

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การพัฒนาไม้พลาสติกคอมโพสิตสูตรหน่วงการติดไฟ
จากพอลิพรอพิลีนและเส้นใยมะพร้าว

DEVELOPMENT OF WOOD PLASTIC COMPOSITES (WPCs)
MADE FROM POLYPROPYLENE/COIR TO IMPROVE
FLAME RETARDANT PROPERTY



T117286



นายเกียรติศักดิ์ จันทร์น้อย

นางสาวขวัญนภา แสงคำ

นางสาวสุติภัทร ทัพโฆหาญ

สงทป.....
เลขทะเบียน.....117286
วันเดือนปี..... 20 ก.ค. 2554

b..... 12 332 75A
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2553

**DEVELOPMENT OF WOOD PLASTIC COMPOSITES (WPCs)
MADE FROM POLYPROPYLENE/COIR TO IMPROVE
FLAME RETARDANT PROPERTY**



**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN INDUSTRIAL CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE**

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ACADEMIC YEAR 2010

หัวข้อโครงการพิเศษ

การพัฒนาไม้พลาสติกคอมโพสิตสูตรหน่วงการติดไฟ
จากพอลิพรอพิลีนและเส้นใยมะพร้าว

Development of Wood Plastic Composites (WPCs) made from
Polypropylene/Coir to Improve Flame Retardant Property

ชื่อนักศึกษา

นายเกียรติศักดิ์ จันทน์น้อย 50050292

นางสาวขวัญภา แสงคำ 50050293

นางสาวชุตติภัทร ทัพใจหาญ 50050305

ปริญญา

วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา

เคมีอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

อ.วรธรรม อุ้นจิตติชัย

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมี
อุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2553

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชาติ	
ผศ.ดร.ปทุมมา ศิริพันธ์โนน	
รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรที่ปฏิบัติงานในหน่วยงานที่เกี่ยวข้องไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การพัฒนาไม้พลาสติกคอมโพสิตสูตรหน่วงการติดไฟ	
	จากพอลิพรอพิลีนและเส้นใยมะพร้าว	
ชื่อนักศึกษา	นายเกียรติศักดิ์	จันทร์น้อย
	นางสาวขวัญณา	แสงคำ
	นางสาวชุตติภัทร	ทัพใจหาญ
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต	
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม	
ปีการศึกษา	2553	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.อิทธิพล	แจ้งชัด
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อ.วรธรรม	อุ้นจิตติชัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาไม้พลาสติกคอมโพสิต (Wood Plastic Composites, WPCs) สูตรหน่วงการติดไฟ จากพอลิพรอพิลีนและเส้นใยมะพร้าวเบอร์ 2 (ขนาด 20 – 50 mesh) อัตราส่วน 50:50 (โดยน้ำหนัก) โดยทำการศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารหน่วงไฟชนิดต่างๆ ได้แก่ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Al(OH)₃, ATH) ปริมาณ 30 – 60 ส่วนโดยร้อยละของพอลิเมอร์ (php), แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Mg(OH)₂, MGH) 30 – 60 php, สารประกอบฟอสเฟต (Phosphate) 20 – 30 php และซิงค์บอเรต (ZnB) 4 – 10 php รวมทั้งศึกษาผลของปรากฏการณ์ซินเนอจิสติก (Synergistic effect) ในการหน่วงการติดไฟ โดยทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) จากนั้นขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (compression molding machine) แล้วนำไปทดสอบสมบัติการลามไฟแบบแนวนอน (Horizontal burning test) และทดสอบสมบัติอื่นๆ ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อนและสัณฐานวิทยา จากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารหน่วงไฟแต่ละชนิดจนถึงปริมาณสูงสุดที่ศึกษาส่งผลให้การลามไฟของ WPCs ช้าลง แต่ไม่สามารถทำให้ WPCs ดับไฟได้ด้วยตัวเอง โดย ATH และ MGH ที่ปริมาณ 60 php, Phosphate 25 php และ ZnB 10 php มีผลทำให้อัตราการเผาไหม้ของ WPCs ช้าลงจาก 1.114 in/min เป็น 0.685, 0.634, 0.491 และ 0.873 in/min ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การลามไฟที่ช้าลง 35.8, 43.1, 55.9 และ 21.6 % ตามลำดับ และในการศึกษาผลของปรากฏการณ์ซินเนอจิสติกต่อสมบัติของการหน่วงไฟ พบว่า WPCs ที่มี ATH ผสม ZnB (60+10 php) มีอัตราการเผาไหม้น้อยที่สุดคือ 0.483 in/min (เปอร์เซ็นต์การลามไฟที่ช้าลง 56.6 %) จากการศึกษสมบัติต่างๆ ของพลาสติกคอมโพสิตที่ผลิตได้พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารหน่วงไฟมากขึ้น ทำให้ไม้พลาสติกคอมโพสิตมีความแข็งแรง โค้งงอลดลง ขณะที่ค่ามอดุลัสโค้งงอ ความแข็งกดและความหนาแน่นของ WPCs มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณสารหน่วงไฟมากขึ้นทำให้ไม้พลาสติกคอมโพสิตมีองค์ความเป็นผลึกลดลง จากรูป SEM พบว่า สารหน่วงไฟส่วนใหญ่มีการกระจายตัวได้ดีในไม้พลาสติกคอมโพสิต

Title	Development of Wood Plastic Composites (WPCs) made from Polypropylene/Coir to Improve Flame Retardant Property	
Students	Kiattisak	Chonnoi
	Kwannapa	Saengkham
	Chuthipach	Thapjaihan
Degree	Bachelor of Science	
Major Program	Industrial Chemistry	
Academic Year	2010	
Advisor	Assoc.Prof. Dr.Ittipol Jangchud	
Co-Advisor	Mr.Woratham Oonjittichai	

ABSTRACT

In this research work, wood plastic composites (WPCs) with flame retardancy were studied. The WPCs were made from polypropylene (PP) and coconut coir fibers (20-50 mesh) (50:50 weight ratio). Both types and % loadings of flame retardants were investigated including aluminium hydroxide (ATH) at 30 – 60 part per hundreds of polymer (php), magnesium hydroxide (MGH) at 30 – 60 php, phosphate compound (Phosphate) at 20 – 30 php and zinc borate (ZnB) at 4 – 10 php. Synergistic effect of flame retardant was also studied. WPC samples were compounded by two-roll mill and then shaped by compression molding machine. Horizontal burning test was used to evaluate flame retardant property. Mechanical, physical, thermal and morphological properties of the WPCs were also characterized. It was found that burning rates of WPCs were reduced as the flame retardant loading was increased. However, at the maximum loading of each flame retardant, self – extinguishing property of the WPCs cannot be achieved. 60 php ATH, 60 php MGH, 25 php Phosphate and 10 php ZnB seemed to be the optimum loading of each flame retardant yielding a decrease in burning rate from 1.114 in/min to 0.685, 0.634, 0.491 and 0.873 in/min (or 35.8, 43.1, 55.9 and 21.6 % decrease in burning rate), respectively. In the study of synergistic effect, it was found that ATH 60 php mixed with ZnB 10 php showed the least burning rate (i.e. 0.483 in/min or 56.6 % decrease in burning rate). As expected, addition of each flame retardant yielded a decrease in flexural strength, but increase in flexural modulus, hardness and density of WPCs. Degree of crystallinity of PP in WPCs was

decreased when the flame retardants were incorporated. From SEM micrographs, flame retardants were dispersed well in the WPCs. และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด เป็นอย่างสูงสำหรับการเอาใจใส่ดูแล ให้คำปรึกษา พร้อมทั้งให้การช่วยเหลือในการแก้ปัญหาต่างๆ จนโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

ขอขอบพระคุณ อ.วราธรรม อุ๋นจิตติชัย และสำนักวิจัยการจัดการป่าไม้และผลิตผลป่าไม้ กรมป่าไม้ ที่ได้สละเวลาให้ความรู้ และให้คำแนะนำในรายละเอียดต่างๆเกี่ยวกับโครงการวิจัย

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ปทุมมา ศิริพันธ์ โนน และ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ์ ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบโครงการพิเศษ รวมทั้งให้ข้อเสนอแนะในการดำเนินงานวิจัยและการแก้ไขปรับปรุง รูปเล่มโครงการพิเศษให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ นางสาวกนกอร แสงสุวรรณ ที่ให้ความรู้และให้คำแนะนำในรายละเอียดต่างๆเกี่ยวกับโครงการวิจัย

ขอขอบพระคุณ บริษัท MBJ Enterprise จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เรื่องเส้นใยมะพร้าวที่ใช้ในโครงการวิจัย

ขอขอบพระคุณ บริษัท Behn Mayer Chemical (Thailand) จำกัดและบริษัท Global Connections Publishing จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เรื่องสารหน่วงไฟที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ที่อำนวยความสะดวก และให้คำปรึกษาในการใช้เครื่องมือต่างๆ รวมทั้งช่วยแก้ปัญหาตลอดการดำเนินงาน

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณครอบครัวที่ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจจนโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูปภาพ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สัญลักษณ์และคำย่อ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ไม้พลาสติกคอมโพสิต (Wood Plastic Composites, WPCs)	5
- การนำไม้พลาสติกคอมโพสิตไปใช้งาน	8
2.2 วัสดุประกอบหรือคอมโพสิต (Composites)	8
2.2.1 ความหมายของวัสดุประกอบหรือคอมโพสิต	8
2.2.2 ข้อดีและข้อเสียของคอมโพสิต	10
2.3 พอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composites)	11
2.3.1 พอลิเมอร์เมทริกซ์ (Polymer matrices)	11
2.3.2 ส่วนเส้นใยเสริมแรง (Fiber reinforcement)	13
2.4 เส้นใยธรรมชาติ (Natural Fibers)	14
2.4.1 ลักษณะของเส้นใยธรรมชาติ	14
2.4.2 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ	15
2.4.2.1 เซลลูโลส (Cellulose)	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)	17
2.4.2.3 ลิกนิน (Lignin)	17
2.5 การพัฒนาเส้นใยธรรมชาติเพื่อในอุตสาหกรรม	19
2.6 เส้นใยมะพร้าว (Coconut fiber or Coir)	20
2.7 พอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP)	21
2.7.1 ลักษณะและสมบัติของพอลิพรอพิลีน	23
2.7.2 การประยุกต์ใช้งาน	23
2.8 สารเติมแต่งพอลิเมอร์ (Polymer Additives)	24
2.8.1 สารคงเสถียรภาพ (Stabilizers)	26
2.8.2 สารตัวเติม (Fillers)	26
2.8.3 สารพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers)	27
2.8.4 สารช่วยผสม (Compatibilizers)	27
2.8.5 สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids)	28
2.8.6 สารหน่วงการติดไฟ (Flame retardants)	28
2.8.6.1 ประเภทของสารหน่วงการติดไฟ	30
2.8.6.2 กลไกของสารหน่วงการติดไฟ	31
2.8.6.3 วิธีการทดสอบการเผาไหม้	32
2.9 การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	36
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์	44
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	47
3.3 วิธีการทดลอง	48
3.3.1 วิธีการผลิตเส้นใยมะพร้าวด้วยวิธีทางเชิงกล (Mechanical Pulp; MP)	48
3.3.2 การเตรียมเส้นใยมะพร้าว	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ตอนที่ 1 ศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารหน่วงไฟที่เหมาะสมในการหน่วงไฟ	49
ตอนที่ 2 ศึกษาผลของปรากฏการณ์ซินเนอจิสติกต่อสมบัติของการหน่วงไฟ	50
ตอนที่ 3 ศึกษาสมบัติต่างๆ ของพลาสติกคอมโพสิตที่ผลิตได้	51
3.4 การทดสอบสมบัติต่างๆ	52
3.4.1 สมบัติการลามไฟ	52
3.4.2 สมบัติเชิงกล	52
3.4.2.1 ความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอ	52
3.4.2.2 ความแข็งแรงกระแทก	53
3.4.2.3 ความแข็งกด	54
3.4.3 สมบัติทางกายภาพ	54
- ความหนาแน่น (Density)	55
3.4.4 สมบัติทางความร้อน	55
- Differential Scanning Calorimetry (DSC)	55
3.4.5 สัณฐานวิทยา	56
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	
4.1 ผลการศึกษาของชนิดและปริมาณของสารหน่วงไฟที่เหมาะสมในการหน่วงไฟ	57
4.1.1 ศึกษาปริมาณของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (ATH)	57
4.1.2 ศึกษาปริมาณของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (MGH)	58
4.1.3 ศึกษาปริมาณของสารประกอบฟอสเฟต (Phosphate)	60
4.1.4 ศึกษาปริมาณของซิงค์บอเรต (ZnB)	61
4.2 ผลการศึกษาของปรากฏการณ์ซินเนอจิสติกต่อสมบัติของการหน่วงไฟ	62
4.3 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของพลาสติกคอมโพสิตที่ผลิตได้	64
4.3.1 ศึกษาค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength)	64
4.3.2 ศึกษาค่ามอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus)	66
4.3.3 ศึกษาค่าความแข็งกด (Hardness)	67
4.3.4 ศึกษาค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength)	68
4.4 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของพลาสติกคอมโพสิตที่ผลิตได้	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนของพลาสติกคอม โพลิตที่ผลิตได้	70
4.6 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของพลาสติกคอม โพลิตที่ผลิตได้	71
4.7 การวิเคราะห์ต้นทุน	77
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	78
5.2 ข้อเสนอแนะ	79
เอกสารอ้างอิง	80
ภาคผนวก	84
ภาคผนวก ก เอกสารข้อมูลของพอลิพรอพิลีน	85
ภาคผนวก ข เอกสารข้อมูลของสารหน่วงไฟแต่ละชนิด	86
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของไม้พลาสติกคอม โพลิตที่ผลิตได้ในแต่ละสูตร	95
ภาคผนวก ง DSC Thermalgram ของพอลิพรอพิลีนผสมเส้นใยมะพร้าวที่อัตราส่วนทุกสูตร	96
ภาคผนวก จ ผลการเปรียบเทียบอัตราส่วนผสมของสารหน่วงไฟในไม้พลาสติกคอม โพลิต	100
ภาคผนวก ฉ ตารางเปอร์เซ็นต์การลามไฟที่ช้าลงของชนิดและปริมาณของสารหน่วงไฟ	101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปรภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะการเชื่อมสภาพของทั้งไม้และพลาสติก	5
2.2 ลักษณะของเม็คคอมปาวด์พลาสติกผสมผงไม้	6
2.3 กระบวนการการผลิตและการนำไปใช้งานของไม้ประกอบพลาสติก	7
2.4 ลักษณะการคอมโพสิตของส่วนเสริมแรงแต่ละประเภท	9
2.5 ประเภทของวัสดุคอมโพสิต โดยแบ่งตามลักษณะของส่วนเสริมแรง	10
2.6 โครงสร้างการจัดเรียงตัวของเทอร์โมพลาสติก	12
2.7 โครงสร้างการจัดเรียงตัวของเทอร์โมเซต	12
2.8 ตัวอย่างคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงในลักษณะต่างกัน	13
2.9 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส	15
2.10 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส	17
2.11 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน	18
2.12 การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในไม้	18
2.13 โครงสร้างทางเคมีของพอลิพรอพิลีน	21
2.14 โครงสร้างของไอโซแทคติกพอลิพรอพิลีน	22
2.15 โครงสร้างของไอโซแทคติกพอลิพรอพิลีน	22
2.16 โครงสร้างของอะแทคติกพอลิพรอพิลีน	23
2.17 ผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ผลิตได้จากพอลิพรอพิลีน	24
2.18 การเกิดปฏิกิริยาของเส้นใยเซลลูโลสที่ทำการปรับสภาพด้วย MAPP	28
2.19 กระบวนการเผาไหม้ของวัสดุ	29
2.20 ลักษณะการเผาไหม้ชิ้นงานทดสอบของแต่ละประเภท	33
2.21 ลักษณะการจัดอุปกรณ์สำหรับการทดสอบการเผาไหม้แบบแนวนอน	34
2.22 ลักษณะการเปรียบเทียบข้อแตกต่างในการจัดอุปกรณ์สำหรับ ทดสอบการเผาไหม้แบบ 94-V และ 94-VTM	35
2.23 การทดสอบการเผาไหม้ด้วยวิธีดัชนีออกซิเจน	36
3.1 ลักษณะการทดสอบความแข็งแรงและมอดุลัสโค้งงอ	53
3.2 ขนาดชิ้นงานที่ใช้ทดสอบด้วยมาตรฐานแบบไอโซด	54
3.3 วิธีการวัดความกว้าง ความยาวของชิ้นทดสอบ	55
4.1 อัตราการเผาไหม้ของไม้พลาสติกคอมโพสิตที่ผสม อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปร่าง (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 อัตราการเผาไหม้ของไม้พลาสติกคอมโพสิตที่ผสม อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ	59
4.3 อัตราการเผาไหม้ของไม้พลาสติกคอมโพสิตที่ผสม สารประกอบฟอสเฟตที่ปริมาณต่างๆ	60
4.4 อัตราการเผาไหม้ของไม้พลาสติกคอมโพสิตที่ผสม ซิงค์บอเรตที่ปริมาณต่างๆ	61
4.5 อัตราการเผาไหม้ของไม้พลาสติกคอมโพสิตที่ศึกษา สมบัติปรากฏการณ์ขึ้นเนอจิสติกในแต่ละสูตร	62
4.6 ค่าความแข็งแรงโค้งงอของวัสดุคอมโพสิตในแต่ละสูตร	65
4.7 ค่ามอดูลัสโค้งงอของวัสดุคอมโพสิตในแต่ละสูตร	66
4.8 ค่าความแข็งกด (Hardness) ของวัสดุคอมโพสิตในแต่ละสูตร	67
4.9 ค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ของวัสดุคอมโพสิตในแต่ละสูตร	68
4.10 SEM Micrograph ของ WPCs ระหว่าง PP/Coir ในอัตราส่วน 50:50 ที่ไม่ได้เติมสารหน่วงไฟที่กำลังขยาย (ก) 100 เท่า และ (ข) 500 เท่า	71
4.11 SEM Micrograph ของ WPCs ระหว่าง PP/Coir ในอัตราส่วน 50:50 ที่มี ATH (60 php) เป็นสารหน่วงไฟที่กำลังขยาย (ก) 100 เท่าและ (ข) 500 เท่า	72
4.12 SEM Micrograph ของ WPCs ระหว่าง PP/Coir ในอัตราส่วน 50:50 ที่มี ATH + ZnB (60+10 php) เป็นสารหน่วงไฟที่กำลังขยาย (ก) 100 เท่าและ (ข) 500 เท่า	72
4.13 SEM Micrograph ของ WPCs ระหว่าง PP/Coir ในอัตราส่วน 50:50 ที่มี MGH (60 php) เป็นสารหน่วงไฟที่กำลังขยาย (ก) 100 เท่าและ (ข) 500 เท่า	73
4.14 SEM Micrograph ของ WPCs ระหว่าง PP/Coir ในอัตราส่วน 50:50 ที่มี MGH + ZnB (60+10 php) เป็นสารหน่วงไฟที่กำลังขยาย (ก) 100 เท่าและ (ข) 500 เท่า	74
4.15 SEM Micrograph ของ WPCs ระหว่าง PP/Coir ในอัตราส่วน 50:50 ที่มี Phosphate (25 php) เป็นสารหน่วงไฟที่กำลังขยาย (ก) 100 เท่าและ (ข) 500 เท่า	74
4.16 SEM Micrograph ของ WPCs ระหว่าง PP/Coir ในอัตราส่วน 50:50 ที่มี Phosphate + ZnB75 (25+10 php) เป็นสารหน่วงไฟที่กำลังขยาย (ก) 100 เท่าและ (ข) 500 เท่า	74
4.17 SEM Micrograph ของ WPCs ระหว่าง PP/Coir ในอัตราส่วน 50:50 ที่มี ZnB (10 php) เป็นสารหน่วงไฟที่กำลังขยาย (ก) 100 เท่าและ (ข) 500 เท่า	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบลักษณะเด่นของไม้พลาสติกกับไม้และพลาสติก	7
2.2 ข้อดีและข้อเสียของเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์	20
2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยมะพร้าว	21
2.4 ลักษณะความสามารถในการติดไฟของวิธีการทดสอบแต่ละชนิด	35
2.5 สูตรผสมในการทดลอง	36
3.1 ข้อมูลของพอลิพรอพิลีน Moplen [®] EP300H ที่ใช้ในการทดลอง	45
3.2 ข้อมูลของสารประกอบฟอสเฟต (ZURAN [®] 484) ที่ใช้ในการทดลอง	45
3.3 ข้อมูลของซิงค์บอเรต (Firebrake [®] ZB) ที่ใช้ในการทดลอง	45
3.4 ข้อมูลของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (APYRAL 40CD) ที่ใช้ในการทดลอง	46
3.5 ข้อมูลของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (APYMAG 40S) ที่ใช้ในการทดลอง	46
3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเส้นใยกับขนาดของตะแกรงร่อน	48
3.7 สูตรผสมที่ใช้ในการทดลอง (ตอนที่ 1)	49
3.8 สูตรผสมที่ใช้ในการทดลอง (ตอนที่ 2)	50
3.9 สูตรผสมที่ใช้ในการทดลอง (ตอนที่ 3)	51
3.10 มาตรฐานต่างๆ ในการทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต	52
4.1 เปรอ์เซ็นต์ของพอลิพรอพิลีนกับสารตัวเติมในแต่ละสูตร	64
4.2 ความหนาแน่นของพลาสติกคอมโพสิตแต่ละสูตร	69
4.3 สมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิตแต่ละสูตร	70
4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบของไม้พลาสติกคอมโพสิต 1 กิโลกรัม	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

PP	หมายความว่า	พอลิพรอพิลีน (Polypropylene)
เส้นใยมะพร้าวเบอร์ 2	หมายความว่า	เส้นใยมะพร้าว เบอร์ 2 ขนาด 20-50 mesh
PP-g-MA	หมายความว่า	พอลิพรอพิลีนที่ต่อกิ่งมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Polypropylene graft maleic anhydride)
WPCs	หมายความว่า	ไม้พลาสติกคอมโพสิต (Wood Plastic Composites)
Control (No FR)	หมายความว่า	ไม้พลาสติกคอมโพสิตผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับเส้นใยมะพร้าว ในอัตราส่วน 50:50 โดยที่ไม่เติมสารหน่วงไฟ
ZnB	หมายความว่า	ซิงค์โบเรต (Zinc Borate)
ATH	หมายความว่า	อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminium Hydroxide)
MGH	หมายความว่า	แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Magnesium Hydroxide)
สารประกอบ Phosphate	หมายความว่า	ไพโรฟอสฟอริกแอซิด ซอลท์ (Pyrophosphoric acid salt)
DSC	หมายความว่า	Differential Scanning Colorimetry
T_m	หมายความว่า	อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (Melt Temperature)
T_c	หมายความว่า	อุณหภูมิการตกผลึก (Crystallization Temperature)
X_c	หมายความว่า	องศาความเป็นผลึก (Degree of Crystallization)
SEM	หมายความว่า	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)
php	หมายความว่า	ส่วนโดยร้อยละของพอลิเมอร์ (โดยน้ำหนัก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย

ป่าไม้ นับเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่สำคัญมากของประเทศ เป็นแหล่งเก็บกักคาร์บอนและแหล่งที่อยู่อย่างถาวร ซึ่งมนุษย์ได้รับประโยชน์จากป่าไม้ทั้งทางตรงและทางอ้อม ไม่ว่าจะเป็นวัสดุในการก่อสร้างบ้านเรือน เครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ เป็นแหล่งอาหาร ยารักษาโรค ตลอดจนใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น กระดาษ สี เป็นต้น ทำให้ไม้เป็นวัสดุที่มีการนำไปใช้ประโยชน์มากชนิดหนึ่ง แต่ด้วยปัจจุบันจำนวนประชากรของประเทศที่เพิ่มมากขึ้นและความต้องการอุปโภคผลิตภัณฑ์จากไม้ที่ไม่สิ้นสุด ทำให้ปริมาณไม้ที่มีในประเทศมีจำนวนลดน้อยลงและไม่เพียงพอต่อความต้องการ ก่อให้เกิดปัญหาการตัดไม้ทำลายป่า ปัญหาความต้องการและการตอบสนองต่อความต้องการในแง่ของการใช้ไม้ไม่สมดุลกันและปัญหาอื่นๆ ตามมา เช่น ปัญหาการขาดแคลนน้ำ อุทกภัย ปัญหาขาดความสมดุลทางธรรมชาติ และปัญหาป่าเสื่อมโทรม เป็นต้น

แนวทางการแก้ไขปัญหาดังกล่าววิธีหนึ่ง คือ การผลิตไม้พลาสติกคอมโพสิต (Wood Plastic Composites, WPCs) หรือไม้พลาสติก เพื่อทดแทนการใช้ไม้เพียงอย่างเดียว ช่วยลดปัญหาการขาดแคลนไม้ และการตัดไม้ทำลายป่าที่เพิ่มมากขึ้น โดยที่ไม้พลาสติกที่ดีควรมีลักษณะภายนอกเหมือนหรือคล้ายกับวัสดุไม้ทุกประการ เช่น น้ำหนักเบา มีความแข็งแรง ทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศได้เป็นอย่างดี สามารถตากด้วยตะปูหรือตัดด้วยเลื่อยได้ และมีอายุการใช้งานยาวนาน เป็นต้น ซึ่งไม้พลาสติกจัดว่าเป็น “พอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composites)” อย่างหนึ่ง ประกอบด้วยวัสดุสองชนิด คือ วัสดุส่วนที่เป็นพอลิเมอร์ (Polymer matrix) และวัสดุส่วนที่เป็นวัสดุเสริมแรง (Reinforcement)

พอลิเมอร์จัดเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่มีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์ นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ปัจจุบันมีการพัฒนาปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ให้มีคุณภาพและสมบัติที่ดียิ่งขึ้น ช่วยลดต้นทุนการผลิต และเหมาะสมกับการใช้งานในรูปแบบหรือสภาวะต่างๆ ได้ดีขึ้น โดยการทำพอลิเมอร์คอมโพสิต ซึ่งในโครงการพิเศษนี้ใช้พอลิพรอพิลีน (Polypropylene) เป็นเมทริกซ์ เนื่องจากในขณะนี้มีการใช้พอลิพรอพิลีนอย่างแพร่หลายทำให้เกิดโรงงานที่ทำการผลิตที่ตั้งอยู่ภายในประเทศจำนวนมากขึ้นกว่าในอดีต เป็นผลให้ราคาในท้องตลาดลดลงและเมื่อนำไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายได้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีน (Polyethylene) แล้ว พบว่า พอลิพรอพิลีนมีสมบัติในด้านการรับแรงหรือน้ำหนักที่ดีกว่า ส่วนในด้านเส้นใยเสริมแรงนั้น ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers) มาใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงในพอลิเมอร์คอมโพสิต ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยสังเคราะห์ที่เคยใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงในพอลิเมอร์คอมโพสิตมีราคาแพง ต้องใช้เวลาในการตั้งเคราะห์นาน และไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ ผนวกกับเส้นใยธรรมชาติที่มีข้อดีหลายประการดังนี้

- เส้นใยบางชนิดเป็นของเหลือใช้ มีราคาถูก ทำให้สามารถใช้ลดต้นทุนการผลิตได้
- เส้นใยมีความหนาแน่นต่ำ ทำให้มีน้ำหนักเบา
- หาง่าย เพราะเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ มีให้เลือกใช้ได้หลายชนิดไม่หมดสิ้น
- เส้นใยมีสมบัติเชิงกลดี บางชนิดมีความแข็งแรงและค่ามอดุลัสสูง
- ช่วยกำจัดและลดกากของเสียจากเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม
- สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพและไม่เป็นปัญหาในการกำจัด

ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดแนวความคิดที่จะนำเส้นใยธรรมชาติมาช่วยปรับปรุงสมบัติและคุณภาพของพอลิเมอร์ ซึ่งเส้นใยธรรมชาติที่ใช้ในโครงการพิเศษนี้คือเส้นใยมะพร้าว (Coir fiber) เนื่องจากในอุตสาหกรรมผลิตที่นอน หรือเบาะรถยนต์ ฯลฯ จะมีเศษเส้นใยมะพร้าวที่ใช้ประโยชน์ต่อไม่ได้เหลือในปริมาณมาก จึงได้นำเส้นใยมะพร้าวส่วนนี้มาใช้ในโครงการพิเศษ โดยนำทั้งสองส่วนมาทำเป็นพอลิเมอร์คอมโพสิตซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์ไม้พลาสติกมีสมบัติที่ดีกว่าบางประการ[1] คือ

- มีน้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ
- มีความแข็งแรงและค่ามอดุลัสจำเพาะหรือมอดุลัสต่อน้ำหนัก (Specific strength and Specific modulus) สูง
- มีอายุการใช้งานยาวนาน ไม่ผุกร่อนง่าย และไม่ถูกทำลายด้วยแมลง เช่น มอด ปลวก เป็นต้น
- มีสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลที่ดี ดูดซึมน้ำได้น้อยกว่าไม้
- สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ง่าย จากกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์เช่น การอัดรีด (Extrusion) การฉีดขึ้นรูป (Injection molding) เป็นต้น
- สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้หลากหลายลักษณะและง่ายต่อการใส่ประกอบกับวัสดุอื่น (Insertion)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สามารถนำเศษเหลือใช้จากกระบวนการผลิตกลับมาใช้ใหม่ได้ (Recycle)

อย่างไรก็ดี การใช้ประโยชน์ของเส้นใยธรรมชาติในปัจจุบันยังไม่ประสบความสำเร็จในเชิงอุตสาหกรรมเท่าที่ควร เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีข้อจำกัดบางประการที่ต้องปรับปรุงให้มีสมบัติที่ดีขึ้น คือ

- เส้นใยธรรมชาติมีความสามารถในการยึดเกาะกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ต่ำ เป็นเหตุให้มีสมบัติบางประการต่ำลง เช่น สมบัติเชิงกล
- เส้นใยธรรมชาติดูดซับน้ำสูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์ ทำให้คอมโพสิตเส้นใยธรรมชาติดูดซับน้ำได้สูงกว่าคอมโพสิตเส้นใยสังเคราะห์และพอลิเมอร์
- เส้นใยธรรมชาติขาดความสม่ำเสมอของเส้นใยแต่ละเส้นอาจมีขนาดและความยาวที่ไม่เท่ากัน

และที่สำคัญเส้นใยธรรมชาติมีความไวต่อการลุกไหม้ของเปลวไฟได้ง่าย (Flammable sensibility) จึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ไม้พลาสติกคอมโพสิตต้องมีการเพิ่มประสิทธิภาพการหน่วงการติดไฟไปพร้อมๆ กับการพัฒนาและปรับปรุงสมบัติในด้านอื่นๆ ด้วย โดยเฉพาะการประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้าง

เพราะฉะนั้น ไม้พลาสติกที่สามารถหน่วงการติดของเปลวไฟได้จึงมีความสำคัญทั้งในด้านของความปลอดภัย อุตสาหกรรมและประสิทธิภาพในการใช้งานมากขึ้นในปัจจุบัน โครงการวิจัยนี้จึงเป็นการพัฒนาไม้พลาสติกคอมโพสิตสูตรหน่วงการติดไฟเพื่อนำไปเพิ่มประสิทธิภาพการหน่วงไฟและสมบัติเชิงกลของไม้พลาสติกคอมโพสิต

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาถึงปัจจัยบางประการที่มีผลต่อไม้พลาสติกจากพอลิพรอพิลีนผสมเส้นใยมะพร้าว สูตรหน่วงการติดไฟ ได้แก่ ผลของชนิดและปริมาณสารหน่วงการติดไฟ
2. เพื่อศึกษาถึงสมบัติต่างๆ ของไม้พลาสติกจากพอลิพรอพิลีนผสมเส้นใยมะพร้าว สูตรหน่วงการติดไฟที่เตรียมได้ ได้แก่ สมบัติการลามไฟ สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารหน่วงไฟที่เหมาะสมในการหน่วงการติดไฟ โดยสารที่ใช้ในการศึกษาในโครงการวิจัยนี้ได้แก่ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) ซึ่งศึกษาในปริมาณ 30 – 60 php, ซิงค์บอเรต (ZnB) ซึ่งศึกษาในปริมาณ 4 – 10 php และสารประกอบฟอสเฟต (Phosphate compounds) ซึ่งศึกษาในปริมาณ 20 - 30 php
2. ศึกษาผลของปรากฏการณ์ซินเนอจิสติก (Synergistic effect) ในการหน่วงการติดไฟระหว่างซิงค์บอเรตกับอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์, แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์หรือสารประกอบฟอสเฟต
3. ศึกษาสมบัติต่างๆ ของไม้พลาสติกที่เตรียมได้จากพอลิพรอพิลีนผสมกับเส้นใยมะพร้าว เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกายภาพ และสัณฐานวิทยา

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถทราบสูตรและผลิตไม้พลาสติกจากพอลิเมอร์และเส้นใยมะพร้าวที่มีสมบัติการหน่วงไฟได้และมีสมบัติเชิงกลที่ดี สามารถประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับไม้ เช่น เฟอร์นิเจอร์ ไม้ปาร์เก้ แผ่นไม้กรอบหน้าต่าง ประตู ส่วนประกอบรถยนต์ อุปกรณ์กีฬา ฝาเพดาน ฯลฯ เพื่อทดแทนไม้จากธรรมชาติหรือคอมโพสิตเส้นใยสังเคราะห์ที่นำเข้าจากต่างประเทศ
2. สามารถเพิ่มประโยชน์การใช้สอยและมูลค่าของเส้นใยมะพร้าว รวมถึงส่งเสริมให้เกิดอุตสาหกรรมพอลิเมอร์คอมโพสิตจากเส้นใยธรรมชาติในประเทศได้
3. เป็นบริการความรู้แก่ภาคธุรกิจ โดยสามารถนำผลงานวิจัยไปใช้พัฒนาและนำไปสู่การผลิตในเชิงพาณิชย์และอุตสาหกรรมได้
4. สามารถนำความรู้ที่ได้ในการประยุกต์ใช้กับไม้พลาสติกชนิดอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

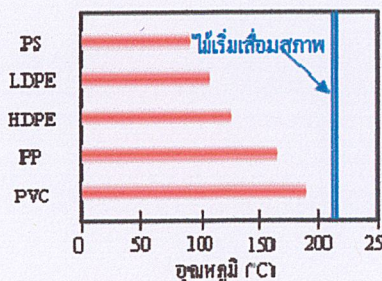
2.1 ไม้พลาสติกคอมโพสิต (Wood Plastic Composites, WPCs)[2]

ไม้พลาสติกคอมโพสิต (Wood Plastic Composites, WPCs) หรือเรียกสั้นๆว่า “ไม้พลาสติก” คือ วัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composites) ที่สังเคราะห์ขึ้นซึ่งมีลักษณะคล้ายกับไม้เกือบทุกประการ แต่เกิดจากกระบวนการผสมระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับพลาสติก สามารถใช้งานได้เหมือนกับไม้จริง กล่าวคือ สามารถนำไปใช้กับทุกส่วนของงานก่อสร้าง โดยใช้อุปกรณ์และเครื่องมือเกี่ยวกับการก่อสร้างเช่นเดียวกับงานไม้ เช่น เลื่อย เจาะ ตอกตะปู ทำลวดลายไม้ เป็นต้น ซึ่งสามารถนำมาใช้งานได้หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็น ไม้เนื้อแข็ง ไม้เนื้ออ่อน ไม้สำหรับปูพื้นบ้าน ไม้ปูพื้นริมสระน้ำ ไม้ระแนงกันสาด ไม้รั้ว ไม้ฝา ไม้สำหรับงานภายใน-ภายนอก ไม้สำหรับทำเฟอร์นิเจอร์

ไม้พลาสติกถือได้ว่าเป็นการนำเอาองค์ความรู้ของทั้งวงการไม้และวงการพลาสติกมาประสานรวมกัน ทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ ซึ่งสามารถถือได้ว่าเป็นวัสดุทางวิศวกรรมได้อีกชั้นหนึ่ง ในมุมมองทางด้านวิศวกรรมวัสดุ โดยจะแบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ส่วนคือ โครงสร้าง (Structure) กระบวนการผลิต (Processing) สมบัติ (Properties) และสมรรถนะ (Performance)

1. โครงสร้าง (Structure)

โครงสร้างของทั้งไม้และพลาสติกจัดเป็นวัสดุประเภทพอลิเมอร์เช่นเดียวกัน แต่ต่างกันตรงที่ไม้เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ ในขณะที่พลาสติกเป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ ทำให้ไม่สามารถควบคุมสมบัติของไม้ให้เป็นไปตามต้องการเช่นพลาสติก แต่สามารถทำกับไม้พลาสติกได้



ภาพแสดงชั้นต่างๆ ของต้นไม้

เอกสารนี้ รูปที่ 2.1 อุณหภูมิในการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆและของไม้ และชั้นต่างๆของไม้[2] ราคา

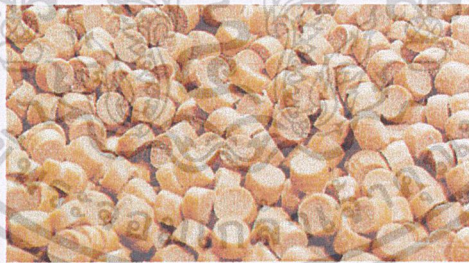
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของพลาสติก มีหลายชนิดแบ่งตามชนิดและรูปแบบการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุล เนื่องจากพลาสติกแต่ละชนิดมีโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกันจึงทำให้มีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีต่างกันไปด้วย ในการเลือกใช้พลาสติกที่จะนำมาใช้ประกอบกับไม้ นั้นนอกจากจะต้องคำนึงถึงสมบัติที่ต้องการแล้วยังต้องคำนึงถึงความเป็นไปได้ในการผลิต และความเข้ากันได้ระหว่างไม้กับพลาสติกอีกด้วย

โครงสร้างของไม้ เป็นวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากโครงสร้างของไม้ประกอบขึ้นจากเซลล์เนื้อไม้ที่มีรูปร่างหลากหลายกระจายเรียงตัวเป็นชั้นๆ แต่ละชั้นมีสมบัติต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของเซลล์ ความอุดมสมบูรณ์ของน้ำ อาหาร แสงแดดและสภาวะแวดล้อมต่างๆ ที่ดินไม้ นั้นได้รับขณะที่ทำการสร้างเซลล์นั้นๆ และเนื่องจากเนื้อเยื่อของต้นไม้แต่ละชั้น ไม่เหมือนกันนี้เอง จึงทำให้มีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีแตกต่างกันไป

