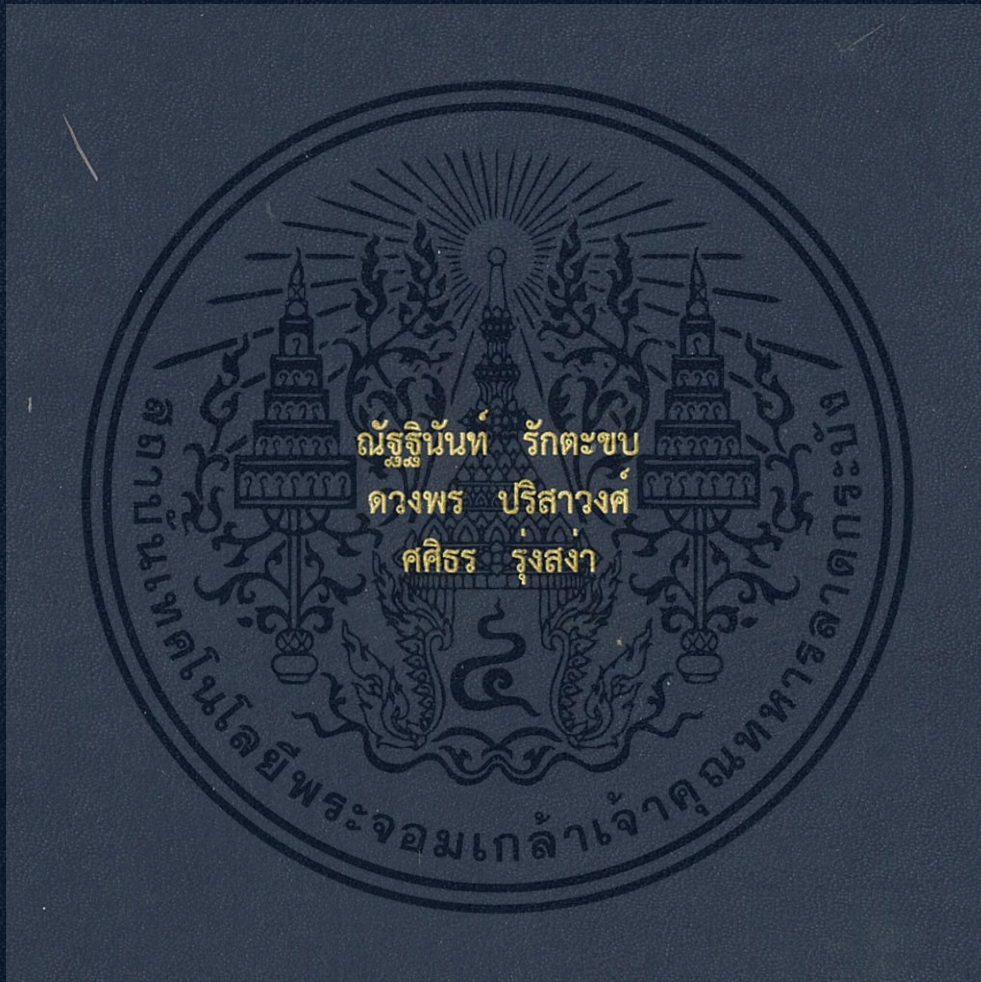


การศึกษาสารหน่วงไฟระบบเดี่ยวและระบบอินทุมสเซนส์
จากเปลือกหอยแมลงภู

STUDY OF FLAME RETARDANTS IN SINGLE AND
INTUMESCENT SYSTEMS FROM MUSSEL SHELL



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

การศึกษาสารหน่วงไฟระบบเดี่ยวและระบบอินตูเมสเซนต์
จากเปลือกหอยแมลงภู

STUDY OF FLAME RETARDANTS IN SINGLE AND
INTUMESCENT SYSTEMS FROM MUSSEL SHELL



เลขหมู่
เลขทะเบียน 149442
ในเดือนปี ๘ อ.ค. 2561

b. 1288.6981
i.

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF FLAME RETARDANTS IN SINGLE AND INTUMESCENT SYSTEMS FROM MUSSEL SHELL



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การศึกษาสารหน่วงไฟระบบเดี่ยวและระบบอินตุมสเซนตจากเปลือกหอยแมลงภู

Study of Flame Retardants in Single and Intumescent Systems from Mussel Shell

ชื่อนักศึกษานางสาวณัฐฉิรินทร์ รักตะขบ รหัสนักศึกษา 55050644
นางสาวดวงพร ปรีสวางศ์ รหัสนักศึกษา 55050661
นางสาวศศิธร รุ่งสง่า รหัสนักศึกษา 55050815**ปริญญา**

วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา

เคมี

ปีการศึกษา

2558

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ผศ.ดร.บรรจง บุญชม

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์ ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธี กรรมการ	
รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	
ผศ.ดร.บรรจง บุญชม กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาสารหน่วงไฟระบบเดี่ยวและระบบอินตumesเซนต์จากเปลือกหอยแมลงภู่		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวณัฐธินันท์	รักตะขบ	รหัสนักศึกษา 55050644
	นางสาวดวงพร	ปริสวางค์	รหัสนักศึกษา 55050661
	นางสาวศศิธร	รุ่งสง่า	รหัสนักศึกษา 55050815
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2558		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.อิทธิพล	แจ้จ้ง	ชาติ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.บรรจง	บุญชม	

บทคัดย่อ

พลาสติกส่วนมากสามารถติดไฟได้ง่าย ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการจำกัดการใช้งานพลาสติกในชีวิตประจำวันสมัยใหม่ที่ไม่ต้องการความเสี่ยงต่ออันตรายจากเพลิงไหม้ การลดการติดไฟของพลาสติกทำได้โดยการใช้สารหน่วงไฟ (Flame retardants; FR) ใดๆก็ตามที่สารหน่วงไฟเชิงพาณิชย์มีข้อดีหลายประการ สารหน่วงไฟอินทรีย์หนัก ราคาแพง และต้องใช้ปริมาณมาก ในขณะที่สารหน่วงไฟฮาโลเจนปลดปล่อยก๊าซอันตราย ในงานวิจัยนี้ สารหน่วงไฟฟอสฟอรัสจากเปลือกหอยแมลงภู่ถูกเตรียมขึ้นโดยวิธีตกตะกอนแบบง่าย ผลการทดลองยืนยันผลิตภัณฑ์ที่ได้ว่าเป็นแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$; CaHP) ที่มีผลึกแบบโมโนคลินิก งานวิจัยนี้ทำการศึกษาสารหน่วงไฟ CaHP ทั้งระบบเดี่ยวและระบบอินตumesเซนต์ (Intumescent; IFR) โดยใช้พลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ทำการหลอมของผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) แล้วขึ้นรูปตัวอย่างด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) ในการทดลองระบบเดี่ยวพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ CaHP มากขึ้นส่งผลให้อัตราการลามไฟช้าลง แต่วัสดุยังไม่สามารถดับไฟได้ด้วยตัวเอง จึงมีการพัฒนาเป็นสารหน่วงไฟในระบบอินตumesเซนต์ (IFR) โดยใช้ CaHP เป็นสารให้กรด, เมลามีน (MA) เป็นสารให้ฟอง และแกรไฟต์ขยาย (EG) เป็นสารให้คาร์บอนที่ปริมาณ FR ควบคุมที่ 30% โดยน้ำหนัก และให้ปริมาณ MA คงที่ 6% โดยน้ำหนัก จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการหน่วงไฟตามมาตรฐาน UL-94 ดีขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วน CaHP:EG จาก 2:1 ถึง 5:1 ที่อัตราส่วน CaHP:EG ที่ 3:1 มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟดีที่สุด ให้ผลการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 เป็น V0 และให้ค่า LOI สูงที่สุดคือ 24% ใดๆก็ตามที่พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ CaHP ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของ HDPE ที่มีการใส่ IFR มีแนวโน้มลดลง คาดว่าเนื่องจากเกิดการรวมกลุ่มก้อนของ CaHP ทำให้เกิดรอยตำหนิ ซึ่งยืนยันได้จากการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำสำคัญ : แกรไฟต์ขยาย แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรต เปลือกหอยแมลงภู
สารหน่วงไฟระบบอินตุมเนสเซนส์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Study of Flame Retardants in Single and Intumescent Systems from Mussel Shell	
Students	Miss Nutthinan Ruktakhob	Student ID 55050644
	Miss Duangphorn Parisawong	Student ID 55050661
	Miss Sasithorn Rungsanga	Student ID 55050815
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)	
Department	Chemistry	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2015	
Advisor	Assoc.Prof.Dr.Ittipol Jangchud	
Co-advisor	Asst.Prof.Dr.Banjong Boonchom	

Abstract

Most of plastics can be burnt easily. Fire-risk problem prevents plastics from applications of modern human life-styles with no fire-risk hazard. Low flammability of plastics can be carried out by adding flame retardant (FR) additives. However, commercial FRs have several drawbacks. Inorganic FRs have high densities, expensive, and high-loading needed, whereas halogenic FRs release toxic substances. In this work, a phosphorous FR from mussel shell was synthesized by simple precipitation method yielding calcium dihydrogenphosphate monohydrate ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$; CaHP). It was confirmed that CaHP can be synthesized and revealed monoclinic crystalline structure. Both single FR and intumescent (IFR) systems of CaHP were studied in High Density Polyethylene (HDPE) matrix. HDPE and CaHP were compounded by using an internal mixer and shaped into samples by an injection molding machine. As CaHP loading was increased, It was found that flammability (according to UL-94 vertical testing) was retarded with lower burning rates. However, self-extinguishing of the compounds cannot be achieved in the single system. As CaHP was used as acid source, intumescent system (IFR) was then studied by using melamine (MA) as a blowing agent and expanded graphite (EG) as carbon source. Controlled loading of FR was fixed at 30% (by weight) at the MA loading at 6% (by weight). It was found that flame retarding efficiency was improved by increasing CaHP ratio from 2:1 to 5:1 CaHP:EG. At the ratio of CaHP:EG at 3:1, an optimum flame retarding effect was found since V-0 (according to UL-94) and the highest LOI

(Limiting Oxygen Index) were achieved. However, mechanical properties of HDPE mixed with IFRs were decreased as CaHP ratios was increased. This might be explained by agglomerates of CaHP yielding defects as confirmed by SEM.

Keywords : Expanded graphite, Calcium dihydrogen phosphate monohydrate (CaHP), Mussel shell, Intumescent flame retardant (IFR)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด ที่กรุณารับเป็นที่ปรึกษาโครงการพิเศษ คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ และความช่วยเหลือในการดำเนินงานโครงการพิเศษนี้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.บรรจง บุญชม ที่กรุณารับเป็นที่ปรึกษาโครงการพิเศษร่วม คอยให้คำปรึกษา และให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์ และ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธี อาจารย์ คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ ที่กรุณาตรวจทาน และแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้อง สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่ประจำ อาคารฝึกงานอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์เทคโนโลยี รวมทั้ง คุณขวัญใจ พูลสวัสดิ์ ที่คอยอำนวยความสะดวกตลอดการทำโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณ บริษัท เอ็ม.บี.เจ. เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด โดยเฉพาะคุณบำรุง เษฎาพงศ์-ไพบูลย์ คุณฤชอร พรหมนิมิตร ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมี

ขอขอบพระคุณ บริษัท เคมีมิน จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ Expanded graphite

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่อาคารและสถานที่ รวมจนถึงแม่บ้าน ที่ช่วยเหลืออำนวยความสะดวกในการเปิดปิดอาคารทั้งในและนอกเวลาราชการ

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และพี่ๆ เพื่อนๆ ทุกคน ที่คอยช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และเป็นกำลังใจจนทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงผ่านไปได้

นอกจากนี้ยังมีบุคคลอื่นๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ ซึ่งผู้จัดทำมิได้กล่าวถึงอีกมากมาย ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ณัฐชินนท์ รักตะขบ
ดวงพร ปรีสาวงศ์
ศศิธร รุ่งสง่า

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 สารหน่วงไฟ (Flame retardants).....	4
2.1.1 องค์ประกอบของไฟ (Fire triangle).....	4
2.1.2 กลไกการทำงานของสารหน่วงไฟ (Flame retardant mechanisms).....	6
2.1.2.1 การขัดขวางทางกายภาพ.....	6
2.1.2.2 การขัดขวางทางเคมี.....	6
2.1.3 ประเภทของสารหน่วงไฟ.....	7
2.1.4 สารหน่วงไฟระบบอินตุมสเซนต์.....	7
2.1.4.1 องค์ประกอบของสารหน่วงไฟระบบอินตุมสเซนต์.....	8
2.1.4.2 กลไกการเกิดอินตุมสเซนต์.....	8
2.2 เปลือกหอยแมลงภู่.....	9
2.2.1 โครงสร้างของเปลือกหอยแมลงภู่.....	10
2.2.2 ชั้นของเปลือกหอยแมลงภู่.....	10
2.2.3 การนำเปลือกหอยแมลงภู่มาใช้ประโยชน์.....	11
2.2.4 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ จากเปลือกหอย.....	11
2.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene; HDPE).....	12
2.3.1 สมบัติทั่วไป.....	12
2.3.2 การนำไปใช้ประโยชน์.....	12
2.4 แกรไฟต์ (Graphite).....	13
2.4.1 ประเภทแกรไฟต์.....	14
2.4.2 แกรไฟต์ขยาย (Expanded graphite).....	14
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	19
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	20
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	21
3.4 กระบวนการฉีดขึ้นรูป.....	25
3.5 การวิเคราะห์และการทดสอบ.....	25
3.5.1 การวิเคราะห์ $(Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O)$ ที่เตรียมได้จากเปลือกหอยแมลงภู่.....	25
3.5.1.1 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของ $Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$	25
3.5.1.2 การวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวของ $Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$	25
3.5.1.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของ $Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$	25
3.5.1.4 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของ $Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$	25
3.5.1.5 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบของ $Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$	25
3.6 การทดสอบสมบัติต่างๆ.....	27
3.6.1 การลามไฟ.....	27
3.6.1.1 การทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 (Vertical testing).....	27
3.6.1.2 การหาค่า Limiting oxygen index (LOI).....	28
3.6.2 สมบัติเชิงกล.....	29
3.6.2.1 ความแข็งแรงโค้งงอและมอดูลัสโค้งงอ.....	29
3.6.2.2 ความทนต่อแรงกระแทก.....	30
3.6.2.3 การทดสอบความแข็ง.....	30
3.6.3 สมบัติทางกายภาพ.....	31
3.6.3.1 ความหนาแน่น.....	31
3.6.3.2 สัณฐานวิทยา.....	32
3.6.4 สมบัติทางความร้อน.....	32
3.6.4.1 Differential scanning calorimetry (DSC).....	32
3.6.4.2 Thermogravimetric analysis (TGA).....	32
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	34
4.1 วิเคราะห์ลักษณะและโครงสร้างของ CaHP ที่เตรียมได้.....	34
4.1.1 วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ.....	34
4.1.2 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน.....	35
4.1.3 วิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัว.....	35
4.1.4 วิเคราะห์โครงสร้างผลึก.....	36
4.1.5 วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยา.....	37

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณ CaHP ต่อการหน่วงไฟในระบบเดี่ยว.....	37
4.2.1 ศึกษาสมบัติการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94.....	37
4.2.2 ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา.....	38
4.3 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณ CaHP ต่อการหน่วงไฟในระบบอินตุมเมสเซนต์.....	40
4.3.1 ศึกษาสมบัติการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 และ LOI	40
4.3.2 ศึกษาสมบัติเชิงกล.....	41
4.3.3 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ.....	44
4.3.3.1 ความหนาแน่น.....	44
4.3.3.2 สัณฐานวิทยา.....	44
4.3.4 ศึกษาสมบัติทางความร้อน.....	46
4.3.4.1 DSC.....	46
4.3.4.2 TGA.....	47
4.4 วิเคราะห์ต้นทุน.....	48
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	50
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	50
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	50
เอกสารอ้างอิง.....	51
ภาคผนวก.....	54
ภาคผนวก ก.....	55
ภาคผนวก ข.....	59

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณธาตุในเปลือกหอยน้ำจืดและเปลือกหอยทะเล.....	10
2.2 สมบัติทั่วไปของ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	11
2.3 สมบัติบางประการของ HDPE.....	13
2.4 สมบัติเชิงกลของแต่ละตัวอย่าง.....	16
2.5 ค่า LOI และ UL-94 ของแต่ละตัวอย่าง.....	17
3.1 สมบัติบางประการของ HDPE.....	20
3.2 สมบัติบางประการของ MA.....	20
3.3 สมบัติบางประการของ Expanded graphite.....	20
3.4 สูตรผสมที่เตรียมเทียบเป็นร้อยละใน HDPE.....	24
3.5 สูตรผสมที่เตรียมในระบบอินตุมสเซนส์จากธรรมชาติ.....	24
3.6 เกณฑ์การแบ่งกลุ่มพฤติกรรมของวัสดุต่อการติดไฟตามมาตรฐาน UL-94.....	27
3.7 เกณฑ์การแบ่งกลุ่มพฤติกรรมของวัสดุต่อการติดไฟตามมาตรฐาน LOI.....	28
4.1 ปริมาณธาตุองค์ประกอบที่พบของเปลือกหอยแมลงภู่มาก่อนและหลังการสังเคราะห์.....	34
4.2 ผลการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 และอัตราการเผาไหม้ของวัสดุ ที่มีปริมาณ CaHP แตกต่างกัน.....	38
4.3 ผลการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 และค่า LOI ของวัสดุ ที่มีอัตราส่วนของ CaHP:EG แตกต่างกัน.....	40
4.4 สมบัติทางความร้อนของ HDPE (Control) และ HDPE ที่มี CaHP:EG ในอัตราส่วนแตกต่างกัน.....	46
4.5 วิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบการผลิตพลาสติกทนไฟในอัตราส่วน CaHP:EG ที่ 3:1 ปริมาณ 1 กิโลกรัม.....	49

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 การเกิดอค์คีภัย.....	1
1.2 เปลือกหอยแมลงภู์เหลือทิ้ง.....	2
2.1 องค์ประกอบในการติดไฟ (สามเหลี่ยมไฟ).....	4
2.2 ลักษณะการหน่วงไฟของระบบอินตุมสเซนต์.....	9
2.3 ลักษณะการเกิดโฟมของการหน่วงไฟระบบอินตุมสเซนต์.....	9
2.4 เปลือกหอยแมลงภู์.....	10
2.5 โครงสร้างของ HDPE.....	12
2.6 โครงสร้างของแกรไฟต์.....	13
2.7 สัณฐานวิทยาของ Expanded graphite.....	14
2.8 กราฟการวิเคราะห์ TGA และ XRD ของ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	15
3.1 แผนผังการเตรียม $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ จากเปลือกหอยแมลงภู์.....	23
3.2 แผนผังการวิเคราะห์ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ จากเปลือกหอยแมลงภู์.....	26
3.3 การทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 โดยการเผาชิ้นงานแบบแนวตั้ง.....	27
3.4 การทดสอบ Limiting oxygen index (LOI).....	28
3.5 การทดสอบการทนแรงโค้งงอแบบ 3 จุด.....	30
3.6 ลักษณะของตัวอย่างและวิธีการทดสอบความทนต่อแรงกระแทก.....	30
3.7 แผนผังการทดสอบสมบัติต่างๆ.....	33
4.1 กราฟ IR ของ CaHP ที่เตรียมได้.....	35
4.2 กราฟ TGA ของ CaHP ที่เตรียมได้.....	36
4.3 กราฟ XRD ของ CaHP ที่เตรียมได้.....	36
4.4 ภาพ SEM ของ CaHP ที่เตรียมได้ (กำลังขยาย 1000 เท่า).....	37
4.5 การติดไฟของ HDPE เมื่อทำการจุดไฟเป็นเวลา 10 วินาที โดยมีอัตราส่วน HDPE:CaHP (a) ไม่ใส่ CaHP, (b) 80:20, (c) 40:60 และ (d) 60:40.....	38
4.6 ภาพ SEM ที่เตรียมจาก HDPE กับ CaHP (a) กำลังขยาย 500 เท่า และ (b) กำลังขยาย 7000 เท่า.....	39
4.7 การติดไฟของ HDPE เมื่อทำการจุดไฟเป็นเวลา 10 วินาที โดยมีอัตราส่วน HDPE:EG (a) 2:1, (b) 3:1, (c) 4:1 และ (d) 5:1.....	41
4.8 ค่าความแข็งโค้งงอของ HDPE (Control) และ HDPE ที่มี CaHP:EG ในอัตราส่วนแตกต่างกัน.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ค่ามอดุลัสโค้งงอของ HDPE (Control) และ HDPE ที่มี CaHP:EG ในอัตราส่วนแตกต่างกัน.....	42
4.10 ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของ HDPE (Control) และ HDPE ที่มี CaHP:EG ในอัตราส่วนแตกต่างกัน.....	43
4.11 ค่าความแข็งแบบ Shore D ของ HDPE (Control) และ HDPE ที่มี CaHP:EG ในอัตราส่วนแตกต่างกัน.....	43
4.12 ค่าความหนาแน่นของ HDPE (Control) และ HDPE ที่มี CaHP:EG ในอัตราส่วนแตกต่างกัน.....	44
4.13 ภาพ SEM ของและ HDPE ที่มี CaHP:EG (a) กำลังขยาย 100 เท่า (b) กำลังขยาย 500 เท่า และ (c) กำลังขยาย 500 เท่า.....	45
4.14 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนขององค์ประกอบต่างๆ ในตัวอย่าง (a) CaHP, (b) HDPE, (c) MA และ (d) EG.....	47
4.15 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของ HDPE ที่มี CaHP:EG ในอัตราส่วนแตกต่างกัน.....	48

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลาสติกเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่มนุษย์รู้จักมานาน และนำมาใช้ประโยชน์แทนโลหะ ไม้ หรือวัสดุธรรมชาติอื่นๆ เช่น ภาชนะ ชิ้นส่วนของยานยนต์ บรรจุภัณฑ์ต่างๆ รวมทั้งอุปกรณ์และเครื่องใช้อื่นๆ ปัจจุบันพลาสติกมีบทบาทมากขึ้นในชีวิตประจำวัน เนื่องจากพลาสติกมีสมบัติเด่นหลายประการ คือ ความหนาแน่นต่ำ น้ำหนักเบา ทนสารเคมี มีความยืดหยุ่นสูง และราคาถูก แต่มีข้อด้อย คือ ส่วนใหญ่ไม่ทนไฟ และความแข็งแรงต่ำ จากปัญหาเบื้องต้นที่กล่าวมางานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาเพื่อพัฒนาสมบัติด้อยของพลาสติก เช่น การทนไฟและสมบัติเชิงกลอื่นๆ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาเพื่อให้พลาสติกสามารถทนวงไฟได้นานขึ้นและช่วยบรรเทาความเสียหายจากการเกิดอัคคีภัย



รูปที่ 1.1 การเกิดอัคคีภัย [1]

การป้องกันการเกิดอัคคีภัยที่ง่ายที่สุด คือการเติมสารหน่วงไฟ (Flame retardants) ลงไปในพลาสติก โดยสารหน่วงไฟในปัจจุบันมีมากมายหลายชนิดได้แก่ สารหน่วงไฟประเภทสารประกอบฮาโลเจน (Halogen-based flame retardants) ซึ่งเป็นสารที่ได้รับความนิยมอย่างมากเช่น โบรมีน มีประสิทธิภาพการหน่วงไฟดีที่สุดในปัจจุบันได้มีการหลีกเลี่ยงการใช้สารประกอบประเภทฮาโลเจน เนื่องจากมีความเป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม จึงทำให้สารหน่วงไฟประเภทอนินทรีย์ (Inorganic flame retardants) มีบทบาทมากขึ้น ได้แก่ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (ATH) แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) และสารประกอบโบรอน เป็นต้น สารหน่วงไฟประเภทนี้มีราคาถูก ไม่เป็นพิษ และยังมีสมบัติในการลดควันที่เกิดจากการเผาไหม้ แต่สารประเภทนี้จะมีความคงทนต่ำ การจะทำให้มีประสิทธิภาพที่ดีนั้นจำเป็นต้องใช้สารหน่วงไฟในปริมาณมาก (เช่น 40%) ส่งผลทำให้พลาสติกมีน้ำหนักมากขึ้น ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น และทำให้มีสมบัติเชิงกลต่ำลง

สารหน่วงไฟประเภทสารประกอบฟอสฟอรัส (Phosphorus-based flame retardants) เช่น แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (Ammonium polyphosphate; APP) สารหน่วงไฟประเภทนี้มีราคาถูก หาง่าย ไม่เป็นพิษ และมีประสิทธิภาพการหน่วงไฟกับวัสดุที่มีปริมาณออกซิเจนสูง จึงได้รับความนิยมมากขึ้นโดยเฉพาะในปัจจุบัน

จากงานวิจัยของบรรจง บุญชม [2] ได้มีการศึกษาการเตรียมแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต-โมโนไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$; CaHP) อย่างง่าย โดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid; H_3PO_4) เป็นสารตั้งต้น และมีอะซิโตน (Acetone) เป็นตัวกลาง จากการทดลองพบว่า เมื่อนำ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ มาตรฐาน

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย คือพลาสติกและเปลือกหอย โดยเลือกพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เป็นตัวแทนพลาสติก เนื่องจาก HDPE มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ และผู้วิจัยหวังว่าจะนำไปใช้ในการศึกษาการผลิตไม้เทียม (Wood plastic composites) ต่อไป การเลือกใช้เปลือกหอยแมลงภู่เป็นตัวแทนเปลือกหอย เพื่อเป็นการควบคุมชนิดของเปลือกหอย เนื่องจากเปลือกหอยแมลงภู่เป็นวัสดุทางธรรมชาติที่หาได้ง่าย ราคาถูก ช่วยลดปริมาณขยะและช่วยเพิ่มมูลค่าให้เศษวัสดุเหลือใช้



