การศึกษาไม้พลาสติก WPCs ชนิดทนไฟชนิดบวมพอง

STUDY OF INTUMESCENT FLAME RETARDED WOOD PLASTIC COMPOSITES (WPCs)

นายชิลิโชค ปุณณะบิชี

นางสาวยุดิตา แข่มขืน

นางสาวยุพรรณกาญจ์ รัตนากาญจ์

โครงงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การศึกษาไม้พลาสติก WPCs ชนิดทนไฟระบบอินตูเมสเซนต์

STUDY OF INTUMESCENT FLAME RETARDED WOOD PLASTIC COMPOSITES (WPCs)

นายสิทธิโชค ปุณณะนิธิ

นางสาวสุธิดา แช่มชื่น

นางสาวสุพรรณภางค์ รักษาวงค์

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF INTUMESCENT FLAME RETARDED WOOD PLASTIC COMPOSITES (WPCs)

MR. SITTHICHOK PUNNANITHI

MISS SUTHIDA CHAMCHEUN

MISS SUPUNNAPANG RAKSAWONG

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

ACADEMIC YEAR 2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การศึกษาไม้พลาสติก WPCs ชนิดทนไฟระบบอินตูเมสเซนต์
	Study of Intumescent Flame Retarded Wood Plastic Composites (WPCs)
ชื่อนักศึกษา	นายสิทธิโชค ปุณณะนิธิ
	นางสาวสุธิดา แช่มชื่น
	นางสาวสุพรรณภางค์ รักษาวงค์
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
สาขาวิชา	เคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.อิทธิพล แจ้งชัด
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อ.วรธรรม อุ่นจิตติชัย

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร	
ผศ.ดร.ภัทธาวุธ มนต์วิเศษ	
รศ.ดร.อิทธิพล แจ้งชัด	
อ.วรธรรม อุ่นจิตติชัย	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การศึกษาไม้พลาสติก WPCs ชนิดทนไฟระบบอินตูเมสเซนต์ Study of Intumescent Flame Retarded Wood Plastic Composites (WPCs)
ชื่อนักศึกษา	นายสิทธิโชค ปุณณะนิธิ นางสาวสุธิดา แช่มชื่น นางสาวสุพรรณภางค์ รักษาวงค์
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
สาขาวิชา	เคมี
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.อิทธิพล แจ้งชัด
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อ.วรธรรม อุ่นจิตติชัย

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันมีความต้องการใช้ไม้เป็นจำนวนมากส่งผลให้ป่าไม้ลดลงอย่างรวดเร็วจึงมีการคิดค้นและพัฒนาวัสดุทดแทนไม้ งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPCs) ชนิดทนไฟระบบอินตูเมสเซนต์ (Intumescent) ที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเกรดรีไซเคิล (Recycled HDPE) และเส้นใยมะพร้าว (Coirs, F) ควบคุมอัตราส่วน HDPE ต่อเส้นใยมะพร้าว 50:50 (w/w) โดยใช้แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) และเมลามีน (MA) เป็นสารหน่วงไฟ ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและการติดไฟ ได้แก่ อัตราส่วนของสารหน่วงไฟ (MA : APP : F) และการใช้สารหน่วงไฟในรูปมาสเตอร์แบทช์ (Masterbatch) โดยผสมวัตถุดิบด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) และทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) จากนั้นทดสอบสมบัติการลามไฟตามมาตรฐาน UL 94 แบบแนวตั้งและ Limiting Oxygen Index (LOI) ทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความทนต่อแรงโค้งงอ (Flexural strength) และความทนต่อแรงกระแทก (Impact strength) ความหนาแน่น สัณฐานวิทยาด้วย SEM และสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC และ TGA จากการทดลองพบว่า การลดปริมาณสารหน่วงไฟ APP และ MA ที่พอเหมาะทำให้ WPCs ยังเป็น V-0 และมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น พบว่าอัตราส่วน MA : APP : F เป็น 0.17:0.5:1 คืออัตราส่วนที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลอง ซึ่งเป็นสารหน่วงไฟระบบอินตูเมสเซนต์ที่มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟดี ให้ผลการลามไฟตามมาตรฐาน UL 94 เป็น V-0 และ LOI เท่ากับ 27 ทั้งยังใช้ในปริมาณน้อยจึงส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลดีผ่านมาตรฐาน มอก. 876– 2547 นอกจากนี้ยังสามารถใช้สารหน่วงไฟในรูปมาสเตอร์แบทช์ ทำให้ผลิตง่ายขึ้น ลดต้นทุนและยังได้ไม้เทียม WPCs ชนิดทนไฟ V-0 ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์

คำสำคัญ : ไม้พลาสติกคอมโพสิต, สารหน่วงไฟระบบอินตูเมสเซนต์, เส้นใยมะพร้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Study of Intumescent Flame Retarded Wood Plastic Composites (WPCs)	
Students	Mr. Sitthichok	Punnanithi
	Miss Suthida	Chamcheun
	Miss Supunnapang	Raksawong
Degree	Bechalor of Science	
Program	Industrial Chemistry	
Academic Year	2013	
Advisor	Assoc.Prof.Dr.Ittipol	Jangchud
Co-advisor	Mr. Woratham	Oonjittichai

Abstract

Nowadays, demands for natural woods keep increasing resulting in deforestation. A number of research works in artificial woods have been carried out. In this work, Intumescent Flame Retarded (IFR) Wood Plastic Composites (WPCs) were studied. WPCs were prepared from High Density Polyethylene (Recycled HDPE) mixed with coconut fibers (F) (controlled ratio at 50:50 by weight). Ammonium polyphosphate (APP) and Melamine (MA) were used as intumescent flame retardants (IFRs). Factors affecting WPC properties were studied, i.e., MA:APP:F ratios and IFRs in masterbatch form. Raw materials were compounded by a two-roll mill and then shaped by an injection molding machine. WPC samples were characterized for flammability according to UL 94 (vertical testing) and Limiting Oxygen Index (LOI), mechanical properties, density, morphology by SEM and thermal properties by DSC and TGA. It was found that by reduction of IFR ratios (MA:APP:F) to an optimum ratio, V-0 WPCs were achieved with increasing mechanical properties. It can be concluded that the ratio of 0.17:0.5:1 (MA:APP:F) seemed to be the optimum ratio to yield good flame resisted WPC (V-0 with LOI of 27) with good mechanical properties. The resulted WPCs also passed TIS 876-2547 standard. Moreover, by preparing IFRs as masterbatch, it resulted in the ease of WPC production and cost saving. It was shown that the V-0 intumescent flame retarded WPCs can be achieved with a promising result as commercializable WPCs.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Keyword : Wood Plastic Composites, Intumescent flame retardant, Coir

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ้งชัด ที่กรุณารับเป็นที่ปรึกษาโครงงานพิเศษ คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานโครงงานพิเศษนี้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ อาจารย์วรธรรม อุ่นจิตติชัย ที่กรุณารับเป็นที่ปรึกษาโครงงานพิเศษร่วม คอยให้คำปรึกษา และให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ภัทธาวุธ มนต์วิเศษ รศ.ดร.จุฑารัตน์ปรัชญาวรากร และ ผศ.ดร.ชลดา ฤตวิรุฬห์ อาจารย์คณะกรรมการตรวจสอบโครงงานพิเศษ ที่กรุณาตรวจทาน และแก้ไขโครงงานพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และ คุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่ประจำอาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์เทคโนโลยี รวมทั้ง คุณขวัญใจ พลูสวัสดิ์ ที่คอยอำนวยความสะดวกตลอดการทำโครงงานพิเศษ

ขอขอบพระคุณ บริษัท เอ็ม.บี.เจ เอ็นเตอร์ไพร์ส โดยเฉพาะคุณบำรุง เจษฎาพงศ์ไพบูลย์ คุณฤชุอร พรหมนิมิตร์ และ คุณธรรมกร ภาณุวัฒนากุล ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมี และคอยช่วยเหลือให้คำปรึกษาต่างๆ ในการทำโครงงานพิเศษ

ขอขอบพระคุณ หน่วยวิจัยและเครื่องมือกลางและเจ้าหน้าที่นักวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง SEM, เครื่อง DSC และเครื่อง TGA

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่อาคารและสถานที่ รวมจนถึงแม่บ้าน ที่ช่วยเหลือ อำนวยความสะดวกในการเปิดปิดอาคารทั้งในและนอกเวลาราชการ

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และพี่ๆ เพื่อนๆ ทุกคน ที่คอยช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และเป็นกำลังใจจนทำให้โครงงานพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงได้

นอกจากนี้ยังมีบุคคลอื่นๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ ซึ่งผู้จัดทำมิได้กล่าวถึงอีกมากมาย ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

สิทธิโชค ปุณณะนิธิ
สุธิดา แช่มชื่น
สุพรรณภางค์ รักษาวงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อโครงงานพิเศษภาษาไทย	I
บทคัดย่อโครงงานพิเศษภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูปภาพ	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงงาน	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 วัสดุคอมโพสิต	4
2.1.1 ความหมายของวัสดุคอมโพสิต	4
2.1.2 ประเภทของวัสดุคอมโพสิต	5
2.1.3 ข้อดีข้อเสียของวัสดุคอมโพสิต	7
2.2 เส้นใยธรรมชาติ	8
2.2.1 เซลลูโลส	8
2.2.2 เฮมิเซลลูโลส	9
2.2.2.1 ประโยชน์ของเฮมิเซลลูโลส	9
2.2.3 ลิกนิน	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 มะพร้าว 11
2.3.1 เส้นใยมะพร้าว 13
2.3.2 ประโยชน์ของใยมะพร้าว 13
2.4 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง 14
2.4.1 ลักษณะทั่วไป 14
2.4.2 สมบัติทั่วไป 15
2.4.3 การใช้งาน 16
2.5 สารเติมแต่ง 16
2.5.1 พอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดร์ด 17
2.5.2 สารป้องกันออกซิเดชัน 17
2.5.3 สารช่วยกระบวนการ 19
2.6 สารหน่วงไฟ 19
2.6.1 องค์ประกอบของไฟ 19
2.6.2 กลไกการทำงานของสารหน่วงไฟ 21
2.6.2.1 การขัดขวางทางกายภาพ 21
2.6.2.2 การขัดขวางทางเคมี 22
2.6.3 ชนิดของสารหน่วงไฟ 23
2.6.3.1 สารหน่วงไฟจำแนกประเภทจากความคงทน 23
2.6.3.2 สารหน่วงไฟจำแนกประเภทจากองค์ประกอบ 24
2.6.4 สารหน่วงไฟระบบอินทูเมสเซนต์ 25
2.6.4.1 องค์ประกอบของสารหน่วงไฟระบบอินทูเมสเซนต์ 25
2.6.4.2 การเกิดชั้น Char 26
2.6.4.3 ลักษณะทางกายภาพ 27
2.6.4.4 กลไกการเกิดอินทูเมสเซนต์ 28
2.6.4.5 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของสารหน่วงไฟระบบอินทูเมสเซนต์ 29
2.6.4.6 ข้อดีข้อเสียของสารหน่วงไฟระบบอินทูเมสเซนต์ 29
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย 33

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย 33

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย 34

3.3 วิธีการทดลอง 35

3.3.1 การเตรียมเส้นใยไม้ 35

3.3.2 ขั้นตอนการผสม 35

3.3.2.1 การเตรียมสารหน่วงไฟ 35

3.3.2.2 การเตรียมไม้เทียม (WPCs) โดยเติมสารหน่วงไฟ 37

3.4 การทดสอบ 38

3.4.1 การลามไฟ 38

3.4.1.1 การทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL 94 38

3.4.1.2 การหาค่า Limiting Oxygen Index (LOI) 39

3.4.2 สมบัติเชิงกล 40

3.4.2.1 ความทนต่อแรงโค้งงอ 40

3.4.2.2 ความทนต่อแรงกระแทก 41

3.4.3 สมบัติทางกายภาพ 42

3.4.3.1 ความหนาแน่น 42

3.4.3.2 สัณฐานวิทยา 43

3.4.3.3 กล้องจุลทรรศน์ใช้แสง 43

3.4.4 สมบัติทางความร้อน 44

3.4.4.1 Differential Scanning Calorimetry (DSC) 44

3.4.4.1 Thermogravimetric Analysis (TGA) 44

3.5 สรุปประเด็นศึกษา 44

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง 45

4.1 ศึกษาอัตราส่วนของสารหน่วงไฟ 45

4.1.1 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต 46

4.1.1.1 ศึกษาสมบัติการลามไฟตามมาตราฐาน UL 94 46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.2 ศึกษาสมบัติเชิงกล 48
4.1.1.3 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ 50
4.1.2 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณเมลามีน 51
4.1.2.1 ศึกษาสมบัติการลามไฟตามมาตราฐาน UL 94 51
4.1.2.2 ศึกษาสมบัติเชิงกล 52
4.1.2.3 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ 56
4.2 ศึกษาการใช้สารหน่วงไฟในรูปมาสเตอร์แบทช์ 58
4.2.1 ศึกษาสมบัติการลามไฟตามมาตราฐาน UL 94 58
4.2.2 ศึกษาสมบัติเชิงกล 59
4.2.3 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ 61
4.3 ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 61
4.4 ศึกษาสมบัติทางความร้อน 65
4.4.1 Differential Scanning Calorimetry (DSC) 65
4.4.2 Thermogravimetric Analysis (TGA) 66
4.5 ศึกษาค่า Limiting Oxygen Index (LOI) 67
4.6 วิเคราะห์ต้นทุน 68

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 69
5.1 ผลสรุปที่ได้ 69
5.2 ข้อเสนอแนะ 70

เอกสารอ้างอิง 71
ภาคผนวก ก 74
ภาคผนวก ข 78
ภาคผนวก ค 82
ภาคผนวก ง 92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เกรดต่างๆ 16

ตารางที่ 3.1 ปริมาณส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมสารหน่วงไฟอัตราส่วนต่างๆ (ลด APP) 36

ตารางที่ 3.2 ปริมาณส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมสารหน่วงไฟอัตราส่วนต่างๆ (ลด MA) 36

ตารางที่ 3.3 ปริมาณเส้นใยที่เคลือบสารหน่วงไฟ 37

ตารางที่ 3.4 สูตรที่ใช้ในการผสมไม้เทียม 37

ตารางที่ 3.5 มาตรฐานในการทดสอบไม้เทียม 38

ตารางที่ 3.6 เกณฑ์การแบ่งกลุ่มพฤติกรรมของวัสดุต่อการติดไฟตามมาตรฐาน UL 94 38

ตารางที่ 3.7 เกณฑ์การแบ่งกลุ่มพฤติกรรมของวัสดุต่อการติดไฟตามมาตรฐาน LOI 39

ตารางที่ 4.1 ผลการลามไฟตามมาตรฐาน UL 94 ของไม้พลาสติกคอมโพสิตที่มีปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) แตกต่างกัน 46

ตารางที่ 4.2 ผลการลามไฟตามมาตรฐาน UL 94 ของไม้พลาสติกคอมโพสิตที่มีปริมาณเมลามีน (MA) แตกต่างกัน 51

ตารางที่ 4.3 ผลการลามไฟตามมาตรฐาน UL 94 ของไม้พลาสติกคอมโพสิตที่มีปริมาณเส้นใยที่เคลือบสารหน่วงไฟแตกต่างกัน 58

ตารางที่ 4.4 สมบัติทางความร้อนของไม้พลาสติกคอมโพสิต แต่ละสูตรที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC 66

ตารางที่ 4.5 ค่า Limiting Oxygen Index (LOI) ของไม้พลาสติกคอมโพสิตสูตรต่างๆ 67

ตารางที่ 4.6 วิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบในการผลิตไม้พลาสติกคอมโพสิต 1 กิโลกรัม 68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 ตัวอย่างไม้พอลิเมอร์คอมโพสิต WPCs	2
รูปที่ 2.1 ลักษณะต่างๆของเฟสที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์	4
รูปที่ 2.2 แผนผังประเภทของคอมโพสิต	5
รูปที่ 2.3 โครงสร้างเซลลูโลส	9
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส	10
รูปที่ 2.5 หน่วยซ้ำในโครงสร้างของลิกนิน	10
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของลิกนิน	11
รูปที่ 2.7 มะพร้าวและเส้นใยมะพร้าว	11
รูปที่ 2.8 สมบัติเชิงกลส่วนต่างๆของเส้นใยมะพร้าว	12
รูปที่ 2.9 ผลิตภัณฑ์จากใยมะพร้าว	14
รูปที่ 2.10 โครงสร้างของพอลิเอทิลีน	15
รูปที่ 2.11 ลักษณะโครงสร้างของพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน	15
รูปที่ 2.12 ปฏิกิริยาการเตรียม Polyethylene grafted maleic anhydride	17
รูปที่ 2.13 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิเอทิลีน	18
รูปที่ 2.14 โมเดลความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน	18
รูปที่ 2.15 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของ Primary antioxidant	18
รูปที่ 2.16 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของ Secondary antioxidant	19
รูปที่ 2.17 องค์ประกอบในการเกิดไฟ (สามเหลี่ยมไฟ)	20
รูปที่ 2.18 องค์ประกอบของสารหน่วงไฟระบบอินทูเมสเซนต์	26
รูปที่ 2.19 การเกิดชั้น Char	27
รูปที่ 2.20 ลักษณะการหน่วงไฟของสารหน่วงไฟระบบอินทูเมสเซนต์	28
รูปที่ 2.21 ลักษณะการเกิดโฟมของการหน่วงไฟระบบอินทูเมสเซนต์	29
รูปที่ 3.1 การทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL 94 โดยการเผาชิ้นงานแบบแนวตั้ง	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.2 การทดสอบ Limiting Oxygen Index 40
รูปที่ 3.3 การทดสอบความทนแรงโค้งงอแบบ 3 จุด 41
รูปที่ 3.4 การทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทกแบบ Izod 42
รูปที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์ใช้แสงแบบพกพา (Digital Portable Microscopes) 43
รูปที่ 4.1 การติดไฟของไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPCs) เมื่อทำการจุดไฟเป็นเวลา 10 วินาที โดยมีอัตราส่วน MA : APP : F (a) ไม่ใส่สารหน่วงไฟ (b)1:3:1 (c) 1:2:1 (d) 1:1:1 (e) 1:0.8:1 (f) 1:0.5:1 (g) 1:0.3:1 และ (h)1:0.1:1 47
รูปที่ 4.2 ค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural Strength) ของไม้พลาสติกคอมโพสิตที่มีปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) แตกต่างกัน 48
รูปที่4.3 ค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact Strength) ของไม้พลาสติกคอมโพสิตที่มีปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) แตกต่างกัน 49
รูปที่ 4.4 ค่ามอดุลัสโค้งงอ (Flexural Modulus) ของไม้พลาสติกคอมโพสิตที่มีปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) แตกต่างกัน 49
รูปที่ 4.5 ค่าความหนาแน่น (Density) ของไม้พลาสติกคอมโพสิตที่มีปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) แตกต่างกัน 50
รูปที่ 4.6 การติดไฟของไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPCs) เมื่อทำการจุดไฟเป็นเวลา 10 วินาที โดยมีอัตราส่วน MA : APP : F (a) 0.1:0.3:1, (b)0.17:0.5:1 52
รูปที่ 4.7 ภาพ OM ของ WPCs ที่เตรียมจาก HDPE ผสมสารหน่วงไฟระบบอินตูเมสเซนต์ (Intumescent) ในอัตราส่วน MA : APP : F เป็น (a)0.1:0.3:1 และ (b) 0.17:0.5:1 52
รูปที่ 4.8 ค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural Strength) ของไม้พลาสติกคอมโพสิตที่มีปริมาณเมลามีน (MA) แตกต่างกัน 53
รูปที่ 4.9 ค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact Strength) ของไม้พลาสติกคอมโพสิตที่มีปริมาณเมลามีน (MA) แตกต่างกัน 54
รูปที่ 4.10 ค่ามอดุลัสโค้งงอ (Flexural Modulus) ของไม้พลาสติกคอมโพสิตที่มีปริมาณเมลามีน (MA) แตกต่างกัน 55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.11 ค่าความหนาแน่น (Density) ของไม้พลาสติกคอมโพสิตที่มีปริมาณเมลามีน (MA) ต่างกัน 56
รูปที่ 4.12 การติดไฟของไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPCs) เมื่อทำการจุดไฟเป็นเวลา 10 วินาที โดยมีปริมาณเส้นใยที่เคลือบสารหน่วงไฟ : ปริมาณเส้นใยที่ไม่เคลือบสารหน่วงไฟ เป็น (a) 100:0, (b) 75:25, (c) 50:50 และ (d) 25:75 58
รูปที่ 4.13 ค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural Strength) ของไม้พลาสติกคอมโพสิตที่มีปริมาณเส้นใยที่เคลือบสารหน่วงไฟแตกต่างกัน 59
รูปที่ 4.14 ค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact Strength) ของไม้พลาสติกคอมโพสิตที่มีปริมาณเส้นใยที่เคลือบสารหน่วงไฟแตกต่างกัน 60
รูปที่ 4.15 ค่ามอดุลัสโค้งงอ (Flexural Modulus) ของไม้พลาสติกคอมโพสิตที่มีปริมาณเส้นใยที่เคลือบสารหน่วงไฟแตกต่างกัน 60
รูปที่ 4.16 ค่าความหนาแน่น (Density) ของไม้พลาสติกคอมโพสิตที่มีปริมาณเส้นใยที่เคลือบสารหน่วงไฟแตกต่างกัน 61
รูปที่ 4.17 ภาพ SEM ของ WPCs ที่เตรียมจาก HDPE ผสมสารหน่วงไฟระบบอินตูเมสเซนต์อัตราส่วน 0.17:0.5:1 62
รูปที่ 4.18 ภาพ SEM ของ WPCs ที่เตรียมจาก HDPE ผสมสารหน่วงไฟระบบอินตูเมสเซนต์อัตราส่วน 1:2:1 64
รูปที่ 4.19 TGA อุณหภูมิการสลายตัวด้วยความร้อน (a) องค์ประกอบต่างๆของไม้พลาสติกคอมโพสิต (b) ไม้พลาสติกคอมโพสิตที่ใส่สารหน่วงไฟอัตราส่วนต่างๆ 67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงงาน

ป่าไม้เป็นแหล่งทรัพยากรที่สำคัญต่อระบบนิเวศน์ ช่วยรักษาสมดุลของธรรมชาติเป็นแหล่งกำเนิดต้นน้ำลำธาร แหล่งที่อยู่อาศัย แหล่งอาหารของสัตว์ แหล่งฟอกอากาศทางธรรมชาติ รวมทั้งป่าไม้ยังช่วยบรรเทาและป้องกันการเกิดอุทกภัย แต่ปัจจุบันนี้ป่าไม้กำลังลดลงอย่างรวดเร็ว มีการตัดไม้ทำลายป่าทั่วทุกที่ เนื่องมาจากความต้องการในการใช้ไม้จำนวนมากขึ้น เช่น เป็นแหล่งที่อยู่อาศัย แหล่งทำกิน ทำเครื่องมือเครื่องใช้ อาคารบ้านเรือน เป็นต้น จากการที่มีทรัพยากรป่าไม้ลดลงจึงส่งผลต่อสมดุลของธรรมชาติ เช่น ปัญหาฝนตกไม่ตรงตามฤดูกาล ปัญหาความแห้งแล้ง ปัญหาอุทกภัย ปัญหาภาวะเรือนกระจก เป็นต้น

งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาเพื่อพัฒนาวัสดุทดแทนไม้เพื่อลดการตัดไม้ทำลายป่า รวมทั้งปรับปรุงข้อด้อยของไม้ เช่น ดูดความชื้น โก่งตัว ถูกทำลายได้ด้วยปลวกและแมลง น้ำหนักมาก ราคาแพง และไม่ทนไฟ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาไม้พลาสติกคอมโพสิตชนิดทนไฟเพื่อให้ไม้ทนไฟได้นานขึ้นและช่วยบรรเทาความเสียหายจากการเกิดอัคคีภัย

วัสดุทดแทนไม้ในงานวิจัยนี้คือ ไม้พลาสติกคอมโพสิต (Wood Plastic Composites ; WPCs) โดยมีพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและเส้นใยมะพร้าวเป็นส่วนประกอบหลัก ซึ่งเส้นใยมะพร้าวเป็นวัสดุทางธรรมชาติที่หาได้ง่าย ราคาถูก มีลักษณะเป็นเส้นใย เมื่อทำเป็นวัสดุคอมโพสิตแล้วให้เนื้อสัมผัสคล้ายกับไม้ ทั้งนี้ยังสามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงได้อีกด้วย แต่สมบัติโดยรวมก็ยังไม่มีจุดเด่นเหนือกว่าไม้ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาสมบัติของไม้พลาสติกคอมโพสิตในด้านการทนไฟเพื่อเป็นจุดเด่นให้คนหันมาใช้วัสดุทดแทนไม้มากยิ่งขึ้น

จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ [1] ได้มีการปรับปรุงสมบัติการทนไฟของไม้พลาสติกคอมโพสิตโดยใส่สารหน่วงไฟผสมลงในพอลิเมอร์และเส้นใยโดยตรง ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการทนไฟของไม้พลาสติกคอมโพสิตไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากเส้นใยมะพร้าวเป็นวัสดุที่ติดไฟได้ง่าย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการเคลือบสารหน่วงไฟลงบนเส้นใย เพื่อลดความสามารถในการติดไฟของเส้นใยมะพร้าวให้มีประสิทธิภาพในการทนไฟดียิ่งขึ้น โดยใช้สารหน่วงไฟระบบอินตูเมสเซนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Intumescent) ซึ่งเป็นสารหน่วงไฟที่เมื่อวัสดุได้รับความร้อนจะทำให้เกิดการพองตัว เกิดโครงสร้างลักษณะคล้ายโฟมซึ่งเป็นฉนวนความร้อนและสามารถทำหน้าที่เป็นแนวกั้นความร้อนระหว่างเปลวไฟกับวัสดุที่ถูกเผาไหม้ได้ นอกจากนี้ยังเป็นมิตรกับมนุษย์และสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ทั้งนี้เพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน

รูปที่ 1.1 ตัวอย่างไม้พลาสติกคอมโพสิต WPCs [2]

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการเตรียมไม้พลาสติกคอมโพสิตชนิดทนไฟระบบอินตูเมสเซนต์ (Intumescent Flame Retarded WPCs) จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene ; HDPE) ผสมเส้นใยมะพร้าว โดยเน้นศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการดับไฟและสมบัติอื่นๆของวัสดุ ปัจจัยที่จะศึกษาได้แก่ ผลของอัตราส่วนของสารหน่วงไฟ (MA : APP : F), ศึกษาการใช้สารหน่วงไฟในรูปมาสเตอร์แบทช์ (Masterbatch), สมบัติต่างๆของไม้พลาสติกคอมโพสิตที่เตรียมได้ เช่น สมบัติการลามไฟตามมาตรฐาน UL 94 และ LOI (Limiting Oxygen Index) ความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) ความทนต่อแรงกระแทก (Impact strength) ความหนาแน่น (Density) สัณฐานวิทยาด้วย SEM สมบัติทางความร้อนด้วย DSC และ TGA เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาอัตราส่วนของสารหน่วงไฟ (เมลามีน : แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต : เส้นใยมะพร้าว ; MA : APP : F)

2. ศึกษาการใช้สารหน่วงไฟในรูปมาสเตอร์แบทช์ (Masterbatch)

3. ศึกษาสมบัติของไม้เทียมที่เตรียมได้ ได้แก่

- สมบัติการลามไฟตามมาตรฐาน UL 94 และ LOI (Limiting Oxygen Index)

- สมบัติเชิงกลเช่น ความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) ความทนต่อแรงกระแทก (Impact strength)

- ความหนาแน่น (Density)

- สัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM

- สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC และ TGA

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถพัฒนาไม้เทียมที่มีสมบัติทนไฟได้เพื่อทดแทนการใช้ไม้ที่กำลังจะหมดไป

2. สามารถทราบสูตรที่เหมาะสมในการผลิตเพื่อให้ได้สมบัติที่ดีที่สุด

3. สามารถนำเส้นใยจากธรรมชาติที่เหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์และช่วยเพิ่มมูลค่าเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรทั้งยังช่วยลดการตัดไม้ทำลายป่า

4. สามารถนำความรู้ที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางหรือนำไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยอื่นในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

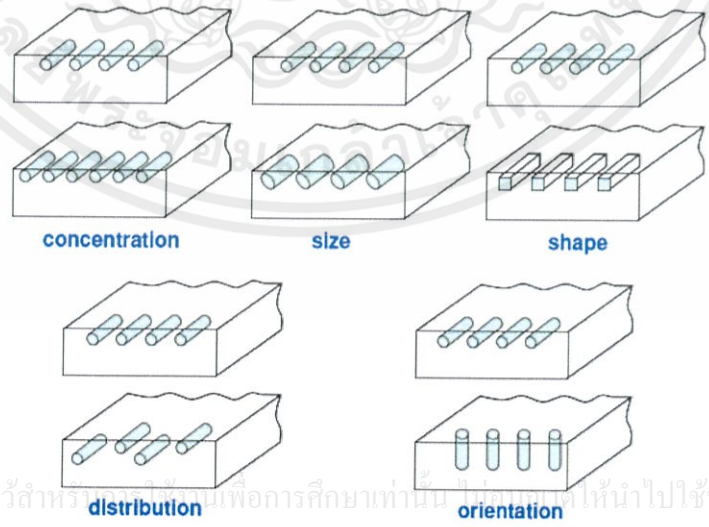
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 วัสดุคอมโพสิต (Composite) [3]

2.1.1 ความหมายของวัสดุคอมโพสิต

คอมโพสิต (Composite) คือวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีหรือโครงสร้างแตกต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกันซึ่งวัสดุที่ได้จะมีสมบัติของวัสดุเริ่มต้นรวมกัน โดยทั่วไปแล้ววัสดุคอมโพสิตจะประกอบด้วยวัสดุตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นเนื้อหลักหรือเมทริกซ์ (Matrix) และวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นเฟสที่กระจายตัว (Dispersed phase) อยู่ในเมทริกซ์นั้นหรืออาจเรียกว่าเป็นเฟสเสริมแรง (Reinforced phase) ตัวอย่างคอมโพสิตที่พบในธรรมชาติ เช่น ไม้ซึ่งเป็นวัสดุเชิงประกอบระหว่างลิกนิน (Lignin) กับเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose fiber) หรือกระดูกซึ่งเป็นคอมโพสิตระหว่างแร่อะพาไทต์ (Apatite) กับโปรตีนคอลลาเจน (Collagen) เป็นต้น

ส่วนของคอมโพสิตสังเคราะห์นั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาเพื่อให้มีสมบัติที่ดีเหมาะกับการใช้งานเฉพาะทาง โดยสมบัติของคอมโพสิตที่ได้จะขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุเริ่มต้น อัตราส่วนของวัสดุเริ่มต้นแต่ละชนิด และลักษณะของเฟสที่กระจายตัวอยู่

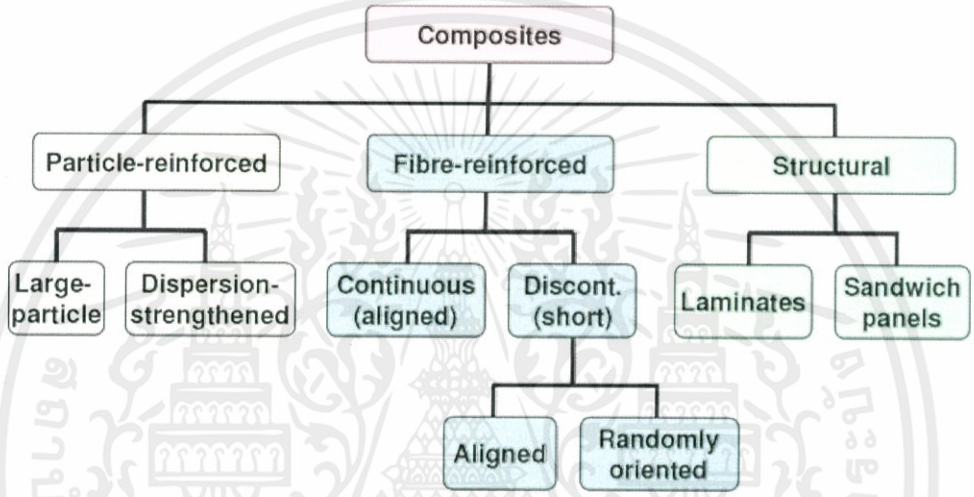


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.1 ลักษณะต่างๆของเฟสที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ [3]

จากรูปที่ 2.1 แสดงถึงลักษณะต่างๆของเฟสที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ ซึ่งส่งผลต่อสมบัติของคอมโพสิต จะเห็นได้ว่าถึงแม้จะเป็นคอมโพสิตที่เกิดจากเมทริกซ์และเฟสที่กระจายตัวอยู่ชนิดเดียวกัน แต่ถ้ามีความเข้มข้น (ปริมาณ) ขนาด รูปร่าง ลักษณะการกระจาย หรือการจัดเรียงตัวของเฟสที่กระจายตัวอยู่แตกต่างกันแล้วคอมโพสิตที่ได้จะมีสมบัติที่ไม่เหมือนกัน

2.1.2 ประเภทของวัสดุคอมโพสิต



รูปที่ 2.2 แผนผังประเภทของคอมโพสิต [3]

คอมโพสิตสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle-reinforced composite) คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber-reinforced composite) และคอมโพสิตโครงสร้าง (Structural composite)

1. คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle-reinforced composite)

คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค คือคอมโพสิตที่มีอนุภาคของวัสดุใดๆกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์เพื่อทำหน้าที่เสริมแรง ซึ่งวัสดุเสริมแรง (Reinforcement) นี้มีรูปร่างได้หลายแบบ เช่น เป็นแผ่นบาง (Flake) เป็นอนุภาคกลม (Particle) หรือเป็นเม็ดขนาดใหญ่ (Filler) เป็นต้น คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภท คือคอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ (Large-particle composite) และคอมโพสิตที่เพิ่มความแข็งแรงด้วยการกระจายตัวของอนุภาค (Dispersion-strengthened composite)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber-reinforced composite)

คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงและความแข็งสูงเมื่อเทียบกับน้ำหนัก ลักษณะเฉพาะดังกล่าวสามารถแสดงได้ในรูปของค่าความแข็งแรงจำเพาะ ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างความต้านทานแรงดึงกับความถ่วงจำเพาะและในรูปของมอดุลัสจำเพาะซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างมอดุลัสยืดหยุ่นกับความถ่วงจำเพาะ

3. คอมโพสิตโครงสร้าง (Structural composite)

คอมโพสิตโครงสร้างสามารถประกอบขึ้นจากวัสดุเนื้อเดียวและคอมโพสิต สมบัติของคอมโพสิตโครงสร้างนี้ นอกจากจะขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุเริ่มต้นแล้วยังขึ้นอยู่กับรูปแบบของวัสดุที่นำมาประกอบกันด้วย สามารถแบ่งคอมโพสิตโครงสร้างได้เป็นสองประเภท คือคอมโพสิตแบบชั้น (Laminar composite) และผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบแบบแซนด์วิช (Sandwich panel)

ซึ่งนอกจากการแบ่งประเภทของคอมโพสิตดังกล่าวข้างต้นแล้ว สามารถแบ่งประเภทของคอมโพสิตตามวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ เมทริกซ์อาจเป็นได้ทั้งโลหะ, เซรามิก หรือพอลิเมอร์ โดยทั่วไปแล้วมักมีความเหนียวที่ดี หน้าที่หลักของเมทริกซ์คือยึดเส้นใยไว้ด้วยกันและเป็นตัวกลางส่งผ่านแรงที่มากระทำไปยังเส้นใยนอกจากนี้ยังช่วยป้องกันการเสียหายของเส้นใยเนื่องจากการขัดถูหรือปฏิกิริยาเคมี แรงของพันธะยึดติด (Adhesive bonding force) ระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ควรมีค่าสูงพอเพื่อป้องกันการที่เส้นใยจะถูกดึงหลุดออกจากเมทริกซ์ โดยสามารถแบ่งประเภทของคอมโพสิตตามวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ Polymer-Matrix Composites (PMCs), Metal-Matrix Composites (MMCs) และ Ceramic-Matrix Composites (CMCs)

1. คอมโพสิตที่มีพอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์ (Polymer-matrix composites ; PMCs)

