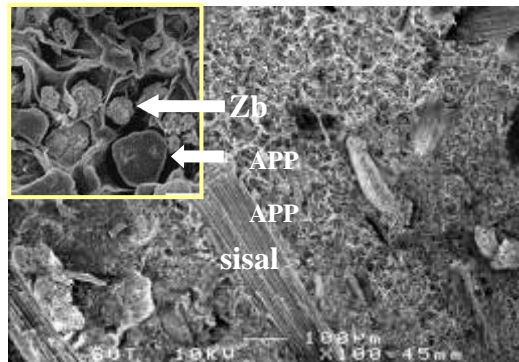


รูปที่ 4.25 ค่าการทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอม โพลีทที่มีคาร์ไฟใส่เส้นใย 2 ชนิดร่วมกัน

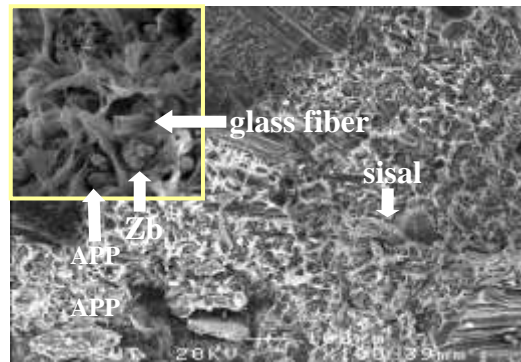
#### 4.4.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

รูปที่ 4.26 แสดงผลการทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอม โพลีทที่มีคาร์ไฟใส่เส้นใย 2 ชนิดร่วมกัน จากรูปที่ 4.26-4.30 พบว่าไม่มีช่องว่างระหว่างเส้นใยกับพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ ซึ่งให้เห็นว่ามีการยึดติดระหว่างเฟสระหว่างเส้นใยและพอลิโพรพิลีนที่ดี นอกจากนี้พบการกระจายตัวของสารหน่วงไฟในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ ซึ่งให้เห็นว่า MAPP ปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพอลิโพรพิลีนและสารหน่วงไฟ

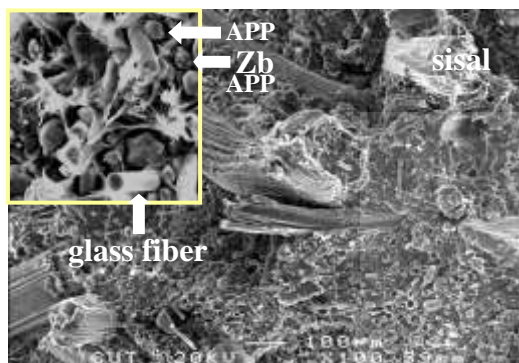




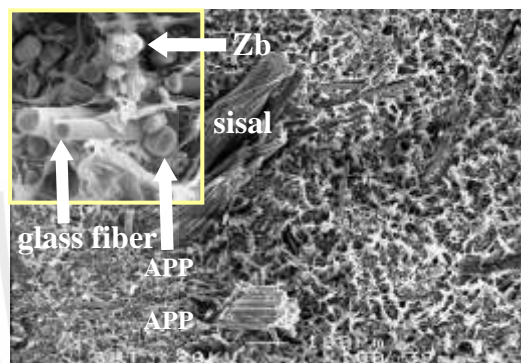
(a) PP/30UT/30APP/10Zb/3MAPP



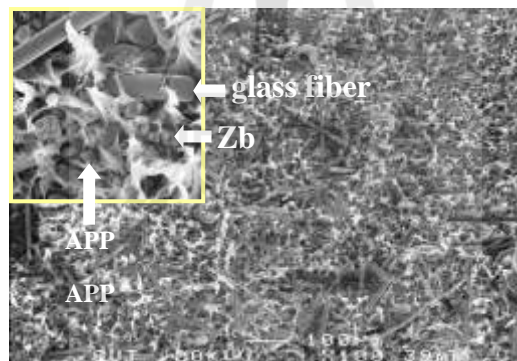
(b) PP/20UT/10GF/30APP/10Zb/3MAPP



(c) PP/15UT/15/GF/30APP/10Zb/3MAPP



(d) PP/10UT/20GF/30APP/10Zb/3MAPP



(e) PP/30GF/30APP/10Zb/3MAPP

รูปที่ 4.26 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่เส้นใย 2 ชนิดร่วมกัน