รูปที่ 1.2 เปลือกหอยแมลงภู่เหลือทิ้ง [3]

ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงเป็นการปรับปรุงแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากเปลือกหอยแมลงภู่เพื่อเตรียมเป็น $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ จากธรรมชาติ ซึ่งเป็นสารประกอบประเภทฟอสเฟอรัส คาดว่าจะมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ทดแทนสารหน่วงไฟกลุ่มฟอสเฟอรัส เพื่อใช้เป็นสารหน่วงไฟสำหรับพลาสติกทั้งในระบบเดี่ยวและระบบอินตุมสเซนส์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาสารหน่วงไฟชนิดใหม่จากเปลือกหอยแมลงภู่ ในระบบเดี่ยวและระบบอินตุมสเซนส์ โดยเน้นการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการหน่วงไฟ และสมบัติเชิงกลของ HDPE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. เตรียมสารหน่วงไฟชนิดใหม่จากเปลือกหอยด้วยกระบวนการแบบตกตะกอน
3. เตรียมอัตราส่วนและทำการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) และฉีดขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding)
 - 3.1 ระบบเดี่ยว ประกอบด้วย HDPE และ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$
 - 3.2 ระบบอินตูดูเมสเซนต์ ประกอบด้วย HDPE, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ เมลามีน (Melamine; MA) และแกรไฟต์ขยาย (Expanded graphite; EG)
4. ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการหน่วงไฟและสมบัติต่างๆ ของพลาสติก ได้แก่
 - สมบัติการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 แบบแนวตั้ง และ LOI (Limiting oxygen index)
 - สมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength), โมดูลัสโค้งงอ (Flexural modulus), ความทนต่อแรงกระแทก (Impact strength), ความแข็ง (Hardness)
 - สมบัติทางกายภาพ เช่น ความหนาแน่น (Density), สัณฐานวิทยาด้วย Scanning electron microscope (SEM)
 - สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) และ Thermogravimetric analysis (TGA)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเตรียม $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ จากเปลือกหอยแมลงภู่ เพื่อใช้เป็นสารหน่วงไฟประเภทฟอสฟอรัส ทั้งระบบเดี่ยว และระบบอินตูดูเมสเซนต์
2. สามารถนำเปลือกหอยแมลงภู่ที่เหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์ และช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้
3. สามารถปรับปรุงสมบัติการหน่วงไฟของพลาสติก
4. นำความรู้ที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางหรือนำไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยอื่นในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

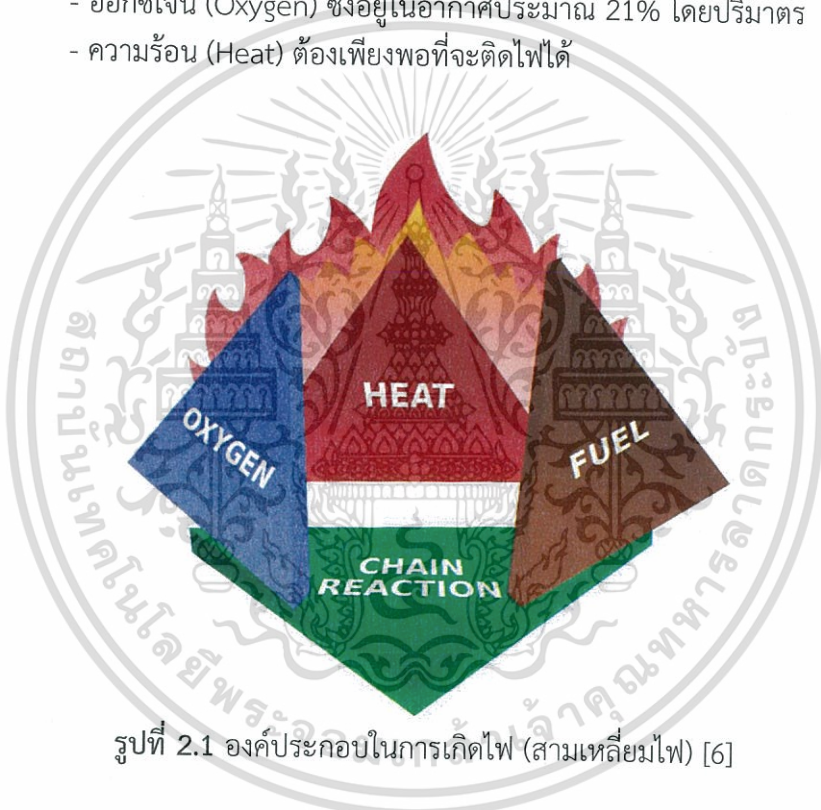
2.1 สารหน่วงไฟ (Flame retardants)

การเผาไหม้ คือปฏิกิริยาทางเคมี ที่เชื้อเพลิงได้รวมตัวกับออกซิเจนในอากาศแล้วเกิดการปล่อยพลังงานความร้อนและแสงสว่างออกมา

2.1.1 องค์ประกอบของไฟ (Fire triangle) [4, 5]

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาร่วมระหว่างองค์ประกอบ 3 อย่าง คือ

- เชื้อเพลิง (Fuel) ซึ่งจะอยู่ในสภาพของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ
- ออกซิเจน (Oxygen) ซึ่งอยู่ในอากาศประมาณ 21% โดยปริมาตร
- ความร้อน (Heat) ต้องเพียงพอที่จะติดไฟได้



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบในการเกิดไฟ (สามเหลี่ยมไฟ) [6]

เมื่อเกิดการเผาไหม้จะให้พลังงานความร้อนและพลังงานแสงออกมา โดยความร้อนส่วนหนึ่งจะแพร่ออกไปและอีกส่วนหนึ่งจะย้อนกลับเข้ามา ทำให้พอลิเมอร์เกิดก๊าซที่สามารถลุกติดไฟได้จากปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อนของพอลิเมอร์และเกิดการเผาไหม้ต่อไปอีก เมื่อเชื้อเพลิงได้รับความร้อนจากการเกิดก๊าซหรือไอที่ผิวมากพอที่จะติดไฟได้ และมีออกซิเจนในอากาศไม่ต่ำกว่าร้อยละ 16 จะเกิดการติดไฟขึ้น โมเลกุลจะมีขนาดเล็กลงจนแปรสภาพเป็นก๊าซแล้วลุกไหม้ต่อเนื่องกันเป็นลูกโซ่

องค์ประกอบในการเผาไหม้มี 4 องค์ประกอบ การจะดับไฟได้นั้นจะต้องเอาอย่างใดอย่างหนึ่งออกไป องค์ประกอบในการเผาไหม้ คือ [7]

1. **เชื้อเพลิง** คือวัสดุใดๆ ที่สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้อย่างรวดเร็วในการเผาไหม้ เช่น ก๊าซ ไม้ กระดาษ โลหะ พลาสติก เป็นต้น เชื้อเพลิงที่อยู่ในสถานะก๊าซ จะสามารถลุกไหม้ติดไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ แต่เชื้อเพลิงในสถานะของแข็งและของเหลวจะไม่สามารถจุดติดไฟได้ ถ้าโมเลกุลที่ผิวไม่อยู่ในสภาพที่เป็นก๊าซ การที่โมเลกุลของของแข็งหรือของเหลวจะสามารถแปรสภาพเป็นก๊าซได้นั้น จะต้องอาศัยความร้อนที่แตกต่างกันตามชนิดของเชื้อเพลิง ความแตกต่างของลักษณะการติดไฟของเชื้อเพลิงดังกล่าวขึ้นอยู่กับสมบัติ 4 ประการดังนี้

1.1) ความสามารถในการติดไฟของสาร (Flammability limits) เป็นปริมาณไอของสารที่เป็นเชื้อเพลิงในอากาศที่มีสมบัติพร้อมจะติดไฟได้ ในการเผาไหม้นั้นปริมาณไอเชื้อเพลิงที่ผสมกับอากาศจะต้องมีปริมาณพอเหมาะจึงจะติดไฟ โดยปริมาณต่ำสุดของไอเชื้อเพลิงที่เป็นเปอร์เซ็นต์ในอากาศซึ่งสามารถจุดติดไฟได้เรียกว่า “ค่าต่ำสุดของไอเชื้อเพลิง (Lower flammable limit)” และปริมาณสูงสุดของไอเชื้อเพลิงที่เป็นเปอร์เซ็นต์ในอากาศซึ่งสามารถจุดติดไฟได้เรียกว่า “ค่าสูงสุดของไอเชื้อเพลิง (Upper flammable limit)” โดยเชื้อเพลิงแต่ละชนิดจะมีค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของไอเชื้อเพลิงที่แตกต่างกันออกไป

1.2) จุดวาบไฟ (Flash point) คืออุณหภูมิต่ำที่สุดที่สามารถทำให้เชื้อเพลิงคายไอออกมาผสมกับอากาศในอัตราส่วนที่เหมาะสม จากจุดที่มีค่าต่ำสุดถึงค่าสูงสุดของไอเชื้อเพลิง เมื่อมีประกายไฟจะเกิดการติดไฟ

1.3) จุดติดไฟ (Ignition point) คืออุณหภูมิของเชื้อเพลิงที่ได้รับความร้อนจนถึงจุดที่ติดไฟได้ แต่การติดไฟนั้นจะต้องต่อเนื่องกันไป โดยปกติความร้อนของ Ignition point จะสูงกว่า Flash point ประมาณ 7°C

1.4) ความหนาแน่นไอ (Vapor density) คืออัตราส่วนของน้ำหนักของสารเคมีในสถานะก๊าซต่อน้ำหนักของอากาศ เมื่อมีปริมาณเท่ากันความหนาแน่นไอใช้เป็นสิ่งที่บอกให้ทราบว่าก๊าซนั้นจะหนัก หรือเบากว่าอากาศซึ่งใช้เป็นข้อมูลในการควบคุมอัคคีภัย

2. ออกซิเจน อากาศที่อยู่รอบๆ ตัวเรามีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบประมาณ 21% แต่การเผาไหม้แต่ละครั้งนั้นจะใช้ออกซิเจนประมาณ 16% เท่านั้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเชื้อเพลิงทุกชนิดที่อยู่ในบรรยากาศรอบๆ ตัวเรานั้น ถูกล้อมรอบด้วยออกซิเจน ซึ่งมีปริมาณเพียงพอสำหรับการเผาไหม้ ถ้าปริมาณออกซิเจนยิ่งมากเชื้อเพลิงก็ยิ่งติดไฟได้ดีขึ้น และเชื้อเพลิงบางประเภทจะมีปริมาณออกซิเจนในตัวเองที่เพียงพอที่สามารถติดไฟได้ โดยไม่ต้องใช้ออกซิเจนที่อยู่โดยรอบ

3. ความร้อน คือพลังงานที่ทำให้เชื้อเพลิงแต่ละชนิดเกิดการคายไอออกมา

4. ปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain reaction) เป็นปฏิกิริยาเริ่มต้นของปฏิกิริยาการเผาไหม้ โดยเริ่มจากความร้อนจากแหล่งจุดไฟที่ให้แก่เชื้อเพลิง และออกซิเจนจะทำให้โมเลกุลของเชื้อเพลิงที่เป็นก๊าซแตกตัวให้อนุมูลอิสระที่ว่องไวก่อน ซึ่งก็จะทำปฏิกิริยาการแผ่ขยายสายโซ่ (Chain propagation) จนกระทั่งอนุมูลอิสระที่ว่องไวมีจำนวนมากพอที่จะเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ของการเผาไหม้ เมื่อเริ่มเกิดการเผาไหม้ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้จะทำให้ปริมาณเชื้อเพลิงที่เหลืออยู่แตกตัว เป็นอนุมูลอิสระที่ว่องไว จะทำปฏิกิริยาลูกโซ่เกิดการเผาไหม้ต่อเนื่องได้อย่างสมบูรณ์

สารหน่วงการติดไฟที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. **Reactive component** เป็นสารที่มีหมู่ฟังก์ชันในการหน่วงไฟอยู่ในโครงสร้าง หรือเป็นสารตัวกลางชนิดพิเศษที่แทรกอยู่ในพอลิเมอร์ระหว่างการเกิดพันธะโครงร่างตาข่าย สารเหล่านี้ไม่หลุดออกจากพอลิเมอร์ ไม่ระเหย และไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อน นิยมใช้กับพอลิเมอร์-เทอร์โมเซต (Thermoset polymers) ซึ่งสารหน่วงไฟเหล่านี้จะประกอบด้วยสารประกอบประเภทฮาโลเจน เช่น โบรมีน คลอรีน โดยเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการสลายตัวให้ก๊าซที่ดับไฟได้ออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างเช่น Tribromo toluene และ Pentabromo phenyl ally เป็นต้น

2. Additive flame retardant เป็นองค์ประกอบพื้นฐานของแร่ (Mineral) ที่เติมลงในพอลิเมอร์หลังการสังเคราะห์พอลิเมอร์ นิยมใช้กับพอลิเมอร์เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic polymers) เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการขจัดน้ำออกมา เช่น อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) นอกจากนี้ยังมีสารเคมีที่ทำหน้าที่เช่นเดียวกัน ตัวอย่างเช่น สารประกอบแมกนีเซียมซิลิเกต แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) สังกะสีและอะลูมิเนียมโบเรต และแอนติโมนีไตรออกไซด์ (Sb_2O_3) เป็นต้น

2.1.2 กลไกการทำงานของสารหน่วงไฟ (Flame retardant mechanisms)

สารหน่วงไฟมีหลายชนิด แต่ละชนิดถูกควบคุมด้วยกลไกการหน่วงไฟที่แตกต่างกัน กลไกการหน่วงไฟแบ่งได้เป็น 2 แบบ ได้แก่ กลไกการหน่วงไฟแบบการขัดขวางทางกายภาพและทางเคมี

2.1.2.1 การขัดขวางทางกายภาพ

1. การทำให้ระบบเย็นลง กลไกนี้สารหน่วงไฟจะดูดความร้อนบางส่วนไป ทำให้สลายตัวในรูปของการหลอมหรือการระเหิด ซึ่งมีผลทำให้พลาสติกได้รับความร้อนน้อยลงจนระบบมีพลังงานไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้แบบลูกโซ่ได้ หรือสารหน่วงไฟสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) เกิดน้ำระเหยออกมาทำให้พื้นผิววัสดุเย็นลง

ตัวอย่างของสารหน่วงไฟที่หน่วงไฟโดยใช้กลไกการหน่วงไฟนี้ เช่น อะลูมินาไฮดรอกไซด์ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น

2. การทำให้เกิดชั้นเคลือบบนพื้นผิววัสดุ กลไกการหน่วงไฟเกิดขึ้นเมื่อวัสดุได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิการเผาไหม้จะทำให้สารหน่วงไฟเกิดการหลอมละลายมาปกคลุมบริเวณผิวหน้าของวัสดุ ซึ่งจะช่วยป้องกันไม่ให้ก๊าซออกซิเจนมาสัมผัสกับวัสดุ และกักขังไอระเหยที่สามารถลุกติดไฟที่เกิดจากการสลายตัวของวัสดุไม่ให้ไปสูผิวหน้าของวัสดุ ทำให้วัสดุไม่เกิดการเผาไหม้ นอกจากนี้ยังช่วยลดการถ่ายเทความร้อนจากจุดที่เกิดการติดไฟไปยังจุดอื่นๆ ทำให้เปลวไฟไม่เกิดการลุกลามต่อ

ตัวอย่างของสารหน่วงไฟที่หน่วงไฟโดยใช้กลไกการหน่วงไฟนี้รวมถึงเกลืออนินทรีย์ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น บอริก บอแรกซ์ ซิลิเกต ฟอสเฟต และพอลิฟอสเฟต เป็นต้น

3. การปลดปล่อยก๊าซที่ไม่ติดไฟ กลไกการหน่วงไฟนี้คือการที่สารหน่วงไฟเมื่อติดไฟแล้วจะสลายตัวให้ก๊าซที่ติดไฟยากหรือไม่ติดไฟ เช่น ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซแอมโมเนีย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ เป็นต้น ส่งผลให้ก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่เกิดจากการสลายตัวของวัสดุซึ่งเป็นก๊าซที่ติดไฟง่ายเจือจางลงจนมีความเข้มข้นต่ำกว่าจุดติดไฟได้ และทำให้ปริมาณออกซิเจนภายในวัสดุลดลง วัสดุไม่สามารถเกิดการเผาไหม้ต่อไปได้

ตัวอย่างของสารหน่วงไฟที่หน่วงไฟโดยใช้กลไกการหน่วงไฟนี้ เช่น โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมไบคาร์บอเนต แอมโมเนียมเฮไลด์ ซิงค์คลอไรด์ แคลเซียมซิลิเกต แมกนีเซียมซิลิเกต อะลูมิเนียมซิลิเกต แอมโมเนียมซิลิเฟอแมต และฟอตเฟต เป็นต้น

2.1.2.2 การขัดขวางทางเคมี

1. วัฏภาคก๊าซ (Gas phase หรือ Vapor phase) กลไกการหน่วงไฟนี้คือการที่สารหน่วงไฟได้รับความร้อนจะเกิดอนุมูลอิสระที่สามารถไปจับกับอนุมูลอิสระที่เกิดจากเผาไหม้ของวัสดุได้ เช่น $H\cdot$, $OH\cdot$ กลายเป็นก๊าซ ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาการแผ่ขยายสายโซ่อนุมูลอิสระสิ้นสุดลง (Free radical chain propagation) การลุกไหม้ก็จะสิ้นสุดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างของสารหน่วงไฟที่หน่วงไฟโดยใช้กลไกการหน่วงไฟนี้ เช่น สารประกอบฮาโลเจน แอนติโมนีออกไซด์ เป็นต้น

2. วิภาคของแข็ง (Solid phase หรือ Condensed phase) กลไกการหน่วงไฟนี้คือการที่สารหน่วงไฟทำหน้าที่เร่งให้เกิดการสลายตัวเร็วขึ้นเป็นก๊าซที่ไม่ติดไฟ หรือเกิดชั้นถ่านคาร์บอน (Char) เพื่อให้ส่วนที่มีการลุกติดไฟกับส่วนที่ยังไม่ลุกติดไฟแยกห่างออกจากกันมากขึ้น และในที่สุดก็ไม่สามารถลุกลามไปถึงส่วนนั้นได้ นอกจากนี้การทำให้เกิดชั้นถ่านคาร์บอนโดยเร่งให้วัสดุทำปฏิกิริยากับกรดลิวอิส (Lewis acid) ผ่านคาร์บอนเนียมไอออนเกิดการขจัดน้ำ (Dehydration) แล้วเกิดการเชื่อมโยงกันเป็นร่างแห และชั้นถ่านคาร์บอนจะช่วยในการหน่วงไฟโดยการเกิดเป็นชั้นถ่านคาร์บอนมาเคลือบที่ผิวของวัสดุ ดังนั้นผิวหน้าของวัสดุจะไม่สัมผัสกับความร้อน

ตัวอย่างของสารหน่วงไฟที่หน่วงไฟโดยใช้กลไกการหน่วงไฟนี้ เช่น สารประกอบฟอสฟอรัส

2.1.3 ประเภทของสารหน่วงไฟ

1. สารหน่วงไฟประเภทฮาโลเจน (Halogen-based flame retardant)

สารหน่วงไฟประเภทนี้มีกลไกการหน่วงไฟแบบขัดขวางทางเคมีในวิภาคก๊าซ สารหน่วงไฟที่เป็นโบรมีนจะมีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดีที่สุด รองลงมาเป็นคลอรีน โดยทั่วไปมักใช้สารหน่วงไฟประเภทนี้ร่วมกับแอนติโมนีออกไซด์ เช่น Antimony trioxide (Sb_2O_3) และ Antimony oxyhalides ซึ่งจะเป็นตัวขัดขวางไม่ให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ในสถานะก๊าซ หรือทำหน้าที่เป็นสารช่วยเสริมการหน่วงไฟ (Synergist)

2. สารหน่วงไฟประเภทฟอสฟอรัส (Phosphorus-based flame retardant)

สารหน่วงไฟประเภทนี้หาได้ง่าย มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟกับวัสดุที่มีปริมาณออกซิเจนสูง เช่น เซลลูโลส และอนุพันธ์ของเซลลูโลส สารหน่วงไฟประเภทนี้มีกลไกควบคุมการหน่วงไฟด้วยการขัดขวางทางกายภาพและทางเคมีในวิภาคก๊าซ และวิภาคของแข็งดังกล่าวข้างต้น โดยทั่วไป ถ้าใช้สารหน่วงไฟประเภทนี้ร่วมกับฮาโลเจนหรือไนโตรเจนจะเป็นการเสริมการหน่วงไฟให้ดีขึ้น

3. สารหน่วงไฟประเภทอนินทรีย์ (Inorganic flame retardant)

สารหน่วงไฟประเภทอนินทรีย์ที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง ได้แก่ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และสารประกอบโบรอน เป็นต้น สารหน่วงไฟประเภทนี้มีราคาถูก ไม่เป็นพิษ และยังมีสมบัติในการลดควันที่เกิดจากการเผาไหม้ แต่สารประเภทนี้จะมีความคงทนต่ำ

4. สารหน่วงไฟประเภทไนโตรเจน (Nitrogen-based flame retardant)

สารหน่วงไฟประเภทนี้ ได้แก่ เมลามีน เมลามีนไฮยานูเรต เมทิลอลเมลามีน สารประกอบกัวนิติน ยูเรีย ไซยานาไดเอไมด์ เป็นต้น ซึ่งสารหน่วงไฟประเภทนี้ทำหน้าที่ในรูปของการเกิดอินตุมสเซนซ์เป็นลักษณะที่เกิดการพองตัวเป็นชั้นถ่านคาร์บอนที่มีลักษณะคล้ายโฟม ทำหน้าที่เป็นฉนวนทางความร้อน และป้องกันการสัมผัสกับออกซิเจนของวัสดุ

2.1.4 สารหน่วงไฟระบบอินตุมสเซนซ์

การทำงานของสารหน่วงไฟประเภทนี้ คือเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีเกิดเป็นชั้นโฟม ทำหน้าที่เป็นฉนวนทางความร้อนและป้องกันการสัมผัสออกซิเจนของวัสดุ ส่งผลให้การติดไฟสิ้นสุดลง [8]

Intumescent มาจากคำว่า Tumens ในภาษาฝรั่งเศสมีความหมายว่า To swell (บวม) หรือคำว่า Tumecece ในภาษาลาตินมีความหมายว่า To swell up (ทำให้บวมขึ้น) ดังนั้นคำว่า Tumescent มีความหมายว่า บวม, พอง

2.1.4.1 องค์ประกอบของสารหน่วงไฟระบบอินตุมสเซนซ์

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

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

3. สารให้พอง (Blowing agent) คือสารที่สลายตัวให้พองก๊าซที่ไม่ติดไฟ เช่น เมลามีน ยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ เป็นต้น

2.1.4.2 กลไกการเกิดอินตุมสเซนซ์ [9]

1. มีพอลิเมอร์เมทริกซ์ (Matrix) เช่น พอลิพรอพิลีน (Polypropylene; PP)

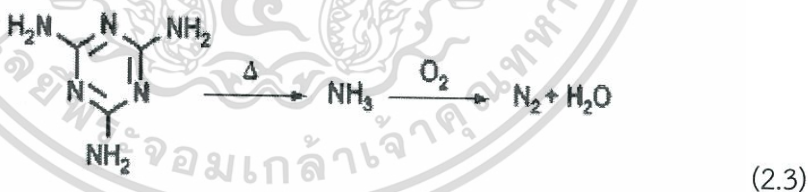
2. แหล่งให้กรดจะสลายตัวให้กรด



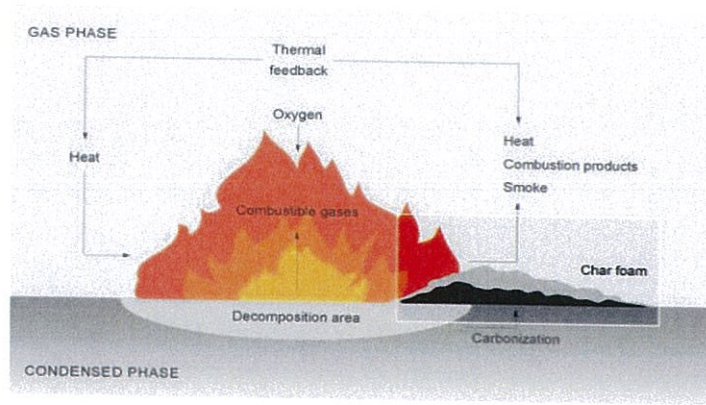
3. กรดที่ได้จากการสลายตัวทำปฏิกิริยากับสารให้คาร์บอนเกิดเป็นชั้นถ่านคาร์บอน



4. สารให้พองสลายตัวให้พองก๊าซ



5. ของผสมเกิดเป็นโฟมขยายตัวขึ้น และเกิดการเชื่อมโยงเป็นของแข็ง



รูปที่ 2.2 ลักษณะการหน่วงไฟของระบบอินตูดูเมสเซนต์ [9]

6. วิทยาศาสตร์ของแข็งเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Crosslinking)



รูปที่ 2.3 ลักษณะการเกิดโฟมของการหน่วงไฟระบบอินตูดูเมสเซนต์ [9]

2.2 เปลือกหอยแมลงภู

หอยแมลงภูจัดอยู่ในไฟลัมมอลลัสคา (*Phylum Mollusca*) เป็นหอยสองฝา สีของเปลือกหอยเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพของที่อยู่อาศัยคือ ถ้าอยู่ใต้น้ำตลอดเวลาเปลือกจะมีสีเขียวอมดำ ถ้าอยู่บริเวณน้ำขึ้นน้ำลงและโดนแสงแดดเปลือกจะมีสีเหลือง เปลือกด้านนอกมีสีเขียว ส่วนท้ายจะกว้างกว่าส่วนหน้า [10]