PMCs คือคอมโพสิตที่มีพอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์ ส่วนวัสดุเสริมแรงเป็นได้หลากหลาย ทั้งแก้ว คาร์บอน และอะรามิด คอมโพสิตประเภทนี้มีการใช้งานแพร่หลาย เนื่องจากมีราคาถูกและขึ้นรูปง่าย เช่น พอลิโอลิฟิน พอลิเมอร์ที่นิยมใช้เป็นเมทริกซ์มากที่สุดคือพอลิเอสเทอร์และไวนิลเอสเทอร์ แต่นอกจากสองประเภทนี้แล้วยังมีพอลิเมอร์ประเภทอื่นๆอีก ตัวอย่างเช่น อีพอกซี ซึ่งมีราคาสูงกว่าพอลิเอสเทอร์หรือไวนิลเอสเทอร์ แต่มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าและสามารถทนต่อความชื้นได้ดีกว่า หรือพอลิไอไมด์เรซิน (Polyimide resin) ซึ่งสามารถทนความร้อนได้ดีกว่าพอลิเมอร์ทั่วไป จึงถูกนำไปใช้ที่อุณหภูมิสูง หรือพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน (Polyether etherketone ; PEEK) พอลิฟีนิลีนซัลไฟด์ (Polyphynylene sulphide ; PPS) พอลิอีเทอร์เอไมด์ (Polyetherimide ; PEI) ซึ่งมีศักยภาพที่จะประยุกต์ใช้เป็นยานอวกาศในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. คอมโพสิตที่มีโลหะหรือโลหะผสมเป็นเมทริกซ์ (Metal-Matrix Composites ; MMCs)

MMCs คือคอมโพสิตที่มีโลหะหรือโลหะผสมเป็นเมทริกซ์ ส่วนวัสดุที่ทำหน้าที่เสริมแรงนั้นสามารถเป็นได้ทั้งอนุภาค หรือเส้นใยทั้งแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ข้อดีของ MMCs ที่เหนือกว่า PMCs คือสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง ไม่ติดไฟ แต่ว่ามีราคาแพง ดังนั้นมักถูกนำไปใช้ในงานเฉพาะที่ต้องการสมบัติเด่นทางด้านความแข็งแรงจำเพาะ ความแข็งตึงจำเพาะ ความต้านทานการสึกหรอ ความต้านทานการคืบ (Creep) การนำความร้อน หรือความเสถียรของขนาด (Dimensional stability) เป็นต้น

3. คอมโพสิตที่มีเซรามิกเป็นเมทริกซ์ (Ceramic-Matrix Composites ; CMCs)

โดยทั่วไปแล้ววัสดุเซรามิกสามารถทนต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงได้ดี แต่ข้อด้อยของเซรามิกคือมีค่าความทนทานต่อการแตกหักต่ำเมื่อเทียบกับโลหะ ดังนั้นเพื่อเป็นการปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้น จึงนำมาทำเป็น CMCs ซึ่งการเสริมแรงสามารถทำได้ทั้งในรูปแบบอนุภาควิสเกอร์หรือเส้นใย

2.1.3 ข้อดีข้อเสียของวัสดุคอมโพสิต

<u>ข้อดีของของวัสดุคอมโพสิต</u>

- ใช้วัสดุคอมโพสิตช่วยลดน้ำหนักของชิ้นงาน
- มีสมบัติต่อน้ำหนักหรือความหนาแน่น (Properties to weight/density ratio) สูง เช่น ความแข็งจำเพาะ (Specific strength) มอดุลัสจำเพาะ (Specific modulus) ความแข็งเปราะจำเพาะ (Specific stiffness) เป็นต้น เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตมีความหนาแน่นต่ำ น้ำหนักเบา
- มีเสถียรภาพทางรูปร่าง (Dimensional stability) สูง เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficients of thermal expansion ; CTE) ต่ำ เมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะ
- มีสมบัติหลากหลาย สามารถผลิตวัสดุคอมโพสิตที่มีความเหมาะสมกับการใช้งาน เช่น ชนิด ปริมาณ ขนาดของเส้นใย

<u>ข้อเสียของของวัสดุคอมโพสิต</u>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำลายหรือนำกลับมาใช้ใหม่หรือรีไซเคิล (Recycle) ได้ยาก
- ต้นทุนการผลิตสูง เนื่องจากราคาวัตถุดิบและเครื่องมือในการขึ้นรูปคอมโพสิต

- คอมโพสิตมักมีสมบัติและทิศทางไม่เท่ากัน (Anisotropy) เนื่องจากการจัดเรียงตัว (Orientation) ของส่วนเสริมแรง

2.2 เส้นใยธรรมชาติ (Natural Fibers) [4],[5]

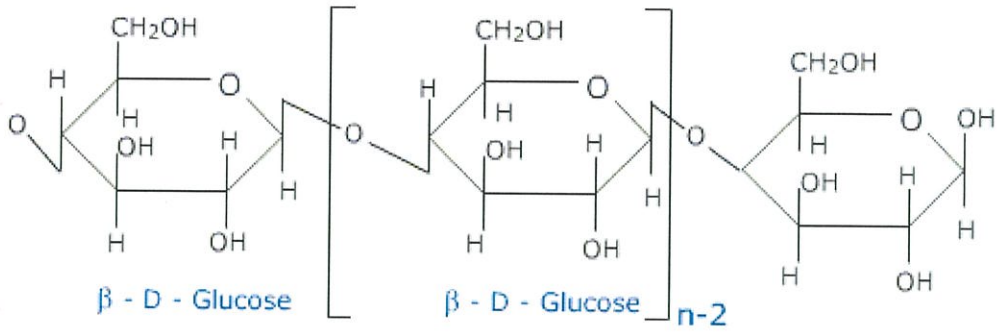
เส้นใยธรรมชาติ (Natural Fibers) หมายถึงสิ่งที่มีลักษณะเป็นเส้นยาวเรียว องค์ประกอบของเซลล์ส่วนใหญ่เป็นเซลลูโลส เกิดจากการรวมตัวของพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharide) ของกลูโคส (Glucose) ซึ่งโมเลกุลของเซลลูโลสเรียงตัวกันในผนังเซลล์ของพืชเป็นหน่วยเส้นใยขนาดเล็กมากเกิดการเกาะจับตัวกันเป็นเส้นใยขึ้น โดยเส้นใยธรรมชาติส่วนใหญ่มีราคาถูก มีปริมาณมาก และเส้นใยธรรมชาติสามารถนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์ได้ โดยอาจเป็นชนิดเสริมแรงหรือไม่เสริมแรงขึ้นกับชนิดและขนาดของเส้นใยที่นำมาใช้

โครงสร้างโดยทั่วไปของเส้นใยธรรมชาติประกอบด้วยเซลลูโลส (Cellulose) เป็นส่วนใหญ่องค์ประกอบที่เหลือเป็นเฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) และลิกนิน (Lignin)

2.2.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสเป็นสารประกอบที่มีมากที่สุดของเนื้อไม้ คือประมาณ 40% ทั้งในไม้ใบแคบหรือไม้ตระกูลสน (Softwood) และไม้ใบกว้าง (Hardwood) มีโครงสร้างอัดกันแน่นเป็นเส้นตรงไม่มีกิ่ง เซลลูโลสเป็นสารประกอบพอลิแซคคาไรด์ที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยคือ D-anhydroglucopyranose เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบตา 1,4 ไกลโคซิดิก (ß-1,4 glycosidic bonds) สูตรโครงสร้างทางเคมีคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ โดยเรียงต่อกันเป็นสายตรงต่อเรื่อยๆเกิดเป็นพอลิเมอร์สายยาวที่ไม่มีกิ่งก้านสาขา (Unbrance polymer) จำนวนหน่วยย่อยที่มาต่อกันจะแตกต่างกันไปตามชนิดของพืชตั้งแต่ 200 ถึง 15,000 หน่วยสำหรับสาย ß-1,4 glycosidic bonds พบว่ากลุ่มไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) กลุ่มไฮดรอกซีเมทิล (CH_2OH group) และพันธะ Glycosidic จะอยู่ในระนาบเดียวกันพบว่าหน่วย D-anhydroglucopyranose ส่วนใหญ่มีรูปร่างเป็นแบบ Chair form และเนื่องจากสาย Glucan หมุนบิดตัวได้ 180 องศารอบแกนจึงทำให้แต่ละสายมีรูปร่างลักษณะที่เปรียบเสมือนแผ่นริบบิ้น (Flate ribbon) สาย Glucan แต่ละสายจะมาเรียงต่อกันเป็นไมโครไฟบริล (Microfibril) เมื่อมาเรียงต่อกันเป็นไมโครไฟบริลแล้วพบพันธะไฮโดรเจนเกิดระหว่างกลุ่มไฮดรอกซิลของคาร์บอนตำแหน่งที่ 3 นอกจากนี้ยังพบพันธะไฮโดรเจนของคาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ของหน่วยย่อยในสายหนึ่งกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของหน่วยย่อยในอีกสายหนึ่งด้วยสายของ ß-1,4 linked glucan ที่ขนานกันนั้นยึดกันอยู่ด้วยพันธะไฮโดรเจนซึ่งมีส่วนให้โครงสร้างของเซลลูโลสซับซ้อนและยากต่อการย่อยสลายมากขึ้นโดยทั่วไปเซลลูโลสมีโครงสร้าง 2 ส่วนคือ Crystalline cellulose มีลักษณะเป็นผลึกที่เป็นระเบียบแข็งแรงและ Amorphous cellulose มีลักษณะไม่เป็นระเบียบมีความแข็งแรงต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 โครงสร้างเซลลูโลส [4]

2.2.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสเป็นสารประกอบที่มีในเส้นใยรองมาจากเซลลูโลส โดยมักพบในไม้ใบแคบหรือไม้ตระกูลสน (Softwood) มีประมาณ 25-30% ส่วนในไม้ใบกว้าง (Hardwood) มีประมาณ 30-35% โดยโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยพอลิแซคคาไรด์คล้ายกับเซลลูโลสแต่มีข้อต่างจากเซลลูโลสคือ

1. เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วย น้ำตาล 5 ชนิดและกรดบางชนิด คือ

- Hexoses (จำนวน C = 6) : Glucose, Mannose, Galactose
- Pentose (จำนวน C = 5) : Xylose, Arabinose
- Acid : 4-O-methyl-D glucuronic acid

2. สายโซ่ของเฮมิเซลลูโลสมีโครงสร้างลักษณะส่วนใหญ่เป็นแบบโซ่กิ่ง (Branch chain) แต่สายโซ่ของเซลลูโลสมีโครงสร้างลักษณะเป็นแบบโซ่ตรง (Linear chain)

3. องศาการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of polymerization) ของเซลลูโลสสูงกว่าเฮมิเซลลูโลส

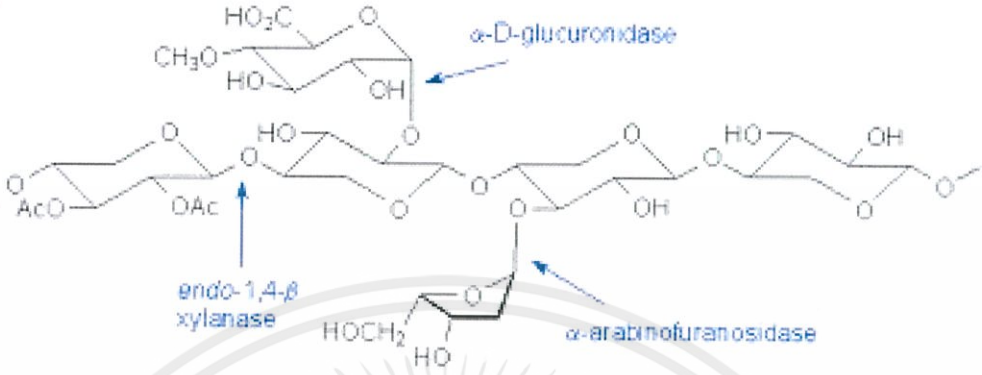
2.2.2.1 ประโยชน์ของเฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses)

1. ในรูป Monomer สามารถแยกน้ำตาลโดยวิธี Hydrolysis เรียกวิธีนี้ว่า Wood saccharification (การทำน้ำตาลจากเนื้อไม้) และวิธี Stream explosion โดยใช้ไอน้ำไปแยกและได้น้ำตาลมาก

2. ในรูป Polymer มีผลทำให้ผลผลิตเยื่อมากขึ้นทำให้ความแข็งแรงของเยื่อและกระดาษเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีโครงสร้างเป็น Amorphous (อยู่รวมกันแบบหลวมๆ) น้ำจึงเข้าไปได้ง่ายเกิดการพองตัวตัวเยื่ออุ้มน้ำได้ดี มีประโยชน์ในการตีเยื่อคือทำให้ผิวของเส้นใยแตกออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

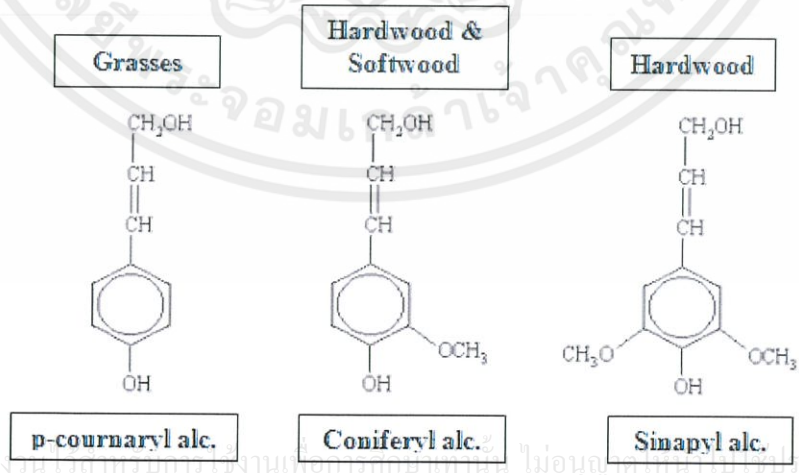
3. เมื่อนำไปทำปฏิกิริยาทางเคมีสังเคราะห์ได้ Food additive (สารแต่งเติมทำให้อาหารข้น), Jelly agent (ใช้ในเครื่องสำอาง เป็นตัว Absorbent) และ Adhesive (ตัวเชื่อมประสาน)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส [4]

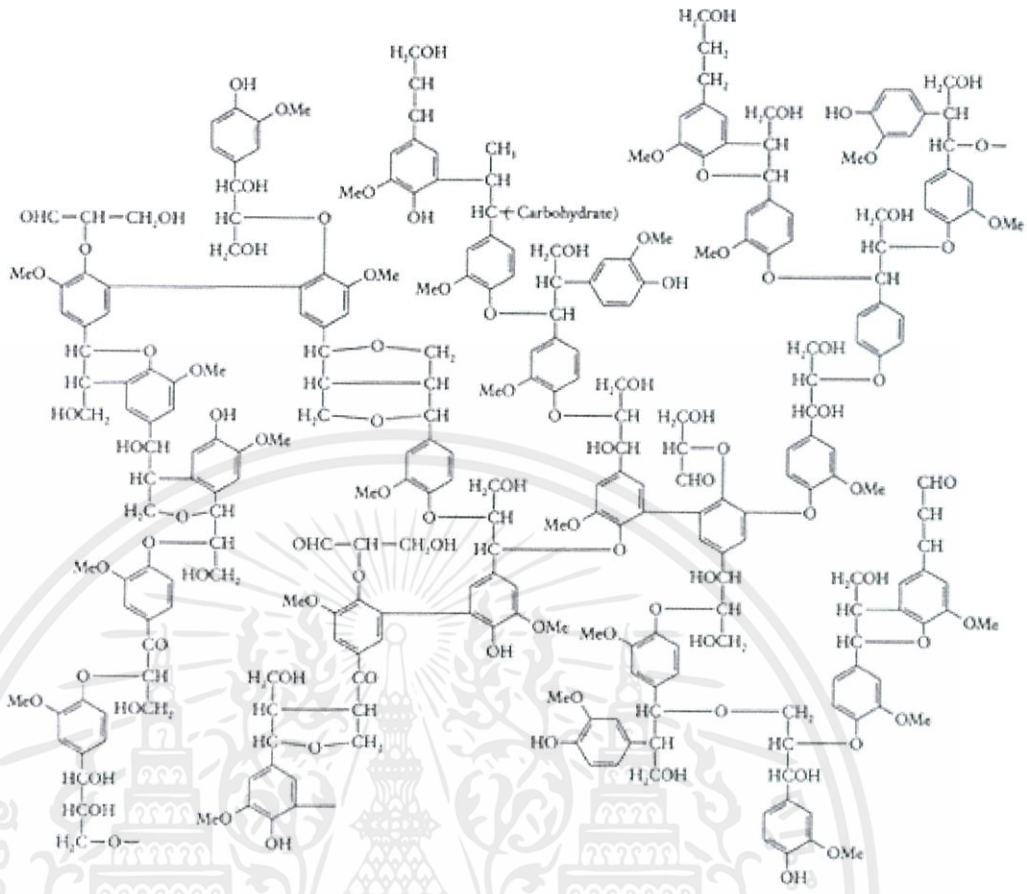
2.2.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเชิงซ้อน ซึ่งเป็นส่วนประกอบของเส้นใยที่มีมากรองจากเซลลูโลสในไม้ใบแคบหรือไม้ตระกูลสน (Softwood) จะมีลิกนินประมาณ 25-30% ส่วนในไม้ใบกว้าง (Hardwood) มีลิกนินประมาณ 20-25% โครงสร้างของลิกนินจะประกอบด้วยสารอะลิฟาติก (Aliphatic) และอะโรมาติก (Aromatic) อยู่รวมกัน โดยสารอะโรมาติกในโครงสร้างจะทำให้ลิกนินเป็นสารที่มีเสถียรภาพสูง ไม่ละลายน้ำ และยังมีหน้าที่ในการยึดติดเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเข้าด้วยกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.5 หน่วยซ้ำในโครงสร้างของลิกนิน [4]



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของลิกนิน [4]

2.3 มะพร้าว (Coconut) [6],[7],[8]

เอกสารนี้เป็นเอก[illegible]การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.7 มะพร้าวและเส้นใยมะพร้าว [9]

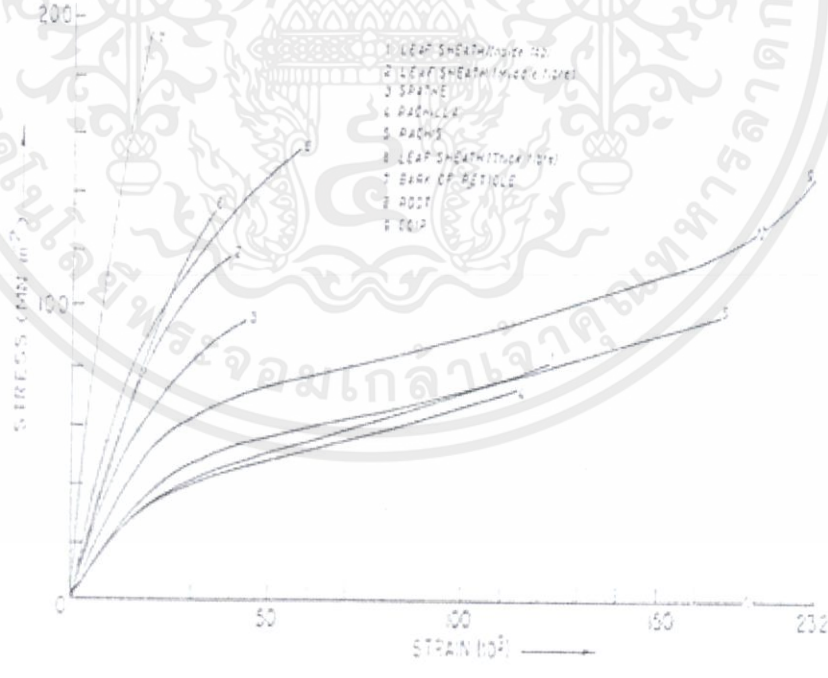
ชื่อวิทยาศาสตร์ *Cocos nucifera L.*

ชื่อสามัญ Coconut

วงศ์ Palmae

มะพร้าวเป็นพืชยืนต้น ใบมีลักษณะเป็นใบประกอบแบบขนนก ผลประกอบด้วยเอพิคาร์ป (Epicarp) คือเปลือกนอก ถัดไปข้างในจะเป็นมีโซคาร์ป (Mesocarp) หรือใยมะพร้าว ถัดไปข้างในเป็นส่วนเอนโดคาร์ป (Endocarp) หรือกะลามะพร้าวซึ่งจะมีรูสีคล้ำอยู่ 3 รูสำหรับงอก ถัดจากส่วนเอนโดคาร์ปเข้าไปจะเป็นส่วนเอนโดสเปิร์มหรือที่เรียกว่าเนื้อมะพร้าว ภายในมะพร้าวจะมีน้ำมะพร้าวซึ่งเมื่อมะพร้าวแก่เอนโดสเปิร์มก็จะดูดเอาน้ำมะพร้าวไปหมด

มะพร้าวเป็นพืชตระกูลปาล์มซึ่งเส้นใยแข็งที่ได้มาจากกาบมะพร้าวจะเรียกว่า "ใย-มะพร้าว" ด้วยเส้นใยที่มีลักษณะเฉพาะทางธรรมชาติเป็นเส้นใยที่หยุ่นเหนียวแข็งแรง ทนทาน มีอายุการใช้งานที่ยาวนานและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติจึงสามารถทำลายได้ง่าย ดังนั้นใยมะพร้าวจึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรมรวมทั้งเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในชีวิตประจำวันส่วนใหญ่



รูปที่ 2.8 สมบัติเชิงกลส่วนต่างๆของเส้นใยมะพร้าว [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของผลงานทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 เส้นใยมะพร้าว (Coir)

ใยมะพร้าวได้จากเปลือกของผลมะพร้าวเส้นใยที่แยกได้แบ่งตามความยาวได้ 3 พวกคือ

- Yarn fiber มีความยาวและความละเอียดเหมาะที่จะใช้นำไปทำเส้นด้าย เพื่อทำพรม ทำเสื่อทำเชือก
- Bristle fiber เป็นเส้นใยขนาดใหญ่หยาบเส้นสั้นกว่าชนิดแรก ใช้ทำแปรงไม้กวาด
- Mattress fiber เป็นเส้นใยขนาดสั้น ใช้สาหรับทำเบาะที่นอน

เส้นใยมะพร้าวเป็นเส้นใยแข็งกระด้างมีความยาวโดยเฉลี่ยประมาณ 15 - 30 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 1 - 1.5 มิลลิเมตร มีความเหนียวต่ำกว่าป่านศรนารายณ์ ความโค้งงอต่ำ ทนต่อความเปียกชื้นและการทำลายของจุลินทรีย์ได้ดี

2.3.2 ประโยชน์ของใยมะพร้าว

1. ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในสินค้าประเภทที่นอนเพื่อสุขภาพ เนื่องจากมีคุณสมบัติของการหมุนเวียนอากาศสูง

2. ใช้เป็นฉนวนในการดูดซับเสียงสำหรับห้องบันทึกเสียงและระบบเสียงในลำโพง ผลิตเป็นวัสดุป้องกันการกระเทือน

3. ใช้ผลิตเป็นวัสดุป้องกันการกระเทือน เหมาะสำหรับสินค้าประเภทเฟอร์นิเจอร์ เช่น เป็นวัสดุภายในที่นั่งโดยสารบนเครื่องบินโดยสารและเบาะนั่งในรถยนต์ชั้นหนึ่ง

4. ใช้ในอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น การใช้เป็นฐานรองเพื่อการยึดเกาะของต้นกล้าและต้นกล้วยไม้หรือใช้แทนหญ้าและฟางคลุมพื้นดินรอบๆต้นไม้เพื่อรักษาความชื้น

5. ใช้ปกคลุมที่โล่งและแท่นที-ออฟของสนามกอล์ฟ เพื่อเก็บกักความชื้นและรักษาพื้นหญ้าให้เขียวชอุ่ม

6. ในต่างประเทศม้วนใยมะพร้าวสามารถนำไปใช้เป็นอุปกรณ์ป้องกันการพังทลายของดินริมตลิ่งหรือเป็นเขื่อนป้องกันการซัดของคลื่นริมแม่น้ำ

7. ใช้ผลิตเชือกเกลียวที่มีความเหนียว แข็งแรง ทนทาน มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเชือกปอ

8. ใช้ผลิตแปรง ไม้กวาด และพรมเก็บดักฝุ่นภายนอกอาคาร ซึ่งพรมใยมะพร้าวจะมีอายุการใช้งานยาวนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ใช้ผลิตเป็นแผ่นกรองหยาบ เช่น ฝุ่นเหนียว ฟิงโคท สีฝุ่น เรซิน กาว ยางมะตอย ฯลฯ

10. ใช้ผลิตเป็นส่วนประกอบของอิฐมวลเบา

2.3.3 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากเส้นใยมะพร้าว

รูปที่ 2.9 ผลิตภัณฑ์จากใยมะพร้าว [11]

2.4 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene ; HDPE) [12],[13]

2.4.1 ลักษณะทั่วไป

พอลิเอทิลีนเป็นเทอร์โมพลาสติกชนิดหนึ่ง ซึ่งเตรียมได้จากเอทิลีนอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนแบบไม่อิ่มตัว (Unsaturated aliphatic hydrocarbon) พอลิเอทิลีนสามารถแบ่งตามความหนาแน่นได้ดังนี้

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low DensityPolyethylene ; LDPE) มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.915 - 0.920 g/cm^3

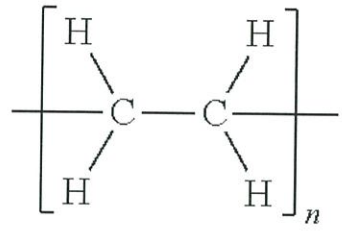
2. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene ; LLDPE) มีความหนาแน่นประมาณ 0.935 g/cm^3

3. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง (Medium Density Polyethylene ; MDPE) มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.925 - 0.935 g/cm^3

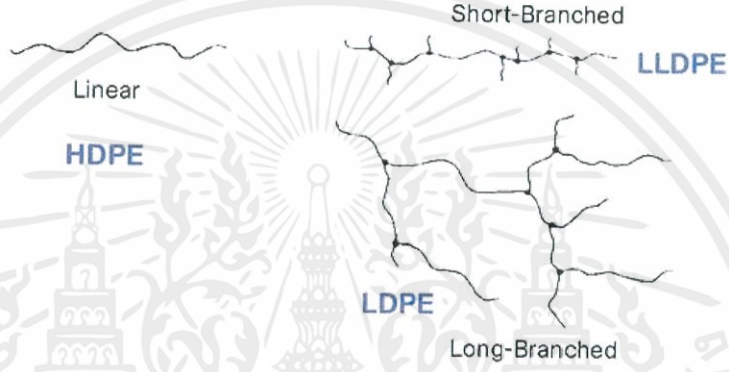
4. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene ; HDPE) มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.940 - 0.960 g/cm^3

ซึ่งแต่ละชนิดมีโครงสร้างโมเลกุลและสมบัติทางกายภาพต่างกันจึงนำไปใช้ประโยชน์แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของพอลิเอทิลีน [12]



รูปที่ 2.11 ลักษณะโครงสร้างของพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน [14]

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เป็นพอลิเอทิลีนชนิดหนึ่งมีลักษณะโครงสร้างเป็นเส้นตรงเกือบตลอดองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น $(CH_2)_n$ และมีส่วนที่เป็นกิ่งก้านน้อยมากมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature ; Tg) ประมาณ -80°C และมีอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature ; Tm) ประมาณ 120 - 130°C สามารถผลิตโดยผ่านกระบวนการซีเกลอร์ (Ziegler process) และกระบวนการฟิลลิปส์ (Phillips process)

2.4.2 สมบัติทั่วไป

- มีความแข็งแรงมีความเหนียวและทนทานต่อแรงดึงปานกลาง
- ความสามารถในการขึ้นรูปง่าย
- ไม่นำไฟฟ้า ไม่นำความร้อน
- ทนทานต่อกรดเบส ทนแสงแดด
- ราคาถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 การใช้งาน

มีการนำไปใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมครัวเรือน อุตสาหกรรมยานยนต์หรืออุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ รวมทั้งสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายกระบวนการดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เกรดต่างๆ [12]

เกรดของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์
1. Injection Molding Grade	ถังแกลอนพลาสติก ถังขยะ ถาดใส่ขนมปัง ลังใส่ขวด ของเล่นและพวกชิ้นงานที่มีโครงสร้างซับซ้อน
2. Blow Molding Grade	ขวดต่างๆ เช่น ขวดนม ขวดน้ำ และแกลลอนขนาดเล็ก
3. Film Extrusion Grade	ถุงช็อปปิ้งต่างๆ
4. Extrusion Sheet Grate	แหและเชือก
5. Pipe Extrusion Grade	ท่อน้ำท่อร้อยสายไฟและสายเคเบิล

2.5 สารเติมแต่ง (Additives) [15]

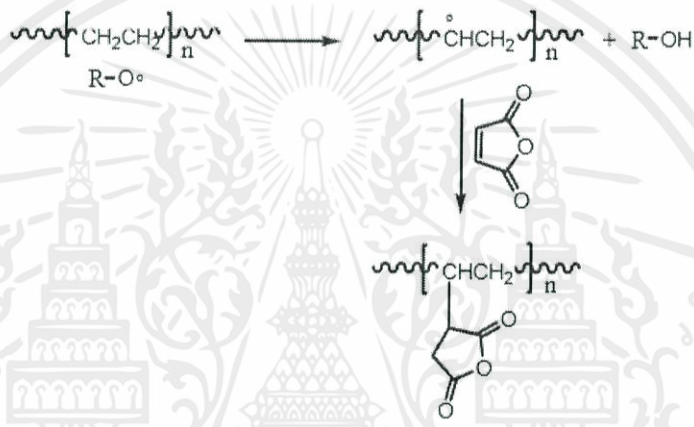
สารเติมแต่ง คือสารที่เติมลงในพอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์และแก้ปัญหาการขึ้นรูปพลาสติกเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณสมบัติที่ดี สารเติมแต่งมีหลายชนิดโดยส่วนใหญ่มีสถานะเป็นของแข็ง สารเติมแต่งที่ดีควรมีสมบัติดังนี้

1. ทำหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. มีความเสถียร (Stable) ภายใต้สภาวะของกระบวนการ
3. มีความเสถียร (Stable) ภายใต้สภาวะของการใช้งาน
4. ไม่ควรเคลื่อนตัวหรือแพร่ออกจากชิ้นพลาสติกไปเจือปนกับวัสดุข้างเคียงได้ง่าย (Bleeding) และแยกตัวออกมาสะสมบริเวณผิวของพลาสติก (Blooming)
5. ไม่ทำให้สมบัติของพอลิเมอร์เสียไป
6. ไม่เป็นพิษ (Non-toxic) และไม่ทำให้เกิดรสหรือกลิ่น
7. มีราคาถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 พอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดร์ด (Polyethylene grafted maleic anhydride ; PE-g-MA) [12]

มาเลอิกแอนไฮไดร์ดกราฟต์พอลิโอเลฟินเป็นสารช่วยผสม (Compatibilizer) ชนิดหนึ่งที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลายเพื่อปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวบริเวณผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมโพสิต โครงสร้างมีทั้งส่วนที่ไม่ว่องไวซึ่งจะเกิดแรงยึดเหนี่ยวแบบแวนเดอ-วาล์วกับพอลิเมอร์และส่วนที่ว่องไวซึ่งจะเกิดปฏิกิริยากับส่วนที่มีขั้ว พอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดร์ดสามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอไรเซชันระหว่างพอลิเอทิลีนกับมาเลอิกแอนไฮไดร์ด โดยมีเปอร์ออกไซด์ (Peroxide) เช่น Tert-butyl Peroxide เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา

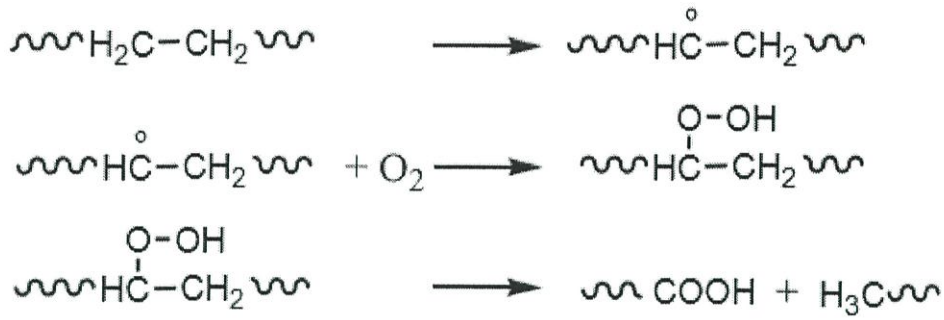


รูปที่ 2.12 ปฏิกิริยาการเตรียม Polyethylene grafted maleic anhydride [12]

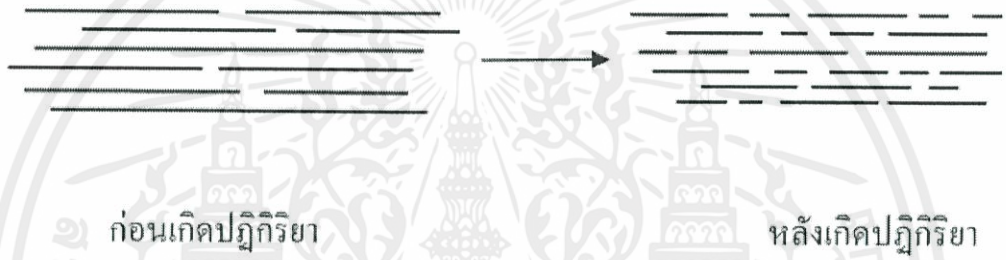
2.5.2 สารป้องกันออกซิเดชัน (Antioxidant) [12],[16]

สารป้องกันออกซิเดชัน คือสารเคมีที่เติมลงไปในพอลิเมอร์เพื่อจับอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) เนื่องจากในขั้นตอนการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิสูง พอลิเอทิลีนอาจสลายตัวหรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดเป็นอนุมูลอิสระขึ้นบนสายโซ่ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในบรรยากาศกลายเป็นสารประกอบเปอร์ออกไซด์ (Peroxide) และเกิดการสลายตัวต่อไปโดยแบ่งสายโซ่ออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกได้เป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนเช่นเดิม ส่วนที่สองได้เป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่ปลายข้างหนึ่งกลายเป็นหมู่คาร์บอกซิลซึ่งสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการสลายตัวต่อไปทำให้ความยาวของสายโซ่โมเลกุลและน้ำหนักโมเลกุลลดลงส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



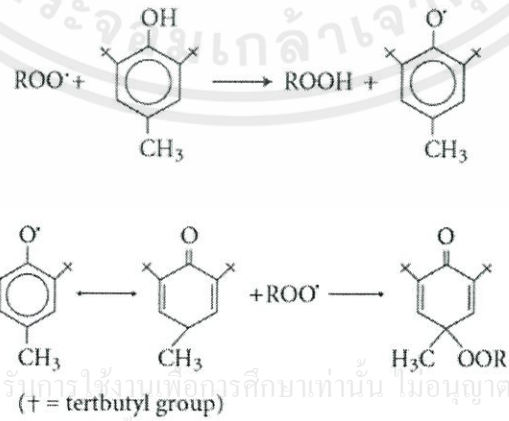
รูปที่ 2.13 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิเอทิลีน [12]



รูปที่ 2.14 โมเดลความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน [12]

Antioxidant มี 2 ประเภท คือ

1. Primary antioxidant มักเป็นสารประกอบ Phenol หรือสารประกอบ Secondary aromatic amine



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.15 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของ Primary antioxidant [16]

2. Secondary antioxidant มักเป็นสารประกอบ Sulfur หรือสารประกอบ Trimesters ของ Phosphorous (Phosphate)

$$P(OR')_3 + ROOH \rightarrow OP(OR')_3 + ROH$$

รูปที่ 2.16 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของ Secondary antioxidant [16]

โดยการใช้งานมักใช้ Primary antioxidant ร่วมกับ Secondary antioxidant เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งาน

2.5.3 สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids) [17]

สารช่วยกระบวนการผลิต คือสารตัวเติมที่ใส่ลงไปเพื่อช่วยให้กระบวนการผลิตในขั้นตอนต่างๆ เช่น การผสม (Mixing) หรือการขึ้นรูป (Shape forming) เป็นไปได้ง่ายยิ่งขึ้น สารบางตัวในกลุ่มนี้จะช่วยลดความหนืดของพอลิเมอร์ผสม ทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลได้ง่ายยิ่งขึ้นจึงช่วยลดระยะเวลาและพลังงานที่ใช้ในการผลิต

2.6 สารหน่วงไฟ (Flame retardant) [18],[19]

การเผาไหม้ คือปฏิกิริยาทางเคมีซึ่งเชื้อเพลิงได้รวมตัวกับออกซิเจนจากอากาศแล้วเกิดการปล่อยพลังงานความร้อนและแสงสว่าง