(a) PP/30UT/30APP/10Zb/3MAPP (b) PP/20UT/10GF/30APP/10Zb/3MAPP

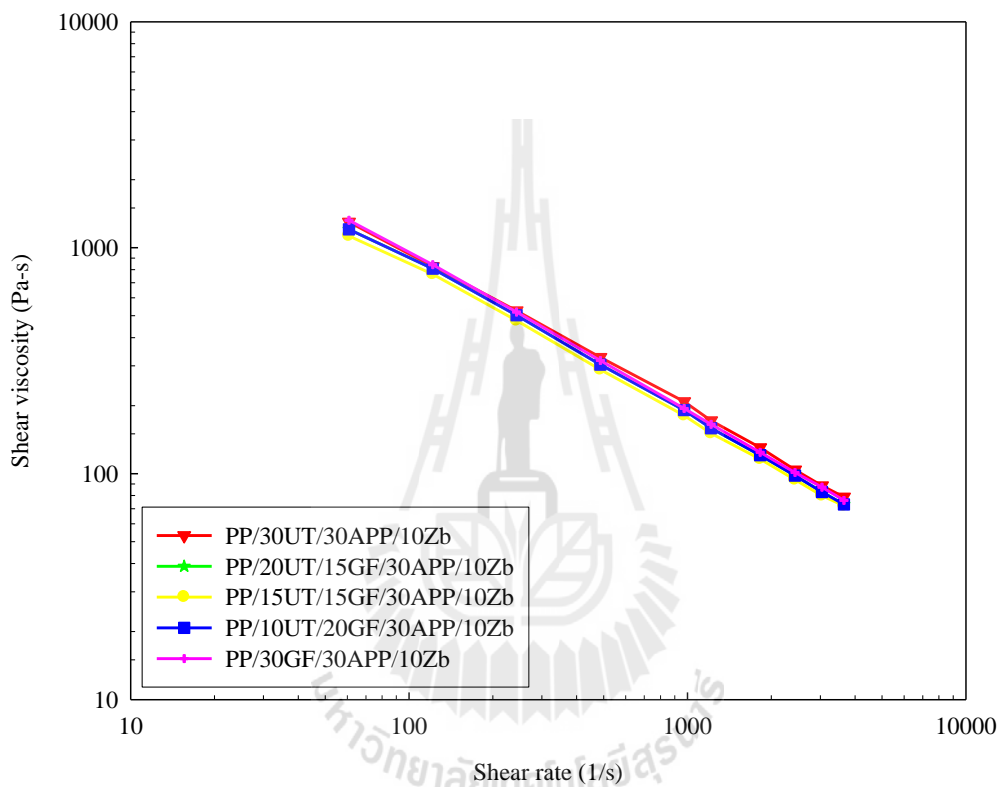
(c) PP/15UT/15/GF/30APP/10Zb/3MAPP (d) PP/10UT/20GF/30APP/10Zb/3MAPP

(e) PP/30GF/30APP/10Zb/3MAPP



#### 4.3.5 สมบัติทางกระแสวิทยา

ความหนืดที่อัตราเฉือนต่างๆของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่เส้นใย 2 ชนิดร่วมกัน คือ เส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยแก้ว แสดงคั่งรูปที่ 4.27 พบว่าการใส่เส้นใยแก้วไม่มีผลกระทบต่อค่าความหนืดของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์ แสดงว่าเส้นใยแก้วไม่มีผลต่อกระบวนการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์



รูปที่ 4.27 ความหนืดที่อัตราเฉือนต่างๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่เส้นใย 2 ชนิดร่วมกัน

## บทที่ 5

### บทสรุป

#### สรุปผลการวิจัย

- การใส่ APP ลงในพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์ ส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติการต้านการติดไฟและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิต เมื่อเพิ่มปริมาณของ APP สมบัติการต้านการติดไฟและความเสถียรทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน การทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าลดลงเล็กน้อย พอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่มีการใส่ APP 40 phr มีสมบัติการต้านการติดไฟและความเสถียรทางความร้อนสูงสุด ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงการกระจายตัวที่ไม่ดีของ APP ในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ APP ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงต่อค่าความหนืดของพอลิเมอร์คอมโพสิต และการทำอัลคาไลน์เซชัน ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิต

- MAPP ส่งผลต่อการปรับปรุงการยึดติดระหว่างพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์และเส้นใยป่านศรนารายณ์ ทำให้สมบัติการทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม MAPP ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญของสมบัติการต้านการติดไฟ สมบัติทางความร้อน และความหนืดของพอลิเมอร์คอมโพสิต ปริมาณ MAPP ที่เหมาะสม คือ 3 phr จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่มีการใส่ MAPP แสดงการยึดติดที่ดีของเส้นใยป่านศรนารายณ์ในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์และการกระจายตัวที่ดีของ APP ในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์

- การใส่สารหน่วงไฟร่วมกันระหว่าง APP และ  $Mg(OH)_2$  ในพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์ให้ผลทางลบต่อสมบัติการต้านการติดไฟ ในทางกลับกัน พอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่ APP 30 phr และ Zb 10 phr แสดงสมบัติการต้านการติดไฟสูงสุด พอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่  $Mg(OH)_2$  มีความเสถียรทางความร้อนสูงสุด อย่างไรก็ตาม การใส่ Zb 40 phr ลงในพอลิเมอร์คอมโพสิตแสดงความเสถียรทางความร้อนต่ำสุด การใช้สารหน่วงไฟร่วมกันระหว่าง APP กับ  $Mg(OH)_2$  หรือ APP กับ Zb ในพอลิเมอร์คอมโพสิตส่งผลให้สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงเล็กน้อย การใส่สารหน่วงไฟ 2 ชนิดร่วมกันไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติการทนต่อแรงดึง การทนต่อแรงกระแทก และความหนืดของพอลิเมอร์คอมโพสิต ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง

พอลิโพรพิลีนและเส้นใยปานสรนารายณ์แสดงการยึดติดที่ดีของเส้นใยปานสรนารายณ์ในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์และการกระจายตัวที่ดีของสารหน่วงไฟในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์

- การใส่เส้นใยแก้วไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติการต้านการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยปานสรนารายณ์ เส้นใยแก้วปรับปรุงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยปานสรนารายณ์ เมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใยแก้วลงในพอลิเมอร์คอมโพสิต ค่าการทนต่อแรงดึง ค่ามอดูลัสแรงดึง และค่าการทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยปานสรนารายณ์เพิ่มขึ้น ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์คอมโพสิตแสดงการยึดติดและการกระจายตัวที่ดีของสารหน่วงไฟและเส้นใยในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ การใส่เส้นใยแก้วไม่มีผลกระทบต่อค่าความหนืดของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยปานสรนารายณ์