รูปที่ 2.4 เปลือกหอยแมลงภู่มะพร้าว [10]

2.2.1 โครงสร้างของเปลือกหอยแมลงภู่มะพร้าว

โครงสร้างของเปลือกหอยมีแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นองค์ประกอบหลักถึง 95% และมีวัสดุอินทรีย์ปริมาณเล็กน้อย แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นวัสดุอินทรีย์ที่ได้รับความสนใจว่าเป็นชีววัสดุในธรรมชาติชนิดหนึ่งที่สามารถให้ผลผลิตทางด้านอุตสาหกรรมที่หลากหลาย เช่น เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมสี และอุตสาหกรรมการแพทย์ ประเทศไทยมีการบริโภคและส่งออกหอยแมลงภู่มะพร้าวค่อนข้างมาก โดยเปลือกหอยเป็นส่วนที่ไม่มีประโยชน์จะถูกนำไปทิ้งเป็นขยะ เกิดปัญหาเรื่องมลพิษทางสิ่งแวดล้อม ดังนั้น หากเราสามารถนำเปลือกหอยที่เหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์ก็จะสามารถช่วยลดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมได้ กองฟิลิกส์สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติได้ทำการศึกษาวิเคราะห์ปริมาณธาตุของเปลือกหอยน้ำจืดและเปลือกหอยทะเล พบว่าปริมาณแคลเซียมในเปลือกหอยน้ำจืดและเปลือกหอยทะเลมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ปริมาณของสทรอนเซียมในเปลือกหอยทะเลสูงกว่าเปลือกหอยน้ำจืด ประมาณ 5 เท่า [11]

ตารางที่ 2.1 ปริมาณธาตุในเปลือกหอยน้ำจืดและเปลือกหอยทะเล [11]

เปลือกหอย	%CaCO ₃	%SrCO ₃	SrCO ₃ /CaCO ₃
น้ำจืด : หอยขม	84.51	0.084	0.00099
หอยโข่ง	92.82	0.118	0.00127
ทะเล : หอยลาย	97.32	0.337	0.00346
หอยแมลงภู่มะพร้าว	95.75	0.354	0.00370

2.2.2 ชั้นของเปลือกหอยแมลงภู่มะพร้าว

ชั้นของเปลือกหอยแมลงภู่มะพร้าวประกอบด้วย

1. เปลือกหอยชั้นนอก จะเป็นชั้นบางๆ เรียกว่า Periostracum ซึ่งประกอบด้วยรงควัตถุแสดงสีของเปลือกหอย และมีหน้าที่ป้องกันกรดคาร์บอนิกบริเวณรอบนอกไม่ให้เข้าไปทำลายเปลือกและเนื้อที่อยู่ภายใน

2. เปลือกหอยชั้นกลาง เกิดจากการอัดแน่นของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนต เรียกว่า Prismatic layer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เปลือกหอยชั้นใน เรียกว่า Nacreous layer มีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ เมื่อถูกแดดจะเป็นประกายสีรุ้ง

นอกจากนี้สำหรับหอยสองฝาจะมีส่วนที่เรียกว่า “Umbo” เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ยึดฝาทั้ง 2 ไว้ด้วยกัน เป็นบริเวณที่มีความหนาแน่นเป็นพิเศษ เพื่อป้องกันการกัดกร่อนของกรดคาร์บอนิกที่อยู่รอบนอก

2.2.3 การนำเปลือกหอยแมลงภู่มามาใช้ประโยชน์

1. ด้านตกแต่งเพื่อความสวยงาม เนื่องจากเปลือกหอยมีความโดดเด่นในด้านสีที่สวยงาม มีความมันวาว มีรูปทรงที่เป็นเอกลักษณ์ จึงมีการนำเปลือกหอยมาทำเป็นเครื่องประดับตกแต่ง เช่น ต่างหู สร้อยคอ เป็นต้น รวมทั้งนำมาประดิษฐ์ตกแต่งบ้านและสวน

2. ด้านการแพทย์ ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่หลากหลายที่ศึกษาการนำเปลือกหอยไปพัฒนาเป็นกระดูกเทียมเพื่อปลูกถ่ายในร่างกายมนุษย์

3. ด้านอุตสาหกรรม ในประเทศไทยมีเปลือกหอยเหลือทิ้งในปริมาณมากทำให้มีราคาถูก จึงมีการนำแคลเซียมคาร์บอเนตที่เป็นองค์ประกอบหลักในเปลือกหอยมาใช้เป็นสารตัวเติมเพิ่มเนื้อในอุตสาหกรรมพลาสติกและยางได้

2.2.4 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ จากเปลือกหอย [2]

$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ เตรียมได้หลากหลายวิธี เช่น กระบวนการสังเคราะห์แบบแห้งและกระบวนการสังเคราะห์แบบเปียก โดยกระบวนการสังเคราะห์แบบแห้งจะใช้อุณหภูมิที่สูงและใช้เวลานาน จึงนิยมสังเคราะห์แบบเปียกหรือแบบตกตะกอนเพราะสามารถสังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิต่ำเตรียมได้ง่ายและใช้เวลาไม่มาก

$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากเปลือกหอยและกรดฟอสฟอริก มีอะซิโตนเป็นตัวกลาง มีสมการดังนี้



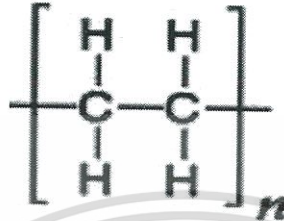
ตารางที่ 2.2 สมบัติทั่วไปของ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ [2]

สมบัติ	ค่าที่แสดง
ความหนาแน่น	2.31 g/cm ³
จุดวาบไฟ	เป็นวัสดุไม่ติดไฟ
ลักษณะ	เป็นผงสีขาว
อุณหภูมิการสลายตัว	ประมาณ 100-500°C เกิดการสลายตัวของโมเลกุลของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene; HDPE) [12]

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเกิดจากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม โดยทั่วไปพอลิเอทิลีนมีสีขาวขุ่น โปร่งแสง มีความลื่นมันในตัว เมื่อสัมผัสจะรู้สึกลื่น ยืดหยุ่นตัวได้ ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่ติดแม่พิมพ์ มีความเหนียว ทนความร้อนได้ไม่มาก แต่ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี เป็นฉนวนไฟฟ้า ใสสีผสมได้ง่าย มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำ จึงสามารถลอยน้ำได้



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของ HDPE [13]

2.3.1 สมบัติทั่วไป

- ยืดหยุ่นได้ดี เหนียวมากที่อุณหภูมิต่ำ
- มีความทนต่อสารเคมี
- หดตัวในแม่พิมพ์ได้ดีมาก ทำให้ถอดจากแม่พิมพ์ได้ง่าย
- เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมาก
- ทนต่อการซึมผ่านของไอน้ำ และก๊าซได้ดี

2.3.2 การนำไปใช้ประโยชน์

- บรรจุภัณฑ์ เช่น ขวดใส่สารเคมี ขวดน้ำ ถังเย็น
- ของเล่นเด็ก
- ชิ้นส่วนแบตเตอรี่
- ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์
- ฟิล์มห่อของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 สมบัติบางประการของ HDPE [13]

โครงสร้าง	ค่าทดสอบ
Crystalline (%)	60-80
Density (g/cm ³)	0.962-9.968
Melting point (°C)	128-135
Yield point (MPa)	28-40
Tensile modulus (MPa)	900-1200
Tensile strength (MPa)	25-45
Impact strength (kJ/m ²)	120
Elongation at break (%)	50-900

2.4 แกรไฟต์ (Graphite) [14]

แกรไฟต์เป็นอีกรูปหนึ่งของธาตุคาร์บอน มีลักษณะเป็นของแข็ง มีรูปผลึก เป็นแผ่นบางๆ ทึบแสง สีเทาเข้มถึงดำ เนื้ออ่อน เป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดี มักใช้ทำไส้ดินสอดำ เบ้าหลอมโลหะ น้ำมันหล่อลื่นบางชนิด ไส้ถ่านไฟฉาย ไส้ไฟอาร์ก ใช้เป็นตัวลดความเร็ว ช่วยควบคุมจำนวนอนุภาคนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ถูกนำมาใช้เมื่อ 4000 ปีก่อนคริสตกาล ในงานทาสี ตกแต่งเครื่องเซรามิกในทางตะวันออกเฉียงใต้ของยุโรป ได้มีการค้นพบแหล่งสะสมตัวของแร่แกรไฟต์ขนาดใหญ่มากที่รัฐคัมเบรีย ประเทศอังกฤษ แร่ที่พบมีลักษณะบริสุทธิ์ ไม่แข็ง แตกหักง่าย และมีรูปแบบการสะสมตัวอัดแน่นกัน



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของแกรไฟต์ [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

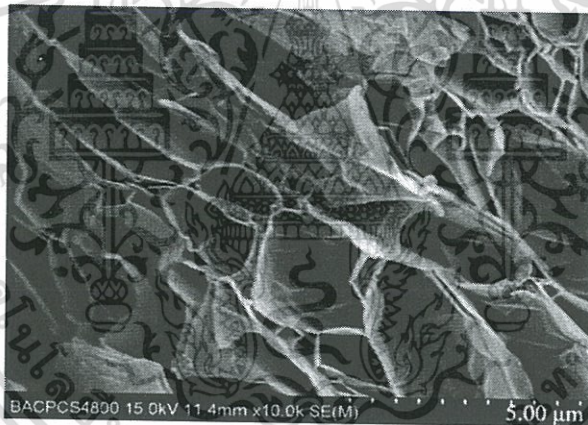
2.4.1 ประเภทแกรไฟต์

แร่แกรไฟต์ที่เกิดในแหล่งสะสม มี 3 ประเภท ได้แก่

- แร่แกรไฟต์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางสั้นๆ หน้าแผ่นเป็นรูปหกเหลี่ยม เมื่อแตกจะมนที่ขอบหรือมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ
- แร่แกรไฟต์ที่มีลักษณะอสัณฐาน มีลักษณะเป็นเม็ดละเอียด เกิดจากกระบวนการแปรสภาพของหินแปรของถ่านโดยความร้อนสูง เป็นขั้นสุดท้ายของการเกิดถ่านหิน บางครั้งเรียกว่า แอนทราไซท์ (Meta-anthracite)
- แร่แกรไฟต์ที่มีลักษณะเป็นก้อน เรียกว่า สายแกรไฟต์ เกิดขึ้นในช่องรอยแตกของสายแร่เป็นเนื้อเดียวกัน

2.4.2 แกรไฟต์ขยาย (Expanded graphite) [15]

แกรไฟต์ขยายเกิดจากสังเคราะห์โดยวิธี Chemical intercalation ของแกรไฟต์ธรรมชาติ และการขยายตัวอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูง แกรไฟต์ขยายเป็น Modified graphite ที่มีช่องว่างภายในอยู่ในช่วง 20-50 nm ซึ่งช่องว่างในชั้นของแกรไฟต์ขยายจะเพิ่มจาก 0.335-0.8 nm โดยประมาณ โครงสร้างของแกรไฟต์ขยายยังคงเหมือนแกรไฟต์ธรรมชาติแต่มีช่องว่างภายในที่ใหญ่กว่า



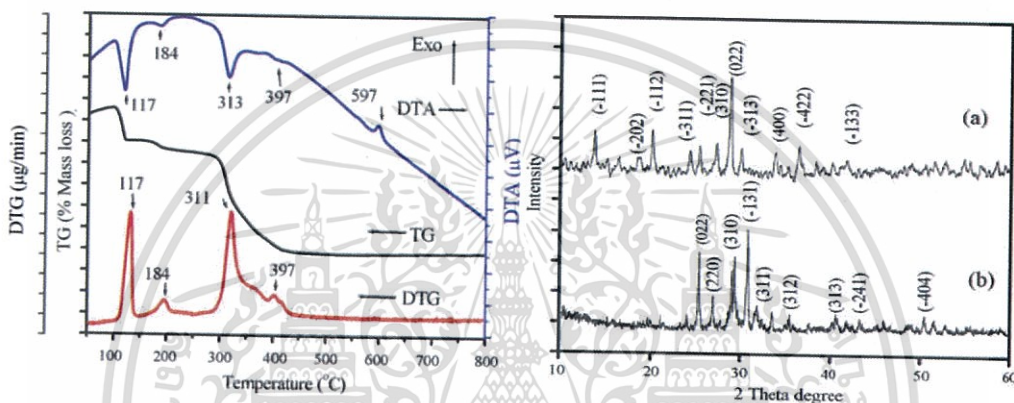
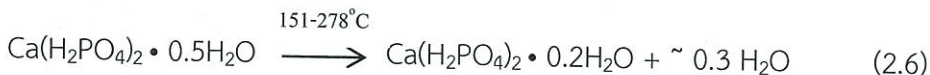
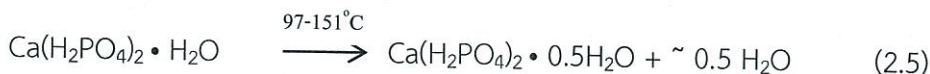
รูปที่ 2.7 สัณฐานวิทยา Expanded Graphite [15]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บรรจง บุญชม [2] ได้ศึกษาการเตรียม $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ซึ่งเตรียมได้จากแคลเซียมคาร์บอเนตและกรดฟอสฟอริกเป็นสารตั้งต้น มีอะซิโตนเป็นตัวกลาง ทำการปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที แล้วนำตะกอนที่ได้ไปกรอง จากนั้นทิ้งไว้ให้อะซิโตนระเหยที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ที่ได้มีลักษณะเป็นผง นำไปวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวด้วยเทคนิค TGA, วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD, ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) และศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย SEM ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่า สัณฐานวิทยาของ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ เป็นดังรูปที่ 2.8 วิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวด้วย TGA จากกราฟพบว่า $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ มีการสลายตัว 3 ช่วง ได้แก่ 97-151 °C, 151-278 °C และ 278-500 °C มีการหายไปของน้ำหนัก (Mass loss) 3.8, 2.1 และ 15.2% ตามลำดับ ซึ่งทั้ง 3 ช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสลายตัวนี้เป็นการสลายตัวของน้ำ ซึ่งคิดเป็น 0.53, 0.29 และ 2.15 โมลกุลของน้ำใน $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ดังสมการที่ 2.5-2.7



รูปที่ 2.8 กราฟการวิเคราะห์ TGA และ XRD ของ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ [2]

Atta Ur Rehman Shah และคณะ [16] ได้ทำการศึกษาผลของอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ (ATH) ต่อสมบัติเชิงกลของพอลิพอฟิลีน (PP) และ ATH คอมโพสิต ทำการศึกษาโดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่าง PP กับ ATH เป็น 93:5, 88:10, 83:15, 48:50 และใช้ Maleic anhydride grafted polypropylene (MAPP) เป็นสารคู่ควบ (Coupling agent) ในปริมาณ 2% สำหรับทุกสูตร นำมาผสมโดยใช้เครื่องผสมแบบอัดรีด (Extruder) แล้วนำมาขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป จากนั้นนำไปศึกษาสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแรงดึง, ความแข็งแรงโค้งงอ และศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา พบว่าเมื่อใส่ ATH ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตมีค่าลดลง เป็นผลมาจากการยึดติดที่ไม่ดีระหว่าง PP กับ ATH โดยสามารถยืนยันด้วยลักษณะของสัณฐานวิทยาที่ศึกษาได้

Qing Zhang และคณะ [17] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพที่เสริมกันของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) และเมลามีน (MA) เป็นสารหน่วงการติดไฟของพอลิออกซิเมทิลลีน (POM) ทำการศึกษาโดยขึ้นรูปคอมโพสิตด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) จากนั้นทำการทดสอบค่า UL-94 ซึ่งทำการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างสารหน่วงไฟระบบธรรมดาและระบบอินตุมเนสเซนซ์ซึ่งมีความแตกต่างกัน คือในระบบอินตุมเนสเซนซ์ จะมีการผสมสารหน่วงไฟในอัตราส่วน MA : APP : Novolac เท่ากับ 1:3:1 โดย MA ทำหน้าที่เป็นสารให้ฟอง, APP เป็นสารกลุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟอสฟอรัสเป็นสารให้กรด และเส้นใย Novolac เป็นสารให้คาร์บอน ซึ่งกลไกในการหน่วงไฟคือเกิดเป็นชั้นถ่านคาร์บอน ทำให้เกิดการป้องกันไม่ให้พอลิเมอร์สัมผัสกับออกซิเจนและความร้อน เมื่อนำมาทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 พบว่าได้ผลการทดลองเป็น V0 แสดงให้เห็นว่า เมื่อทำการจุดไฟแล้วการเผาไหม้สามารถหยุดเองได้ภายใน 10 วินาทีและไม่มีการหยดของเปลวไฟ แต่ในระบบธรรมดาซึ่งใช้ APP และ MA เป็นสารหน่วงไฟในอัตราส่วนที่เท่ากัน พบว่าสามารถดับไฟได้เอง แต่ใช้เวลานานไม่อยู่ในมาตรฐาน UL-94 ดังนั้นงานวิจัยจึงสรุปได้ว่าการทำงานของสารหน่วงไฟในระบบอินตุมเสเซนต์ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าการทำงานของสารหน่วงไฟระบบธรรมดา

Gang Bai และคณะ [18] ทำการศึกษาการทำงานร่วมกันของแกรไฟต์ขยาย (EG) กับสารหน่วงไฟในระบบอินตุมเสเซนต์เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล, ความสามารถในการหน่วงไฟ และการเสียสภาพเนื่องจากความร้อน โดยมีสารที่ทำหน้าที่ให้ฟอง และสารกลุ่มฟอสฟอรัสเป็นสารให้กรด (APP) ในรูปของไม้คอมโพสิต (WPCs) พบว่าการทำงานร่วมกันระหว่าง EG กับ IFR ที่อัตราส่วน 2:3 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้เพิ่มขึ้นทั้ง Tensile testing, Flexural testing และ Izod impact testing ดังตารางที่ 2.4 การเติม EG ลงไปทำให้ประสิทธิภาพของสารหน่วงไฟระบบอินตุมเสเซนต์ดีขึ้น เมื่อทดสอบ LOI พบว่ามีปริมาณการใช้ออกซิเจนในการทำให้วัสดุติดไฟสูงถึง 38.8% เมื่อทดสอบตามมาตรฐาน UL-94 พบว่าได้ผลการทดลองเป็น V0 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการจุดไฟ การเผาไหม้สามารถหยุดเองได้ภายใน 10 วินาทีและไม่มีการหยดของเปลวไฟ และทดสอบ TGA และ DTG พบการก่อดำของชั้นถ่านคาร์บอน ซึ่งเป็นฉนวนกันความร้อน ทำให้มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอื่น ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 สมบัติเชิงกลของแต่ละตัวอย่าง [18]

Sample	Tensile strength (MPa)	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (MPa)	Izod impact strength (kJ m ⁻²)
1	26.2	60.2	3627.3	2.3
2	21.3	51.0	2675.3	1.9
3	22.6	54.5	3376.5	2.3
4	23.9	57.2	3588.8	2.4
5	25.7	65.8	3892.9	2.7
6	23.2	58.1	3617.1	2.6
7	2.0	52.5	2788.2	2.2
8	23.8	56.8	3498.1	2.0
9	24.6	54.3	3101.6	1.9

ตารางที่ 2.5 ค่า LOI และ UL-94 ของแต่ละตัวอย่าง [18]

Sample	PP (g)	WF (g)	m-TMI-g-PP (g)	1010 (g)	EG (g)	APP (g)	CFA (g)	Ratio (EG/IFR)	LOI (%)	UL-94
1	40	60	9	1	0	0	0	-	22.3	-
2	40	60	9	1	25	0	0	-	29.4	V-0
3	40	60	9	1	20	4	1	4:1	34.5	V-0
4	40	60	9	1	15	8	2	3:2	35.2	V-0
5	40	60	9	1	10	12	3	2:3	38.8	V-0
6	40	60	9	1	5	16	4	1:4	32.5	V-0
7	40	60	9	1	0	20	5	-	28.0	V-1
8	40	60	9	1	0	25	0	-	26.7	V-0
9	40	60	9	1	0	0	25	-	24.9	-

Hongfang Zhu และคณะ [19] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพที่เสริมกันระหว่าง EG และ APP เพื่อเป็นสารหน่วงไฟให้กับ Polylactide (PLA) โดยมีการศึกษา LOI, TGA, SEM, X-ray spectroscopy (XPS) และ Cone calorimeter ในการทดสอบ PLA ที่มี 15% โดยน้ำหนักของ APP:EG พบว่าอัตราส่วน 1:3 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมเมื่อทดสอบ LOI พบว่ามีปริมาณการใช้ออกซิเจนในการทำให้วัสดุติดไฟสูงถึงสุด 36.5% และการทดสอบตามมาตรฐาน UL-94 เป็น V0 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการจุดไฟแล้วการเผาไหม้สามารถหยุดเองได้ภายใน 10 วินาที และไม่มีการหยดของเปลวไฟ ส่วนการทดสอบ TGA และ Cone calorimeter แสดงให้เห็นว่า APP:EG เมื่อทำงานร่วมกันสามารถชะลอการเสถียรภาพของวัสดุพอลิเมอร์ที่สูงกว่าอุณหภูมิ 520 °C โดยมีผลมาจากการเกิดขึ้นถ่านคาร์บอน ชั้นถ่านคาร์บอนจะทำหน้าที่ปกป้องพอลิเมอร์จากความร้อนที่จะเข้าสู่ภายใน ทำให้อัตราการสูญเสียมวลต่ำลงและเป็นสารหน่วงไฟที่มีประสิทธิภาพ

สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยสามารถเตรียมเป็นสารหน่วงไฟกลุ่มฟอสฟอรัสได้
- เมื่อปริมาณ ATH มากขึ้น ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของคอมโพลีมีคาลลดลง
- การทำงานร่วมกันระหว่าง APP กับ MA ในอัตราส่วนที่เหมาะสมช่วยเพิ่มสมบัติในการหน่วงไฟ
- การทำงานร่วมกันระหว่าง EG กับ สารหน่วงไฟในระบบอินตุมสเซนส์ ในอัตราส่วนที่เหมาะสมช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติการหน่วงไฟให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น
- อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่าง APP กับ EG ช่วยชะลอการเสถียรภาพของวัสดุพอลิเมอร์ และเป็นสารหน่วงไฟที่มีประสิทธิภาพ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสารหน่วงไฟในระบบเดี่ยวและมีการพัฒนาเป็นระบบอินตุมสเซนส์ มีการศึกษาอัตราส่วนอ้างอิงจากงานวิจัยของ Qing Zhang และคณะ [17] คือ MA : APP : Novolac เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เพื่อการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ 1:3:1 โดยใช้ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (CaHP) เป็นสารให้กรดแทน APP, EG เป็นสารให้คาร์บอนแทนเส้นใย Novolac และ MA เป็นสารให้ฟอง พร้อมทั้งมีการเพิ่มและลดปริมาณของ CaHP:EG เพื่อหาอัตราส่วนที่ให้ประสิทธิภาพการห่อวงไฟดีที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ให้มีสมบัติทนไฟ โดยใช้สารหน่วงการติดไฟจากธรรมชาติ ซึ่งปรับปรุงมาจากแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่ได้จากเปลือกหอยทำปฏิกิริยากับกรดฟอสฟอริก เพื่อสังเคราะห์เป็น $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ จากธรรมชาติ โดยคาดว่าจะน่าจะมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ทดแทนสารหน่วงไฟกลุ่มฟอสฟอรัส เพราะมีฟอสเฟตและน้ำเป็นองค์ประกอบในโครงสร้าง และใช้เป็นองค์ประกอบในการหน่วงไฟของระบบอินตูลูเมสเซนส์

ตอนที่ 1 ศึกษาการใช้ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ เป็นสารหน่วงไฟจากธรรมชาติในระบบเดี่ยว ในปริมาณต่างๆ

ตอนที่ 2 ศึกษาปริมาณของ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ เป็นสารหน่วงไฟในระบบอินตูลูเมสเซนส์

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง เกรดฉีดขึ้นรูป HD1600J, บริษัทพีทีที โกลบอล เคมิคอล จำกัด สมบัติบางประการแสดงตามตารางที่ 3.1
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) เกรดการค้า
3. เมลามีน เกรดการค้า, บริษัทไทยเคเค จำกัด สมบัติบางประการแสดงตามตารางที่ 3.2
4. อะซิโตน (Acetone) เกรดการค้า, บริษัทเซนพ้อย จำกัด
5. กรดฟอสฟอริกเข้มข้น 85% (Phosphoric acid) เกรดการค้า, บริษัทแกมมาโก้ (ประเทศไทย) จำกัด
6. แกรไฟต์ขยาย เกรดการค้า, บริษัทเคมีมิน จำกัด สมบัติบางประการแสดงตามตารางที่ 3.3
7. โพแทสเซียมโบรไมด์ (Potassium bromide), Fisher scientific Co., Ltd.
8. เปลือกหอยแมลงภู่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมอาหาร (และเนื้อหอยแมลงภู่) จากอำเภอลองด่าน จังหวัดสมุทรปราการ

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ HDPE*

สมบัติ	InnoPlus HD1600J	หน่วย	วิธีทดสอบ
ดัชนีการไหล (Melt index, 190 °C / 2.16 kg)	12	g/10min	ASTM D 1238
ความหนาแน่น (Density)	0.958	g/cm ³	ASTM D 1505
จุดหลอมเหลว (Melting point)	129	°C	ASTM D 3418
การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)	210	%	ASTM D 638
มอดูลัสโค้งงอ (Flexural modulus)	1323	MPa	ASTM D790
ความแข็งแรงกระแทก (Notched izod impact strength)	30	J/m	ASTM D 256

*ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ MA*

สมบัติ	MA	หน่วย
ลักษณะ (Appearance)	ผงสีขาว	-
ความชื้น (Moisture content)	0.1	% (w/w)
ค่า pH	7.5-9.5	-
ปริมาณ MA	99.8	% (w/w)
ความหนาแน่น (Density)	1.57	g/cm ³

*ข้อมูลจากบริษัทผู้จำหน่าย

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของ Expanded graphite*

สมบัติ	Expanded Graphite	หน่วย
ลักษณะ (Appearance)	แผ่นสีดำ, ไม่มีกลิ่น	-
ความชื้น (Moisture content)	1.0	% Maximum
ค่า pH	7±1	-
ความหนาแน่น (Density)	0.5-0.65	g/cm ³

*ข้อมูลจากบริษัทผู้จำหน่าย

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องร่อนแยกขนาด (Sieve shaker, รุ่น 01409023: Retsch Co., Ltd.)
2. เครื่องผสมแบบปิด (รุ่น MX500-D75L90, Chareon Tut Co., Ltd.)
3. เครื่องฉีดขึ้นรูป (รุ่น TTI 200/80, บริษัทประทานกิจการ จำกัด)
4. เครื่องปั๊มลม (รุ่น Bebicon 400, Hitachi Co., Ltd.)
5. เครื่อง Thermal gravimetric analyzer (TGA, รุ่น TG 209 F3 Tarsus®, Netzsch Co., Ltd.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เครื่อง Differential scanning calorimeter (รุ่น DSC 2 Mettler Toledo Co., Ltd.)
7. เครื่อง X-ray diffractometer (รุ่น D8 Advance, Bruker AXS Co., Ltd.)
8. เครื่อง X-ray fluorescence spectrometer (รุ่น SRS3400 Bruker AXS Co., Ltd.)
9. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM, รุ่น LR5K, Lloyd Instrument Ltd.)
10. เครื่องวัดความแข็งกด (รุ่น DSTFDDR, Italia Co., Ltd.)
11. เครื่องทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทก (รุ่น Yasuda 199311, Yasuda Seiki Seisakusho Ltd.)
12. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM รุ่น JSM-5410LV, JEOL Co., Ltd.)
13. ตู้อบลมร้อน (Universal oven, รุ่น ML204, Memmert (Germany) Co., Ltd.)
14. เครื่องทำรอยบาก (Ceast, รุ่น Yasuda No. 7686, Yasuda Seiki Seisakusho Ltd.)
15. เครื่องบดเม็ดพลาสติก (Grinder, Bosco Engineering Co., Ltd.)
16. ตะแกรงร่อนขนาด 100 และ 150 mesh
17. เครื่อง Fourier transform infrared spectrometer (รุ่น FTIR Spectrum Gx, Perkin Elmer Co., Ltd.)
18. เครื่องบดมิลล์ (Ball mill)
19. เครื่องปั่นกวน
20. บริภัณฑ์เครื่องแก้ว
21. ไมโครมิเตอร์ และเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ (Vernier caliper)
22. ตะเกียงบุนเสน
23. เครื่องชั่งละเอียด
24. ชุดกรองลดความดันแบบสุญญากาศ
25. ขวดพิคโนมิเตอร์ (Pycnometer)

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

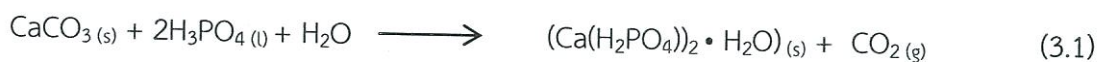
ศึกษาการเตรียมเปลือกหอยแมลงภู และ การสังเคราะห์ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$

1.) การเตรียมเปลือกหอย นำเปลือกหอยมาล้างด้วยน้ำสะอาดเพื่อกำจัดสิ่งสกปรก จากนั้นนำมาแช่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อกำจัดกากโปรตีนที่ปนเปื้อนออก หลังจากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำสะอาด และนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

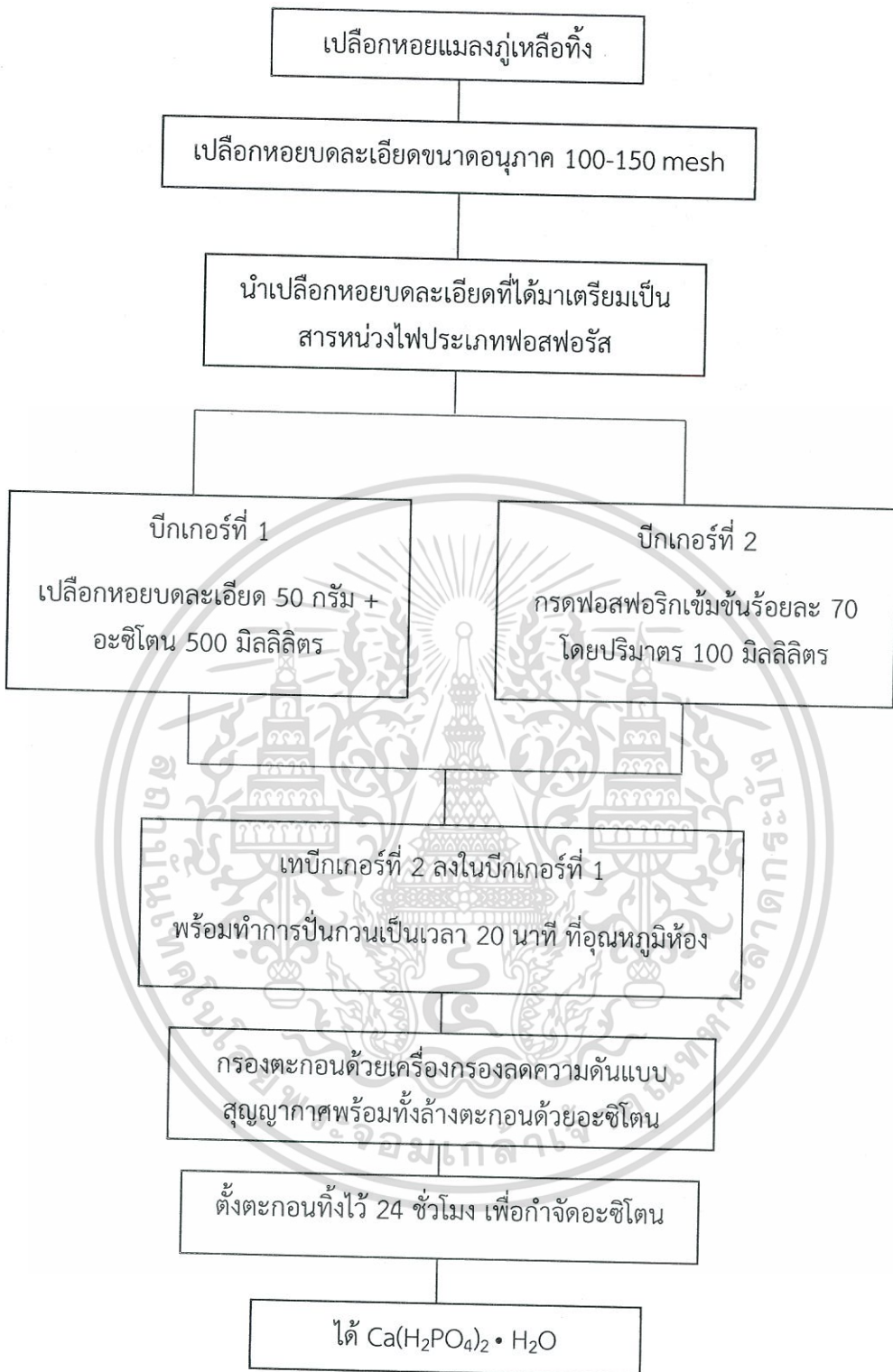
2.) การเตรียมเปลือกหอยเพื่อแยกขนาดอนุภาค นำเปลือกหอยที่ผ่านขั้นตอนการล้างทำความสะอาดแล้วมาบดด้วยเครื่องบด ทำให้เปลือกหอยแตกเป็นชิ้นขนาดเล็ก แล้วนำเปลือกหอยที่ได้มาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดมิลล์ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำเปลือกหอยบดละเอียดที่ได้มาทำการร่อนแยกขนาด โดยใช้เครื่องร่อนที่มีตะแกรงร่อนมาตรฐานขนาด 100 -150 mesh

3.) การเตรียม $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ จากเปลือกหอยแมลงภู [2] นำเปลือกหอยที่บดแล้วมา 50 กรัมใส่ในบีกเกอร์ที่ 1 (ขนาด 1000 มิลลิลิตร) และใช้อะซิโตนเป็นตัวกลางประมาณ 500 มิลลิลิตร นำบีกเกอร์ที่ 1 ไปวางบนเครื่องปั่นกวนในตู้ดูดควัน ต่อมานำกรดฟอสฟอริกเข้มข้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อยละ 70 ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ที่ 2 (ขนาด 250 มิลลิลิตร) จากนั้นค่อยๆ เทสารในบีกเกอร์ที่ 2 ลงในบีกเกอร์ที่ 1 จนหมด พร้อมทั้งทำการปั่นกวนเป็นเวลา 20 นาที ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปกรองตะกอนด้วยชุดกรองลดความดันแบบสุญญากาศพร้อมทั้งล้างตะกอนด้วยอะซิโตนเพื่อชะล้างกรดฟอสฟอริกที่ไม่ทำปฏิกิริยาออก ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อกำจัดอะซิโตนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แผนผังการเตรียม $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ จากเปลือกหอยแมลงภู่อเลื้อยแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 1 ศึกษาการใช้ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ เป็นสารหน่วงไฟจากธรรมชาติในระบบเดี่ยว ในปริมาณต่างๆ แสดงตามตารางที่ 3.4 ผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด โดยตั้งสภาวะของเครื่องดังนี้

- อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม 185 °C
- ความเร็วรอบ (Rotor speed) 40 rpm
- เวลาที่ใช้ในการผสม 15 min

นำสูตรที่ผ่านการผสมแล้ว ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปบดให้มีขนาดเล็กเพื่อนำไปฉีดขึ้นรูปต่อไป

ตารางที่ 3.4 สูตรผสมที่เตรียมเทียบเป็นร้อยละใน HDPE

% CaHP โดยน้ำหนัก	อัตราส่วน HDPE : CaHP	ส่วนประกอบ (โดยน้ำหนัก)	
		HDPE	CaHP จากเปลือกหอย
0	5:0	100	0
20	4:1	80	20
40	3:2	60	40
60	2:3	40	60

*หมายเหตุ $(\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O})$ ใช้ตัวย่อคือ CaHP

ตอนที่ 2 ศึกษาปริมาณของ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ เป็นสารหน่วงไฟในระบบอินตุมเอสเซนส์ สารหน่วงไฟในระบบอินตุมเอสเซนส์ในงานทดลองนี้ประกอบด้วย 3 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ สารกลุ่มฟอสฟอรัส (CaHP) สารให้คาร์บอน (EG) และสารให้ฟอง (MA) โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง HDPE:IFR เป็น 70:30 โดยน้ำหนัก และกำหนดปริมาณ MA ให้คงที่ที่ 6 % โดยน้ำหนัก สูตรผสมแสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 สูตรผสมที่เตรียมในระบบอินตุมเอสเซนส์จากธรรมชาติ

สูตร	อัตราส่วน CaHP : EG	HDPE	MA	CaHP จากเปลือกหอย	EG
1	0:0 (Control)	100	0	0	0
2	2:1	70	6	16	8
3	3:1	70	6	18	6
4	4:1	70	6	19.2	4.8
5	5:1	70	6	20	4

*หมายเหตุ

- $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ใช้ตัวย่อคือ CaHP
- Expanded graphite ใช้ตัวย่อคือ EG
- Ammonium polyphosphate ใช้ตัวย่อคือ APP
- Melamine ใช้ตัวย่อคือ MA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 กระบวนการฉีดขึ้นรูป

นำพลาสติกผสมสูตรที่บดแล้วไปฉีดขึ้นรูปโดยใช้เครื่องฉีดขึ้นรูป โดยใช้อุณหภูมิในการฉีดขึ้นรูปอยู่ที่ 190, 185, 180 °C ใช้ความดัน 50, 55, 60 kg/cm² และใช้เวลาในการหล่อเย็น (Cooling) 300 วินาที

ทำการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างและทำการตัดแต่งชิ้นงานที่ฉีดขึ้นรูป เพื่อนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ

3.5 การวิเคราะห์และการทดสอบ

3.5.1 การวิเคราะห์ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ที่เตรียมได้จากเปลือกหอยแมลงภู

3.5.1.1 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$

นำผง $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ มาวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน โดยทำการอัดเม็ดร่วมกับ KBr ซึ่งใช้ FT-IR ในช่วงเลขคลื่น 400 cm⁻¹ ถึง 4000 cm⁻¹

3.5.1.2 การวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวของ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$

นำผง $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ มาวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวขององค์ประกอบต่างๆ โดยใช้เครื่อง TGA ใช้น้ำหนักสารตัวอย่างประมาณ 5-10 มิลลิกรัม ให้ความร้อนด้วยอัตรา 10 °C/min จากอุณหภูมิ 20-500 °C ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน และอุณหภูมิ 500-900 °C ภายใต้บรรยากาศของออกซิเจน นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาการสลายตัวขององค์ประกอบที่อุณหภูมิต่างๆ

3.5.1.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$

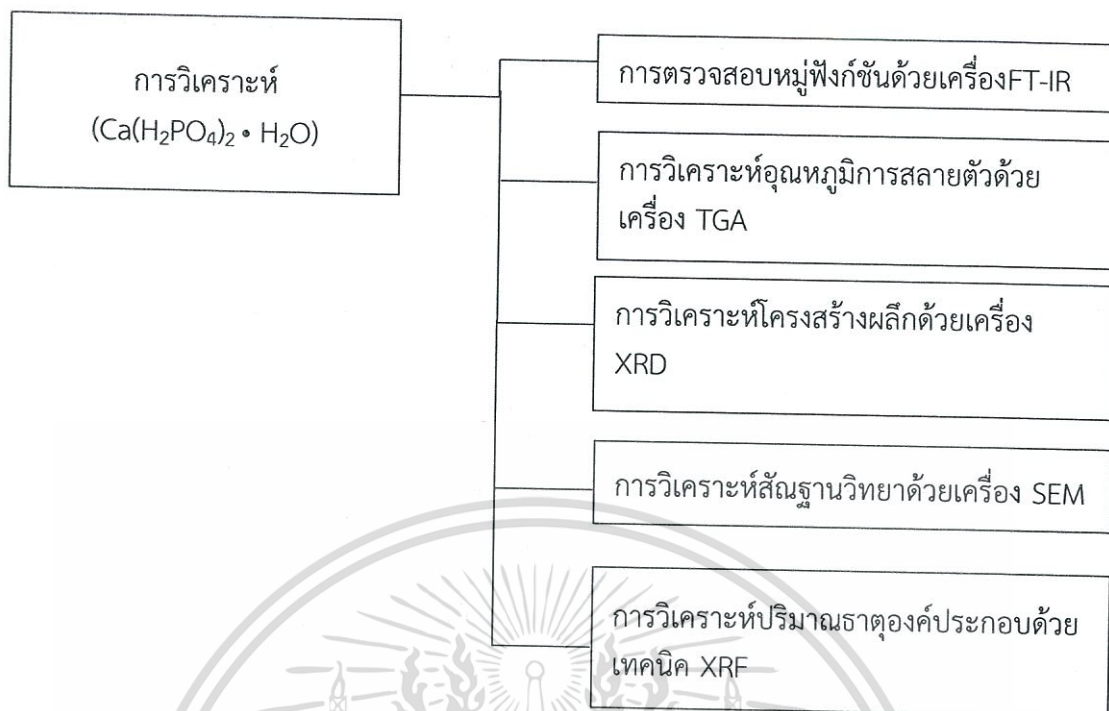
นำผง $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ มาตรวจวิเคราะห์โครงสร้างผลึก โดยใช้เครื่อง XRD ใช้น้ำหนักของสารตัวอย่างประมาณ 1-2 กรัม ต้องมีผิวเรียบและมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 40 ไมโครเมตร

3.5.1.4 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$

นำผง $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ โรยลงบนคาร์บอนเทป ก่อนนำไปติดบนสตั๊ป (Stub) จากนั้นเคลือบด้วยทองคำ แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วย SEM

3.5.1.5 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบของ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$

นำผง $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ มาตรวจวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบ ใช้น้ำหนักของสารตัวอย่างประมาณ 0.5 กรัม ผสมกับบอริก 4.5 กรัม นำไปอัดเม็ดแล้วนำไปวิเคราะห์โดยเครื่อง XRF



รูปที่ 3.2 แผนผังการวิเคราะห์ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ จากเปลือกหอยแมลงภู่

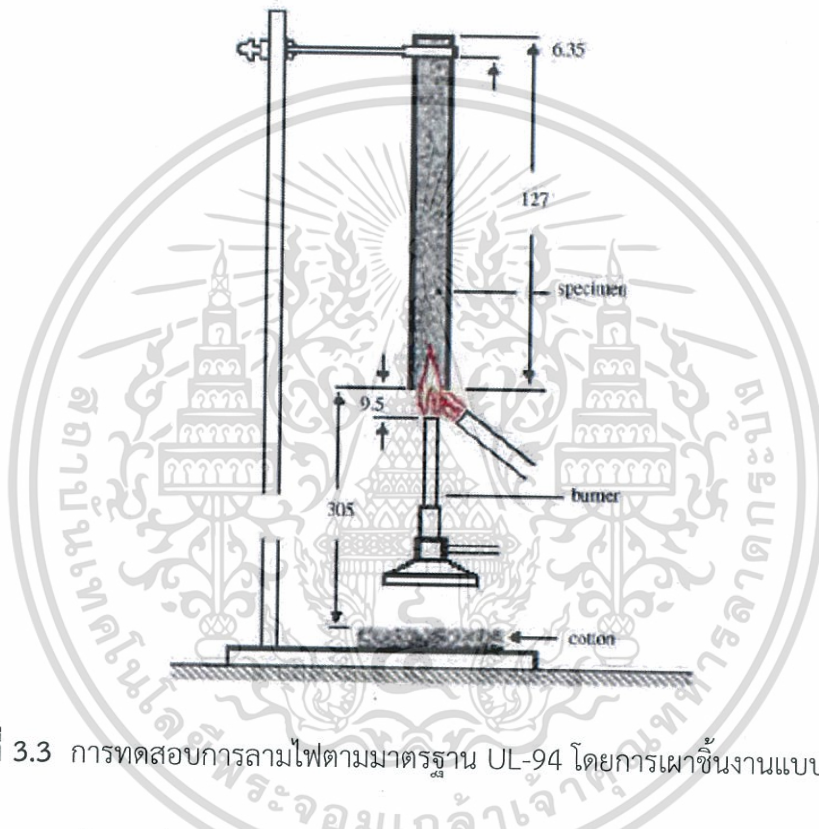
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การทดสอบสมบัติต่างๆ

3.6.1 การลามไฟ [20, 21]

3.6.1.1 การทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 (Vertical testing)

มาตรฐานการทดสอบการลามไฟของพลาสติกหรือยาง ใช้ชิ้นงานทดสอบขนาด $125 \times 13 \times 13 \text{ mm}^3$ จำนวน 5 ชิ้น โดยทำการเผาแบบแนวตั้ง ใช้เปลวไฟสีน้ำเงิน ความสูงของเปลวไฟ 20 mm เผาทำมุม 45 องศา กับชิ้นงานเป็นเวลา 10 วินาที จากนั้นนำเปลวไฟออกจากชิ้นงาน พร้อมทั้งสังเกตการติดไฟที่เกิดขึ้นตามเกณฑ์การแบ่งกลุ่มพฤติกรรมของวัสดุต่อการติดไฟตามมาตรฐาน UL-94 ดังตารางที่ 3.6



รูปที่ 3.3 การทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 โดยการเผาชิ้นงานแบบแนวตั้ง

ตารางที่ 3.6 เกณฑ์การแบ่งกลุ่มพฤติกรรมของวัสดุต่อการติดไฟตามมาตรฐาน UL-94

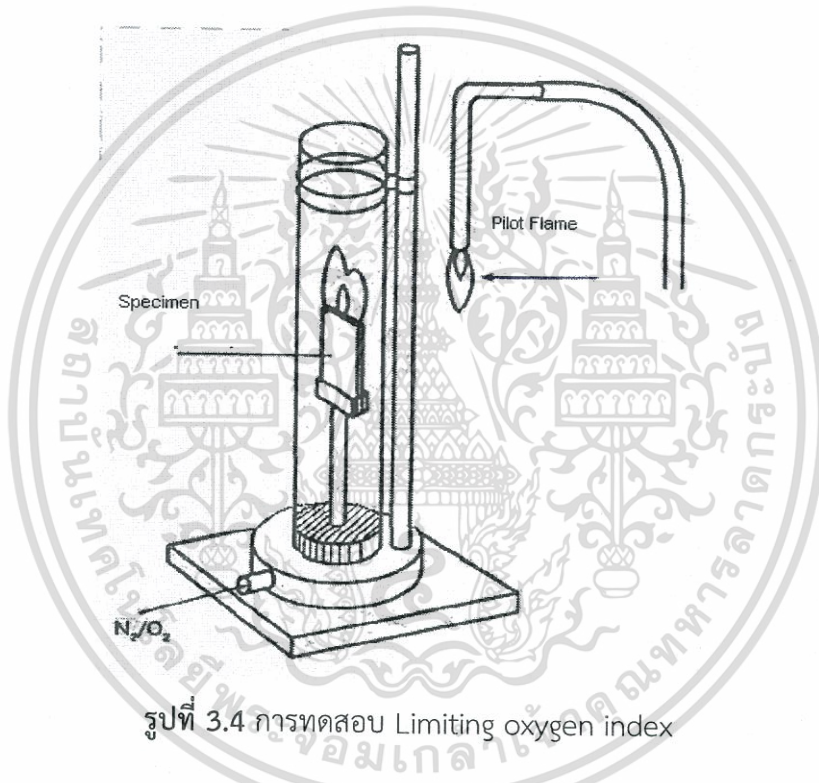
หลักเกณฑ์การแบ่งกลุ่มตามมาตรฐาน UL-94	
UL-94 V0	การเผาไหม้หยุดภายใน 10 วินาที โดยไม่มีการหยดของเปลวไฟ
UL-94 V1	การเผาไหม้หยุดภายใน 60 วินาที โดยไม่มีการหยดของเปลวไฟ
UL-94 V2	การเผาไหม้หยุดภายใน 60 วินาที โดยมีการหยดของเปลวไฟ

โดยปกติการต้านทานการลามไฟหรือการเผาไหม้วัสดุตามมาตรฐาน UL-94 เรียงตามลำดับคือ $V2 < V1 < V0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.1.2 การหาค่า Limiting oxygen index (LOI)

Limiting oxygen index (LOI) หรือ Oxygen index (OI) คือปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนที่ต่ำที่สุด (Minimum oxygen concentration) ที่ทำให้วัสดุเกิดการติดไฟอย่างต่อเนื่อง ภายใต้บรรยากาศที่มีการไหลของออกซิเจนและไนโตรเจน ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2863 โดยวิธีการทดสอบจะวางชิ้นงานตามแนวตั้งของหลอดแก้วและติดตัวชิ้นงานกับตัวล๊อค จากนั้นฉีดก๊าซผสมระหว่างก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจนเข้าไปที่ฐานของหลอดแก้วอย่างต่อเนื่องในอัตราส่วนที่ควบคุม โดยก๊าซจะออกตรงช่องว่างบริเวณด้านบนของหลอดแก้ว จากนั้นนำเปลวไฟมาจ่อตรงส่วนบนสุดของชิ้นงานที่ทดสอบ ดังรูปที่ 3.4 เพื่อให้เกิดการเผาไหม้เหมือนกับการจุดเทียนไข ถ้าไม่เกิดการลุกไหม้ให้เพิ่มปริมาณออกซิเจนจนกระทั่งชิ้นงานติดไฟ โดยการรายงานจะรายงานเป็นเปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนที่ทำให้ชิ้นงานติดไฟ ดังตารางที่ 3.7



รูปที่ 3.4 การทดสอบ Limiting oxygen index

ตารางที่ 3.7 เกณฑ์การแบ่งกลุ่มพฤติกรรมของวัสดุต่อการติดไฟตามมาตรฐาน LOI

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.2 สมบัติเชิงกล [22]

3.6.2.1 ความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอ

ความแข็งแรงโค้งงอ เป็นค่าความเค้นที่ได้จากการทดสอบ เกิดจากการงอตัวโดยใช้ หัวกด (Loading pin) ซึ่งกดลงตั้งฉากกับชิ้นทดสอบที่อยู่ในลักษณะแนวนอน โดยมีตัวรองรับ (Supporting jig) เป็นตัวกำหนดช่วงห่าง (Span) การทดสอบแบบนี้ชิ้นงานจะได้รับทั้งแรงเค้นดึง (Tensile stress) และแรงเค้นกด (Compressive stress) ซึ่งแรงเค้นกดจะเกิดขึ้นบนชิ้นงานที่ทดสอบ ส่วนแรงเค้นดึงจะเกิดได้ชิ้นงานที่ทดสอบ 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 เป็นการทดสอบความเค้น โดยมีตัวกด สำหรับแรงกด 1 จุด ซึ่งอยู่ด้านบนชิ้นงาน และมีตัวรองรับที่กำหนดระยะห่างอยู่ด้านล่างชิ้นงาน ทดสอบ 2 จุด ดังรูปที่ 3.6