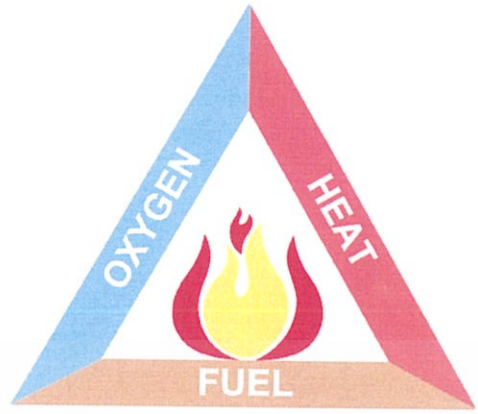
2.6.1 องค์ประกอบของไฟ (Fire triangle)

การที่จะเกิดไฟขึ้นได้นั้น ต้องมีองค์ประกอบ 3 อย่าง คือ

- เชื้อเพลิง (Fuel) ซึ่งจะอยู่ในสภาพของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส
- ออกซิเจน (Oxygen) ซึ่งจะมีอยู่ในอากาศประมาณ 21% โดยปริมาณ
- ความร้อน (Heat) ต้องพอเพียงที่จะติดไฟได้

เมื่อมีองค์ประกอบทั้ง 3 ครบแล้วไฟจะเกิดลุกไหม้ขึ้นและเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 องค์ประกอบในการเกิดไฟ (สามเหลี่ยมไฟ) [19]

การที่จะดับไฟนั้นก็ต้องเอาอย่างใดอย่างหนึ่งออกไป ดังนั้นองค์ประกอบในการเผาไหม้มีอยู่ 4 องค์ประกอบคือ

1. เชื้อเพลิง (Fuel) คือวัตถุใดๆก็ตามที่สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้อย่างรวดเร็วในการเผาไหม้ เช่น ก๊าซ ไม้กระดาษ น้ำมัน โลหะ พลาสติก เป็นต้น เชื้อเพลิงที่อยู่ในสถานะก๊าซจะสามารถลุกไหม้ไฟได้แต่เชื้อเพลิงที่อยู่ในสถานะของแข็งและของเหลวจะไม่สามารถลุกไหม้ไฟได้ถ้าโมเลกุลที่ผิวของเชื้อเพลิงไม่อยู่ในสภาพที่เป็นก๊าซการที่โมเลกุลของของแข็งหรือของเหลวนั้นจะสามารถแปรสภาพกลายเป็นก๊าซได้นั้นจะต้องอาศัยความร้อนที่แตกต่างกันตามชนิดขอเชื้อเพลิง ความแตกต่างของลักษณะการติดไฟของเชื้อเพลิงดังกล่าวขึ้นอยู่กับคุณสมบัติ 4 ประการดังนี้

1.1 ความสามารถในการติดไฟของสาร (Flammability Limits) เป็นปริมาณไอของสารที่เป็นเชื้อเพลิงในอากาศที่มีคุณสมบัติซึ่งพร้อมจะติดไฟได้ ในการเผาไหม้นั้นปริมาณไอเชื้อเพลิงที่ผสมกับอากาศนั้นจะต้องมีปริมาณพอเหมาะจึงจะติดไฟได้ โดยปริมาณต่ำสุดของไอเชื้อเพลิงที่เป็น % ในอากาศซึ่งสามารถจุดติดไฟได้เรียกว่า “ค่าต่ำสุดของไอเชื้อเพลิง (Lower Flammable Limit)” และปริมาณสูงสุดของไอเชื้อเพลิงที่เป็น % ในอากาศซึ่งสามารถจุดติดไฟได้เรียกว่า “ค่าสูงสุดของไอเชื้อเพลิง (Upper Flammable Limit)” ซึ่งสารเชื้อเพลิงแต่ละชนิดจะมีค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของไอเชื้อเพลิงแตกต่างกันไป

1.2 จุดวาบไฟ (Flash Point) คืออุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่สามารถทำให้เชื้อเพลิงคายไออออกมาผสมกับอากาศในอัตราส่วนที่เหมาะสมถึงจุดที่มีค่าต่ำสุดถึงค่าสูงสุดของไอเชื้อเพลิง เมื่อมีประกายไฟก็จะเกิดการติดไฟและดับไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ไปให้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 จุดติดไฟ (Ignition Point) คืออุณหภูมิของสารที่เป็นเชื้อเพลิงได้รับความร้อนจนถึงจุดที่จะติดไฟได้แต่การติดไฟนั้นจะต้องต่อเนื่องกันไป โดยปกติความร้อนของ Ignition Point จะสูงกว่า Flash Point ประมาณ 7°C

1.4 ความหนาแน่นไอ (Vapor Density) คืออัตราส่วนของน้ำหนักของสารเคมีในสถานะก๊าซต่อน้ำหนักของอากาศ เมื่อมีปริมาณเท่ากันความหนาแน่นไอใช้เป็นสิ่งบ่งบอกให้ทราบว่าก๊าซนั้นจะหนักหรือเบากว่าอากาศซึ่งใช้เป็นข้อมูลในการควบคุมอัคคีภัย

2.ออกซิเจน (Oxygen) อากาศที่อยู่รอบๆตัวเรานั้นมีก๊าซออกซิเจนเป็นองค์ประกอบประมาณ 21 % แต่การเผาไหม้แต่ละครั้งนั้นจะต้องการออกซิเจนประมาณ 16 % เท่านั้น ดังนั้นจะเห็นว่าเชื้อเพลิงทุกชนิดที่อยู่ในบรรยากาศรอบๆตัวเรานั้นถูกล้อมรอบด้วยออกซิเจนซึ่งมีปริมาณเพียงพอสำหรับการเผาไหม้ ถ้าปริมาณออกซิเจนยิ่งมากเชื้อเพลิงก็ยิ่งติดไฟได้ดีขึ้นและเชื้อเพลิงบางประเภทจะมีออกซิเจนในตัวเองอย่างเพียงพอที่จะทำให้ตัวเองไหม้ได้โดยไม่ต้องใช้ออกซิเจนที่อยู่โดยรอบเลย

3. ความร้อน (Heat) คือพลังงานที่ทำให้เชื้อเพลิงแต่ละชนิดเกิดการคายไอออกมา

4. ปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain Reaction) เป็นปฏิกิริยาเริ่มต้นของปฏิกิริยาการเผาไหม้ โดยเริ่มจากการที่ความร้อนจากแหล่งจุดไฟที่ให้แก่เชื้อเพลิงและออกซิเจนจะทำให้โมเลกุลของเชื้อเพลิงที่เป็นแก๊สแตกตัวให้อนุมูลอิสระที่ว่องไวก่อน ซึ่งก็จะทำปฏิกิริยาการแผ่โซ่ (Chain propagation) จนกระทั่งอนุมูลอิสระที่ว่องไวมีจำนวนมากพอที่จะเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ของการเผาไหม้ เมื่อเริ่มเกิดการเผาไหม้ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้จึงค่อยทำให้ปริมาณเชื้อเพลิงที่เหลืออยู่แตกตัวเป็นอนุมูลอิสระที่ว่องไวที่จะทำปฏิกิริยาลูกโซ่เกิดการเผาไหม้ต่อไปอย่างต่อเนื่องได้เองจนสมบูรณ์

2.6.2 กลไกการทำงานของสารหน่วงไฟ (Flame Retardant Mechanisms)

สารหน่วงไฟมีหลายชนิดและแต่ละชนิดถูกควบคุมด้วยกลไกการหน่วงไฟที่แตกต่างกัน กลไกการหน่วงไฟแบ่งได้เป็น 2 แบบ ได้แก่ กลไกการหน่วงไฟด้วยการขัดขวางทางกายภาพและทางเคมี

2.6.2.1 การขัดขวางทางกายภาพ

1. การทำให้ระบบเย็นตัวลง กลไกการหน่วงไฟนี้เป็นการที่สารหน่วงไฟจะดูดความร้อนบางส่วนไปทำให้สลายตัวในรูปของการหลอม หรือการระเหิด ซึ่งมีผลทำให้เส้นใยได้รับความร้อนน้อยลงจนระบบมีพลังงานไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้แบบลูกโซ่ได้ หรือสารหน่วงไฟสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) เกิดน้ำระเหยออกมา ทำให้พื้นผิววัสดุเย็นลง

ตัวอย่างของสารหน่วงไฟ ที่หน่วงไฟโดยใช้กลไกการหน่วงไฟนี้ เช่น อะลูมินาไตรไฮเดรต แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การทำให้เกิดชั้นเคลือบบนพื้นผิววัสดุ กลไกการหน่วงไฟเกิดขึ้นเมื่อเส้นใยได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิการเผาไหม้จะทำให้สารหน่วงไฟเกิดการหลอมละลายมาปกคลุมบริเวณผิวหน้าของเส้นใย ซึ่งจะช่วยป้องกันไม่ให้แก๊สออกซิเจนมาสัมผัสกับเส้นใยและกักขังไอระเหยที่สามารถลุกติดไฟที่เกิดจากการสลายตัวของเส้นใยไม่ให้ไปสู่ผิวหน้าของเส้นใย ทำให้เส้นใยไม่เกิดการเผาไหม้ นอกจากนี้ยังช่วยลดการถ่ายเทความร้อนจากจุดที่เกิดการติดไฟไปยังจุดอื่นๆ ทำให้เปลวไฟไม่เกิดการลุกลามต่อ

ตัวอย่างของสารหน่วงไฟ ที่หน่วงไฟโดยใช้กลไกการหน่วงไฟนี้ รวมถึงเกลืออนินทรีย์ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น บอริก-บอแรกซ์ ซิลิเกต ฟอสเฟต และพอลิฟอสเฟต

3. การปลดปล่อยแก๊สที่ไม่ติดไฟ กลไกการหน่วงไฟนี้คือการที่สารหน่วงไฟเมื่อติดไฟแล้วจะสลายตัวใช้แก๊สที่ติดไฟยากหรือไม่ติดไฟ เช่น แก๊สไนโตรเจน แก๊สแอมโมเนีย แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แก๊สไฮโดรเจนคลอไรด์ และไอน้ำ เป็นต้น ส่งผลให้แก๊สไฮโดรคาร์บอนที่เกิดจากการสลายตัวของเส้นใยซึ่งเป็นแก๊สที่ติดไฟง่ายเจือจางลงจนมีความเข้มข้นต่ำกว่าจุดติดไฟได้ และทำให้ปริมาณออกซิเจนภายในเส้นใยลดลง เส้นใยไม่สามารถเกิดการเผาไหม้ต่อไปได้

ตัวอย่างของสารหน่วงไฟ ที่หน่วงไฟโดยใช้กลไกการหน่วงไฟนี้ เช่น โซเดียม-คาร์บอเนต โซเดียมไบคาร์บอเนต แอมโมเนียมเฮไลด์ ซิงค์คลอไรด์ แคลเซียมซัลเฟต แมกนีเซียม-ซัลเฟต อะลูมิเนียมซัลเฟต แอมโมเนียมซัลฟาเมต และฟอสเฟต เป็นต้น

2.6.2.2 การขัดขวางทางเคมี

1. วัฏภาคแก๊ส (Gas phase หรือ Vapor phase) กลไกการหน่วงไฟนี้คือการที่สารหน่วงไฟเมื่อโดนความร้อนจะเกิดอนุมูลอิสระที่สามารถไปจับกับอนุมูลอิสระที่เกิดจากการเผาไหม้ของเส้นใยได้ เช่น H·, OH·กลายเป็นแก๊สซึ่งทำให้ปฏิกิริยาการแผ่โซ่อนุมูลอิสระสิ้นสุดลง (Free-radical chain propagation) การลุกไหม้ก็จะสิ้นสุดลง

ตัวอย่างของสารหน่วงไฟ ที่หน่วงไฟโดยใช้กลไกการหน่วงไฟนี้ เช่น สารประกอบฮาโลเจน และการทำงานของสารหน่วงไฟที่เป็นสารประกอบฮาโลเจนและแอนติ-โมนีออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วัฏภาคของแข็ง (Solid phase หรือ Condensed phase) กลไกการหน่วงไฟนี้คือการที่สารหน่วงไฟทำหน้าที่เร่งให้เส้นใยเกิดการสลายตัวเร็วขึ้นเป็นแก๊สที่ไม่ติดไฟหรือถ่าน

คาร์บอน (Char) เพื่อให้ส่วนที่มีการลุกติดไฟกับส่วนที่ยังไม่ลุกติดไฟแยกห่างออกจากกันมากขึ้น และในที่สุดไฟก็ไม่สามารถลุกลามไปถึงส่วนนั้นได้ นอกจากนี้การทำให้เกิดถ่านคาร์บอนโดยเร่งให้วัสดุทำปฏิกิริยากับกรดลิวอิสผ่านคาร์บอเนียมไอออนเกิดการขจัดน้ำ (Dehydration) ของเส้นใยแล้วเกิดการเชื่อมโยงกันเป็นร่างแหและถ่านคาร์บอนจะช่วยในการหน่วงไฟโดยการเกิดเป็นชั้นถ่านคาร์บอนมาเคลือบเส้นใยไว้ ดังนั้นผิวหน้าวัสดุจะไม่สัมผัสกับความร้อน

ตัวอย่างของสารหน่วงไฟ ที่หน่วงไฟโดยใช้กลไกการหน่วงไฟนี้ เช่น สารประกอบฟอสฟอรัส การทำงานของสารหน่วงไฟที่เป็นสารประกอบฟอสฟอรัสและไนโตรเจน

2.6.3 ชนิดของสารหน่วงไฟ

2.6.3.1 สารหน่วงไฟจำแนกประเภทจากความคงทน

1. สารหน่วงไฟประเภทไม่คงทน (Nondurable flame retardants)

สารหน่วงไฟกลุ่มนี้ได้แก่ กรดอนินทรีย์ เช่น กรดบอริกกรดฟอสฟอริก และซิงค์คลอไรด์ หรือเบส เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมคาร์บอเนต แต่เนื่องจากกรดและเบสจะทำให้เกิดปัญหาการกัดกร่อน ดังนั้นในทางปฏิบัติแล้วมักนิยมใช้สารหน่วงไฟในรูปของเกลือมากกว่า เช่น แอมโมเนียมฟอสเฟต ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต ยูเรียฟอสเฟต และแอมโมเนียมซัลฟาเมต เมื่อเกลือเหล่านี้ได้รับความร้อนจะสลายตัวเป็นแอมโมเนีย กรดฟอสฟอริก หรือกรดพอลิฟอสฟอริก เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกรดฟอสฟอริกจะขจัดน้ำออกกลายเป็นกรดเมตะไพโรฟอสฟอริก มีลักษณะเป็นของเหลวหนืดทำหน้าที่เป็นตัวกันไม่ให้อากาศหรือออกซิเจนแทรกเข้าไปในเส้นใย ทำให้เส้นใยไม่สามารถเกิดการเผาไหม้ และทำหน้าที่เป็นกรดลิวอิสที่ทำให้เส้นใยสลายตัวเกิดถ่านคาร์บอนเพิ่มขึ้น (Char-promoting Lewis acid)

สารหน่วงไฟประเภทนี้จะไม่มีความคงทนต่อการซักล้าง สามารถถูกล้างออกไปได้ด้วยน้ำ น้ำฝน เหงื่อ เหมาะที่จะใช้ตกแต่งผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องผ่านการซักล้าง เช่น ผ้าประเภทใช้แล้วทิ้ง (Disposable fabrics) ฉนวน จอภาพยนตร์ กระดาษ และบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น

2. สารหน่วงไฟประเภทกึ่งคงทน (Semidurable flame retardants)

สารหน่วงไฟประเภทนี้ได้แก่ เกลือของกรดอนินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ เช่นเกลือฟอสเฟตหรือเกลือบอเรตของโลหะดีบุก สังกะสี อะลูมินัม รวมทั้งเกลือที่มีอิออนของโพลิฟอสเฟตน้ำหนักโมเลกุลสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารหน่วงไฟประเภทนี้ยังมีความคงทนภายหลังการซักล้าง 20 ครั้ง ดังนั้นจึงเหมาะที่จะใช้ตกแต่งผลิตภัณฑ์ที่ไม่จำเป็นต้องผ่านการซักล้างบ่อย เช่น ผลิตภัณฑ์ผ้าฟูก เคหะสิ่งทอ และพรม เป็นต้น

3.สารหน่วงไฟประเภทมีความคงทนสูง (Durable flame retardants)

สารหน่วงไฟประเภทนี้จะมีฟอสฟอรัสหรือฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ หรือเป็นสารประกอบประเภท Organophosphorus

สารหน่วงไฟประเภทนี้ยังมีความคงทนภายหลังการซักล้าง 50 ครั้ง ดังนั้นจึงเหมาะที่จะใช้ตกแต่งผลิตภัณฑ์ที่จำเป็นต้องผ่านการซักล้างบ่อย เช่น ผลิตภัณฑ์เสื้อผ้า เป็นต้น

2.6.3.2 สารหน่วงไฟจำแนกประเภทจากองค์ประกอบ

1 .สารหน่วงไฟประเภทฮาโลเจน (Halogen based flame retardants)

สารหน่วงไฟประเภทฮาโลเจนมีกลไกการหน่วงไฟด้วยการขัดขวางทางเคมีในวัฏภาคแก๊สสารหน่วงไฟที่เป็นโบรมีนจะประสิทธิภาพในการหน่วงไฟสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ สารหน่วงไฟที่เป็นคลอรีน โดยทั่วไปมักใช้สารหน่วงไฟประเภทนี้ร่วมกับแอนติโมนีออกไซด์ เช่น Antimony trioxide (Sb_2O_3) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารช่วยเสริมการหน่วงไฟ (Synergist)

2. สารหน่วงไฟประเภทฟอสฟอรัส (Phosphorus based flame retardants)

สารหน่วงไฟประเภทนี้หาได้ง่าย มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟกับวัสดุที่มีปริมาณออกซิเจนสูง เช่น เซลลูโลส และอนุพันธ์ของเซลลูโลส สารหน่วงไฟประเภทนี้มีกลไกควบคุมการหน่วงไฟด้วยการขัดขวางทางกายภาพและทางเคมีในวัฏภาคแก๊สและวัฏภาคของแข็ง ดังกล่าวข้างต้น โดยทั่วไปถ้าใช้สารหน่วงไฟประเภทนี้ร่วมกับฮาโลเจนหรือไนโตรเจนจะเป็นการช่วยเสริมการหน่วงไฟ (Synergism) ให้ดีขึ้น

3. สารหน่วงไฟประเภทอนินทรีย์ (Inorganic flame retardants)

สารหน่วงไฟประเภทอนินทรีย์ที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง ได้แก่ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และสารประกอบโบรอน เป็นต้น สารหน่วงไฟประเภทนี้นอกจากจะมีราคาถูก ไม่เป็นพิษ มีสมบัติในการหน่วงไฟแล้ว ยังมีสมบัติในการลดควันที่เกิดจากการเผาไหม้อย่างไรก็ตามสารประเภทนี้จะมีความคงทนต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. สารหน่วงไฟประเภทไนโตรเจน (Nitrogen basedflame retardants)

สารหน่วงไฟประเภทนี้ ได้แก่ เมลามีน เมลามีนไซยานูเรต เมทิลอลเมลามีน สารประกอบกัวนิดีน ยูเรีย ไซยานาไดเอไมด์ เป็นต้น ซึ่งสารหน่วงไฟประเภทนี้ทำหน้าที่ในรูปของการเกิดอินทูเมสเซนต์ (Intumescent) เป็นลักษณะที่เกิดการพองตัวเป็นชั้นของชาร์ที่มีลักษณะคล้ายโฟม ทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันความร้อนและการสัมผัสกับออกซิเจนให้แก่วัสดุ

2.6.4 สารหน่วงไฟระบบอินทูเมสเซนต์ (Intumescent System) [20],[21]

การทำงานของสารหน่วงไฟประเภทนี้คือเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีเกิดเป็นชั้นโฟม ซึ่งทำหน้าเป็นฉนวนป้องกันความร้อนและการสัมผัสออกซิเจนให้กับวัสดุ ส่งผลให้การลุกไหม้สิ้นสุดลง

Intumescent มาจากคำว่า Tumere ในภาษาฝรั่งเศสมีความหมายว่า To swell (บวม) หรือคำว่า Tumecere ในภาษาลาตินซึ่งมีความหมายว่า To swell up (ทำให้บวมขึ้น) ดังนั้นคำว่า Tumescent มีความหมายว่า บวม, พอง

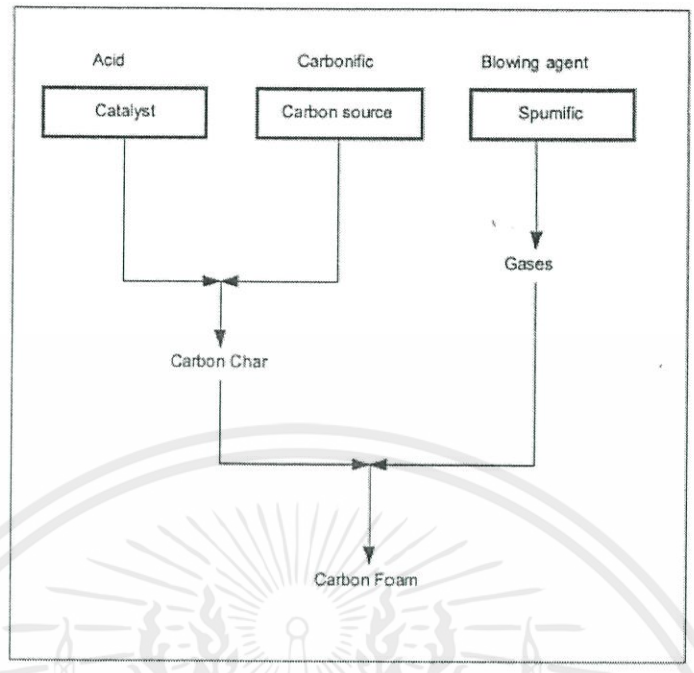
2.6.4.1 องค์ประกอบของสารหน่วงไฟระบบอินตูเมสเซนต์ (Intumescent)

1. แหล่งให้กรดอนินทรีย์ (Acid source) คือสารอนินทรีย์ที่มีความเป็นกรดหรือวัสดุที่สามารถสลายตัวให้อนุภาคที่มีฤทธิ์เป็นกรดในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 100 - 250°C เช่น กรดฟอสฟอริก กรดบอริก เป็นต้น

2. สารทำให้เกิดเถ้า (Carbon source) มักเป็นสารจำพวกพอลิแอลกอฮอล์ เช่น แป้ง พอลิเอไมด์ 6 ซอร์บิทอล เป็นต้น

3. สารให้ฟอง (Blowing agent) คือสารที่สลายตัวให้ฟองก๊าซที่ไม่ติดไฟ เช่น เมลามีน ยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

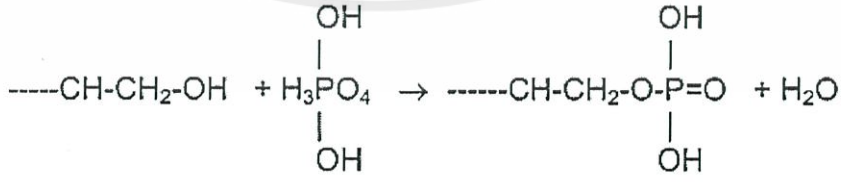


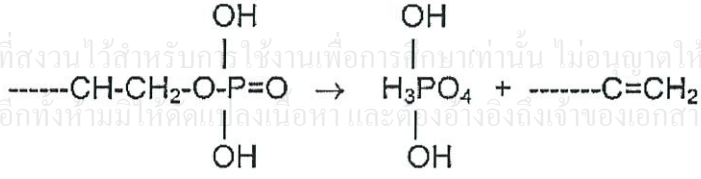
รูปที่ 2.18 องค์ประกอบของสารหน่วงไฟระบบอินตูเมสเซนต์ (Intumescent) [20]

2.6.4.2 การเกิดชั้น Char

การเกิดชั้น Char สามารถแสดงได้ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้

ปฏิกิริยาเคมีข้างต้นแสดงถึงปฏิกิริยา Depolymerisation โดยใช้กรด



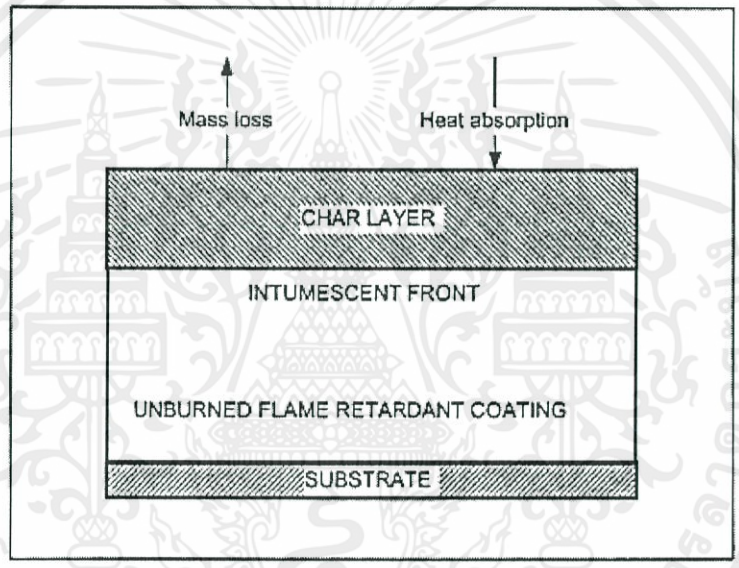


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาเคมีข้างต้นแสดงถึงปฏิกิริยา Dehydration ของพอลิเมอร์เมื่อทำปฏิกิริยากับกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid) ปฏิกิริยาทั้ง 2 แบบจะทำให้เกิด-----$C=CH_2$ ซึ่งจะควบแน่นเกิดเป็นชั้น Char

2.6.4.3 ลักษณะทางกายภาพ

Intumescent เป็นสารหน่วงไฟที่เมื่อวัสดุได้รับความร้อนทำให้เกิดการพองตัว เกิดโครงสร้างที่เป็นโฟมซึ่งเป็นฉนวนความร้อน จึงสามารถทำหน้าที่เป็นแนวกั้นความร้อนระหว่างเปลวไฟกับวัสดุที่ถูกเผาไหม้ได้



รูปที่ 2.19 การเกิดชั้น Char [20]

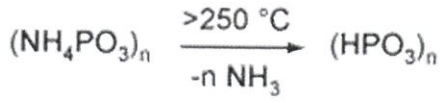
จากรูปที่ 2.19 จะแบ่งเป็น 2 ชั้นโดยชั้นบนเป็นสารหน่วงไฟที่เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการขยายตัวและพองตัวขึ้นเป็นโฟม ซึ่งด้านบนสุดจะเป็นชั้นที่ถูกเผาไหม้ ถัดมาจะเป็นชั้นสารหน่วงไฟที่ขยายตัวแต่ไม่ถูกเผาไหม้และชั้นล่างสุดเป็นชั้นของพอลิเมอร์ โดยที่ชั้นสารหน่วงไฟที่ไม่ถูกเผาจะเป็นแนวกั้นความร้อนและออกซิเจนระหว่างเปลวไฟกับวัสดุที่ถูกเผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.4.4 กลไกการเกิดอินตูเมสเซนต์ (Intumescent)

1. มีพอลิเมอร์เมทริกซ์ เช่น พอลิพรอพิลีน

2. แหล่งให้กรดอนินทรีย์ จะสลายตัวให้กรด

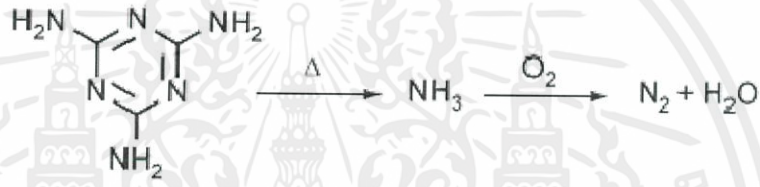


$$(NH_4PO_3)_n \xrightarrow[-n\ NH_3]{>250\ ^\circ C} (HPO_3)_n$$

3. กรดที่ได้จากการสลายตัวทำปฏิกิริยากับสารให้เถ้าเกิดเป็นชั้น Char

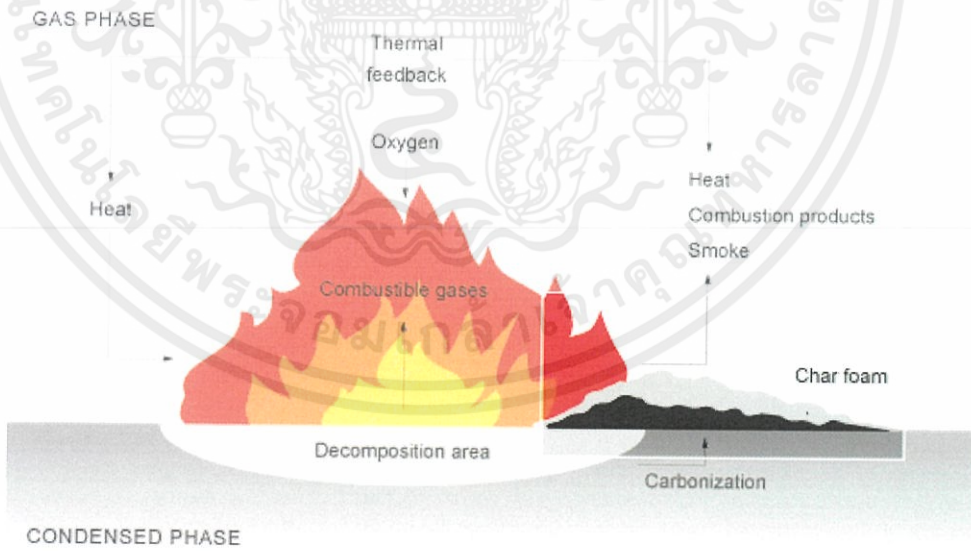
$$(HPO_3)_n + C_x(H_2O)_m \longrightarrow [\text{"C"}]_x + (HPO_3)_n x\ mH_2O$$

4. สารให้ฟองสลายตัวให้ฟองก๊าซ



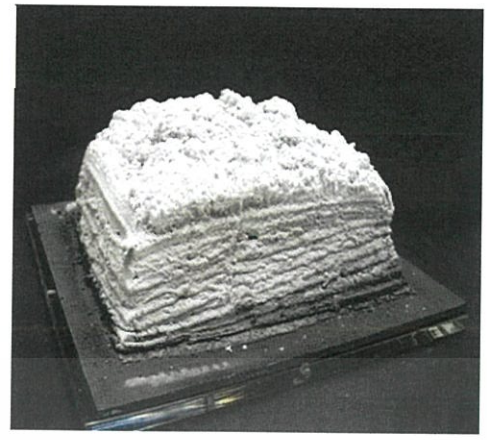
$$\text{melamine} \xrightarrow{\Delta} NH_3 \xrightarrow{O_2} N_2 + H_2O$$

5. ของผสมเกิดเป็นโฟมขยายตัวใหญ่ขึ้นและเกิดการเชื่อมโยงเป็นของแข็ง



รูปที่ 2.20 ลักษณะการหน่วงไฟของระบบอินตูเมสเซนต์ (Intumescent) [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 ลักษณะการเกิดโฟมของการหน่วงไฟระบบอินตูเมสเซนต์ (Intumescent) [21]

2.6.4.5 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของสารหน่วงไฟระบบ Intumescent

1. ชนิดและอัตราส่วนระหว่างองค์ประกอบทั้งสามของสารหน่วงไฟ ได้แก่ แหล่งให้กรดอนินทรีย์ (Acid source), สารทำให้เกิดเถ้า (Carbon source) และสารให้ฟอง (Blowing agent)

2. ความสามารถในการเกิดชั้น Char และความต่อเนื่องของชั้น Char ถ้าชั้น Char มีความต่อเนื่องปกคลุมทั่วพื้นผิวของวัสดุ ก็จะเป็นฉนวนป้องกันความร้อนและการสัมผัสออกซิเจนให้กับวัสดุ ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟดี

3. การทำงานของสารให้ฟอง ถ้าสารให้ฟองสามารถสลายตัวให้ฟองก๊าซและกระจายตัวทั่วภายในชั้น Char ส่งผลให้ชั้น Char ขยายตัวสูงขึ้น จะมีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟดี

2.6.4.6 ข้อดีข้อเสียของสารหน่วงไฟระบบอินตูเมสเซนต์ (Intumescent)

ในปัจจุบันสารหน่วงไฟจำพวกฮาโลเจนได้ถูกจำกัดการใช้งานเนื่องจากสามารถปลดปล่อยสารประกอบฮาโลเจนที่มีความเป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ดังนั้นสารหน่วงไฟแบบ Intumescent จึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ซึ่งนิยมใช้กับพอลิเมอร์และวัสดุคอมโพสิตที่มีเส้นใยและไม้เป็นองค์ประกอบเพราะไม่เพียงแต่สามารถป้องกันการลามไฟได้อย่างมีประสิทธิภาพยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ไม่มีพิษและมีควันน้อย แต่มีประสิทธิภาพในการหน่วงการติดไฟน้อยกว่าสารหน่วงไฟจำพวกฮาโลเจนและมีราคาแพง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Nicole และคณะ [22] ได้ทำการศึกษาการพัฒนาสารหน่วงการติดไฟหลายชนิดที่ใช้ในคอมโพสิตของพอลิเอทิลีนและผงไม้ โดยทำการศึกษาพอลิเอทิลีนและสารหน่วงไฟที่มีความแตกต่างกัน 5 จำพวก ได้แก่ ออกไซด์ของโลหะ (Metal oxide) ใช้แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์, โบรอน (Boron compound) ใช้ซิงค์บอเรต, ฟอสฟอรัส (Phosphorus compound) ใช้แอมโมเนียมพอลิ-ฟอสเฟต (APP), ฮาโลเจน (Halogen compound) ใช้เดคะโบรโมไดฟีนิลออกไซด์และแอนติโมนีไตรออกไซด์ และไนโตรเจน (Nitrogen compound) ใช้เมลามีนฟอสเฟต ซึ่งทำการผสมผงไม้ : พอ-ลิเอทิลีน : สารหล่อลื่น : สารหน่วงการติดไฟในอัตราส่วน 50:35:5:10 (โดยน้ำหนัก) ทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ จากนั้นทำการทดสอบค่า LOI (Limiting oxygen index) พบว่าคอมโพสิตพอลิเอทิลีนที่ใช้ APP เป็นสารหน่วงการติดไฟมีค่า LOI สูงที่สุดและมีเวลาติดไฟ (Ignition time) ช้าที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าคอมโพสิตพอลิเอทิลีนที่ใช้สารหน่วงไฟชนิดนี้สามารถหน่วงการติดไฟได้ดีที่สุด และเมื่อทดสอบความทนต่อแรงโค้งงอ (Flexural strength) พบว่าคอมโพสิตพอลิเอทิลีนที่ใช้ APP มีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับการใส่สารหน่วงไฟชนิดอื่นแต่ค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกับไม้ ดังนั้นจากงานวิจัยนี้จึงสรุปผลได้ว่า APP เป็นสารหน่วงไฟที่ดีที่สุด

Qing Zhang และคณะ [23] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพที่เสริมกันของแอมโมเนียมพอลิ-ฟอสเฟต (APP) และเมลามีน (MA) เป็นสารหน่วงการติดไฟของพอลิออกซิเมทิลลีน ทำการศึกษาโดยขึ้นรูปคอมโพสิตด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ จากนั้นทำการทดสอบค่า UL 94 ซึ่งทำการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างสารหน่วงไฟระบบธรรมดาและระบบ Intumescent ซึ่งมีความแตกต่างกันคือ ในระบบ Intumescent จะมีการผสมสารหน่วงไฟในอัตราส่วน MA : APP : Novolac เท่ากับ 1:3:1 โดยทำหน้าที่เป็นสารให้ฟอง (Blowing agent), แหล่งให้กรดอนินทรีย์ (Acid source), และสารทำให้เกิดเถ้า (Carbon source) ตามลำดับ ซึ่งจะเกิดเป็นชั้น Char ทำให้เกิดการป้องกันไม่ให้พอลิเมอร์สัมผัสกับออกซิเจนและความร้อน เมื่อนำมาทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL 94 พบว่าได้ค่าเท่ากับ V-0 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการจุดไฟแล้วการเผาไหม้จะหยุดเองภายใน 10 วินาที และไม่มีการหยดของเปลวไฟ แต่ในระบบธรรมดาซึ่งใช้ APP และ MA เป็นสารหน่วงไฟในอัตราส่วนที่เท่ากัน พบว่าสามารถดับไฟเองได้แต่ใช้เวลานานไม่อยู่ในมาตรฐาน UL 94 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสรุปได้ว่าการทำงานของสารหน่วงไฟในระบบ Intumescent ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าการทำงานของสารหน่วงไฟระบบธรรมดา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ ดัดแปลง เผยแพร่ หรือแสวงหาประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น โดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้เขียน