2. กระบวนการผลิต (Processing)

รายละเอียดและขั้นตอนในการผลิตไม้ประกอบพลาสติกตลอดจน การเตรียมวัตถุดิบที่ใช้ นั้น จะขึ้นอยู่กับวิธีการขึ้นรูปที่เลือกใช้ เช่น วิธีการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากว่า ในการขึ้นรูปแต่ละวิธีก็มีข้อจำกัดแตกต่างกันไปบางวิธีอาจสามารถใช้กับวัตถุดิบที่มีขนาดไม้ไม่ต้องละเอียดมากได้ แต่บางวิธีจำเป็นต้องเตรียมวัตถุดิบให้มีความละเอียดสูง เป็นผลทำให้มีขั้นตอนในการเตรียมวัตถุดิบแตกต่างกัน และการขึ้นรูปไม้ประกอบพลาสติกสามารถขึ้นรูปได้หลายวิธีเช่นเดียวกับการขึ้นรูปพลาสติกทั่วไป



รูปที่ 2.2 ลักษณะของเม็ดคอมปาวด์พลาสติกผสมผงไม้[3]

3. สมบัติ (Properties)

เนื่องจากไม้ประกอบพลาสติกเป็นวัสดุที่นำทั้งไม้และพลาสติกมารวมกัน จึงเป็นผลทำให้สมบัติเดิมของไม้และพลาสติกเปลี่ยนไป ทั้งนี้ สัดส่วนของไม้และพลาสติกก็ยังมีผลกระทบต่อสมบัติของไม้พลาสติกด้วยเช่นกัน โดยส่วนใหญ่แล้ว ถ้าปริมาณของวัตถุดิบตัวใดตัวหนึ่งมาก สมบัติโดยรวมของไม้พลาสติกก็จะมีแนวโน้มเอียงไปทางวัสดุที่มีปริมาณมากกว่า ซึ่งสามารถกล่าว

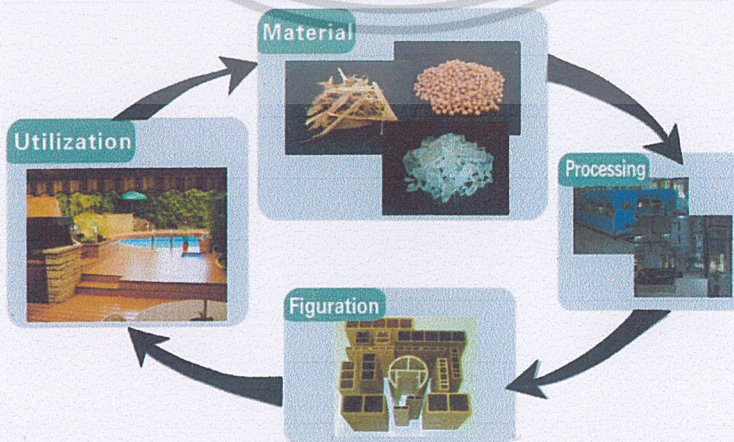
เอกสารสรุปลักษณะเด่นของไม้พลาสติกที่ดีกว่าไม้และพลาสติกได้ดังตารางที่ 2.1 หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบลักษณะเด่นของไม้พลาสติกกับ ไม้และพลาสติก[4]

ไม้ธรรมชาติ	พลาสติก	ไม้พลาสติก
ไม่ทนต่อแสง UV เมื่อใช้นานๆ จะเกิดการผุและหัก	ไม่ทนต่อแสง UV เมื่อใช้นานๆ จะกรอบและแตก	ทนทานต่อแสง UV ไม่กรอบ ไม่แตก และหักได้ยาก
ดูดซับน้ำได้ดีมาก	ดูดซับน้ำได้น้อย	ดูดซับน้ำได้น้อย
เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จะบิดและหดตัวได้มาก	เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จะบิดและหดตัวได้มาก	เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะ บิดและหดตัวเฉลี่ย 1 มม.ต่อ 1 ม.
มีสมบัติเชิงกลน้อย	มีสมบัติเชิงกลน้อย	มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า
มีปัญหาจากปลวกและแมลง ที่กัดกินเนื้อไม้	ไม่มีปัญหาจากปลวกและแมลง ที่กัดกินเนื้อไม้	ไม่มีปัญหาจากปลวกและแมลง ที่กัดกินเนื้อไม้
มีน้ำหนักมาก	มีน้ำหนักเบากว่าไม้	มีน้ำหนักเบากว่าไม้
ลามไฟ สามารถติดไฟได้ง่าย	ขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติก แต่ส่วนใหญ่จะลามไฟ	บางชนิดไม่ลามไฟ เช่น PVC โดยเมื่อติดไฟสามารถดับได้เอง

4. สมรรถนะการใช้งาน (Performance)

เนื่องจากประเภทของวัสดุที่ทำหลากหลายทำให้มีกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้มีสมบัติที่แตกต่างกันหลายอย่าง ทำให้การจะกล่าวถึงสมรรถนะการใช้งานนั้น หากจะมองโดยภาพรวมซึ่งอาจจะมีข้อแตกต่างปลีกย่อย โดยรวมแล้วการเพิ่มไม้ลงไปในพลาสติกนั้น จะเป็นการเพิ่มความแข็งแรงและลดต้นทุนให้กับตัวพลาสติก แต่กลับทำให้มีความเปราะเพิ่มขึ้นเช่นกัน อย่างไรก็ตาม สมบัติด้านอื่นๆ ก็จะแตกต่างกันออกไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งนี้ที่ 2.3 กระบวนการการผลิตและการนำไปใช้งานของไม้พลาสติก[5] ครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 การนำไม้พลาสติกคอมโพสิตไปใช้งาน[6]

ไม้พลาสติกสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย อาทิเช่น

- ไม้พลาสติกที่เนื้อวัสดุเป็นแบบตัน (Solid) มีทั้งลักษณะผิวไม้แบบเรียบและมีลายไม้ใช้การยึดติดด้วยสกรูเกลียวปล่อยเหมือนงานไม้ทั่วๆ ไป สามารถที่จะเหลา เจาะ ชัด กิ่ง หรือตัดได้เหมือนไม้จริงและสามารถรับน้ำหนักได้ดีจึงเหมาะกับการใช้งานได้ทุกประเภท ไม่ว่าจะ เป็น พื้นระเบียง ระแนง กันสาด ระแนงบังตา ไม้ฝาหรือผนัง ราวกันตก รั้ว และอื่นๆอีกมากมาย
- ไม้เทียมพลาสติกที่เนื้อวัสดุเป็นแบบกลวง น้ำหนักเบา (Light) มีทั้งลักษณะผิวไม้แบบร่องกันลื่นและมีลายไม้สลักอีกด้าน ใช้การยึดติดด้วย T-Clip เป็นการยึดติดเข้ากับร่องลื่นด้านข้างของไม้ โดยใช้สกรูเกลียวปล่อยยึดติดเข้ากับโครงสร้างพื้น นิยมนำไปใช้งานพื้นเป็นพื้นระเบียงภายนอกบ้าน เช่น พื้นในสวน หรือพื้นรอบสระน้ำ เพราะคุณสมบัติของไม้พลาสติกที่ทนต่อปลวก หน้ำและการดูแลรักษาน้อย
- ไม้พลาสติกที่เนื้อวัสดุเป็นแบบกลวงรูปตัว C น้ำหนักเบา นิยมนำไปใช้งานประเภท รั้ว ระแนง และ กันสาด
- เฟอร์นิเจอร์ไม้พลาสติก เช่น โต๊ะกลางยาว ชุดรับแขก เก้าอี้ และชุดน้ำชา เป็นต้น

2.2 วัสดุประกอบหรือคอมโพสิต (Composites)[7]

2.2.1 ความหมายของวัสดุประกอบหรือคอมโพสิต

วัสดุประกอบหรือคอมโพสิต (Composites) หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยการรวมวัสดุตั้งแต่ 2 ประเภทเข้าด้วยกัน โดยทั่วไปคอมโพสิตจะมีวัสดุที่เป็นเนื้อหลัก (Matrix) และวัสดุเสริมแรง (Reinforcement materials) ที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อหลักนั้น วัสดุที่เป็นเนื้อหลักจะรองรับวัสดุเสริมแรงให้อยู่ในรูปร่างที่กำหนด ขณะที่วัสดุเสริมแรงจะช่วยเพิ่มหรือปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเนื้อหลักให้สูงขึ้น ซึ่งวัสดุเสริมแรงอาจมีลักษณะเป็นเส้น ก้อน อนุภาค หรือเกล็ดก็ได้ แทรกอยู่ในวัสดุเนื้อหลัก (Base materials) อย่าง โลหะ เซรามิกส์ หรือพอลิเมอร์ ผลของการรวมวัสดุต่างกัน 2 ประเภทเข้าด้วยกันทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงโดยรวมมากกว่าเมื่อเทียบกับความแข็งแรงของวัสดุแต่ละประเภท คอมโพสิตสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดหลักๆ คือ

1. คอมโพสิตแบบอนุภาค (Particulate composites)

เป็นคอมโพสิตที่เกิดจากการกระจายอนุภาคในเมตริกซ์ ซึ่งอนุภาคจะมีรูปร่างการจัดเรียงตัวและขนาดต่างๆกัน อาจเป็นผง หรือเม็ด หรือผลึก

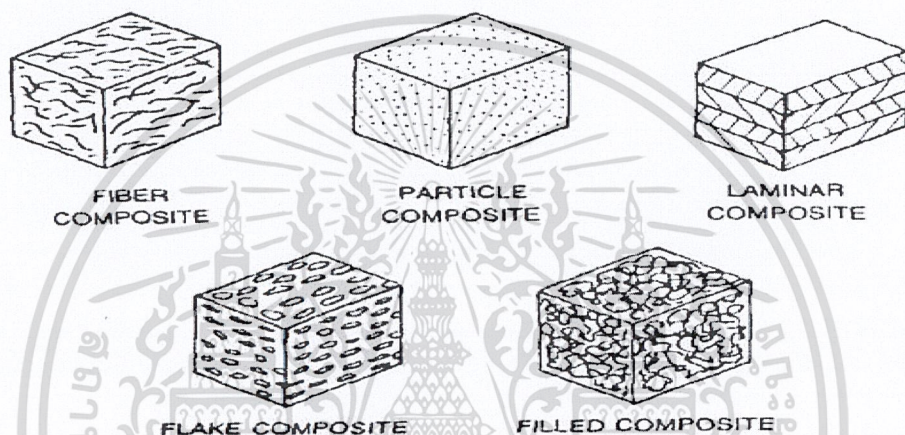
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. คอมโพสิตแบบลามินาร์ (Laminar composites)

เป็นคอมโพสิตที่เกิดจากการยึดติดระหว่างแผ่นวัสดุกับเมตริกซ์ ในลักษณะคล้ายแซนวิช อัดด้วยความดันสูง ซึ่งจะได้เป็นชั้นๆ

3. คอมโพสิตแบบเส้นใย (Fibrous composites)

เกิดจากเส้นใยเสริมแรงในเมตริกซ์ ซึ่งเส้นใยอาจเป็นเส้นใยคาร์บอน (Carbon fibers), เส้นใยอินทรีย์ (Organic Fibers), เส้นใยอารามิด (Aramid fibers), เส้นใยแก้ว (Glass fibers) หรือ เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers)



รูปที่ 2.4 ลักษณะการคอมโพสิตของส่วนเสริมแรงแต่ละประเภท[7]

คอมโพสิตจะประกอบด้วย 2 ส่วน ดังนี้

1. ส่วนเมตริกซ์ (Matrix phase)

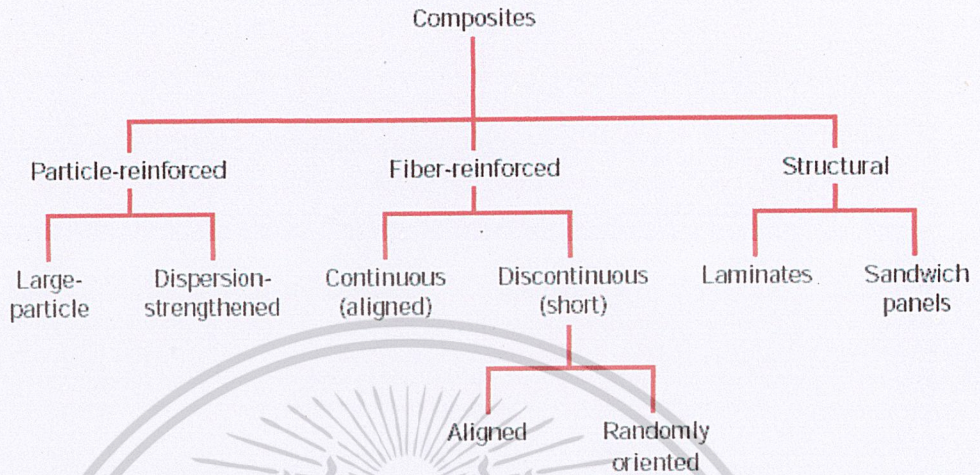
ส่วนเมตริกซ์เป็นองค์ประกอบหลักของคอมโพสิตจัดเป็นส่วนที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) เป็นส่วนที่ช่วยห่อหุ้มและยึดส่วนเสริมแรงเข้าไว้ด้วยกัน โดยทั่วไปเมตริกซ์จะมีความเหนียวสูง ความแข็งแรงและมอดุลัสต่ำกว่าส่วนเสริมแรง ซึ่งมีหน้าที่หลัก ได้แก่

- รักษาความเสถียรในรูปร่างและขนาดของวัสดุคอมโพสิต
- รักษาการกระจายตัวของเส้นใยและแยกไม่ให้เส้นใยมารวมกัน
- ทำให้วัสดุคอมโพสิตสามารถทนต่อการเสียดสภาพภายใต้อุณหภูมิหรือแรงกระทำที่สภาวะทดสอบต่างๆ ได้
- สามารถกระจายหรือส่งถ่ายแรงกระทำที่ได้รับจากภายนอกไปยังส่วนของเส้นใยได้
- ช่วยให้ทนทานต่อสภาพแวดล้อมและมีความเสถียรในตัวกลางต่างๆ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ส่วนเสริมแรง (Reinforcement phase)

ส่วนเสริมแรงเป็นส่วนที่ทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงมากเป็นส่วนที่ไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous phase) ซึ่งจะมีลักษณะเป็นแผ่น อนุภาคเล็กๆ หรือเส้นใยก็ได้



รูปที่ 2.5 ประเภทของวัสดุคอมโพสิต โดยแบ่งตามลักษณะของส่วนเสริมแรง[7]

2.2.2 ข้อดีและข้อเสียของคอมโพสิต

วัสดุคอมโพสิตมีมากมายหลายชนิดและมีสมบัติเด่นหลายประการ นอกจากนี้ยังสามารถออกแบบโครงสร้างของวัสดุคอมโพสิตให้เหมาะกับการใช้งานต่างๆ

1. ข้อดีของพอลิเมอร์คอมโพสิต

- มีสมบัติต่อน้ำหนักหรือความหนาแน่น (Property to weight/density ratio) สูง เช่น ความแข็งแรงจำเพาะ (Specific strength) โมดูลัสจำเพาะ (Specific modulus) เป็นต้น เนื่องจากมีน้ำหนักเบาและความหนาแน่นต่ำ
- ช่วยลดน้ำหนักของวัสดุ
- สามารถสร้างวัสดุให้เหมาะสมกับการใช้งานได้หลากหลาย
- มีอายุการใช้งานยืนยาวและทนต่อการสึกกร่อน
- มีสมบัติรับแรงและเคมปีง (Damping) ดี
- มีความทนทานต่อการด้า (Fatigue resistance) ดี
- มีเสถียรภาพของรูปร่าง (Dimension stability) ต่ำ เมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะ เซรามิก เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ข้อเสียของพอลิเมอร์คอมโพสิต

- มีต้นทุนการผลิตสูง เนื่องจากราคาของวัตถุดิบและเครื่องมือการขึ้นรูปสูง
- ต้องมีความพิถีพิถันในการเลือกใช้วัตถุดิบหรืออุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ ที่จะนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์อย่างละเอียด
- มีสมบัติในแต่ละทิศทางไม่เท่ากันหรือมีสมบัติแอนไอโซโทรปี (Anisotropy) เนื่องจากมีการจัดเรียงตัวของส่วนเสริมแรงทำให้คอมโพสิตไม่แข็งแรงในแนวตั้งฉากกับการจัดเรียงตัว
- ใช้เวลาในกระบวนการผลิตที่ยาวนาน
- ยากในการต่อหรือเชื่อมกับวัสดุอื่นๆ

2.3 พอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composites)

พอลิเมอร์คอมโพสิต หมายถึง วัสดุประกอบชนิดหนึ่งที่อยู่ประกอบด้วยส่วนของพอลิเมอร์เมทริกซ์และส่วนเส้นใยเสริมแรงที่มีสมบัติต่างกัน เมื่อผสมเข้ากันเป็นคอมโพสิตแล้วจะมีความแข็งแรงมากกว่าแต่ละองค์ประกอบย่อย

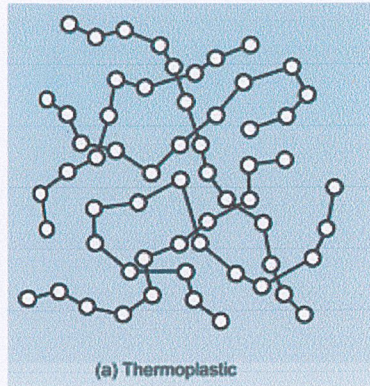
2.3.1 พอลิเมอร์เมทริกซ์ (Polymer matrices)

พอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ใช้โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) เมื่อถูกความร้อนสามารถหลอมตัวได้และเมื่อเย็นตัวลงจะกลับมาแข็งตัวเช่นเดิม สามารถทำให้หลอมและแข็งตัวได้หลายๆ ครั้งโดยไม่ทำให้สมบัติทางเคมีเปลี่ยนแปลงไป จะละลายได้ดีในตัวทำละลายบางชนิด อาจแยกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มเทอร์โมพลาสติกอสัณฐาน (Amorphous thermoplastic) และเทอร์โมพลาสติกกึ่งผลึก (Semi-crystalline thermoplastic)

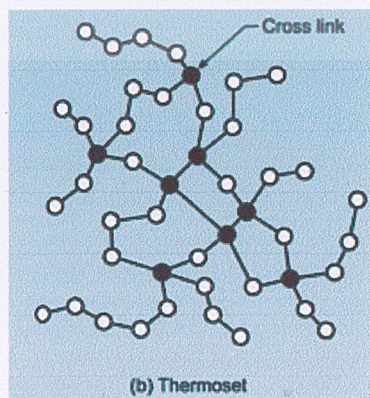
เทอร์โมพลาสติกจะไม่เกิดการเชื่อมโยง ดังนั้นความแข็งแรงเป็นผลโดยตรงจากสมบัติของหน่วยซ้ำหรือมอนอเมอร์ และน้ำหนักโมเลกุลที่สูง เทอร์โมพลาสติกอสัณฐานจะมีการพันกันของสายโซ่โมเลกุลซึ่งจะส่งผลคล้ายกับการเกิดการเชื่อมโยง ส่วนในพอลิเมอร์ที่สามารถตกผลึกได้ก็จะมี การจัดเรียงตัวที่ดีทำให้เมทริกซ์มีความแข็งแรง สมบัติของเทอร์โมพลาสติกจะขึ้นอยู่กับองศาความเป็นผลึก (Degree of crystallization) สัณฐานวิทยา (Morphology) และการจัดเรียงตัวของผลึก (Orientation) ซึ่งจะขึ้นกับสภาวะในการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 โครงสร้างการจัดเรียงตัวของเทอร์โมพลาสติก[8]

2. เทอร์โมเซต (Thermoset) เมื่อผ่านกระบวนการผลิตจะมีรูปร่างถาวร ผลผลิตที่ได้ไม่สามารถนำไปหลอมแล้วนำมาขึ้นรูปได้อีก และไม่ละลายในตัวทำละลาย ไม่เกิดกระบวนการย้อนกลับ กล่าวคือ ก่อนการผ่านกระบวนการเตรียมโครงสร้างของพอลิเมอร์ยังไม่เป็นร่างแห แต่เมื่อนำมาผ่านกระบวนการให้ความร้อนหรือความดันเข้าไปจะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในโครงสร้างเกิดการเชื่อมโยง (Cross linking) ระหว่างสายโซ่โมเลกุล ทำให้เกิดรอยต่อที่แน่นของโครงร่างสามมิติ การเกิดการเชื่อมโยงจะทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงสูง มีเสถียรภาพทางความร้อน และต้านการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) ได้ดี สมบัติเหล่านี้จะสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นของการเชื่อมโยง (Crosslink density) และน้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่ระหว่างการเชื่อมโยง ถ้าเกิดการเชื่อมโยงมากจะส่งผลให้เมตริกซ์มีความแข็งแรงมาก หรือมีมอดูลัสยืดหยุ่นสูง แต่ถ้าเกิดการเชื่อมโยงมากแล้วน้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่ระหว่างการเชื่อมโยงลดลงจะทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลเกิดได้ยาก เกิดความเปราะ มีความเครียด (Strain) ต่ำ และมีความต้านทานต่อแรงกระแทกน้อย

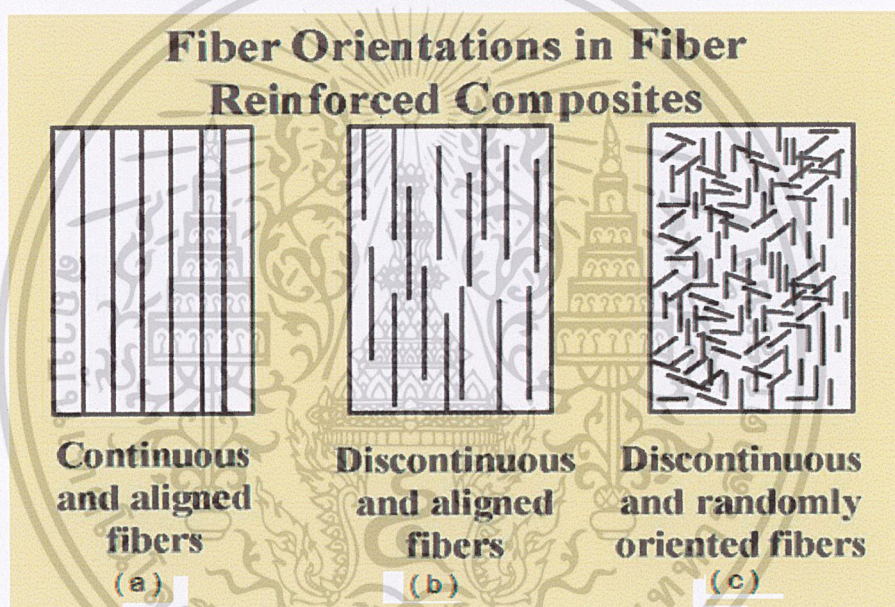


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งหา **รูปที่ 2.7** โครงสร้างการจัดเรียงตัวของเทอร์โมเซต[8] ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 ส่วนเส้นใยเสริมแรง (Fiber reinforcement)

ส่วนเส้นใยเสริมแรง (Fiber reinforcement) เป็นส่วนที่ทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรง มักเป็นส่วนที่ไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous phase) มีลักษณะรูปร่างเป็นเส้นใยที่อาจจะเป็นเส้นใยต่อเนื่อง เส้นใยยาวหรือเส้นใยสั้น โดยทั่วไปเส้นใยที่นิยมนำมาใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงในพอลิเมอร์คอมโพสิต สามารถแบ่งได้เป็น

1. เส้นใยสังเคราะห์ (Synthesis fibers) เช่น เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) เส้นใยแก้ว (Glass fiber) เส้นใยอะรามิด (Aramid fiber) เป็นต้น
2. เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers) เช่น ผงไม้ (Wood flour) เส้นใยมะพร้าว (Coir)



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงในลักษณะต่างกัน[9]

- (a) ส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยยาว จัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน
- (b) ส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยสั้น จัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน
- (c) ส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยสั้น จัดเรียงตัวแบบสุ่ม

สมบัติของเส้นใยที่เหมาะสมสำหรับใช้เสริมแรง ควรมีลักษณะดังนี้

- เส้นใยควรมีค่ามอดุลัสยืดหยุ่นสูง เพื่อประสิทธิภาพในการเสริมแรง
- เส้นใยควรมีความแข็งแรงสูงและแต่ละเส้นไม่ควรแตกต่างกันมาก
- เส้นใยควรจะเสถียร สามารถรับแรงขณะจัดเก็บและขึ้นรูปได้
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นผิวควรมีลักษณะเหมือนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูผู้วางแบบเอกสารเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยสำคัญของเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต

- เส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของเส้นใย
- ปริมาณของเส้นใย
- ลักษณะและการจัดเรียงตัวของเส้นใย

2.4 เส้นใยธรรมชาติ (Natural Fibers)[10]

2.4.1 ลักษณะของเส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยธรรมชาติเป็นอินทรีย์วัสดุทางธรรมชาติที่สำคัญ ได้จากส่วนต่างๆ ของทั้งพืช สัตว์ และหินแร่ เช่น ฝ้าย (Cotton) ไยมะพร้าว (Coir) ขนสัตว์ (Wool) ไยไหม (Silk) และแร่ใยหิน (Asbestos) เป็นต้น ซึ่งหาได้ง่ายจากธรรมชาติ สามารถเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง มีปริมาณมาก และมีราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับเส้นใยสังเคราะห์ รวมทั้งเส้นใยธรรมชาติยังลดการขีดข่วนและลดความเสียหายของเครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ ด้วยเหตุนี้จึงนิยมใช้เส้นใยธรรมชาติผลิตเป็นผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิดและในแง่ของอุตสาหกรรมพลาสติก เป็นสารเติมแต่งในพลาสติก โดยอาจเป็นทั้งสารตัวเติมและสารเสริมแรงเพื่อเป็นการลดต้นทุน ช่วยเพิ่มปริมาณการผลิต ช่วยปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ให้ดีขึ้นและเสริมแรงให้แก่ผลิตภัณฑ์ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิด ขนาด และปริมาณของเส้นใยที่นำมาใช้งาน

เส้นใยธรรมชาติสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทหลักๆ คือ

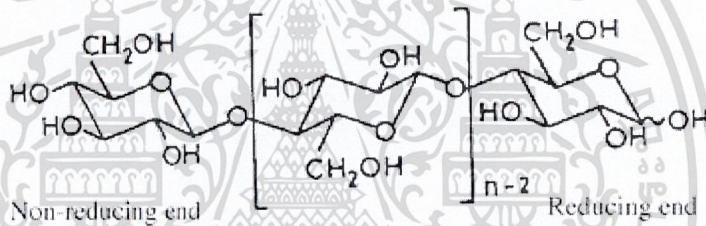
1. เส้นใยจากพืช เป็นเส้นใยที่ประกอบด้วยโมเลกุลของเซลลูโลสที่เป็นไฮโมพอลิเมอร์ ซึ่งได้จากส่วนต่างๆ ของพืช เช่น ฝ้าย ป่าน (Flax) ลินิน (Linins) ไยมะพร้าว นุ่น (Kapok) เป็นต้น
2. เส้นใยจากสัตว์ เป็นเส้นใยที่ประกอบด้วยโมเลกุลโปรตีนเป็นสายโซ่พอลิเปปไทด์ เช่น ขนสัตว์ ไยไหม ผม (Hair) เป็นต้น ซึ่งเส้นใยเหล่านี้จะมีสมบัติทนต่อการยับย่นได้ดี ดูดซับน้ำได้ดี ทนต่อเปลวไฟและมีความถ่วงจำเพาะที่ต่ำ
3. เส้นใยจากหินแร่ เช่น แร่ใยหิน ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี ทนไฟ และเป็นฉนวนไฟฟ้า แต่ปัจจุบันไม่มีการใช้แล้วเนื่องจากเป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจและเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ

2.4.2.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและเป็นโฮโมพอลิเมอร์ของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส (Anhydroglucose units) ซึ่งอาจจะมีค่าองศาการพอลิเมอไรซ์ (Degree of polymerization, DP) ถึง 3,500 เซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรงโดยที่สายโซ่โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวแบบ Fully extended chains ซึ่งจะมีแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่โมเลกุลด้วยพันธะไฮโดรเจน ซึ่งมีผลทำให้เกิดโครงสร้างผลึกขึ้นทำให้เซลลูโลสมีองศาความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) สูง คือ มีค่าประมาณร้อยละ 60–80 ส่งผลให้อุณหภูมิการหลอมตัวสูงมากจึงเกิดการสลายตัวก่อนถึงอุณหภูมิหลอมตัว มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำเป็นวัสดุในอุดมคติสำหรับเป็นสารเสริมแรง



รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส[10]

สมบัติทางกายภาพของเซลลูโลส

1. การละลาย

เซลลูโลสไม่ละลายน้ำ ตัวทำละลายอินทรีย์ แต่จะละลายในกรดเข้มข้น เช่น 40% ของกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) 72% ของกรดซัลฟูริก (Sulfuric acid) เป็นต้น โดยเซลลูโลสจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอย่างรวดเร็วในสารละลายกรดที่อุณหภูมิห้อง แต่หยุดเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำ และสามารถบวมตัวในสารละลายของเกลือเข้มข้นบางชนิด เช่น สารละลายอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali hydroxide) เป็นต้น

2. ความหนืด

ถ้ามีการเพิ่มความเข้มข้นของเซลลูโลส ความหนืดก็จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สมบัติทางกายภาพที่ดีขึ้น ไม่ว่าจะใครๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การดูดซับความชื้น

เซลลูโลสส่วนใหญ่จะมีการดูดซับน้ำและมีการคายไอน้ำหรือของเหลวอื่นๆ ที่อยู่ในบรรยากาศจนกระทั่งถึงจุดสมดุล โดยสมดุลความชื้นของเซลลูโลสจะแปรเปลี่ยนไปตามความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศนั้น ปริมาณความชื้นของเซลลูโลสมีผลต่อสมบัติทางกายภาพบางประการ เช่น เมื่อความชื้นสูงขึ้น ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น

4. ความหนาแน่น

เซลลูโลสเป็นเส้นใยเดี่ยวจะไม่มีค่าความหนาแน่นที่แน่นอน โดยค่าความหนาแน่นจะแปรเปลี่ยนไปตามแหล่งที่มาหรือจากการปรับปรุงทางเคมี

ประโยชน์ของเซลลูโลส

เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม จึงมีวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรประเภท ฟางข้าว แกลบ จี้เลื่อย กาบมะพร้าว และต้นมันสำปะหลังเป็นจำนวนมาก ซึ่งหาได้ง่ายสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอโนไซม์เซลลูเลสได้ และยังสามารถแปรรูปโดยอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์ เช่น เซลลูโลสเมื่อถูกย่อยด้วยเอโนไซม์เซลลูเลสจะได้กลูโคส (Glucose) เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในอุตสาหกรรม เช่น การผลิตเอทานอล กรดอะมิโนที่จำเป็นหลายชนิด กรดอินทรีย์ และเคมีภัณฑ์อีกหลายอย่าง

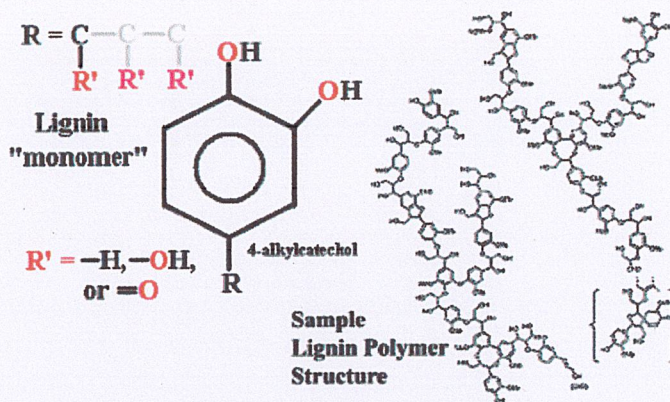
นอกจากนี้เซลลูโลสยังถูกนำมาเป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตภัณฑ์หลายประเภท ดังนี้

1. เส้นใย (Fiber) เซลลูโลสจากฝ้ายและเยื่อจากไม้ที่มีแอลฟาเซลลูโลสมากกว่า 90% ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย โดยเตรียมสารละลายเซลลูโลสในตัวทำละลายที่เหมาะสมแล้วทำให้เกิดเส้นใยเซลลูโลสขึ้นมาใหม่ ซึ่งเรียกว่า เซลลูโลสคืนสภาพ (Regenerated cellulose) ใช้ทำไหมเทียม ผ้าห่มขนสัตว์ สายพาน และสายเทป เป็นต้น เส้นใยที่ได้เรียกว่า เรยอน (Rayon)

2. फिल्म (Film) แผ่นฟิล์มที่ทำมาจากเซลลูโลสใช้ห่ออาหาร เป็นเมมเบรน (Membrane) ในกระบวนการไดอะลิซิส (Dialysis) และกระบวนการออสโมซิส (Osmosis) ทั้งนี้เพราะเซลลูโลสมีสมบัติคงทน ใส ยอมให้อากาศและตัวถูกละลายสามารถซึมผ่านได้บ้าง

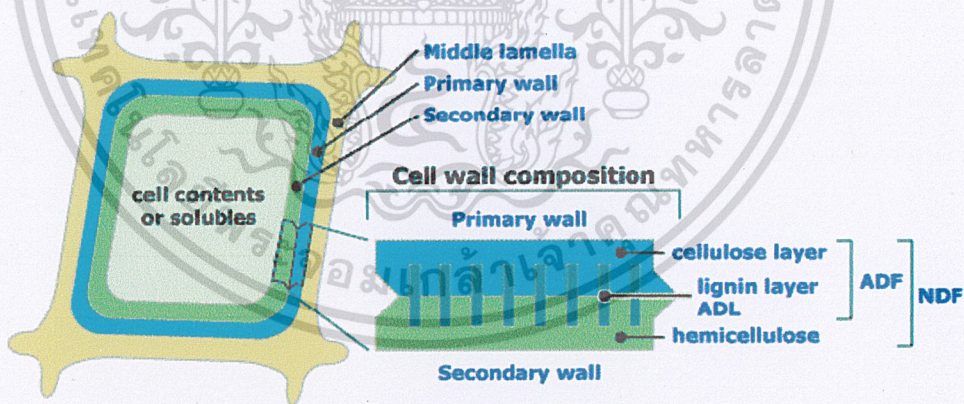
3. ยา (Drugs) ในยาหนึ่งเม็ดนอกจากจะมีตัวยาแล้วยังมีสารอื่น เช่น เซลลูโลส เพื่อช่วยให้เม็ดยาคงทนไม่แตกหักง่าย และยังทำให้เม็ดยาแตกตัวได้ดีในกระเพาะอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน[12]

ไม้แต่ละชนิดจะมีอัตราส่วนระหว่างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดและอายุของไม้ โดยไม้ที่มีปริมาณลิกนินมากจะมีความแข็งแรงสูงและในไม้ชนิดเดียวกันไม้อายุมากจะมีปริมาณลิกนินมากเช่นเดียวกัน โดยการจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในไม้ แสดงคังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในไม้[13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การพัฒนาเส้นใยธรรมชาติเพื่อในอุตสาหกรรม[14]

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีในการนำเส้นใยธรรมชาติ มาใช้ทดแทนเส้นใยสังเคราะห์เพื่อการผลิตเป็นวัสดุ "คอมโพสิต (Composite)" โดยได้มีการนำเส้นใยธรรมชาติมาใช้เป็นสารเติมแต่งหรือสารเสริมแรงในพลาสติก เพื่อเป็นการลดต้นทุน เพิ่มปริมาณการผลิต และเพิ่มความแข็งแรงแก่ผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้วัสดุคอมโพสิตที่ผลิตได้มีน้ำหนักเบา และสามารถลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง หากนำมาผสมกับพลาสติกชีวภาพ (Bio-plastic) ให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ "กรีนคอมโพสิต (Green composite)" ที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์หรือเอนไซม์

• เส้นใยธรรมชาติในอุตสาหกรรมยานยนต์

ในปี ค.ศ. 1910 เฮนรี ฟอร์ด เจ้าของบริษัทรถยนต์ฟอร์ด ได้ทดลองและพัฒนาในการนำผลผลิตทางการเกษตรมาใช้เป็นชิ้นส่วนยานยนต์ โดยเริ่มจากการใช้แป้งสาลีผสมกับใยหินในการผลิตกล่องบรรจุขวดขวดในรถยนต์ และยังได้ดำเนินการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนสามารถผลิตชิ้นส่วนรถยนต์จากเส้นใยธรรมชาติ ปัจจุบัน แนวโน้มการผลิตรถยนต์ตามแนวคิดนี้มีมากขึ้น เนื่องจากการแข่งขันในด้านการตลาดและความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีที่เพิ่มสูงมากยิ่งขึ้น ในปัจจุบัน ทำให้บริษัทรถยนต์ต้องผลิตรถยนต์ให้มีคุณภาพที่ดีกว่าและมีต้นทุนการผลิตต่ำ โดยเน้นการนำวัสดุใช้แล้วหรือเส้นใยธรรมชาติมาเป็นส่วนผสมในชิ้นส่วนยานยนต์ ซึ่งทำให้ต้นทุนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ลดลงมาก ทั้งนี้ ผลิตภัณฑ์ผสมเส้นใยธรรมชาติยังได้ถูกนำไปใช้ในรถบรรทุก รถพ่วง และเครื่องบิน จากเหตุผลข้างต้น จึงส่งผลให้เส้นใยธรรมชาติกลายเป็นคู่แข่งสำคัญของเส้นใยสังเคราะห์ไปโดยปริยาย

• เส้นใยธรรมชาติในอุตสาหกรรมไม้และเฟอร์นิเจอร์

ไม้เป็นวัสดุที่มีความสำคัญในการทำเฟอร์นิเจอร์ เครื่องมือและเครื่องใช้ต่างๆ องค์กรใด ในขณะที่ความต้องการในการใช้ ไม้ภายในประเทศเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ประเทศกลับประสบปัญหาจำนวนป่าไม้ในประเทศลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้น การนำเส้นใยธรรมชาติมาผสมพลาสติกเพื่อผลิตเป็นวัสดุคอมโพสิตที่มีสมบัติเป็นไม้เทียม (Artificial woods) จึงเป็นทางออกใหม่ในการแก้ปัญหาดังกล่าว ทั้งนี้ วัสดุไม้เทียมดังกล่าวจะมีน้ำหนักเบา แข็งแรง เหนียว ทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศและมีอายุการใช้งานยาวนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ข้อดีและข้อเสียของเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์[14]