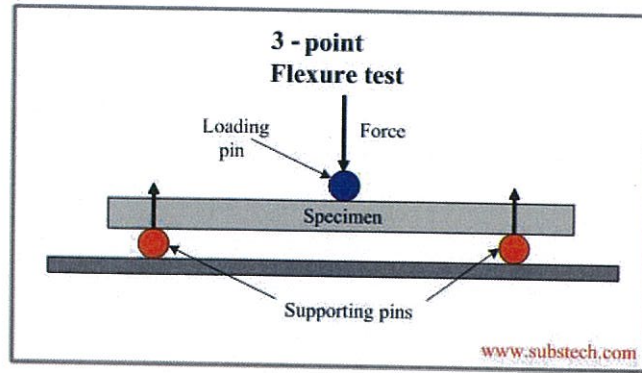
ความแข็งแรงโค้งงอ คือความเค้นมากที่สุดหรือความเค้นโค้งงอ (Maximum stress or Flexural stress: σ_{max}) ที่เกิดตรงกลางชิ้นงานที่ทดสอบตรงส่วนผิวนอก หาได้ดังสมการที่ 3.2

$$\text{Flexural strength} = \frac{3FL}{2Wh^2} \quad (3.2)$$

มอดุลัสโค้งงอ คือระยะที่ชิ้นงานโค้งงอ เมื่อถูกกดด้วยแรง สามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 3.3

$$\text{Flexural modulus} = \frac{L^3 F}{4Wh^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta d} \quad (3.3)$$

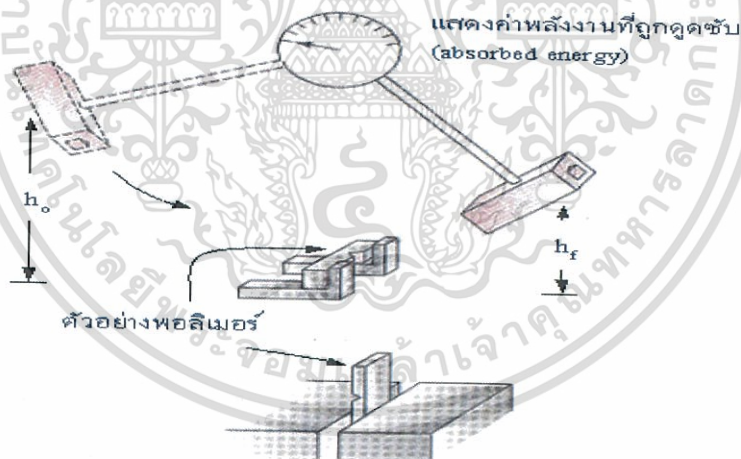
- เมื่อ
- F คือแรงกดสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการโค้งงอ มีหน่วยเป็นนิวตัน (N)
 - L คือระยะห่างระหว่างตำแหน่งของวัสดุที่รองรับชิ้นงานทดสอบ (Span length)
 - W คือความกว้างของชิ้นงานที่ทดสอบ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)
 - h คือความสูงของชิ้นงาน มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)
 - ΔF คือผลต่างของแรงกดในช่วงความชันเป็นเส้นตรง มีหน่วยเป็นนิวตัน (N)
 - Δd คือระยะโค้งงอ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)



รูปที่ 3.5 การทดสอบการทนแรงโค้งงอแบบ 3 จุด [22]

3.6.2.2 ความทนต่อแรงกระแทก

ความทนต่อแรงกระแทก เป็นการวัดความสามารถในการดูดกลืนพลังงานของวัสดุภายใต้แรงกระแทก ความทนต่อแรงกระแทกมักจะสัมพันธ์กับค่าความเหนียว (Toughness) การทดสอบสมบัติความทนต่อแรงกระแทก เป็นการทดสอบเชิงกลในลักษณะการได้รับแรงกระทำอย่างทันทีทันใด ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 256 ซึ่งเป็นแบบไอซอด (Izod type) ขึ้นงานตัวอย่าง 10 ชิ้น ทำการบากชิ้นงานที่นำมาทดสอบเป็นรูปตัววี (V notch) โดยมีรัศมีร่องบาก (Root radius) 0.254 mm และมีความลึก 2.54 mm



รูปที่ 3.6 ลักษณะของตัวอย่างและวิธีการทดสอบความทนต่อแรงกระแทก [22]

3.6.2.3 การทดสอบความแข็งกด

การทดสอบความแข็งแบบ Durometer การใช้ Durometer วัดความแข็งที่ผิวของพอลิเมอร์จะทำโดยการวางชิ้นงานบนผิวเรียบ กดหัวเข็มลงบนชิ้นงานจนกระทั่งสุดระยะของหัวเข็มอ่านค่าความแข็งจากหน้าปัด ระยะเวลาคงที่ (ประมาณ 10 วินาที) ค่าที่ได้ไม่มีหน่วย ความหนาของชิ้นงานไม่น้อยกว่า $\frac{1}{4}$ นิ้ว โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2240

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.3 สมบัติทางกายภาพ

3.6.3.1 ความหนาแน่น [22]

ความหนาแน่น เป็นการวัดมวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร หากความหนาแน่นของชิ้นงาน โดยใช้ชิ้นงานทดสอบจำนวน 5 ชิ้น โดยการชั่งน้ำหนักชิ้นงานด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง แล้วหาปริมาตรชิ้นงาน จากนั้นแทนค่าลงในสมการเพื่อหาความหนาแน่น ดังสมการที่ 3.4

$$\text{Density} = \frac{M}{V} \quad (3.4)$$

เมื่อ D คือความหนาแน่นของวัตถุ มีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3)
M คือมวลรวมของวัตถุ มีหน่วยเป็นกรัม (g)
V คือปริมาตรรวมของวัตถุ มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร (cm^3)

การวัดค่าความถ่วงจำเพาะ [23]

ตามมาตรฐาน ASTM D 792 สามารถทำได้ 2 วิธี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะรูปทรง (Form) ของวัสดุที่จะทดสอบ โดยวิธีที่ 1 (Method A) จะใช้กับวัสดุที่อยู่ในรูปของ Sheet, Rods, Tubes หรือชิ้นงานที่ขึ้นรูปแล้ว ในขณะที่วิธีที่ 2 (Method B) จะพัฒนาขึ้นมาสำหรับใช้กับวัสดุที่อยู่ในรูปของผง (Powder) หรือเกล็ด (Flakes) หรือเม็ดพลาสติก (Pellets) ที่ยังไม่ได้ขึ้นรูป

ตั้งข้อมูลที่ได้กล่าวมาข้างต้น ในงานวิจัยนี้หาความถ่วงจำเพาะของ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ โดยวิธีที่ 2 เนื่องจากสารอยู่ในรูปผง

การทดสอบ Specific gravity วิธีที่ 2 (Method B)

วิธีนี้ต้องการใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า Pycnometer โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. ชั่งน้ำหนักเปล่าของ Pycnometer
 2. เติมน้ำลงใน Pycnometer จากนั้นชั่งน้ำหนักของ Pycnometer รวมกับน้ำหนักของน้ำ
 3. ล้างทำความสะอาดและทำ Pycnometer ให้แห้ง
 4. เติมวัสดุที่จะทดสอบลงไปประมาณ 1-5 กรัม จากนั้นชั่งน้ำหนักของ Pycnometer รวมกับน้ำของหนักวัสดุ
 5. เติมน้ำลงไป ใน Pycnometer ดังกล่าว ชั่งน้ำหนักของ Pycnometer รวมกับน้ำหนักของน้ำและน้ำหนักวัสดุที่ทดสอบ
- จากนั้นคำนวณหา Specific gravity ของผงหรือเม็ด ได้ดังนี้

$$\text{Specific gravity} = \frac{a}{a+b-m} \quad (3.5)$$

เมื่อ a = น้ำหนักวัสดุทดสอบ (ซึ่งมีค่าน้ำหนักของ Pycnometer รวมกับน้ำหนักของวัสดุที่ทดสอบลบออกด้วยน้ำหนักของ Pycnometer เปล่า)

b = น้ำหนักของ Pycnometer รวมกับน้ำหนักของน้ำ

m = น้ำหนักของ Pycnometer รวมกับน้ำหนักของวัสดุทดสอบและน้ำหนักของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ} = \frac{\text{ความหนาแน่นสาร}}{\text{ความหนาแน่นน้ำ}} \quad (3.6)$$

3.6.3.2 สันฐานวิทยา [22]

การศึกษาลักษณะทางสันฐานวิทยาของพลาสติกด้วย SEM เป็นการส่องดูลักษณะพื้นผิวของวัสดุอย่างละเอียด เพื่อดูการกระจายตัวของ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ โดยนำชิ้นงานตัวอย่างมาแช่ในไตรเจนเหลวเป็นเวลา 30 นาที แล้วทำการหักชิ้นงานทันทีที่อุณหภูมิต่ำ จากนั้นนำตัวอย่างมาเคลือบผิวหน้าด้วยทองคำ แล้วจึงนำไปวิเคราะห์เพื่อศึกษาพื้นผิวของชิ้นงาน

3.6.4 สมบัติทางความร้อน

3.6.4.1 Differential scanning calorimetry (DSC) [24, 25]

DSC เป็นเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับการวัดอัตราการไหลของความร้อน (Heat flow) ที่ให้แก่สารตัวอย่างเทียบกับสารอ้างอิงที่เป็นฟังก์ชันกับเวลาหรืออุณหภูมิ ทำการทดสอบภายใต้สภาวะดังนี้

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

สามารถคำนวณค่าองศาความเป็นผลึก (Degree of crystallinity; X_c) ดังสมการที่ 3.7

$$\text{Degree of crystallinity (\%)} = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} \times \frac{100}{\% \text{ของ HDPE ในวัสดุ}} \times 100 \quad (3.7)$$

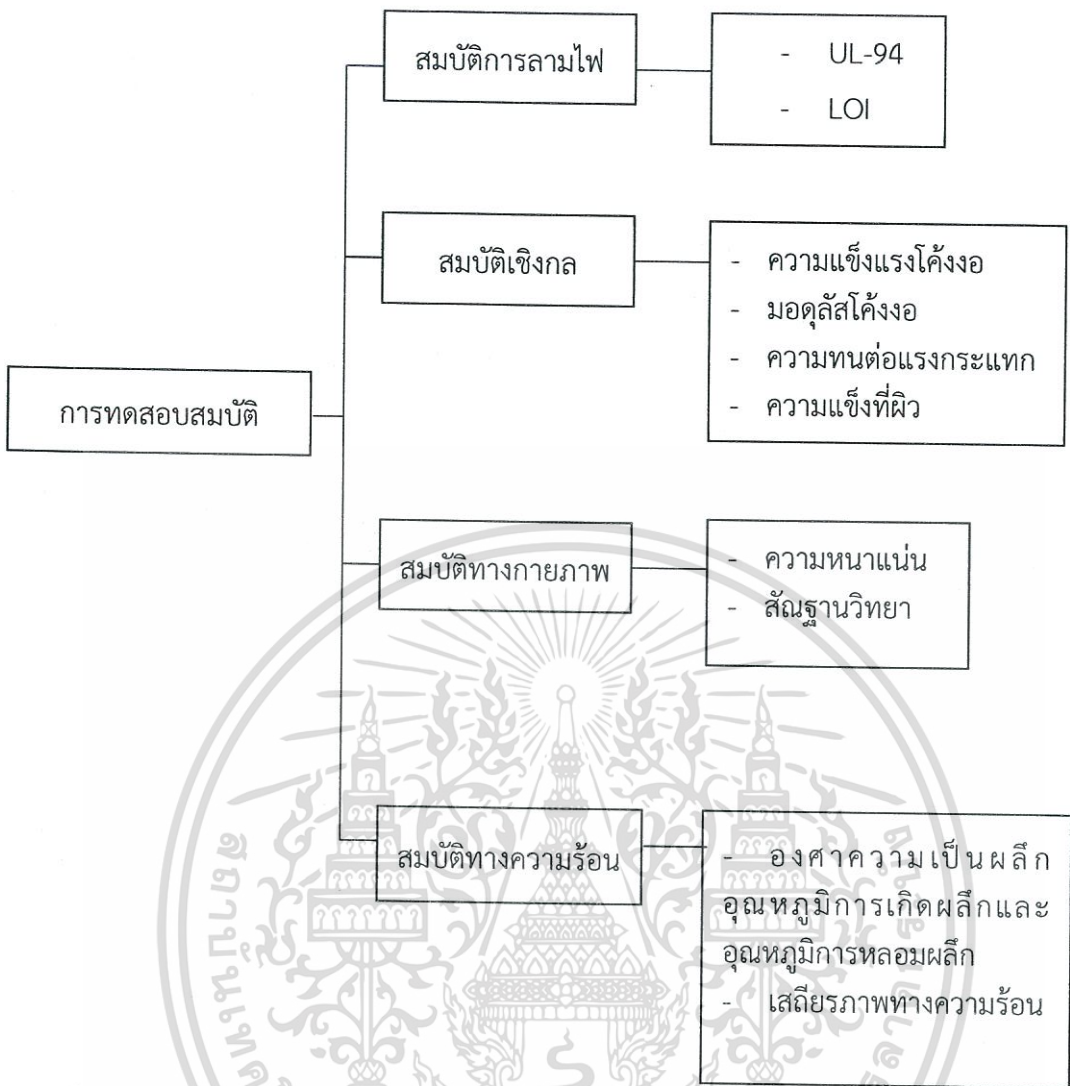
เมื่อ ΔH_f คือเอนทาลปี (Enthalpy) ของการหลอมเหลวพอลิเมอร์
 ΔH_f^0 คือเอนทาลปีของการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ที่มีผลึก 100% โดยมีค่าเท่ากับ 293.6 J/g

3.6.4.2 Thermogravimetric analysis (TGA) [26]

TGA เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของตัวอย่าง โดยบดตัวอย่างให้มีขนาดเล็กและนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เตรียมตัวอย่างทดสอบประมาณ 15 มิลลิกรัม แล้วทำการทดสอบภายใต้สภาวะดังนี้

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

และทำการทดสอบภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนและออกซิเจน



รูปที่ 3.7 แผนผังการทดสอบสมบัติต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสารหน่วงไฟชนิดใหม่จากเปลือกหอยแมลงภู่ทำการศึกษาศาสนาหน่วงไฟในระบบเดี่ยว โดยใช้ CaHP ที่เตรียมได้จากเปลือกหอยแมลงภู่เป็นสารหน่วงไฟ และใช้ HDPE เป็นตัวแทนของพลาสติก มีอัตราส่วนผสมระหว่าง HDPE และ CaHP เป็น 100:0, 80:20, 60:40 และ 40:60 โดยน้ำหนัก เพื่อให้ทราบอัตราส่วนที่มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟดีที่สุด ทำการทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 รวมทั้งการศึกษาศาสนาหน่วงไฟในระบบอินตุมสเซนส์ โดยใช้ CaHP เป็นสารให้กรด, MA เป็นสารให้ฟอง และ EG เป็นสารให้คาร์บอน ใช้อัตราส่วนผสมระหว่าง HDPE และ IFR เป็น 70:30 โดยน้ำหนัก ให้ปริมาณ MA คงที่ 6% โดยน้ำหนัก มีการศึกษาอัตราส่วนระหว่าง CaHP และ EG เป็น 2:1, 3:1, 4:1 และ 5:1 โดยน้ำหนัก เพื่อหาอัตราส่วนที่มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟดีที่สุด รวมทั้งศึกษาสมบัติต่างๆ ของวัสดุ เช่น สมบัติเชิงกล, สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางความร้อน เป็นต้น

4.1 วิเคราะห์ลักษณะและโครงสร้างของ CaHP ที่เตรียมได้

4.1.1 วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ

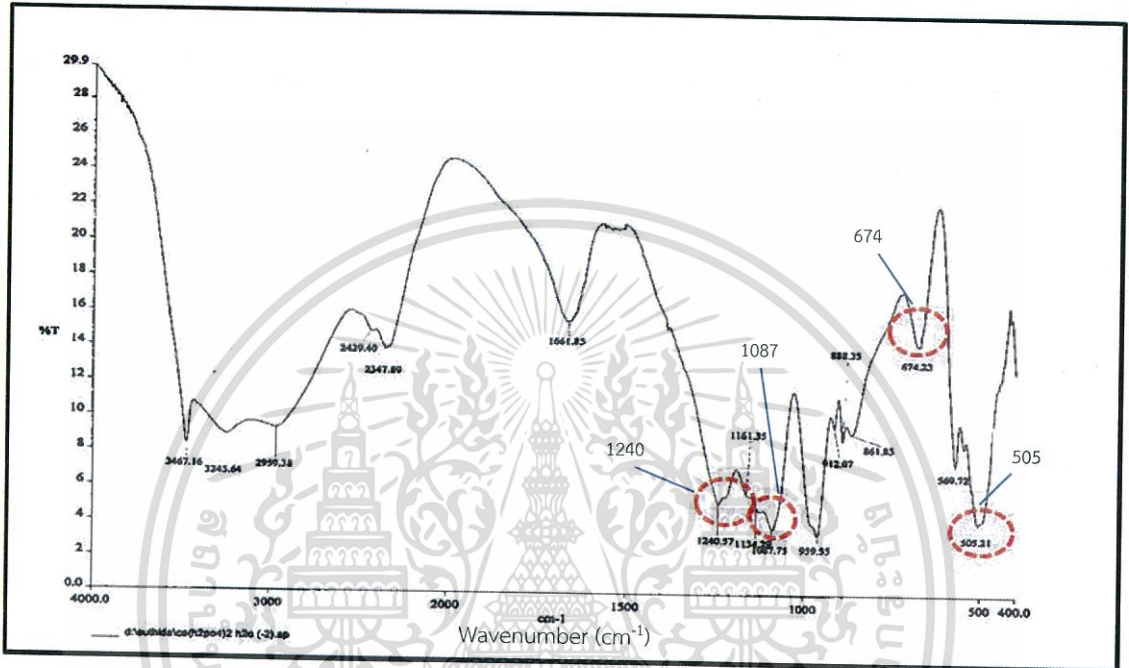
จากการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของเปลือกหอยแมลงภู่ก่อนและหลังการสังเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่า ธาตุองค์ประกอบหลักของเปลือกหอยคือ Ca ซึ่งมีปริมาณมาก (70%) และพบธาตุอื่นๆคือ Mg, S, Cr, Fe, Cu, Sr ในปริมาณที่แตกต่างกัน เมื่อนำเปลือกหอยแมลงภู่มาผ่านกระบวนการสังเคราะห์พบว่า มีปริมาณของ P เกิดขึ้น และปริมาณของ Ca ลดลง เนื่องจากเกิดการทำปฏิกิริยากันระหว่าง CaCO_3 ในเปลือกหอย [11] กับกรดฟอสฟอริก

ตารางที่ 4.1 ปริมาณธาตุองค์ประกอบที่พบของเปลือกหอยแมลงภู่ก่อนและหลังการสังเคราะห์

ลักษณะของสาร	ปริมาณธาตุองค์ประกอบ (%)							
	Mg	S	Ca	Cr	Fe	Cu	Sr	P
ก่อนการสังเคราะห์	0.3	0.1	70.0	0.2	0.5	0.2	0.3	0.0
หลังการสังเคราะห์	0.0	0.0	34.6	0.1	0.1	0.1	0.1	21.9

4.1.2 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

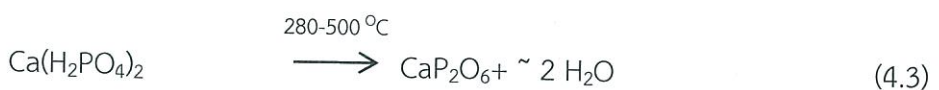
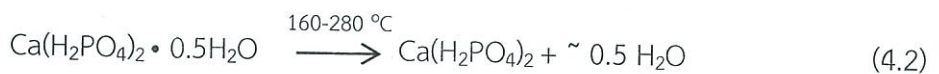
จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่า CaHP ที่เตรียมได้มีหมู่ฟังก์ชันใกล้เคียงกับสารมาตรฐานตามงานวิจัยของบรรจง บุญชม [2] สังเกตจากในกราฟ IR พบ Peak ของ P-O Stretching ที่ประมาณ 1240 cm^{-1} , Peak ของ Symmetric PO_2 Stretching ที่ประมาณ 1087 cm^{-1} , Peak ของ Symmetric POP Stretching ที่ประมาณ 674 cm^{-1} และ Peak ของ Asymmetric POP stretching ที่ประมาณ 505 cm^{-1} ซึ่งสรุปได้ว่าสามารถเตรียม CaHP ได้จริง



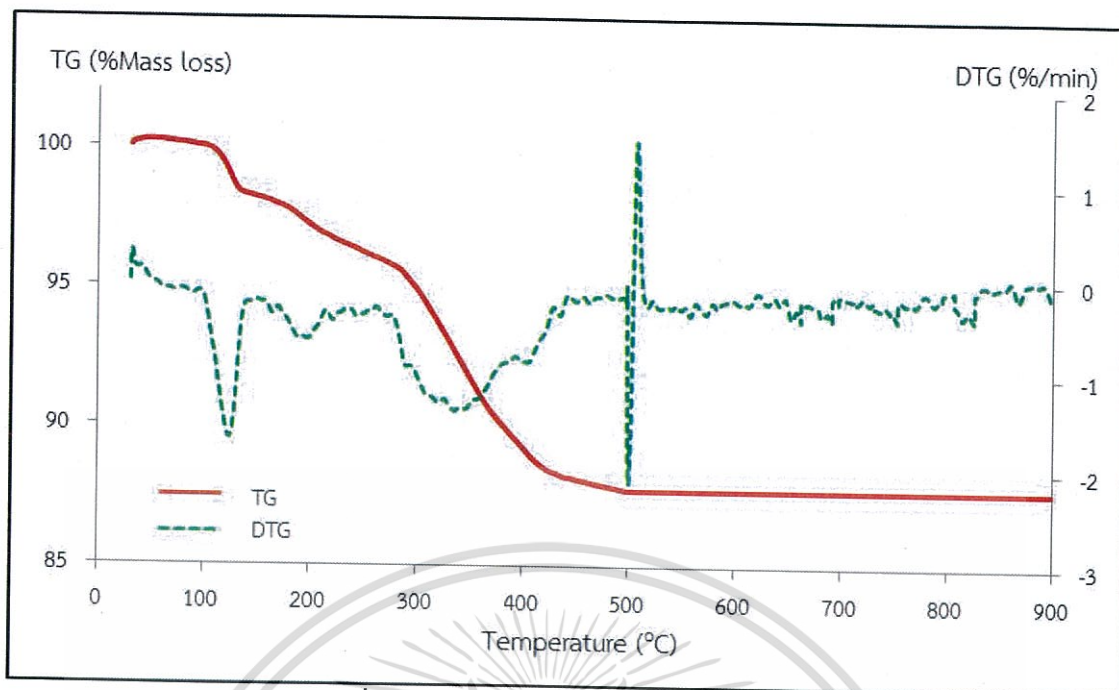
รูปที่ 4.1 กราฟ IR ของ CaHP ที่เตรียมได้

4.1.3 วิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัว

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่า CaHP ที่เตรียมได้มีอุณหภูมิการสลายตัว 3 ช่วงคือ $100\text{--}160\text{ }^{\circ}\text{C}$, $160\text{--}280\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $280\text{--}500\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีการหายไปของน้ำหนัก (Mass loss) 2, 1.9 และ 8.5 % ตามลำดับ ซึ่งทั้งสามช่วงคาดว่าเป็นการสลายตัวของน้ำ คิดเป็น 0.48, 0.46 และ 2.05 โมลกุลของน้ำใน $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ดังสมการที่ 4.1-4.3 ผลที่ได้เป็นไปตามงานวิจัยของบรรจง บุญชม [2]



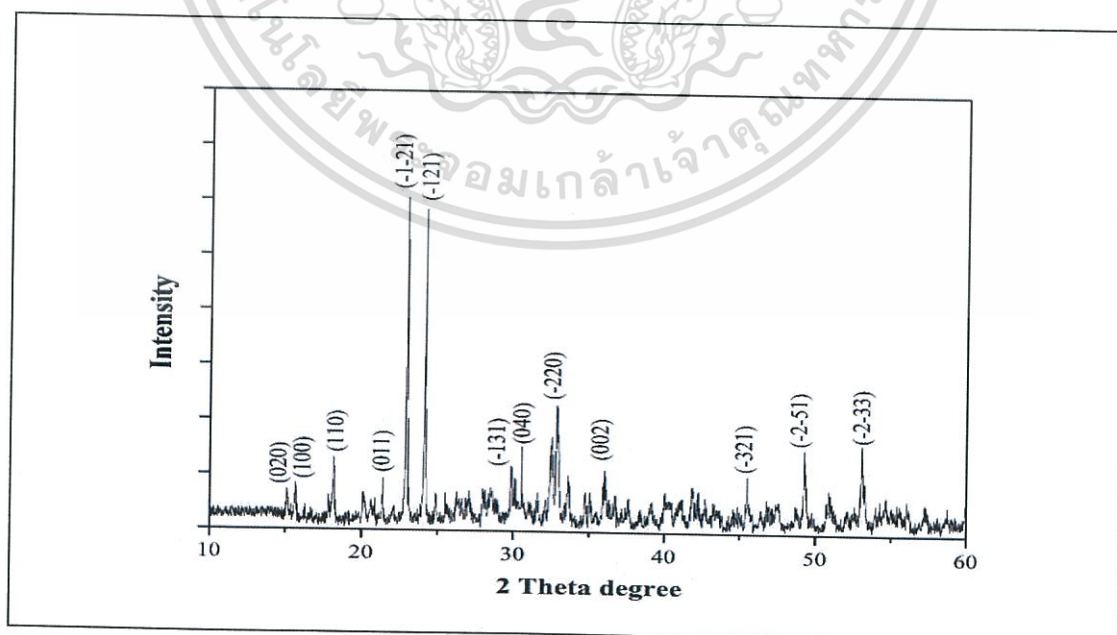
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กราฟ TGA ของ CaHP ที่เตรียมได้