Rachasit Jeencham และคณะ [24] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการหน่วงไฟของสารหน่วงไฟหลายชนิดบนคอมโพสิตพอลิพรอพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์ งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมคอมโพสิตจากพอลิพรอพิลีน (PP) และเส้นใยป่านศรนารายณ์ (F) ที่ใส่สารหน่วงไฟต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$), แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) และซิงค์บอเรต (Zb) ทำการผสมโดยใช้เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) และขึ้นรูปโดยเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding) แล้วทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL 94 พบว่าคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนของ PP : F : APP เป็น 100:30:40 (%phr) และคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนของ PP : F :APP :Zb เป็น 100:30:30:10 (%phr) ได้ผลการทดสอบเป็น V-0 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อจุดไฟแล้วการเผาไหม้จะหยุดเองภายใน 10 วินาทีและไม่มีการหยดของเปลวไฟ แต่การใช้สารหน่วงไฟชนิดอื่นในอัตราส่วนที่เท่ากันไม่สามารถดับไฟเองได้ งานวิจัยนี้จึงสรุปได้ว่าสารหน่วงไฟที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดคือ APP และการเสริมกันของ APP และ Zb

W.K. Patrick Lim และคณะ [25] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการหน่วงไฟระบบ Intumescent ของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) และเมลามีนไซยานูเลต (MC) ในคอมโพสิตระหว่างอีพอกซีเรซินและเส้นใยแก้ว ทำการขึ้นรูปโดยใช้วิธีใช้มือทา (Hand lay-up) ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของสารหน่วงไฟ3 ชนิดได้แก่ APP, MC และการเสริมกันของ APP และ MC ในระบบ Intumescent เมื่อทำการทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL 94 และ LOI (Limiting Oxygen Index) พบว่าสารหน่วงไฟทั้งหมดได้ผลการทดสอบตามมาตรฐาน UL 94 เป็น V-0 แต่ใช้ในอัตราส่วนที่ต่างกัน นั่นคือต้องใช้ APP ในอัตราส่วนอย่างน้อยร้อยละ5 ส่วน MC ใช้ในอัตราส่วนอย่างน้อยร้อยละ 20 และสารหน่วงไฟระบบ Intumescent คือ APP : MC ใช้ในอัตราส่วนเท่ากับร้อยละ 4:1 ซึ่งจะเห็นว่าเป็นสารหน่วงไฟที่ใช้ปริมาณน้อยที่สุด สำหรับค่า LOI (limiting Oxygen Index) จะแปรผันตรงกับปริมาณของ APP หากใส่ในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ค่า LOI สูงขึ้นด้วย ดังนั้นจากงานวิจัยนี้จึงสรุปได้ว่า APP และ MC เป็นสารหน่วงไฟที่มีประสิทธิภาพในการหน่วงการติดไฟดีสุดเพราะใช้ในปริมาณน้อยที่สุด

กนกอร แสงสุวรรณ [10] ทำการศึกษาไม้พลาสติกคอมโพสิตจากพอลิโอเลฟินส์และเส้นใยมะพร้าว โดยศึกษาผลของขนาดเส้นใยมะพร้าว [เบอร์1, 2, 3 และ 4], ผลของอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างพอลิพรอพิลีน (PP) กับเส้นใยมะพร้าว (F) [100:0, 70:30, 60:40 และ 50:50] และศึกษาผลของปริมาณสารช่วยผสม (Compatibilizer) โดยใช้ Polypropylene grafts maleic anhydride

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(PE-g-MA) [1, 2 และ 3 %wt] จากนั้นนำมาผสมด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) แล้วนำมาขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression moulding) จากนั้นนำไปศึกษาสมบัติต่างๆคือ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกายภาพ และสัณฐานวิทยา พบว่า การใช้เส้นใยมะพร้าวเบอร์ 2 อัตราส่วนระหว่าง PP : F เป็น 50:50 และปริมาณ PE-g-MA ที่ 2 %wt จะให้ค่าความแข็งกด (Hardness) ความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) มอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus) และความต้านทานการยึดติดของตะปูเกลียว (Screw holding) สูงที่สุด นอกจากนี้ปริมาณ PE-g-MA ที่ 2 %wt ยังให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำต่ำที่สุดด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาไม้เทียมให้มีสมบัติทนไฟ โดยใช้สารหน่วงไฟระบบอินตูเมส-เซนต์ (Intumescent) ซึ่งใช้แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) เป็นสารให้กรดอนินทรีย์ ใช้เมลามีน (MA) เป็นสารให้ฟอง และใช้เส้นใยมะพร้าว (F) เป็นสารให้เถ้า โดยทำการศึกษาหาปริมาณ APP และ MA ที่น้อยที่สุดที่ยังคงมีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดี จากการทดลองพบว่าการเคลือบสารหน่วงไฟลงบนเส้นใยทั้งหมดมีความยุ่งยากในการผสม เกิดการรวมตัวกันเป็นก้อน ซึ่งอาจส่งผลต่อสมบัติของไม้เทียม เช่น สมบัติเชิงกลลดลง จึงทำการเคลือบสารหน่วงไฟลงบนเส้นใยบางส่วนในรูปมาสเตอร์แบทช์ (Masterbatch) ทั้งนี้เพื่อลดปัญหาในการผสม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ตอน คือ

ตอนที่1 ศึกษาอัตราส่วนของสารหน่วงไฟที่ใช้เคลือบเส้นใยทั้งหมดแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

1.1 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP)

1.2 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณเมลามีน (MA)

ตอนที่2 ศึกษาการใช้สารหน่วงไฟในรูปมาสเตอร์แบทช์ (Masterbatch)

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. High Density Polyethylene (HDPE) เกรดรีไซเคิล MFI 5.65 บริษัท Thaimongkorn Co.,Ltd
2. เส้นใยมะพร้าว บริษัท WPC Design Co.,Ltd
3. สารป้องกันออกซิเดชัน (Antioxidant) บริษัท Optimal Tech Co.,Ltd
   - Anox 20 (Phenolic antioxidant)
   - Alkanox 240 (Phosphite antioxidant)
4. สารช่วยผสม (Compatibilizer) บริษัท Optimal Tech Co.,Ltd
   - Polyethylene grafted maleic anhydride (PE-g-MA) เกรด NB 1016PE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids) บริษัท SQI Group Co.,Ltd

- PE Wax

- R 10

6. สารหน่วงไฟ (Flame retardant)

- Melamine (MA) บริษัท Thai KK Co.,Ltd

- Ammonium polyphosphate (APP) บริษัท Clariant Co.,Ltd

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องร่อนแยกขนาด (Sieve shaker) รุ่น 01409023 : Retsch Co.,Ltd. พร้อมกับตะแกรงมาตรฐานขนาด 50-80 mesh

2. เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) รุ่น LRM 110 : Lab Tech Engineering Co.,Ltd.

3. เครื่องบดเม็ดพลาสติก (Grinder) :Bosco Engineering Co.,Ltd.

4. เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine) : SANDRETTO metalmeccanica รุ่น micron 40

5. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine ; UTM) รุ่น LR 5K : Lloyd Instrument Co.,Ltd.

6. เครื่องวัดความทนทานต่อแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod impact tester) รุ่น 258-PC : Yasuda Seiki Seisakusho Co.,Ltd.

7. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM)

8. กล้องจุลทรรศน์ใช้แสง (Optical Microscopes)

9. เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (Differential Scanning Calorimeter ; DSC) รุ่น NETZSCH DSC 204 F1

10. เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analyzer ; TGA) รุ่น Pyris 1 : PerkinElmer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. ตู้อบ รุ่น UM 400 : MEMERT Co.,Ltd.

12. เครื่องชั่ง

13. เตาให้ความร้อน (Hot plate)

14. เครื่องแก้ว

15. เทอร์โมมิเตอร์

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมเส้นใยไม้

นำกาบมะพร้าวที่ล้างสะอาดแล้วมาบดด้วยเครื่องบด ทำการคัดแยกขนาดเส้นใยโดยใช้เครื่องร่อนแยกขนาดที่มีตะแกรงร่อนขนาด 50-80 mesh ก่อนทำการทดลองต้องนำเส้นใยไปอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อเป็นการทำให้ความชื้นในเส้นใยหมดไป

3.3.2 ขั้นตอนการผสม

3.3.2.1 การเตรียมสารหน่วงไฟ (IFRs)

การเตรียมสารหน่วงไฟ (IFRs) ทำได้โดยกำหนดชนิดและอัตราส่วนของสารหน่วงไฟซึ่งประกอบด้วย เมลามีน (MA) : แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) : เส้นใยมะพร้าว (F) ในอัตราส่วนต่างๆซึ่งเป็นอัตราส่วนโดยน้ำหนัก มีขั้นตอนดังนี้

1. <u>การเตรียมสารละลายเมลามีน</u> (MA)

ชั่งเมลามีน (MA) ที่มีลักษณะเป็นผงตามตารางที่ 3.1 หรือ 3.2 ค่อยๆละลายในน้ำอุ่น 70°C ปริมาตร 500 mL พร้อมทั้งคนสารละลายให้เข้ากัน

2. <u>การเตรียมสารหน่วงไฟ</u> (IFRs)

ชั่งวัตถุดิบตามตารางที่ 3.1 หรือ 3.2 จากนั้นนำเส้นใยมะพร้าวผสมลงในสารละลายเมลา-มีน (MA) จนเข้ากัน แล้วค่อยๆเติมแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) ใช้มือคลุกส่วนผสมทั้งหมดให้เข้ากัน เป็นเวลาประมาณ 15 นาที จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อระเหยน้ำ

<u>ตอนที่ 1</u> ศึกษาอัตราส่วนของสารหน่วงไฟ

1.1 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP)

เพื่อศึกษาหาปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) ที่น้อยที่สุดที่ยังคงมีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ปริมาณส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมสารหน่วงไฟอัตราส่วนต่างๆ (ลด APP)

MA : APP : F	ปริมาณ (g)		
	Melamine (MA)	Ammonium Polyphosphate (APP)	Cellulose (F)
1:3:1	250	750	250
1:2:1	250	500	250
1:1:1	250	250	250
1:0.8:1	250	200	250
1:0.5:1	250	125	250
1:0.3:1	250	75	250
1:0.1:1	250	25	250

1.2 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณเมลามีน (MA)

เมื่อทราบปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) ที่น้อยที่สุดแล้ว ก็จะหาปริมาณเมลามีน (MA) ที่น้อยที่สุด เพื่อให้ทราบอัตราส่วนที่ดีที่สุดของสารหน่วงไฟ

ตารางที่ 3.2 ปริมาณส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมสารหน่วงไฟอัตราส่วนต่างๆ (ลด MA)

MA : APP : F	ปริมาณ (g)		
	Melamine (MA)	Ammonium Polyphosphate (APP)	Cellulose (F)
0.1:0.3:1	25	75	250
0.17:0.5:1	41.75	125	250

<u>ตอนที่2</u> ศึกษาการใช้สารหน่วงไฟในรูปมาสเตอร์แบทช์ (Masterbatch)

จากตอนที่ 1 พบว่าอัตราส่วน MA : APP : F เป็น 0.17:0.5:1 คืออัตราส่วนของสารหน่วงไฟที่ดีที่สุด ในการทดลองพบว่าการเคลือบสารหน่วงไฟลงบนเส้นใยทั้งหมดมีความยุ่งยากในการผสม เกิดการรวมตัวกันเป็นก้อน ซึ่งอาจส่งผลต่อสมบัติของไม้เทียม เช่น สมบัติเชิงกลลดลง จึงทำการเคลือบสารหน่วงไฟลงบนเส้นใยบางส่วนเพื่อลดปัญหาในการผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ปริมาณเส้นใยที่เคลือบสารหน่วงไฟ

MA : APP : F	ปริมาณ(php)	
	เส้นใยที่เคลือบสารหน่วงไฟ	เส้นใยที่ไม่เคลือบสารหน่วงไฟ
0.17:0.5:1	100	0
0.17:0.5:1	75	25
0.17:0.5:1	50	50
0.17:0.5:1	25	75

ตารางที่ 3.4 สูตรที่ใช้ในการผสมไม้พลาสติกคอมโพสิต

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (php)
HDPE (Recycle)	100
เส้นใยมะพร้าวเคลือบสารหน่วงไฟ	100
PE-g-MA	4
PE Wax	8
Anox 20	0.05
Alkanox 240	0.05
R-10	4

3.3.2.2 การเตรียมไม้เทียม (WPCs) โดยเติมสารหน่วงไฟ (IFRs)

1. ชั่งวัตถุดิบตามสูตรผสมดังตารางที่ 3.4

2. ทำการผสมวัตถุดิบสูตรต่างๆด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) โดยใช้อุณหภูมิ 185°C ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้ คือหลอมเม็ด HDPE ประมาณ 5 นาที จากนั้นเติมเส้นใยมะพร้าวที่ผสมสารหน่วงไฟทั้งหมด, Anox20, Alkanox 240, PE wax และ PE-g-MA ทำการผสมเป็นเวลา 15 นาที แล้วจึงเติม R 10 ลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำของผสมแต่ละสูตรที่ได้ไปบดเป็นเม็ด แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

4. จากนั้นทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) โดยปรับอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 170 - 185°C

3.4 การทดสอบ

การทดสอบสมบัติต่างๆของไม้เทียม ได้ทำการทดสอบตามมาตรฐานดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 มาตรฐานในการทดสอบไม้เทียม

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยรายงายผล
ความทนต่อแรงโค้งงอ	ASTM D 790	MPa
ความทนต่อแรงกระแทก	ASTM D 256	kJ/m^2
ความหนาแน่น	ASTM D 792	g/cm^3
LOI	ASTM D 2863	$\%O_2$

3.4.1 การลามไฟ

3.4.1.1 การทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL 94 (Vertical testing) [25]

UL 94 เป็นมาตรฐานการทดสอบการลามไฟของวัสดุยางหรือพลาสติกที่ใช้ในอุปกรณ์หรือเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ โดยใช้ชิ้นงานทดสอบขนาด 125 x 13 x 13 มิลลิเมตร จำนวน 5 ชิ้น โดยทำการเผาแบบแนวตั้ง ใช้เปลวไฟสีน้ำเงิน และมีความสูงของเปลวไฟ 20 มิลลิเมตร

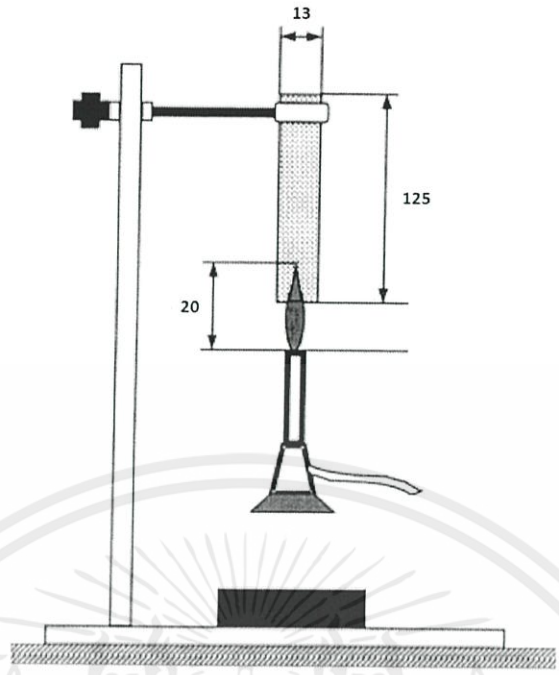
ตารางที่ 3.6 เกณฑ์การแบ่งกลุ่มพฤติกรรมของวัสดุต่อการติดไฟตามมาตรฐาน UL 94 [25]

หลักเกณฑ์การแบ่งกลุ่มตามมาตรฐาน UL 94	
V-0	การเผาไหม้หยุดภายใน 10 วินาที โดยไม่มีการหยดของเปลวไฟ
V-1	การเผาไหม้หยุดภายใน 60 วินาที โดยไม่มีการหยดของเปลวไฟ
V-2	การเผาไหม้หยุดภายใน 60 วินาที โดยมีการหยดของเปลวไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปกติความต้านทานการลามไฟหรือการเผาไหม้วัสดุตามมาตรฐาน UL 94 เรียงตามลำดับคือ

V-2 < V-1 < V-0



รูปที่ 3.1 การทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL 94 โดยการเผาชิ้นงานแบบแนวตั้ง [26]

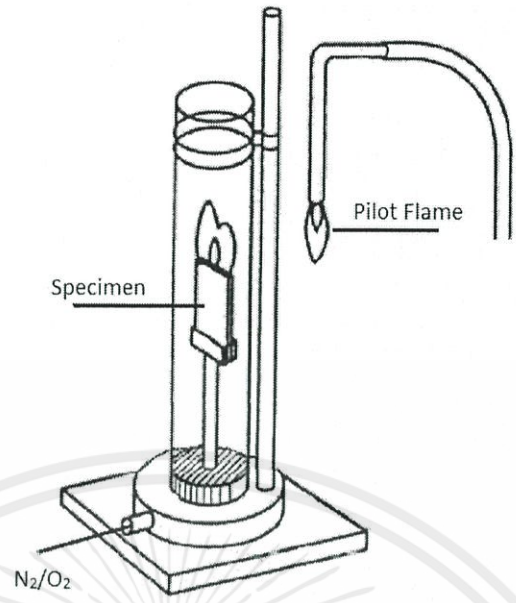
3.4.1.2 การหาค่า Limiting Oxygen Index (LOI) [18]

Limiting Oxygen Index (LOI) หรือ Oxygen Index (OI) คือปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนต่ำสุด (Minimum oxygen concentration) ที่ทำให้วัสดุเกิดการลุกไหม้อย่างต่อเนื่องภายใต้บรรยากาศที่มีการไหลของออกซิเจนและไนโตรเจนผสมกัน โดยมักจะรายงานเป็นเปอร์เซ็นต์ ซึ่งอากาศทั่วไปมีปริมาณของออกซิเจนประมาณ 21%

ตารางที่ 3.7 เกณฑ์การแบ่งกลุ่มพฤติกรรมของวัสดุต่อการติดไฟตามมาตรฐาน LOI

LOI (%)	ประเภทของวัสดุ
< 21	วัสดุที่ติดไฟได้ (Flammable)
21 – 28	วัสดุที่ติดไฟได้ช้า (Slow burning)
29 – 100	วัสดุที่สามารถดับไฟเองได้ (Self - extinguishing)
> 100	วัสดุที่ไม่ติดไฟ (Intrinsically non - flammable)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 การทดสอบ Limiting Oxygen Index [27]

3.4.2 สมบัติเชิงกล [28],[29]

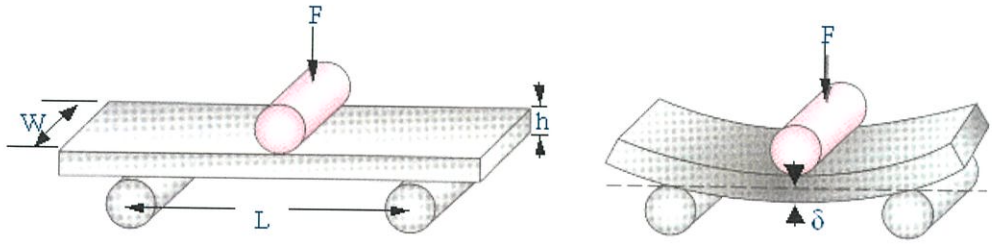
3.4.2.1 ความทนต่อแรงโค้งงอ

ความทนทานต่อแรงโค้งงอ เป็นค่าความเค้นที่ได้จากการทดสอบให้เกิดการงอตัว โดยใช้หัวกด (Indentor) ซึ่งกดลงตั้งฉากกับชิ้นทดสอบที่อยู่ในลักษณะแนวนอนโดยมีตัวรองรับ (Supporting jig) เป็นตัวกำหนดช่วงห่าง (Span) การทดสอบแบบนี้ชิ้นงานทดสอบจะได้รับทั้งแรงเค้นดึง (Tensile stress) และแรงเค้นกด (Compressive stress) ซึ่งแรงเค้นกดจะเกิดขึ้นบนชิ้นงานทดสอบ ส่วนแรงเค้นดึงจะเกิดใต้ชิ้นงานทดสอบ โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 790 ใช้ชิ้นงานทดสอบ 5 ชิ้นในแต่ละครั้ง และมีสภาวะในการทดสอบดังนี้

- โหลดเซลล์ (Load cell) 5 kN
- ความเร็วในการกด (Compression speed) 10 mm/min
- ระยะห่างระหว่างแท่นรองรับ (L) 15 เท่าของความหนาชิ้นงาน

การทดสอบความทนแรงโค้งงอแบบ 3 จุด เป็นการทดสอบความเค้นโดยมีตัวกดสำหรับแรงกด 1 จุด ซึ่งอยู่ด้านบนชิ้นงานทดสอบ และมีตัวรองรับที่กำหนดระยะห่างอยู่ด้านล่างชิ้นงานทดสอบ 2 จุด ดังรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 การทดสอบความทนแรงโค้งงอแบบ 3 จุด [29]

ความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) คือความเค้นมากที่สุดหรือความเค้นโค้งงอ (Maximum stress or Flexural stress: σ_{max}) ที่เกิดตรงกลางชิ้นทดสอบตรงส่วนผิวนอก หาได้ดังสมการ

$$\text{Flexural strength} = \frac{3FL}{2Wh^2}$$

มอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus) คือระยะที่ชิ้นงานเกิดการโค้งงอเมื่อถูกกดด้วยแรง สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\text{Flexural modulus} = \frac{L^3F}{4Wh^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta d}$$

เมื่อ F คือแรงกดสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการโค้งงอ มีหน่วยเป็นนิวตัน (N)

L คือระยะห่างระหว่างตำแหน่งของวัสดุที่รองรับชิ้นงานทดสอบ (Span length)

W คือความกว้างของชิ้นงานทดสอบ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

H คือความหนาของชิ้นงานทดสอบ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

ΔF คือผลต่างของแรงกดในช่วงความชันเป็นเส้นตรง มีหน่วยเป็นนิวตัน (N)

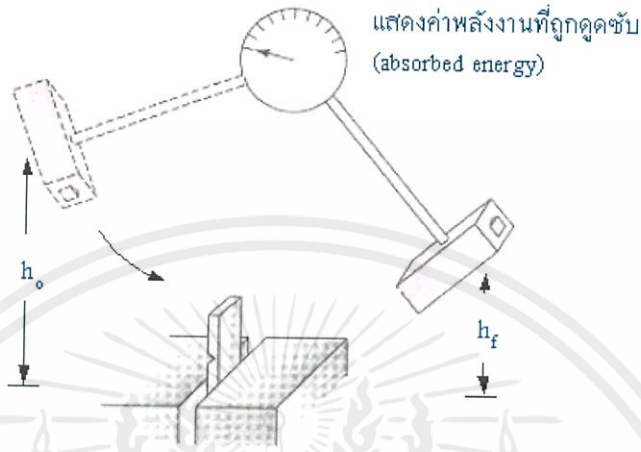
Δd คือระยะโค้งงอ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

3.4.2.2 ความทนต่อแรงกระแทก

ความทนต่อแรงกระแทก เป็นการวัดความสามารถในการดูดกลืนพลังงานของวัสดุภายใต้การกระแทก ความทนต่อแรงกระแทกมักจะสัมพันธ์กับค่าความเหนียว (Toughness) การทดสอบสมบัติความทนต่อแรงกระแทกเป็นการทดสอบเชิงกลในลักษณะการได้รับแรงกระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างทันทีทันใดโดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 256 ซึ่งเป็นแบบไอซอด (Izod type) ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทกแบบ Izod [29]

โดยใช้ชิ้นงานทดสอบ 5 ชิ้น ในแต่ละครั้ง และสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\text{Impact strength} = \frac{W}{A}$$

เมื่อ W คือค่าความทนต่อแรงกระแทก มีหน่วยเป็นกิโลจูล (kJ)

A คือพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่แตกหัก มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)

3.4.3 สมบัติทางกายภาพ

3.4.3.1 ความหนาแน่น (Density) [30]

หาความหนาแน่นของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งใช้ชิ้นงานทดสอบจำนวน 5 ชิ้น โดยการชั่งน้ำหนักชิ้นงานด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง แล้วหาปริมาตรชิ้นงาน จากนั้นแทนค่าลงในสมการเพื่อหาความหนาแน่น ดังสมการ

$$\text{Density} = \frac{M}{V}$$

เมื่อ D คือความหนาแน่น มีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3)

M คือมวล มีหน่วยเป็นกรัม (g)

V คือปริมาตร มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร (cm^3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

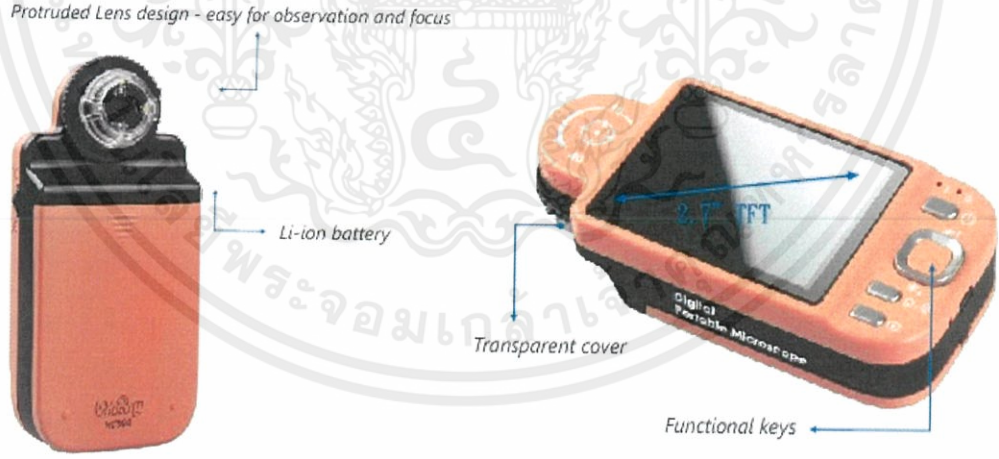
3.4.3.2 สัณฐานวิทยา (Morphology) [10]

การศึกษาสัณฐานวิทยาของไม้เทียม จะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM) ซึ่งเป็นการส่องดูลักษณะพื้นผิวของวัสดุอย่างละเอียด เพื่อดูการกระจายตัวของเส้นใยมะพร้าวในวัฏภาคของพอลิเมอร์เมทริกซ์ โดยนำชิ้นงานทดสอบมาแช่ไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) เป็นเวลา 30 นาที แล้วทำการหักชิ้นงานทันทีที่อุณหภูมิต่ำ จากนั้นนำตัวอย่างมาเคลือบทองและนำไปวิเคราะห์เพื่อศึกษาพื้นผิวของชิ้นงาน

3.4.3.3 กล้องจุลทรรศน์ใช้แสง (Optical Microscopes) [31]

กล้องจุลทรรศน์ใช้แสง (Optical microscopes) กล้องจุลทรรศน์ใช้แสงมีหลักการทำงานคือ ใช้แสงเป็นตัวช่วยในการทำให้มองเห็นภาพ โดยแสงจะวิ่งผ่านระบบเลนส์ต่างๆและมีการส่องไปที่วัตถุก่อนที่แสงจะส่องผ่านเข้าสู่สายตา ซึ่งแสงที่อยู่ภายในระบบที่สะท้อนกลับเข้าสู่สายตาเราทำให้เราเห็นภาพได้โดยการมองผ่านเลนส์

ในงานวิจัยนี้ใช้กล้องจุลทรรศน์ใช้แสงแบบพกพา (Digital Portable Microscopes) โดยมีกำลังสูงสุดเท่ากับ 200X (Optical 40X and Digital 5 x)



รูปที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์ใช้แสงแบบพกพา (Digital Portable Microscopes) [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.4 สมบัติทางความร้อน

3.4.4.1 Differential Scanning Calorimetry (DSC) [10]

DSC เป็นเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับการวัดอัตราการไหลของความร้อน (Heat flow) ที่ให้แก่สารตัวอย่างเทียบกับสารอ้างอิงที่เป็นฟังก์ชันกับเวลาหรืออุณหภูมิ สามารถอธิบายสมบัติของวัสดุคอมโพสิต เช่น ค่าองศาความเป็นผลึก (Degree of crystallization ; X_c) อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิการตกผลึก (T_c) เป็นต้น โดยสภาวะการทดสอบเป็นดังนี้

อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ	10 °C/min
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ	25 - 200 °C

สามารถคำนวณค่าองศาความเป็นผลึก (Degree of crystallinity ; X_c) ได้ดังสมการนี้

$$\text{Degree of crystallinity };X_c(\%)= \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^{\circ}} X \frac{100}{\%\text{ ของ HDPE ในวัสดุ}} X\ 100$$

เมื่อ ΔH_f คือเอนทาลปี (Enthalpy) ของการหลอมเหลวของพอลิเมอร์

ΔH_f° คือเอนทาลปีของการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ที่มีผลึก 100% โดยมีค่าเท่ากับ 293.6 J/g [12]

3.4.4.2 Thermogravimetric Analysis (TGA)

TGA เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวด้วยความร้อนของตัวอย่าง โดยบดตัวอย่างให้มีขนาดเล็กและนำไปอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เตรียมตัวอย่างทดสอบประมาณ 15 มิลลิกรัมแล้วทำการทดสอบภายใต้สภาวะการทดสอบดังนี้

อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ	20 °C/min
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ	50 - 900 °C

และทดสอบภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนและออกซิเจน

3.5 สรุปประเด็นศึกษา

1. ศึกษาอัตราส่วนของสารหน่วงไฟ
2. ศึกษาการใช้สารหน่วงไฟในรูปมาสเตอร์แบทช์ (Masterbatch)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการพัฒนาไม้พลาสติกคอมโพสิตสูตรหน่วงการติดไฟจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ผสมเส้นใยมะพร้าว (Coir ; F) เบอร์4 (ขนาด 50-80 mesh) ซึ่งใช้อัตราส่วนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อเส้นใยมะพร้าวเป็น 50:50 (โดยน้ำหนัก) ทำการศึกษาสารหน่วงไฟระบบอินตูเมสเซนต์ (Intumescent) ซึ่งใช้แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) เป็นสารให้กรดอนินทรีย์ เมลามีน (MA) เป็นสารให้ฟอง และเส้นใยมะพร้าว (F) เป็นสารให้เถ้า โดยทำการศึกษาหาปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) และเมลามีน (MA) ที่น้อยที่สุดที่ยังคงมีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดีและศึกษาการใช้สารหน่วงไฟในรูปมาสเตอร์แบทช์ (Masterbatch) เพื่อลดปัญหาความยุ่งยากในการผสม การรวมตัวเป็นก้อน (Agglomerates) ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง รวมทั้งศึกษาสมบัติต่างๆของไม้พลาสติกคอมโพสิต เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน และความสามารถในการติดไฟ เป็นต้น

4.1 ศึกษาอัตราส่วนของสารหน่วงไฟ

สารหน่วงไฟที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นสารหน่วงไฟระบบอินตูเมสเซนต์ (Intumescent) เมื่อวัสดุได้รับความร้อนจะพองตัวเป็นชั้นมีลักษณะคล้ายโฟม ซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวณป้องกันการแพร่ผ่านของความร้อนและออกซิเจน ทำให้ปฏิกิริยาการลุกไหม้แบบลูกโซ่สิ้นสุดลง

สารหน่วงไฟระบบอินตูเมสเซนต์ (Intumescent) มี 3 องค์ประกอบหลักดังนี้ คือ

- สารให้กรดอนินทรีย์ : ใช้แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) สลายตัวให้กรดฟอสฟอริกที่อุณหภูมิประมาณ 250 °C

- สารให้ฟอง : ใช้เมลามีน (MA) สลายตัวให้แก๊สแอมโมเนีย (NH_3) และแก๊สไนโตรเจน (N_2) ที่อุณหภูมิประมาณ 345 °C

- สารให้เถ้า : ใช้เส้นใยมะพร้าว (F)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP)

4.1.1.1 ศึกษาสมบัติการลามไฟตามมาตราฐาน UL 94

จากงานวิจัย [23] ศึกษาประสิทธิภาพที่เสริมกันของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) และเมลามีน (MA) เป็นสารหน่วงการติดไฟของพอลิออกซิเมทิลลีน ซึ่งทำการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างสารหน่วงไฟระบบธรรมดาและระบบอินตูเมสเซนต์ (Intumescent) พบว่าสารหน่วงไฟระบบอินตูเมสเซนต์ (Intumescent) ที่มีอัตราส่วน MA : APP : Novolac เท่ากับ 1:3:1 ให้ผลการลามไฟตามมาตราฐาน UL 94 เป็น V-0 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาอัตราส่วนของสารหน่วงไฟระบบอินตู-เมสเซนต์ (Intumescent) เริ่มจากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) เนื่องจาก APP เป็นสารเติมแต่งที่มีราคาแพง เมื่อใส่ในปริมาณมากจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลงจึงทำการลดปริมาณ APP ในช่วงอัตราส่วนของ MA : APP : F เป็น 1:3:1 ถึง 1:0.1:1 โดยมี MA และ F คงที่ เพื่อหาปริมาณ APP ที่น้อยที่สุดที่ยังคงมีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดี โดยผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1

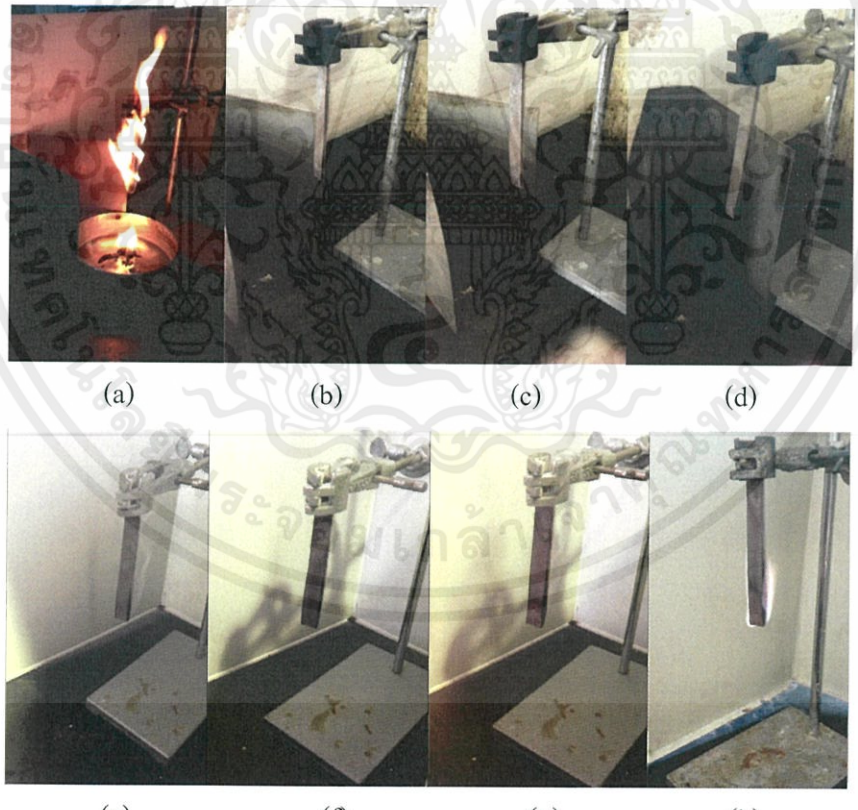
ตารางที่ 4.1 ผลการลามไฟตามมาตรฐาน UL 94 ของไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPCs) ที่มีปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) แตกต่างกัน

MA : APP : F	ผลการทดสอบตามมาตรฐาน UL 94
Control	ไหม้หมด
1:3:1	V-0
1:2:1	V-0
1:1:1	V-0
1:0.8:1	V-0
1:0.5:1	V-0
1:0.3:1	V-0
1:0.1:1	ไหม้หมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

จากตารางที่ 4.1 พบว่า ไม้พลาสติกคอมโพสิตที่ไม่ใส่สารหน่วงไฟเมื่อทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL 94 จะติดไฟและลุกไหม้จนหมด ส่วนไม้พลาสติกคอมโพสิตที่ใส่สารหน่วงไฟ