เส้นใยธรรมชาติ	เส้นใยสังเคราะห์
ข้อดี	ข้อดี
<ol style="list-style-type: none"> 1. สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย 2. มีศักยภาพในการเสริมแรงวัสดุอื่น 3. น้ำหนักเบาและไม่เป็นพิษ 4. เป็นทรัพยากรที่ไม่หมดสิ้น 5. เป็นฉนวนทางความร้อน 	<ol style="list-style-type: none"> 1. นำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย 2. ทนต่อการซักล้าง 3. สามารถปรับปรุงสมบัติได้หลากหลาย 4. มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน
ข้อเสีย	ข้อเสีย
<ol style="list-style-type: none"> 1. อายุการใช้งานค่อนข้างสั้น 2. ปรับปรุงสมบัติได้น้อย 3. มีข้อจำกัดในการใช้งาน 4. เสียหายง่ายระหว่างการผลิต 5. ติดไฟได้ง่าย 	<ol style="list-style-type: none"> 1. สวมใส่แล้วร้อน 2. ย่อยสลายยาก 3. ระบายอากาศได้น้อย 4. มีราคาแพง

2.6 เส้นใยมะพร้าว (Coconut fiber or Coir)[15]

มะพร้าวมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Cocos nucifera* Linn. เป็นพืชตระกูลปาล์ม ลำต้นกลมฐานลำต้นกว้าง มีข้อปล้องตามลำต้น ใบเป็นใบประกอบเรียงขนานกันอยู่บนก้านใหญ่ ซึ่งเส้นใยแข็งที่ได้มาจากกาบมะพร้าว จะเรียกว่า “ใยมะพร้าว” ด้วยเส้นใยที่มีลักษณะเฉพาะทางธรรมชาติเป็นเส้นใยที่ยืดหยุ่นเหนียว แข็งแรง ทนทาน มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติจึงสามารถทำลายหรือย่อยสลายได้ง่าย ดังนั้นเส้นใยมะพร้าวจึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรม รวมทั้งเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในชีวิตประจำวัน อาทิเช่น

- วัตถุดิบหลักในสินค้าประเภทที่นอนเพื่อสุขภาพและเตียงนอนของโรงพยาบาล เนื่องจากมีสมบัติของการหมุนเวียนอากาศสูง
- ผลิตเป็นวัสดุป้องกันการกระแทก เหมาะสำหรับสินค้าประเภทเฟอร์นิเจอร์ เช่น วัสดุ

ภายในที่นั่งโดยสารบนเครื่องบิน และเบาะนั่งในรถยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ เช่น การใช้เป็นฐานรองพื้นเพื่อการยึดเกาะของ ดินกล้าและดินกล้วยไม้ หรือใช้แทนหญ้าและฟางคลุมดินเพื่อกักเก็บความชื้น
- เศษเหลือจากการผลิตโคมะพร้าวที่เรียกว่า “ ขุยมะพร้าว ” สามารถนำมาเป็นส่วนประกอบในการทำปุ๋ยและเชื้อเพลิงชีวมวลได้เป็นอย่างดี

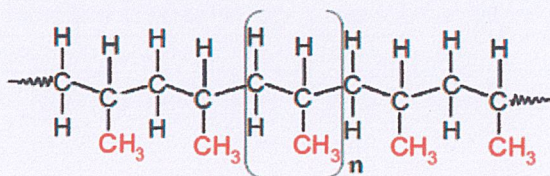
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นโคมะพร้าว[15]

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (% น้ำหนักอบแห้ง)	มาตรฐาน
ซีเถ้า	3.80	TAPPI-T211-om-93
ไฮโดรเซลลูโลส	59.66	Acid chlorite Methode of Browing
ลิกนิน	41.89	TAPPI-T222-om-98
แอลฟาเซลลูโลส	49.20	TAPPI-T203-om-93
แพนโตแซน	20.92	TAPPI-T223-om-84

หมายเหตุ : ข้อมูลจากโครงการวิจัยต่อเนื่องปี 2553 ซึ่งการวิเคราะห์แต่ละองค์ประกอบใช้วิธีแตกต่างกัน

2.7 พอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP)

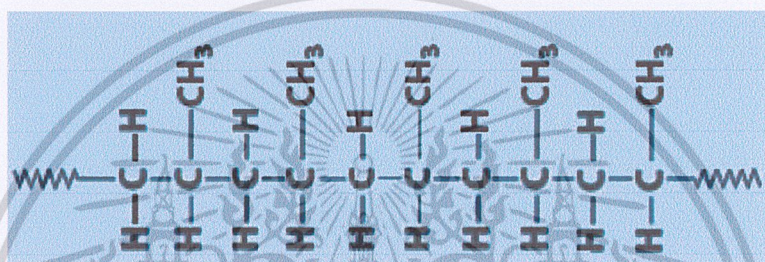
ในปี ค.ศ.1954 แนพทาได้นำตัวเร่งที่ซีเกลอร์ค้นพบมาใช้ในการเตรียมพอลิพรอพิลีน โดยปรับปรุงรูปแบบของตัวเร่งปฏิกิริยาได้พอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักแตกต่างกันออกไป ซึ่งมีผลทำให้สมบัติของพอลิพรอพิลีนแต่ละประเภทแตกต่างกัน โครงสร้างทางเคมีส่วนใหญ่ของพอลิพรอพิลีนจะมีหมู่เมทิล (Methyl group, -CH₃) เกาะบนสายโซ่หลักของโมเลกุล (Main chain)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 2.13 โครงสร้างทางเคมีของพอลิพรอพิลีน[16]
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

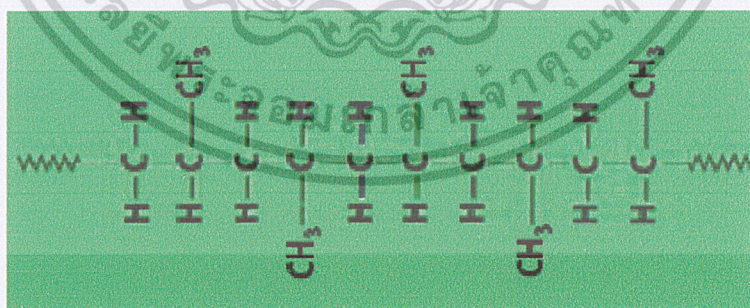
พอลิพรอพิลีนสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ตามลักษณะการเกาะของหมู่เมทิลบนสายโซ่โมเลกุลหลัก ได้แก่

1. ไอโซแทคติกพอลิพรอพิลีน (Isotactic polypropylene) มีลักษณะการเกาะของหมู่เมทิลด้านเดียวกันทั้งหมดบนสายโซ่โมเลกุลหลัก ลักษณะเช่นนี้โครงสร้างโมเลกุลมีความเป็นระเบียบสูงทำให้มีการตกผลึกได้ดีที่สุด สามารถสังเคราะห์ได้ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ Heterogeneous ของ Titanium(III)chloride กับตัวเร่งร่วมกับสารประกอบ Organoalluminium เช่น Diethylaluminum chloride



รูปที่ 2.14 โครงสร้างของไอโซแทคติกพอลิพรอพิลีน[16]

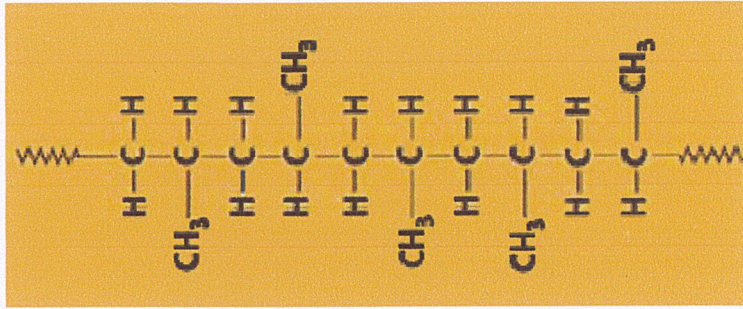
2. ซินดิโอแทคติกพอลิพรอพิลีน (Syndiotactic polypropylene) มีลักษณะการเกาะของหมู่เมทิลสลับกันบนสายโซ่หลักอย่างเป็นระเบียบ ทำให้โครงสร้างมีความเป็นระเบียบลดลง มีผลทำให้การตกผลึกลดลงด้วย



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของซินดิโอแทคติกพอลิพรอพิลีน [16]

3. อะแทคติกพอลิพรอพิลีน (Atactic polypropylene) มีลักษณะการเกาะของหมู่เมทิลบนสายโซ่โมเลกุลหลักอย่างไม่เป็นระเบียบ ลักษณะเช่นนี้ทำให้มีการตกผลึกน้อยที่สุดและสามารถ

เอกสารนี้สังเคราะห์จากกรดิวอิส และสารประกอบ Organometallic ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 โครงสร้างของอะแทคติกพอลิพรอพิลีน[16]

2.7.1 ลักษณะและสมบัติของพอลิพรอพิลีน

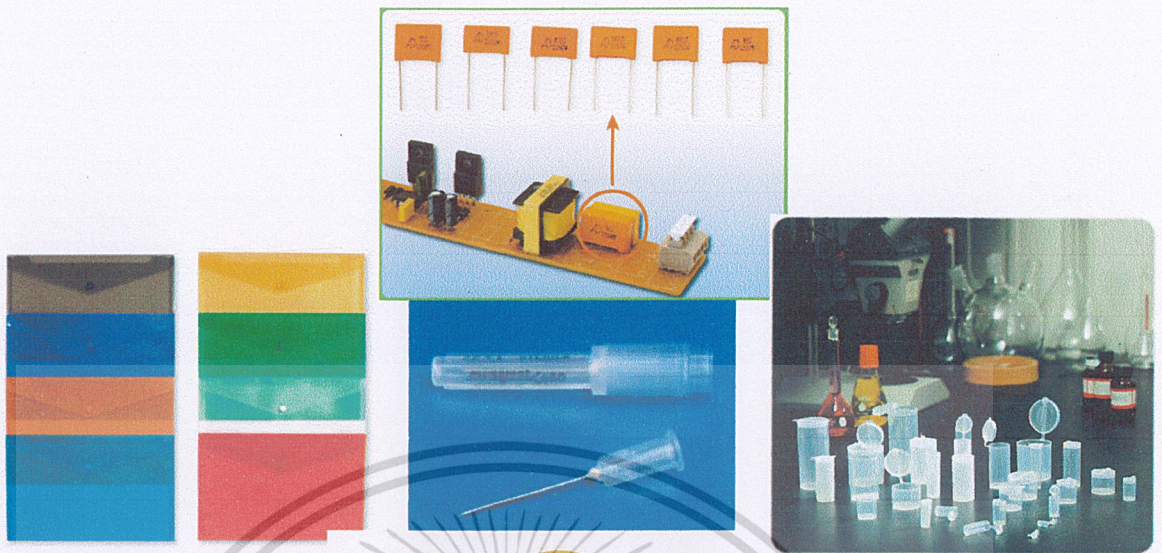
พอลิพรอพิลีน มีลักษณะขาวขุ่น มีผิวแข็ง ทนทานต่อการขีดข่วน คงตัวเสถียรรูปได้ยาก มีความทึบแสงกว่าพอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) สามารถผสมสีได้ง่ายทั้งลักษณะ โปร่งแสงและทึบแสง มีน้ำหนักเบาจึงสามารถลอยน้ำได้เช่นเดียวกับพอลิเอทิลีนและมีลักษณะอื่น ๆ คล้ายกับพอลิเอทิลีน โดยมีสมบัติทั่วไปคือ

- มีความหนาแน่นในช่วง 0.890-0.905 กรัม/ลบ.ซม.
- เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมาก แม้ที่อุณหภูมิสูง
- ทนทานต่อสารเคมีส่วนมาก แต่สารเคมีบางชนิดอาจทำให้พองตัว หรืออ่อนนุ่มได้
- มีความต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซได้ดี
- มีจุดหลอมเหลวปานกลางประมาณ 130 – 170 องศาเซลเซียส
- ไม่สามารถละลายในตัวทำละลายที่อุณหภูมิห้อง
- สามารถละลายได้ในตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนที่อุณหภูมิสูงกว่า 80 องศาเซลเซียส
- มีความเป็นผลึกสูงทำให้มีสมบัติเชิงกลที่ดี

2.7.2 การประยุกต์ใช้งาน

ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่ผลิตมาจากพอลิพรอพิลีน ซึ่งสามารถพบเห็นได้ในชีวิตประจำวัน เช่น ก่องเครื่องมือ กระเป๋า ปกแฟ้มเอกสาร ก่องและตลับเครื่องสำอาง เครื่องใช้ในครัวเรือน

เอกสารนี้คัดลอกบรรจุกอาหาร อุปกรณ์ของรถยนต์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ วัสดุบรรจุภัณฑ์ อุปกรณ์ทาง-
ไม่ว่าการแพทย์ ขวดใส่สารเคมี และกระป๋องน้ำมันเครื่อง ฯลฯ ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 ผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ผลิตได้จากพอลิพรอพิลีน[17]

2.8 สารเติมแต่งพอลิเมอร์ (Polymer Additives)[18]

เนื่องจากความแตกต่างทางด้านสมบัติและ โครงสร้างระหว่างไม้กับพลาสติกที่อาจส่งผลต่อคุณภาพและสมบัติของไม้พลาสติกได้ เช่น ความเข้ากันได้ (Miscibility) ของไม้กับพลาสติก เสถียรภาพทางความร้อน เป็นต้น รวมถึงลักษณะและสมบัติของพลาสติกที่เป็นองค์ประกอบหลักของพอลิเมอร์เมทริกซ์ในไม้พลาสติกที่ยังคงสมบัติที่ไม่ต้องการ ซึ่งเกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตและตัวของวัสดุพอลิเมอร์เอง เช่น พอลิเมอร์บางชนิดแข็งเปราะเกินไป หรือบางชนิดจุดหลอมเหลวสูงเกินไปไม่เหมาะในการขึ้นรูป บางชนิดแตกหักภายใต้อิทธิพลของแสงและออกซิเจน เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องช้อนหรือลดข้อบกพร่องของพลาสติก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับชิ้นงานมากยิ่งขึ้น สารเติมแต่งพอลิเมอร์หลากหลายชนิดจึงเข้ามามีบทบาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำคัญที่จะช่วยปรับปรุงสมบัติ และเพิ่มขีดความสามารถในการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นและมีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเชิงพาณิชย์มากขึ้น

สารเติมแต่งอาจมีสถานะเป็นของแข็ง ยึดหยุ่นเหมือนยาง ของเหลว หรือก๊าซ ก็ได้ บางชนิดผสมอยู่ในพลาสติกเกือบทุกชนิด บางชนิดมีอยู่ในพลาสติกที่ใช้งานเฉพาะทาง บางชนิด ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ เช่น สารตัวเติม (Fillers) และบางชนิดละลายได้ดีในพอลิเมอร์ เช่น สารต้านออกซิเดชันหรือแอนติออกซิแดนต์ (Antioxidant) เป็นต้น โดยที่สารเติมแต่งสามารถแบ่งสมบัติที่ต้องการปรับปรุงได้ 5 กลุ่ม ดังนี้

1. สารปรับปรุงสมบัติเชิงกล (Mechanical property modifiers) เช่น สารตัวเติม (Fillers) สารพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers) และสารเสริมแรง (Reinforcement) เป็นต้น
2. สารปรับปรุงพื้นผิว (Surface property modifiers) เช่น สารหล่อลื่น (Lubricants) สารป้องกันไฟฟ้าสถิต (Antistatic agent) เป็นต้น
3. สารปรับปรุงสมบัติทางเคมี (Chemical property modifiers) เช่น สารต้านออกซิเดชัน (Antioxidant) สารหน่วงการติดไฟ (Flame retardants) และสารต้านจุลชีพ (Biocides) เป็นต้น
4. สารปรับปรุงความสวยงาม (Aesthetic property modifiers) เช่น สารให้สี (Colorants) เป็นต้น
5. สารปรับปรุงกระบวนการผลิต (Processing modifiers) เช่น พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers) สารเชื่อมโยง (Cross linking agent) สารช่วยผสม (Compatibilizers) และสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน (Heat stabilizers) เป็นต้น

ปริมาณสารเติมแต่งพอลิเมอร์ไม่ควรใส่เกินมากกว่า 10 % โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์พลาสติก (ยกเว้นสารเพิ่มเนื้อ) ซึ่งโดยทั่วไปสมบัติที่ควรมีของสารเติมแต่งพอลิเมอร์พอสรุปได้ดังต่อไปนี้

- มีประสิทธิภาพตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการและราคาถูก
- มีความเสถียรต่อสภาพเงื่อนไขตามสภาวะต่างๆที่นำไปใช้
- ต้องไม่แพร่หลุด (Bleed or bloom) จากพลาสติกไปสู่วัสดุอื่น ๆ
- มีความเสถียรภาพต่อกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

• ต้องไม่ทำให้สมบัติของพอลิเมอร์เสียสภาพไป
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่หรือดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.1 สารคงเสถียรภาพ (Stabilizers)

การเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ทำให้เกิดการแตกหักหรือการตัดขาดสายโซ่ (Chain scission) การเกิดพันธะเชื่อมโยง (Cross linking) และการเกิดหมู่ดูดกลืนแสง (Chromophoric group) อันเป็นผลที่เกิดขึ้นภายใต้อุณหภูมิสูง ก๊าซออกซิเจน ก๊าซโอโซน น้ำ และเชื้อจุลินทรีย์ ด้วยเหตุนี้จึงต้องป้องกันและลดการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ ด้วยการเติมสารคงสภาพดังนี้

สารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน (Antioxidants) โดยทั่วไปแล้ว โครงสร้างพอลิเมอร์ที่พลังงานพันธะแตกสลายพันธะต่ำสุดคือ C-H เรียงลำดับจากน้อยไปหามากดังนี้ ปฐมภูมิ > ทุติยภูมิ > ตติยภูมิ และพวก Allylic hydrogen เช่น พอลิพรอพิลีน และบิวทาไดอีน จะเกิดอนุมูลอิสระสลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และจับโลหะ ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เสถียรขึ้น

สารป้องกันแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV protectors) ทำหน้าที่ลดอันตรายที่เกิดจากรังสี (ความยาวคลื่น 290 – 400 nm) โดยดูดซับพลังงานก่อนพอลิเมอร์ และไม่เกิดการสลายตัว ตัวอย่างเช่น 2-hydroxyl benzophenones carbon black เป็นต้น

สารหน่วงความว่องไวของโลหะ (Metal deactivators) ทำหน้าที่ให้โลหะเกิดสารประกอบเชิงซ้อน กับ Chelating agent เช่น Oxamides , Organic phosphites ซึ่งจะทำให้ความว่องไวในการเกิดออกซิเดชันกับพอลิเมอร์เกิดได้ช้าลง

2.8.2 สารตัวเติม (Fillers)

สารตัวเติมเป็นอนุภาคของแข็งที่ผสมกับพอลิเมอร์ เพื่อปรับปรุงสมบัติให้มีลักษณะจำเพาะ มีความแข็งแรงมากขึ้น หรือ เพื่อลดต้นทุนของผลิตภัณฑ์ สามารถแบ่งตามบทบาทเมื่อผสมในพอลิเมอร์ออกเป็น 2 ประเภทคือ

ตัวเติมชนิดเฉื่อย (Inert filler) สารประเภทนี้ ช่วยเพิ่มค่ามอดุลัส ปรับปรุงความเป็นฉนวนทางไฟฟ้า ลดต้นทุน และช่วยในกระบวนการผลิตง่ายขึ้น ตัวอย่างเช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ทาลคัม (Talcum) เป็นต้น

ตัวเติมชนิดเสริมแรง (Reinforcing filler) สารประเภทนี้ช่วยเพิ่มความแข็งแรงทางกล ความทนต่อแรงกระแทก และความแข็งแรงดึง ตัวอย่างเช่น เส้นใยแก้ว เส้นใย Kevlar เส้นใยธรรมชาติ และซิลิกา เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.3 สารพลาสติไซเซอร์ (Plasticizers)

สารพลาสติไซเซอร์เป็นสารที่เติมลงในพอลิเมอร์ เพื่อให้พลาสติคอ่อนตัวหรือนิ่ม และสามารถดัดโค้งงอได้ (Soft and flexible) และให้สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติคที่อุณหภูมิต่ำกว่าเดิม ทั้งนี้ เนื่องจากสารพลาสติไซเซอร์ จะช่วยให้เกิดช่องว่างระหว่างโมเลกุล พลังงานในการหมุนพันธะลดลง โดยการเข้าไปแทรกระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ทำให้ความแข็งแรงของสายโซ่โมเลกุลลดลง สารเคมีที่ใช้เป็นสารพลาสติไซเซอร์ ควรมีสมบัติดังนี้

- เป็นสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งเป็นของเหลวที่มีจุดเดือดสูง
- ควรมีพารามิเตอร์การละลายใกล้เคียงกัน กับ พอลิเมอร์ที่จะผสม
- มีเสถียรภาพ โดยสามารถต้านทานต่อการไหลซึมออกมา (Bleeding) การเคลื่อนไหว (Migration) และการขัดออก (Rub-off)
- ไม่ควรมีการตกผลึกในช่วงอุณหภูมิขณะใช้งาน
- มีเสถียรภาพต่อสารเคมี ไม่ติดไฟและไม่เป็นพิษ

2.8.4 สารช่วยผสม (Coupling agent)

สารช่วยผสมเป็นสารเติมแต่งที่ส่วนใหญ่เติมลงในพลาสติคที่ไม่มีขั้วเพื่อให้สารเติมแต่งชนิดอื่นๆ เช่น สารตัวเติมทั้งชนิดเสริมแรงหรือไม่เสริมแรง สามารถกระจายตัวได้ดีขึ้น โดยปกติสารช่วยผสมจะประกอบด้วยด้านที่มีขั้วเพื่อทำปฏิกิริยากับสารเสริมแรงที่มีขั้วและด้านที่ไม่มีขั้วเพื่อทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ทำให้การยึดเกาะของสารตัวเติมกับพอลิเมอร์ดีขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้น

การใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน (Maleic anhydride grafted polypropylene, MAPP) เป็นสารช่วยผสม ช่วยปรับปรุงการยึดติด และการกระจายตัวของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิพรอพิลีนที่ไม่มีขั้วกับ เส้นใยเซลลูโลสที่มีขั้ว สมบัติดังกล่าวเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดสมบัติคอมโพสิต MAPP ไม่เพียงแต่ทำให้ผิวของพอลิพรอพิลีนมีความแข็งแรงขึ้น แต่สามารถเกิดการเชื่อมโยงด้วยพันธะโคเวเลนต์กับหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนผิวของเส้นใยเซลลูโลส

การเกิดพันธะโคเวเลนต์ระหว่างมาเลอิกแอนไฮไดรด์ และหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนผิวของเส้นใยเซลลูโลส ได้ถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค IR (Infrared spectroscopy) ซึ่งปฏิกิริยาการเกิดพันธะ

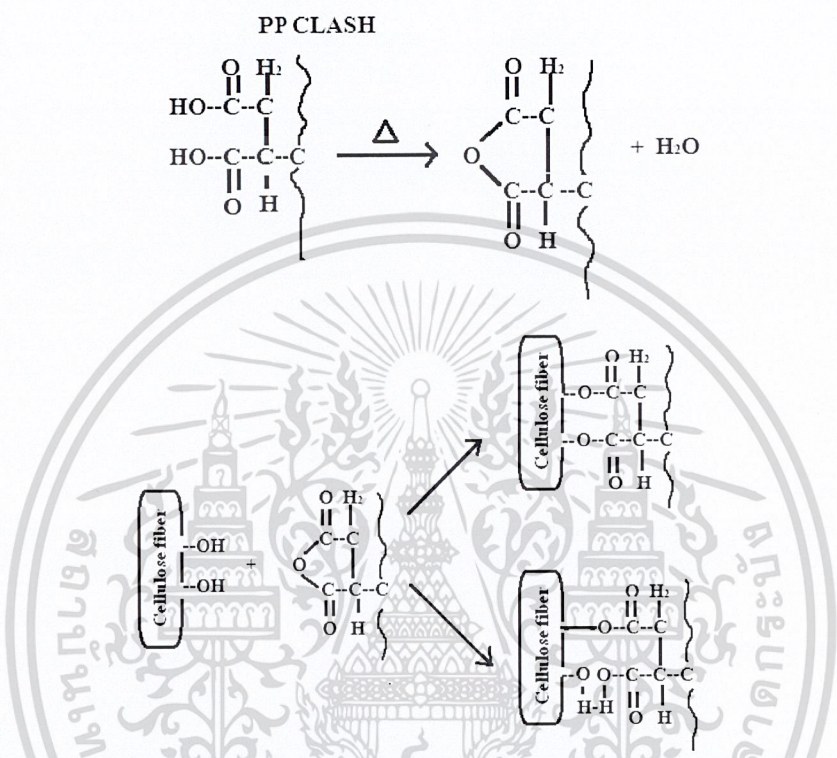
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นที่ 1 Activation of the copolymer

โคพอลิเมอร์จะเปลี่ยนรูปไปเป็นแบบแอนไฮไดรด์ซึ่งว่องไวกว่า

ขั้นที่ 2 Esterification of fiber

ทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification) กับเส้นใย



รูปที่ 2.18 การเกิดปฏิกิริยาของเส้นใยเซลลูโลสที่ทำการปรับสภาพด้วย MAPP[18]

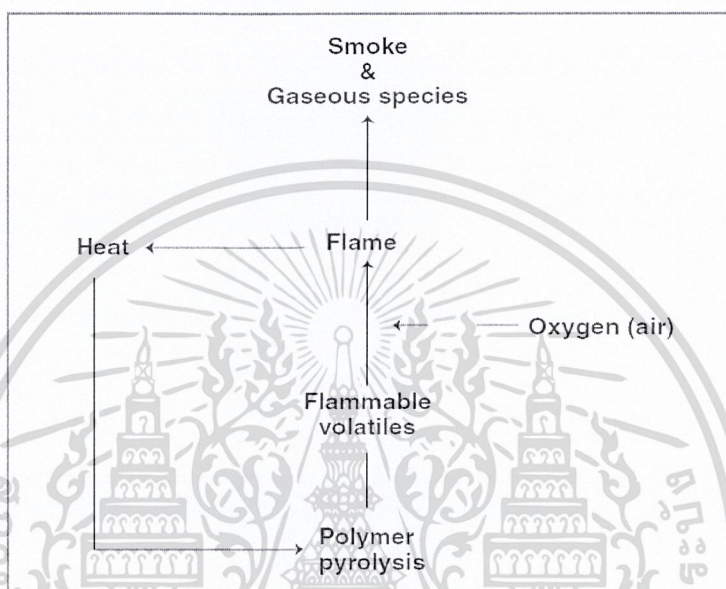
2.8.5 สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids)

สารช่วยกระบวนการผลิต คือ องค์ประกอบที่เติมเข้าไปในพอลิเมอร์เพื่อช่วยให้กระบวนการผลิตในขั้นตอนต่าง ๆ เช่น การผสม (Mixing) หรือการขึ้นรูป (Shape forming) เป็นไปได้ง่ายยิ่งขึ้น สารบางชนิดช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมให้ดีขึ้น เช่น สารบางตัวในกลุ่มนี้ช่วยลดความหนืดของพอลิเมอร์ผสมทำให้ของผสมไหลได้ง่ายยิ่งขึ้น จึงลดระยะเวลาและพลังงานที่ใช้ในการผลิต ตัวอย่างเช่น Enhance, Ultra WF107 เป็นต้น

2.8.6 สารหน่วงการติดไฟ (Flame retardants)[19]

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาร่วมระหว่างองค์ประกอบ 3 สิ่ง คือ เชื้อเพลิง (Fuel) ออกซิเจน (Oxygen) และความร้อน (Heat) เมื่อเกิดการเผาไหม้จะให้พลังงานความร้อนและพลังงานแสง ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกมา โดยความร้อนส่วนหนึ่งจะแพร่ออกไปและอีกส่วนหนึ่งจะย้อนกลับเข้ามาทำให้พอลิเมอร์เกิดก๊าซที่สามารถลุกติดไฟได้จากปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อนของพอลิเมอร์และเกิดการเผาไหม้ต่อไปอีกและเมื่อเชื้อเพลิงได้รับความร้อนจากการเกิดก๊าซหรือไอที่ผิวมากพอที่จะติดไฟได้และมีออกซิเจนในอากาศไม่ต่ำกว่าร้อยละ 16 ไฟก็จะติดขึ้น โมเลกุลของเชื้อเพลิงจะแตกตัวเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง จนแปรสภาพเป็นก๊าซแล้วลุกไหม้ต่อเนื่องกันไปเป็นลูกโซ่



รูปที่ 2.19 กระบวนการเผาไหม้ของวัสดุ[20]

ผลิตภัณฑ์พลาสติกทุกชนิดที่ผลิตมาจากพอลิเมอร์มักจะติดไฟง่ายเสมอ เนื่องจากพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ที่นำมาผลิตนั้นมักจะมีจุดหลอมเหลวไม่สูงมาก ทำให้เกิดการติดไฟได้ง่ายดังนั้นเราจึงต้องมีการเติมสารเติมแต่งชนิดหน่วงการติดไฟลงไป เพื่อให้สมบัติของพอลิเมอร์มีอายุการใช้งานที่นานและมีความปลอดภัยมากขึ้น

สารหน่วงการติดไฟที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. Reactive component เป็นสารที่มีหมู่ที่มีประสิทธิภาพในการหน่วงการติดไฟอยู่ในโครงสร้างหรือเป็นสารตัวกลางชนิดพิเศษที่แทรกอยู่ในพอลิเมอร์ระหว่างการเกิดพันธะ โครงสร้างสารเหล่านี้ไม่หลุดออกจากพอลิเมอร์ ไม่ระเหย และไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อน นิยมใช้กับพอลิเมอร์เทอร์โมเซต ซึ่งสารหน่วงการติดไฟเหล่านี้จะประกอบด้วยฮาโลเจน เช่น โบรมีน คลอรีน โดยเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการสลายตัวให้ก๊าซที่ดับไฟได้ออกมา ตัวอย่างเช่น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า Tribromo toluene และ pentabromo phenyl allyl เป็นต้น ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Additive flame retardant เป็นองค์ประกอบพื้นฐานของแร่ (Mineral) ที่เติมลงใน พอลิเมอร์หลังการสังเคราะห์ตัวพอลิเมอร์ นิยมใช้กับพอลิเมอร์เทอร์โมพลาสติก โดยเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการขจัดน้ำออกมา เช่น อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) นอกจากนี้ยังมีสารเคมีที่ทำหน้าที่เช่นเดียวกันนี้อีก อย่างเช่น สารประกอบแมกนีเซียมซัลเฟต แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) สังกะสีและอะลูมิเนียมบอเรต และแอนติโมนีไตร-ออกไซด์ (Sb_2O_3) เป็นต้น

2.8.6.1 ประเภทของสารหน่วงการติดไฟ

1. สารอินทรีย์ประเภทฟอสเฟต

สารอินทรีย์ประเภทฟอสเฟต เป็นสารหน่วงไฟที่ใช้กันมากในพวกพอลิไวนิลคลอไรด์ เซลลูลอสติก พอลิฟีนิลีนออกไซด์ และโพลียูรีเทนชนิดยืดหยุ่นพบว่า ประมาณ 60% เป็นเอสเทอร์ ประเภทวงแหวนเหมือนกับไตรคลอริลฟอสเฟตและประมาณ 40% เป็นฮาโลจีเนตเต็ด อัลคิลฟอสเฟต ซึ่งใช้กันมากในพวกยูรีเทน

2. คลอรีเนตเต็ดไฮโดรคาร์บอน (Chlorinated hydrocarbon)

สารหน่วงไฟประเภทนี้ อย่างเช่น คลอรีเนตเต็ดพาราฟินส์ (Chlorinated paraffins) มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบอยู่ 70% ใช้ในพอลิโอเลฟินส์ (Polyolefins) เช่น ใช้เป็นฉนวนสำหรับ ลวดและเคเบิล นอกจากนี้จะมีพวกออกซิเจนที่ล ดิคคลอเรน (Occidental dechlorane) หรือบิสเฮกซะคลอโรไซโคลเพนตาไดเอนออกเทน (Bis-hexachloro cyclopentadiene octane) ใช้ในพอลิโอเลฟินส์และไนลอน

3. ออร์แกโนโบรมีน (Organobromine)

สารหน่วงไฟประเภทนี้ อย่างเช่น เดคาโบรโมไดเฟนิลออกไซด์ (Decabromodiphenyl oxide) นิยมใช้ในพอลิสไตรีนที่ทนต่อแรงกระแทกและพอลิเมอร์ร่วมระหว่างอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอีนสไตรีน ส่วนโบรมิเนตเต็ดไซโคลอะลิฟาติก (Brominated cycloaliphatics) นิยมใช้ในโพลีพอลิสไตรีน

4. แอนติโมนีออกไซด์ (Antimony oxide)

สารหน่วงการติดไฟประเภทนี้นิยมใช้ร่วมกับออร์แกโนคลอรีนและออร์แกโนโบรมีน

5. โลหะออกไซด์ชนิดอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่พัฒนาขึ้นเพื่อลดการเกิดควันในระหว่างการเผาไหม้ ได้แก่ โบรอน ซิงค์ และโมลิบดีนัม พบว่า ผู้ทรงบางชนิดช่วยปรับปรุงให้สมบัติดีขึ้นมากสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.6.2 กลไกของการหน่วงการติดไฟ

1. การยับยั้งหรือการกำจัดอนุมูลอิสระ

โดยทั่วไปการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาของสายโซ่อนุมูลหลักในวัฏภาคที่เป็นไอ ในบางครั้งสารอินทรีย์ประเภทเฮโลเจนอาจเกิดอนุมูลโบรมีนและคลอรีนซึ่งเข้าไปแทรกแซงสายโซ่ที่เกิดออกซิเดชันช่วยในการยับยั้งหรือกำจัดอนุมูลอิสระได้ เช่นเดียวกับสารอินทรีย์ฟอสเฟตด้วย

2. การปกคลุมก๊าซที่ไม่รวมก๊าซออกซิเจน

สารหน่วงการติดไฟอาจทำให้เกิดก๊าซซึ่งปกคลุมผิวของพลาสติกซึ่งเป็นการรักษาพลาสติกไม่ให้สัมผัสกับออกซิเจนที่อยู่ในบรรยากาศและป้องกันการเผาไหม้ ก๊าซประเภทนี้ได้แก่โบรมีน ไฮโดรเจนคลอไรด์ แอนติโมนีออกไซด์ และไอน้ำ เป็นต้น

3. การเคลือบผิว

การเผาไหม้ของสารอินทรีย์ประเภทฟอสฟอรัสทำให้เกิดฟอสฟอรัสออกไซด์ซึ่งมีลักษณะคล้ายแก้วหลอม เมื่อแข็งตัวแล้วจะเคลือบสารอินทรีย์บนพลาสติก จัดเป็นสารที่ไม่เกิดการติดไฟและช่วยแยกออกซิเจนในบรรยากาศต่อไป

4. การเกิดถ่าน

กระบวนการเผาไหม้บางชนิดเปลี่ยนพอลิเมอร์ประเภทสารอินทรีย์ให้เป็นถ่านคาร์บอนที่มีฟองอยู่ โดยจะแยกออกซิเจนในบรรยากาศและทำหน้าที่เป็นฉนวนเก็บความร้อนของเปลวเพลิงไม่ให้ออกจากพลาสติกและป้องกันการแตกสลายของพลาสติกไปเป็นไอระเหยของสารอินทรีย์ที่เกิดจากการสันดาป

5. การดูดความร้อน

สารหน่วงการติดไฟที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงประเภทดูดความร้อนและมีผลทำให้พลาสติกเย็นลงต่ำกว่าอุณหภูมิของการสลายตัวจะช่วยป้องกันการเผาไหม้โดยการระเหยกลายเป็นไอน้ำได้ เช่น อะลูมิเนียมไตรไฮเดรต

6. การไหลเป็นหยดก่อนการเผาไหม้

ในการทดสอบเทอร์โมพลาสติกในห้องปฏิบัติการพบว่า ตอนปลายสุดของการเผาไหม้สารตัวอย่างที่หลอมเหลวเป็นหยดและมีเปลวไฟติดอยู่ด้วย แต่เมื่อทำให้สารตัวอย่างเย็นลงจะไม่เกิดการเผาไหม้อีกต่อไป เรียกพฤติกรรมแบบนี้ว่า “ การดับไฟด้วยตนเอง (Self extinguishing) ”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลือกใช้สารหน่วงการติดของเปลวไฟจะใช้ปริมาณมากน้อยเพียงไรขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ความไม่สามารถเข้ากันได้ (Incompatibility) การไหลออกจากเนื้อสาร (Exudation) ความเป็นพิษ (Toxicity) และเสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability) เป็นต้น โดยที่สารหน่วงการติดไฟในทางอุดมคติควรมีลักษณะ ดังนี้

- ช่วยหน่วงการติดของเปลวไฟได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีประสิทธิผล
- สามารถทนต่ออุณหภูมิของกระบวนการได้
- ไม่เกิดการกัดกร่อน ไม่มีพิษ และมีควันน้อย
- ไม่มีผลกระทบต่อสมบัติของพลาสติก
- สามารถเข้ากันได้ดีกับพลาสติก
- ไม่เกิดการไหลออกจากเนื้อพลาสติก (Bleeding)

การเติมสารหน่วงการติดของเปลวไฟมีผลหลักต่อสมบัติต่างๆ ของพลาสติกดังนี้

- สมบัติทางกล : ทำให้ความแข็งแรงลดลง
 - สมบัติทางไฟฟ้า : ทำให้การนำไฟฟ้าลดลง
 - สมบัติทางเคมี : ชนิดที่เป็นสารปรับแต่งทำให้ความต้านทานต่อสารเคมีลดลง
 - สมบัติทางความร้อน : ชนิดที่เป็นสารปรับแต่งทำให้การนำความร้อนลดลง
- แต่ถ้า เป็นแบบว่องไวต่อปฏิกิริยาจะช่วยปรับปรุง
ความต้านทานต่อความร้อน
- สมบัติเมื่อเวลาผ่านไป (Aging) : ในระยะยาวมีผลทำให้สมบัติลดลง