4.1.4 วิเคราะห์โครงสร้างผลึก

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าเมื่อนำกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ CaHP ที่เตรียมได้ไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานตาม PDF #090347 จะมีค่า 2θ ที่ใกล้เคียงกันคือ 15.059, 15.731, 18.101, 20.052, 22.911, 24.194, 29.802, 30.521, 33.006, 33.532, 35.376, 36.056, 45.479, 49.428 และ 53.116 จะมีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก (Monoclinic system) ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามงานวิจัยของบรรจง บุญชม [2]



รูปที่ 4.3 กราฟ XRD ของ CaHP ที่เตรียมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยา

การศึกษาพื้นผิวของลักษณะ CaHP ด้วย SEM ที่กำลังขยาย 1000 เท่า พบว่า CaHP มีลักษณะเป็นแผ่น มีขนาดไม่สม่ำเสมออยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน แสดงผลได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ภาพ SEM ของ CaHP ที่เตรียมได้ (กำลังขยาย 1000 เท่า)

4.2 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณ CaHP ต่อการหน่วงไฟในระบบเดี่ยว

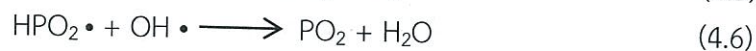
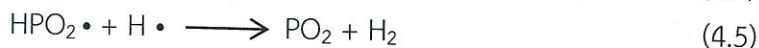
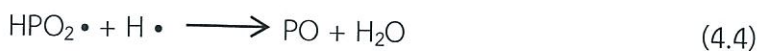
สารหน่วงไฟที่ใช้ในการศึกษาคือ CaHP ซึ่งเป็นสารหน่วงไฟในกลุ่มฟอสฟอรัส มีกลไกควบคุมการหน่วงไฟด้วยการขัดขวางทางกายภาพ

4.2.1 ศึกษาสมบัติการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94

จากตารางที่ 4.2 แสดงผลการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 และอัตราการเผาไหม้ของวัสดุที่มีปริมาณ CaHP แตกต่างกันตามลำดับ จะเห็นว่าชิ้นงานที่ไม่ใส่ CaHP (Control) และชิ้นงานที่มีการใส่ CaHP ในปริมาณที่แตกต่างกันจะเกิดการติดไฟและลุกไหม้จนหมด การติดไฟแสดงดังรูปที่ 4.5 เมื่อนำมาศึกษาอัตราการเผาไหม้ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ CaHP วัสดุเกิดการลามไฟช้าลง เนื่องจาก CaHP เกิดการปลดปล่อยอนุภาคของน้ำ สามารถยืนยันได้จากการศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวของ CaHP ช่วยเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อน ระเหยน้ำ ทำให้พื้นผิวของวัสดุเย็นลง นอกจากนี้ CaHP เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดอนุมูลอิสระไปจับกับอนุมูลอิสระที่เกิดจากการเผาไหม้ทำให้ปฏิกิริยาการแผ่ขยายสายโซ่สิ้นสุดลง การลุกไหม้จะสิ้นสุดลง [27] แสดงตามสมการที่ 4.4-4.6

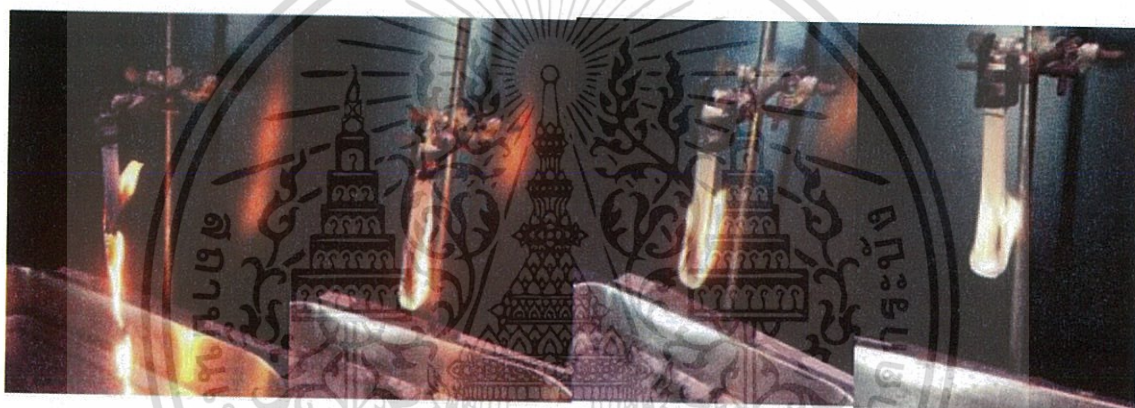
ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณ CaHP จึงทำให้อัตราการเผาไหม้ของวัสดุลดลง และสำหรับสูตร Control มีอัตราการเผาไหม้เท่ากับ 37 mm/min ซึ่งช้ากว่าสูตรที่มีการเติม CaHP 20% และ 40% โดยน้ำหนัก เนื่องจากลักษณะการหยดที่แตกต่างกัน โดยสูตร Control มีลักษณะการหยดที่ต่อเนื่องเป็นผลมาจากพฤติกรรมของ HDPE เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการหลอมเหลว สำหรับสูตรที่มีการเติม CaHP จะมีลักษณะการหยดแบบไม่ต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ 4.2 ผลการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 และอัตราการเผาไหม้ของวัสดุที่มีปริมาณ CaHP ของวัสดุที่มีปริมาณ CaHP ต่างต่างกัน

HDPE : CaHP	ผลการทดสอบตามมาตรฐาน UL 94	อัตราการเผาไหม้ (mm/min)
100 : 0 (Control)	ติดไฟ ไหม้หมด	37
80 : 20	ติดไฟ ไหม้หมด	57
60 : 40	ติดไฟ ไหม้หมด	48
40 : 60	ติดไฟ ไหม้หมด	22



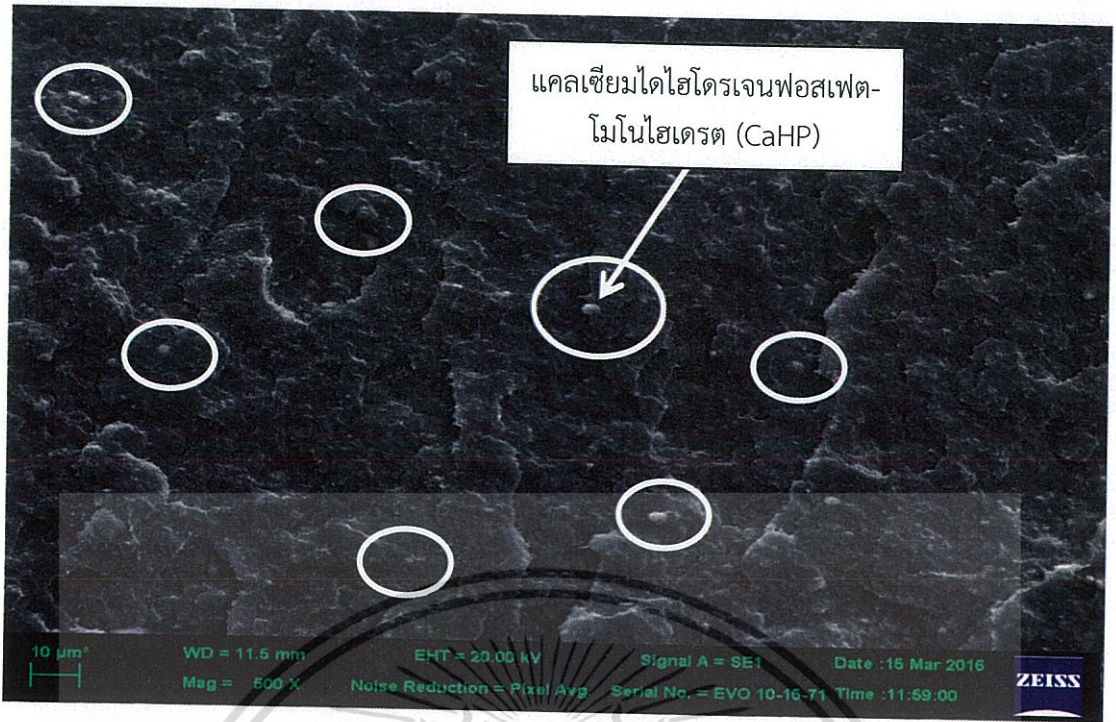
(a) (b) (c) (d)

รูปที่ 4.5 การติดไฟของ HDPE เมื่อทำการจุดไฟเป็นเวลา 10 วินาที โดยมีอัตราส่วน HDPE:CaHP (a) ไม่ใส่ CaHP, (b) 80:20, (c) 40:60 และ (d) 60:40

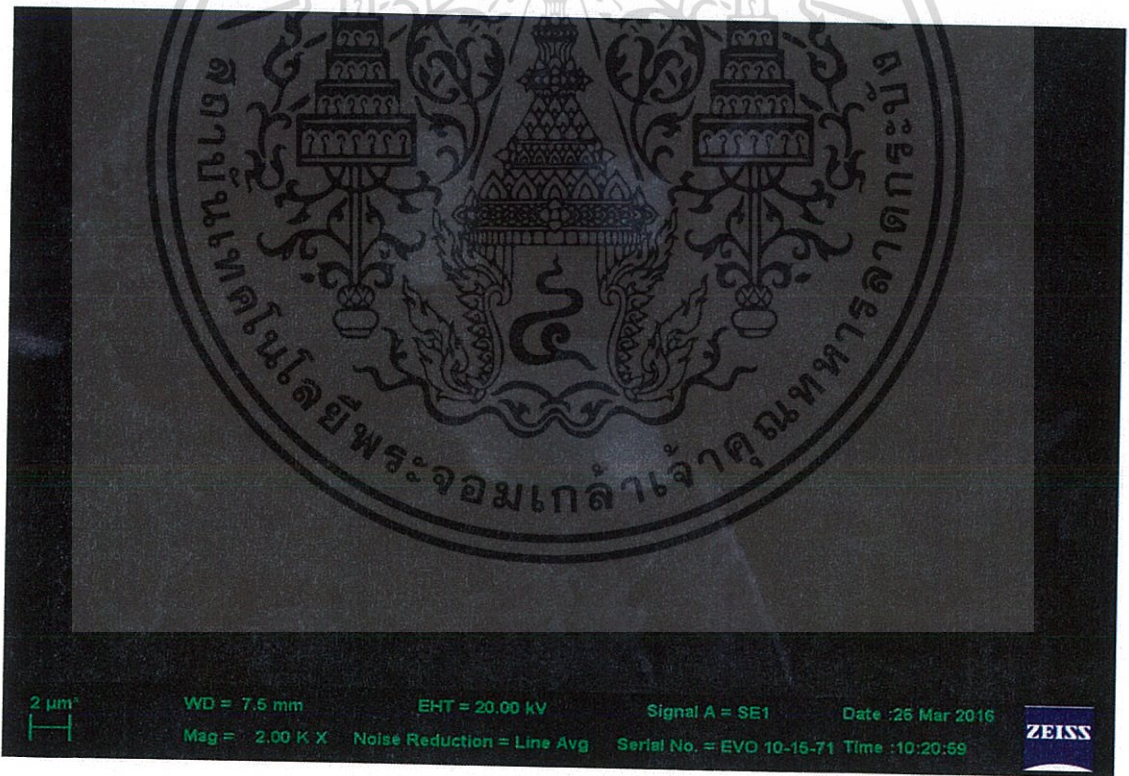
4.2.2 ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา

ศึกษาสารหน่วงไฟในระบบเดี่ยวโดยใช้ CaHP ที่เตรียมได้จากเปลือกหอยแมลงภู่เป็นสารหน่วงไฟ และใช้ HDPE เป็นตัวแทนของพลาสติก เพื่อดูการกระจายตัวและการยึดติดของ HDPE กับ CaHP สามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 4.6

จากรูปที่ 4.6 ที่กำลังขยาย 500 เท่า ภาพ (a) พบว่า CaHP กระจายตัวได้สม่ำเสมอในพอลิเมอร์เมทริกซ์ และจากภาพ (b) ที่กำลังขยาย 2000 เท่า เพื่อศึกษาการยึดติดกันระหว่าง CaHP กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ พบว่ามีการยึดติดไม่ดีระหว่าง CaHP กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ จะเห็นรอยต่อระหว่างอนุภาค CaHP กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ เนื่องจาก CaHP เป็นสารที่มีขี้ ส่วนพอลิเมอร์เมทริกซ์ไม่มีขี้ และในการผสมไม่ได้ใส่สารช่วยกระจาย (Dispersing agent) หรือสารช่วยผสม (Compatibilizer) จึงทำให้เกิดการยึดเกาะต่ำ



(a)



(b)

รูปที่ 4.6 ภาพ SEM ที่เตรียมจาก HDPE กับ CaHP (a) กำลังขยาย 500 เท่า และ (b) กำลังขยาย 2000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณ CaHP ต่อการหน่วงไฟในระบบอินตูเมสเซนต์

สารหน่วงไฟระบบอินตูเมสเซนต์เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีเกิดเป็นชั้นถ่านคาร์บอน ทำหน้าที่เป็นฉนวนทางความร้อนและป้องกันการสัมผัสของความร้อนและออกซิเจน ส่งผลให้การติดไฟสิ้นสุดลง สารหน่วงไฟในระบบอินตูเมสเซนต์ประกอบด้วย 3 องค์ประกอบคือ สารให้กรด:CaHP, สารให้คาร์บอน:EG และสารให้ฟอง:MA

ในงานวิจัยนี้ควบคุมอัตราส่วนของพลาสติก (HDPE) : สารหน่วงไฟ (IFR) เป็น 70:30 โดยน้ำหนัก และมีการศึกษาอัตราส่วนของ CaHP:EG ที่ใช้เป็นสารหน่วงไฟในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

4.3.1 ศึกษาสมบัติการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 และ LOI

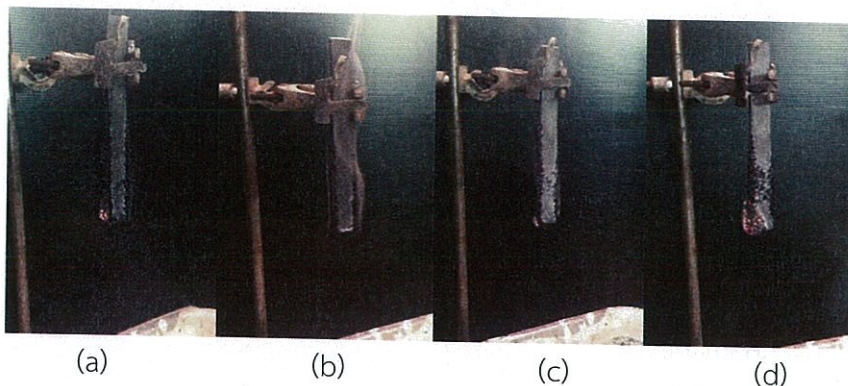
จากงานวิจัยของ Qing Zhang และคณะ [17] ศึกษาประสิทธิภาพที่เสริมกันของ APP และ MA เป็นสารหน่วงการติดไฟของพอลิออกซิเมทิลีน (POM) ซึ่งทำการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างสารหน่วงไฟระบบธรรมดาและระบบอินตูเมสเซนต์ พบว่าสารหน่วงไฟระบบอินตูเมสเซนต์ที่มีอัตราส่วนของ MA:APP:Novolac เท่ากับ 1:3:1 โดย MA ทำหน้าที่เป็นสารให้ฟอง APP ซึ่งเป็นสารกลุ่มฟอสฟอรัสทำหน้าที่เป็นสารให้กรด และเส้นใย Novolac ทำหน้าที่เป็นสารให้คาร์บอน พบว่าให้ผลการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 เป็น V0 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาอิทธิพลของสารหน่วงไฟในระบบอินตูเมสเซนต์ โดยมีการใช้ CaHP เป็นสารให้กรดแทน APP, EG เป็นสารให้คาร์บอนแทนเส้นใย Novolac และ MA ทำหน้าที่เป็นสารให้ฟองเช่นเดียวกับงานวิจัยข้างต้น มีการควบคุมให้ MA คงที่ ศึกษาปริมาณของ CaHP:EG ในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อหาอัตราส่วนที่มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดีที่สุด ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.3 ผลการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 และ LOI ของ HDPE ที่มีอัตราส่วนของ CaHP:EG แตกต่างกัน

CaHP : EG	ผลการทดสอบตามมาตรฐาน UL-94	Limiting oxygen index (%)
0:0 (Control)	ติดไฟไหม้หมด	22
2 : 1	V1	24
3 : 1	V0	24
4 : 1	V1	23
5 : 1	ติดไฟไหม้หมด	22

จากตารางที่ 4.3 แสดงผลการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 และ LOI ของ HDPE ที่มีอัตราส่วนของ CaHP:EG แตกต่างกัน พบว่า อัตราส่วนที่มีประสิทธิภาพการหน่วงไฟที่ดีที่สุดคือ 3:1 โดยน้ำหนัก ให้ค่าเป็น V0 (สามารถดับไฟได้ด้วยตัวเอง ภายในเวลา 10 วินาที โดยไม่มีการหยด) และให้ค่า LOI สูงสุดเท่ากับ 24% แสดงว่าเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ทำให้ EG ช่วยเสริมการทำงานของ CaHP ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดย CaHP จะสลายตัวให้กรดและทำปฏิกิริยากับสารให้คาร์บอน (EG) เกิดเป็นชั้นถ่านคาร์บอนทำหน้าที่เป็นฉนวนกันความร้อน และพบว่า เมื่อปริมาณ CaHP เพิ่มขึ้น (4:1 และ 5:1) ประสิทธิภาพการหน่วงไฟของวัสดุลดลง เนื่องจาก CaHP มีการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนส่งผลให้เกิดการกระจายตัวที่ไม่ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ยืนยันได้จากการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย SEM

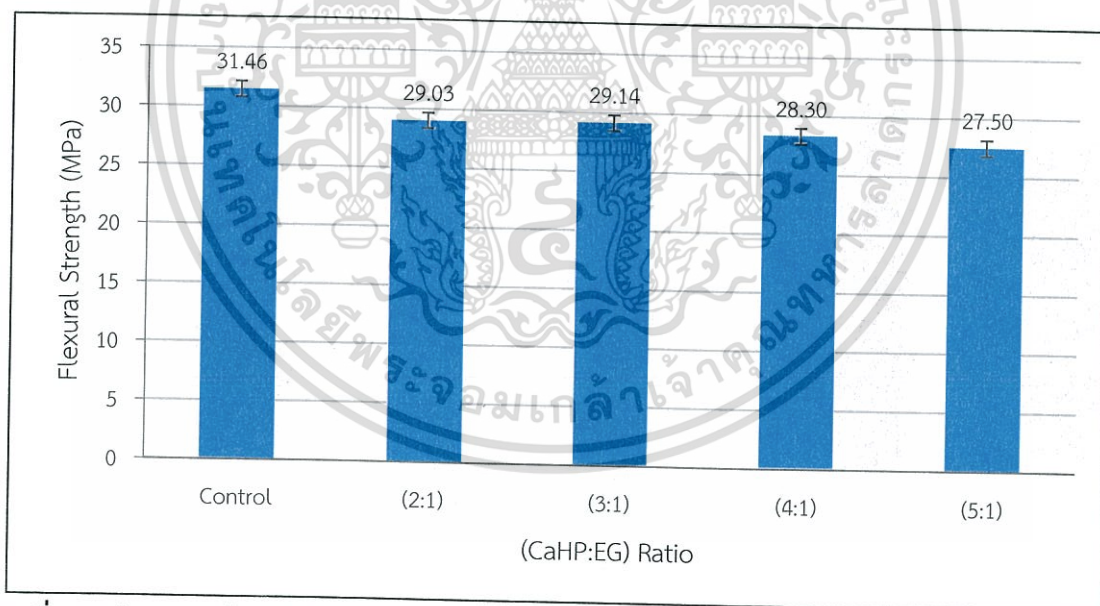
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 การติดไฟของ HDPE เมื่อทำการจุดไฟเป็นเวลา 10 วินาที โดยมีอัตราส่วน CaHP : EG (a) 2:1, (b) 3:1, (c) 4:1 และ (d) 5:1

4.3.2 ศึกษาสมบัติเชิงกล

จากรูปที่ 4.8 แสดงค่าความแข็งแรงโค้งงอของ HDPE (Control) และ HDPE ที่มี CaHP:EG ในอัตราส่วนแตกต่างกัน พบว่าเมื่อเติมสารหน่วงไฟลงใน HDPE ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากสารหน่วงไฟที่เติมลงไปมีลักษณะเป็นอนุภาคของแข็งที่มีขี้ เมื่อใส่ลงในพอลิเมอร์เมทริกซ์ (HDPE) ซึ่งไม่มีขี้ จึงไม่เกิดอันตรกิริยาระหว่างกัน ทำให้เกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interface) ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอมีค่าลดลง

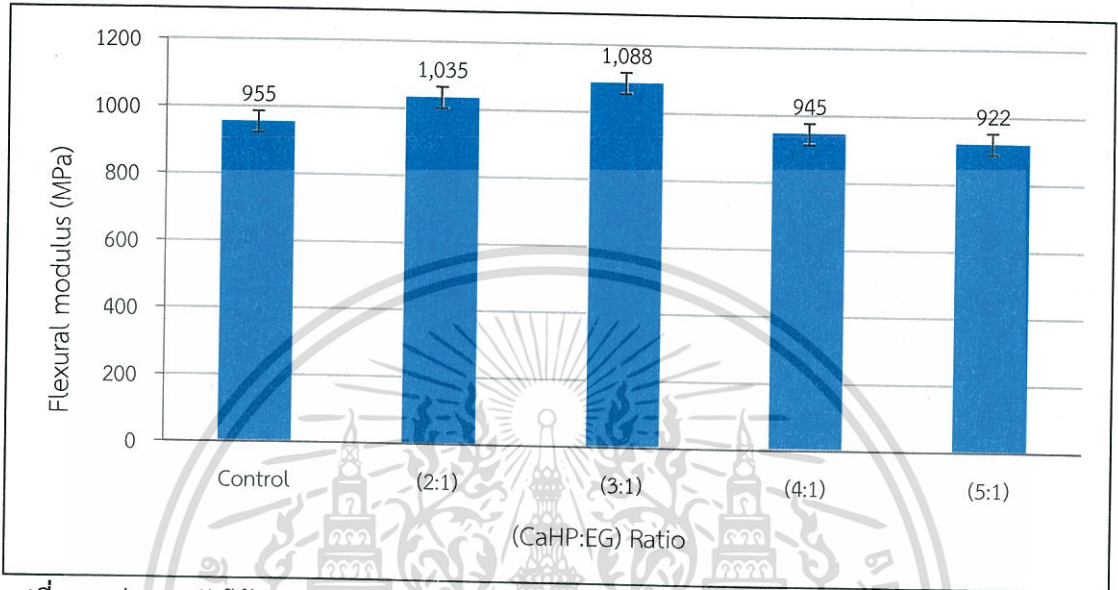


รูปที่ 4.8 ค่าความแข็งแรงโค้งงอของ HDPE (Control) และ HDPE ที่มี CaHP:EG ในอัตราส่วนแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.9 แสดงค่ามอดุลัสโค้งงอของ HDPE (Control) และ HDPE ที่มี CaHP:EG ในอัตราส่วนแตกต่างกัน พบว่าเมื่อเติมสารหน่วงไฟลงใน HDPE ส่งผลให้ค่ามอดุลัสโค้งงอมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ค่าๆ หนึ่ง และมีค่าลดลง เนื่องจากสารหน่วงไฟที่เติมลงไปมีลักษณะเป็นอนุภาคของแข็งช่วย

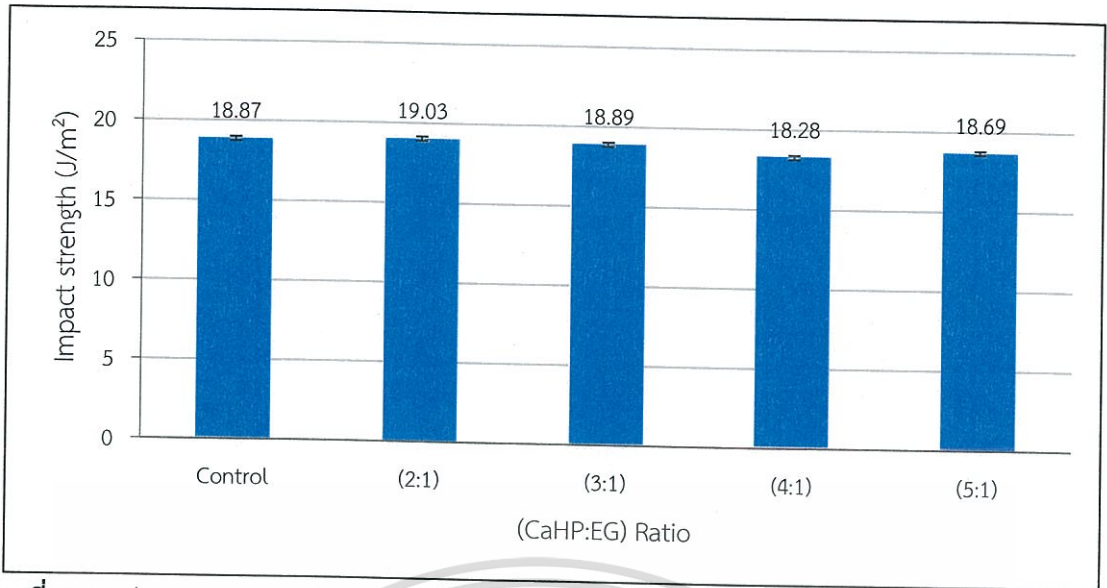
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้านแรงกระทำที่เกิดขึ้นกับวัสดุ ค่ามอดุลัสโค้งงอจึงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสูตร Control และเมื่อเพิ่มปริมาณ CaHP (4:1 และ 5:1) พบว่า ค่ามอดุลัสโค้งงอลดลง เนื่องจาก CaHP เกิดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน ทำให้เกิดจุดบกพร่อง (Defects) ในชิ้นงาน รวมทั้งเมื่อปริมาณ CaHP เพิ่มขึ้นทำให้ EG ที่มีลักษณะเป็นแผ่นช่วยในการต้านแรงกระทำมีปริมาณลดลง เป็นผลให้ค่ามอดุลัสโค้งงอมีค่าลดลง