เมื่อทดสอบการลามไฟจะมีความสามารถในการหน่วงการติดไฟมากขึ้น เนื่องจากเมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนจากการเผาไหม้ จะเกิดการสลายตัวของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) และเมลามีน (MA) เกิดเป็นโครงสร้างลักษณะคล้ายโฟม เป็นฉนวนป้องกันการแพร่ผ่านของความร้อนและออกซิเจน ทำให้ปริมาณเชื้อเพลง แก๊สที่ติดไฟได้ รวมทั้งความร้อนแพร่มายังวัสดุได้น้อยลง และเมื่อมีปริมาณองค์ประกอบที่ใช้ในการติดไฟไม่เพียงพอก็จะส่งผลให้การเผาไหม้สิ้นสุดลงเมื่อลดปริมาณ APP พบว่าอัตราส่วนของ MA : APP : F ที่ 1:3:1 ถึง 1:0.3:1 ได้ผลทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL 94 เป็น V-0 แต่เมื่อลดปริมาณ APP ที่อัตราส่วนของ MA : APP : F เป็น 1:0.1:1 พบว่าชิ้นงานติดไฟและลุกไหม้จนหมด ทั้งนี้เนื่องมาจากมีปริมาณ APP น้อยเกินไป จนไม่สามารถเกิดเป็นชั้นโฟมปกคลุมพื้นผิวชิ้นงานได้ทั้งหมด เมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนจึงเกิดการลุกไหม้ในบริเวณที่ไม่มีชั้นโฟมปกคลุมพื้นผิว ส่งผลให้เกิดการลามไฟและลุกไหม้จนหมด นอกจากนี้การลดปริมาณ APP ยังช่วยให้สมบัติเชิงกลบางประการดีขึ้นและลดต้นทุนในการผลิต

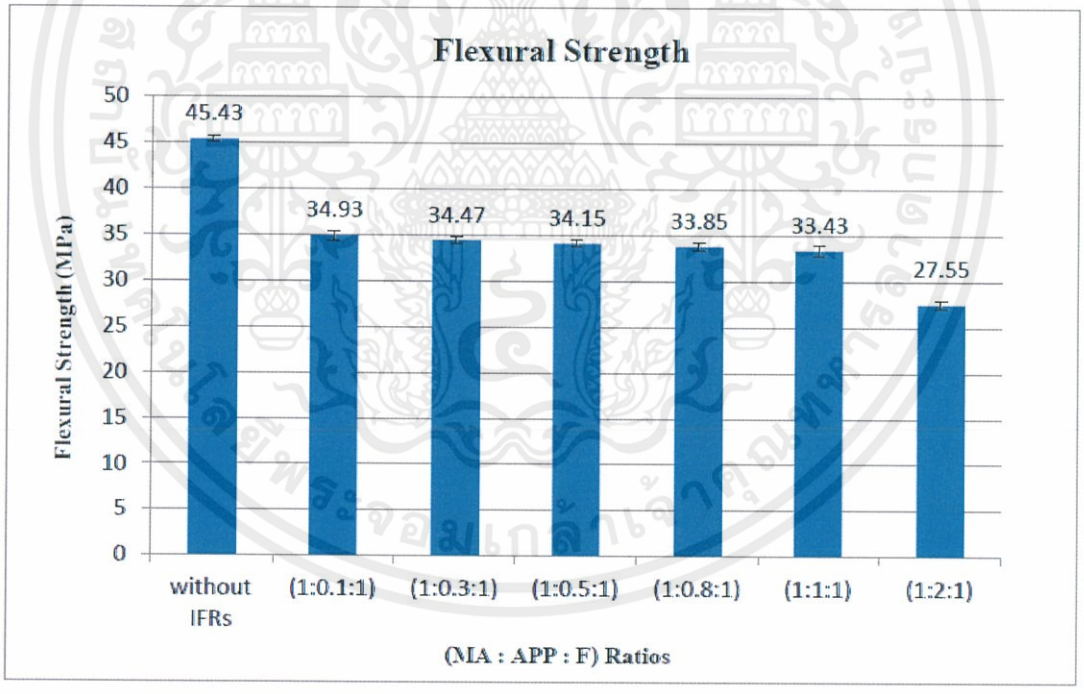


รูปที่ 4.1 การติดไฟของไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPCs) เมื่อทำการจุดไฟเป็นเวลา 10 วินาที โดยมีอัตราส่วน MA : APP : F (a) ไม่ใส่สารหน่วงไฟ, (b) 1:3:1, (c) 1:2:1, (d) 1:1:1, (e) 1:0.8:1, (f) 1:0.5:1, (g) 1:0.3:1 และ (h) 1:0.1:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของผลงานทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

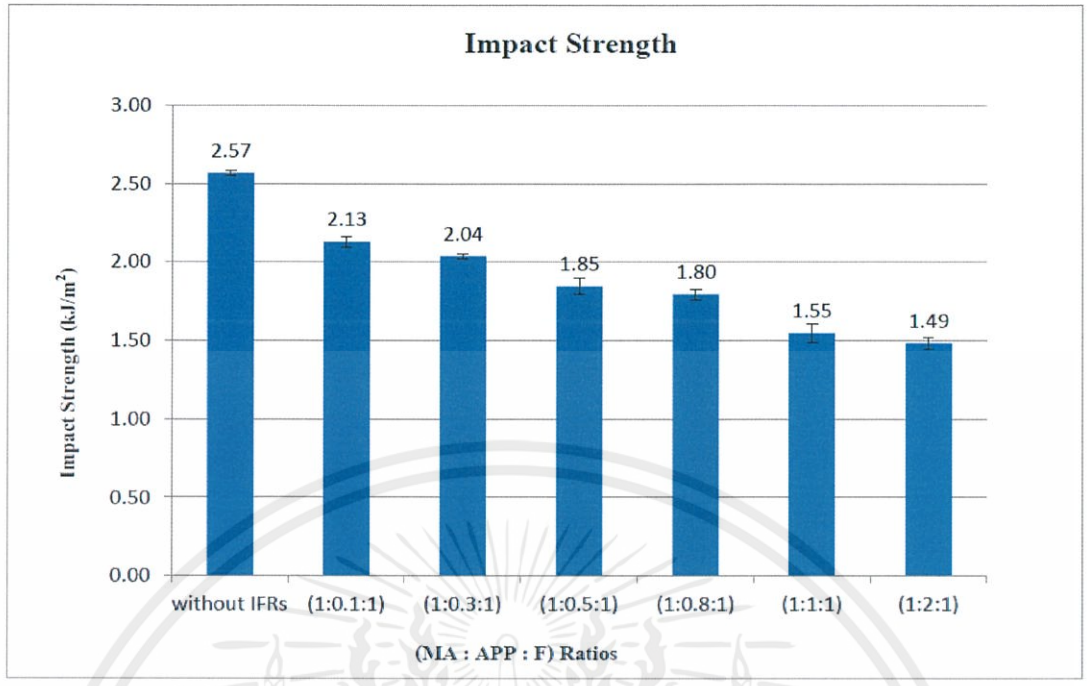
4.1.1.2 ศึกษาสมบัติเชิงกล

จากรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 แสดงค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural Strength) และค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact Strength) ของไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPCs) ที่มีปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) แตกต่างกันตามลำดับ พบว่า เมื่อมีการเติมสารหน่วงไฟลงไปในไม้พลาสติกคอมโพสิตจะทำให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural Strength) และค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact Strength) มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากสารหน่วงไฟที่เติมลงไปถือเป็นสารเติมแต่งชนิดหนึ่ง ซึ่งทำให้การยึดติดกันของพอลิเมอร์และเส้นใยทำได้ยากขึ้น และสารหน่วงไฟที่เติมลงไปยังไปลดปริมาณของพอลิเมอร์ซึ่งเป็นเมทริกซ์ เมื่อเติมสารหน่วงไฟลงไปปริมาณมากอาจเกิดการกระจายที่ไม่ดีในพอลิเมอร์ เกิดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerates) และเนื่องจากความมีขั้วของสารหน่วงไฟอาจดูดความชื้น เกิดเป็นฟองอากาศในชิ้นงาน ทำให้เกิดเป็นจุดบกพร่อง (Defects) ในชิ้นงาน มีช่องว่าง จึงส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงของชิ้นงานลดลง

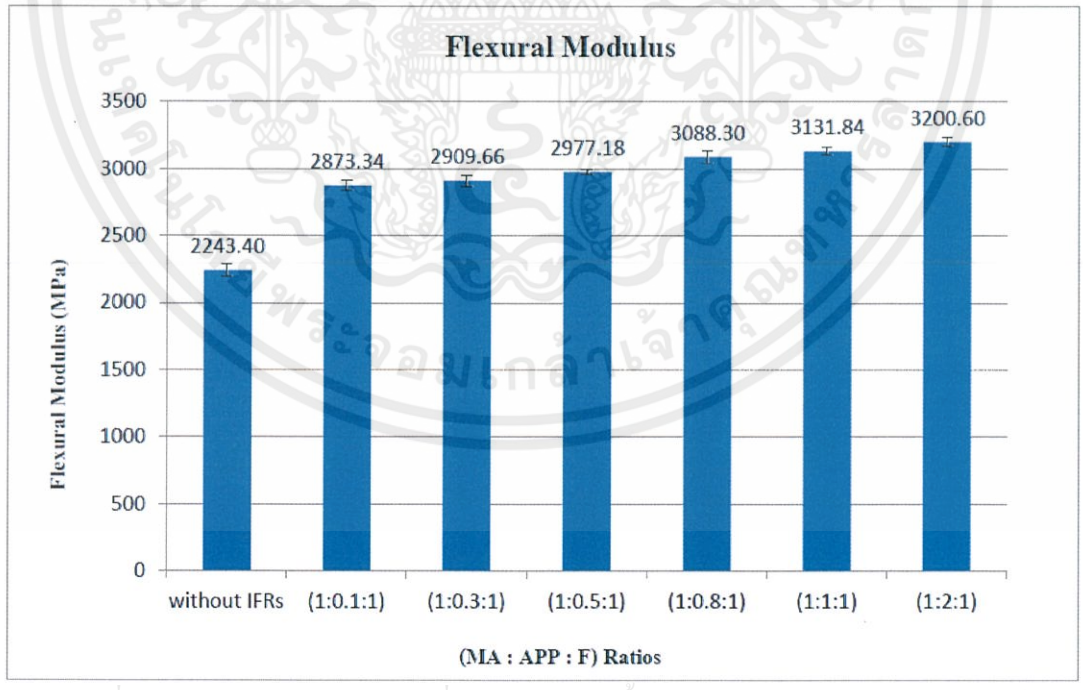


รูปที่ 4.2 ค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural Strength) ของไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPCs) ที่มีปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact Strength) ของไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPCs) ที่มีปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) แตกต่างกัน



รูปที่ 4.4 ค่ามอดุลัสโค้งงอ (Flexural Modulus) ของไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPCs) ที่มีปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) แตกต่างกัน

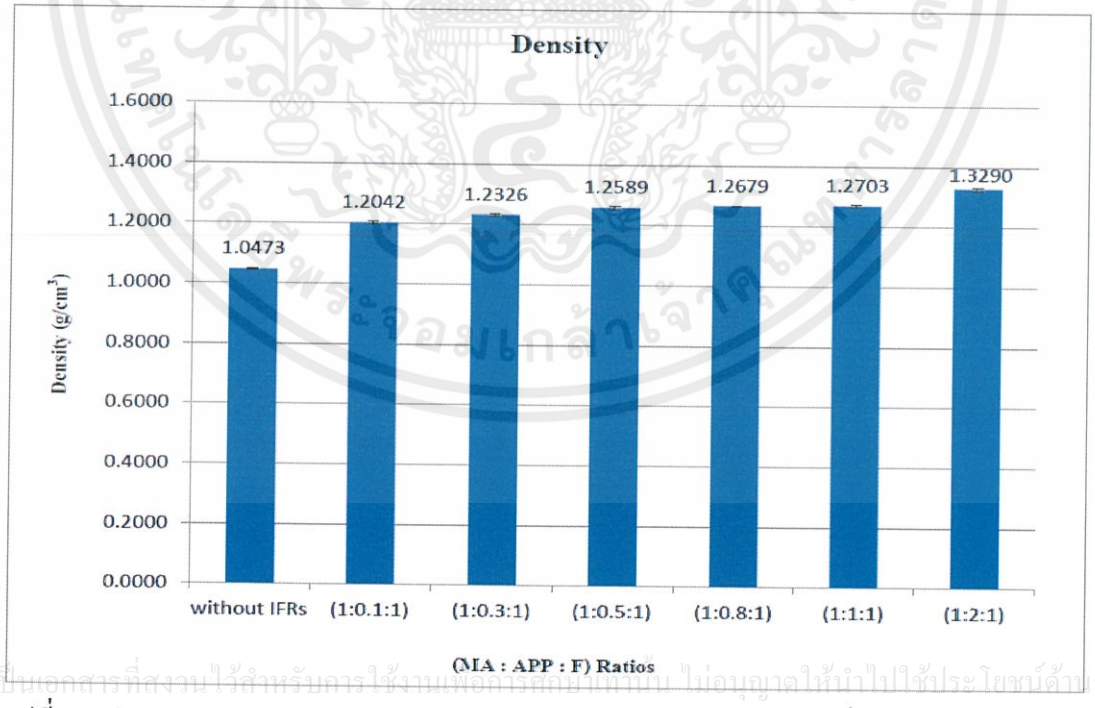
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 พบว่า เมื่อเติมสารหน่วงไฟลงไปในไม้พลาสติกคอมโพสิตจะทำให้ค่ามอดุลัสโค้งงอ (Flexural Modulus) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารหน่วงไฟที่เติมลงไปเป็นอนุภาคที่มีความแข็งมากกว่าส่วนที่เป็นพอลิเมอร์และเส้นใย ซึ่งเป็นไปตามกฎของของผสม (Rule of mixture) นั่นคือเมื่อเติมอนุภาคที่มีความแข็งมากลงไปในปริมาณมากก็จะทำให้ชิ้นงานมีความแข็งมากขึ้น ส่งผลให้ค่ามอดุลัสโค้งงอ (Flexural Modulus) มากขึ้น

4.1.1.3 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ

- ศึกษาค่าความหนาแน่น (Density)

จากรูปที่ 4.5 พบว่า เมื่อเติมสารหน่วงไฟลงไปในไม้พลาสติกคอมโพสิตจะทำให้ค่าความหนาแน่น (Density) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารหน่วงไฟที่เติมลงไปมีลักษณะเป็นอนุภาคของแข็งและมีความหนาแน่นมากกว่าพอลิเมอร์ โดยที่ความหนาแน่นของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เมลามีน (MA) และแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) เป็น 0.941, 1.57 และ 1.90 g/cm^3 ตามลำดับ จึงส่งผลให้ความหนาแน่น (Density) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามกฎของของผสม (Rule of mixture)



รูปที่ 4.5 ค่าความหนาแน่น (Density) ของไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPCs) ที่มีปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณเมลามีน (MA)

4.1.2.1 ศึกษาสมบัติการลามไฟตามมาตราฐาน UL 94

จากการศึกษาตอนที่ 4.1.1 จะได้ปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) ที่น้อยที่สุดแล้วยังคงมีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดี คืออัตราส่วน MA : APP : F เป็น 1:0.3:1 ในตอนนี้จึงทำการศึกษาหาปริมาณเมลามีน (MA) ที่น้อยที่สุดที่ยังคงมีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟ จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น [23] พบว่าอัตราส่วนของ MA : APP : F ที่น้อยที่สุดที่ให้ผลการลามไฟตามมาตราฐาน UL 94 เป็น V-0 คืออัตราส่วน 1:3:1 ดังนั้นจึงทำการลดปริมาณ MA ให้เป็นไปตามสัดส่วนดังกล่าว แต่ยังคงปริมาณเส้นใยเท่าเดิมเพื่อให้ปริมาณวัฏภาคที่ติดไฟได้เท่ากันทุกสูตร โดยผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการลามไฟตามมาตรฐาน UL 94 ของไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPCs) ที่มีปริมาณเมลามีน (MA) แตกต่างกัน

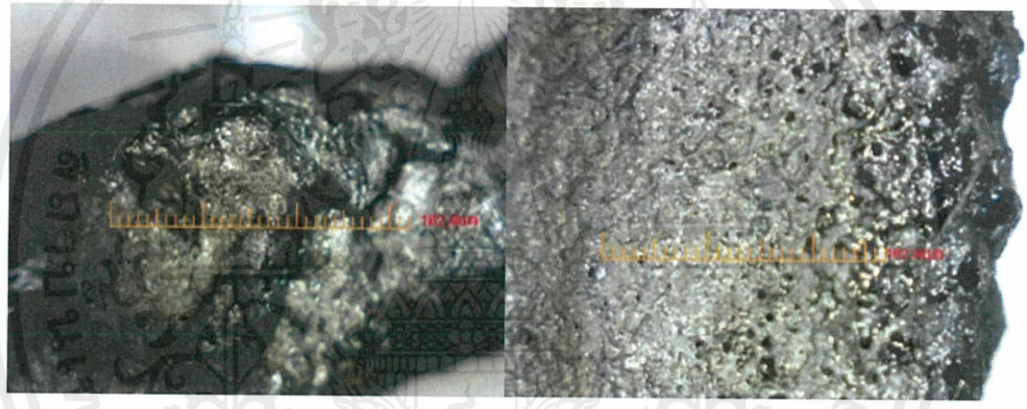
MA : APP : F	ผลการทดสอบตามมาตรฐาน UL 94
0.1:0.3:1	V-2
0.17:0.5:1	V-0

จากตารางที่ 4.2 พบว่าจากตอนที่ 4.1.1 อัตราส่วนของ MA : APP : F ที่ดีที่สุด คือ 1:0.3:1 ในตอนนี้จึงทำการลดปริมาณเมลามีน (MA) ลงให้เป็นไปตามสัดส่วน 1:3:1 พบว่า เมื่อทำการลดปริมาณ MA ลงเป็น 0.1:0.3:1 ให้ผลทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL 94 เป็น V-2 คือจุดไฟที่ปลายวัสดุเป็นเวลา 10 วินาที การเผาไหม้หยุดภายใน 60 วินาที โดยมีการหยดของเปลวไฟ ดังรูปที่ 4.6 เนื่องจากมีปริมาณ MA น้อยเกินไป ส่งผลให้สลายตัวให้แก๊สที่ไม่ติดไฟน้อย ทำให้เกิดชั้นโฟมที่บางจึงไม่สามารถป้องกันการแพร่ผ่านของความร้อนและออกซิเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพส่งผลให้ชิ้นงานมีความสามารถในการหน่วงไฟต่ำ ซึ่งจะเห็นได้จากรูปที่ 4.7 และเมื่อทำการเพิ่มปริมาณ MA เป็น 0.17:0.5:1 ชิ้นงานที่ถูกเผาจะมีลักษณะเป็นชั้นโฟมที่มีรูพรุนมากขึ้น และให้ผลทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL 94 เป็น V-0 แสดงว่าอัตราส่วนนี้มีปริมาณ MA เพียงพอที่จะทำให้เกิดการหน่วงไฟอย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(a) (b)

รูปที่ 4.6 การติดไฟของไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPCs) เมื่อทำการจุดไฟเป็นเวลา 10 วินาที โดยมีอัตราส่วน MA : APP : F (a) 0.1:0.3:1 และ (b) 0.17:0.5:1



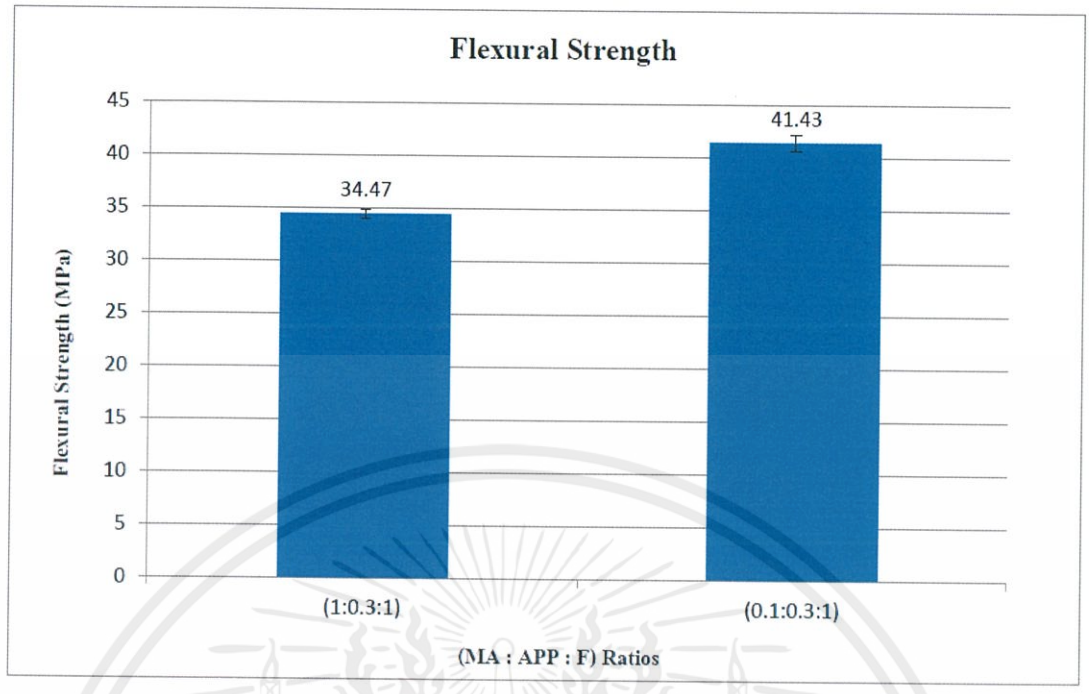
(a) (b)

รูปที่ 4.7 ภาพ OMของ WPCs ที่เตรียมจาก HDPE ผสมสารหน่วงไฟระบบอินตูเมสเซนต์ (Intumescent) ในอัตราส่วน MA : APP : F เป็น (a) 0.1:0.3:1 และ (b)

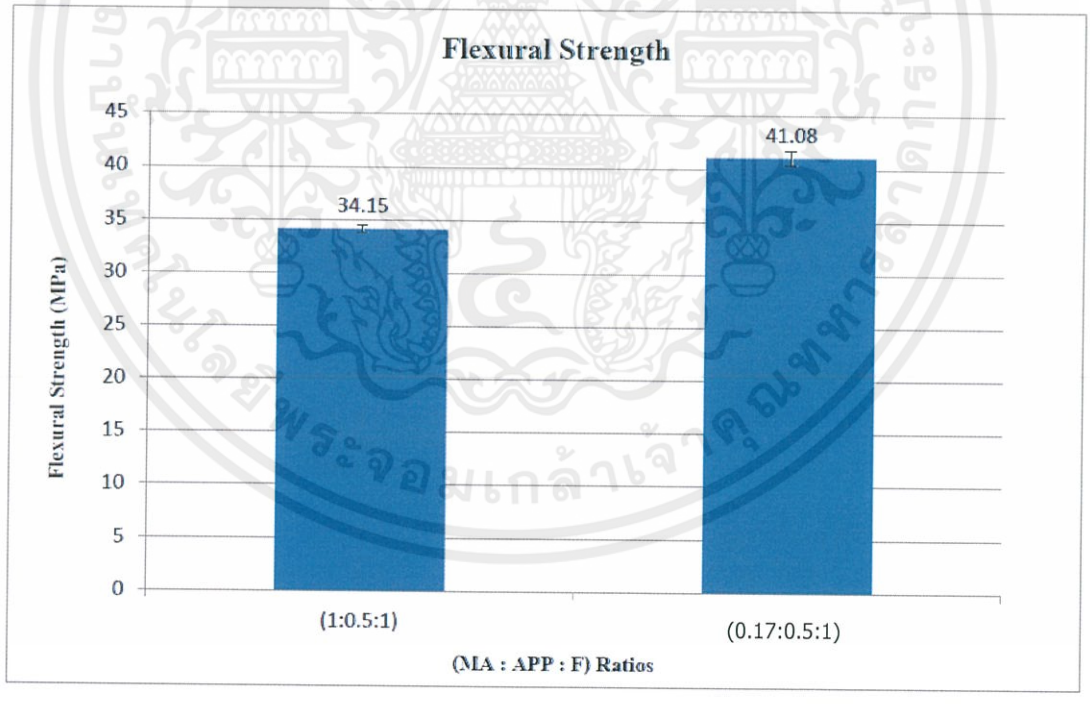
4.1.2.2 ศึกษาสมบัติเชิงกล

จากรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 แสดงค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural Strength) และค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact Strength) ของไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPCs) ที่มีปริมาณเมลามีน (MA) แตกต่างกันตามลำดับ พบว่า เมื่อลดปริมาณ MA ลง ทำให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural Strength) และค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact Strength) เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเติมสารหน่วงไฟในปริมาณน้อยลง ทำให้การยึดติดกันของพอลิเมอร์และเส้นใยดีขึ้น มีความต่อเนื่องของเมทริกซ์มากยิ่งขึ้น รวมทั้งเกิดการกระจายตัวของสารหน่วงไฟบนพอลิเมอร์และเส้นใยดี เกิดรอยต่อน้อย มีจุดบกพร่อง (Defects) น้อย ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงของชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



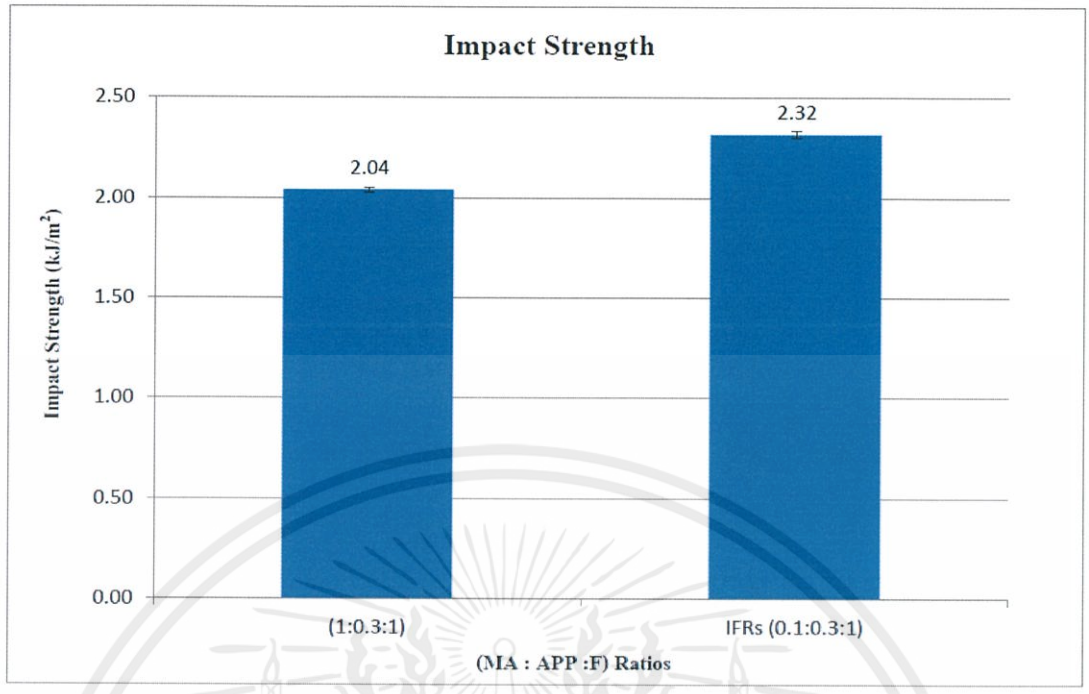
(a) ได้ผลการทดสอบตามมาตรฐาน UL 94 เป็น V-2



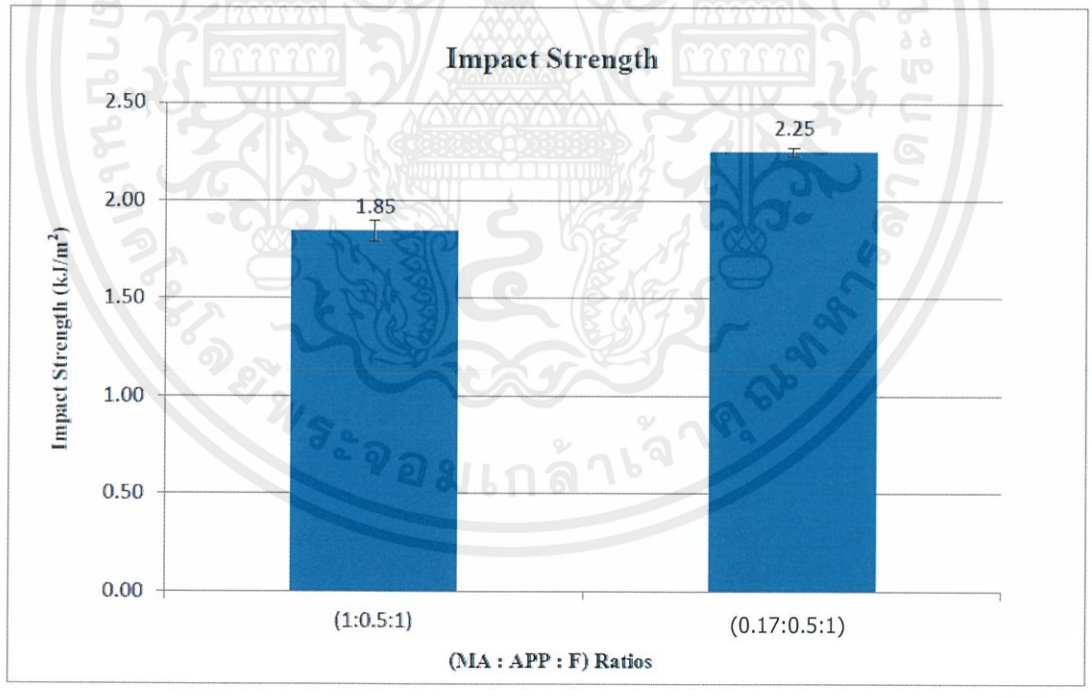
(b) ได้ผลการทดสอบตามมาตรฐาน UL 94 เป็น V-0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.8 ค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural Strength) ของไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPCs) ที่มีปริมาณเมลามีน (MA) แตกต่างกัน



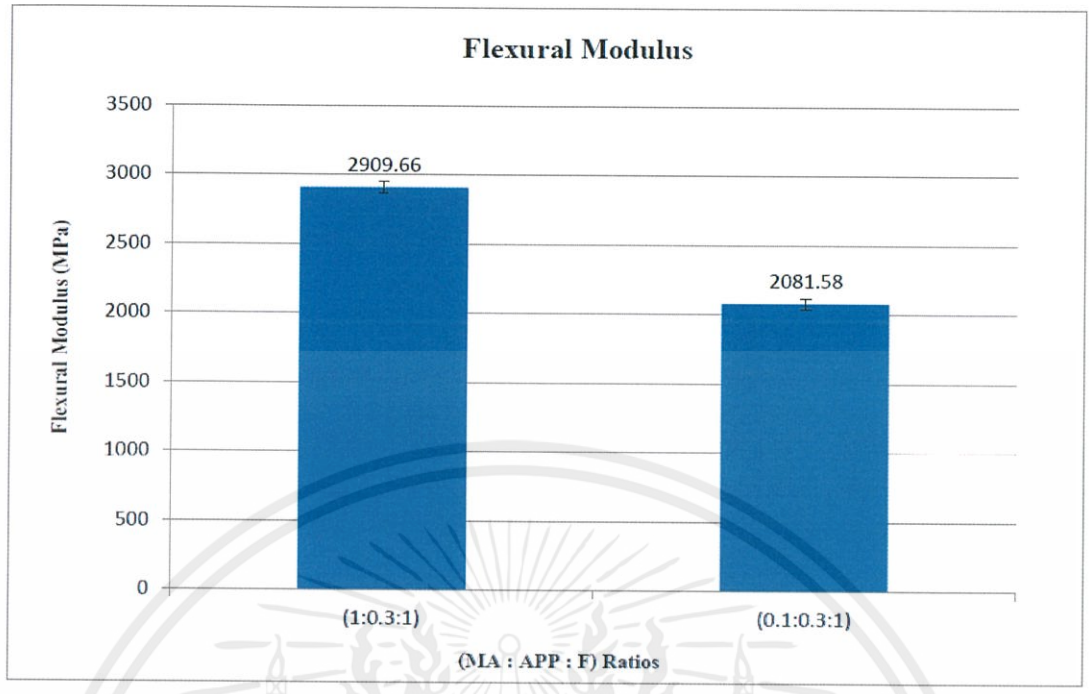
(a) ได้ผลการทดสอบตามมาตรฐาน UL 94 เป็น V-2



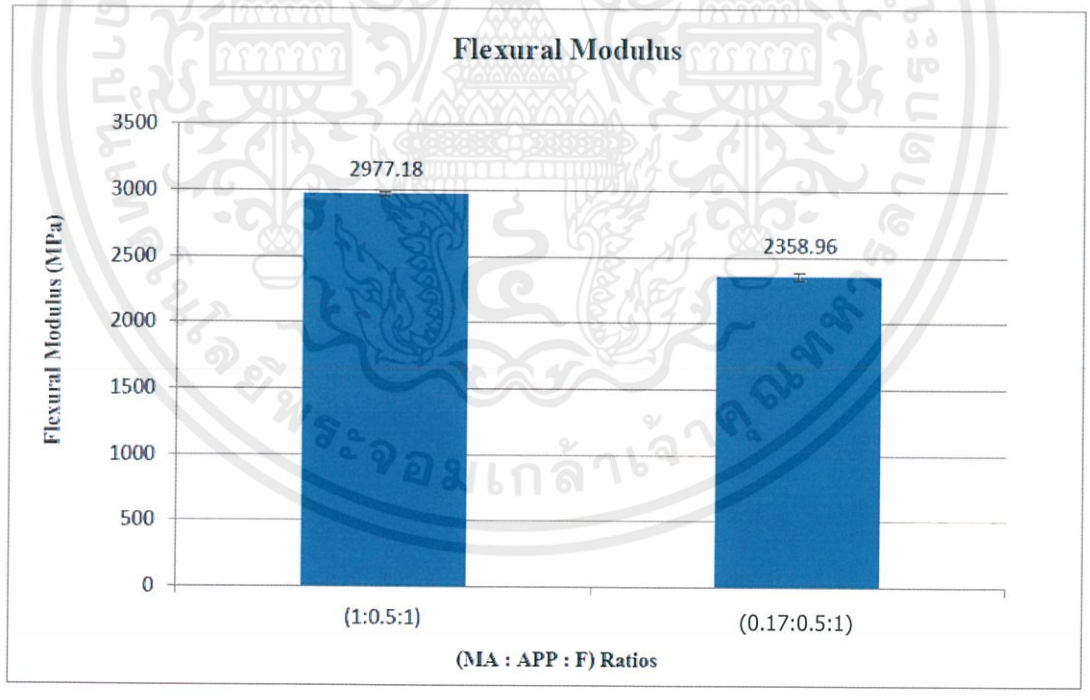
(b) ได้ผลการทดสอบตามมาตรฐาน UL 94 เป็น V-0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.9 ค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact Strength) ของไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPCs) ที่มีปริมาณเมลามีน (MA) แตกต่างกัน



(a) ได้ผลการทดสอบตามมาตรฐาน UL 94 เป็น V-2



(b) ได้ผลการทดสอบตามมาตรฐาน UL 94 เป็น V-0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

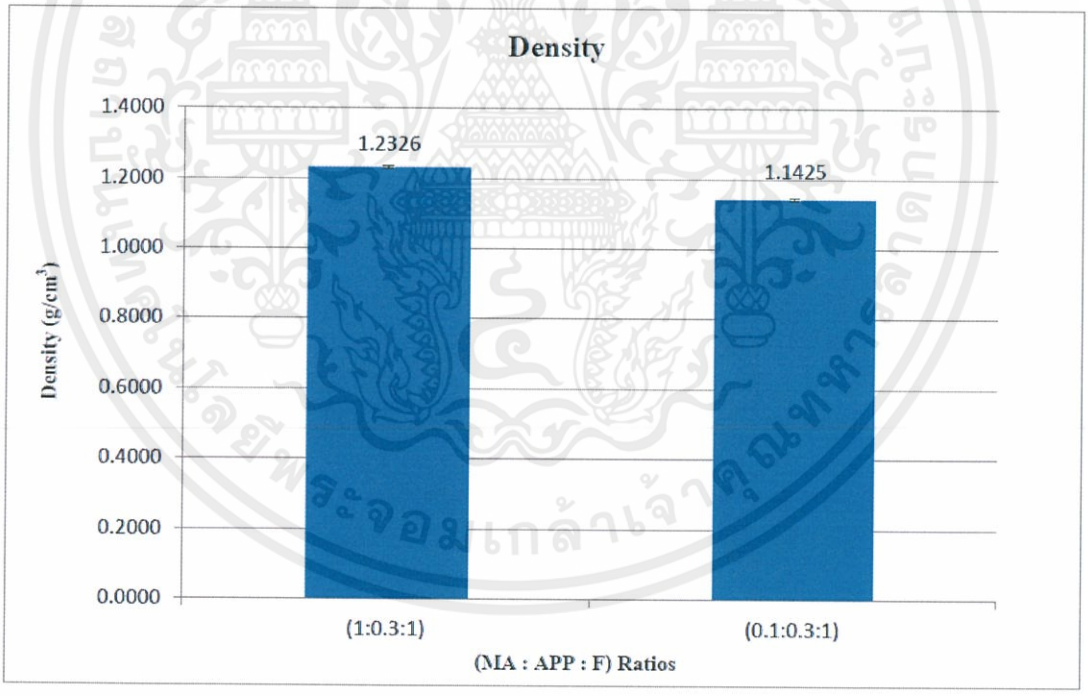
รูปที่ 4.10 ค่ามอดุลัสโค้งงอ (Flexural Modulus) ของไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPCs) ที่มีปริมาณเมลามีน (MA) แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.10 พบว่า เมื่อลดปริมาณเมลามีน (MA) ลงจะทำให้ค่ามอดุลัสโค้งงอ (Flexural Modulus) มีแนวโน้มลดลง ซึ่งเป็นไปตามกฎของของผสม (Rule of mixture) คือเมื่อเติมอนุภาคที่มีความแข็งมากลงไปในปริมาณน้อยก็จะทำให้ชิ้นงานมีความแข็งลดลง ส่งผลให้ค่ามอดุลัสโค้งงอ (Flexural Modulus) ลดลง