2.8.6.3 วิธีการทดสอบการเผาไหม้[20]

วิธีการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการติดไฟและประเมินความเสี่ยงภัยมีอยู่หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้กันในห้องปฏิบัติการหลักๆ มีดังนี้

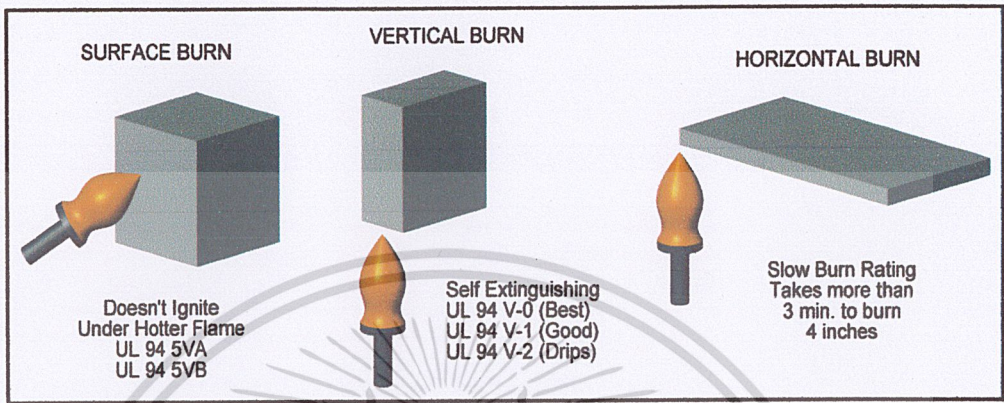
1. การทดสอบแบบยูแอล 94 (UL 94 Testing)

วิธีทดสอบแบบ UL 94 เป็นการบ่งชี้เบื้องต้นสำหรับการยอมรับได้ของพลาสติกที่จะนำมาใช้ประโยชน์ในส่วนหนึ่งของอุปกรณ์หรือเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ ด้วยการพิจารณาถึงขีดความสามารถในการติดได้ของวัสดุที่นำมาทำเป็นชิ้นงานส่วนประกอบ โดยวิธีการนี้ไม่ได้มี

จุดมุ่งหมายที่จะแสดงให้เห็นถึงอันตรายของวัสดุภายใต้การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจริง แต่เป็นเพียงการประเมินเบื้องต้นในการจุดติดของเปลวไฟสำหรับพลาสติกแต่ละชนิดเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนวัสดุสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะเพื่อการค้า หรือเพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการทดสอบแบบ UL 94 สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลักๆ คือ การเผาไหม้แบบแนวนอน การเผาไหม้บริเวณพื้นผิว และการเผาไหม้แบบแนวตั้ง โดยมีลักษณะการเผาไหม้ดังรูปที่ 2.20



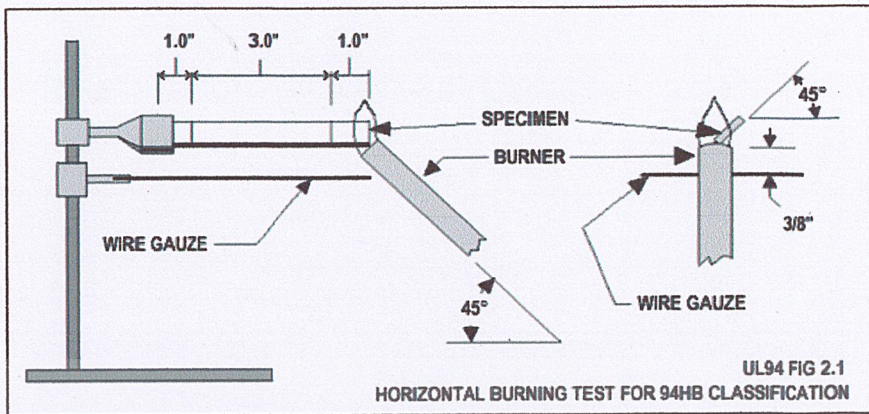
รูปที่ 2.20 ลักษณะการเผาไหม้ชิ้นงานทดสอบของแต่ละประเภท[20]

แต่ละประเภทสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับรูปร่างของผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ เช่น แผ่น (Sheet) ท่อ (Tube) ท่อน (Rod) และฟิล์ม (Film) อธิบายพอสังเขปดังนี้

1.1 การเผาไหม้แบบแนวนอน (Horizontal Burning Test) [21]

การเผาไหม้แบบแนวนอนหรือวิธี “ 94H-B ” เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด โดยที่แท่งพลาสติกจะถูกวางอยู่ในแนวราบโดยปลายด้านหนึ่งผูกติดไว้ ถ้าพลาสติกโค้งงอได้อาจช่วยพยุงด้วยตะแกรงและมีตะเกียบหนุนชิ้นวางอยู่ได้ปลายอีกด้านหนึ่ง ถ้าพลาสติกไม่ติดไฟจะรายงานว่า “ไม่เกิดการเผาไหม้ (Non-burning)” ถ้าพลาสติกติดไฟต้องวัดอัตราการเกิดเปลวไฟในหน่วยนิ้วต่อนาที และรายงานผลเป็น “อัตราการเผาไหม้ (Rate of burning)” ถ้าติดไฟเพียงครึ่งทางแล้วหยุดจะรายงานเป็น “สามารถดับได้ด้วยตนเอง (Self-extinguishing)” และรายงานระยะทางที่ถูกเผาไหม้เป็นนิ้ว ซึ่งวัสดุที่มีความหนาน้อยกว่า 0.918 นิ้ว จะถูกจำแนกให้อยู่ในวิธี 94H-B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 ลักษณะการจัดอุปกรณ์สำหรับการทดสอบการเผาไหม้แบบแนวนอน[21]

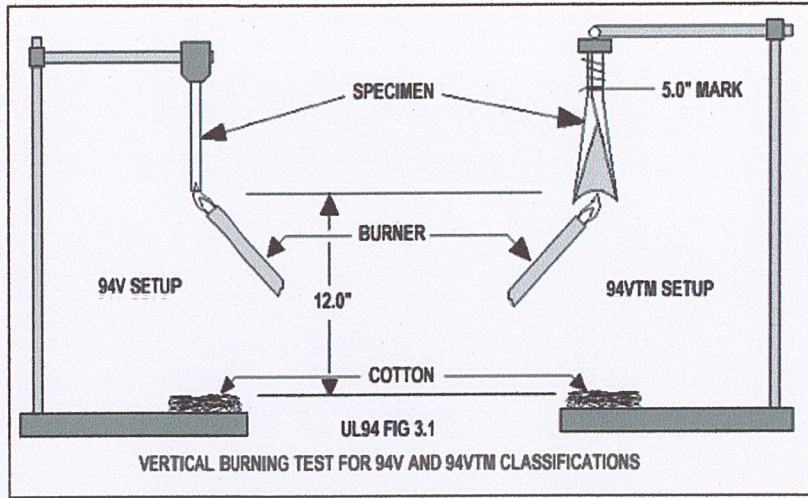
1.2 การเผาไหม้บริเวณพื้นผิว (Surface Burning Test)

การเผาไหม้บริเวณพื้นผิว เป็นวิธีการทดสอบที่ทำการใช้เปลวไฟเผาไหม้บริเวณพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบ แล้วพิจารณาถึงระยะเวลาในการเผาไหม้และดับไฟได้ด้วยตัวเอง รวมถึงพิจารณาลักษณะทางกายภาพหลังจากที่เกิดการเผาไหม้ เช่น เมื่อทำการเผาไหม้จะเกิดรูหรือช่องว่างเกิดขึ้นบนพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบซึ่งวิธีนี้จะมีอยู่ 2 ประเภท คือ 94-5VA และ 94-5VB

1.3 การเผาไหม้แบบแนวตั้ง (Vertical Burning Test)[22]

การเผาไหม้แบบแนวตั้ง เป็นวิธีการทดสอบที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายไม่ซับซ้อน และสามารถประเมินผลได้อย่างมีประสิทธิภาพ เรียกสั้นๆ ว่า “94-V” ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ 94-V0, 94-V1 และ 94-V2 โดยทำการนำชิ้นงานทดสอบที่มีขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว \times 5 นิ้ว มาวางในแนวตั้งปลายด้านหนึ่งถูกยึดติดไว้ จากนั้นก็นำเปลวไฟมาเผาชิ้นงานทดสอบ โดยมีเส้นใยฝ้าย (Cotton) มารองรับเพื่อศึกษาถึงการเผาไหม้แบบหยด (Drips burning) ของวัสดุบางชนิด แต่สำหรับชิ้นงานทดสอบที่มีลักษณะบางจะใช้วิธีทดสอบที่มีลักษณะเช่นเดียวกันกับวิธี 94-V แต่ชิ้นงานทดสอบต้องบางและมีขนาด 8 นิ้ว \times 2 นิ้ว ซึ่งจะนำมาวัดตามยาวเป็นรูปทรงกรวย โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ $\frac{1}{2}$ นิ้ว คือ การเผาไหม้แบบแนวตั้งของวัสดุบาง (Thin material vertical burning test, 94-VTM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 ลักษณะการเปรียบเทียบข้อแตกต่างในการจัดอุปกรณ์สำหรับทดสอบ

การเผาไหม้แบบ 94-V และ 94-VTM[22]

จากวิธีดังกล่าวข้างต้น สามารถสรุปลักษณะการบ่งชี้เบื้องต้นและการประเมินการจุดติด
ของเปลวไฟของแต่ละประเภทตามตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ลักษณะความสามารถในการติดไฟของวิธีการทดสอบแต่ละชนิด[23]

การบ่งชี้ลักษณะ	ลักษณะการวิเคราะห์ผลความสามารถในการติดไฟ
5VA Surface Burn	การเผาไหม้สามารถหยุดภายใน 60 วินาทีและตัวอย่างทดสอบ ไม่มีการเผาไหม้จนทะลุผ่าน (ไม่มีรู/ช่อง)
5VB Surface Burn	การเผาไหม้สามารถหยุดภายใน 60 วินาทีและตัวอย่างทดสอบ มีการเผาไหม้จนทะลุผ่าน (มีรู/ช่อง)
V-0 Vertical Burn	การเผาไหม้หยุดภายใน 10 วินาที ไม่มีการไหลหยด และไม่เกิดการลุกไหม้ของเปลวไฟภายใน 30 วินาที
V-1 Vertical Burn	การเผาไหม้หยุดภายใน 60 วินาที ไม่มีการไหลหยด และไม่เกิดการลุกไหม้ของเปลวไฟภายใน 60 วินาที
V-2 Vertical Burn	การเผาไหม้หยุดภายใน 60 วินาที มีการไหลหยด และไม่เกิดการลุกไหม้ของเปลวไฟภายใน 60 วินาที
H-B Horizontal Burn	ถ้าไม่ติดไฟจะรายงานว่า “ ไม่เกิดการเผาไหม้ ” ถ้าติดไฟจะรายงานเป็น “ อัตราการเผาไหม้ ” ในหน่วยนิ้ว/นาที ถ้าอัตราการเผาไหม้ที่น้อยกว่า 3 นิ้ว/นาที หรือหยุดเผาไหม้ก่อนจุดที่ทำให้ เครื่องหมายบอกระยะ 5 นิ้วจะรายงานเป็น “ การดับไฟได้ด้วยตัวเอง ”

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องแจ้งถึงแหล่งเอกสารที่ต้นฉบับไปให้

2. ดัชนีออกซิเจนหรือการทดสอบแบบเทียนไข (Oxygen index or Candle test)

วิธีการทดสอบนี้จะวางพลาสติกยาวเข้าไปในหลอดแก้วที่อยู่ตามแนวตั้งและตรึงไว้ที่ฐาน ผสมก๊าซออกซิเจนและไนโตรเจนในอัตราส่วนที่ถูกควบคุมและป้อนเข้าไปที่ฐานของหลอดทดสอบอย่างต่อเนื่องและออกทางรูเปิดด้านบน จากนั้นนำเปลวไฟจ่อลงตรงส่วนบนสุดของตัวอย่างพลาสติก เพื่อให้เกิดการเผาไหม้เหมือนจุดติดเทียนไข ถ้าไม่เกิดการลุกไหม้ให้ลดเปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนลงจนกระทั่งหยุด ส่วนเปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนวิกฤต (Critical percent oxygen) ซึ่งเป็นเส้นแบ่งกันการลุกไหม้พอลิเมอร์จะรายงานเป็นดัชนีออกซิเจน (Oxygen index)

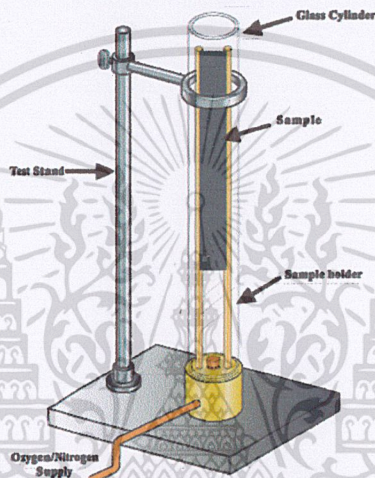


Figure 1 - Schematic of oxygen index test system

รูปที่ 2.23 การทดสอบการเผาไหม้ด้วยวิธีดัชนีออกซิเจน[24]

2.9 การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

M.Sain และคณะ [25] ทำการศึกษาสมบัติของสารหน่วงไฟและสมบัติเชิงกลของสารประกอบระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับพอลิพรอพิลีน(PP) โดยการผสมส่วนผสมต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สูตรผสมในการทดลอง[25]

Formulation of the mixes

Ingredients	Mix number						
	A	B	C	D	E	F	G
PP	100	47.5	47.5	47.5	47.5	47.5	47.5
Sawdust	-	50	25	25	25	-	-
Rice Husk	-	-	-	-	-	50	25
E-43 (coupling agent)	-	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Magnesium hydroxide	-	-	25	20	20	-	25
Boric acid	-	-	-	-	5	-	-
Zinc Borate	-	-	-	-	5	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามทำซ้ำหรือดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการผสมแบบหลอมเหลว (Melt blending) แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำมาบดให้มีลักษณะเป็นก้อนกลมๆ นำมาฉีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 204 °C โดยใช้เครื่องฉีดขึ้นรูป ตัวอย่างที่ได้นำมาทดสอบความสามารถในการติดไฟโดยใช้เทคนิค Oxygen index tests (OI) พบว่า สูตรผสม C สามารถลดประสิทธิภาพของการติดไฟได้มากที่สุด 35% รองลงมาคือ สูตรผสม E ที่มีสารเติมสารซิงค์บอเรต (Zinc borate) 5 php มีค่า OI 30% และเมื่อนำตัวอย่างที่ได้มาทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า วัสดุประกอบที่ผสมสารหน่วงไฟ (สูตรผสม C, D, E และ G) จะมีความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) และความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) น้อยกว่าพอลิพรอพิลีนที่ผสมซีลีเนียมหรือแคลบเพียงอย่างเดียว (สูตรผสม B และ F) แต่มีสมบัติเชิงกลที่มากกว่าพอลิพรอพิลีนอย่างเดียว

N.M. Stark และคณะ[26] ทำการประเมินสารหน่วงไฟหลากหลายชนิดเพื่อใช้เป็นสารหน่วงไฟในวัสดุประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนกับผงไม้ (Wood-flour) โดยสารหน่วงไฟที่ทำการศึกษา ได้แก่ เดคาโบรโมไดฟีนิลออกไซด์ (Decabromodiphenyl oxide, DBO), แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Magnesium hydroxide, MH), ซิงค์บอเรต (Zinc borate, ZB), เมลามีนฟอสเฟต (Melamine phosphate, MP) และแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (Ammonium polyphosphate, AP) ซึ่งสารหน่วงไฟเหล่านี้จะถูกผสมเข้ากับพอลิเอทิลีนและผงไม้ที่ความเข้มข้น 10% โดยน้ำหนัก ในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin screw extruder) จากนั้นนำมาขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างเพื่อมาวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding) ซึ่งจะนำตัวอย่างที่ได้มาทดสอบประสิทธิภาพการเผาไหม้ ด้วยวิธีดัชนีออกซิเจน (Oxygen index) วัดอัตราการปลดปล่อยความร้อน (Heat release rate, HRR) วัดช่วงเวลาในการเผาไหม้ (Ignition time, IT) วัดอัตราการสูญเสีย น้ำหนัก (Mass loss rate, MLR) และประสิทธิภาพการเผาไหม้ทางความร้อน (Effective heat of combustion, EHO) ด้วยเครื่อง Cone calorimeter และนำมาทดสอบสมบัติเชิงกลทางด้านความยืดหยุ่น (Flexural modulus of elasticity, MOE) ด้วยวิธีมาตรฐาน ASTM D790 ในแต่ละตัวอย่าง ซึ่งจากการทดลองทั้งหมด พบว่า สารหน่วงไฟแต่ละชนิดจะให้สมบัติกับวัสดุประกอบแตกต่างกัน ดังนี้

- DBO จะช่วยปรับปรุงพีก (Peak) ของค่า HRR เกิดขึ้นหลังผ่านไป 60 วินาทีและทำให้วัสดุประกอบมีค่า MLR และ EHO น้อยที่สุด อย่างไรก็ตาม DBO จะไม่เปลี่ยน

ค่าของ MOE และไม่ช่วยปรับปรุงด้านความแข็งแรงให้กับวัสดุประกอบ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- MH จะช่วยเพิ่มค่า IT ได้มากที่สุดและช่วยปรับปรุงฟลักของค่า HRR เกิดขึ้นหลังผ่านไป 60 วินาทีได้ดีที่สุด อย่างไรก็ตาม MH จะทำให้วัสดุประกอบมีการปลดปล่อยความร้อนรวม (Total heat release) ต่ำที่สุด
- ZB จะมีค่าดัชนีออกซิเจนต่ำที่สุดและมีค่าค่า HRR เกิดขึ้นหลังผ่านไป 300 วินาที อย่างไรก็ตาม ZB จะทำให้วัสดุประกอบมีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด
- MP ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพในการเผาไหม้ของวัสดุประกอบเพียงบางส่วนเท่านั้น
- AP จะช่วยให้มีค่าดัชนีออกซิเจนมากที่สุดและมีฟลักของค่า HRR เกิดขึ้นหลังผ่านไป 60 และ 300 วินาที อย่างไรก็ตาม วัสดุประกอบที่มี AP ผสมจะมีค่า IT สิ้นที่สุดและมีค่าการปลดปล่อยความร้อนรวมสูงที่สุด อีกทั้งยังทำให้ประสิทธิภาพทางสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบลดลงด้วย

ดังนั้นการผสมสารหน่วงไฟกับไม้พลาสติก ควรพิจารณาถึงองค์ประกอบและประสิทธิภาพของสารหน่วงไฟแต่ละชนิดให้เหมาะสมกับ WPCs แต่ละประเภทด้วย

A. De Chirico และคณะ[27] ทำการศึกษาถึงสารหน่วงไฟ (Flame retardant, FR) สำหรับพอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP) ที่มีองค์ประกอบของลิกนิน (Lignin, LIG) เป็นหลัก ซึ่งสารหน่วงไฟที่ทำการวิเคราะห์ได้แก่ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminium hydroxide, $\text{Al}(\text{OH})_3$), พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly (vinyl) alcohol, PVA) และพวกสารประกอบฟอสเฟต (Phosphate compound) โดยแบ่งการศึกษาเป็น 2 สูตร คือ PP 85% ผสม LIG 15% และ PP 80% ผสม LIG 14% และผสม FR อีก 6% จากนั้นนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง คอนแคลอริมิเตอร์ (Cone calorimeter) เพื่อศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่า PP ที่ผสม LIG เพียงอย่างเดียวและ PP ที่ผสม LIG กับ $\text{Al}(\text{OH})_3$ หรือ PVA จะให้ปริมาณควันและคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในระหว่างการเผาไหม้ต่ำมาก แต่มีเวลาในการเผาไหม้รวม (Total combustion time) ที่สั้นกว่าสารประกอบฟอสเฟตที่ให้เวลาในการเผาไหม้รวมที่นานมาก แสดงให้เห็นว่า สารหน่วงไฟประเภทสารประกอบฟอสเฟตจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการหน่วงไฟให้กับพอลิพรอพิลีนที่มีองค์ประกอบของ LIG เป็นหลัก

S.A. A. Ramazani และคณะ[28] ทำการศึกษาสมบัติของสารหน่วงไฟ สมบัติทางกายภาพ – เชิงกลของคอมโพสิตระหว่างพอลิพรอพิลีน (PP) กับซิงค์โบเรต (Zinc borate, ZnB) และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) โดยการผสมพอลิพรอพิลีนกับแคลเซียมสเตียเรต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Calcium stearate), มาเลอิกแอนไฮไดรด์ต่อกิ่งพอลิพรอพิลีน (MAPP), $\text{Al}(\text{OH})_3$ และผงของ ZnB ที่อัตราส่วนต่างๆ กันด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (Single screw extruder) ด้วยความเร็วรอบ 60 rpm เพื่อเตรียมตัวอย่างทดสอบสมบัติเชิงกลตามมาตรฐาน ASTM D638 และ ASTM D256 พบว่าการเพิ่มปริมาณสารตัวเติม (Filler) ของทุกตัวอย่างจะเป็นการลดค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และค่าการยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) ลง แต่จะเพิ่มค่ามอดุลัสแรงดึง (Tensile modulus) นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณ MAPP จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ในคอมโพสิตที่มีปริมาณ $\text{Al}(\text{OH})_3$ และ ZnB เท่ากับ 10% โดยน้ำหนักได้ดีที่สุดเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต และเมื่อนำตัวอย่างที่ได้มาทดสอบความสามารถในการติดไฟด้วยวิธี Limiting oxygen index (LOI) จะพบว่า $\text{Al}(\text{OH})_3$ และ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ที่ผสมกับ ZnB จะช่วยเพิ่มค่า LOI ซึ่งสามารถปรับปรุงสมบัติการหน่วงไฟของคอมโพสิตได้ แต่ตัวอย่างที่มีการผสม MAPP เข้าไปจะลดค่าของ LOI ลง สรุปได้ว่า การผสมสาร $\text{Al}(\text{OH})_3$ และ ZnB เข้ากับพอลิพรอพิลีนจะลดสมบัติเชิงกลบางประการของคอมโพสิตแต่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการหน่วงไฟของคอมโพสิต

กนกอร แสงสุวรรณ[29] ทำการศึกษาไม้พลาสติกจากพอลิโเอเลฟินส์และเส้นใยมะพร้าว โดยศึกษาผลของขนาดเส้นใยมะพร้าว (เบอร์ 1, 2, 3 และ 4) ที่เติมในไม้พลาสติก ผลของอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างพอลิพรอพิลีน (Polypropylene ; PP) กับเส้นใยมะพร้าว (100:0 70:30 60:40 และ 50:50) และศึกษาผลของปริมาณสารช่วยผสม (Compatibilizer) โดยใช้พอลิพรอพิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Polypropylene grafts maleic anhydride; MAPP) (1, 2 และ 3%wt) จากนั้นนำมาผสมด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) แล้วนำมาขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) จากนั้นนำไปศึกษาสมบัติต่างๆ คือ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกายภาพ และสัณฐานวิทยา จะพบว่า เส้นใยมะพร้าวเบอร์ 2 อัตราส่วนระหว่างพอลิพรอพิลีนกับเส้นใยมะพร้าว 50:50 และปริมาณของสารช่วยผสม MAPP ที่ 2 %wt จะให้ค่าความแข็งแรง (Hardness) ความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) มอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus) และความต้านทานการยึดเหนี่ยวของตะปูเกลียว (Screw holding) สูงที่สุด นอกจากนี้ปริมาณของสารช่วยผสม MAPP ที่ 2 %wt ยังให้เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำต่ำที่สุดด้วย

G. Fontaine และคณะ[30] ได้ทำการสังเคราะห์สารประกอบฟอสฟอรัสชนิดใหม่ที่เรียกว่า

Neutralize intumescent fire retardant (NIFR) จากการทำปฏิกิริยาของ Phosphoryl thichloride กับ Pentaerythritol ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อใช้เป็นสารหน่วงไฟในปริมาณ 30% โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สมานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนักของพอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP) และทำการศึกษาผลของปรากฏการณ์ซินเนอ-
 จิสติก (Synergistic effect) ของสารซิงค์บอเรต (Zinc borate, ZB) ซึ่งมีอยู่ด้วยกันอยู่ 3 ประเภททาง
 การค้า คือ FB290 : $2ZnO \cdot 3B_2O_3 \cdot 3H_2O$, FB415 : $4ZnO \cdot B_2O_3 \cdot H_2O$ และ FB500 : $2ZnO \cdot 3B_2O_3$ โดย
 จะทำการผสมที่ความเข้มข้น 1% และ 2% โดยน้ำหนัก แล้วทำการผสมรวมกันด้วยเครื่องอัดรีด
 แบบสกรูคู่ (Twin screw extruder) ที่อุณหภูมิ 205 °C ด้วยความเร็วรอบ 40 rpm จากนั้นนำมาอัด
 ให้เป็นแผ่น (sheet) เพื่อนำมาวิเคราะห์การเผาไหม้ด้วยวิธีขีดจำกัดออกซิเจน (Limiting oxygen
 index, LOI) จะพบว่า PP ที่ผสมสาร NIFR จะช่วยเพิ่มค่า LOI จาก 18 vol.% (ค่า LOI ของ PP
 บริสุทธิ์) เป็น 30 vol.% สำหรับสูตรที่มีการผสม FB290 และ FB415 ที่ความเข้มข้น 1% โดย
 น้ำหนักจะเพิ่มค่า LOI สูงสุดถึง 36 และ 38 vol.% ตามลำดับ ส่วนในกรณีของ FB500 ที่ความ
 เข้มข้น 2% โดยน้ำหนักจะเพิ่มค่า LOI ได้สูงสุดถึง 39 vol.% แสดงให้เห็นว่า สาร NIFR ที่
 สังเคราะห์ขึ้นใหม่สามารถเป็นสารหน่วงไฟให้กับ PP ได้และ ZB ช่วยให้เกิด Synergistic effect
 กับสาร NIFR ในการเป็นสาร หน่วงไฟได้เป็นอย่างดี

S. Nitinat และ K. Jarukumjorn [31] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและความสามารถในการ
 การคิดไฟของวัสดุประกอบระหว่าง พอลิพรอพิลีน (PP) กับป่านศรนารายณ์ (Sisal) ซึ่งใช้
 แมกนีเซียม ไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) และซิงค์บอเรต (Zinc borate) เป็นสารหน่วงไฟ ทำการ
 ผสมพอลิพรอพิลีนกับป่านศรนารายณ์ สารหน่วงไฟ และพอลิพรอพิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮ-
 ไดรด์ (MAPP) ที่ใช้เป็นสารคู่ควบในเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) ที่อุณหภูมิ 170 °C เป็น
 เวลา 13 นาทีแล้วนำวัสดุประกอบที่ได้มาทำการฉีดขึ้นรูปผ่านแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 170 °C จะได้
 ชิ้นงานตัวอย่าง จากนั้นนำตัวอย่างมาวิเคราะห์ผลของความสามารถในการคิดไฟ พบว่า $Mg(OH)_2$
 ช่วยลดอัตราการเผาไหม้ของวัสดุประกอบพอลิพรอพิลีนกับป่านศรนารายณ์ ได้มีประสิทธิภาพ
 มากกว่า ZnB และไม่มีผลของปรากฏการณ์ซินเนอจิสติก (Synergetic effect) กับวัสดุประกอบเมื่อ
 ทำการเติมสารหน่วงไฟทั้งสองชนิด เมื่อนำมาทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology)
 พบว่า สารหน่วงไฟสามารถกระจายตัวภายในเมตริกซ์ของพอลิพรอพิลีนได้ดี และเมื่อนำตัวอย่าง
 มาวิเคราะห์ถึงสมบัติเชิงกล พบว่า วัสดุประกอบที่เติมสารหน่วงไฟทั้งสองชนิดจะมีค่าความ
 แข็งแรงกระแทก (Impact strength) ค่าใกล้เคียงกับพอลิพรอพิลีน อย่างไรก็ตาม วัสดุประกอบที่
 เติมสารหน่วงไฟทั้ง $Mg(OH)_2$ และ ZnB จะแสดงข้อเปรียบเทียบในสมบัติการดึงและการยืดหยุ่น
 กับวัสดุประกอบที่ไม่เติมสารหน่วงไฟ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเติม $Mg(OH)_2$ และ ZnB จะเพิ่ม
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติการหน่วงไฟให้กับวัสดุประกอบโดยไม่จำเป็นต้องตระหนักถึงสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบเหล่านี้

G.B. Premalal และคณะ[32] ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตที่เตรียมจากพอลิพรอพิลีนและผงแคลบ และคอมโพสิตที่เตรียมจากพอลิพรอพิลีนกับทาลคัม โดยใช้เครื่อง Brabender plasticoder ควบคุมอุณหภูมิที่ 180 °C ความเร็วรอบ 50 rpm ซึ่งทำการผสมสารตัวเติมที่ 0 15 30 45 และ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก (Hydraulic press) ที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำมาทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า เมื่อปริมาณของสารตัวเติมทั้งสองเพิ่มขึ้นในแต่ละคอมโพสิตทำให้มอดุลัสและความแข็งแรงโค้งงอมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงดึงเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง คอมโพสิตที่ใช้แคลบเป็นสารตัวเติมมีค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัสและความแข็งแรงโค้งงอต่ำกว่าคอมโพสิตที่ใช้ทาลคัมเป็นสารตัวเติม แต่มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดที่สูงกว่า

X. Chen และคณะ [33] ได้ทำการศึกษาการทำงานร่วมกันของ Hydroxy Silicone Oil (HSO) กับสารหน่วงไฟที่เติมลงไปในพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตซึ่งสารหน่วงไฟที่ใช้คือ Ammonium Polyphosphate (APP) และ Pentaerythritol (PER) แล้วทดสอบตามมาตรฐาน UL-94 โดยใช้เทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA), Cone calorimeter (CONE), ภาพถ่ายดิจิทัล และ X-ray photoelectron spectroscopy (XPR) เพื่อดูผลของ HSO ผลจาก CONE พบว่า HPO จะช่วยเสริมสมบัติด้านการหน่วงไฟให้กับคอมโพสิต โดย HSO จะทำปฏิกิริยากับ APP เกิดเป็น Silica phosphate ซึ่งมีโครงสร้างเหมือนเซรามิกส์ เป็นผลดีต่อชั้นป้องกันไฟ

F. Montezin และคณะ [34] ศึกษาสมบัติการหน่วงไฟและสมบัติเชิงกลของ PP-PE copolymer ที่ประกอบด้วยสารประกอบของโบรมีน / Antimony trioxide ผสมกับ Magnesium hydroxide หรือ Talc. ในการศึกษาได้นำทั้งสารประกอบของโบรมีน (Brominated compound) ที่มีการเพิ่ม Antimony trioxide (Sb_2O_3) ลงไป ผสมลงไปใน PP-PE copolymer แล้วทำการศึกษา โดยในการศึกษานี้จะใช้ Brominated trimethylphenyl indane (FR 1808) และ Poly(pentaromobenzyl acrylate) (FR 1025) รวมกันที่ปริมาณ 40% ซึ่งเกิดการหน่วงไฟที่ดี แล้วนำมาเทียบกับ PP-PE copolymer ที่เติม $Mg(OH)_2$ ในปริมาณ 64% สารที่เติมลงไปจะเปลี่ยนความต้านทานไฟและความแข็งแรงของ PP-PE copolymer อย่างไรก็ตาม การเติมสารในปริมาณมากก็มีผลต่อความต้านทานไฟ สิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 สำคัญอีกอย่างคือการที่เติมสารเติมแต่งลงไปนั้น ค่า Tensile strength ต่ำกว่าค่าสูงสุดในการ
 ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านทานไฟและสมบัติเชิงกล จะมีการศึกษาการใช้ Brominated flame –retardant 20% w/w รวมกับ $(\text{Mg}(\text{OH})_2)$ หรือ Talc. 20% w/w แล้วนำไปเปรียบเทียบกับ Brominated flame –retardant 40% w/w โดยใช้ Talc. เป็นสารอ้างอิง จากการทดลอง พบว่า Brominated compound จะให้ประสิทธิภาพในการต้านทานไฟได้ดีที่สุดที่ประมาณ 40% w/w ด้านสมบัติเชิงกลพบว่า PP-PE copolymer ที่เติมเฉพาะ Brominated flame –retardant อนุภาคจะไม่อัดแน่นเท่า PP-PE copolymer ที่มี Brominated flame –retardant 20% w/w กับ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 20% w/w เนื่องจาก Brominated trimethylphenyl indane มีอนุภาคที่ค่อนข้างใหญ่

J. Yang และคณะ[35] ศึกษาสมบัติการหน่วงไฟของคอมโพสิต PP/ $\text{Al}(\text{OH})_3/\text{Mg}(\text{OH})_2$ โดยใช้ Polypropylene (PP) ผสม Aluminium hydroxide ($\text{Al}(\text{OH})_3$) กับ Magnesium hydroxide ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) เป็นสารหน่วงไฟปริมาณ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 php โดยใช้เครื่อง Twin-screw extruder ในการเตรียมคอมโพสิต แล้วทำการวัดค่า Oxygen index (OI) ความเร็วในการเผาไหม้และความหนาแน่นของควัน จากผลการทดลองพบว่า ค่า OI จะมีค่าเพิ่มขึ้น ความเร็วในการเผาไหม้และความหนาแน่นของควันจะลดลง เมื่อมีปริมาณสารเติมแต่งมาก และค่า OI จะมีค่าลดลง ความเร็วในการเผาไหม้และความหนาแน่นของควันจะเพิ่มขึ้น เมื่ออนุภาคของสารเติมแต่งมีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น

S. Borysiak และคณะ [36] ได้ทำการศึกษาค่าการเติมอนุภาคของไม้ลงไปเนื้อพอลิเมอร์เพื่อศึกษาสมบัติในด้านความคงทนต่อการติดไฟ ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการเติมอนุภาคของเปลือกสนเข้าไปในปริมาณ 50% ลงไปที่พอลิพรอพิลีนที่มีค่า Melt Flow Index (MFI) แตกต่างกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ 3 ชนิด ดังนี้ Malen F-401 (ค่า MFI ต่ำสุด), Malen S-702 และ PP HY-202 (ค่า MFI สูงสุด) จากนั้นนำไปทดสอบการเผาไหม้ด้วยเครื่อง Cone Calorimeter โดยตั้งค่าการแผ่รังสีความร้อนที่ 35 kW/m^2 เพื่อศึกษาอัตราการปล่อยความร้อน (Heat Release Rate ; HRR) อัตราการสูญเสียมวล (Mass Loss Rate ; MLR), การก่อควัน (Smoke Generation ; SEA), การปล่อย CO/CO_2 และการติดไฟ พบว่าคอมโพสิตจะมีการติดไฟที่ช้ากว่าพอลิพรอพิลีน บริสุทธิ์ รวมทั้งอัตราการปล่อยความร้อน, อัตราการสูญเสียมวลเฉลี่ย, การก่อควัน และการปล่อยก๊าซพิษก็ที่ค่าลดลง ส่วนในด้านของตัว พอลิพรอพิลีนพบว่า พอลิพรอพิลีนที่มีค่า MFI สูงนั้นจะใช้เวลาในการติดไปนานกว่า อัตราการปล่อยความร้อนต่ำกว่า และเวลาในการเผาไหม้นานกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Md. M. Haque และคณะ [37] ได้ทำการศึกษาการเสริมพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตด้วยเส้นใยปาล์มและเส้นใยมะพร้าว ก่อนนำเส้นใยไปทำการทดสอบผสมต้องนำเส้นใยไปผสมกับ Benzene diazonium salt ก่อน เพื่อให้เข้ากับพอลิพรอพิลีนได้ดี โดยจะเติมลงไป 15, 20, 25, 30 และ 35 %wt ตามลำดับ แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล เพื่อเปรียบเทียบผลระหว่างเส้นใยปาล์มกับเส้นใยมะพร้าว และเพื่อดูปริมาณของ เส้นใยจากการทดลองพบว่าสมบัติเชิงกล (ยกเว้น Tensile strength) จะดีขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เติมลงไป แต่ที่ 35 %wt จะมีความยืดหยุ่นและค่า Impact strength น้อยกว่าที่ 30 %wt นอกจากนี้ยังพบว่าเส้นใยมะพร้าวจะทำให้คอมโพสิตที่สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเส้นใยปาล์ม

B.V. Kokta และคณะ[38] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิพรอพิลีนกับเส้นใยสน ซึ่งมีการปรับสภาพผิวในวิธีต่างๆ เพื่อปรับปรุงการยึดติดระหว่างพอลิพรอพิลีนกับเส้นใยสน โดยใช้ Polymethylene Polyphenylisocyanate (PMPPIC), Silane coupling agent (Silane A-172, Silane A-174, Silane-A1100) และอีโพลีนแว็กซ์ (Epolene wax) เป็นสารปรับสภาพผิวก่อนใส่ในพอลิเมอร์ โดยวิธีการผสมในเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งและขึ้นรูปด้วยวิธีกดอัดพบว่า การใช้อีโพลีนแว็กซ์เป็นสารช่วยกระจายเพียงอย่างเดียวสามารถเพิ่มค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัส และค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ได้ดี ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยจะเพิ่มค่าความแข็งแรงดึง และค่ามอดุลัส แต่ร้อยละการยืด ณ จุดขาดจะลดลง ในขณะที่ใช้ PMPPIC กับอีโพลีนแว็กซ์เป็นสารปรับสภาพผิวนั้นทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์มีค่าสูงสุด นอกจากนี้ยังพบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ให้ค่าสมบัติเชิงกลสูงสุดคือ 20 mesh

จากงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถสรุปประเด็นที่สำคัญได้ดังนี้

- ไม้พลาสติกควรมีอัตราส่วนระหว่างพอลิพรอพิลีนกับเส้นใยมะพร้าว 50:50 ซึ่งมีขนาดของเส้นใยมะพร้าว เบอร์ 2 (ขนาด 20-50 mesh) และปริมาณสารช่วยผสม (PP-g-MA) ที่ 2 %wt ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้ดีขึ้น
- การเติมอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ในช่วง 10 – 60 %wt จะช่วยหน่วงการติดไฟให้กับคอมโพสิตได้ดีและมีสมบัติเชิงกลลดลงเพียงเล็กน้อย
- การเติมซิงค์บอเรตในช่วง 5 – 10 %wt จะช่วยหน่วงการติดไฟให้กับคอมโพสิตได้ดีและให้สมบัติขึ้นเนอจิสติกกับคอมโพสิตโดยไม่ทำให้สมบัติเชิงกลลดลงมากเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