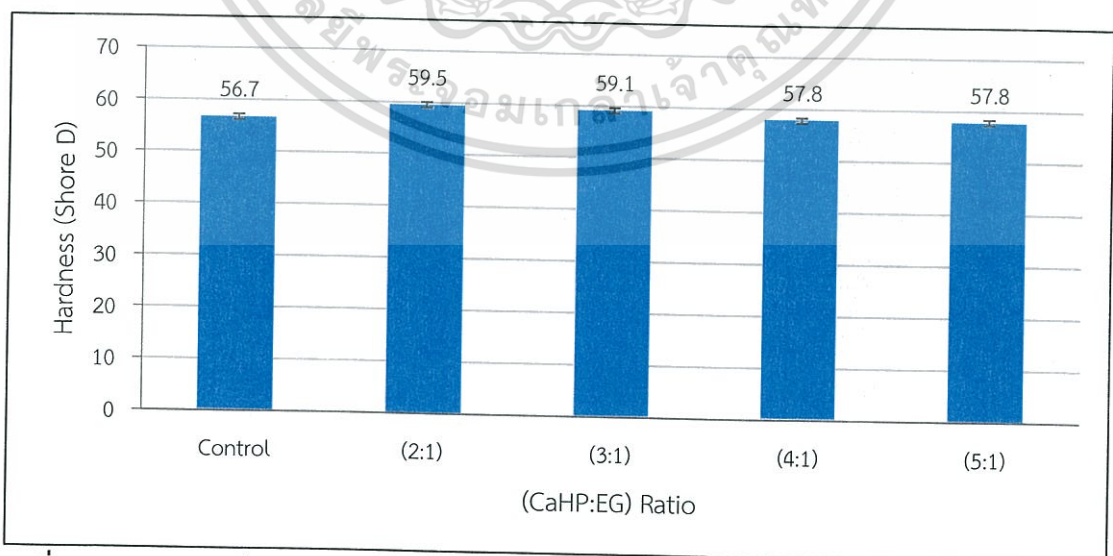
รูปที่ 4.9 ค่ามอดุลัสโค้งงอของ HDPE (Control) และ HDPE ที่มี CaHP:EG ในอัตราส่วนแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.10 แสดงค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของ HDPE (Control) และ HDPE ที่มี CaHP:EG ในอัตราส่วนแตกต่างกัน พบว่าเมื่อเติมสารหน่วงไฟลงในพลาสติกไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความทนทานต่อแรงกระแทก เนื่องจากสารหน่วงไฟในระบบอินตูดิเมสเซนส์ที่ใช้มีแกรไฟต์ขยาย (EG) เป็นองค์ประกอบ ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่น [15] เมื่อทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปจะเกิดการเรียงตัวตามแนวการฉีดขึ้นงานตัวอย่าง [28] ดังนั้นเมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำในแนวตั้งฉากจึงช่วยในการต้านแรงกระทำที่เกิดขึ้นกับวัสดุได้ ค่าความแข็งแรงกระแทกจึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.10 ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของ HDPE (Control) และ HDPE ที่มี CaHP:EG ในอัตราส่วนแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.11 แสดงค่าความแข็งแบบ Shore D ของ HDPE (Control) และ HDPE ที่มี CaHP:EG ในอัตราส่วนแตกต่างกัน พบว่าเมื่อเติมสารหน่วงไฟลงใน HDPE จะทำให้ค่าความแข็งที่ผิวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ HDPE (Control) เนื่องจากสารหน่วงไฟที่เติมลงไปมีลักษณะเป็นอนุภาคของแข็งที่มีความแข็งมากกว่าพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นไปตามกฎของของผสม (Rule of mixture) คือเมื่อเติมอนุภาคที่มีความแข็งลงในวัสดุจะทำให้วัสดุมีความแข็งมากขึ้น ค่าความแข็งที่ผิวจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อใส่ CaHP มากขึ้น พบว่าค่าความแข็งที่ผิวไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจาก CaHP เกิดการเกาะกลุ่มกันเป็นจุดบกพร่องในชิ้นงาน



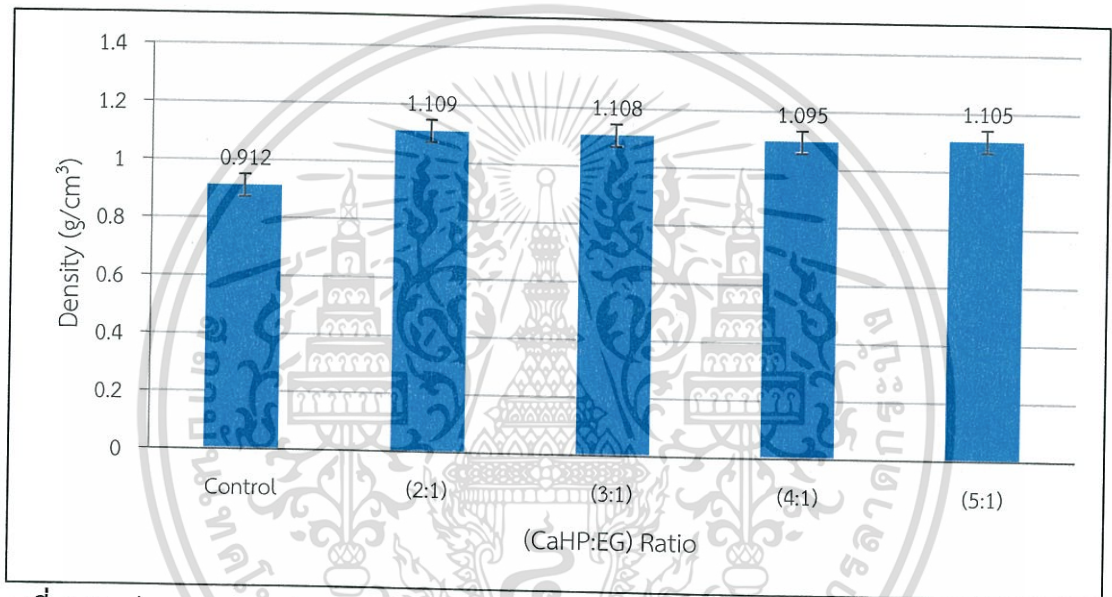
รูปที่ 4.11 ค่าความแข็งแบบ Shore D ของ HDPE (Control) และ HDPE ที่มี CaHP:EG ในอัตราส่วนแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ

4.3.3.1 ความหนาแน่น

จากรูปที่ 4.12 พบว่า เมื่อเติมสารหน่วงไฟลงใน HDPE จะทำให้ค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารหน่วงไฟที่เติมลงไปมีลักษณะเป็นอนุภาคของแข็ง และมีความหนาแน่นมากกว่าพอลิเมอร์ โดยความหนาแน่นของ HDPE, MA, CaHP และ EG เป็น 0.94, 1.57, 1.99 และ 0.50-0.65 g/cm³ ตามลำดับ ส่งผลให้ความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับ HDPE (Control) ตามกฎของของผสม โดยพบว่าตัวอย่างที่มีการเติมสารหน่วงไฟในระบบอินตูลิเมสเซนต์ ที่มีปริมาณ CaHP:EG แตกต่างกัน มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกัน เนื่องจากเมื่อปริมาณ CaHP เพิ่มขึ้นส่งผลให้ CaHP เกิดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน เป็นจุดบกพร่องและเกิดช่องว่างในชิ้นงาน ค่าความหนาแน่นจึงใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.12 ค่าความหนาแน่นของ HDPE (Control) และ HDPE ที่มี CaHP:EG ในอัตราส่วนแตกต่างกัน

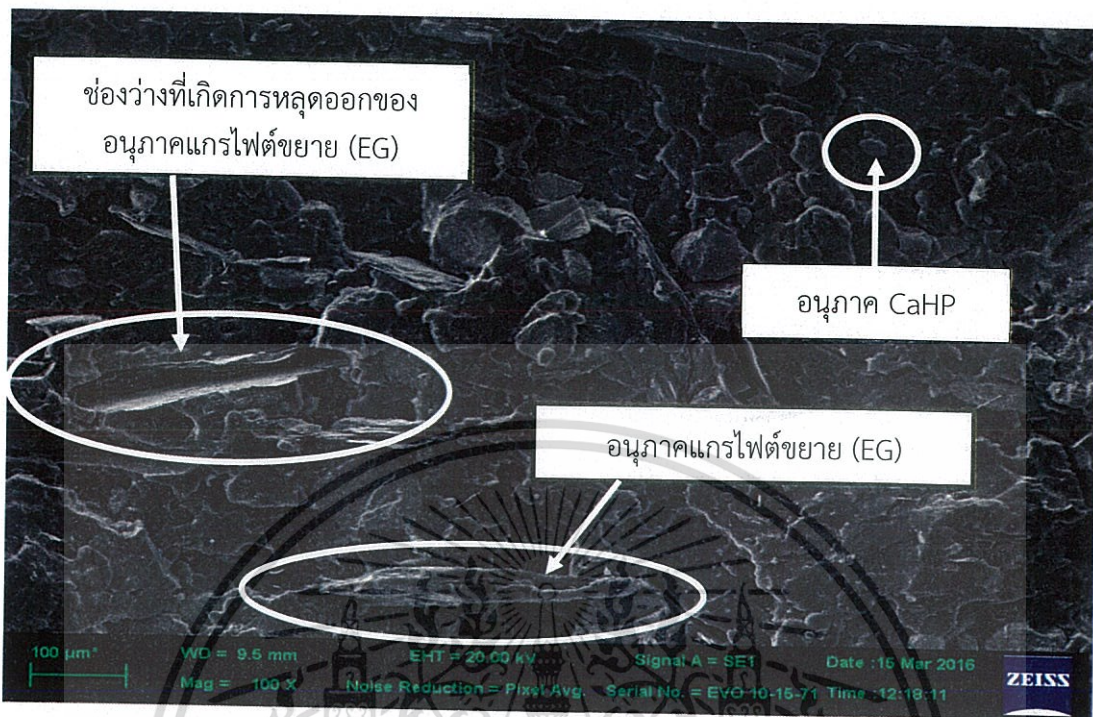
4.3.3.2 สันฐานวิทยา

ศึกษาสารหน่วงไฟในระบบอินตูลิเมสเซนต์ โดยใช้ CaHP เป็นสารให้กรด, MA เป็นสารให้ฟอง และ EG เป็นสารให้คาร์บอน ใช้อัตราส่วนผสมระหว่าง HDPE และ IFR เป็น 70:30 โดยน้ำหนัก มีการศึกษาอัตราส่วนระหว่าง CaHP และ EG เป็น 2:1, 3:1, 4:1 และ 5:1 โดยน้ำหนัก เพื่อดูการกระจายตัวและการยึดติดของ HDPE, CaHP และ EG สามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 4.14

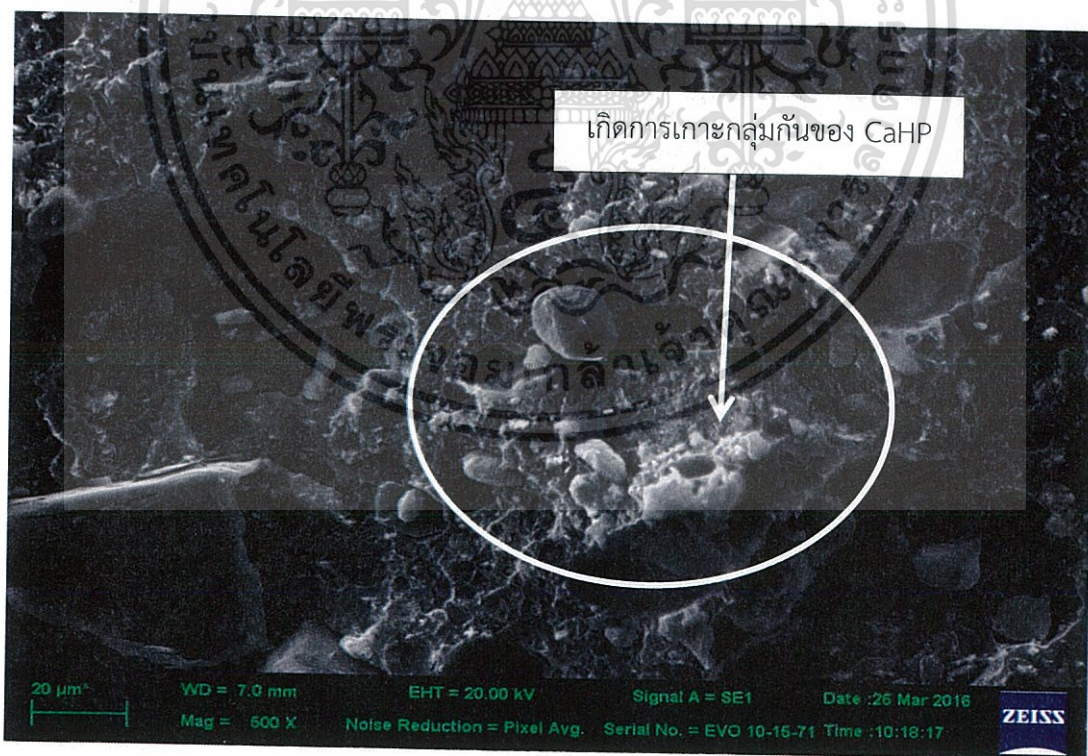
จากรูปที่ 4.14 ที่กำลังขยาย 100 เท่า ภาพ (a), 500 เท่า ภาพ (b) และ 500 เท่า ภาพ (c) พบว่า จากภาพ (a) CaHP และ EG มีการกระจายตัวสม่ำเสมอในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ภาพ (b) ที่กำลังขยาย 500 เท่า ศึกษาการยึดติดกันระหว่าง CaHP กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ พบว่า CaHP เกิดการยึดติดที่ไม่ดีกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ เกิดช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่าง CaHP กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ มีการหลุดออกของ CaHP และเกิดการเกาะกลุ่มกัน เนื่องจาก CaHP เป็นสารที่มีขี้ ส่วนพอลิเมอร์เมทริกซ์ไม่มีขี้ ส่งผลให้เกิดการยึดเกาะต่ำ ภาพ (c) ที่กำลังขยาย 500 เท่า ศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การยึดติดกันระหว่าง EG กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ พบว่า EG มีการยึดติดที่ไม่ดีกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ เกิดช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่าง EG กับพอลิเมอร์เมทริกซ์

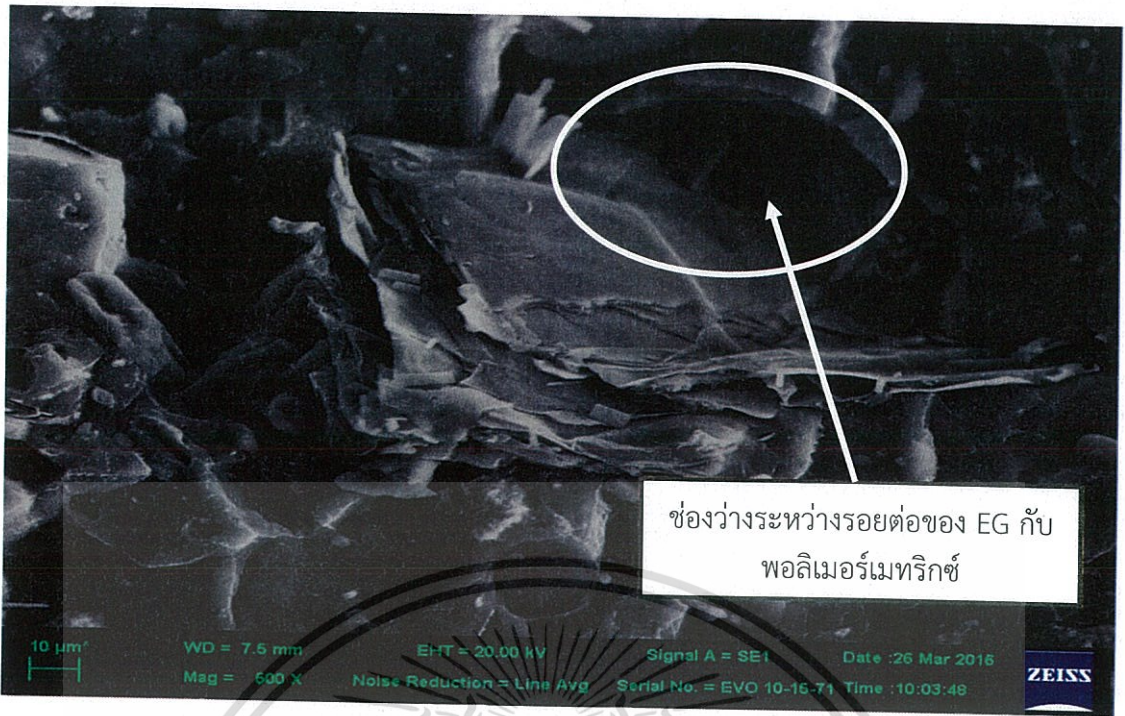


(a)



(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c)

รูปที่ 4.13 ภาพ SEM ของและ HDPE ที่มี CaHP:EG (a) กำลังขยาย 100 เท่า, (b) กำลังขยาย 500 เท่า และ (c) กำลังขยาย 500 เท่า

4.3.4 ศึกษาสมบัติทางความร้อน

4.3.4.1 DSC

การศึกษาสมบัติทางความร้อนโดยใช้เทคนิค DSC สามารถอธิบายสมบัติต่างๆ ของวัสดุเช่น ค่าองศาความเป็นผลึก (Degree of crystallization; X_c), อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิการตกผลึก (T_c) เป็นต้น ซึ่งผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สมบัติทางความร้อนของ HDPE (control) และ HDPE ที่มี CaHP:EG ในอัตราส่วนแตกต่างกัน

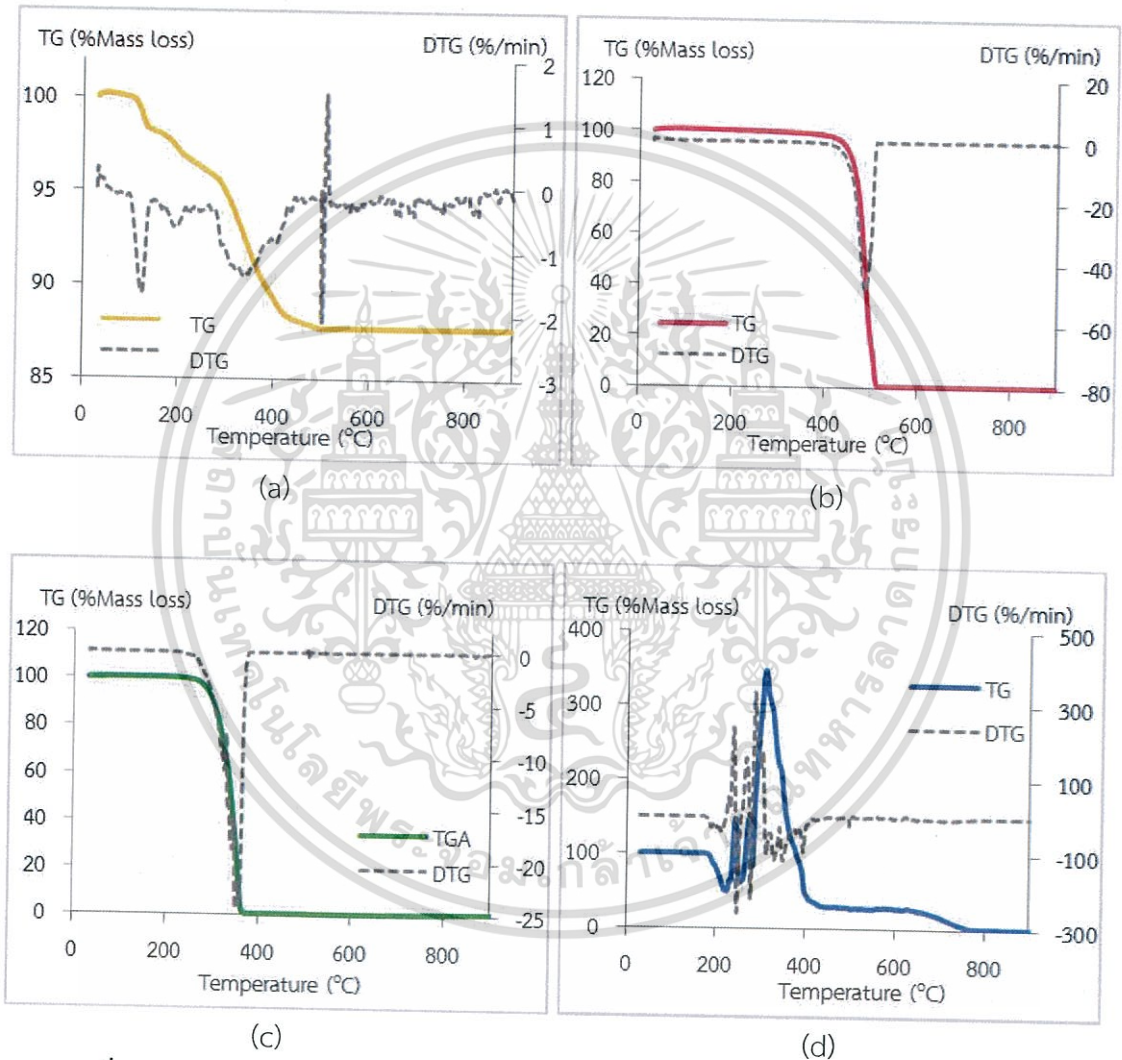
CaHP : EG	T_m (°C)	T_c (°C)	ΔH (J/g)	X_c (%)
0:0 (Control)	132.0	119.8	222.3	75.7
2 : 1	130.3	120.9	150.2	73.1
3 : 1	130.5	120.9	148.3	72.2
5 : 1	130.3	120.9	150.6	73.3

จากการทดลองพบว่า เมื่อเติมสารหน่วงไฟลงไป T_m , T_c และ X_c ของวัสดุไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับสูตร Control แสดงว่าสารหน่วงไฟไม่ส่งผลต่อการเกิดผลึกของ HDPE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4.2 TGA

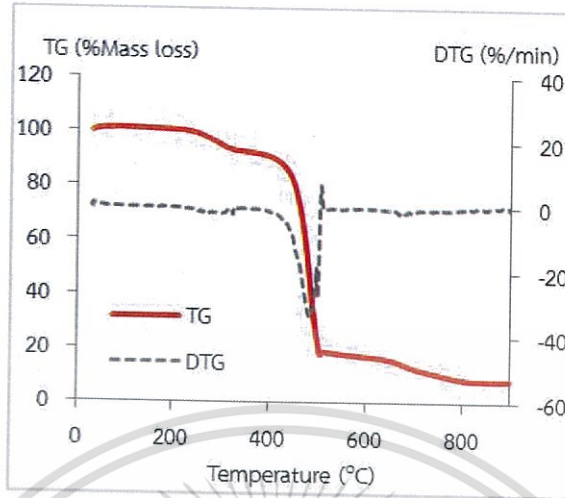
การศึกษาสมบัติทางความร้อนโดยใช้เทคนิค TGA เป็นการศึกษาการหาอุณหภูมิการสลายตัวในแต่ละองค์ประกอบของตัวอย่าง จากรูปที่ 4.14 แสดงอุณหภูมิการสลายตัวของแต่ละองค์ประกอบ (a) CaHP, (b) HDPE, (c) MA และ (d) EG พบว่า จากภาพ (a) CaHP เกิดการสลายตัว 3 ช่วง คือ 100-160 °C, 160-280 °C และ 280-500 °C จากภาพ (b) HDPE เกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 400-500 °C จากภาพ (c) MA เกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 250-350 °C และจากภาพ (d) EG ที่อุณหภูมิ 200 °C จะเกิดการเปลี่ยนสถานะ มีการขยายตัว ส่งผลให้อุณหภูมิเกิดการแกว่ง และหยุดนิ่งที่อุณหภูมิ 400 °C