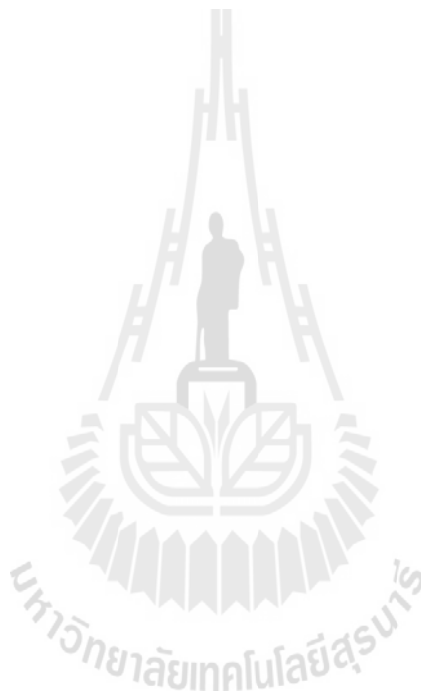
## บรรณานุกรม

- เอกสารแผนพัฒนาการผลิตป่านศรนารายณ์ ปี 2545-2549. กรมวิชาการเกษตร. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2545)
- Abu Bakar, M. B., Mohd Ishak, Z. A., Mat Taib, R., Rozman, H. D., and Mohamad Jani, S. (2010). Flammability and mechanical properties of wood flour filled polypropylene composites. J. Appl. Polym. Sci. 116: 2714-2722.
- Alberto, F., Hendrikus, C. L. A., and Giovanni, C. (2006). Metal functionalized POSS as fire retardant in polypropylene. Polym. Degrad. Stab. 91: 2275-2281.
- Arbelaiz, A., Fernandez, B., Cantero, G., Llano-Ponter, R., Valea, A., and Mondragon, I. (2005) Mechanical properties of flax fibre/polypropylene composites: Influence of fibre/matrix modification and glass fibre hybridization. Compos: Part A. 36: 1637-1644.
- Ashton, H. C. (2005). Fire retardants. In Xanthos, M. (Ed.). Functional Fillers for Plastics. Weinheim: Wiley-VCH.
- Doan, T. T. L., Gao, S. L., and Madar, E. (2006). Jute/polypropylene composites: Part I. Effect of matrix modification. Compos. Sci. Technol. 66: 952-963.
- Franz, A and Stein, W. (1975). Process for the manufacture of flame resistant laminates. US Patent 3,922,459.
- Georlette, P. (2001). Applications of halogen flame retardants. In Horrocks, A.R. and Price D. (Ed.). Fire Retardant Materials. New York: CRC Press.
- Gu, H. (2009). Tensile behaviours of the coir fibre and related composites after NaOH treatment. Mater. Design. 30: 3931-3934.
- Hendrickson, L and Connole, K. B. (1995). Review of stabilization of polyolefin insulated conductors. I: Theory and factors affecting stability. Polym. Eng. Sci. 35: 211-217.
- Hilaldo, C. J. (1998) Flammability Handbook for Plastics. Lancaster: Technomic Publishing Co, Inc.
- Jang, J. and Lee, E. (2001) Improvement of the flame retardancy of paper sluge/polypropylene composites. Polym. Test. 20: 7-13.
- Jarukumjorn, K and Suppakarn, N. (2009). Effect of glass fiber hybridization on properties of sisal fiber-polypropylene composites. Compos: Part B. 40: 623-627.

- Jeencham, R., Suppakarn, N., and Jarukumjorn, K. (2009) Effect of flame retardant on flammability and mechanical properties of polypropylene composites. In Proceeding of Pure and Applied Chemistry International Conference 2009. (pp 314-316). Phitsanulok, Thailand: Naresuan University.
- Jha, N. K., Misra, A. C., and Bajai, P. (1984). Flame-retardant additives for polypropylene. Macromol. Sci. Chem. 24: 69-116.
- Lee, S. Y., Kang, L. A., and Wu, Q. (2008). Thermal, mechanical and morphological properties of polypropylene/clay/wood flour nanocomposites. Polym. Lett. 2: 78-87.
- Li, B. and Xu, M. (2006). Effect of a novel charring-forming agent on flame retardancy and thermal degradation of intumescent flame retardant polypropylene. Polym. Degrad. Stab. 91: 1380-1386.
- Mareri, P., Bastide, S., Binda, N., and Crespy, A. (1998). Mechanical behaviour of polypropylene composites containing fine mineral filler: Effect of filler surface treatment. Compos. Sci. Technol. 58: 747-752.
- Matko, S., Toldy, A., Keszei, S., Anna, P., Bertalan, G., and Marosi, G. (2005). Flame retardancy of biodegradable polymer and biocomposites. Polym. Degrad. Stab. 88: 138-145.
- Obi, R. K., Uma, M. C., Jeevan, P. R. D., and Varada, R. A. (2009). Thermal properties of Napier grass fibers. Mater. Lett. 63: 2390-2392.
- Panthapulakkal, S. and Sain, M. (2007). Injection-molded short hemp fiber/glass fiber-reinforced polypropylene hybrid composites-Mechanical, water absorption and thermal properties. J. Appl. Polym. Sci. 103: 2432-2441.
- Paul, S. A., Boudenne, A., Ibos, L., Candau, Y., Joseph, K., and Thomas, S. (2008) Effect of fiber loading and chemical treatments on thermophysical properties of banana fiber/polypropylene commingled composite materials. Compos: Part A. 39: 1582-1588.
- Rana, A. K., Mandal, A., Mitra, B. C., Jacobson, R., Rowell, R., and Banerjee, A. N. (1998). Short jute fiber-reinforced polypropylene composites: Effect of compatibilizer. J. Appl. Polym. Sci. 69: 329-338.
- Rigolo, M. and Woodhams, R. T. (1992). Basic magnesium carbonate flame retardants for polypropylene. Polym. Eng. Sci. 32: 327-334.