	สารเคมี	Grade	บริษัท
1	Polypropylene (PP) Moplen [®] EP300H	Commercial	HMC Polymers Company Co.,Ltd.
2	เส้นใยมะพร้าว (เบอร์ 2)	Commercial	MBJ Enterprise Co.,Ltd.
3	Polypropylene graft maleic anhydride (PP-g-MA) 3200	Commercial	Optimal Tech Co.,Ltd.
4	Zinc borate (Firebrake [®] ZB), ZnB	Commercial	Global Connections Publishing Co.,Ltd.
5	Aluminum hydroxide (Al(OH) ₃), (APYRAL 40CD), ATH	Commercial	Great Lakes Chemical Corporation Co.,Ltd.
6	Magnesium hydroxide(Mg(OH) ₂), (APYMAG 40S), MGH	Commercial	Behn Meyer Chemical (T) Co.,Ltd.
7	สารประกอบ Phosphate, (ZURAN [®] 484), Phosphate	Commercial	Behn Meyer Chemical (T) Co.,Ltd.
8	Phenolic antioxidant (Anox [®] 20)	Commercial	Great Lakes Chemical Corporation Co.,Ltd.
9	Phosphite antioxidant (Alkanox [®] 240)	Commercial	Great Lakes Chemical Corporation Co.,Ltd.
10	Processing aids (Ultra Plast [®] WF 107)	Commercial	Behn Meyer Chemical (T) Co.,Ltd.
11	Processing aids (Enhance [®])	Commercial	Behn Meyer Chemical (T) Co.,Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลของพอลิพรอพิลีน (Moplen® EP300H) ที่ใช้ในการทดลอง

สมบัติ	Moplen EP300H	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ
ดัชนีการหลอมไหล (230 °C/2.16 kg), (g/10min)	1.8	D 1238
ความหนาแน่น (g/cm ³)	0.9	D 792B
ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (MPa)	25	D 638
การยืด ณ จุดคราก (%)	9	D 638
มอดุลัสโค้งงอ (MPa)	1150	D 790A
ความแข็งแรงกระแทกแบบไอซอดที่ 23 °C (J/m)	No Break	D 256A

หมายเหตุ : ข้อมูลจากผู้ผลิต

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลของสารประกอบฟอสเฟต (ZURAN® 484) ที่ใช้ในการทดลอง

Properties	Phosphate compounds
Components	Pyrophosphoric acid salts
Particle size	< 10 µM
Melting point	274-285 °C (525-545 °F)
pH value	4.5-6.5 (10% suspension in water at 25 °C)
Nitrogen content	20-24%
Phosphorus content	18-21%

หมายเหตุ : ข้อมูลจากผู้ผลิต

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลของซิงค์โบเรต (Firebrake® ZB) ที่ใช้ในการทดลอง

Properties	Zinc borate
Symbol	Firebrake® ZB , ZnB
Refractive index	1.58
Particle size	2.1 µM
Specific gravity	2.77
Boric Oxide, B ₂ O ₃	48.05 %
Zinc Oxide, ZnO	37.45 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารข้อมูลจากผู้ผลิตการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 ข้อมูลของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (APYRAL 40CD) ที่ใช้ในการทดลอง

Properties	Aluminum hydroxide
Symbol	$\text{Al}(\text{OH})_3$, ATH
Content	99.5 %
Moisture	0.2 %
Loss on ignition	34.6 %
Particle size	- 0.6 D_{10} μm - 1.3 D_{50} μm - 3.2 D_{90} μm
Specific surface area	3.5 m^2/g
Density	2.4 g/cm^3

หมายเหตุ : ข้อมูลจากผู้ผลิต

ตารางที่ 3.5 ข้อมูลของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (APYMAG 40S) ที่ใช้ในการทดลอง

Properties	Magnesium hydroxide
Symbol	$\text{Mg}(\text{OH})_2$, MGH
Content	90 %
Moisture	0.5 %
Loss on ignition	31 %
Particle size	- 1 D_{10} μm - 5 D_{50} μm - 18 D_{90} μm
Specific surface area	4 m^2/g
Stearic acid	0.5 %
Density	2.4 g/cm^3

หมายเหตุ : ข้อมูลจากผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือ		รุ่น	บริษัท
1	ตู้อบ	7200 Tuttlingen/Germany	WTC Binder Co.,Ltd.
2	เครื่องชั่งน้ำหนัก ชนิดละเอียด	300-9466/3100 C	Precisa Instrumenta AG, CH- Dietikon Co.,Ltd.
3	เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two – roll mill)	LRM 110	Lab Tech Engineering Co.,Ltd.
4	เครื่องบดเม็ดพลาสติก (Grinder)	MUD 18H	Kasuga E.W. Co.,Ltd.
5	เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine)	LR5K	Lloyd Instrument Co., Ltd.
6	เครื่องวัดความทนทานต่อแรง กระแทกแบบไอซอด (Izod Impact Tester)	Yasuda	Yasuda Seiki Seisakusho Co.,Ltd.
7	เครื่องทดสอบความแข็งกด (Shore D Durometer Hardness Tester)	Yasuda	Yasuda Seiki Seisakusho Co.,Ltd.
8	เครื่องทดสอบสมบัติทาง ความร้อน, DSC (Differential Scanning Calorimeter)	Pyris Diamond DSC	Perkin Elmer instruments Co.,Ltd.
9	เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding Machine)	-	บริษัท ชัยเจริญการช่าง จำกัด
10	กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด SEM (Scanning Electron Microscope)	1455 VP	LEO Co.,Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 วิธีการผลิตเส้นใยมะพร้าวด้วยวิธีทางเชิงกล (Mechanical Pulp; MP)

1. นำกาบมะพร้าวที่ล้างสะอาดแล้วมาบดด้วยเครื่องบด (Grinder)
2. ทำการแยกขนาดโดยใช้เครื่องร่อนแยกขนาดที่มีตะแกรงร่อน ขนาด 20 50 และ 80 mesh เพื่อควบคุมขนาดของเส้นใย

ตารางที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเส้นใยกับขนาดของตะแกรงร่อน

เบอร์	ขนาดของตะแกรงร่อน	ขนาด (μm)
1	บนตะแกรงร่อนขนาด 20 mesh	841
2	ระหว่างตะแกรงร่อนขนาด 20 – 50 mesh	841 - 297
3	ระหว่างตะแกรงร่อนขนาด 50 – 80 mesh	297 - 177
4	ชั้นล่างตะแกรงร่อนขนาด 80 mesh	177

3.3.2 การเตรียมเส้นใยมะพร้าว

- นำเส้นใยมะพร้าวเบอร์ 2 มาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้น

ตอนที่ 1 ศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารหน่วงไฟที่เหมาะสมในการหน่วงไฟ

1. ทำการชั่งส่วนผสมทั้งหมดตามตารางที่ 3.7
2. ทำการผสมส่วนผสมที่เตรียมในแต่ละสูตรให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) โดยใช้อุณหภูมิในการผสมเท่ากับ 190 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการผสม 15 นาที
3. นำพอลิเมอร์ที่ผสมได้ไปทำการบดย่อยด้วยเครื่องบดเม็ดพลาสติก (Grinder)
4. นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่ทำการบดแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้น
5. นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมมาทำการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่อง Compression Molding Machine ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาทีและทำการหล่อเย็นต่ออีก 5 นาที ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. นำชิ้นงานที่ได้มาทดสอบสมบัติการลามไฟ

ตารางที่ 3.7 สูตรผสมที่ใช้ในการทดลอง (ตอนที่ 1)

สารเคมี (php)	สูตร														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
PP	100														
เส้นใยมะพร้าว (เบอร์ 2)	100														
(Al(OH) ₃), ATH	30	40	50	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(Mg(OH) ₂), MGH	-	-	-	-	30	40	50	60	-	-	-	-	-	-	-
สารประกอบ Phosphate	-	-	-	-	-	-	-	-	20	25	30	-	-	-	-
Zinc borate , ZnB	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	6	8	10
Processing aid, Enhance [®]	5														
Processing aid, WF [®] 107	1.5														
Antioxidant, Anox [®] 20	0.05														
Antioxidant, Alkanox [®] 240	0.05														
สารช่วยผสม, PP-g-MA	2														

หมายเหตุ - เส้นใยมะพร้าวต้องทำการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
เป็นเวลา 24 ชั่วโมงทุกครั้งก่อนทำการผสม

ตอนที่ 2 ศึกษาผลของปรากฏการณ์ซินเนอจิสติกต่อสมบัติของการหน่วงไฟ

1. ทำการชั่งสารเคมีตามตารางที่ 3.8
2. ทำการผสมส่วนผสมที่เตรียมในแต่ละสูตรให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) โดยใช้อุณหภูมิในการผสมเท่ากับ 190 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการผสม 15 นาที
3. นำพอลิเมอร์ที่ผสมได้ไปทำการบดย่อยด้วยเครื่องบดเม็ดพลาสติก (Grinder)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่ทำการบดแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้น
 5. นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมมาทำการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่อง Compression Molding Machine ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาทีและทำการหล่อเย็นต่ออีก 5 นาที ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส
- ตารางที่ 3.8 สูตรผสมที่ใช้ในการทดลอง (ตอนที่ 2)

สารเคมี (php)	สูตร		
	1	2	3
PP	100		
เส้นใยมะพร้าว (เบอร์ 2)	100		
(Al(OH) ₃), ATH	60	-	-
(Mg(OH) ₂), MGH	-	60	-
สารประกอบ Phosphate	-	-	25
Zinc borate, ZnB	10	10	10
Processing aid - Enhance [®]	5		
Processing aid - WF [®] 107	1.5		
Antioxidant - Anox [®] 20	0.05		
Antioxidant - Alkanox [®] 240	0.05		
สารช่วยผสม - PP-G-MA	2		

หมายเหตุ - เส้นใยมะพร้าวต้องทำการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงทุกครั้งก่อนทำการผสม

6. นำชิ้นงานที่ได้มาทดสอบสมบัติการลามไฟ

ตอนที่ 3 ศึกษาสมบัติต่างๆ ของพลาสติกคอมโพสิตที่ผลิตได้

1. ทำการชั่งสารเคมีตามตารางที่ 3.9
2. ทำการผสมส่วนผสมที่เตรียมในแต่ละสูตรให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) โดยใช้อุณหภูมิในการผสมเท่ากับ 190 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการผสม 15 นาที

3. นำพอลิเมอร์ที่ผสมได้ไปทำการบดย่อยด้วยเครื่องบดเม็ดพลาสติก (Grinder) ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่ทำการบดแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้น
5. นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมมาทำการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่อง Compression Molding Machine ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาทีและทำการหล่อเย็นต่ออีก 5 นาที ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3.9 สูตรผสมที่ใช้ในการทดลอง (ตอนที่ 3)

สารเคมี	ปริมาณ (php)
PP	100
เส้นใยมะพร้าว (เบอร์ 2)	100
Flame retardant	
- $(Al(OH)_3)$, ATH	60
- $(Mg(OH)_2)$, MGH	60
- สารประกอบ Phosphate	25
- Zinc borate, ZnB	10
- $(Al(OH)_3)$, ATH + ZnB	60 + 10
- $(Mg(OH)_2)$, MGH + ZnB	60 + 10
- สารประกอบ Phosphate + ZnB	25 + 10
Processing aid - Enhance [®]	5
Processing aid - WF [®] 107	1.5
Antioxidant - Anox [®] 20	0.05
Antioxidant - Alkanox [®] 240	0.05
สารช่วยผสม - PP-G-MA	2

หมายเหตุ - เส้นใยมะพร้าวต้องทำการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงทุกครั้งก่อนทำการผสม

6. นำชิ้นงานที่ได้มาทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อนและ สันฐานวิทยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.10 มาตรฐานต่างๆ ในการทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยรายงานผล
ความแข็งแรงกระแทก	ASTM D 256	kJ/m^2
ความแข็งกด	ASTM D 2240	Shore D
ความแข็งแรงโค้งงอ	ASTM D 790	MPa
มอดุลัสโค้งงอ	ASTM D 790	MPa
ความหนาแน่น	มอก. 966-2547	g/cm^3

3.4 การทดสอบสมบัติต่างๆ

3.4.1 สมบัติการลามไฟ

วิธีการทดสอบสมบัติการลามไฟในการทดลองนี้จะใช้วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน UL-94 โดยใช้ในการทดสอบการลามไฟแบบแนวนอน (Horizontal Burning Test) ดังนี้

- ชิ้นงานทดสอบมีขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว \times 5 นิ้ว โดยยึดปลายด้านหนึ่งไว้ตามแนวนอนและทำเครื่องหมายบอกระยะที่ 1 นิ้วและ 5 นิ้วจากปลายด้านที่ไม่ได้ยึด โดยจัดรูปแบบการทดลองดังรูปที่ 2.21
- ทำการจ่อเปลวไฟเป็นเวลา 30 วินาทีหรือจนกว่าจะเผาไปถึงระยะที่ทำเครื่องหมายบอกระยะไว้ 1 นิ้ว แล้วนำเปลวไฟออก
- ถ้าการเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจะทำการจับเวลาระหว่างจุดที่ทำเครื่องหมายบอกระยะที่ 1 นิ้ว และ 5 นิ้ว
- ถ้าการเผาไหม้หยุดก่อนจุดที่ทำเครื่องหมายบอกระยะ 5 นิ้วจะทำการบันทึกเวลาและระยะที่เผาไหม้ระหว่างสองจุดที่ทำเครื่องหมายไว้
- ทำการทดสอบชิ้นงานทั้งหมด 3 ตัวอย่าง

3.4.2 สมบัติเชิงกล

3.4.2.1 ความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอ

การหาค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) และมอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus) ตามมาตรฐาน ASTM D 790 [39] ใช้ชิ้นงานตัวอย่าง 10 ชิ้นในแต่ละครั้ง โดยสภาวะ

การทดสอบเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โหลดเซลล์ (Load cell) 5 kN
- ความเร็วในการกด (Compression speed) 10 mm/min
- ระยะห่างของขารองรับชิ้นงาน (Span length) 40 mm

สมการที่ใช้ในการคำนวณความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอ มีดังนี้

$$\text{ความแข็งแรงโค้งงอ ; } \sigma_f = \frac{1.5 FL}{Bh^2}$$

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

เมื่อ F คือ แรงกดสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานตัวอย่างโค้งงอ (N)

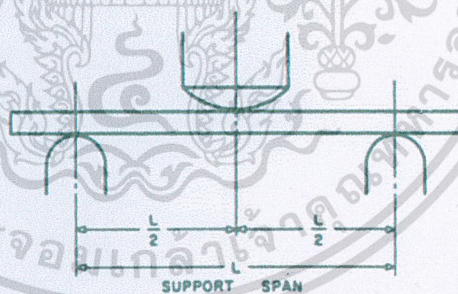
L คือ Span length (40 mm)

B คือ ความกว้างของชิ้นงานตัวอย่าง (mm)

h คือ ความหนาของชิ้นงานตัวอย่าง (mm)

ΔF คือ ผลต่างของแรงกดในช่วงความชันเป็นเส้นตรง (N)

Δd คือ ระยะกดโค้งงอ (mm)

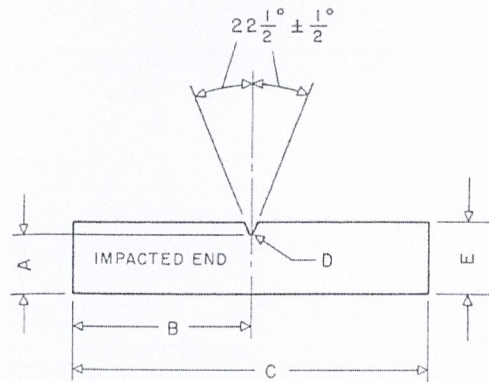


รูปที่ 3.1 ลักษณะการทดสอบความแข็งแรงและมอดุลัสโค้งงอ[39]

3.4.2.2 ความแข็งแรงกระแทก

การหาค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 256[40] โดยการทดสอบจะใช้มาตรฐานแบบไอซอด (Izod type) แบบมีรอยบาก (Notch) โดยใช้ชิ้นงานที่มีรอยบากลึก 0.1 นิ้ว ทดสอบตัวอย่างชิ้นงาน 10 ชิ้นในแต่ละครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



A	10.2 ± 0.05
B	32 ± 1
C	64 ± 2
D	0.25R ± 0.05
E	12.7 ± 0.2

รูปที่ 3.2 ขนาดชิ้นงานที่ใช้ทดสอบด้วยมาตรฐานแบบไอซอด[40]

ค่าความแข็งแรงกระแทกสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

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

เมื่อ IS คือ ค่าความแข็งแรงกระแทก (kJ/m²)

W คือ ค่าพลังงานกระแทก (kJ)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างที่แตกหัก (m²)

3.4.2.3 ความแข็งกด

การหาค่าความแข็งกด (Hardness tester ; Shore D) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 2240 [41] โดยใช้มาตรฐานแบบ Shore D ในการทดสอบ ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานที่นำมาทดสอบต้องเรียบ และมีความหนาไม่ต่ำกว่า 6 mm โดยแต่ละชิ้นงานกดทั้งหมด 10 จุดโดยไม่ซ้ำจุดเดิม และกดเป็นเวลา 5 วินาที จึงอ่านค่าได้

3.4.3 สมบัติทางกายภาพ

- ความหนาแน่น (Density)

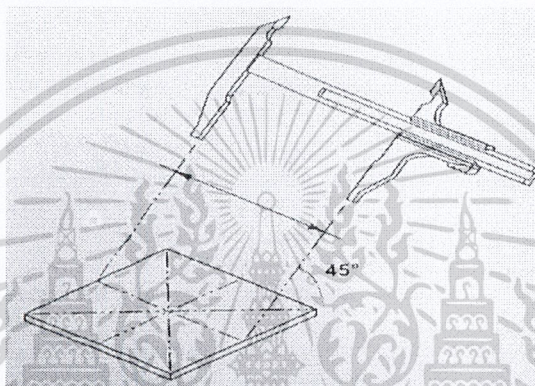
หาความหนาแน่นตามมาตรฐาน มอก. 966-2547 [42] สามารถหาได้โดยการ

เตรียมชิ้นทดสอบให้มีขนาด 50 mm x 50 mm จำนวน 3 ชิ้น ชั่งชิ้นทดสอบให้ได้มวลที่
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 สมบัติทางกายภาพ

- ความหนาแน่น (Density)

หาความหนาแน่นตามมาตรฐาน มอก. 966-2547 [42] สามารถหาได้โดยการเตรียมชิ้นทดสอบให้มีขนาด 50 mm x 50 mm จำนวน 3 ชิ้น ชั่งชิ้นทดสอบให้ได้มวลที่แน่นอน จากนั้นทำการวัดความหนาตรงจุดกึ่งกลาง ความกว้างและความยาวของชิ้นทดสอบ โดยวางเครื่องมือให้ทำมุมกับแนวระนาบของชิ้นทดสอบ ประมาณ 45 องศา ตามรูป ที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วิธีการวัดความกว้าง ความยาวของชิ้นทดสอบ [42]

3.4.4 สมบัติทางความร้อน

- Differential Scanning Calorimetry (DSC)

ชั่งตัวอย่างใส่อะลูมิเนียมแพน จำนวน 5 – 7 มิลลิกรัม ให้ทราบปริมาณที่แน่นอนแล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 20 °C/min อุณหภูมิสูงสุด 200 °C ศึกษาอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และพื้นที่ใต้กราฟ การคำนวณหา Heat of melting (ΔH) และ Degree of crystallinity จากสูตรดังนี้

$$\Delta H = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟ (mJ)}}{\text{น้ำหนักสารตัวอย่าง (mg)}}$$

สามารถคำนวณค่าองศาความเป็นผลึก (Degree of crystallinity ; X_c) ของ PP ได้ดังสมการนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างเช่น วัสดุผสม 208.5 กรัม มีพอลิเมอร์ 100 กรัม (สูตร Control (No FR))
 วัสดุผสม 1.000 กรัม มีพอลิเมอร์ $(100 \times 1.000) / 208.5 = 0.4796$ กรัม
 พอลิเมอร์ 0.4796 กรัม มี ΔH_f 14.0676 J
 พอลิเมอร์ 1 กรัม มี ΔH_f $(14.0676 \times 1) / 0.4796 = 29.3320$ J/g
 เพราะฉะนั้น องศาความเป็นผลึก = $(29.3320 / 165) \times 100 = 17.8$

3.4.5 สัณฐานวิทยา

การศึกษาสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope ; SEM) เป็นการส่องดูพื้นผิวของวัสดุอย่างละเอียดเพื่อศึกษาการยึดติดระหว่างเส้นใยมะพร้าวกับพอลิเมอร์ และการกระจายตัวของเส้นใยในพอลิเมอร์ การเตรียมตัวอย่างทำได้โดยการนำตัวอย่างมาแช่ที่อุณหภูมิต่ำโดยใช้ไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) แช่ตัวอย่างเป็นเวลา 30 นาที และทำการหักพื้นที่ที่อุณหภูมิต่ำ จากนั้นนำตัวอย่างมาเคลือบด้วยทองและนำเข้าเครื่อง SEM เพื่อศึกษาบริเวณรอยหักของชิ้นงานตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

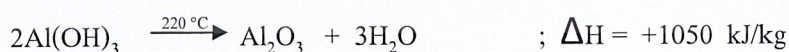
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการพัฒนาไม้พลาสติกสูตรหน่วงการติดไฟจากพอลิพรอพิลีนผสมเส้นใยมะพร้าวเบอร์ 2 (ขนาด 20 – 50 mesh) ซึ่งใช้อัตราส่วนผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนต่อเส้นใยมะพร้าวในอัตราส่วน 50:50 โดยทำการศึกษานิดและปริมาณของสารหน่วงไฟที่เหมาะสมในการหน่วงไฟของไม้พลาสติก กล่าวคือ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) ศึกษาในปริมาณ 30 – 60 ส่วนโดยร้อยละของพอลิเมอร์ (Part per hundreds of polymer, php) ซิงค์บอเรต (ZnB) ศึกษาในปริมาณ 4 – 10 php และสารประกอบฟอสเฟต ซึ่งศึกษาในปริมาณ 20 – 30 php และทำการศึกษาผลของการทำงานร่วมกัน (Synergistic effect) ของสารหน่วงไฟที่เหมาะสมสำหรับไม้พลาสติกที่ผลิตได้ โดยใช้ซิงค์บอเรตผสมกับอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์หรือแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์หรือสารประกอบฟอสเฟต รวมทั้งศึกษาสมบัติต่างๆ ของไม้พลาสติก เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อนและสัณฐานวิทยา เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาไม้พลาสติกสูตรหน่วงการติดไฟดังนี้

4.1 ศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารหน่วงไฟที่เหมาะสมในการหน่วงไฟ

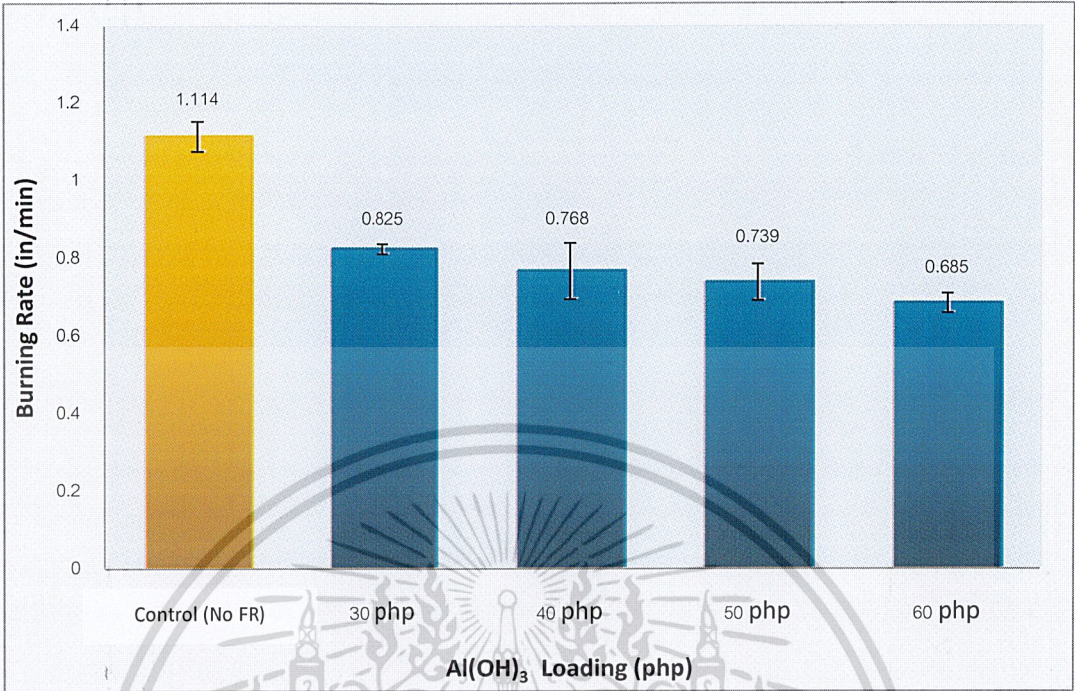
4.1.1 ศึกษาปริมาณของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (ATH)

อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เป็นสารหน่วงไฟประเภทสารอนินทรีย์ในกลุ่ม Metal oxide ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต ซึ่งมีอุณหภูมิในการสลายตัวประมาณ $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ และมีปฏิกิริยาการสลายตัว[44] ดังนี้



โดยงานวิจัยนี้ใช้ปริมาณของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่ 30, 40, 50 และ 60 php และนำไปทดสอบสมบัติการหน่วงไฟ โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



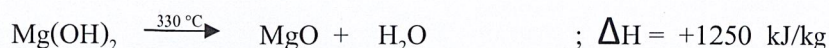
รูปที่ 4.1 อัตราการเผาไหม้ของไม้พลาสติกผสมอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.1 พบว่า อัตราการเผาไหม้ของไม้พลาสติกมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เมื่อเกิดการสลายตัวทางความร้อนจะเกิดชั้นเคลือบของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide, Al₂O₃) บนพื้นผิวของชิ้นงาน เกิดปฏิกิริยาคูดความร้อนช่วยให้ชิ้นงานเย็นตัวลงและมีโมเลกุลของน้ำหลุดออกมาเพื่อช่วยในการกำจัดก๊าซที่สามารถติดไฟได้ ซึ่งส่งผลให้ไม้พลาสติกมีอัตราการเผาไหม้ที่ลดลง โดยปริมาณของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่ 60 php จะมีอัตราการเผาไหม้น้อยที่สุดคือ 0.685 in/min ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การลามไฟที่ช้าลง 35.8 % อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ใส่ในปริมาณมากกว่านี้ (เกิน 60 php) เนื่องจากอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เป็นสารอนินทรีย์ที่มีลักษณะเป็นของแข็ง ทำให้มีลักษณะคล้ายกับการเติมสารตัวเติม (Fillers) ซึ่งจะทำให้มีต้นทุนสูงขึ้นและผลของสมบัติเชิงกลลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณมากเกินไป

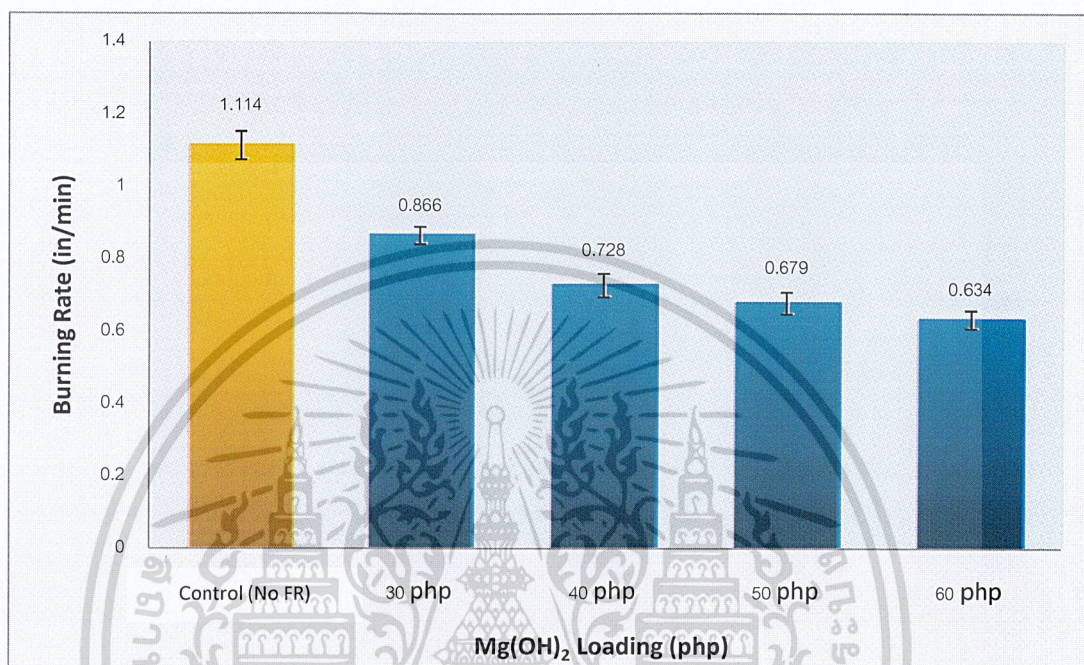
4.1.2 ศึกษาปริมาณของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (MGH)

แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารหน่วงไฟประเภทสารอนินทรีย์ในกลุ่ม Metal oxide ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต ซึ่งมีอุณหภูมิในการสลายตัวประมาณ 330 °C และมีปฏิกิริยาการสลายตัว[45] ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



โดยงานวิจัยนี้ใช้ปริมาณของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ 30, 40, 50 และ 60 php และนำไปทดสอบสมบัติการหน่วงไฟโดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.2



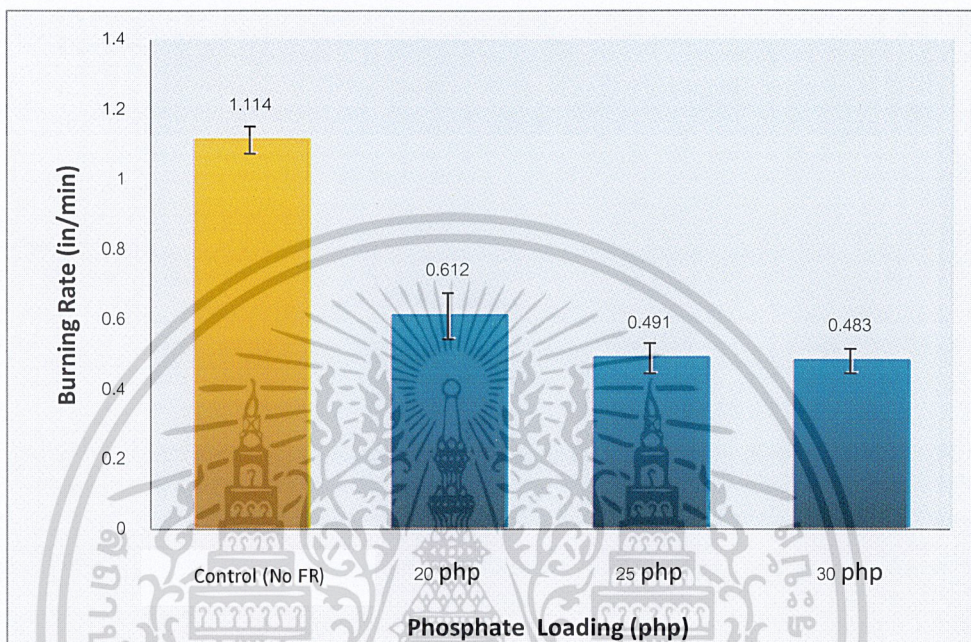
รูปที่ 4.2 อัตราการเผาไหม้ของไม้พลาสติกที่ผสมแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.2 พบว่า อัตราการเผาไหม้ของไม้พลาสติกมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นคล้ายกรณีของการใส่อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (ATH) เนื่องจากแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เมื่อเกิดการสลายตัวทางความร้อนจะเกิดชั้นเคลือบของแมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide, MgO) บนพื้นผิวของชิ้นงาน เกิดปฏิกิริยาคูดความร้อนช่วยให้ชิ้นงานเย็นตัวลงและมีโมเลกุลของน้ำหลุดออกมาเพื่อช่วยในการเจือจางก๊าซที่สามารถติดไฟได้ ซึ่งส่งผลให้ไม้พลาสติกมีอัตราการเผาไหม้ที่ลดลง โดยปริมาณของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ 60 php จะมีอัตราการเผาไหม้น้อยที่สุดคือ 0.634 in/min ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การลามไฟที่ช้าลง 43.1% อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ใส่ในปริมาณมากกว่านี้ (เกิน 60 php) เนื่องจากแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารอนินทรีย์ที่มีลักษณะเป็นของแข็ง ทำให้มีลักษณะคล้ายกับการเติมสารตัวเติม (Fillers) ซึ่งจะทำให้มีต้นทุนสูงขึ้นและผลของสมบัติเชิงกลลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณมากเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ศึกษาปริมาณของสารประกอบฟอสเฟต (Phosphate compounds)

สารประกอบฟอสเฟตเป็นสารหน่วงไฟในกลุ่ม Phosphorus-Based Flame retardants โดยในงานวิจัยนี้ใช้ปริมาณของสารประกอบฟอสเฟตที่ 20, 25 และ 30 php และนำไปทดสอบสมบัติการหน่วงไฟ โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3



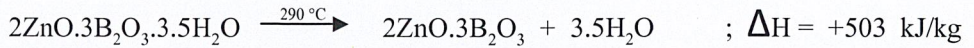
รูปที่ 4.3 อัตราการเผาไหม้ของไม้พลาสติกที่ผสมสารประกอบฟอสเฟตที่ปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.3 พบว่า อัตราการเผาไหม้ของไม้พลาสติกมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของสารประกอบฟอสเฟตเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อสารประกอบฟอสเฟตได้รับความร้อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพทางความร้อนเป็นสารในรูปของกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid) ซึ่งกรดนี้จะทำให้เกิดชั้นผิวเคลือบบนชิ้นงาน ส่งผลให้ปริมาณก๊าซออกซิเจนในโครงสร้างลดลง และความร้อนในชิ้นงานลดลงทำให้ลดปัจจัยในการติดไฟ ซึ่งส่งผลให้ไม้พลาสติกมีอัตราการเผาไหม้ที่ลดลง จากปริมาณสารประกอบฟอสเฟตที่เพิ่มเข้าไปจะพบว่า อัตราการเผาไหม้ของปริมาณสารประกอบฟอสเฟตที่ 25 และ 30 php มีความใกล้เคียงกันมาก ในการศึกษาต่อไปทางคณะวิจัยจึงเลือกศึกษาปริมาณของสารประกอบฟอสเฟตที่ 25 php มีอัตราการเผาไหม้คือ 0.491 in/min ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การลามไฟที่ช้าลง 55.9 % เพราะอาจจะช่วยในการประหยัดต้นทุนการผลิตได้

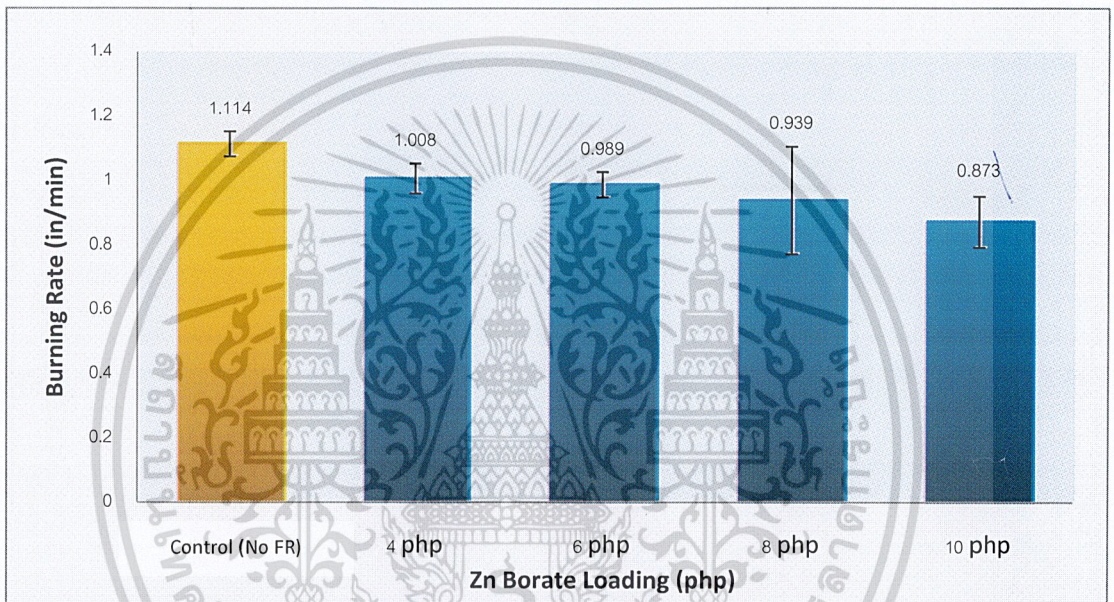
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 ศึกษาปริมาณของซิงค์บอเรต (ZnB)

ซิงค์บอเรตเป็นสารหน่วงไฟในกลุ่ม Borate-Based Flame retardants ซึ่งมีคุณสมบัติในการสลายตัวประมาณ 290 °C และมีปฏิกิริยาการสลายตัว[45] ดังนี้



โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปริมาณซิงค์บอเรตที่ 4, 6, 8 และ 10 php และนำไปทดสอบสมบัติการหน่วงไฟ โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 อัตราการเผาไหม้ของไม้พลาสติกที่ผสมซิงค์บอเรตที่ปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.4 พบว่า อัตราการเผาไหม้ของไม้พลาสติกมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของซิงค์บอเรตเพิ่มขึ้น เนื่องจากซิงค์บอเรตที่ผสมเข้าไปจะไปเกิดเป็นชั้นเคลือบของบอเรต ($2\text{ZnO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3$) บนผิวชิ้นงานทำให้ปริมาณก๊าซออกซิเจนในโครงสร้างลดลงและโมเลกุลของน้ำที่หลุดออกมาจะช่วยเจือจางก๊าซและความร้อนที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ต่อไป ซึ่งส่งผลให้ไม้พลาสติกมีอัตราการเผาไหม้ที่ลดลง โดยซิงค์บอเรตที่ปริมาณ 10 php จะมีอัตราการเผาไหม้น้อยที่สุดคือ 0.873 in/min ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การลามไฟที่ช้าลง 21.6 % อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ใส่ในปริมาณมากกว่านี้ (เกิน 10 php) เนื่องจากซิงค์บอเรตเป็นสารอนินทรีย์ที่มีลักษณะเป็นของแข็ง และมีอนุภาคค่อนข้างใหญ่ ทำให้มีลักษณะคล้ายกับการเติมสารตัวเติม (Fillers) ซึ่งจะทำให้มีต้นทุนสูงขึ้นและผลของสมบัติเชิงกลลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณมากเกินไป

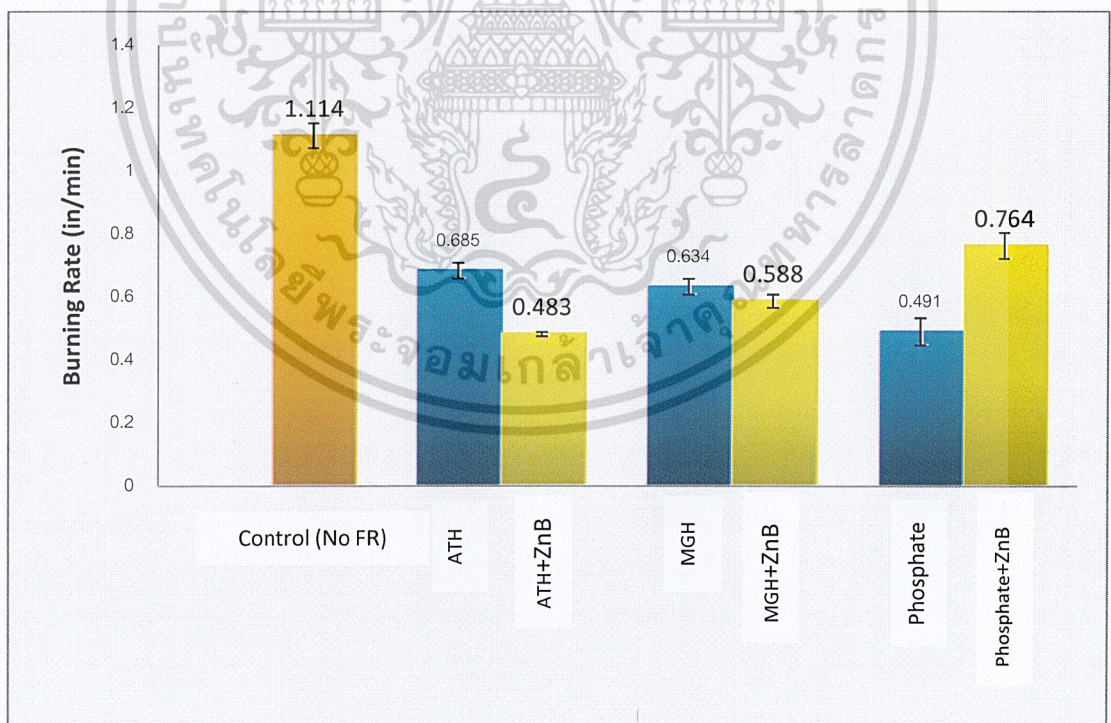
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองตอนที่ 1 ในการศึกษาชนิดและปริมาณสารหน่วงไฟ พบว่า Phosphate ที่ ปริมาณ 25 php จะมีอัตราการเผาไหม้ที่เหมาะสมที่สุดและในการศึกษาผลของปรากฏการณ์ซินเนอ จิสติกต่อสมบัติของการหน่วงไฟจะเลือกพิจารณาถึงปริมาณที่เหมาะสมจากการทดลองตอนที่ 1 คือ ATH และ MGH 60 php, Phosphate 25 php และ ZnB 10 php

4.2 ศึกษาผลของปรากฏการณ์ซินเนอจิสติกต่อสมบัติของการหน่วงไฟ

จากการศึกษาปริมาณของสารหน่วงไฟแต่ละชนิดในการทดลองตอนที่ 1 ทำให้ทราบถึง ปริมาณของสารหน่วงไฟที่เหมาะสมในแต่ละชนิด เพื่อนำมาเป็นแนวทางในการศึกษาปรากฏการณ์ ซินเนอจิสติก ซึ่งเป็นปรากฏการณ์การเสริมกันของสารแต่ละชนิดที่ช่วยให้สมบัติของวัสดุคอม- โพลีมีสมบัติที่ดีขึ้นกว่าสมบัติการทำงานของสารแต่ละตัว

โดยงานวิจัยนี้ให้ซิงค์บอเรตในปริมาณที่ได้จากผลการทดลองตอนที่ 1 เป็นสารเสริมชนิด แรก โดยนำมาผสมกับสารหน่วงไฟอีกสามชนิดในปริมาณต่างๆที่ได้จากผลการทดลองตอนที่ 1 กล่าวคือ ATH 60 php, MGH 60 php, Phosphate 25 php ผสมกับ ZnB 10 php แล้วนำไปทดสอบ สมบัติการหน่วงไฟ โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 อัตราการเผาไหม้ของไม้พลาสติกที่ศึกษาสมบัติปรากฏการณ์ซินเนอจิสติกในแต่ละสูตร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 เป็นอัตราการเผาไหม้ของไม้พลาสติกที่ศึกษาสมบัติปรากฏการณ์ซินเนอจิสติกในแต่ละสูตร พบว่า อัตราการเผาไหม้ของสารผสมระหว่างอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์กับชิงค์บอร์ดมีอัตราการเผาไหม้ลดลงเมื่อเทียบกับการที่ใช้สารหน่วงไฟเพียงชนิดเดียว เนื่องจากชิงค์บอร์ดสามารถเกิดอันตรกิริยากับอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์แล้วเกิดเป็นถ่านที่มีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูง อีกทั้งมีโมเลกุลของน้ำหลุดออกมาซึ่งสามารถช่วยเจือจางเชื้อเพลิงที่ติดไฟและลดอุณหภูมิที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ได้อีกดังสมการ[45]



แสดงว่า สารหน่วงไฟสองชนิดนี้เกิดปรากฏการณ์เสริมกันหรือปรากฏการณ์ซินเนอจิสติก (Synergistic effects) ส่วนสารผสมระหว่างสารประกอบฟอสเฟตกับชิงค์บอร์ด พบว่า อัตราการเผาไหม้มีค่ามากกว่าการใช้สารประกอบฟอสเฟตเพียงอย่างเดียว เนื่องจากสารหน่วงไฟสองชนิดนี้อาจจะไม่อันตรกิริยาต่อกันแสดงว่า สารทั้งสองตัวนี้ไม่มีสมบัติเสริมกัน และสารผสมระหว่างอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์และกับชิงค์บอร์ดมีอัตราการเผาไหม้น้อยที่สุด คือ 0.483 in/min ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การลามไฟที่ช้าลง 56.6 %

อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองการลามไฟของตัวอย่างสูตรต่างๆ ที่ศึกษาผลของการเกิดซินเนอจิสติกได้ค่าการทดสอบน้อยกว่าการคาดการณ์ กล่าวคือ มีค่าการทดสอบน้อยกว่าผลรวมของค่าอัตราการเผาไหม้ของสารหน่วงไฟแต่ละชนิดเพียงอย่างเดียว และไม่ทำให้ WPCs สามารถดับไฟได้ด้วยตัวเอง (Self extinguishing) ทั้งนี้เนื่องจาก

- ๑ กลไกการติดไฟของวัสดุต้องเกิดขึ้นบนพื้นผิว (Surface) ของวัสดุ และต้องมีก๊าซออกซิเจน (O_2) ช่วยในการติดไฟ ตามกลไกที่แสดงในรูปที่ 2.19 การใช้สารหน่วงไฟ

ปริมาณมาก (60 – 70 php) ใน WPCs ซึ่งมีพลาสติกและเส้นใยไม้ในอัตราส่วน 50:50 เหมือนเป็นการใส่สารตัวเติม (Fillers) ปริมาณมากในวัสดุทำให้สัดส่วนของพอลิเมอร์ซึ่ง

เป็นวัฏภาคต่อเนื่องในชิ้นงานลดลง (พิจารณาจากตารางที่ 4.1) อาจส่งผลให้เกิดความไม่ต่อเนื่องและช่องว่างที่อากาศ (O_2) สามารถเข้าไปในชิ้นงานได้ส่งผลให้อัตราการเผาไหม้ไม่ลดลงเท่าที่ควร

- การติดไฟและการลามไฟของวัสดุ WPCs อาจต่างจากวัสดุพลาสติกทำให้ปริมาณสารหน่วงไฟที่เหมาะสมที่ศึกษาอาจไม่เหมือนกัน เนื่องจาก WPCs มีองค์ประกอบหลักเป็นพลาสติกและผงไม้หรือเส้นใยไม้ในอัตราส่วน 50:50 ซึ่งทั้งสององค์ประกอบโดยเฉพาะผงไม้สามารถติดไฟได้ง่ายและมีพื้นที่ผิวมาก ซึ่งน่าจะต้องใช้สารหน่วงไฟที่มากกว่าปกติ

ตารางที่ 4.1 เปอร์เซนต์ของพอลิพรอพิลีนกับสารตัวเติมในแต่ละสูตร

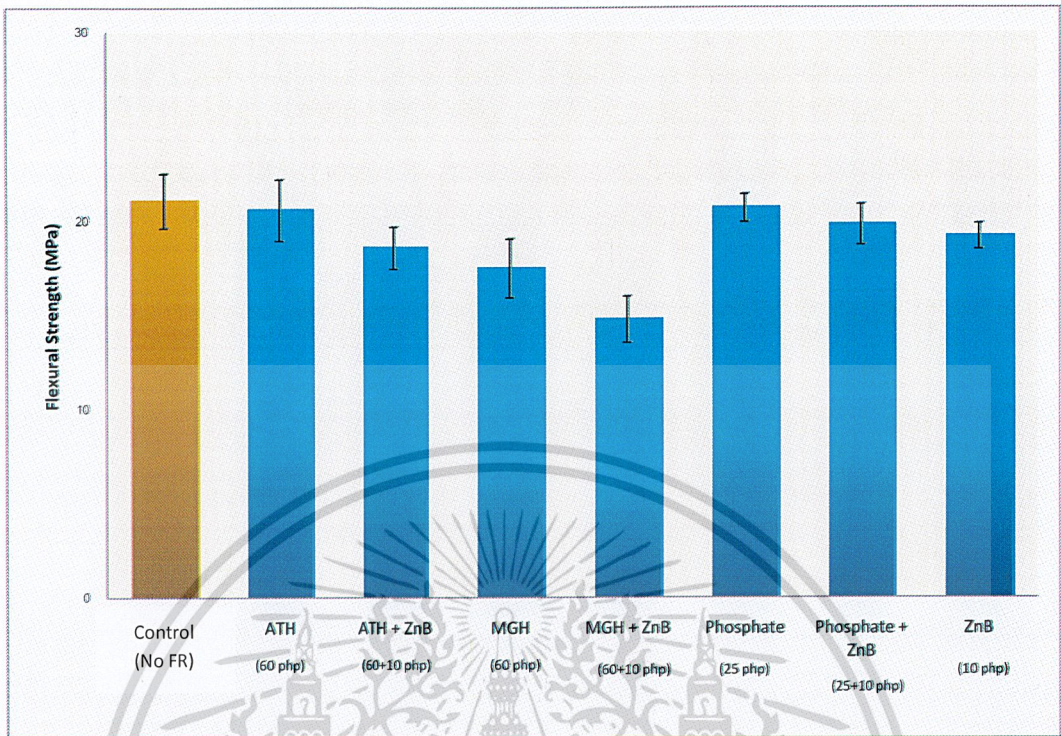
Formula	% PP	% Filler
PP/Coir (50:50)	50	50
PP/Coir (50:50) + ATH (60 php)	31.25	68.75
PP/Coir (50:50) + MGH (60 php)	31.25	68.75
PP/Coir (50:50) + Phosphate (25 php)	40	60
PP/Coir (50:50) + ZnB (10 php)	45.45	54.55
PP/Coir (50:50) + ATH + ZnB (60+10 php)	29.41	70.59
PP/Coir (50:50) + MGH + ZnB (60+10 php)	29.41	70.59
PP/Coir (50:50) + Phosphate + ZnB (25+10 php)	37.04	62.96

4.3 ศึกษาสมบัติเชิงกลของไม้พลาสติกที่ผลิตได้

4.3.1 ศึกษาค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength)

ค่าความแข็งแรงโค้งงอเป็นสมบัติเชิงกลที่แสดงถึงความสามารถของวัสดุที่สามารถทนทานต่อแรงโค้งงอที่มากกระทำตั้งฉากกับแนวตามยาวของวัสดุ สมบัติการโค้งงอจะพิจารณาความเค้นและความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ผิวนอกของชิ้นงาน ซึ่งแนวโน้มค่าแข็งแรงโค้งงอของไม้พลาสติกจะเกี่ยวข้องกับโครงสร้างภายในของไม้พลาสติกนั้นๆ เมื่อมีการเติมสารเสริมแรงหรือสารเติมแต่งเข้าไปเพิ่มในโครงสร้างเช่นอย่างในงานวิจัยนี้ มีการเติมสารเสริมแรงเติมแต่งชนิดหน่วงไฟเข้าไปในโครงสร้าง ซึ่งสารหน่วงไฟที่เติมเข้าไปจะทำให้ส่วนที่เป็นส่วนเมตริกซ์ลดลง ทำให้ความแข็งแรงของโครงสร้างลดลงตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



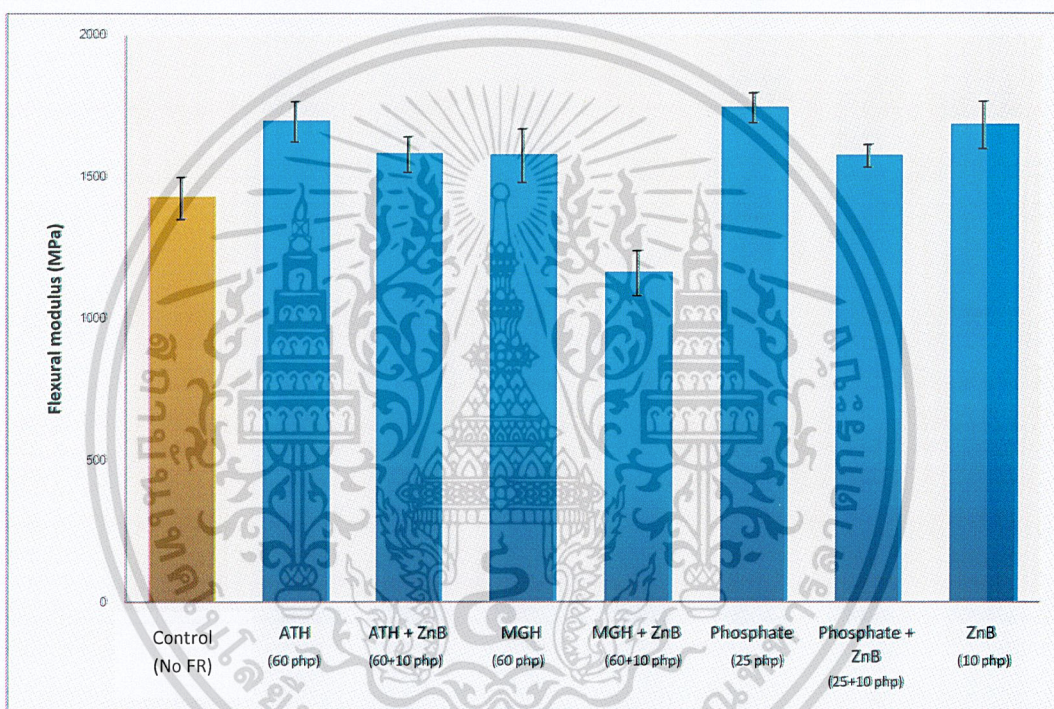
รูปที่ 4.6 ค่าความแข็งแรงโค้งงอของไม้พลาสติกในแต่ละสูตร

จากรูปที่ 4.6 พบว่า เมื่อมีการเติมสารหน่วงไฟเข้าไปในไม้พลาสติกจะทำให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากสารหน่วงไฟที่เติมถือเป็นสารเติมแต่งชนิดหนึ่ง ซึ่งเมื่อทำการเติมเข้าไปจะทำให้การยึดติดกันของส่วนที่เป็นพอลิเมอร์และส่วนเส้นใยเสริมแรงทำได้ยากขึ้น และสารหน่วงไฟที่เติมเข้าไปยังส่งผลทางอ้อมโดยไปลดปริมาณของส่วนเมตริกซ์ ซึ่งจะเห็นได้จากกราฟของไม้พลาสติกสูตรที่มีสารหน่วงไฟระหว่างแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์กับซิงค์บอเรตค่าความแข็งแรงโค้งงอที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าสูตรอื่น สาเหตุอาจจะเกิดจากสารหน่วงไฟอาจเกิดการกระจายตัวไม่ดีในพอลิเมอร์เกิดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerates) ทำให้เกิดเป็นจุดบกพร่องบนชิ้นงาน เมื่อทำการผสมทำให้เกิดการผสมไม่เข้ากันจึงทำให้เกิดฟองอากาศในโครงสร้าง จึงส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงของชิ้นงานลดลงตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ศึกษาค่ามอดูลัสโค้งงอ (Flexural modulus)

ค่ามอดูลัสโค้งงอเป็นสมบัติเชิงกลที่แสดงถึงความแข็งหรือความสามารถในการต้านทานการโค้งงอเมื่อได้รับแรงของวัสดุ โดยจะพิจารณาในช่วงที่ความเค้นสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับความเครียด งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค่ามอดูลัสของของผสม ซึ่งตามกฎของของผสม (Rule of mixture) ได้ระบุไว้ว่า เมื่อการผสมกันระหว่างวัสดุตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป สมบัติของวัสดุผสม เช่น มอดูลัส หรือ ความหนาแน่น ซึ่งขึ้นกับสมบัติของแต่ละองค์ประกอบและสัดส่วนปริมาณของแต่ละองค์ประกอบ



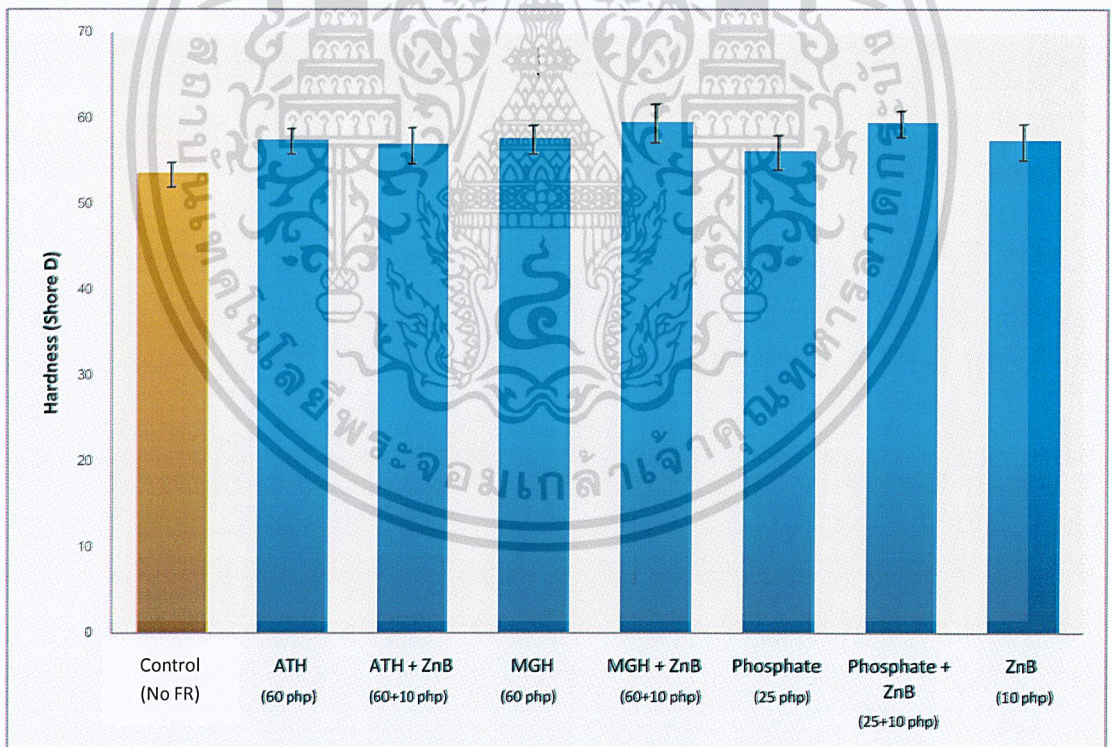
รูปที่ 4.7 ค่ามอดูลัสโค้งงอของไม้พลาสติกในแต่ละสูตร

จากรูปที่ 4.7 พบว่า เมื่อมีการเติมสารหน่วงไฟเข้าไปในไม้พลาสติกจะทำให้ค่ามอดูลัสโค้งงอ (Flexural modulus) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารหน่วงไฟที่เติมไปเป็นสารตัวเติมชนิดหนึ่งและอนุภาคของสารหน่วงไฟมีความแข็งมากกว่าส่วนที่เป็นพอลิเมอร์และส่วนของเส้นใย ซึ่งเป็นไปตามกฎของของผสม ตามที่ได้ระบุไว้ข้างต้น แต่บางกรณีค่ามอดูลัสที่วัดได้ก็มีแนวโน้มลดลงซึ่งไม่เป็นไปตามกฎของของผสม (Rule of mixture) อาจเนื่องจากการผสมอนุภาคเข้าจึงทำให้การผสมเป็นเนื้อเดียวกันทำได้ยาก และส่งผลให้ค่ามอดูลัสโค้งงอลดลงอย่างเช่น สูตรที่เกิดจากการผสมระหว่างแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์กับซิงค์บอเรต สาเหตุที่ทำให้ค่ามอดูลัสลดลงอาจ

เนื่องมาจากเกิดช่องว่างภายในชิ้นงานอันเนื่องมาจากเกิดฟองอากาศหรือรอยตำหนิ (Defects) ขณะทำการผสมจึงส่งผลให้ ค่ามอดุลัสลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอื่นๆ ซึ่งกรณีนี้มักจะเกิดกับสารผสมที่มีการจับกลุ่มเป็นก้อน (Agglomerates) ในระหว่างการผสม

4.3.3 ศึกษาค่าความแข็งกด (Hardness)

ค่าความแข็งกดเป็นสมบัติเชิงกลที่แสดงถึงความแข็งที่พื้นผิวชิ้นงานของวัสดุที่สามารถต้านทานต่อแรงที่กดลงบนพื้นผิวของวัสดุให้เกิดการยุบตัวได้ ซึ่งค่าแข็งแรงกดที่วัดได้จะได้ค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับส่วนประกอบภายในโครงสร้างของวัสดุนั้นๆ ถ้าวัสดุมีการเพิ่มส่วนที่เป็นของแข็งเข้าไป ของแข็งเมื่อถูกผสมก็จะกระจายตัวภายในชิ้นงาน ทำให้ค่าที่วัดได้มีค่ามากตามไปด้วย ถ้าหากเราเติมสารเติมแต่งชนิดนี้หรือเหลวแล้วเมื่อทำการวัดค่าความแข็งกดก็จะมีค่าน้อยลง



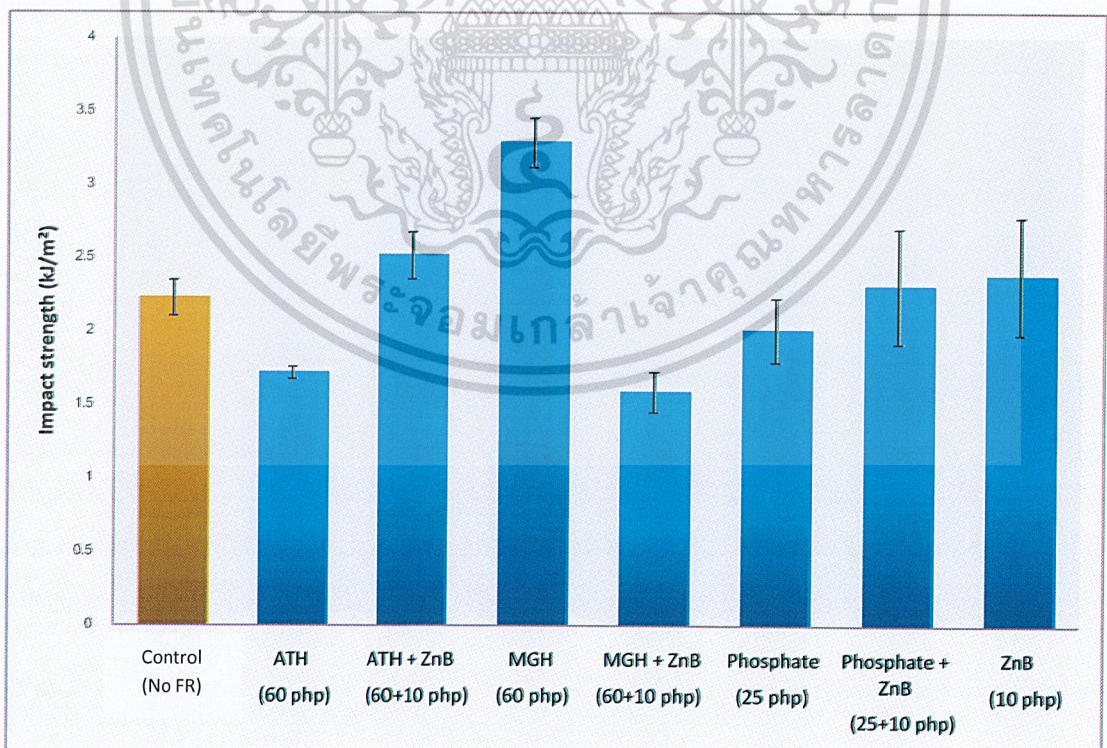
รูปที่ 4.8 ค่าความแข็งกด (Hardness) ของไม้พลาสติกในแต่ละสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8 พบว่า ค่าความแข็งแรงกมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับค่ามอดุลัส สามารถอธิบายได้ด้วยกฎของผสมเช่นเดียวกันกล่าวคือ เนื่องมาจากการเติมสารหน่วงไฟเข้าไป สารหน่วงไฟที่เติมเข้าไปเป็นอนุภาคที่แข็ง ซึ่งสารหน่วงไฟทั้งสองชนิดมีค่าความแข็งใกล้เคียงกัน คือ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ประมาณ 2.5 - 3.5, แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ประมาณ 2.0 - 3.0, สารประกอบฟอสเฟตประมาณ 3.0 และซิงค์บอเรตประมาณ 3.0 และมีมอดุลัสสูงเมื่อเทียบกับส่วนที่เป็นเส้นใยและส่วนเมตริกซ์ สารหน่วงไฟที่เติมลงไปจะเกิดการกระจายตัวของอนุภาคบนพอลิเมอร์คอมโพสิต หรือเป็นการเพิ่มของส่วนเมตริกซ์ในชิ้นงานทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงกระจายไปทั่วชิ้นงาน เนื่องจากการกระจายตัวของสารหน่วงไฟที่กระจายกับเป็นกลุ่มก้อน จึงส่งผลให้เมื่อเราทำชิ้นงานไปทดสอบความแข็งแรงกมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

4.3.4 ศึกษาค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength)

ค่าความแข็งแรงกระแทกเป็นสมบัติเชิงกลที่แสดงถึงความสามารถในการรับแรงกระแทก โดยฉับพลันของวัสดุ งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่ศึกษาค่าความแข็งแรงกระแทกของของผสมโดยการเติมสารหน่วงไฟเข้าไปผสมใน โครงสร้างของไม้พลาสติก



รูปที่ 4.9 ค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ของไม้พลาสติกในแต่ละสูตร ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 พบว่า ค่าความแข็งแรงกระแทกแบบไอซอดของพอลิเมอร์คอมโพสิตไม่สามารถสรุปแนวโน้มของค่าความแข็งแรงกระแทกได้ เนื่องจากขนาดอนุภาคของสารหน่วงไฟที่เติมเข้ามีขนาดอนุภาคต่างกัน และการกระจายตัวของสารหน่วงไฟในไม้มพลาสติกคอมโพสิตมีทั้งการกระจายตัวได้ดีและเกิดการกระจายตัวที่ไม่ดี จึงทำให้ได้ค่าความแข็งแรงกระแทกที่ทำการทดสอบมีทั้งแนวโน้มที่มีค่าเพิ่มขึ้นและแนวโน้มลดลงซึ่งทำให้ไม่สามารถสรุปแนวโน้มของค่าความแข็งแรงกระแทกได้แนวโน้มลดลงเมื่อเราเติมสารหน่วงไฟเข้าไป เนื่องจากเมื่อเติมสารหน่วงไฟเข้าไปปริมาณของพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่องลดลง เกิดการกระจายตัวของอนุภาคสารหน่วงไฟบนเส้นใยและบนพอลิเมอร์เมทริกซ์ เกิดรอยต่อ ซึ่งเป็นบริเวณที่ไม่แข็งแรงหรือเป็นจุดบกพร่อง (Flaws หรือ Defects) ของชิ้นงาน และเมื่อมีการเติมสารหน่วงไฟเข้าไปจุดบกพร่องก็จะเกิดมากขึ้นตามไปด้วย จึงส่งผลให้ค่าความแข็งแรงกระแทกลดลง ซึ่งสารหน่วงไฟเป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์ทำให้การผสมของพอลิเมอร์เกิดได้ยาก เนื่องจากสารหน่วงไฟอาจมีการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerates) ซึ่งเป็นบริเวณที่พอลิเมอร์ไม่สามารถแทรกตัวเข้าไประหว่างเส้นใยกับสารหน่วงไฟได้ ทำให้เกิดเป็นช่องว่าง (Voids) หรือรอยตำหนิ (Defect) อันเป็นจะเริ่มต้นของการแตกหักและส่งผลให้ค่าความแข็งแรงกระแทกลดลงตามไปด้วย จากกราฟจะพบบ้างสูตรที่มีค่าความแข็งแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเช่น สูตรของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์กับซิงค์บอเรต สาเหตุอาจเกิดจากการกระจายตัวของอนุภาคของสารหน่วงไฟในขั้นตอนการผสมของสองสูตรนี้ มีการกระจายตัวของอนุภาคของสารหน่วงไฟได้ดีจึงส่งผลให้ค่าความแข็งแรงกระแทกเพิ่มขึ้น

4.4 ศึกษาสมบัติทางกายภาพของพลาสติกคอมโพสิตที่ผลิตได้

ตารางที่ 4.2 ความหนาแน่นของพลาสติกคอมโพสิตแต่ละสูตร

สูตร	ความหนาแน่น(g/cm ³)
Control (NO FR)	1.016 ± 0.04
ATH (60 php)	1.148 ± 0.04
ATH+ZnB (60+10 php)	1.246 ± 0.09
MGH (60 php)	1.074 ± 0.06
MGH+ZnB (60+10 php)	1.167 ± 0.02
สารประกอบ Phosphate (25 php)	0.995 ± 0.03
สารประกอบ Phosphate +ZnB (25 +10 php)	0.974 ± 0.03
ZnB (10 php)	1.126 ± 0.08

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการเพิ่มสารเติมแต่งเข้าไปในโครงสร้าง ยิ่งทำให้ความหนาแน่นของไม้พลาสติกมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากสารเติมแต่งที่เติมเข้าไปมีลักษณะเป็นอนุภาคของแข็งและมีความหนาแน่นมากกว่าพอลิเมอร์ที่ใช้ จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นที่วัดได้มีแนวโน้มที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามกฎของของผสม (Rule of mixture) อย่างไรก็ตาม พบว่า บางสูตรมีความหนาแน่นน้อย เช่น พลาสติกคอมโพสิตที่เติมสารประกอบพวก Phosphate ซึ่งสาเหตุที่วัดค่าความหนาแน่นได้น้อยนั้นอาจจะมาจากขั้นตอนการผสมที่ทำการผสมยังไม่ทั่วถึงและการกระจายของอนุภาคของสารประกอบพวก Phosphate กระจายไม่สม่ำเสมอหรืออาจเกิดการจับตัวเป็นก้อนจึงทำให้เกิดช่องว่างในชิ้นงานหรือจุดบกพร่องในชิ้นงานในโครงสร้าง จึงทำให้ค่าความหนาแน่นที่วัดได้จึงมีค่าน้อยกว่าค่าความหนาแน่นของไม้พลาสติกสูตรอื่น

4.5 ศึกษาสมบัติทางความร้อนของพลาสติกคอมโพสิตที่ผลิตได้

การศึกษาสมบัติทางความร้อนสามารถอธิบายสมบัติต่างๆของวัสดุคอมโพสิตได้มากมาย เช่น ค่าองศาความเป็นผลึก (Degree of crystallization, X_c), อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) ของวัสดุแต่ละชนิดและอุณหภูมิการตกผลึก (T_c) เป็นต้น

ตารางที่ 4.3 สมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิตแต่ละสูตรที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC

Formula	T_m (°C)	T_c (°C)	องศาความเป็นผลึก (X_c) (%)
Control (NO FR)	163.5	120.9	17.8
ATH	161.9	120.6	14.1
ATH + ZnB	162.7	121.3	16.2
MGH	163.8	124.1	14.1
MGH + ZnB	162.8	122.1	12.2
Phosphate	163.3	121.9	13.6
Phosphate + ZnB	162.2	121.7	15.2
ZnB	162.5	122.6	10.5

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า เมื่อมีการเพิ่มสารหน่วงไฟเข้าไปในวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต จะพบว่าค่าองศาความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เนื่องจากเมื่อเพิ่มสารหน่วงไฟเข้าจะเกิดการลดความต่อเนื่องของพอลิเมอร์เม็ดรีซซ์ที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่องและสารหน่วงไฟที่เพิ่มเข้าไป

มีลักษณะเป็นผงอนุภาค ส่งผลให้เกิดการแทรกตัวระหว่างพอลิเมอร์เมตริกซ์ทำให้ความหนืดของของผสมขณะหลอม (Melt viscosity) เพิ่มขึ้น พอลิเมอร์เมตริกซ์เกิดผลึกยากขึ้นและมีค่าองศาความเป็นผลึกลดลง เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิการตกผลึก (T_c) พบว่าเมื่อผสมสารหน่วงไฟกับพอลิเมอร์เมตริกซ์ ค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่า สารหน่วงไฟไม่ได้ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดผลึกของพอลิเมอร์และอุณหภูมิการตกผลึก (T_c) มีค่าใกล้เคียงกันมากแสดงว่า สารหน่วงไฟที่เติมลงไปไม่ได้เป็นสารก่อผลึก (Nucleating agent) ให้กับพอลิเมอร์

4.6 ศึกษาสัณฐานวิทยาของพลาสติกคอมโพสิตที่ผลิตได้

การศึกษาสัณฐานวิทยาของวัสดุเมื่อทำการหักที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic crack) ทำให้เราทราบถึงลักษณะโครงสร้างภายในชิ้นงาน ขนาดอนุภาค การกระจายตัวของอนุภาคที่มีการผสมและการยึดเกาะระหว่างอนุภาคของสารเติมแต่งกับพอลิเมอร์ รวมทั้งช่องว่างภายในชิ้นงาน



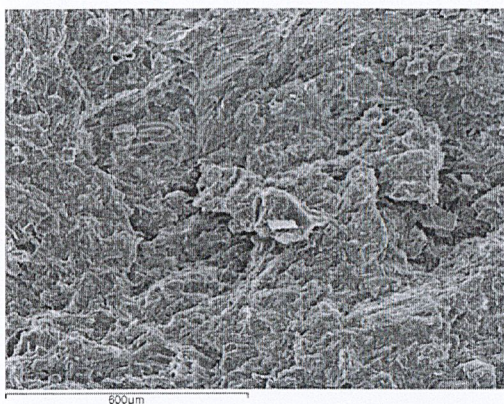
(ก) กำลังขยาย 100 เท่า

(ข) กำลังขยาย 500 เท่า

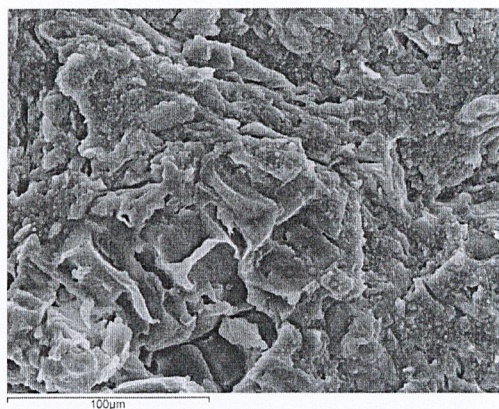
รูปที่ 4.10 SEM Micrograph ของ WPCs ระหว่าง PP/Coir ในอัตราส่วน 50:50 ที่ไม่ได้เติมสารหน่วงไฟที่กำลังขยาย (ก) 100 เท่า และ (ข) 500 เท่า

จากรูปที่ 4.10 ในรูป (ข) สังเกตได้ว่า เส้นใยมะพร้าวและพอลิพรอพิลีนมีการผสมค่อนข้างที่จะเข้ากันได้ดี พบว่า ไม่มีการขาดหรือหลุดของอนุภาคเส้นใยในโครงสร้างของวัสดุคอมโพสิต และจากภาพยังอธิบายได้ว่าการกระจายตัวของเส้นใยกับเนื้อพอลิพรอพิลีนได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