4.1.2.3 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ

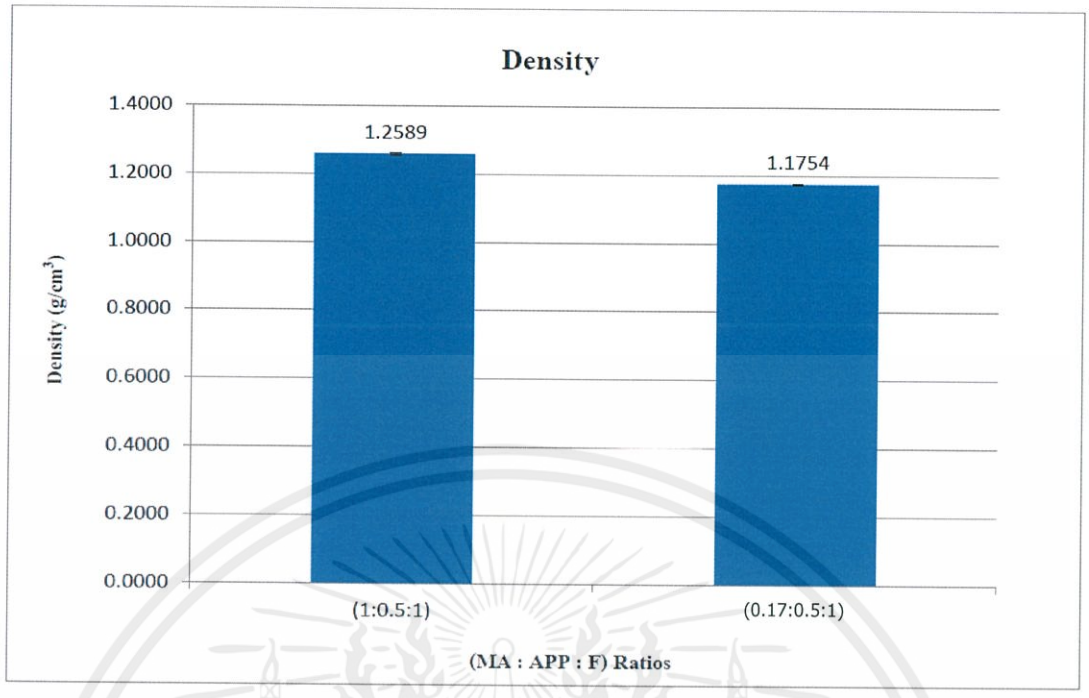
-ศึกษาค่าความหนาแน่น (Density)

จากรูปที่ 4.11 พบว่า เมื่อลดปริมาณเมลามีน (MA) ลงจะทำให้ค่าความหนาแน่น (Density) ลดลง เนื่องจากสารหน่วงไฟที่เติมลงไปมีความหนาแน่นมากกว่าพอลิเมอร์ เมื่อเติมลงไปในปริมาณน้อย จึงส่งผลให้ความหนาแน่น (Density) มีแนวโน้มลดลงตามกฎของของผสม (Rule of mixture)



(a) ได้ผลการทดสอบตามมาตรฐาน UL 94 เป็น V-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b) ได้ผลการทดสอบตามมาตรฐาน UL 94 เป็น V-0

รูปที่ 4.11 ค่าความหนาแน่น (Density) ของไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPCs) ที่มีปริมาณเมลามีน (MA) ต่างกัน

4.2 ศึกษาการใช้สารหน่วงไฟในรูปมาสเตอร์แบทช์ (Masterbatch)

จากการศึกษาตอนที่ 4.1 ซึ่งทำการศึกษาหาปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) และเมลามีน (MA) ที่น้อยที่สุดที่ยังคงมีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดี โดยจากการทดลองพบว่าอัตราส่วน MA : APP : F ที่ดีที่สุดเป็น 0.17:0.5:1 เนื่องจากได้ผลการลามไฟตามมาตรฐาน UL 94 เป็น V-0 ทั้งยังใช้ในปริมาณน้อยส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลดี น้ำหนักเบา และช่วยลดต้นทุน ซึ่งจากการทดลองพบว่าการผสมสารหน่วงไฟลงบนเส้นใยทั้งหมดมีความยุ่งยากในการผสม เกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนขณะทำการผสมด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง ดังนั้นจึงนำอัตราส่วนที่ดีที่สุดข้างต้นมาทำการศึกษาการใช้สารหน่วงไฟในรูปมาสเตอร์แบทช์ (Masterbatch)โดยหาอัตราส่วนปริมาณเส้นใยที่เคลือบสารหน่วงไฟ : ปริมาณเส้นใยที่ไม่เคลือบสารหน่วงไฟ (Coated : Uncoated Fiber Ratios) ที่ยังคงได้ผลการทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL 94 เป็น V-0 เพื่อลดปัญหาดังกล่าว นอกจากนี้ยังสามารถช่วยลดเวลาในการผลิต ทำให้อัตราในการผลิตเพิ่มสูงขึ้น และลดต้นทุนในการผลิตอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 ศึกษาสมบัติการลามไฟตามมาตราฐาน UL 94

ตารางที่ 4.3 ผลการลามไฟตามมาตรฐาน UL 94 ของไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPCs) ที่มีปริมาณเส้นใยที่เคลือบสารหน่วงไฟแตกต่างกัน

MA : APP : F	เส้นใยที่เคลือบสารหน่วงไฟ (%)	เส้นใยที่ไม่เคลือบสารหน่วงไฟ (%)	มาตรฐาน UL 94
0.17:0.5:1	100	0	V-0
0.17:0.5:1	75	25	V-0
0.17:0.5:1	50	50	V-0
0.17:0.5:1	25	75	V-0

จากตารางที่ 4.3 พบว่า เมื่อทำการเคลือบสารหน่วงไฟลงบนเส้นใยในปริมาณที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL 94 เป็น V-0 ทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าปริมาณเส้นใยที่เคลือบสารหน่วงไฟไม่ส่งผลต่อสมบัติการลามไฟ ทั้งนี้เนื่องมาจากในขั้นตอนการผสมด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) เส้นใยที่เคลือบสารหน่วงไฟมีการกระจายตัวดีในของผสม ไม่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerates) จึงทำให้มีสมบัติคงที่

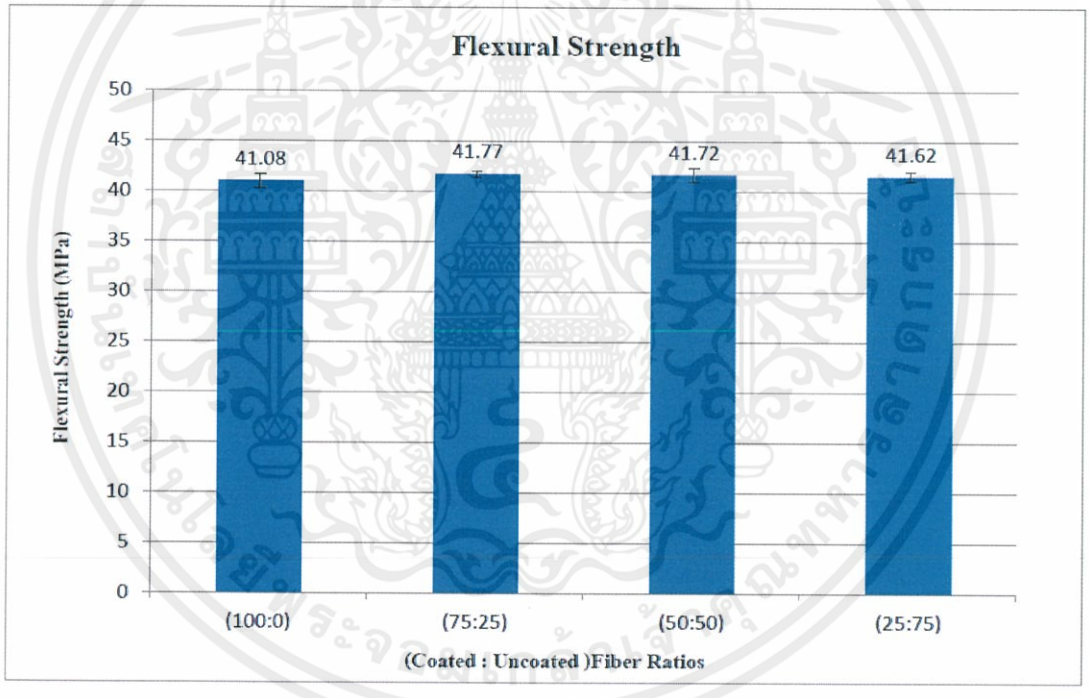
(a) (b) (c) (d)

รูปที่ 4.12 การติดไฟของไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPCs) เมื่อทำการจุดไฟเป็นเวลา 10 วินาที โดยมีปริมาณเส้นใยที่เคลือบสารหน่วงไฟ : ปริมาณเส้นใยที่ไม่เคลือบสารหน่วงไฟ เป็น (a) 100:0, (b) 75:25, (c) 50:50 และ (d) 25:75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

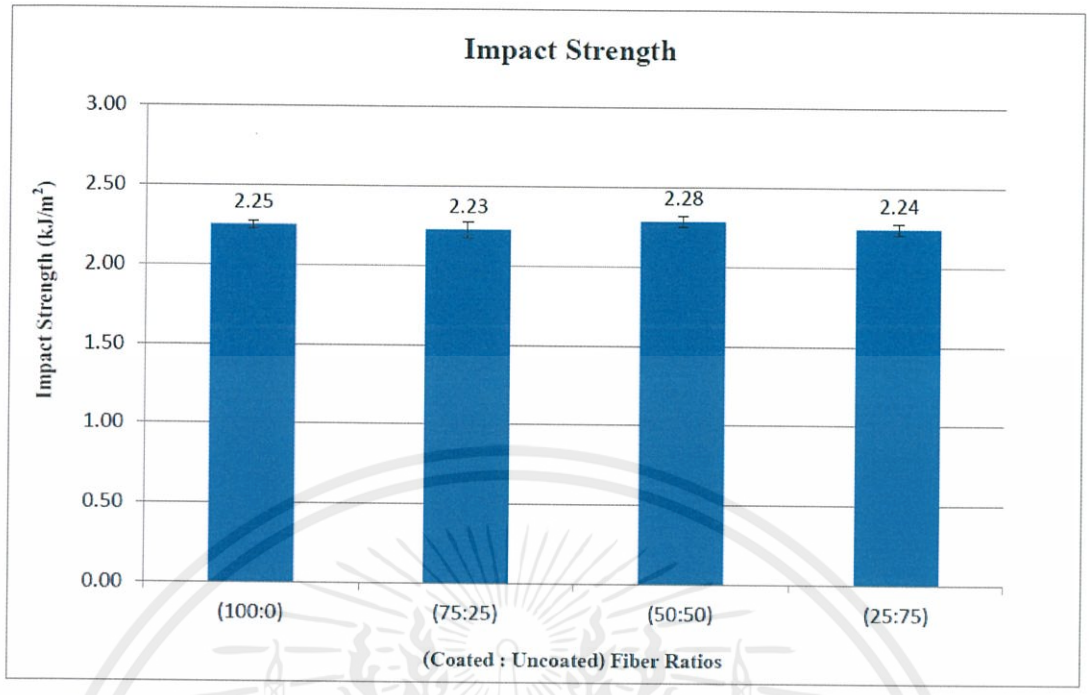
4.2.2 ศึกษาสมบัติเชิงกล

จากรูปที่ 4.13 – รูปที่ 4.15 แสดงค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural Strength) ค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact Strength) และค่ามอดุลัสโค้งงอ (Flexural Modulus) ของไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPCs) ที่มีปริมาณเส้นใยที่เคลือบสารหน่วงไฟแตกต่างกันตามลำดับ พบว่าเมื่อทำการเคลือบสารหน่วงไฟลงบนเส้นใยในปริมาณที่แตกต่างกัน จะเห็นว่าไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural Strength) ค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact Strength) และค่ามอดุลัสโค้งงอ (Flexural Modulus) อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องมาจากในขั้นตอนการผสมด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) เส้นใยที่เคลือบสารหน่วงไฟมีการกระจายตัวดีในของผสม ไม่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerates) จึงทำให้มีสมบัติคงที่

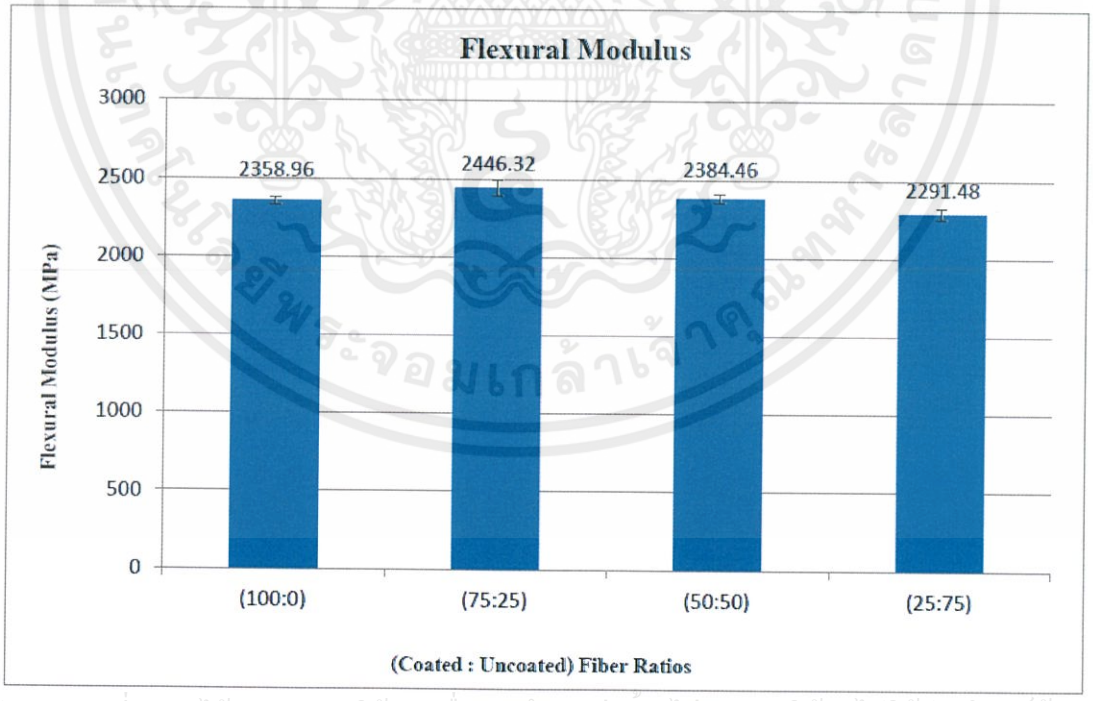


รูปที่ 4.13 ค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural Strength) ของไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPCs) ที่มีปริมาณเส้นใยที่เคลือบสารหน่วงไฟแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact Strength) ของไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPCs) ที่มีปริมาณเส้นใยที่เคลือบสารหน่วงไฟแตกต่างกัน



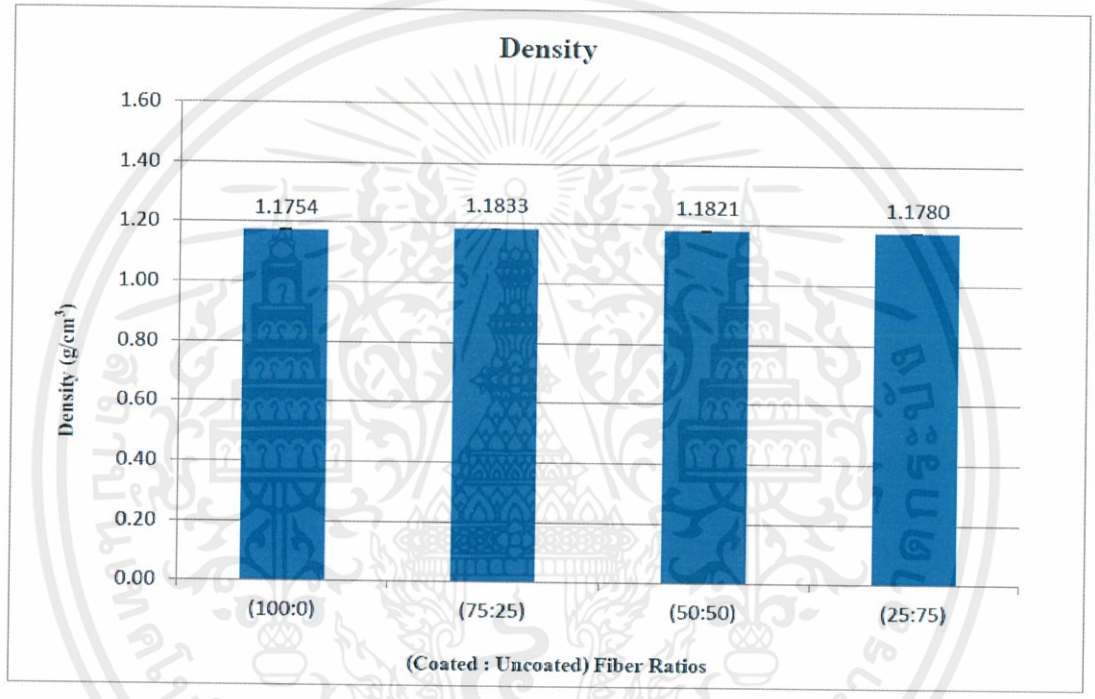
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.15 ค่ามอดุลัสโค้งงอ (Flexural Modulus) ของไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPCs) ที่มีปริมาณเส้นใยที่เคลือบสารหน่วงไฟแตกต่างกัน

4.2.3 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ

-ศึกษาค่าความหนาแน่น (Density)

จากรูปที่ 4.16 พบว่า เมื่อทำการเคลือบสารหน่วงไฟลงบนเส้นใยในปริมาณที่แตกต่างกัน จะเห็นว่าไม่ส่งผลต่อค่าค่าความหนาแน่น (Density) อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องมาจากในขั้นตอนการผสมด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) เส้นใยที่เคลือบสารหน่วงไฟมีการกระจายตัวดีในของผสม ไม่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerates) จึงทำให้มีสมบัติคงที่



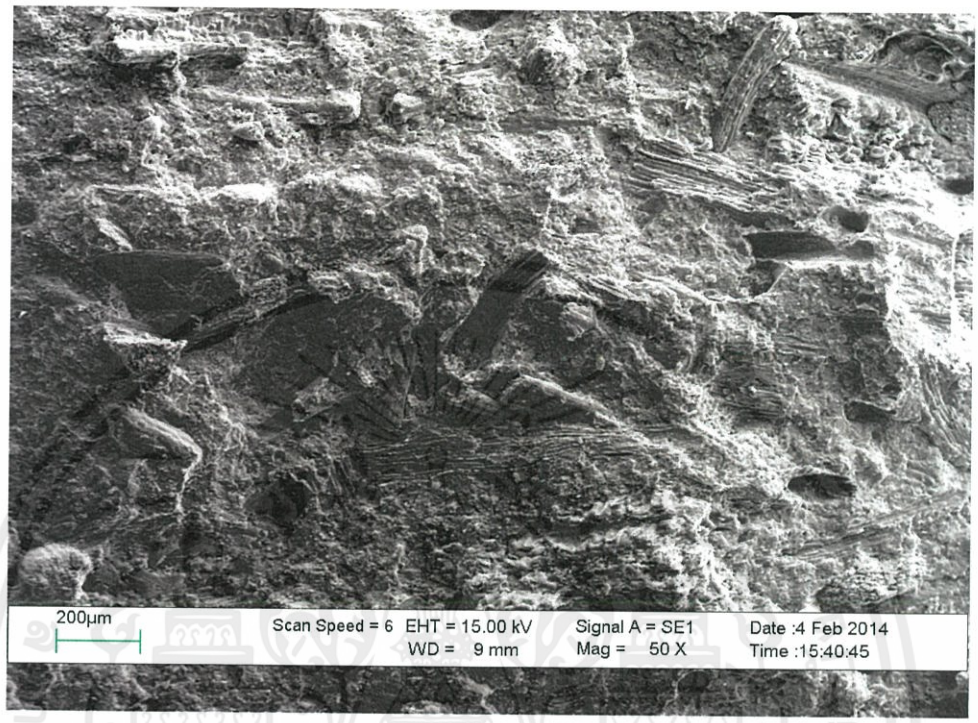
รูปที่ 4.16 ค่าความหนาแน่น (Density) ของไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPCs) ที่มีปริมาณเส้นใยที่เคลือบสารหน่วงไฟแตกต่างกัน

4.3 ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM)

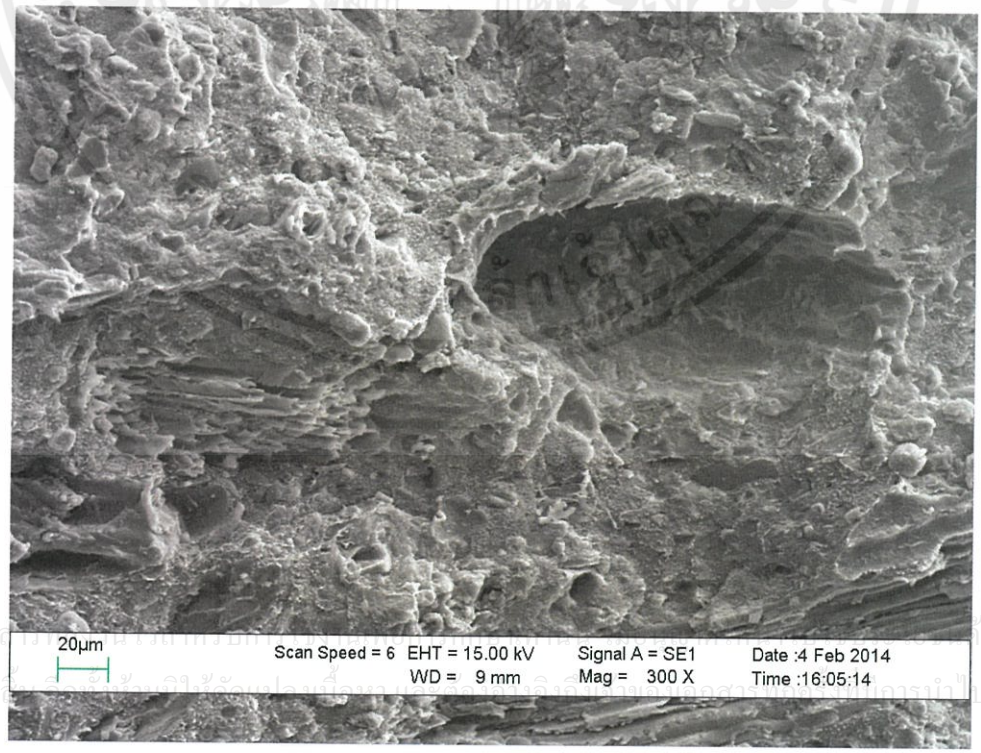
การศึกษาสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เป็นการศึกษาพื้นผิวของวัสดุอย่างละเอียด เพื่อให้ทราบถึงลักษณะโครงสร้างภายในชิ้นงาน ขนาดอนุภาค การกระจายตัวของอนุภาค และการยึดเกาะระหว่างอนุภาคสารเติมแต่งกับพอลิเมอร์รวมทั้งช่องว่างภายในชิ้นงาน โดยทำการศึกษาไม้พลาสติกคอมโพสิตที่มีอัตราส่วน MA : APP : F เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1:2:1 และ 0.17:0.5:1 เพื่อดูการกระจายตัวของเส้นใยเมื่อใส่สารหน่วงไฟในปริมาณมากและน้อยตามลำดับ

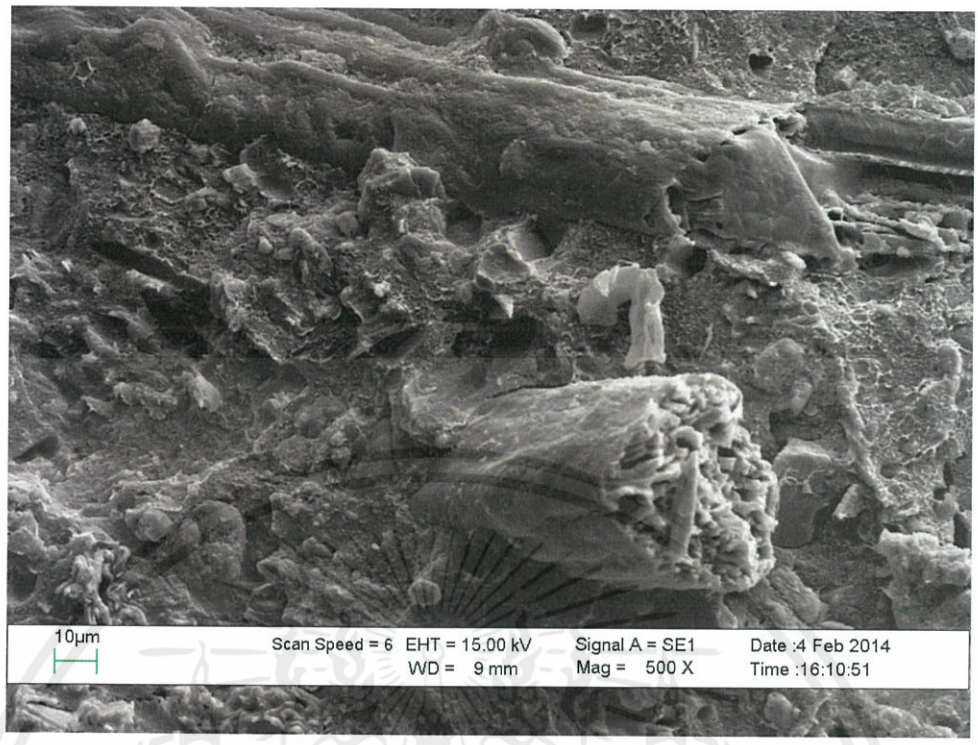


(a) กำลังขยาย 50 เท่า



(b) กำลังขยาย 300 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสาร
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้ง
การนำไปใช้

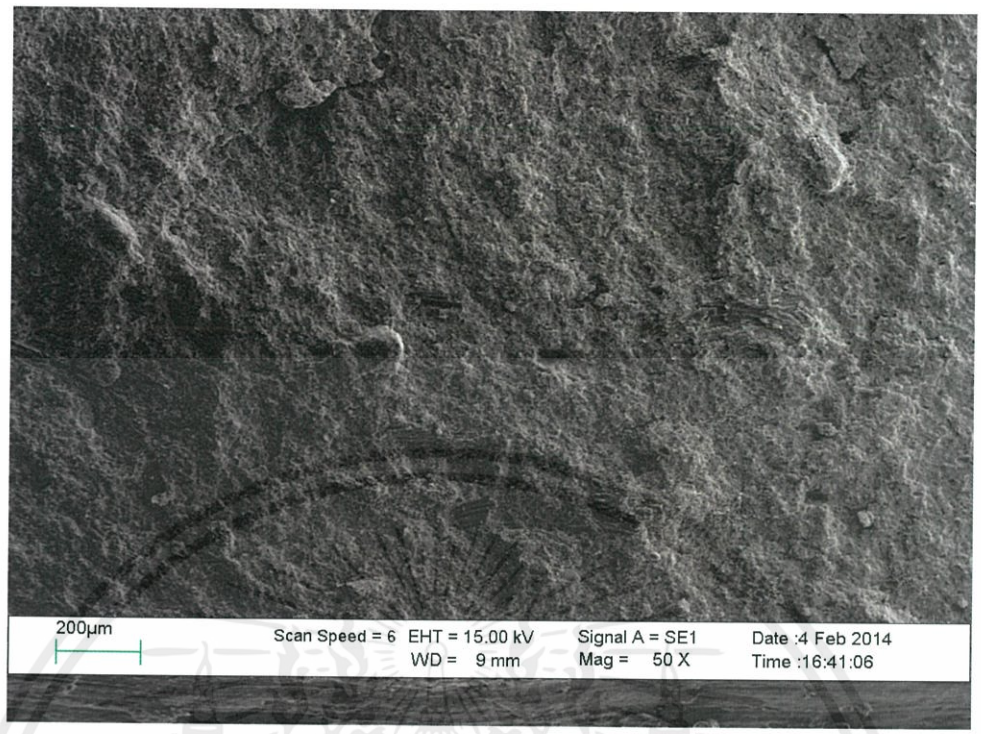


(c) กำลังขยาย 500 เท่า

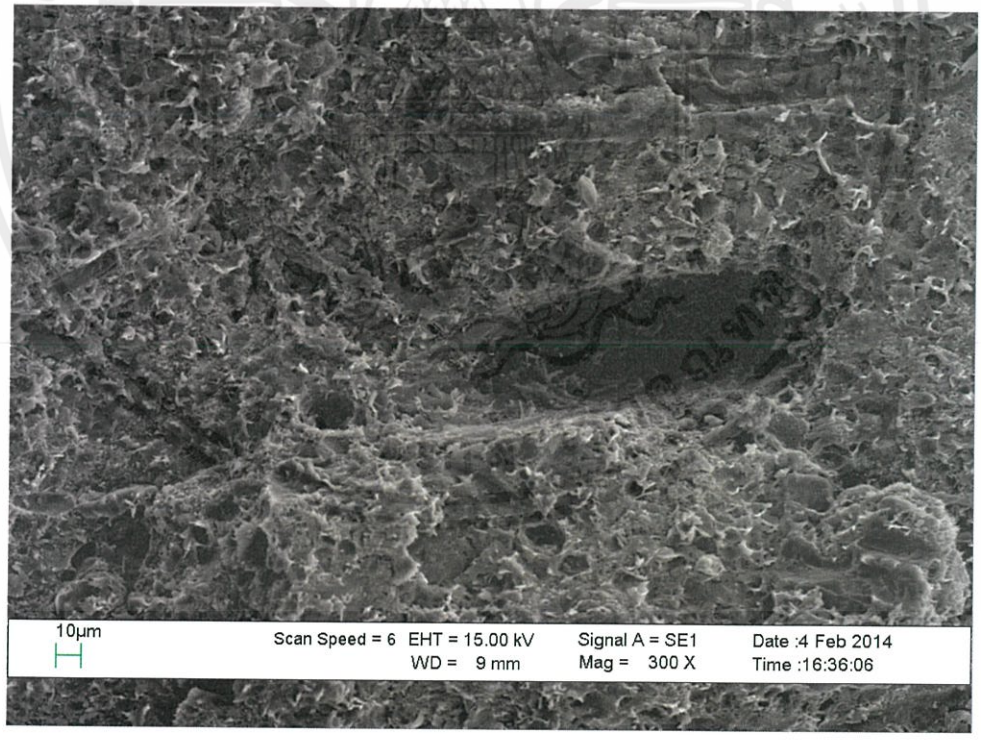
รูปที่ 4.17 ภาพ SEM ของ WPCs ที่เตรียมจาก HDPE ผสมสารหน่วงไฟระบบอินตูเมสเซนต์ (Intumescent) อัตราส่วน 0.17:0.5:1

จากรูปที่ 4.17 พบว่า เส้นใยกระจายตัวได้สม่ำเสมอในพอลิเมอร์เมทริกซ์ มีการหลุดหรือขาดของอนุภาคเส้นใยในโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตเล็กน้อย เนื่องจากการหักชิ้นงาน ไม่มีช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างพอลิเมอร์กับเส้นใย แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์และเส้นใยยึดติดกันได้ดี ส่งผลให้สมบัติเชิงกลดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

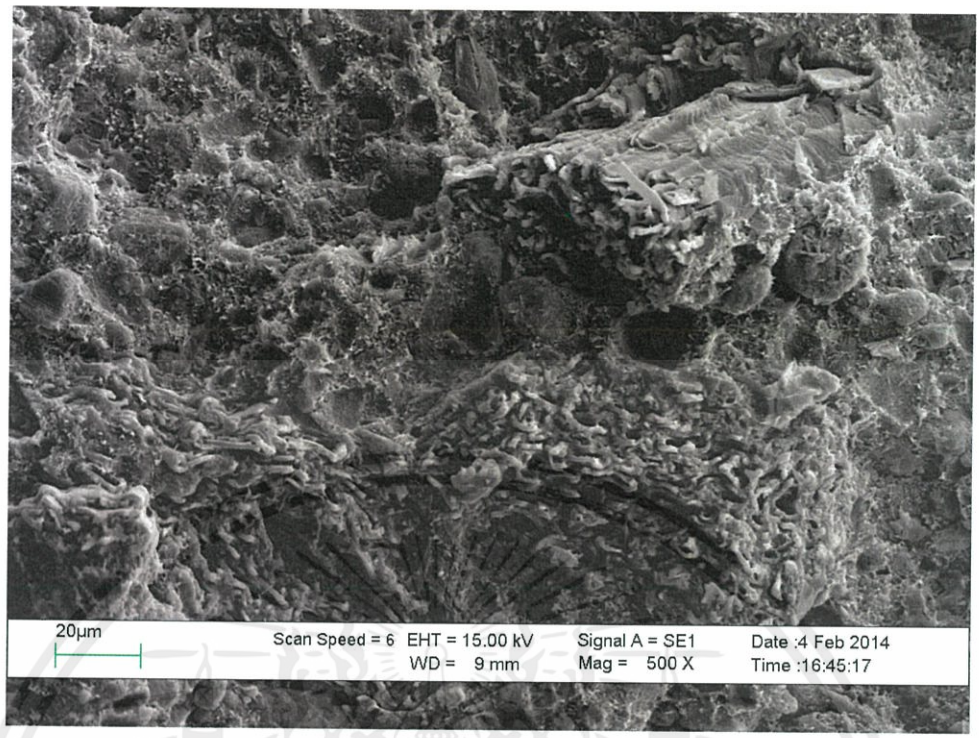


(a) กำลังขยาย 50 เท่า



(b) กำลังขยาย 300 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c) กำลังขยาย 500 เท่า

รูปที่ 4.18 ภาพ SEM ของ WPCs ที่เตรียมจาก HDPE ผสมสารหน่วงไฟระบบอินตูเมสเซนต์ (Intumescent) อัตราส่วน 1:2:1

จากรูปที่ 4.18 พบว่า เส้นใยกระจายตัวได้สม่ำเสมอในพอลิเมอร์เมทริกซ์ แต่มีปริมาณเส้นใยน้อยเมื่อเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเพราะใส่สารหน่วงไฟไปในอัตราส่วนที่มากขึ้น ทั้งยังมีช่องว่าง ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง มีการหลุดหรือขาดของอนุภาคเส้นใยในโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตเนื่องจากการหักชิ้นงาน ไม่มีช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างพอลิเมอร์กับเส้นใย แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์และเส้นใยยึดติดกันได้ดี

4.4 ศึกษาสมบัติทางความร้อน

4.4.1 ศึกษาโดยใช้เทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC)

การศึกษาสมบัติทางความร้อนโดยใช้เทคนิค DSC สามารถอธิบายสมบัติต่างๆของวัสดุคอมโพสิตได้มากมาย เช่น ค่าองศาความเป็นผลึก (Degree of crystallization ; X_c) อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิการตกผลึก (T_c) เป็นต้น ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 สมบัติทางความร้อนของไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPCs) แต่ละสูตรที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC

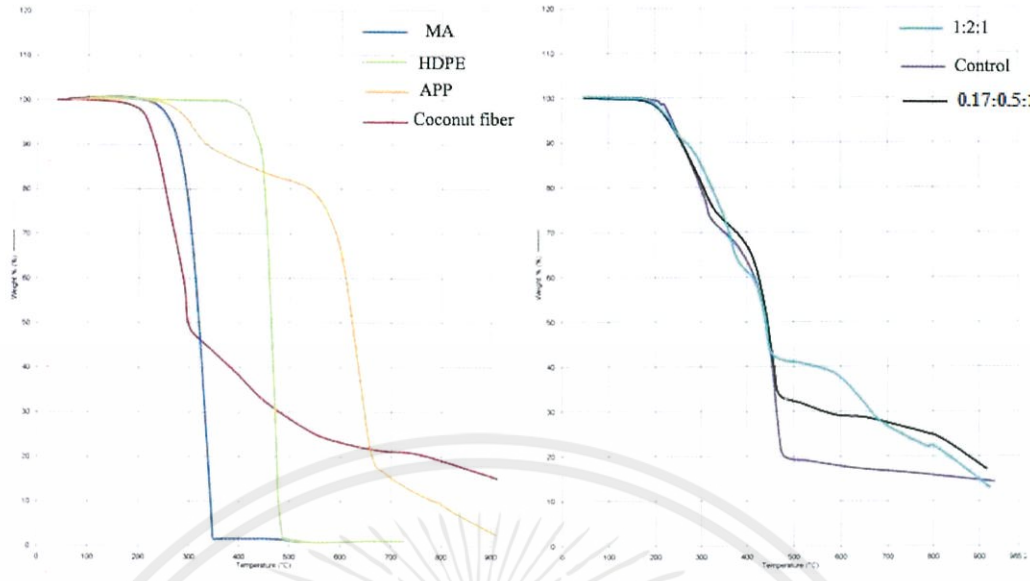
MA : APP : F	T_m (°C)	T_c (°C)	ΔH (J/g)	องศาความเป็นผลึก (%)
Control	133.0	99.8	94	69.3
0.17 : 0.5 : 1	134.9	101.1	71	68.9
1 : 2 : 1	131.3	114.2	35	63.2

อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงอุณหภูมิที่ทำให้ผลึกเกิดการหลอมเหลว จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) มีค่าไม่แตกต่างกันมาก ส่วนค่าองศาความเป็นผลึกเป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณผลึกที่เกิดขึ้น การใส่สารหน่วงไฟทำให้การเกิดผลึกลดลง ส่งผลให้ค่าองศาความเป็นผลึกลดลง และมีสมบัติเชิงกลลดลง

4.4.2 ศึกษาโดยใช้เทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)

เป็นการศึกษาหาอุณหภูมิการสลายตัวด้วยความร้อนในแต่ละองค์ประกอบของตัวอย่าง จากรูปที่ 4.19 แสดงอุณหภูมิการสลายตัว (a) HDPE, APP และ MA สลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 420 – 500 °C, 280 – 900 °C และ 250 - 350 °C ตามลำดับ ส่วน Coconut Fiber เริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 200 °C จาก (b) เปรียบเทียบอุณหภูมิการสลายตัวของไม้พลาสติกคอมโพสิตที่ใส่และไม่ใส่สารหน่วงไฟ พบว่า การใส่สารหน่วงไฟไม่มีผลต่ออุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายตัวของไม้พลาสติกคอมโพสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) (b)

รูปที่ 4.19 TGA อุณหภูมิการสลายตัวด้วยความร้อน (a) องค์ประกอบต่างๆของไม้พลาสติกคอมโพสิต (b) ไม้พลาสติกคอมโพสิตที่ใส่สารหน่วงไฟอัตราส่วนต่างๆ

4.5 ศึกษาค่า Limiting Oxygen Index (LOI)

เป็นการศึกษาหาปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนต่ำสุด (Minimum oxygen concentration) ที่ทำให้วัสดุเกิดการลุกไหม้อย่างต่อเนื่อง ภายใต้บรรยากาศที่มีการไหลของออกซิเจนและไนโตรเจนผสมกัน ตามมาตรฐาน ASTM D 2863

ตารางที่ 4.5 ค่า Limiting Oxygen Index (LOI) ของไม้พลาสติกคอมโพสิตสูตรต่างๆ

MA : APP : F	Limiting Oxygen Index (%)
HDPE	24.45
Control	19.82
1:2:1	38.17
1:0.5:1	28.32
0.17:0.5:1	27.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.5 พบว่า เมื่อใส่สารหน่วงไฟในอัตราส่วนของ MA : APP : F ที่มากขึ้น ก็จะส่งผลให้ค่า LOI เพิ่มสูงขึ้น จะเห็นว่าเมื่อทำการลด APP จาก 1:2:1 เป็น 1:0.5:1 ค่า LOI จะลดลงอย่างมาก แต่เมื่อทำการลด MA จาก 1:0.5:1 เป็น 0.17:0.5:1 ค่า LOI ลดลงเพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า APP ซึ่งเป็นสารให้กรดอนินทรีย์จะเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญที่ทำให้สารหน่วงไฟระบบอินตูเมสเซนต์ (Intumescent) สามารถหน่วงการติดไฟได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.6 วิเคราะห์ต้นทุน (Cost Analysis)

การวิเคราะห์ต้นทุนเป็นการแจกแจงถึงค่าใช้จ่ายต่างๆในการผลิตวัสดุ เพื่อใช้ในการประมาณราคาสินค้าเพื่อขาย และใช้เปรียบเทียบราคากับวัสดุที่ต้องการแข่งขัน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 วิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบในการผลิตไม้พลาสติกคอมโพสิต 1 กิโลกรัม

สมบัติต่างๆ	MA : APP : F			
	Control	**1:2:1**	**1:0.5:1**	**0.17:0.5:1**
UL - 94	ไหม้หมด	V-0	V-0	V-0
LOI (%)	19.82	38.17	28.32	27.00
Flexural Strength (MPa)	45.4	27.6	34.15	41.1
Flexural Modulus (MPa)	2243.4	3200.6	2977.8	2358.9
Density (g/cm^3)	1.0473	1.3290	1.2589	1.1754
ราคา* (บาท/กิโลกรัม)	24.2	128.3	86.7	68.0

หมายเหตุ : * ราคาวัตถุดิบ ณ เดือนมีนาคม พ.ศ. 2557

จากตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าการใส่สารหน่วงไฟส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตไม้พลาสติกคอมโพสิตเพิ่มมากขึ้น การใส่สารหน่วงไฟในปริมาณมาก จะมีประสิทธิภาพในการหน่วงการติดไฟมาก (ค่า LOI สูง) แต่มีราคาแพง เมื่อลดปริมาณสารหน่วงไฟลงอัตราส่วน 0.17:0.5:1 พบว่าเป็นการลดต้นทุนการผลิตมาก โดยที่ไม้พลาสติกคอมโพสิตยังคงมีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟดีและมีสมบัติเชิงกลดีอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 ผลสรุปที่ได้

ตอนที่ 1 เป็นการศึกษาอัตราส่วนของสารหน่วงไฟ (MA : APP : F)

- ศึกษาอิทธิพลของปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) โดยพบว่าอัตราส่วนที่ดีที่สุด คือ 1:0.3:1 ซึ่งให้ผลการลามไฟตามมาตรฐาน UL 94 แบบแนวตั้งเป็น V-0

- ศึกษาอิทธิพลของปริมาณเมลามีน (MA) โดยทำการลดปริมาณ MA จากอัตราส่วน 1:0.3:1 เป็น 0.1:0.3:1 พบว่าให้ผลการลามไฟตามมาตรฐาน UL 94 แบบแนวตั้งเป็น V-2 เนื่องมาจากมีอัตราส่วน MA : APP ที่น้อยเกินไป จึงทำการลดปริมาณ MA จากอัตราส่วน 1:0.5:1 เป็น 0.17:0.5:1 พบว่าให้ผลการลามไฟตามมาตรฐาน UL 94 แบบแนวตั้งเป็น V-0 ดังนั้นอัตราส่วนที่ดีที่สุดของ (MA : APP : F) คือ 0.17:0.5:1

เมื่อทำการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่า การใช้สารหน่วงไฟในอัตราส่วนที่น้อยลง ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น ทั้งค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural Strength) ค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact Strength) ความหนาแน่น (Density) ลดลง ทำให้มีน้ำหนักเบา นอกจากนี้ค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural Strength) และค่ามอดุลัสโค้งงอ (Flexural Modulus) ของไม้พลาสติกคอมโพสิตที่เตรียมได้ยังผ่านมาตราฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.876-2547 แผ่นชิ้นไม้อัดชนิดอัดราบ

เมื่อทำการศึกษาสมบัติการลามไฟตามมาตรฐาน UL 94 แบบแนวตั้ง ได้ผลการทดสอบเป็น V-0 คือสามารถดับไฟภายใน 10 วินาที และเมื่อทดสอบค่า Limitting Oxygen Index (LOI) ได้ค่า LOI เท่ากับ 28.0

ตอนที่ 2 เป็นศึกษาการใช้สารหน่วงไฟในรูป masterbatch

จากการทดลองพบว่าการเคลือบสารหน่วงไฟลงบนเส้นใยทั้งหมดมีความยุ่งยากในการผสม เกิดการรวมตัวกันเป็นก้อน ซึ่งส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลลดลง ดังนั้นจึงทำการเคลือบสารหน่วงไฟลงบนเส้นใยบางส่วนโดยหาอัตราส่วนปริมาณเส้นใยที่เคลือบสารหน่วงไฟ : ปริมาณเส้นใยที่ไม่เคลือบสารหน่วงไฟ (Coated : Uncoated Fiber Ratios) โดยทำการทดลองในอัตราส่วน 100:0,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

75:25, 50:50 และ 25:75 พบว่าในทุกๆอัตราส่วนให้ผลการลามไฟตามมาตรฐาน UL 94 แบบแนวตั้งเป็น V-0 และมีสมบัติเชิงกล ทั้งค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural Strength) ค่ามอดุลัสโค้งงอ (Flexural Modulus) ค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact Strength) รวมทั้งความหนาแน่น (Density) ที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสามารถใช้สารหน่วงไฟในรูป masterbatch ได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ศึกษาสมบัติของไม้พลาสติกคอมโพสิตที่เตรียมได้เพิ่มเติม เช่น อายุการใช้งาน ความทนทานต่อดินฟ้าอากาศ การดูดน้ำ ความต้านทานการยึดติดของตะปูเกลียว ความทนทานต่อแมลง เช่น ปลวก มอด เป็นต้น

- ศึกษาการเตรียมและสมบัติไม้พลาสติกคอมโพสิตที่เตรียมจากพอลิเมอร์เหลือใช้ชนิดอื่น

- ปรับปรุงสมบัติของไม้พลาสติกคอมโพสิตที่มีน้ำหนักมาก ให้มีน้ำหนักลดลง เบา

- เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้ R 10 เป็นสารช่วยกระบวนการผลิต (processing aid) ส่งผลให้ไม้เทียมที่เตรียมได้มีกลิ่นเหม็น จึงควรเลือกใช้สารช่วยกระบวนการผลิตชนิดอื่น

- ศึกษาอิทธิพลของปริมาณเมลามีน (MA) เพิ่มเติม จากอัตราส่วนของ MA : APP : F เป็น 0.1:0.5:1 ซึ่งได้ผลการลามไฟตามมาตรฐาน UL – 94 เป็น V-0 โดยทำศึกษาผลของการเพิ่ม MA เป็น 0.2, 0.3, 0.4, … เพื่อให้ทราบอัตราส่วนที่มีปริมาณ MA ที่สามารถหน่วงการติดไฟได้อย่างมีประสิทธิภาพ (ได้ผลการลามไฟเป็น V-0)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] เกียรติศักดิ์ จันทร์น้อย และคณะ.“**การพัฒนาไม้พลาสติกคอมโพสิตสูตรหน่วงการติดไฟจากพอลิพรอพิลีนและเส้นใยมะพร้าว.**” โครงงานพิเศษ วิทยาศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2552.

[2] **Wood Plastic Composites.** [Online]. Available : http://thai.alibaba.com/product-gs/146x22mm-outdoor-wpc-decking-composite-deck-floor-974091657.html

[3] สุภาสินี ลิมปานุภาพ ซีท. **คอมโพสิต**. ขอนแก่น. เอกสารประกอบการสอน:ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

[4] **องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้** [Online]. Available : http://www.buranapagroup.com/knowledge_chemical.php

[5] วรธรรม อุ่นจิตติชัย. **อุตสาหกรรมไม้และวัสดุทดแทนไม้**. กรุงเทพฯ. เอกสารประกอบการสอน:คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[6] **มะพร้าว** [Online]. Available : http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%A1%E0%B8%B0%E0%B8%9E%E0%B8%A3%E0%B9%89%E0%B8%B2%E0%B8%A7

[7] ดรรชนี พัทธวรากร. **เทคโนโลยีสิ่งทอ**. เชียงใหม่. เอกสารประกอบการสอน:ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

[8] **เส้นใยมะพร้าว** [Online]. Available : http://www.ngcoconutfiber.com/product_coconutfiber.html#.UlkSGfngQQV

[9] **มะพร้าว** [Online].Available : http://manufoods.blogspot.com/2012/05/blog-post_25.html

[10] กนกอร แสงสุวรรณ.“**วัสดุทดแทนไม้พอลิเมอร์คอมโพสิตจากพอลิโอเลฟินและเยื่อเชิงกลจากมะพร้าว.**” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2552.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[11] **ประโยชน์ของใยมะพร้าว** [Online].Available :
http://pakavat.blogspot.com/2012/08/blog-post_7305.html

[12] นิลุบล เผือกบัวขาว.“**สมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปใหม่โดยมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารเติมแต่ง.**” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2550.

[13] W. Martienssen and H. Warlimont. **Springer Handbook of Condensed Matter and Materials Data**.Springer.Berlin, 2005.

[14] **พอลิเอทิลีน** [Online]. Available :
http://www.ptonline.com/columns/density-molecular-weight-in-polyethylene

[15] **สารเติมแต่ง** [Online]. Available :
http://www.plasticmart.co.th/images/1176038014/Additive.pdf

[16] M. Chanda and S.K. Roy. **Plastics Technology Handbook**. 4th ed. CRC Press, 2006

[17] **สารช่วยกระบวนการผลิต** [Online]. Available :
http://www.thaiglossary.org/groups/rt/browse/published/search/P/prefix

[18] **การเผาไหม้ของวัสดุ** [Online]. Available :
http://www.thaitextile.org/lab/content.php?id=ARC0121019172929&lang=th

[19] **Fire Triangle** [Online]. Available :
http://www.firesafetyinfo.co.uk/fire-triangle/

[20] **Intumescent Flame Retardant** [Online]. Available :
http://upetd.up.ac.za/thesis/submitted/etd-01122007-112752/unrestricted/06chapter6.pdf

[21] **Intumescent Flame Retardant System** [Online]. Available :
http://www.flameretardants-online.com/web/en/106/110.htm

[22] N. M. Stark, R. H. White, S. A. Mueller and T. A. Osswald.“Evaluation of various fire retardants for use in wood flour polyethylene composite.” **Polymer Degradation and Stability**. 95 (2010) 1903-1910.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[23] Q. Zhang and Y. Chen."Synergistic effects of ammonium polyphosphate/melamine intumescent system with macromolecular char former in flame-retardants polyoxymethylene." **Journal of Polymer Research**. 18 (2011) 293-303.

[24] R. Jeencham, N. Suppakarn and K. Jarukumjorn."Effect of Flame Retardants on Flame Retardant, Mechanical, and Thermal Properties of Sisal Fiber/Polypropylene Composites." **Composites Part B: Engineering**. 56 (2014) 249-253.

[25] W.K. Patrick Lima, M. Mariattia, W.S. Chowa and K.T. Marb."Effect of intumescent ammonium polyphosphate (APP) and melamine cyanurate (MC) on the properties of epoxy/glass fiber composites " **Composites Part B: Engineering**. 43 (2012) 124-128.

[26] J. Jyongsikand L. Eungki."Improvement of the flame retardancy of paper sludge/polypropylene composite." **Polymer Testing**. 20 (2000) 7–13.

[27] **Limited Oxygen Index** [Online]. Available : http://www.rutlandplastics.co.uk/materials_datasheets_flammability2.shtml

[28] ศิริรัตน์ เตชะเพิ่มผล. **พอลิเมอร์คอมโพสิตด้วยเส้นใยจากมะพร้าว**. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2550.

[29] **การทดสอบสมบัติเชิงกล** [Online]. Available : http://www.sci.buu.ac.th/~chemistry/staff/thanida/Polymer_Chemistry/image_files/chapter5_3.html

[30] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. **Polymer Characterization and Analysis**. กรุงเทพฯ. เอกสารประกอบการสอน : คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

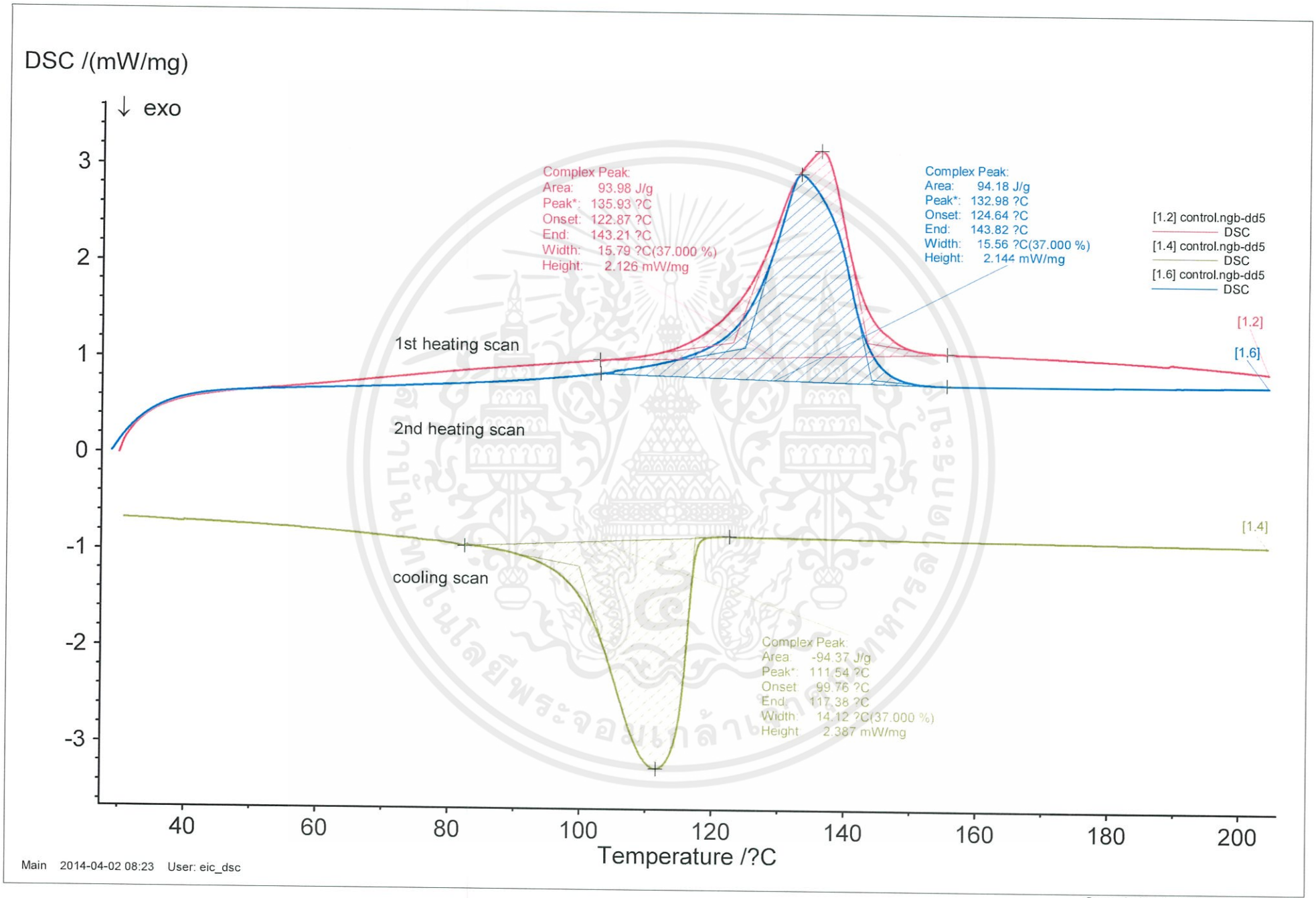
[31] **กล้องจุลทรรศน์ใช้แสงแบบพกพา** [Online]. Available : https://sites.google.com/site/betterscienceinstrumentcoltd/roll-hardness-tester/vitiny-digital-portable-microscope

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

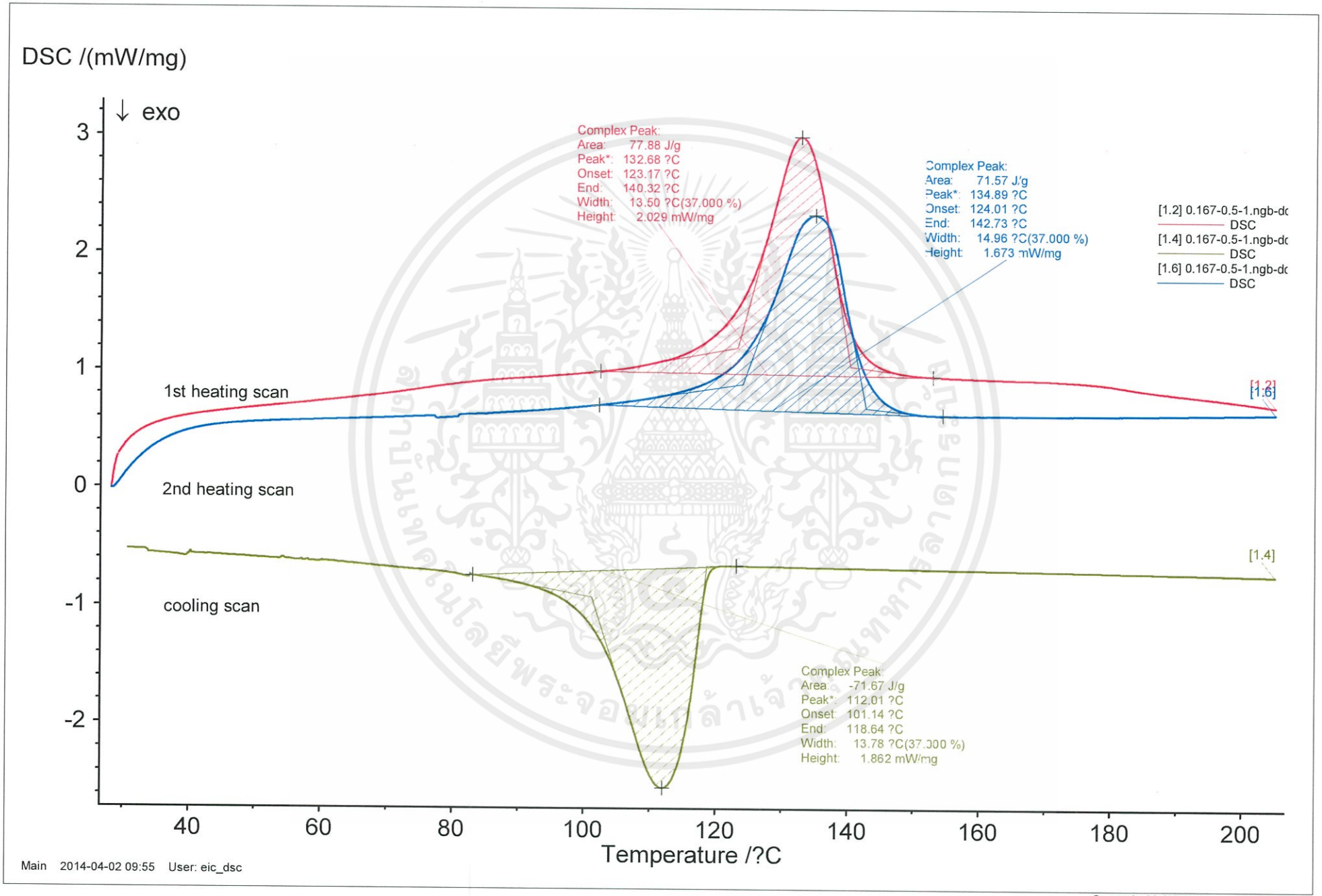
ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนจากเครื่อง DSC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



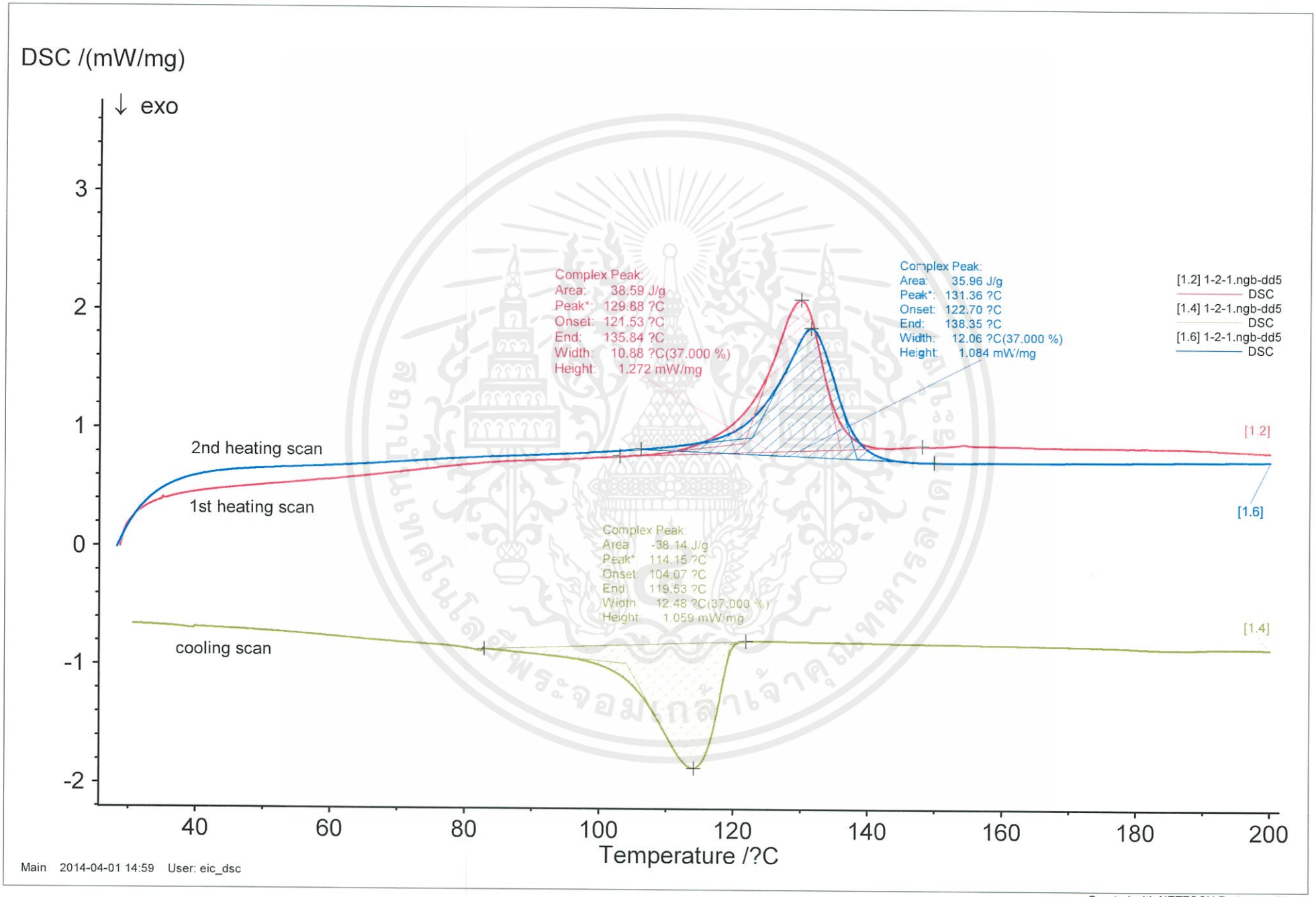
รูปที่ ก-1 กราฟจากเครื่อง DSC ของ WPCs ที่ไม่ใส่สารหน่วงไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



รูปที่ ก-2 กราฟจากเครื่อง DSC ของ WPCs ที่ใส่สารหน่วงไฟในอัตราส่วน 0.17:0.5:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



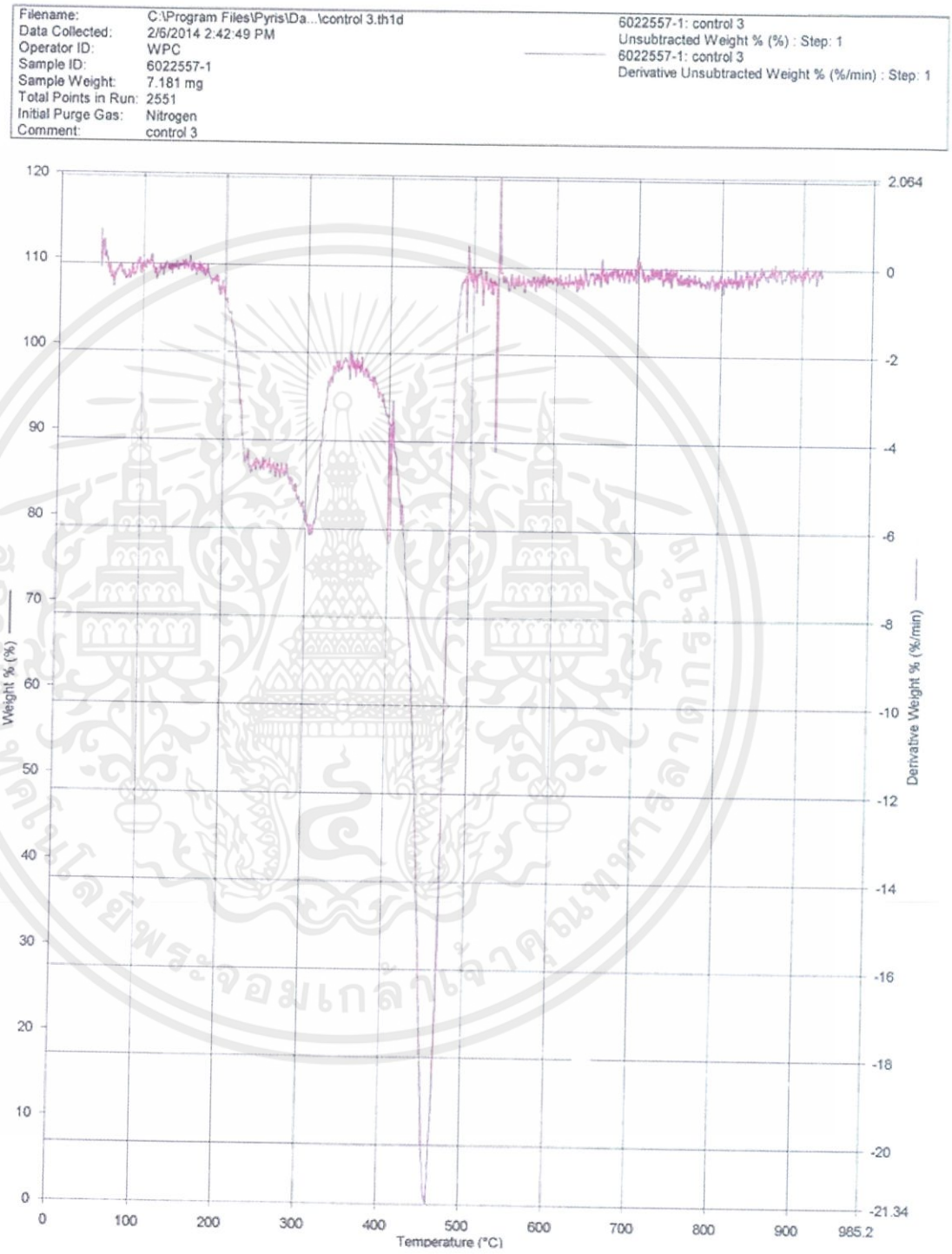
รูปที่ ก-3 กราฟจากเครื่อง DSC ของ WPCs ที่ใส่สารหน่วงไฟในอัตราส่วน 1:2:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ภาคผนวก ข

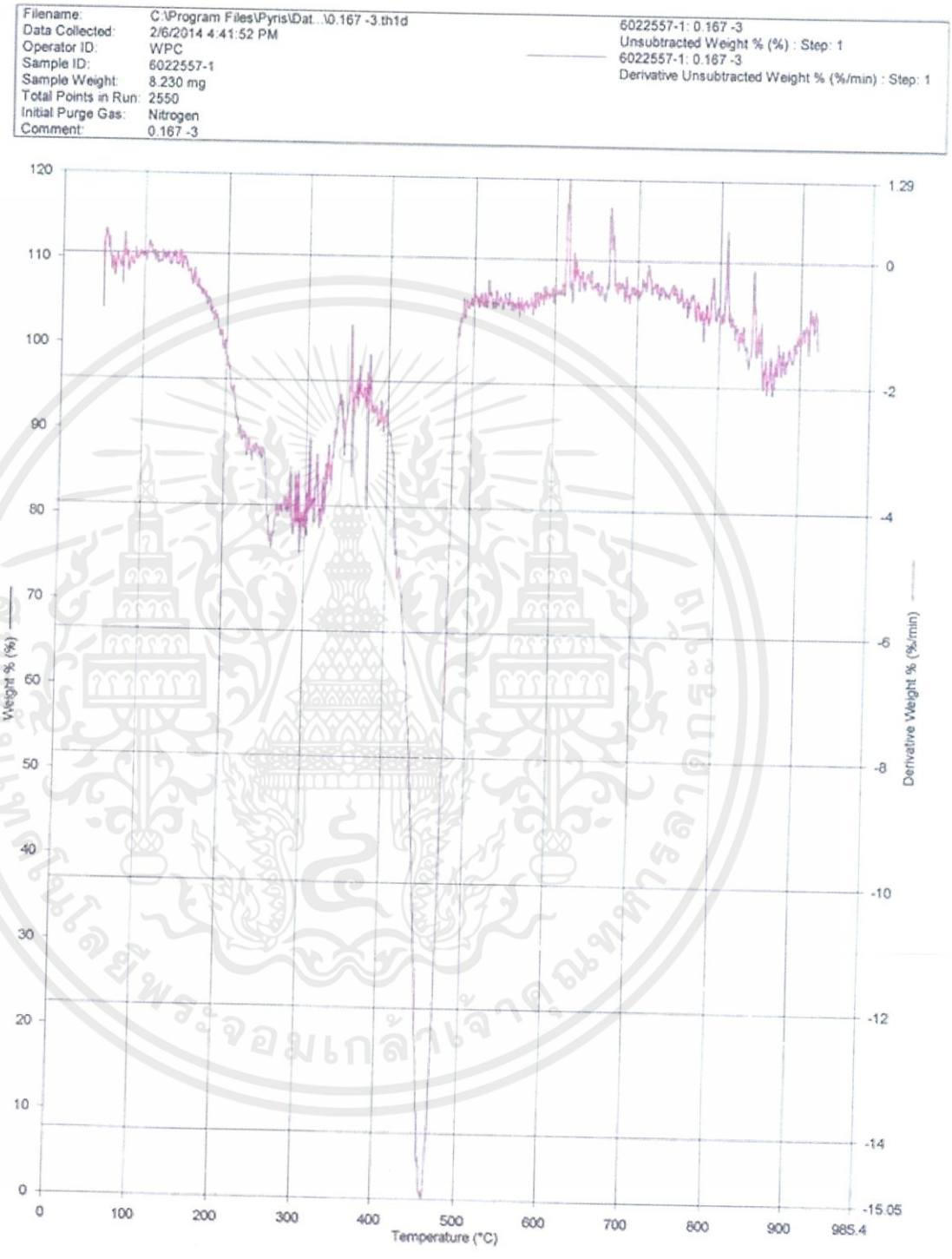
ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนจากเครื่อง TGA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



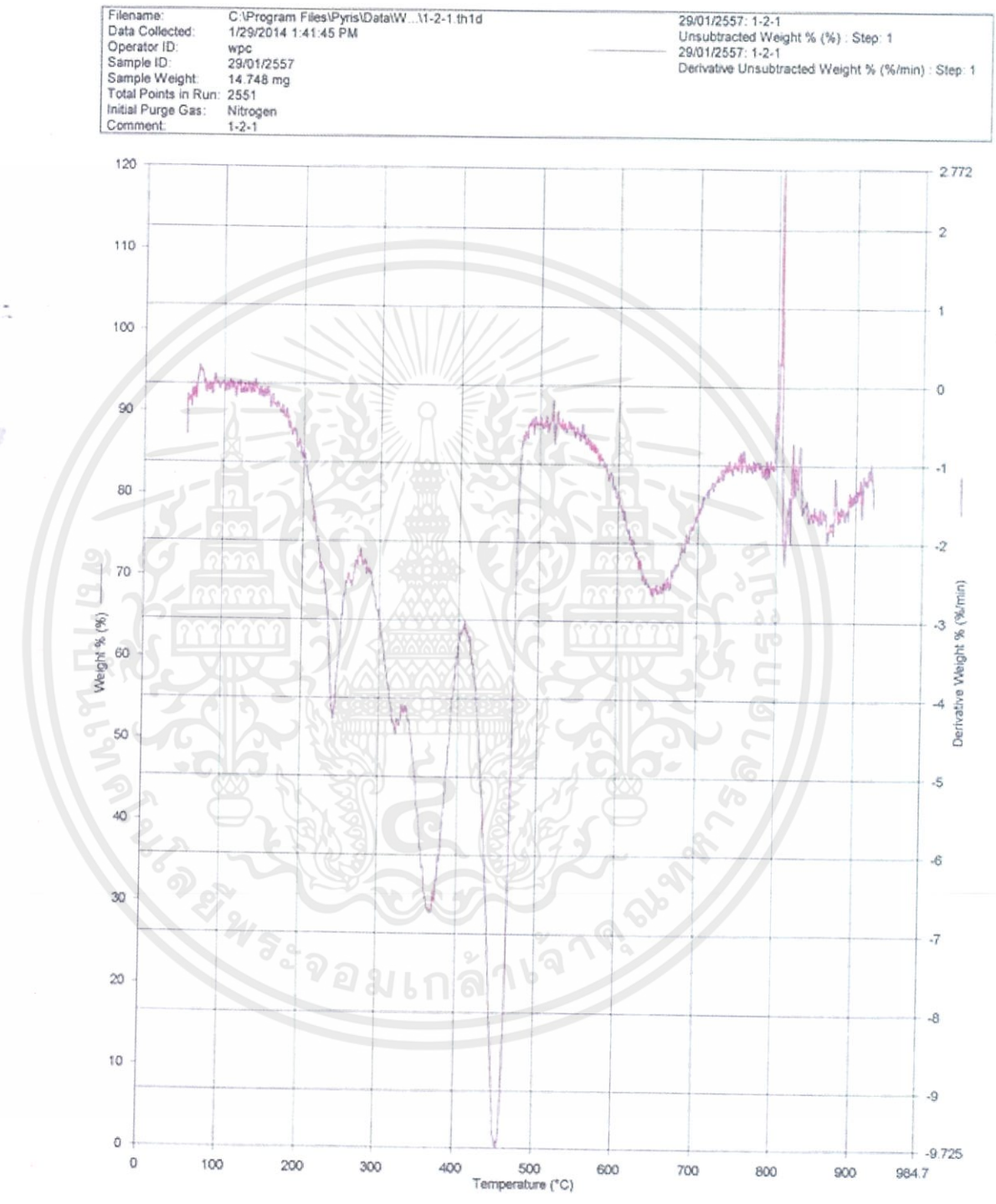
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ข-1 กราฟจากเครื่อง TGA ของ WPCs ที่ไม่ใส่สารหน่วงไฟ



รูปที่ ข-2 กราฟจากเครื่อง TGA ของ WPCs ที่ใส่สารหน่วงไฟในอัตราส่วน 0.17:0.5:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของผลงานทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ข-3 กราฟจากเครื่อง TGA ของ WPCs ที่ใส่สารหน่วงไฟในอัตราส่วน 1:2:1

ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบ LOI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

111/1 MU 2, TUMBOL MAKHAMKU, AMPHUR NIKOMPATTANA, RAYONG, THAILAND 21180.
TEL: 66-3889-3599-610 (Ext. 2507), 089-8348243 FAX: 66-3889-3599-610 (Ext. 2507) E-mail: Sales@eic.co.th

TEST REPORT

Report No.	T10-0331
Customer / Applicant : Name	WPC Design Co.,Ltd
Customer / Applicant : Address	121/168 Soi Thanasit Moo. 11, Teparak Rd T. Bangpla A. Bangphlee, Samutprakarn 10540
Sample name	1. HDPE 2. Control 3. 0.167 : 0.5 : 1 4. 1 : 0.5 : 1 5. 1 : 2 : 1
Sample description	Composite material
Test standard	ASTM D 2863 (Test method A)
Test condition	1. Specimen size: 100 x 10 mm, thickness 4.0 ± 0.25 mm. 2. Specimen type I and gas measurement type A 3. The specimens are mark drawn across the width 50 mm. 4. Atmosphere of 24.6 °C and 53.2 %RH.
Measurement equipment name	LOI set
Sample received date	February 20, 2014
Testing date/period	February 28 – March 4, 2014
Test results	Details of test report show on next pages.