- Rozman, H. D., Tay, G. S., Kumar, R. N., Abubak, A., Ismail, H., and Mohd Ishak, Z. A. (1999). Polypropylene hybrid composites: A preliminary study on the use of glass and coconut fiber as reinforcements in polypropylene composites. Polym. Plast. Technol. Eng. 38: 997-1011.
- Rozman, H. D., Tay, G. S., Kumar, R. N., Abusamah, A., Ismail, H., and Mohd. Ishak, Z. A. (2001). Polypropylene-oil palm empty fruit bunch-glass fibre hybrid composites: a preliminary study on the flexural and tensile properties. Eur. Polym. J. 37: 1283-1291.
- Sain, M. and Kokta, B. V. (1994). Polyolefin-wood filler composites I: Performance of m-phenylene bismaleimide-modified wood fiber in polypropylene composite. J. Appl. Polym. Sci. 54:1545-1559.
- Sain, M., Park, S. H., Suhara, F., and Law, S. (2004). Flame retardant and mechanical properties of natural fibre-PP composites containing magnesium hydroxide. Polym. Degrad. Stab. 83: 363-367.
- Sain, M., Suhara, P, Law, S. and Bouilloux, A. (2005) Interface modification and mechanical properties of natural fiber-polyolefin composite products. J. Reinf. Plast. Comp. 24: 121-130.
- Samyn, F., Bourbigot, S., Duquesne, S., and Delobel, R. (2007). Effect of zinc borate on the thermal degradation of ammonium polyphosphate. Therm. Acta. 456: 134-144.
- Schartel, B., Braun, U., Schwarz, U., and Reinmann, S. (2003). Fire retardancy of polypropylene/flax blends. Polymer. 44: 6241-6250.
- Schwarz, U., Pflug, G., and Reinemann, S. (2002). Polypropylene-flachs-compounds. Kunstst. Plast. Eur. 92: 93-94.
- Saheb, D. N. and Jog, J. P. (1999). Natural fiber polymer composites: a review. Adv. Polym. Technol. 18: 351-363.
- Sen, A. K., Mukherjee, B., and Bhowmick, K. (1991). Preparation and characterization of low halogen and nonhalogen fire resistant low smoke (FRLS) cable sheathing compound from blends of functionalized polyolefins and PVC. J. Appl. Polym. Sci. 43:1674-1684.
- Suppakarn, N. and Jarukumjorn, K. (2009). Mechanical properties and flammability of sisal/PP composites: Effect of flame retardant type and content. Compos: Part B. 40: 613-618.
- Suppakarn, N., Jarukumjorn, K., and Tananimit, S. (2008). Effect of flame retardant on mechanical properties and flammability of sisal/PP composites. Adv. Mater. Res. 47-50: 403-406.

- Thwe, M. M and Liao, K. (2003). Durability of bamboo-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites. Compos. Sci. Tech. 63: 375-387.
- Yang, H. S., Kim, H. J., Park, H. J., Lee B. J., and Hwang, T. S. (2007). Effect of compatibilizing agents on rice-husk flour reinforced polypropylene composites. Compos. Struct. 77: 45-55.
- Zanetti, M., Camino, G., and Wilkie, C. A. (2002). Fire retardant halogen-antimony-clay synergism in polypropylene layered silicate nanocomposites. Chem. Mater. 14: 189-193.
- Zhang, S. and Horrocks, A. R. (2003). A review of flame retardant polypropylene fibres. Prog. Polym. Sci. 28: 1517-1538.



## ประวัติผู้วิจัย

### หัวหน้าโครงการ

นางสาว กษมา จารุกัจฉา ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สถานที่ติดต่อ สาขาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000 การศึกษา พ.ศ. 2533 วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมี) เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง มหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ. 2536 วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์) มหาวิทยาลัยมหิดล และ พ.ศ. 2542 Ph.D. (Polymer Engineering) University of Akron, OH, USA สาขาวิชาการที่มีความสนใจ กระบวนการขึ้นรูปและตรวจสอบพอลิเมอร์ (polymer processing and characterization) และพอลิเมอร์ผสมและคอมโพสิต (polymer blend and composites) ผลงานทางวิชาการ ประกอบด้วย บทความทางวิชาการ 35 บทความ และรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ 8 ฉบับ

### ผู้ร่วมวิจัย

นางสาว นิธินาถ สุขกาญจน์ ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สถานที่ติดต่อ สาขาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000 การศึกษา พ.ศ. 2536 วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมี) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2538 วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์) วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ พ.ศ. 2542 Ph.D. (Macromolecular Science) University of Case Western Reserve, USA สาขาวิชาการที่มีความสนใจ การตรวจสอบพอลิเมอร์ (polymer characterization) และพอลิเมอร์คอมโพสิต (polymer composites) ผลงานทางวิชาการ ประกอบด้วย บทความทางวิชาการ 35 บทความ และรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ 8 ฉบับ