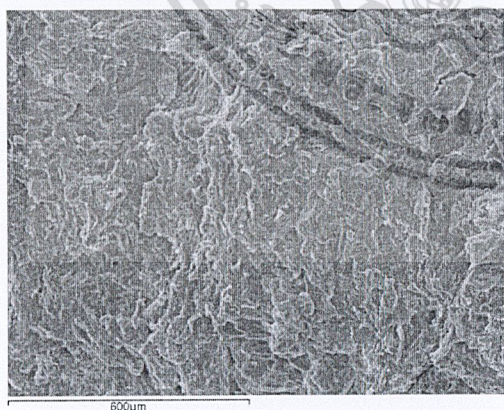
(ก) กำลังขยาย 100 เท่า



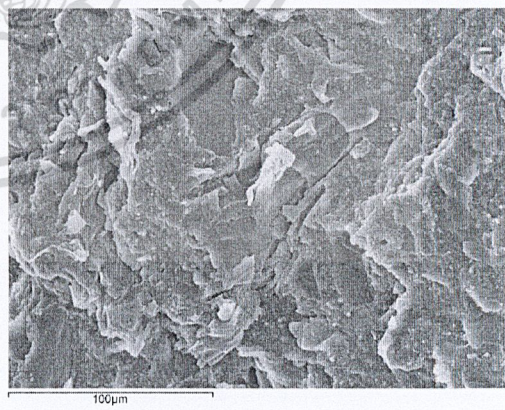
(ข) กำลังขยาย 500 เท่า

รูปที่ 4.11 SEM Micrograph ของ WPCs ระหว่าง PP/Coir ในอัตราส่วน 50:50 ที่มี ATH (60 php) เป็นสารหน่วงไฟที่กำลังขยาย (ก) 100 เท่าและ (ข) 500 เท่า

จากรูปที่ 4.11 ในรูป (ข) สังเกตได้ว่า เส้นใยมะพร้าวและพอลิพรอพิลีนมีการผสมค่อนข้างที่จะเข้ากันได้ดี เกาะกลุ่มกันเป็นก้อนทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ เนื่องจากขนาดอนุภาคของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์มีหลายขนาดผสมกัน สังเกตได้ว่าไม่มีการขาดหรือหลุดของอนุภาคเส้นใยในโครงสร้างของวัสดุคอมโพสิต และจากภาพยังอธิบายได้ว่าการกระจายตัวของเส้นใยกับเนื้อพอลิพรอพิลีนได้ดี



(ก) กำลังขยาย 100 เท่า



(ข) กำลังขยาย 500 เท่า

รูปที่ 4.12 SEM Micrograph ของ WPCs ระหว่าง PP/Coir ในอัตราส่วน 50:50 ที่มี ATH + ZnB (60+10 php) เป็นสารหน่วงไฟที่กำลังขยาย (ก) 100 เท่าและ (ข) 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.12 ในรูป (ข) สังเกตได้ว่า เส้นใยมะพร้าวและพอลิพรอพิลีนมีการผสมกันอย่างที่เข้ากันได้ดี และการผสมกันระหว่างอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์กับซิงค์บอเรตค่อนข้างเกาะเป็นแผ่นผลึก สังเกตได้ว่า ไม่มีการขาดหรือหลุดของอนุภาคเส้นใยในโครงสร้างของวัสดุคอมโพสิต และจากภาพยังไม่ปรากฏช่องว่างที่เกิดจากฟองอากาศซึ่งแสดงว่า ไม้พลาสติกคอมโพสิตมีการยึดเกาะกันได้ดี



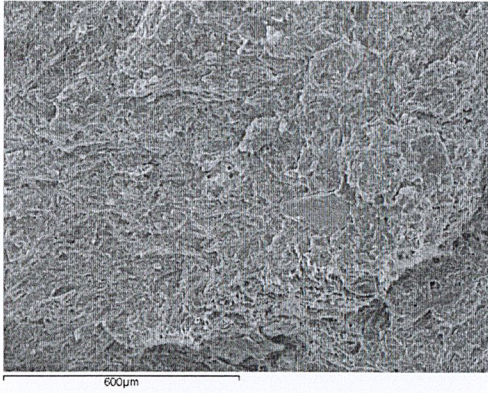
(ก) กำลังขยาย 100 เท่า

(ข) กำลังขยาย 500 เท่า

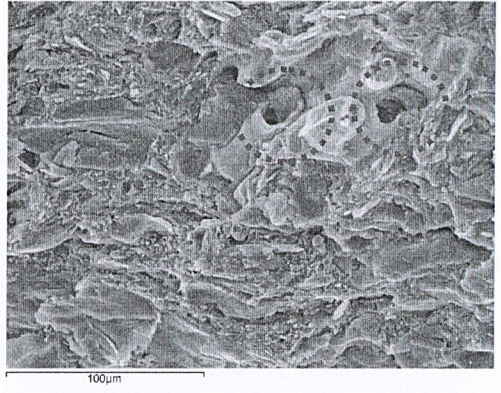
รูปที่ 4.13 SEM Micrograph ของ WPCs ระหว่าง PP/Coir ในอัตราส่วน 50:50 ที่มี MGH (60 php) เป็นสารหน่วงไฟที่กำลังขยาย (ก) 100 เท่าและ (ข) 500 เท่า

จากรูปที่ 4.13 ในรูป (ข) สังเกตได้ว่า อนุภาคของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ยังไม่ได้ผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิพรอพิลีนกับเส้นใยมะพร้าว แสดงว่า อนุภาคของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ขณะถูกผสมมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนไม่เกิดการกระจายตัวทำให้การผสมเกิดขึ้นไม่ดี แต่จากการสังเกตโครงสร้างโดยรวมแล้วโครงสร้างไม่มีการขาดหรือหลุดของอนุภาคเส้นใยในโครงสร้างของวัสดุคอมโพสิต แสดงว่าการยึดเกาะกันระหว่างวัสดุเป็นไปค่อนข้างสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



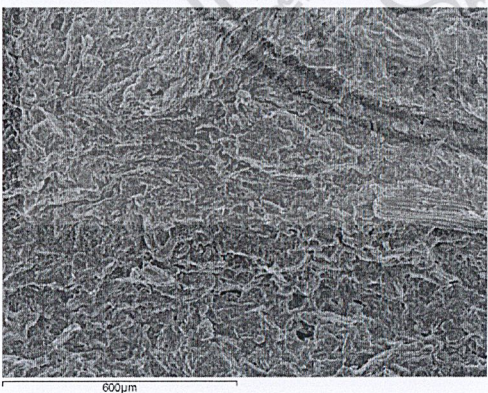
(ก) กำลังขยาย 100 เท่า



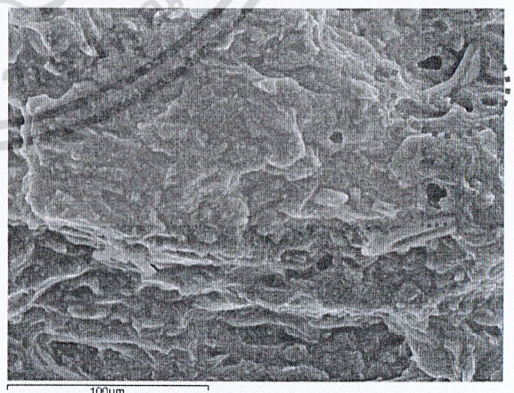
(ข) กำลังขยาย 500 เท่า

รูปที่ 4.14 SEM Micrograph ของ WPCs ระหว่าง PP/Coir ในอัตราส่วน 50:50 ที่มี MGH + ZnB (60+10 ph) เป็นสารหน่วงไฟที่กำลังขยาย (ก) 100 เท่าและ (ข) 500 เท่า

จากรูปที่ 4.14 ในรูป (ข) สังเกตได้ว่า เส้นใยมะพร้าวและพอลิพรอพิลีนมีการผสมค่อนข้างที่จะเข้ากันได้ดี แต่สังเกตได้ว่าในโครงสร้างเกิดช่องว่างหรือรูเกิดขึ้น สาเหตุอาจเนื่องมาจากขณะทำการผสมเกิดฟองอากาศเกิดขึ้นในขั้นตอนการผสม ทำให้เกิดช่องว่างในโครงสร้างของวัสดุคอมโพสิต ซึ่งข้อมูลจากภาพนี้ยังสามารถอธิบายเกี่ยวกับสมบัติเชิงกลคือ ค่ามอดุลัสที่วัดได้ของไม้พลาสติกถึงมีค่าต่ำสุด เนื่องจากช่องว่างในชิ้นงาน และมีการกระจายตัวของเส้นใยกับเนื้อพอลิพรอพิลีนได้ดี



(ก) กำลังขยาย 100 เท่า



(ข) กำลังขยาย 500 เท่า

รูปที่ 4.15 SEM Micrograph ของ WPCs ระหว่าง PP/Coir ในอัตราส่วน 50:50 ที่มี Phosphate

(25 ph) เป็นสารหน่วงไฟที่กำลังขยาย (ก) 100 เท่าและ (ข) 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.15 ในรูป (ข) สังเกตได้ว่า เส้นใยมะพร้าวและพอลิพรอพิลีนมีการผสมค่อนข้างที่จะเข้ากันได้ดี และการผสมสารประกอบฟอสเฟตลงไปจากภาพสารประกอบฟอสเฟตมีการกระจายตัวที่ดีทั่วบริเวณ โครงสร้าง แต่จากภาพ พบช่องว่างบนโครงสร้างแสดงว่า ในขั้นตอนการผสมไม้พลาสติกคอมโพสิตนี้ อาจเกิดฟองอากาศขึ้นภายในชิ้นงาน แต่จากภาพไม่พบการขาดหรือหลุดของอนุภาคเส้นใยในโครงสร้างของวัสดุคอมโพสิตแสดงว่า ไม้พลาสติกคอมโพสิตมีการยึดเกาะกันได้ดี



(ก) กำลังขยาย 100 เท่า

(ข) กำลังขยาย 500 เท่า

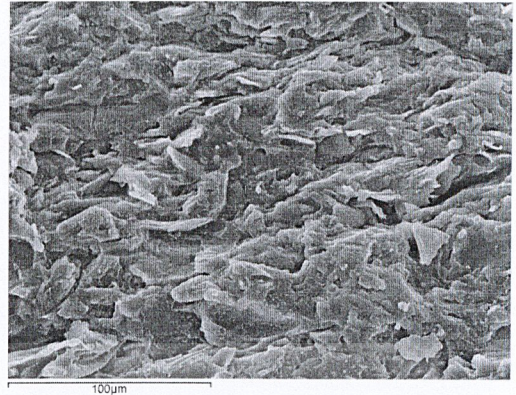
รูปที่ 4.16 SEM Micrograph ของ WPCs ระหว่าง PP/Coir ในอัตราส่วน 50:50 ที่มี Phosphate + ZnB (25+10 php) เป็นสารหน่วงไฟที่กำลังขยาย (ก) 100 เท่าและ (ข) 500 เท่า

จากรูปที่ 4.16 ในรูป (ข) สังเกตได้ว่า เส้นใยมะพร้าวและพอลิพรอพิลีนมีการผสมค่อนข้างที่จะเข้ากันได้ดี และการผสมกันระหว่างสารประกอบฟอสเฟตกับซิงค์บอเรตเกาะเป็นแผ่นเป็นผลึกค่อนข้างใหญ่และมีช่องว่างภายใน โครงสร้างเล็กน้อย แต่ไม่พบการขาดหรือหลุดของอนุภาคเส้นใยในโครงสร้างของวัสดุคอมโพสิต แสดงว่ามีการยึดเกาะกันได้ดี ส่วนการกระจายตัวของสารประกอบฟอสเฟตผสมกับซิงค์บอเรตมีการกระจายค่อนข้างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) กำลังขยาย 100 เท่า



(ข) กำลังขยาย 500 เท่า

รูปที่ 4.17 SEM Micrograph ของ WPCs ระหว่าง PP/Coir ในอัตราส่วน 50:50 ที่มี ZnB (10 php) เป็นสารหน่วงไฟที่กำลังขยาย (ก)100 เท่าและ (ข) 500 เท่า

จากรูปที่ 4.17 ในรูป (ข) สังเกตได้ว่า ในโครงสร้างมีอนุภาคของซิงค์บอเรตที่เกือบจะหลุดออกจากส่วนที่เป็นโครงสร้าง อันเนื่องมาจากการผสมกันระหว่างซิงค์บอเรตกับเส้นใยมะพร้าวและพอลิพรอพิลีนยังผสมเข้ากันได้ไม่ดี แต่การกระจายตัวของอนุภาคซิงค์บอเรตมีการกระจายตัวได้ดี

จากการศึกษาฐานวิทยภายในโครงสร้างของ WPCs ผสมสารหน่วงไฟชนิดต่างๆ พบว่า สารหน่วงไฟมีการกระจายตัวที่ดี และมีการยึดเกาะที่ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ยกเว้นบางสูตร เช่น สูตรที่มีซิงค์บอเรตเป็นสารหน่วงไฟ ทั้งนี้เนื่องจากสารหน่วงไฟที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นสารหน่วงไฟเชิงพาณิชย์สำหรับพลาสติกพอลิโอเลฟินส์ (Polyolefins) เกรดการค้าที่มีการเคลือบสารช่วยกระจายตัวอยู่แล้วจึงไม่เกิดปัญหาการกระจายตัวและการยึดเกาะมากนัก อย่างไรก็ตาม การใส่สารหน่วงไฟปริมาณมากอาจเกิดปัญหาจากการผสมและการกระจายตัวได้ ถ้าไม่ใช่เครื่องผสมที่มีประสิทธิภาพในการผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 การวิเคราะห์ต้นทุน (Cost Analysis)

การวิเคราะห์ต้นทุนเป็นการแจกแจงถึงค่าใช้จ่ายต่างๆในการผลิตวัสดุหนึ่งๆ เพื่อใช้ในการประมาณราคาสินค้าเพื่อขาย และใช้เปรียบเทียบราคากับวัสดุที่ต้องการแข่งขัน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบของไม้พลาสติกคอมโพสิต 1 กิโลกรัม

ชนิดของวัสดุ	อัตราการเผาไหม้ (in/min)	ราคาวัตถุดิบ* (บาท/กิโลกรัม)
WPCs	1.114	40
WPCs + ATH (60 php)	0.685	45.8
WPCs + MGH (60 php)	0.634	41.2
WPCs + Phosphate (25 php)	0.491	74.4
WPCs + ZnB (10 php)	0.873	43.8
WPCs + ATH + ZnB (60+10 php)	0.483	48.5
WPCs + MGH + ZnB (60+10 php)	0.588	44.1
WPCs + Phosphate + ZnB (25+10 php)	0.764	76.4

หมายเหตุ : *ราคาวัตถุดิบ ณ เดือนมีนาคม พ.ศ. 2554

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า สารหน่วงการติดไฟบางชนิดมีประสิทธิภาพสูง แต่มีราคาแพงทำให้ราคา WPCs สูงขึ้นด้วย เช่น WPCs + Phosphate ขณะที่การใช้สารหน่วงการติดไฟ 2 ชนิดผสมกันแล้วทำให้ Synergistic effects มีประสิทธิภาพสูงขึ้น (อัตราการเผาไหม้ที่ช้าลง) และมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำลง เช่น สูตรผสมของ WPCs+ATH+ZnB (60 +10 php) หรือ WPCs+MGH+ZnB (60 +10 php) เป็นต้น โดยราคาที่ได้เป็นราคาที่ดีได้จากการทำวิจัยครั้งนี้ ซึ่งถ้ามีการผลิตจริงจะทำให้ราคาต้นทุนการผลิตลดต่ำลง เนื่องจากปริมาณที่ผลิตได้จะมีปริมาณมากกว่าที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการพัฒนาไม้พลาสติกสูตรหน่วงการลามไฟจากพอลิพรอพิลีนผสมเส้นใยมะพร้าวเบอร์ 2 (ขนาด 20 – 50 mesh) ซึ่งใช้อัตราส่วนผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนต่อเส้นใยมะพร้าวในอัตราส่วน 50:50 (PP:Coir fiber) โดยทำการศึกษาชนิดและปริมาณของสารหน่วงไฟที่เหมาะสมในการหน่วงไฟของไม้พลาสติก ได้แก่ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (ATH) และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (MGH) (30 – 60 php) สารประกอบฟอสเฟต (Phosphate compounds) (20 – 30 php) และซิงค์บอเรต (ZnB) (4 – 10 php) และศึกษาผลของการทำงานร่วมกัน (Synergistic effect) ของสารหน่วงไฟสำหรับไม้พลาสติกที่ผลิตได้ โดยศึกษาสมบัติต่างๆ ของไม้พลาสติกที่ผลิตได้ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อนและสัณฐานวิทยาของไม้พลาสติก จากการศึกษาในงานวิจัยนี้สามารถสรุปผลการทดลองงานวิจัยได้ดังนี้

1. จากการศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารหน่วงไฟที่เหมาะสมในการหน่วงไฟพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารหน่วงไฟแต่ละชนิดในไม้พลาสติกส่งผลให้อัตราการเผาไหม้ของวัสดุช้าลง ปริมาณสารหน่วงไฟที่เหมาะสม คือ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ปริมาณ 60 php สารประกอบฟอสเฟตที่ปริมาณ 25 php และซิงค์บอเรตที่ปริมาณ 10 php ส่งผลให้อัตราการเผาไหม้ของไม้พลาสติก PP/Coir (50:50) ช้าลงจาก 1.114 in/min เป็น 0.685, 0.634, 0.491 และ 0.873 in/min ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การลามไฟที่ช้าลง 35.8, 43.1, 55.9 และ 21.6 % ตามลำดับ

2. ในการศึกษาผลของปรากฏการณ์ซินเนอจิสติกต่อสมบัติของการหน่วงไฟ พบว่า ไม้พลาสติกคอมโพสิตที่มีอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 60 php ผสมซิงค์บอเรต 10 php มีอัตราการเผาไหม้น้อยที่สุด (0.483, 56.6 %) เนื่องจากอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์และซิงค์บอเรตมีอันตรกิริยาต่อกัน เกิดเป็นสารที่มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง ทำให้มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟมากที่สุด

3. จากการศึกษาสมบัติต่างๆ ของพลาสติกคอมโพสิตที่ผลิตได้พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสาร

หน่วงไฟมากขึ้น ทำให้ไม้พลาสติกมีความแข็งแรงโค้งงอลดลง ขณะที่ค่ามอดูลัสโค้งงอ อีกทั้งไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแข็งแรงและความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น อีกทั้งเมื่อเพิ่มปริมาณสารหน่วงไฟมากขึ้นทำให้ไม้พลาสติกมีองค์ความเป็นผลึกลดลงเล็กน้อย แต่มีค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิการตกผลึก (T_c) ใกล้เคียงกัน และสารหน่วงไฟส่วนใหญ่มีการกระจายตัวได้ดีในไม้พลาสติก ส่งผลให้ชิ้นงานมีสมบัติเชิงกลโดยรวมดีขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. พัฒนาไม้พลาสติกเพื่อเพิ่มสมบัติการต้านการลามไฟหรือสามารถดับได้ด้วยตนเอง เช่น
 - ศึกษาสารหน่วงไฟชนิดใหม่
 - พัฒนาเทคนิคการใส่สารหน่วงไฟ เช่น การแช่เส้นใยในสารละลายหน่วงไฟเพื่อให้สารอยู่ในเนื้อไม้หรือเคลือบเส้นใยไม้
 - ศึกษาไม้พลาสติกคอมโพสิตผสม เช่น พอลิโพลีเอทิลีนกับพอลิเมอร์ที่สามารถดับไฟได้ด้วยตัวเอง เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC), ยางพอลิคลอโรพรีน (CR), CPE ฯลฯ
 - ปรับปรุงรูปแบบไม้พลาสติกเพื่อให้ดับไฟได้ด้วยตัวเอง เช่น การปิดผิว การทำเป็นชั้น (Sandwich)
2. ศึกษาไม้พลาสติกชนิดอื่นทั้งพอลิเมอร์และเส้นใยเพื่อให้ได้สมบัติที่ดีและคุ้มค่ากับต้นทุนการผลิต
3. ศึกษาสมบัติอื่นๆ ของไม้พลาสติกที่ผลิตได้เพิ่มเติม เช่น อุณหภูมิอ่อนตัว (Heat distortion temperature) สมบัติการดูดน้ำ ความทนทานต่อดินฟ้าอากาศ (Weathering resistance)
4. ทดสอบขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์จริง เช่น ไม้ปาร์เก้ กรอบรูป หน้าต่าง ฯลฯ และทดลองใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] บริษัท โซลูเมท จำกัด , **woodplastic composite** , 2553 , [Online].Available :
<http://www.siamwoodmall.com/index/webboard.php>
- [2] ธนดล สัตตบงกช , การพัฒนาไม้ประกอบพลาสติก , 2553 , [Online].Available :
http://www.rdi.ku.ac.th/Techno_ku60/res-58/index58.html
- [3] Manufacture[®] , **Plastic+Wood+Pellets.html** , 2553 , [Online].Available :
<http://www.manufacturer.com/product/i1034638-Plastic+Wood+Pellets.html>
- [4] บริษัท โซลูเมท จำกัด , การเปรียบเทียบไม้พลาสติกกับไม้และพลาสติก , 2553 ,
 [Online].Available : <http://www.siamwoodmall.com/A2.html>
- [5] บริษัท 2MS PTE จำกัด , **Recycle Image**, 2553 , [Online].Available :
<http://www.2ms.sg/properties.html>
- [6] บริษัท โซลูเมท จำกัด , การประยุกต์ใช้งานไม้พลาสติกคอมโพสิต , 2553 , [Online].Available:
<http://www.siamwoodmall.com/index.php?lay=show&ac=article&Ntype=17&Id=5>
- [7] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ , วัสดุคอมโพสิต , 2553 , [Online].Available :
http://www.mtec.or.th/index.php?option=com_content&task=view&id=169&Itemid=178
- [8] National Research Council Canada , ประเภทของวัสดุคอมโพสิต , 2553 , [Online].Available:
[http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/irc/ctus/ctus-n30/Thermoplastic Polyolefin Roofing Membranes.html](http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/irc/ctus/ctus-n30/Thermoplastic%20Polyolefin%20Roofing%20Membranes.html)
- [9] Oregon State University , **Fiber Orientations in Fiber reinforced Composites** , 2553 ,
 [Online].Available : http://oregonstate.edu/instruct/dce/ans312/four/intro_rough_trans.htm
- [10] American Fiber Manufacturers Association , **Cellulose** , 2553 , [Online].Available :
<https://chempolymerproject.wikispaces.com/Cellulose-D-TPNR>
- [11] Forest Enclopedia Network , **Hemicellulose** , 2553 , [Online].Available :
<http://www.forestencyclopedia.net/p/p2/p1138/p1183/p1245>
- [12] University of Miami , **Lignin** , 2553 , [Online].Available :

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรที่ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] Oregon State University, **Cell plants orientations** , 2553 ,[Online].Available :
http://oregonstate.edu/instruct/dce/ans312/four/intro_rough_trans.html
- [14] สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ, **เส้นใยธรรมชาติ**, 2553 , [Online].Available :
<http://www.nia.or.th/innolinks/200703/innovambassador.htm>
- [15] Joe, **ใยมะพร้าว** , 2553 [Online].Available : <http://mattress-material.blogspot.com/2010/05/coconut-fiber.html>
- [16] บริษัท HMC Polymers (Thailand) จำกัด, **Polypropylene**, 2553, [Online].Available :
http://www.hmcpolymers.com/products.techinfo.PP_chemistry_property.html
- [17] Google[®] , **Polypropylene Product**, 2553, [Online].Available :
<http://www.google.co.th/images?hl=th&source=imghp&biw=polypropylene>
- [18] มาลินี ชัยสุภกิจสินธ์. “เคมีพอลิเมอร์” : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร, 2552
- [19] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. “สารปรับแต่งพอลิเมอร์ (Polymer Additives)”. กรุงเทพมหานคร, 2547
- [20] Fire Testing Technology, **Fire Testing**, 2553, [Online].Available :
<http://www.fire-testing.com/html/instruments/ul94ad.htm>
- [21] ASTM D635. “Standard Test Methods for Rate of Burning and/or Extent and Time of Burning of Plastics in a Horizontal Position.” Philadelphia : American Society for Testing and materials., 2000.
- [22] ASTM D3801. “Standard Test Methods for Measuring the Comparative Burning Characteristics of Solid Plastics in a Vertical Position.” Philadelphia : American Society for Testing and materials., 2000.
- [23] Building Automation Products, **UL-94 Testing**, [Online].Available :
www.bapihvac.com/CatalogPDFs/I_Application/UL94_Rating.pdf
- [24] Wendell Hull and Associates, **Oxygen index Test**, [Online].Available :
http://www.wendellhull.com/oxygen_index_oi.php
- [25] M. Sain, S.H. Park, F. Suhara and S. Law, “Flame retardant and mechanical properties of natural fibre-PP composites containing magnesium hydroxide”, **Polymer Degradation and Stability**, 83, 2004, 363-367

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [26] N. Stark, R. White, S. Mueller and T. Osswald, “ Evaluation of various fire retardants for use in wood-flour-polyethylene composites ”, *Polymer Degradation and Stability*, 95, 2010, 1903-1910
- [27] A. Dechirico, M. Armaninia, P. Chinib, G. Ciocolob, F. Provasolia and G. Audisio, “ Flame retardants for polypropylene based on lignin ”, *Polymer Degradation and Stability*, 79, 2003, 139–145
- [28] A. Ramazani , A. Rahimi, M. Frounchi and S. Radman, “ Investigation of flame retardancy and physical–mechanical properties of zinc borate and aluminum hydroxide propylene composites ”, *Materials and Design*, 29, 2008,1051–1056
- [29] กนกอร แสงสุวรรณ. “ การศึกษาไม้พลาสติกคอมโพสิตจากพอลิโพลีเอทิลีนและเส้นใยมะพร้าว ”, วิทยานิพนธ์ หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร, 2553.
- [30] G. Fontaine, S. Bourbigot and S. Duquesne, “ Neutralized flame retardant phosphorus agent: Facile synthesis, reaction to fire in PP and synergy with zinc borate ”, *Polymer Degradation and Stability*, 93, 2008, 68-76
- [31] N. Suppakarn and K. Jarukumjorn, “ Mechanical properties and flammability of sisal/PP composites: Effect of flame retardant type and content ”, *Composites: Part B*, 40, 2009, 613–618
- [32] H. Premalal, H. Ismail and A. Baharin, “ Comparison of the mechanical properties of rice husk powder filled polypropylene composites with talc filled polypropylene composites ”, *Polymer Testing*, 21, 2002, 833–839
- [33] X. Chen and C. Jiao, “Synergistic effects of hydroxy silicone oil on intumescent flame retardant polypropylene system ”, *Fire Safety Journal*,44, 2009, 1010–1014
- [34] F. Montezin1, L. Cuesta1, A. Crepy and P. Georlette, “ Flame Retardant and Mechanical Properties of a Copolymer PP/PE Containing Brominate Compounds/Antimony Trioxide Blends and Magnesium Hydroxide or Talc ”, *Fire and Materials*, 21, 1997, 245-252
- [35] J. Yang , J.Z. Liang and C.Y. Tang, “ Studies on melt flow properties during capillary extrusion of PP/Al(OH)₃/Mg(OH)₂ flame retardant composites ”, *Polymer Testing*, 28, 2009, 907–911
- [36] S. Borysiak , D. Pauksza and M. Helwig, “ Flammability of wood -polypropylene composites ”, *Polymer Degradation and Stability*, 91, 2006, 3339-3343

- [37] M. Haque, M. Hasan, S. Islam and E. Ali, “ Physico-mechanical properties of chemically treated palm and coir fiber reinforced polypropylene composites ”, *Bioresource Technology*, 100, 2009, 4903–4906
- [38] M. Kokta and B.V. Boufut. “ Use of wood flour as filler in polypropylene : Studies on Mechanical properties ”. *Polymer-plastics technology engineering*, 28, 1989, 247-259.
- [39] ASTM D790. “ Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.” Philadelphia : American Society for Testing and materials., 2000.
- [40] ASTM D256. “ Standard Test Methods for Impact Resistance of Plastics and Electrical Insulating Materials.” Philadelphia : American Society for Testing and materials., 2000.
- [41] ASTM D2240. “ Standard Test Methods for Rubber Property – Durometer Hardness.” Philadelphia : American Society for Testing and materials., 2000.
- [42] มอก. 966-2547. “ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของแผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง ”, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม, ประเทศไทย, 2547, 1-21
- [43] Wunderlich, B. “ Macromolecular Physics ”, Academic Press, New York, 3, 1980, 61 – 64.
- [44] A sector group of Cefic “ European Flame Retardants Association ”, European Chemical Industry Council, Belgium, 2006, 1-6.
- [45] G. Antonietta and A. Shanks. “ Structural and thermal interpretation of the synergy and interactions between the fire retardants magnesium hydroxide and zinc borate ”. *Polymer Degradation and Stability*, 92, 2007, 2-13.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


HMC Polymers
An associate of PTT & LyondellBasell
ภาคผนวก ก

product data

Moplen EP300H

Polypropylene Impact Copolymer Resin

Features

- Good cold impact resistance
- Good dimensional stability

Typical applications

- Corrugated board extrusion
- Stationary sheets
- Blow molding bottles
- Pail lids/ Crates injection

Resin properties (a)	Moplen EP300H	ASTM METHOD(b)
Melt flow rate (230 °C / 2.16 kg), dg/min	1.8	D1238
Density, g/cm ³	0.90	D792B
Tensile strength at yield, MPa	25	D638
Elongation at yield, %	9	D638
Flexural modulus, MPa	1150	D790A
Notched izod impact strength at 23 °C, J/m	No break	D256A
Deflection temperature, at 455 kPa, °C	88	D648

(a) Values shown are averages and are not to be considered as specifications.

(b) ASTM test methods are the latest under Society's current procedures. All molded specimens are prepared by injection

Chemical Registration / Inventory Status

All ingredients in *Moplen EP300H* meet the chemical registration requirements of TSCA (U.S.) and DSL (Canada).

Note: Due to the fact that different regulations in each country set different details of compliance, users of *Moplen EP300H* are recommended to undertake their own investigation of the requirements and comply with each regulation set forth, for instance, in applicable local F&DA requirements. Ultimately the users must make their own determination that their use of *Moplen EP300H* is safe, lawful and technically suitable in their intended applications.

Moplen is a trademark of LyondellBasell Industries
 HMC Polymers is certified according to ISO 9001 and 14001
 Issued 1-Aug-08

The purpose of this document is only for technical support of the use of the product.

Before using a HMC Polymers product, customers and other users should make their own independent determination that the product is suitable for the intended use. They should also ensure that they can use the HMC Polymers product safely and legally. This document does not constitute a warranty, express or implied, including a warranty of merchantability or fitness for a particular purpose. In addition, no immunity under HMC Polymers', LyondellBasell's or third parties' intellectual property rights shall be implied from this document. No one is authorized to make any warranties, issue any immunities or assume any liabilities on behalf of HMC Polymers except in a writing signed by an authorized HMC Polymers employee. Unless otherwise agreed in writing, the exclusive remedy for all claims is replacement of the product or refund of the purchase price at HMC Polymers' option, and in no event shall HMC Polymers be liable for special, consequential, incidental, punitive or exemplary damages

HMC Polymers Co., Ltd

20/F, Sathorn City Tower, 175 South Sathorn Road, Thungmahamek, Sathorn, Bangkok 10120, Thailand

Tel +66 2679 6388-89, 2614 3700 Fax +66 2679 6380

www.hmcpolymers.com



APYRAL®

ภาคผนวก ข

Nabaltec

Produkt- / Product-Information

APYRAL 40CD

Mineralisches Flammschutzmittel für
Mineral flame retardant for

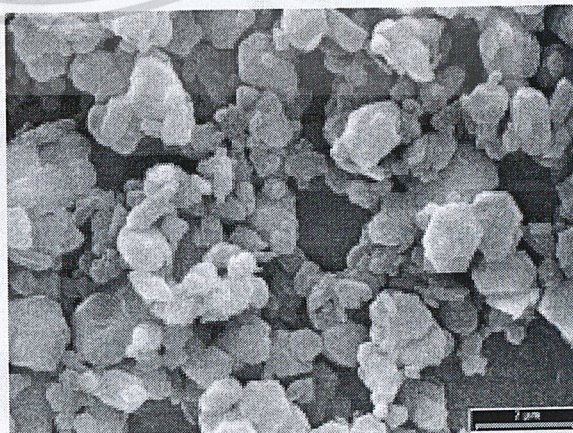
- Kabelindustrie / Wire and cable industry
- Bauindustrie / Construction industry
- Fahrzeugbau / Public transport

APYRAL®

Durchschnittsanalyse / Typical analysis		APYRAL 40 CD
Al (OH) ₃ - Gehalt / -Content	[%]	99.5
Feuchte / Moisture	[%]	0.2
Glühverlust / Loss on ignition	[%]	34.6
Teilchengröße / Particle size		
(Laserbeugung) / (Laser diffraction)	D ₁₀ [µm]	0.6
	D ₅₀ [µm]	1.3
	D ₉₀ [µm]	3.2
Siebrückstand / Sieve analysis		
(> 45 µm)	[%]	0.01
Spezifische Oberfläche / Specific surface area		
(BET)	[m ² /g]	3.5
Schüttdichte / Bulk density		
	[kg/m ³]	400
Ölaufnahme / Oil absorption		
	[ml/100g]	22
Weißgrad / Whiteness		
(Elrepho 457 nm)	[%]	98
Spezifische Leitfähigkeit / Specific conductivity		
	[µS/cm]	30
Brechungsindex / Refractive index		
		1.58
Härteindex (Mohs) / Mohs hardness		
		3
Dichte / Density		
	[g/cm ³]	2.4

Produktvorteile / Product properties

- Gutes Förder- und Dosierverhalten
Good conveyance and dosing
- Hohe Feinheit
Very fine particles
- Sehr niedrige Ölaufnahme
Very low oil absorption
- Hoher Compound-Schmelzeindex
High compound melt flow index
- Hohe Extrusionsgeschwindigkeiten
High extrusion speeds



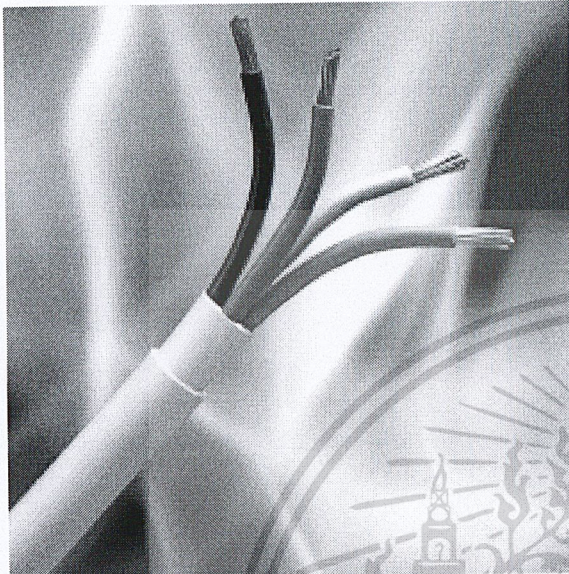
ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

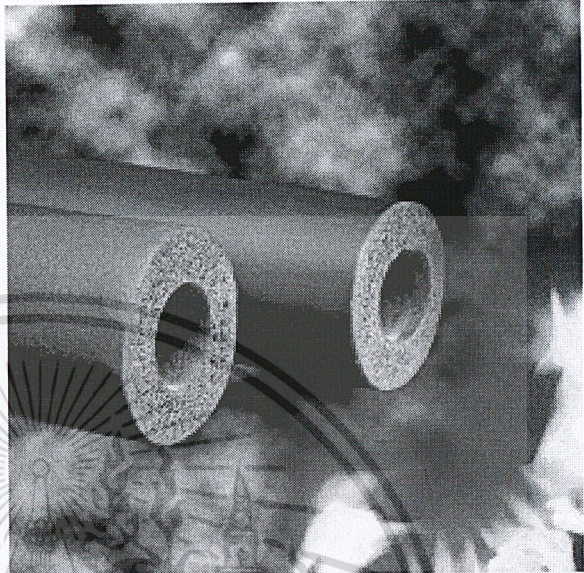
Nabaltec



Beispiele für den Einsatz von APYRAL 40CD / Examples for the use of APYRAL 40CD



Halogenfrei flammgeschützte Kabel
Halogen free flame retardant cables

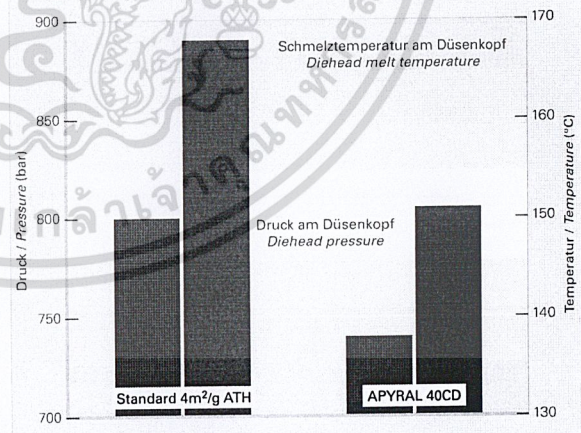
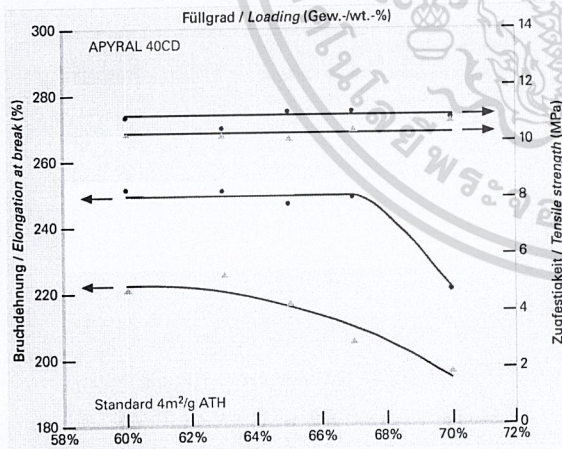


Rauchgasreduzierter Thermoisolationssschaum
Smoke suppressed thermoinsulation foam

Produkt- / Product-Information

Mechanische Eigenschaften von HFFR-PE/mPE Kabelcom-
pounds
Mechanical Properties of HFFR-PE/mPE cable compounds

Extrusionsparameter eines HFFR-PE/EVA Compounds;
Isolierung eines Kupferleiters mit 650 m/min
Extrusion parameters for an HFFR-PE/EVA Compound;
insulation of a copper wire at 650 m/min



For further information, please contact:

Nabaltec AG
P. O. Box 1860 · D-92409 Schwandorf
Phone +49(0) 94 31 53 - 0
Fax +49(0) 94 31 615 57
www.nabaltec.de

Business Unit Flame Retardants

Phone +49(0) 94 31 53-4 62/4 58/4 67
fillers@nabaltec.de

All data listed in this brochure are reference values and subject to production tolerances. These values are exclusive to the product description and no guarantee is placed on the properties. It remains the responsibility of the users to test the suitability of the product for their application.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APYMAG®