Examined by .....

(Amnat Srisa-ad)

Engineer 3

10/03/2014

Approved by .....

(Pachareeya Suriyachai)

The Deputy of Manager

10/03/2014

Reported by Nittaya Toeyla

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายงานนี้รับรองผลเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ได้ทดสอบเท่านั้น ห้ามคัดถ่ายรายงานผลการทดสอบแต่เพียงบางส่วนโดยไม่ได้รับอนุญาตจากบริษัท อีพีจี อินโนเวชัน เซ็นเตอร์ จำกัด
This report is certified only on the sample tested. This report shall not be reproduced except in full, without approval of EPG Innovation Center Co., Ltd.

111/1 MU 2, TUMBOL MAKHAMKU, AMPHUR NIKOMPATTANA, RAYONG, THAILAND 21180.
TEL: 66-3889-3599-610 (Ext. 2507), 089-8348243 FAX: 66-3889-3599-610 (Ext. 2507) E-mail: Sales@eic.co.th

Test Report No. T10-0331

Test results

No.	Sample name	Oxygen Index (%)
1	HDPE	24.45
2	Control	19.82
3	0.167 : 0.5 : 1	27.00
4	1 : 0.5 : 1	28.32
5	1 : 2 : 1	38.17

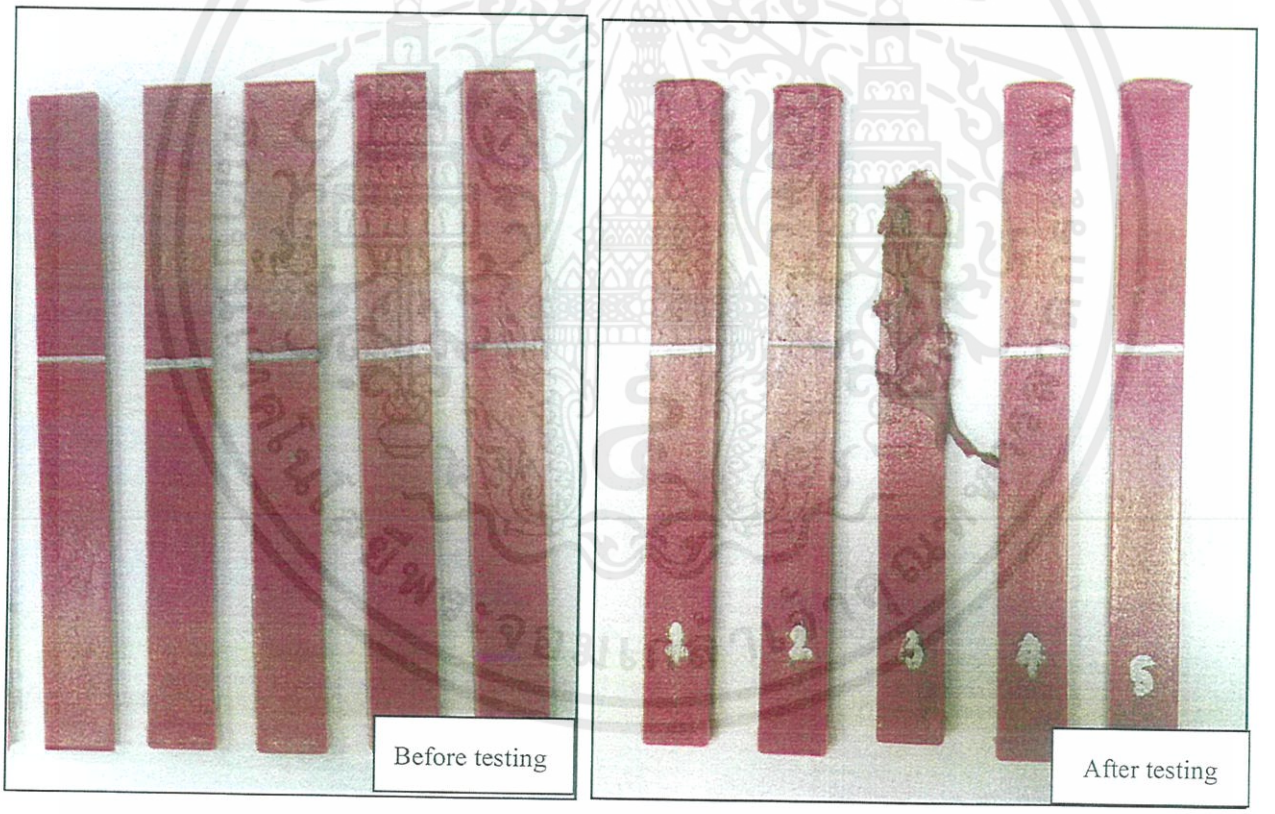


Figure 1 The appearance of HDPE sample.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

111/1 MU 2, TUMBOL MAKHAMKU, AMPHUR NIKOMPATTANA, RAYONG, THAILAND 21180.
TEL: 66-3889-3599-610 (Ext. 2507), 089-8348243 FAX: 66-3889-3599-610 (Ext. 2507) E-mail: Sales@eic.co.th

Test Report No. T10-0331

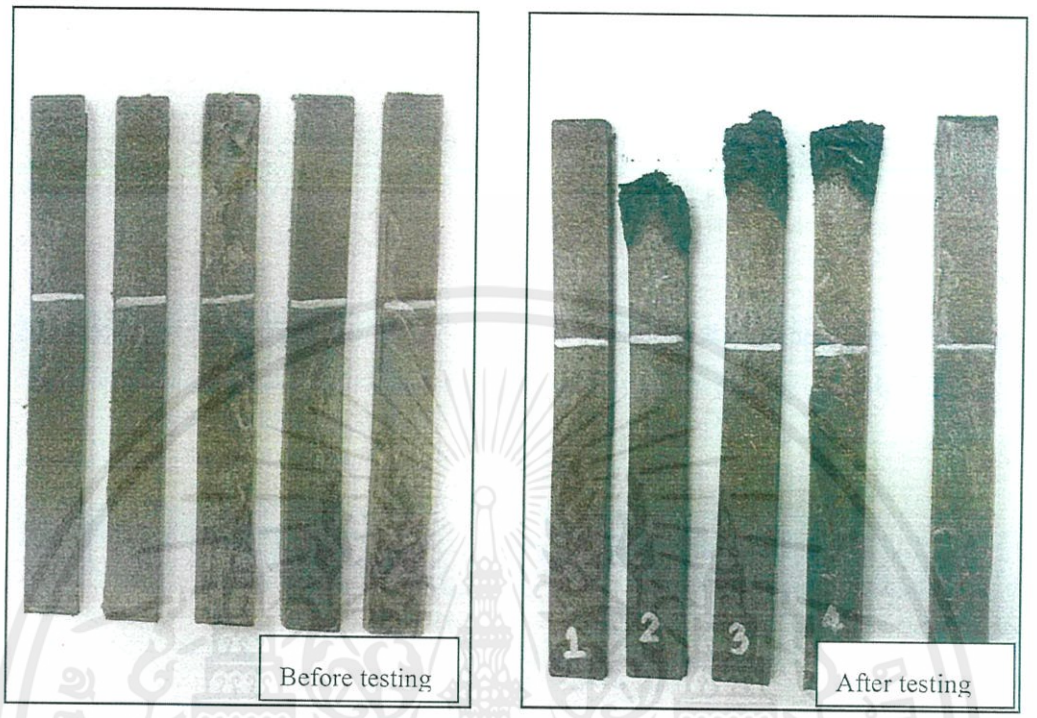
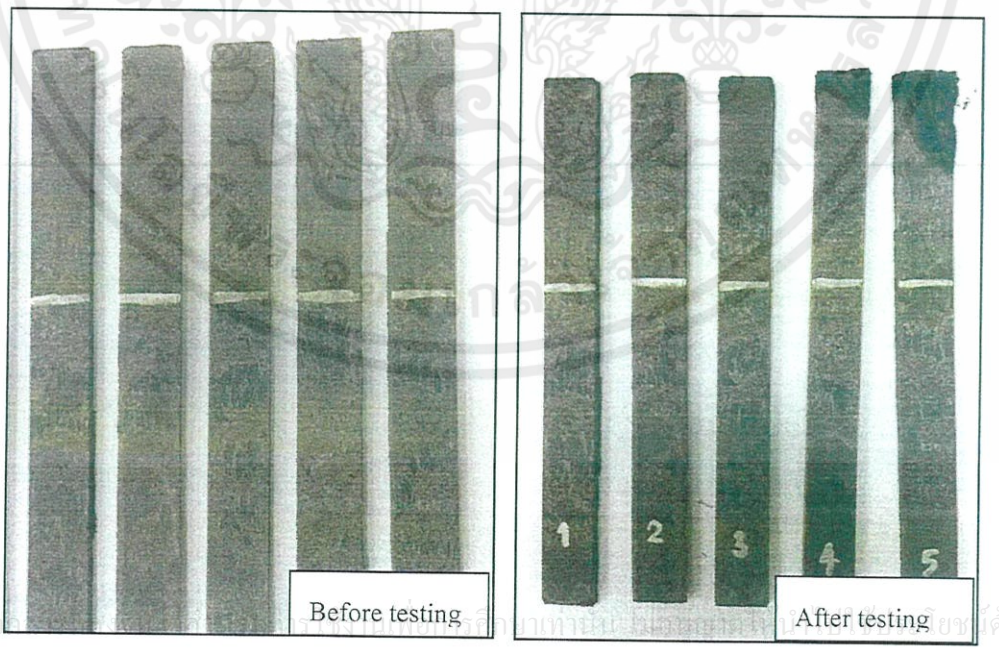


Figure 2 The appearance of Control sample.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 3 The appearance of 0.167 : 0.5 : 1 sample.

รายงานนี้รับรองผลเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ได้ทดสอบเท่านั้น ห้ามคัดถ่ายรายงานผลการทดสอบแต่เพียงบางส่วนโดยไม่ได้รับอนุญาตจากบริษัท อีพีจี อินโนเวชั่น เซ็นเตอร์ จำกัด
This report is certified only on the sample tested. This report shall not be reproduced except in full, without approval of EPG Innovation Center Co., Ltd.

Test Report No. T10-0331

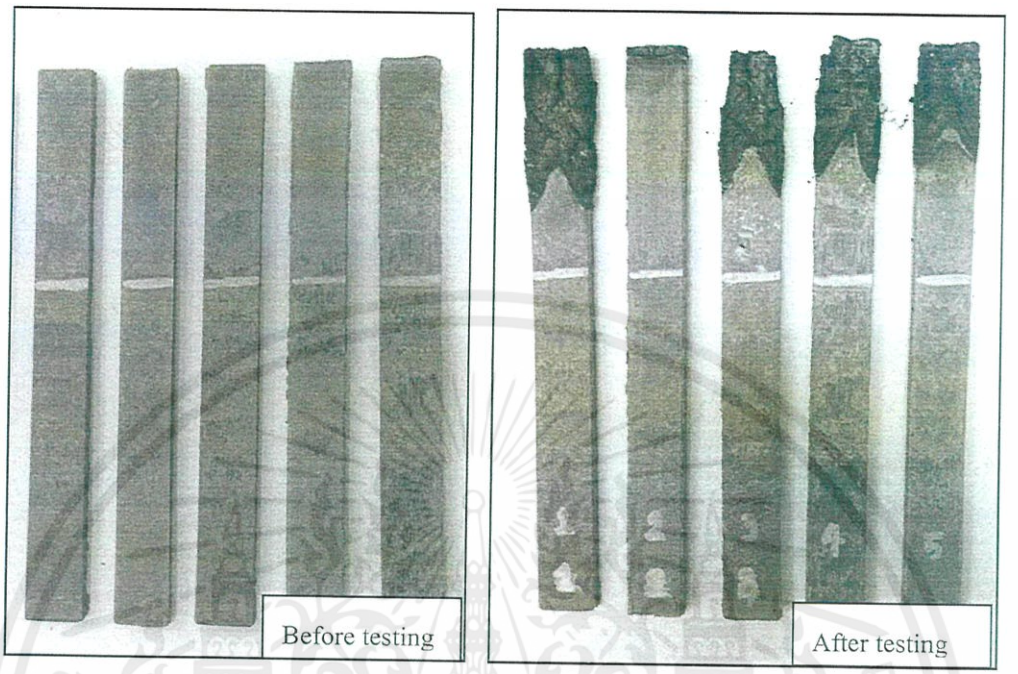


Figure 4 The appearance of 1 : 0.5 : 1 sample.

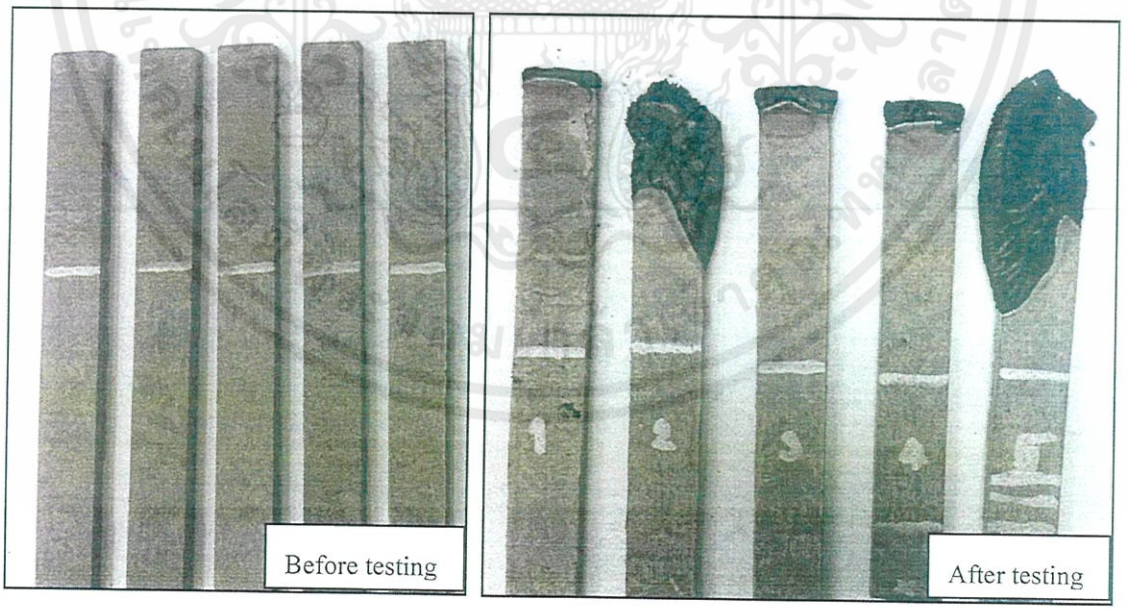


Figure 5 The appearance of 1: 2 : 1 sample.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Test Report No. T10-0331

Appendix A

Table 1A The properties of HDPE sample

Test item	Number of specimen				
	1	2	3	4	5
Test specimens Thickness (mm)	3.3	3.2	3.3	3.2	3.3
Burning period (sec)	5	5	>180	5	5
Length burnt (mm)	0	0	>50	0	0
Oxygen concentration (%)	23	24	24.5	24.3	24.4
Responses the measurement*	O	O	X	O	O
Final value of oxygen concentration: Cf (%)	24.4				
The interval: d (%)	0.1=(24.5-24.4)				
k value**	0.50				
Oxygen Index: OI (%)* **	**24.45**				

*__Note__ O- neither the period or extent of burning exceeds, X- the period or extent of burning exceeds (Burning period not over 180 sec and extent of burning not over 50 mm.)

**__Note__ k value refer form Table 2 as ASTM D2863

***__Note__ Oxygen Index = Cf + kd

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริษัท อีพีจี อินโนเวชั่น เซ็นเตอร์ จำกัด
东方集团创新中心有限公司
EPG INNOVATION CENTER CO., LTD.
TESTING LABORATORY OF EPG INNOVATION CENTER COMPANY LIMITED
111/1 MU 2, TUMBOL MAKHAMKU, AMPHUR NIKOMPATTANA, RAYONG, THAILAND 21180.
TEL: 66-3889-3599-610 (Ext. 2507), 089-8348243 FAX: 66-3889-3599-610 (Ext. 2507) E-mail: Sales@eic.co.th

Test Report No. T10-0331

Table 2A The properties of Control sample

Test item	Number of specimen				
	1	2	3	4	5
Test specimens Thickness (mm)	4.0	4.0	4.0	4.0	4.1
Burning period (sec)	5	>180	>180	>180	5
Length burnt (mm)	0	32	22.5	19	0
Oxygen concentration (%)	20	22	21	20.5	20.2
Responses the measurement*	O	X	X	X	O
Final value of oxygen concentration: Cf (%)	20.2				
The interval: d (%)	0.3=(20.5-20.2)				
k value**	-1.25				
Oxygen Index: OI (%)*	**19.82**				

***Note** O- neither the period or extent of burning exceeds, X- the period or extent of burning exceeds (Burning period not over 180 sec and extent of burning not over 50 mm.)

****Note** k value refer form Table 2 as ASTM D2863

*****Note** Oxygen Index = Cf + kd

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายงานนี้รับรองผลเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ได้ทดสอบเท่านั้น ห้ามคัดถ่ายรายงานผลการทดสอบแต่เพียงบางส่วนโดยไม่ได้รับอนุญาตจากบริษัท อีพีจี อินโนเวชั่น เซ็นเตอร์ จำกัด
This report is certified only on the sample tested. This report shall not be reproduced except in full, without approval of EPG Innovation Center Co., Ltd.

Test Report No. T10-0331

Table 3A The properties of 0.167 : 0.5 : 1 sample

Test item	Number of specimen				
	1	2	3	4	5
Test specimens Thickness (mm)	3.7	3.7	3.8	3.7	3.8
Burning period (sec)	5	5	36	99	>180
Length burnt (mm)	0	0	3.6	11	24.3
Oxygen concentration (%)	20	22	25	25.5	26.0
Responses the measurement*	O	O	O	O	X
Final value of oxygen concentration: Cf (%)	26.0				
The interval: d (%)	0.5=(25.5-26.0)				
k value**	2.01				
Oxygen Index: OI (%)* **	**27.00**				

Note O- neither the period or extent of burning exceeds, X- the period or extent of burning exceeds (Burning period not over 180 sec and extent of burning not over 50 mm.)

***Note** k value refer form Table 2 as ASTM D2863

****Note** Oxygen Index = Cf + kd

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Test Report No. T10-0331

Table 4A The properties of 1 : 0.5 : 1 sample

Test item	Number of specimen				
	1	2	3	4	5
Test specimens Thickness (mm)	3.9	4.2	4.0	3.8	3.9
Burning period (sec)	>180	104	>180	>180	>180
Length burnt (mm)	32.4	3.7	32.7	28.9	24.8
Oxygen concentration (%)	30	28	29	28.5	28.2
Responses the measurement*	X	O	X	X	X
Final value of oxygen concentration: Cf (%)	28.2				
The interval: d (%)	0.2=(28.2-28.0)				
k value**	0.61				
Oxygen Index: OI (%)*	**28.32**				

***Note** O- neither the period or extent of burning exceeds, X- the period or extent of burning exceeds (Burning period not over 180 sec and extent of burning not over 50 mm.)

****Note** k value refer form Table 2 as ASTM D2863

*****Note** Oxygen Index = Cf + kd

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Test Report No. T10-0331

Table 5A The properties of 1 : 2 : 1 sample

Test item	Number of specimen				
	1	2	3	4	5
Test specimens Thickness (mm)	4.0	3.8	3.9	4.1	3.8
Burning period (sec)	29	>180	33	37	>180
Length burnt (mm)	4.5	33.4	5.1	5.8	39.6
Oxygen concentration (%)	35	38	37	37.5	37.8
Responses the measurement*	O	X	O	O	X
Final value of oxygen concentration: Cf (%)	37.8				
The interval: d (%)	0.3=(37.8-37.5)				
k value**	1.25				
Oxygen Index: OI (%)* **	**38.17**				

Note O- neither the period or extent of burning exceeds, X- the period or extent of burning exceeds (Burning period not ver 180 sec and extent of burning not over 50 mm.)

***Note** k value refer form Table 2 as ASTM D2863

****Note** Oxygen Index = Cf + kd

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

Datasheet ของสารเติมแต่งต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample Name	Properties	Standard Method	RESULTS	Unit
HDPE Red (Thai)	1. Izod Impact Strength	ASTM D256	5.45	(kJ/m^2)
	2. Tensile Strength	ASTM D638	22.6	MPa
	3. Elongation at break	ASTM D638	19	%
	4. Young's modulus	ASTM D638	552	MPa
	5. Flexural Strength	ASTM D 790	28.4	MPa
	6. Flexural Modulus	ASTM D 790	1100	MPa
	7. Density	ASTM 792	0.83	g/cm^3
	8. Melt Flow Index	ASTM D 1238	5.65	g/10min
	9. Hardness Shore D	ASTM D2240	50.7	-

รูปที่ ง-1 ข้อมูลเม็ดพลาสติก HDPE เกรดรีไซเคิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MATERIAL SAFETY DATA SHEET

I. IDENTIFICATION OF PRODUCT

CHEMICAL NAME: Melamine
MOLECULAR FORMULA: C3H6N6
MOLECULAR WEIGHT: 126.13
CAS NO. 108-78-1

II. PHYSICAL / CHEMICAL DATA

A. APPEARANCE: Fine, white powder
B. SPECIFICATION:

Melamine:	99.8% min.
Moisture:	0.1% max.
Ash:	0.03% max.
Turbidity(Kaolin):	20max.
Color(APHA)	20max.
pH value:	7.5--9.5

C. Packing: 25/500/1000kg p.p. woven bag with p.e. inner bag.

III. FIRE AND EXPLOSION HAZARD DATA

A. FLAMMABILITY: Can't be run on powders.
B. FIRE-FIGHTING METHOD: Water fog.
C. THERMAL DECOMPOSITION: Pyrolysis can form toxic materials: carbon dioxide, carbon monoxide, hydrogen cyanide.
D. SPECIAL FIRE-FIGHTING: Self-contained breathing apparatus with a full facepiece operated.

IV. HEALTH HAZARD DATA

A. EFFECTS OF OVER EXPOSURE: May cause irritation of eyes, skin, nasal and respiratory passages; may cause gastrointestinal irritation if swallowed.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C. FIRST-AID PROCEDURES:

1. Eye Contact: Flush with water lifting eyelids occasionally.

2. Skin contact: Flush with soap and water.

3.Internal Ingestion: Gave two glasses of water; induce vomiting by ipecac syrup or by placing finger in back of throat. Call a physician.

4.If inhaled: Remove individual to fresh air.

V. PROTECTIVE EQUIPMENT

A. VENTILATION: Provide sufficient mechanical ventilation to maintain exposure below levels of overexposure.

B. PROTECTIVE GLOVES: Wear resistant gloves.

C. PROTECTIVE EQUIPMENT: Normal work clothing covering arms and legs.

REACTIVITY DATA

A. HAZARDOUS POLYMERIZATION: Can't occur.

B. STABILITY: Stable

C. INCOMPATIBILITY: Avoid contact with strong acids.

VI. ENVIRONMENTAL DATA

A. HAZARD CLASS: Non-hazardous

The information contained herein is correct to the best of our knowledge. The recommendations or suggestions contained in this bulletin are made without guarantee or representation as to results. We suggest that you evaluate these recommendations and suggestions in your own laboratory prior to use.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Chemtura

Technical Information
www.chemtura.com
Effective: 09.10.2008

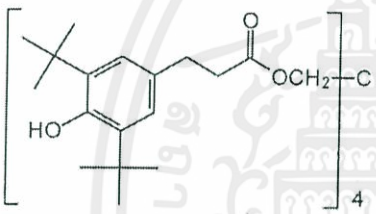
Anox® 20

Phenolic Antioxidant

Anox 20 is a high molecular weight hindered phenolic antioxidant that provides very low volatility and excellent resistance to extraction from polymer compounds.

Chemical Structure

Tetrakismethylene (3,5-di-t-butyl-4-hydroxyhydrocinnamate) methane
CAS Reg. Number: 6683-19-8
EINECS-Number: 229-722-6



Typical Physical Properties of Anox 20

Appearance	White, free-flowing solid
Bulk density [kg/m³]	Powder 650 / Granular 570
Molecular weight	1178
Melting range, °C	110 – 125
Flash point, °C	299

Thermogravimetric Analysis (10 mg @ 10°C/minute under N_2)

Weight Loss, %	5	10	25
Temperature, °C	350	365	387

Solubility @ 25°C (g/100g solvent)

Water	<0.1	Acetone	75
Benzene	>100	Chloroform	>100
Methanol	<0.1	*n*-Hexane	<0.1
Ethyl Acetate	66	Toluene	50

Application

Anox 20 is particularly effective against polymer degradation during long-term aging. It is also very effective as a process stabilizer. **Anox 20** exhibits good resistance to discoloration at the high temperatures that are encountered in thermoplastic polymer processing.

Food Contact

This compound has broad food contact approvals; for details please contact Chemtura, Regulatory Affairs Polymer Additives.

Storage and Handling

The use of proper protective equipment is recommended. Excess exposure to the product should be avoided. Wash thoroughly after handling. Store the product in a cool, dry, well-ventilated area away from incompatible materials. Unless stated, proper storage will permit usage of the product for 3 years from the date of receipt.

For additional handling and toxicological information, consult the Chemtura Material Safety Data Sheet.

The information contained herein relates to a specific Chemtura product and its use, and is based on information available as of the date hereof. Additional information relating to the product can be obtained from the pertinent Material Safety Data Sheets. Nothing in this Technical Data Sheet shall be construed to modify any of Chemtura standard terms and conditions of sale under which the product is sold by Chemtura. NOTHING IN THIS TECHNICAL DATA SHEET SHALL BE CONSTRUED TO CONSTITUTE A REPRESENTATION OR WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING THE PRODUCT'S CHARSCTERISTICS, USE, QUALITY, SAFETY, MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. Nothing contained herein shall constitute permission or recommendation to practice any intellectual property without the permission of the owner.

Chemtura and the Chemtura logo are trademarks of Chemtura Corporation or one of its subsidiaries.

Copyright © 2007 Chemtura Corporation. All rights reserved.

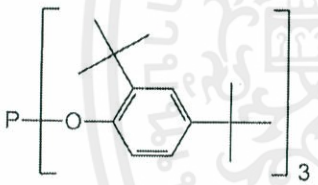
Chemtura

Technical Information
www.chemtura.com
Effective: 11.04.2008

Alkanox® 240
Phosphite Antioxidant

Alkanox 240 is an organo-phosphite antioxidant that exhibits excellent hydrolytic stability.

Chemical Structure
Tris(2,4-di-*t*-butylphenyl) phosphite
CAS Reg. Number: 31570-04-4



Features
Alkanox 240 effectively reduces peroxide induced oxidative degradation of most polymeric substances during processing. The low volatility of Alkanox 240 allows for use at the high temperatures required for processing thermoplastic polymers. Alkanox 240 is suitable for use in a multitude of polymers such as polyolefins, polycarbonate, ABS and polyesters.

Typical Physical Properties of Alkanox 240

Appearance	White, free flowing solid
Bulk density, Kg/L	0.55 (Powder) 0.53 (Granular)
Molecular weight	647
Specific Gravity @ 20°C, g/ml	1.03
Melting range, °C	180 – 185
Flash point, °C	225

Thermogravimetric Analysis (10 mg @ 10°C/mi[illegible]der N_2)

Weight Loss, %	5	10	25
Temperature, °C	239	250	272

Solubility @ 20°C (Weight %)

Water	Insoluble	*Acetone*	1
Ethyl acetate	4	*Chloroform*	36
Benzene	34	*Hexane*	11
Methanol	Insoluble		

Food Contact
This compound has broad food contact approvals; for details please contact Chemtura, Regulatory Affairs Polymer Additives.

Storage and Handling Precautions
The use of proper protective equipment is recommended. Excess exposure to the product should be avoided. Wash thoroughly after handling. Store the product in a cool, dry, well-ventilated area away from incompatible materials. Unless stated, proper storage will permit usage of the product for 6 to 12 months from the date of receipt.

For additional handling and toxicological information, consult the Chemtura Material Safety Data Sheet.

The information contained herein relates to a specific Chemtura product and its use, and is based on information available as of the date hereof. Additional information relating to the product can be obtained from the pertinent Material Safety Data Sheets. Nothing in this Technical Data Sheet shall be construed to modify any of Chemtura standard terms and conditions of sale under which the product is sold by Chemtura. NOTHING IN THIS TECHNICAL DATA SHEET SHALL BE CONSTRUED TO CONSTITUTE A REPRESENTATION OR WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING THE PRODUCT'S CHARSCTERISTICS, USE, QUALITY, SAFETY, MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. Nothing contained herein shall constitute permission or recommendation to practice any intellectual property without the permission of the owner.

Chemtura and the Chemtura logo are trademarks of Chemtura Corporation or one of its subsidiaries.

Copyright © 2007 Chemtura Corporation. All rights reserved.

NEXTSTEP CHEMICALS CO., LTD.

121/ 60 Soi. Tanasit Moo. 11, Taparak Road, Bang Pla,

Bang Phlee, Samut Prakarn, 10540 Thailand

Tel: +662-7507771-2 Fax: +662-7506446

E-mail: E-mail:sales@nextstepchemicals.co.th, http://www.nextstepchemicals.co.th

PE WAX H110

SPECIFICATION

PE WAX are low molecular weight polyethylene waxes derived from HDPE. The careful process control by Nextstep. They are hard, crystalline materials that melt to a low viscosity. The product range as follows:

Applications

: Candles, Crayons	: Thermoplastic road marking	: Rubber
: Hot melt adhesives	: Plastic additives	: Polishes
: Color concentrates	: Petroleum waxes blends	: Asphalt Coating

Typical Properties (CAS no - 9002-88-4)

Properity	Unit	Test Method	110	110	110
Molecular Weight Mn		GPC	1500±500	1500±500	1500±500
Viscosity at 140°C	cps	Brookfield Type	**10-80**	**80-200**	**200-400**
Density	g / cc	ASTM D1505	0.92-0.96	0.92-0.96	0.92-0.96
Penetration Hardness	dmm	ASTM D1321	3-8	3-8	3-8
Softening Point	°C	ASTM D36	105-120	105-120	105-120
Color			White	White	White
Appearance/form			flake	flake	flake

Packing : 25 kg./Bag.

Origin : Thailand

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

WOOSUNG™ NEOBOND® NB1016 PE

Product Information

Product Data Sheet

WOOSUNG™ NEOBOND® NB1016 PE

Description and Typicial Properties

Description

WOOSUNG™ NEOBOND® NB1016 is a anhydride modified polyethylene.

Availability

Globally

Typical Characteristics

Compatibilizer, Coupling agent, PE-WPC compounds, Adhesive Resin for Steel Pipe Coating

Table - Properties

INSPECTION	TEST METHOD	UNIT	SPECIFICATION
Appearance(Yellowness Index)	ASTM D1925	-	<3
Melt Index(190℃/2.16kg)	ASTM D1238	g/10min	1 ~ 2
Tensile Strength(500mm/min)	ASTM D638	kgf/cm^2	min. 100
Melting point by DSC	ASTM D3418	℃	118 ~ 127
Moisture	ASTM D4019(150℃)	ppm	max. 500
Peel bond strength	WSC METHOD	kgf/cm^2	5~7
Density	ASTM D1238	g/10min	0.925± 0.005
Elongation at Break	ASTM D638	%	600~800
Impact Strength (Izod with Notch)	ASTM D256	kgfcm/cm	>50
Softening Point (Vicat)	ASTM D1525	℃	100

Read and understand the Material Safety Data Sheet (MSDS) before using this product

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง เผยแพร่ หรือจำหน่ายต่อ

WOOSUNG Chemical Co., Ltd.

267 wondang-Ri, Bukahn-Myun, Youngcheon, Kyungbuk, The Republic of Korea

WELL IN ENTERPRISE CO., LTD.

Office : No.151, Sec.2, Chongde 2nd. Rd.,Taichung City 40653, Taiwan.

Tel:+886-4-22436789 Fax:+886-4-22439863 E-mail:huroger@ms45.hinet.net

Factory : No.110, Si-Wei, Shanhua Chen, Tainan Hsien, 74163, Taiwan.

EASYFLOW R10

DATA SHEET

COMPOSITION : Blend of unsaturated fatty acid soaps with Zn and Ca.

SPECIFICATION :

Appearance:	light beige pastilles
Soften point (℃):	87.6~92.0
Specific Gravity:	1.03

CHARACTERISTICS AND APPLICATION:

R10 is designed to reduce viscosity (internal friction) to improve the flow properties and decrease the sliding friction (external friction) in rubber compounds.

The release effect of R10 is remarkable. It can eliminate sticking and improve mold release, especially for complicated mold designs.

Being consisted of Zn soap and Ca soap to be multifunctional,
when it is used as Peptizer, added in the first stage ;
when it is used as Lubricant, added in the final stage.

With Zn soaps, R10 has a slight activating effect on curing in sulfur containing compounds.

DOSAGE : PHR 1~5

STORAGE / STABILITY : At least 2 years under normal storage conditions.

PACKING : 25kgs in paper bag.

เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์ที่ใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RECOMMENDED FOR : NR, SBR, EPDM, CR, IIR, CM, Halo IIR, NBR, and BR.