Produkt- / Product-Information

Nabaltec

APYMAG 30, APYMAG 40, APYMAG 60, APYMAG 80 APYMAG 30S, APYMAG 40S, APYMAG 60S, APYMAG 80S

Mineralische Flammschutzmittel für
Mineral flame retardants for

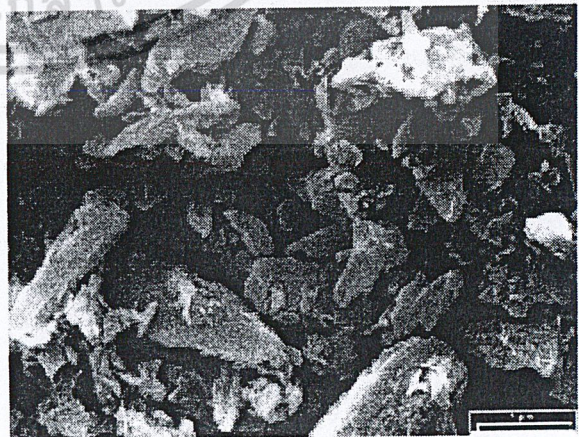
- Bauindustrie / Construction industry
- Fahrzeugbau / Public transport
- Elektro-/Elektronikindustrie / Electronic industry

APYMAG®

Durchschnittsanalyse / Typical analysis		APYMAG 30	APYMAG 40	APYMAG 60	APYMAG 80
Mg (OH) ₂ - Gehalt / -Content	[%]	90	90	92	93
Feuchte / Moisture	[%]	0,5	0,5	0,5	0,5
Glühverlust / Loss on ignition	[%]	31	31	31	31
Teilchengröße / Particle size (Laserbeugung) / (Laser diffraction)					
D ₁₀ [µm]		2,5	1	1	1
D ₅₀ [µm]		12	5	3,5	3
D ₉₀ [µm]		25	18	14	8
Siebrückstand / Sieve analysis (> 45 µm)					
	[%]	0,2	0,2	0,02	0,02
Spezifische Oberfläche / Specific surface area (BET)					
	[m ² /g]	3	4	6	8
Schüttdichte / Bulk density					
	[kg/m ³]	600	450	350	350
Ölaufnahme / Oil absorption					
	[ml/100g]	19	20	23	26
Weißgrad / Whiteness (Elrepho 457 nm)					
	[%]	90	94	94	95
Spezifische Leitfähigkeit / Specific conductivity					
	[µS/cm]	350	350	350	350
Stearnsäure / Stearic acid		APYMAG 30S	APYMAG 40S	APYMAG 60S	APYMAG 80S
	[%]	0,5	0,5	0,5	0,5
Dichte / Density					
	[g/cm ³]	2,4	2,4	2,4	2,4

Produktvorteile / Product properties

- Verarbeitbar bis 300 °C
Processable up to 300 °C
- Niedrige Viskosität
Low viscosity
- Guter Rauchgasunterdrücker
Good smoke suppressant

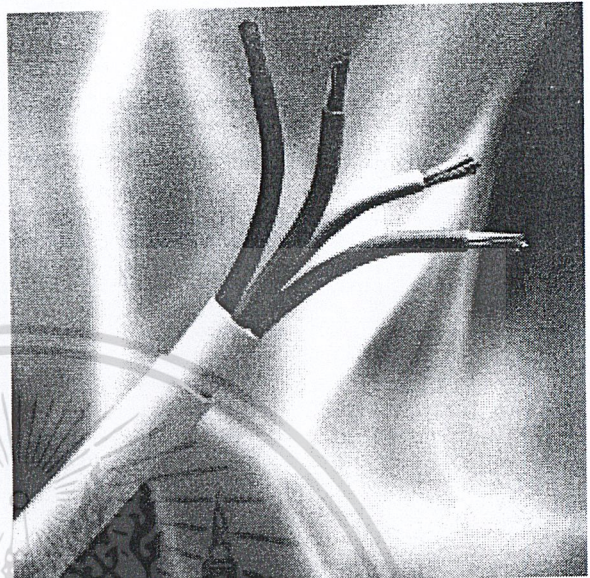
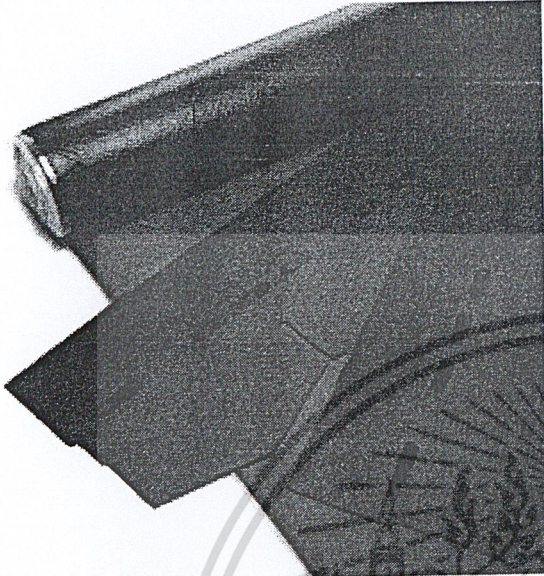


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Nabaltec



Beispiele für den Einsatz von APYMAG / Examples for the use of APYMAG



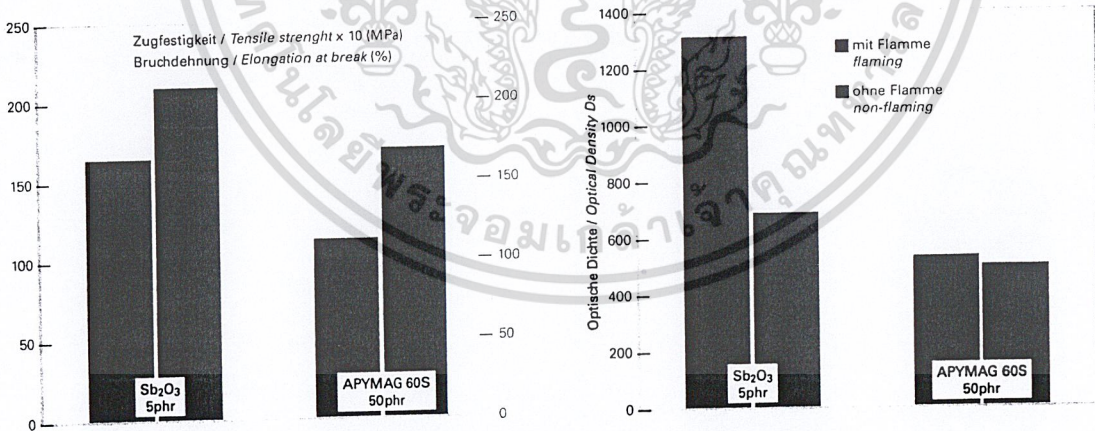
Dachbahnen für den Objektbau auf Basis TPO, EPDM oder Bitumen / Roofing membranes based on TPO, EPDM or bitumen respectively

Halogenfrei flammgeschützte und rauchgasreduzierte Kabel / Halogenfree fire retardant and smoke suppressed cables

Produkt- / Product-Information

Mechanische Eigenschaften flammgeschützter PVC-Compounds
Mechanical properties of flame retardant PVC compounds

Maximale Rauchgasdichte für mit Antimontrioxid bzw. APYMAG 60S flammgeschütztem PVC
Maximum smoke density for fire retardant PVC compounds containing Antimonytrioxide and APYMAG 60S respectively



For further information, please contact:

Nabaltec AG
P. O. Box 18 60 · D-92409 Schwandorf
Phone +49(0) 94 31 53 - 0
Fax +49(0) 94 31 615 57
www.nabaltec.de

Business Unit Flame Retardants

Phone +49(0) 94 31 53-4 62/4 58/4 67
fillers@nabaltec.de

All data listed in this brochure are reference values and subject to production tolerances. These values are exclusive to the product description and no guarantee is placed on the properties. It remains the responsibility of the users to test the suitability of the product for their application.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะภายในเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Intumescent Flame Retardant for Polymer

1. General

Zuran® 484 is a highly efficient, halogen-free intumescent flame retardants for polyolefins and thermoplastic elastomers such as PP (homo- and copolymers), HDPE, LDPE and EVA. The outstanding thermal stability of Zuran® 484 allows it to tolerate higher processing temperatures without drastic loss in mechanical properties. Unlike halogen-containing flame retardants, there is no black smoke nor is Zuran® 484 migratory. Furthermore, it provides superior water resistance compared to commonly used phosphorus/nitrogen type flame retardants, which upon compounding results in free of pre-heating and corrosion. The usage level of Zuran® 484 for achieving UL 94 V-0 rating can be further reduced when it is used in combination with a small amount of anti-dripping agents.

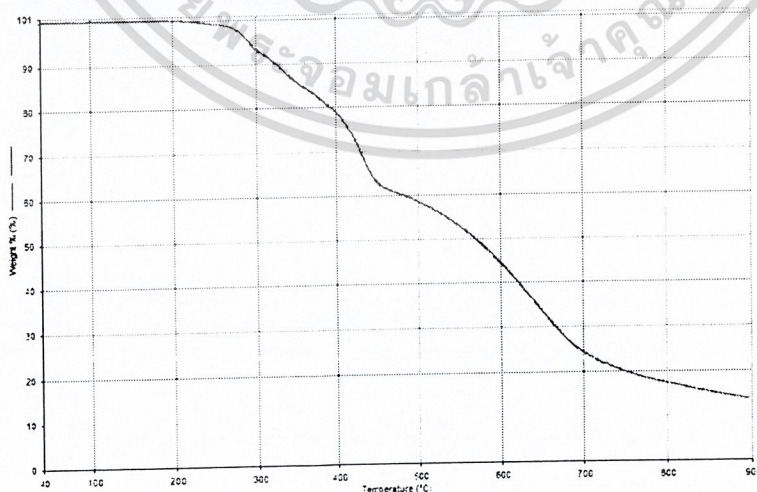
2. Properties

Components	:	Pyrophosphoric acid salts
Structure	:	Proprietary information
CAS No.	:	Proprietary information
Nitrogen content	:	20-24%
Phosphorus content	:	18-21%

3. Physical Data

Appearance	:	White to off-white powder
Odor	:	Odorless
Melting point	:	274–285 °C (525–545 °F)
Particle size	:	< 10 μM
pH value	:	4.5–6.5 (10% suspension in water at 25 °C)
Bulk density	:	0.50–0.65
Volatility (pure substance; TGA, heating rate 10 °C/min in air)	:	5% weight loss at 280 °C 10% weight loss at 320 °C 20% weight loss at 377 °C

Thermogravimetric analysis (TGA) diagram



Intumescent Flame Retardant for Polymer

4. Solubility

(g in 100 ml solvent @25 °C)

Methanol	:	<0.1
Water	:	<1

5. Specification

Appearance	:	White to off-white powder
Melting point	:	270 °C min.
Volatile	:	0.5 % max.
Particle size (Average)	:	10 µM max.

6. Application Data

Being an intumescent flame retardant, Zuran® 484 itself contains all the essential components for the intumescent mechanism i.e. an acid source, a carbonization agent and a blowing agent. This 3-in-1 package makes it especially suitable for the applications of flame-retarded PP, HDPE, LDPE, EVA and thermoplastic elastomers. The typical dosage for UL94 V-0 rating in PP (1/16") is at dosages of 23~30%, depending on the substrate and additives loading. The required dosage for achieving V-0 rating can be further reduced by adding a small amount of anti-dripping agents. Table 1 indicates the typical dosages of Zuran® 484 for UL94 V-0 rating in a variety of polymers (1/16"). The recommended processing conditions for Zuran® 484 are listed on Table 2.

Table 1 Typical Dosages for UL94 V-0 rating at 1/16"

Polymers	Dosage
PP homo polymer	25~28% (22~25% with PTFE)
PP copolymer	25~30% (22~25% with PTFE)
LDPE	30% with PTFE
EVA	35%

Table 2 Recommended Processing Conditions of Zuran 484®**Extrusion**

Barrel temperature: 210~230 °C
 Die temperature: 210~230 °C
 Screw speed: 150-200 rpm

Injection

Barrel temperature: 190~210 °C
 Nozzle temperature: 190~210 °C

Effect of Fillers

Due to the interference with the mechanism of the intumescent flame retardants, fillers such as calcium carbonate and talc are not suited for Zuran® 484. For example, the addition of small amounts of calcium carbonate prevent the UL 94 V-0 rating from being achieved even at increased loadings of Zuran® 484.

Intumescent Flame Retardant for Polymer
7. Comparative Performance Data

Formulation	Control	Zuran 484	Zuran 484	MPP Pentaerythritol	ASTM method
PP (homo, MFI = 4)	100	75	70	70	
Flame Retardant Dosage	--	25	30	30	
Antioxidant	0.1	0.1	0.1	0.1	
Anti-Dripping Agent	--	0.2	0.2	0.2	
Flammability Performance					
UL-94 (1/16 inch)	Fail	V-0	V-0	Fail	
Dripping	Yes	No	No	No	
Limiting Oxygen Index	--	30.5	33.0	29.3	D 2863
Physical Properties					
Izod Impact Notch (J/m)	--	22.58	23.47	24.25	D 256
Izod Impact Unnotch (J/m)	NB	191.9	146.21	151.21	D 256
Tensile Max. Strength (Kg/cm ²)	319	299	275	280	D 638
Tensile Elongation (%)	45.1	8.97	8.31	8.24	D 638
Flexural Strength Modulus (Kg/cm ²)	12646	21758	20905	27217	D 790
HDT @0.45 Mpa (°C)	100.1	116.5	118.1	132.7	D 648
Specific Gravity	0.902	1.022	1.034	1.025	D 792

8. Packaging

20 kg carton box.

DATA SHEET

Firebrake® ZB

DESCRIPTION & APPLICATIONS

Firebrake® ZB fire retardant is a unique form of zinc borate with multifunctional fire retardant applications in plastic and rubber compounds. Since *Firebrake®* ZB releases its water of hydration at temperatures exceeding 290°C (554°F), it can be used in systems requiring high processing temperatures. *Firebrake®* ZB has a refractive index similar to that of most polymer systems, which results in the retention of considerable translucency and allows the use of low pigment loading. It can be fed to extruders, calenders, or injection moulding equipment in much the same way as other solid polymers.

Firebrake® ZB is used as a flame retardant, smoke and afterglow suppressant, and anti-arcing agent in polymer systems such as polyvinyl chloride, nylon, epoxy, polyethylene, polypropylene, polyesters, thermoplastic elastomers and rubbers.

Depending on the base polymer used and fire standards to be met, *Firebrake®* ZB can be used to replace partially (or even completely) other fire retardant additives such as antimony oxide. In some systems, *Firebrake®* ZB displays synergism with antimony oxide. In halogen-containing systems, the usage level of *Firebrake®* ZB is in the range of 3-25 parts per hundred parts of resin (phr). In halogen-free systems, the recommended level is in the range of 10-250 phr, normally used in conjunction with alumina trihydrate, magnesium hydroxide, or a silicone polymer. Examples of starting point formulations are available upon request.

Firebrake® ZB-Fine and *Firebrake®* ZB-XF are recommended for applications where maximum fire test performance is needed, and physical properties such as film forming and adhesion are critical.

When stored under normal conditions of temperature and humidity, *Firebrake®* ZB is chemically stable and shows little tendency to cake.

TYPICAL PROPERTIES

Refractive Index	1.58
Median Particle Size:	
ZB, microns (Laser Diffraction)	9
ZB-Fine, microns (Laser Diffraction)	2.1
ZB-XF, microns (Laser Diffraction)	1.8
Solubility in water at room temp, %	<0.28
Specific Gravity	2.77
Stability: Thermally stable up to 290°C. Can be hydrolyzed by strong acids and bases.	

CHEMICAL ANALYSIS

Boric Oxide, B ₂ O ₃ , %	48.05
Zinc Oxide, ZnO, %	37.45
Water of Crystallization, H ₂ O, %	14.50
Anhydrous Equivalent, %	85.50

0604

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NOTICE: Before using this product, please read the Product Specification, the Material Safety Data Sheet and any other applicable product literature. The descriptions of potential uses for this product are provided only by way of example. The product is not intended or recommended for any use that would constitute infringement of any applicable patents. Nor it is intended or recommended that the product be used for any described purposes without verification by the user of the product's safety and efficacy for such purposes, as well as ensuring compliance with all applicable laws, regulations and registration requirements. Suggestions for use of this product are based on data that is believed to be reliable. The seller shall have no liability resulting from misuse of the product and provides no guarantee, whether express or implied, as to the results obtained if the product is not used in accordance with directions or safe practices. The buyer assumes all responsibility, including any injury or damage, resulting from misuse of the product, whether used alone or in combination with other materials. **THE SELLER MAKES NO EXPRESS OR IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. THE SELLER SHALL HAVE NO LIABILITY FOR CONSEQUENTIAL DAMAGES.**



Luzenac America, Inc.
345 Inverness Drive South
Suite 310
Centennial, CO 80112 USA
800-325-0299
303-643-0400
Fax: 303-643-0446
www.luzenac.com

Technical Information
United States
877-767-5037
techcenter@america.luzenac.com

Sales & Customer Service
United States
800-525-TALC (8252)
Fax: 406-285-5224
talca@america.luzenac.com

Luzenac Europe
B.P. 1162
31036 Toulouse Cedex 1, France
+33 5 61 50 20 20
Fax: +33 5 61 50 20 55
polymers@europe.luzenac.com
www.luzenac.com

Luzenac Asia
3 International Business Park
#01-18, Nordic European Centre
Singapore 609927
+65 6890 6926
Fax: +65 6890 6927
etienne.chenevier@asia.luzenac.com
www.luzenac.com

Produced by U.S. Borax, Wilmington, CA
Marketed world wide by Luzenac

Member of the Rio Tinto Group

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

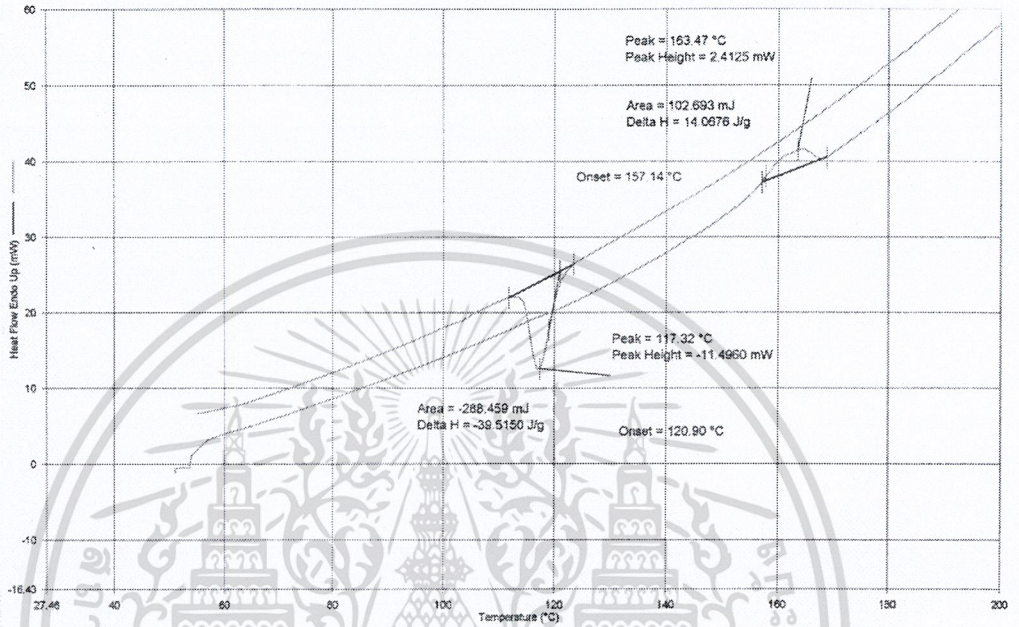
ตารางที่ ก ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของไม้พลาสติกคอมโพสิตที่ผลิตได้ในแต่ละสูตร

Formula	Flexural Strength (MPa)	Flexural modulus (MPa)	Hardness (Shore D)	Impact strength (kJ/m ²)
Control (No FR)	21.11±1.44	1426±73.98	53.5±1.42	2.23±0.122
ATH(60)	20.61±1.62	1695±70.3	57.4±1.45	1.72±0.041
ATH(60)+ ZnB(10)	18.62±1.11	1580±62.22	56.9±2.06	2.52±0.16
MGH(60)	17.521±1.56	1576±93.8	57.6±1.66	3.29±0.168
MGH(60)+ ZnB(10)	14.8±1.22	1160±79.35	59.5±2.24	1.59±0.136
Phosphate(25)	20.7±0.73	1742±51.76	56.1±1.98	2.01±0.218
Phosphate(25) + ZnB(10)	19.82±1.07	1573±39.71	59.4±1.52	2.310±0.392
ZnB(10)	19.21±0.69	1682±83.02	57.3±2.07	2.38±0.399

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

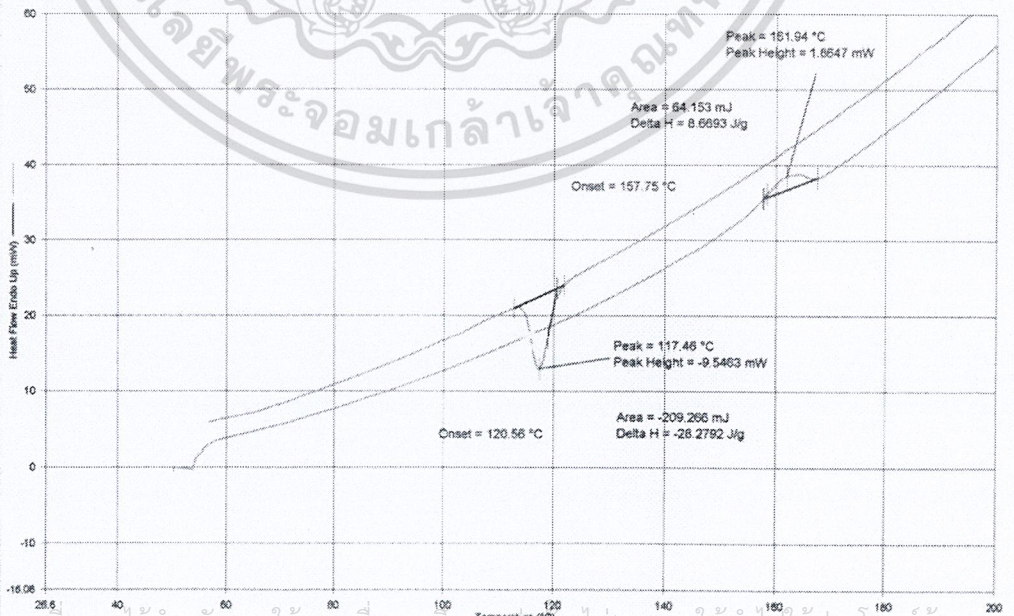
ภาคผนวก ง

ภาพที่ ๑1 DSC Thermalgram ของพอลิพรอพิลีนผสมเส้นใยมะพร้าวที่อัตราส่วน 50:50



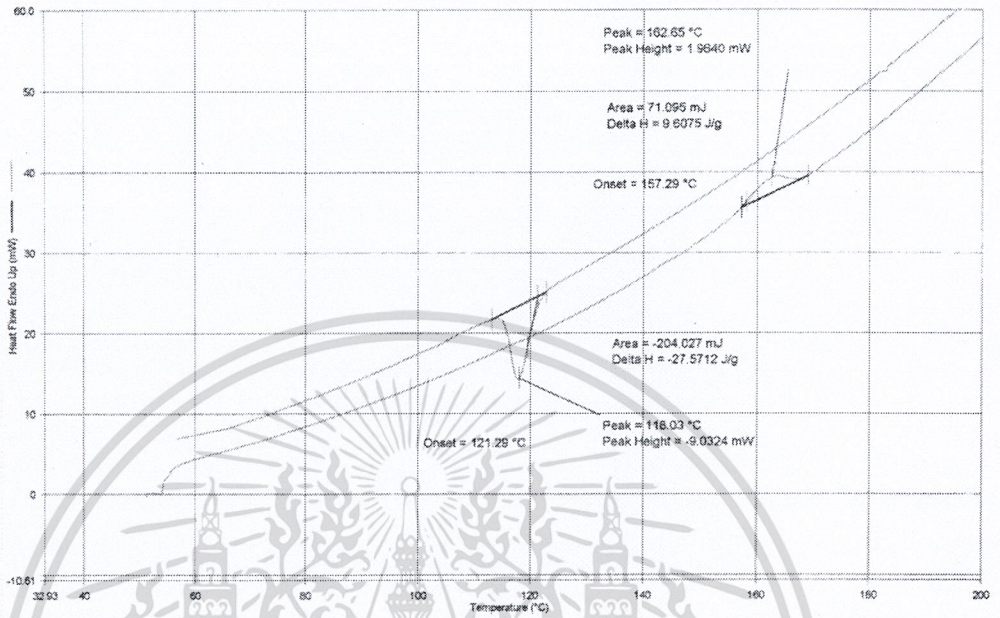
ภาพที่ ๑2 DSC Thermalgram ของพอลิพรอพิลีนผสมเส้นใยมะพร้าวที่อัตราส่วน 50:50

โดยมีอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เป็นสารหน่วงไฟ

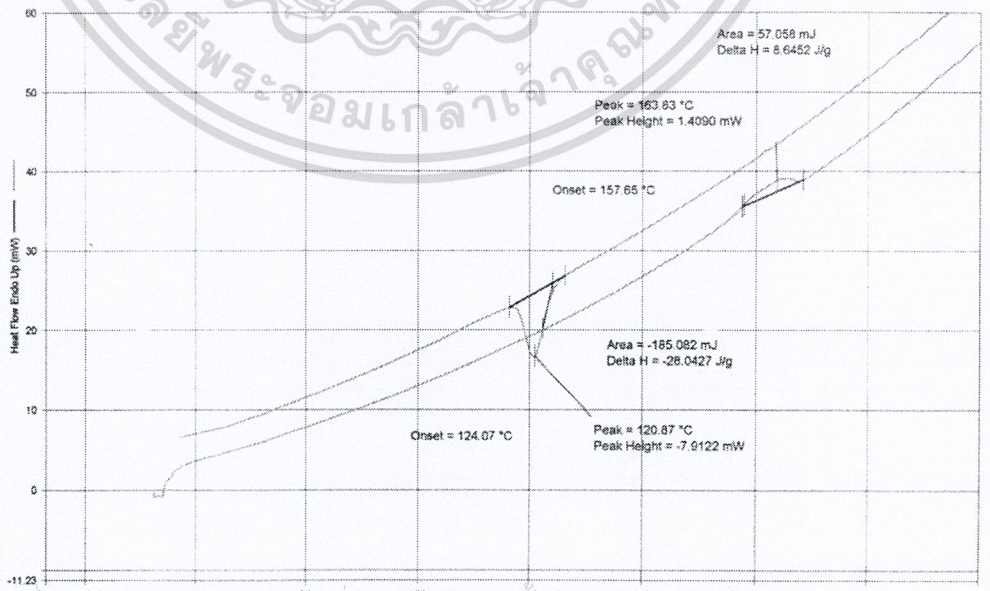


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 3 DSC Thermalgram ของพอลิพรอพิลีนผสมเส้นใยมะพร้าวที่อัตราส่วน 50:50 โดยมีอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ผสมเชิงค้ำบอเรตเป็นสารหน่วงไฟ

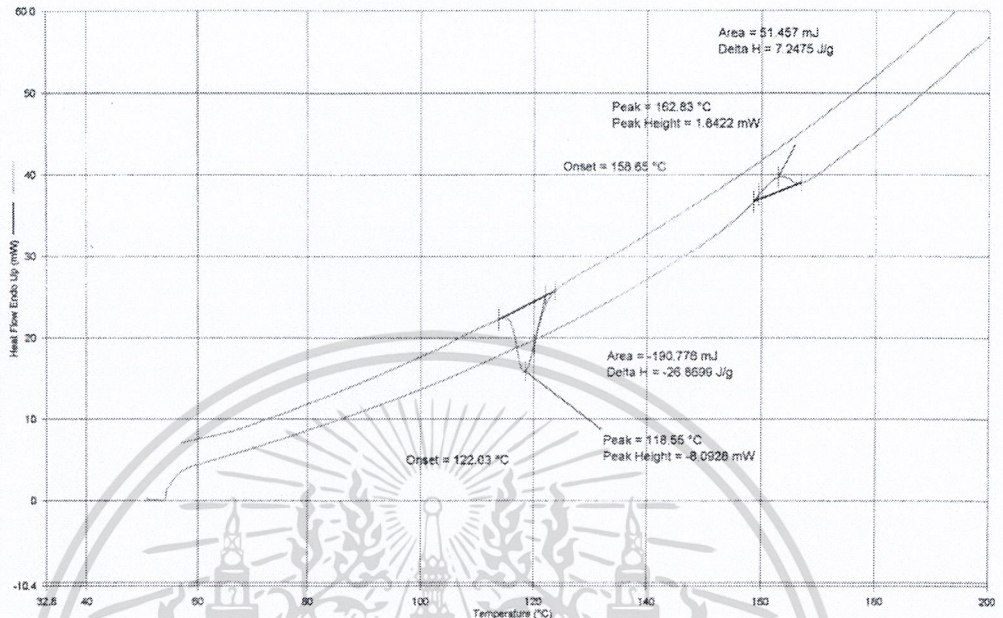


ภาพที่ 4 DSC Thermalgram ของพอลิพรอพิลีนผสมเส้นใยมะพร้าวที่อัตราส่วน 50:50 โดยมีแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารหน่วงไฟ

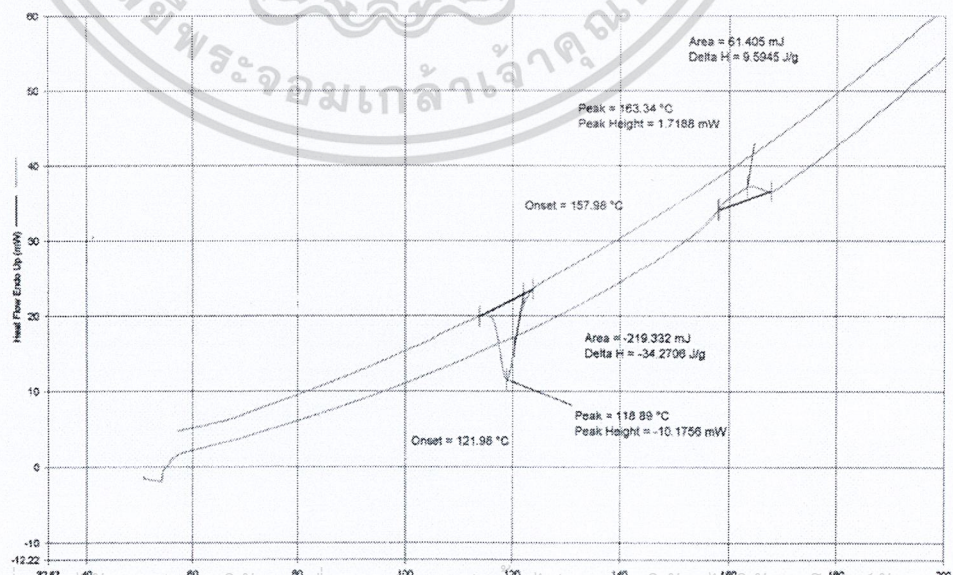


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านก ารค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 5 DSC Thermalgram ของพอลิพรอพิลีนผสมเส้นใยมะพร้าวที่อัตราส่วน 50:50 โดยมีแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ผสมซิงค์บอเรตเป็นสารหน่วงไฟ

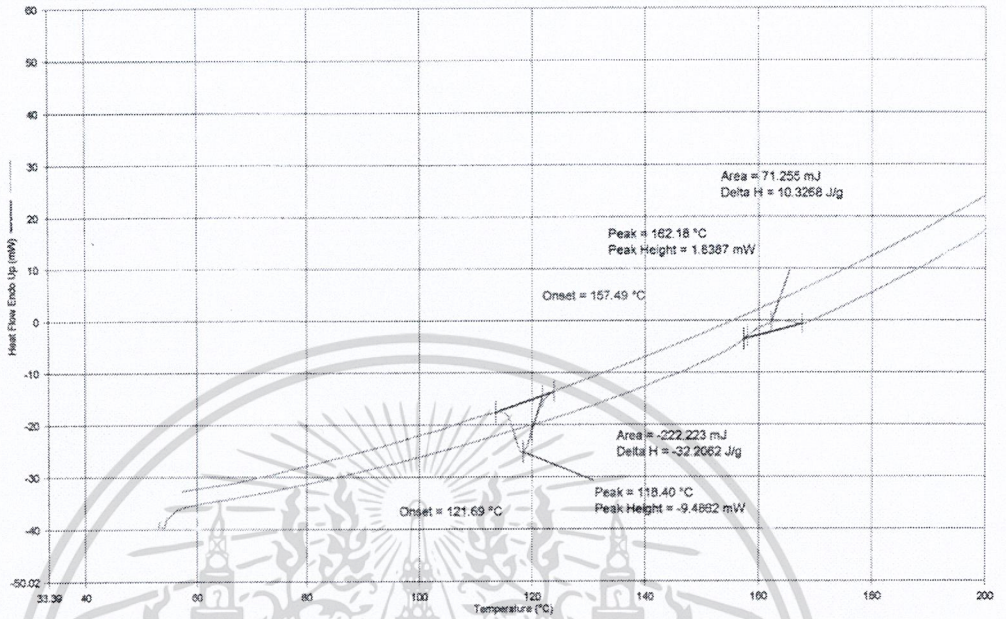


ภาพที่ 6 DSC Thermalgram ของพอลิพรอพิลีนผสมเส้นใยมะพร้าวที่อัตราส่วน 50:50 โดยมีสารประกอบฟอสเฟตเป็นสารหน่วงไฟ

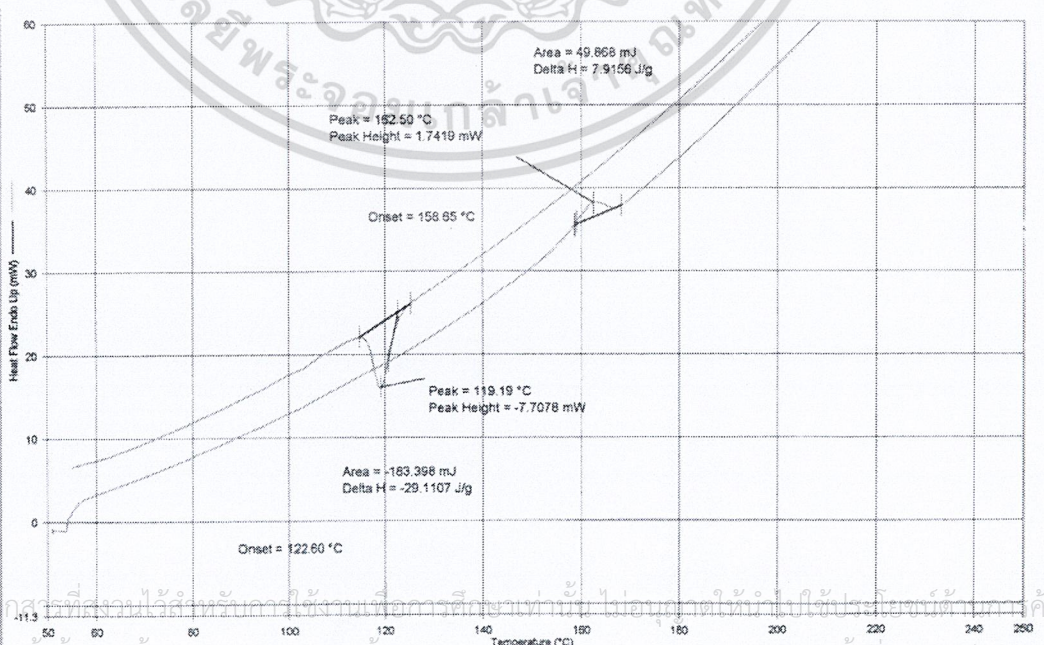


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 7 DSC Thermalgram ของพอลิพรอพิลีนผสมเส้นใยมะพร้าวที่อัตราส่วน 50:50 โดยมีสารประกอบฟอสเฟตผสมซึ่งบอเร็ตเป็นสารหน่วงไฟ



ภาพที่ 7 DSC Thermalgram ของพอลิพรอพิลีนผสมเส้นใยมะพร้าวที่อัตราส่วน 50:50 โดยมีซิงค์บอเร็ตเป็นสารหน่วงไฟ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ภายในอาคารศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำให้ปะปนออกสู่สาธารณะ
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

ตารางผลการเปรียบเทียบอัตราส่วนของสารหน่วงไฟในไม้พลาสติกคอมโพสิต

สูตร	น้ำหนักของสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง (กรัม)							น้ำหนัก รวม	% สารหน่วงไฟ โดยน้ำหนักรวม
	พอลิ พรอปิ ลีน	เส้นใย	สารหน่วงไฟ	Processing aid, Enhance	สารช่วย ผสม	Processing aid, WF 107	Antioxidant		
ATH (60)	100	100	60	5	2	1.5	1.0	268.6	22.34
ATH+ZnB (60+10)	100	100	60+10=70	5	2	1.5	1.0	278.6	22.34+4.57=26.91
MGH (60)	100	100	60	5	2	1.5	1.0	268.6	22.34
MGH+ZnB (60+10)	100	100	60+10=70	5	2	1.5	1.0	278.6	22.34+4.57=26.91
Phosphate (25)	100	100	25	5	2	1.5	1.0	233.6	10.70
Phosphate+ZnB (25+10)	100	100	25+10=35	5	2	1.5	1.0	243.6	10.70+4.57=15.27
ZnB (10)	100	100	10	5	2	1.5	1.0	218.6	4.57

ภาคผนวก ก

ตารางเปอร์เซ็นต์การลามไฟที่ซ้าลงของชนิดและปริมาณของสารหน่วงไฟ
(เทียบกับสูตรที่ไม่มีสารหน่วงไฟ)

สูตรผสม	ปริมาณ (%wt PP)	อัตราการเผาไหม้ (in/min)	% การลามไฟที่ซ้าลง
Control (No FR)	0	1.114	0
ATH	30	0.825	25.9
	40	0.768	31.1
	50	0.739	33.7
	60	0.685	35.8
MGH	30	0.866	22.3
	40	0.728	34.6
	50	0.679	39.1
	60	0.634	43.1
Phosphate	20	0.612	45.1
	25	0.491	55.9
	30	0.483	56.6
ZnB	4	1.008	9.5
	6	0.989	11.2
	8	0.939	15.7
	10	0.873	21.6
ATH+ZnB	60+10	0.483	56.6
MGH+ZnB	60+10	0.588	47.2
Phosphate+ZnB	25+10	0.764	31.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้