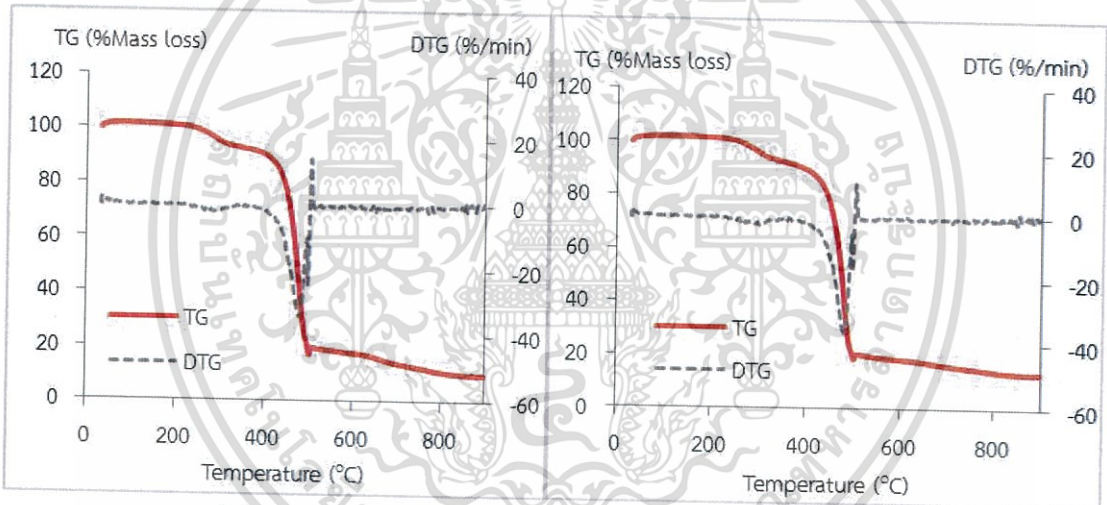
รูปที่ 4.14 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนขององค์ประกอบต่างๆในตัวอย่าง (a) CaHP, (b) HDPE, (c) MA และ (d) EG

จากรูปที่ 4.15 แสดงอุณหภูมิการสลายตัวของ HDPE ที่มี CaHP:EG ในอัตราส่วนแตกต่างกัน พบว่าในอัตราส่วน 2:1, 3:1 และ 5:1 มีการสลายตัวเหมือนกัน 3 ช่วง ดังนี้ ช่วงที่ 1 ที่อุณหภูมิ 250-350 °C คาดว่าเป็นการสลายตัวของ MA และโมเลกุลของน้ำใน CaHP ช่วงที่ 2 ที่

อุณหภูมิ 350-500 °C คาดว่าเป็นการสลายตัวของ HDPE, EG และโมเลกุลของน้ำใน CaHP ช่วงที่ 3 ที่อุณหภูมิ 600-900 °C เมื่อให้อุณหภูมิถึง 900 °C พบว่ามีปริมาณสารเหลืออยู่



(a) 2:1



(b) 3:1

(c) 5:1

รูปที่ 4.15 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของ HDPE ที่มี CaHP:EG ในอัตราส่วนแตกต่างกัน

4.4 วิเคราะห์ต้นทุน

จากตารางที่ 4.5 แสดงการวิเคราะห์ต้นทุนเป็นการแจกแจงค่าใช้จ่ายของวัตถุดิบต่างๆ ที่ใช้ในการผลิตเพื่อเปรียบเทียบในเชิงอุตสาหกรรม โดยสารหน่วงไฟที่สังเคราะห์ได้ (CaHP) มีราคาถูกกว่าสารหน่วงไฟกลุ่มฟอสเฟตที่ใช้ในอุตสาหกรรม เช่น APP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 วิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบการผลิตพลาสติกทนไฟในอัตราส่วน CaHP:EG ที่ 3:1 ปริมาณ 1 กิโลกรัม

สารเคมี	ราคาตลาด (บาท/กิโลกรัม)	CaHP(3):EG(1)		APP(3):EG(1)	
		ปริมาณที่ใช้ (php)	คิดเป็น (บาท)	ปริมาณที่ใช้ (php)	คิดเป็น (บาท)
HDPE	55	70	38.50	70	38.50
CaHP	28*	18	5.04	-	-
APP	230	-	-	18	41.40
EG	18	6	1.08	6	1.08
MA	150	6	9.00	6	9.00
รวม			53.62		89.98

หมายเหตุ : *ราคาต้นทุนแบบประมาณการผลิตเชิงพาณิชย์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณ CaHP ต่อการหน่วงไฟในระบบเดี่ยวและระบบอินตุมสเซนซ์ โดยทำการทดสอบสมบัติการลามไฟเพื่อหาอัตราส่วนที่มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดีที่สุดรวมทั้งทดสอบสมบัติต่างๆของวัสดุ เช่น สมบัติเชิงกล, สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางความร้อน เป็นต้น สามารถสรุปได้ดังนี้

ตอนที่ 1 ศึกษาปริมาณ CaHP ที่ใช้เป็นสารหน่วงไฟจากธรรมชาติในระบบเดี่ยว

ทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณ CaHP ที่มีผลต่อการหน่วงไฟในระบบเดี่ยว โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง HDPE และ CaHP เป็น 100:0, 80:20, 60:40 และ 40:60 โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อทดสอบสมบัติการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 แบบแนวตั้งชิ้นงานในทุกอัตราส่วนเกิดการติดไฟและลุกไหม้จนหมด และเมื่อทดสอบอัตราการเผาไหม้ พบว่าเมื่อใส่ CaHP ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้อัตราการเผาไหม้มีแนวโน้มลดลง ดังนั้นสรุปได้ว่า CaHP ที่ใช้เป็นสารหน่วงไฟในระบบเดี่ยวไม่สามารถช่วยให้วัสดุเกิดการดับไฟได้ด้วยตัวเอง แต่สามารถช่วยในการหน่วงไฟได้เล็กน้อย

ตอนที่ 2 ศึกษาปริมาณการใช้ CaHP ในระบบอินตุมสเซนซ์

ทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณ CaHP ที่มีผลต่อการหน่วงไฟในระบบอินตุมสเซนซ์ โดยควบคุมอัตราส่วนของพลาสติก (HDPE) : สารหน่วงไฟ (IFR) เป็น 70:30 โดยน้ำหนัก และทำการศึกษาอัตราส่วนของ CaHP:EG ที่ใช้เป็นสารหน่วงไฟในอัตราส่วน 2:1, 3:1, 4:1 และ 5:1 ตามลำดับ พบว่าอัตราส่วนของ CaHP:EG ที่ 3:1 มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟดีที่สุดซึ่งเมื่อทดสอบสมบัติการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 แบบแนวตั้งให้ผลเป็น V0 คือสามารถดับไฟภายใน 10 วินาที และเมื่อทดสอบค่า Limiting oxygen index (LOI) ได้ค่าสูงที่สุดเท่ากับ 24%

เมื่อทำการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ CaHP ส่งผลให้ ความแข็งแรงโค้งงอมีแนวโน้มลดลง, โมดูลัสโค้งงอมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ค่าฯ หนึ่ง และมีค่าลดลง, ค่าความแข็งแบบ Shore D ความทนทานต่อแรงกระแทกและความหนาแน่นไม่แตกต่างกันมีนัยสำคัญ

สำหรับการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่าสารหน่วงไฟไม่ส่งผลต่อการเกิดผลึกของ HDPE และในเทคนิค TGA พบว่าตัวอย่างมีการสลายตัว 3 ช่วง ดังนี้ ช่วงที่ 1 ที่อุณหภูมิ 250-350 °C, ช่วงที่ 2 ที่อุณหภูมิ 350-500 °C และช่วงที่ 3 ที่อุณหภูมิ 600-900 °C เมื่อให้อุณหภูมิถึง 900 °C พบว่ามีปริมาณสารเหลืออยู่

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาประเด็นอื่นๆเพิ่มเติมเพื่อหาสูตรที่ให้ประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดีที่สุด ได้แก่ อัตราส่วนของ HDPE:IFR, ปริมาณของ MA และปริมาณของ EG
2. มีการใส่สารช่วยผสมเพื่อให้เกิดการผสมที่ดี
3. เตรียม CaHP จากวัสดุธรรมชาติชนิดอื่นๆ เช่น กระดุก และเปลือกไข่ เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] บริษัท สนุก ออนไลน์ จำกัด. 2556. การเกิดอัคคีภัย [online]. Available : <http://guru.sanook.com/7901/>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 28 ธันวาคม 2558
- [2] Boonchom, B. 2009. "Parallelogram-like microparticles of calciumdihydrogenphosphate monohydrate ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) obtained by a rapid precipitation route in aqueous and acetone media". *Journal of Alloys and Compounds*. 482 : 199–202.
- [3] มูลนิธิโลกสีเขียว. 2549. เปลือกหอยแมลงภู่อหือทิ้ง [online]. Available : <http://www2.manager.co.th/Campus/ViewNews.aspx?NewsID=9560000112178>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 5 มกราคม 2559
- [4] Safety Discovery. 2555. ทฤษฎีการเผาไหม้ [online]. Available : https://www.facebook.com/permalink.php?id=287549407930187&story_fbid=459119190773207 เข้าถึงเมื่อวันที่ 7 มกราคม 2559
- [5] สถานีดับเพลิงสามเสน. 2555. องค์ประกอบของไฟ [Online]. Available : <http://www.samsenfire.com/article/53-study-paf.html> เข้าถึงเมื่อวันที่ 7 มกราคม 2559
- [6] Adrian, B. 2015. Flame Retardants [online]. Available : <http://www.flameretardantsonline.com/web/en/106/111.htm>. Access on 8 January 2016
- [7] สำนักป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย. 2552. ทฤษฎีการเผาไหม้ [online]. Available : http://www.fire2fight.com/articles.php?article_id=5 เข้าถึงเมื่อวันที่ 8 มกราคม 2559
- [8] Alexander, B. 2009. Intumescent Flame Retardant [Online]. Available : <http://upetd.up.ac.za/thesis/submitted/etd-01122007-112752/unrestricted/06chapter6.pdf>. Access on 14 January 2016
- [9] Adrian, B. 2010. Intumescent Flame Retardant Sytem [Online]. Available : <http://www.flameretardant-online.com/web/en/106/110.htm>. Access on 17 January 2016
- [10] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2555. หอยแมลงภู่อ [Online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%AB%E0%B8%AD%E0%B8%A2%E0%B9%81%E0%B8%A1%E0%B8%A5%E0%B8%87%E0%B8%A0%E0%B8%B9%E0%B9%88> เข้าถึงเมื่อวันที่ 24 มกราคม 2559
- [11] ศศิพันธุ์ ณ สงขลา, อุษณีย์ สันตติวงศ์ไชย, สุรพงษ์ พิมพ์จันทร์, ชาญชัย อัสววินิจกุลชัย และ สมพร จองคำ. 2541. "การวิเคราะห์ธาตุในเปลือกหอยโดยวิธีนิวเคลียร์." หน้า 581-589. ใน การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ : กองฟิสิกส์ สำนักปรมาณูเพื่อสันติ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Michael, S. 2012. **Polyethylene** [Online]. Available :
<http://www.ptonline.com/columns/density-molecular-weight-in-polyethylene>. Access on 22 January 2016
- [13] จุไรรัตน์ ดวงเดือน. 2555. **โครงสร้างและสมบัติพอลิเอทิลีน** [Online]. Available :
http://www.neutron.rmutphysics.com/chemistry-glossary/index.php?option=com_content&task=view&id=1290&Itemid=108.
 เข้าถึงเมื่อวันที่ 22 มกราคม 2559
- [14] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2558. **แกรไฟต์** [Online]. Available :
<https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%81%E0%B8%81%E0%B8%A3%E0%B9%84%E0%B8%9F%E0%B8%95%E0%B9%8C> เข้าถึงเมื่อวันที่ 24 มกราคม 2559
- [15] อรวรรณ สัมฤทธิ์เดชขจร. 2557. **แกรไฟต์ขยาย** [Online]. Available :
<https://www.mtec.or.th/academic-services/mtec-science-technology-news/6800-composite>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 24 มกราคม 2559
- [16] Atta, U. R. S., Dongwoo, L., Yiqi, W., Abdul, W., Krishnan, J., Byungsun, K. and Jungil, S. 2014. "Effect of concentration of ATH on mechanical properties of polypropylene/aluminiumtrihydrate (PP/ATH) composite". *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 24 : 81–s89.
- [17] Zhang, Q. and Chen, Y. 2011. "Synergistic effects of ammonium polyphosphate/melamine intumescent system with macromolecular char former in flame-retardants polyoxymethylene." *Journal of polymer Research*. 18 : 293-303.
- [18] Gang, B., Chuigen, G. and Liping, L. 2014. "Synergistic effect of intumescent flame retardant and expandable graphite on mechanical and flame-retardant properties of woodflour-polypropylene composites." *Construction and Building Materials* 50 : 148–153.
- [19] Zhu, H., Zhu, Q., Li, J., Tao, K., Xue, L. and Yan, Q. 2011. "Synergistic effect between expandable graphite and ammonium polyphosphate on flame retarded polylactide." *Polymer Degradation and Stability* 96 : 183-189.
- [20] Zeus Industrial Products, Inc. 2005. **Flammability of Polymers** [Online]. Available :
http://www.appstate.edu/~clementsjs/journalarticles/zeus_flammability.pdf.
 Access on 26 January 2016
- [21] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. 2549. **Polymer Characterization and analysis**. [Online]. Available : <http://www.seem.kmutt.ac.th/research/pentec/download/MTT656-Chapter%20%205%20Electron%20Microscopy%20for%20Polymer%20%20%20%20%20Analysis.pdf> เข้าถึงเมื่อวันที่ 4 กุมภาพันธ์ 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

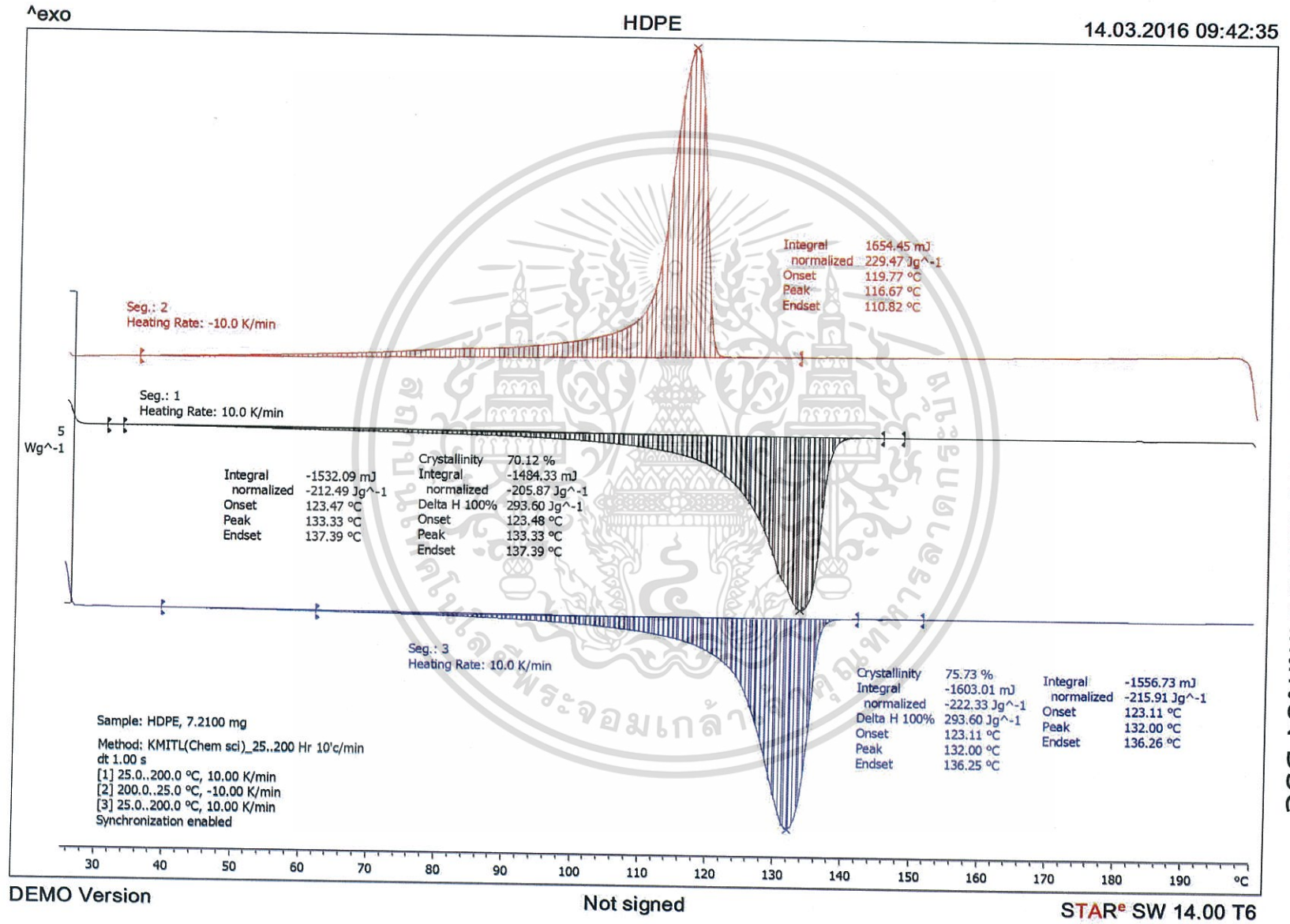
- [22] เต็มสุข แดงหอม และคณะ. 2544. เคมีพอลิเมอร์. [Online]. Available : http://www.sci.buu.ac.th/~chemistry/staff/thanida/Polymer_Chemistry/image_files/chapter5_3.html เข้าถึงเมื่อวันที่ 7 กุมภาพันธ์ 2559
- [23] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. 2549. เอกสารประกอบการสอน วิชา MTT656 Polymer Characterization and Analysis. [Online]. Available : <http://www.seem.kmutt.ac.th/research/pentec/download/MTT656-Chapter%20%205%20Electron%20Microscopy%20for%20Polymer%20%20%20%20%20Analysis.pdf> เข้าถึงเมื่อวันที่ 11 กุมภาพันธ์ 2559
- [24] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2557. เทคนิควิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ. [Online]. Available : <https://www.mtec.or.th/mcu/phcl/index.php/th/2014-09-04-06-23-37/14-uncategorised/38-thermal-analysis-th>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 11 กุมภาพันธ์ 2559
- [25] ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. 2557. Differential Scanning Calorimetry (DSC) [Online]. Available : http://www.nanotec.or.th/th/?page_id=559. เข้าถึงเมื่อวันที่ 14 กุมภาพันธ์ 2559
- [26] ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. 2557 Thermogravimetric Analysis (TGA) [Online]. Available : http://www.nanotec.or.th/th/?page_id=569. เข้าถึงเมื่อวันที่ 14 กุมภาพันธ์ 2559
- [27] Bernhard, S. 2010. "Phosphorus- based Flame Retardancy Mechanisms" *Materials* 3 : 4710-4745.
- [28] จรรณีญา กริ่งเกษมศรี. 2557. "การศึกษาการเกิดโพรงอากาศภายในชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป." โครงการพิเศษ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



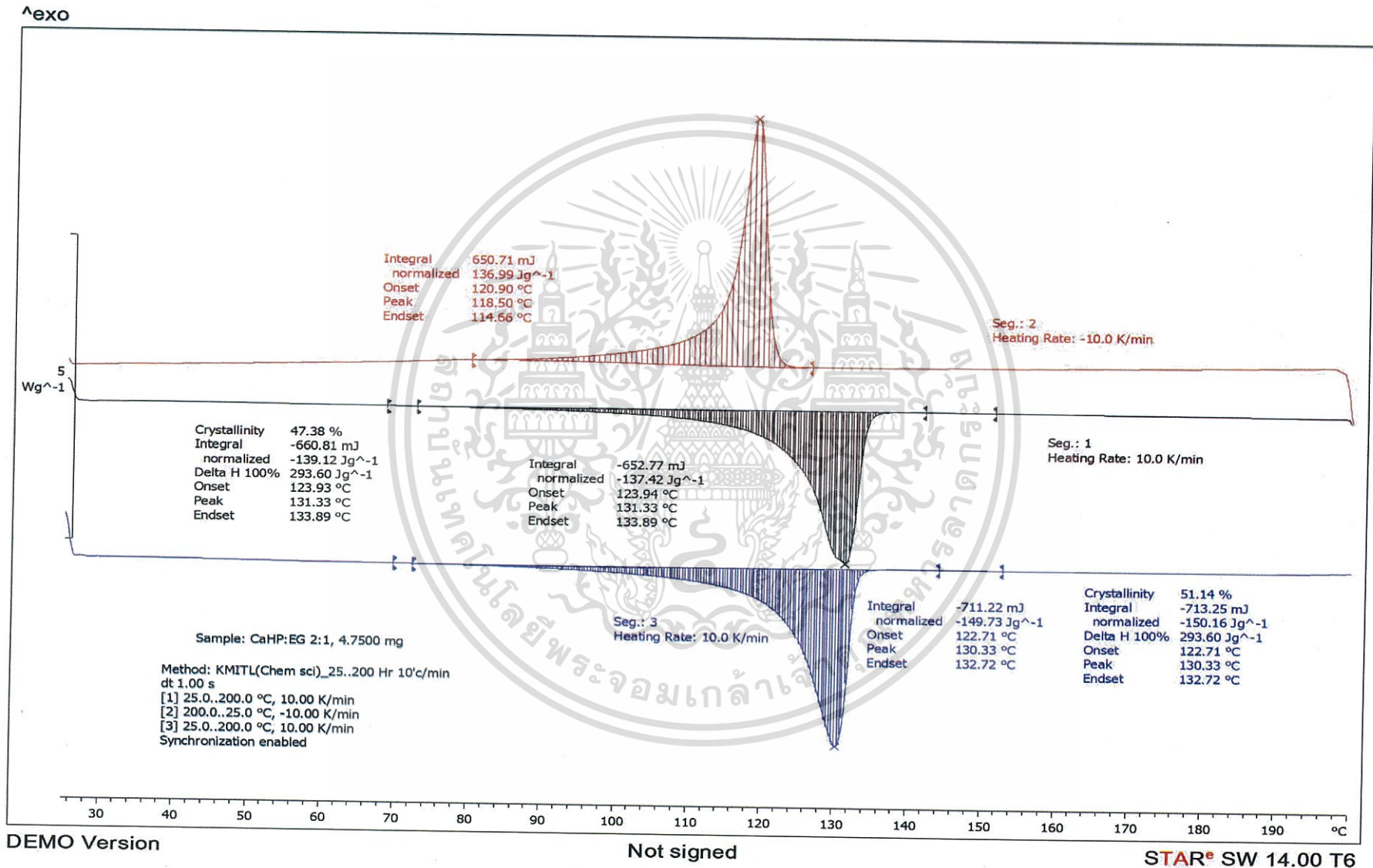
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



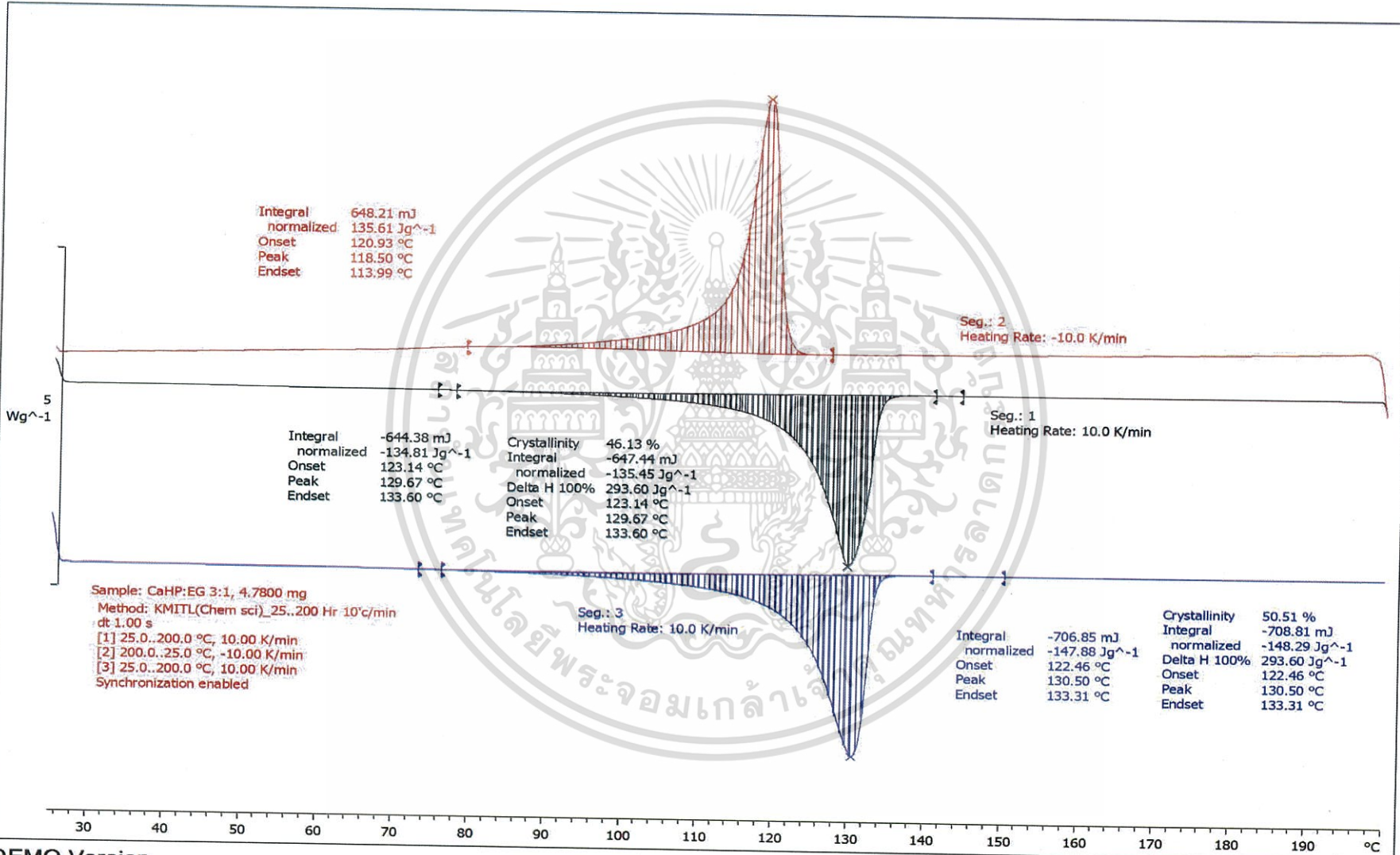
ภาคผนวก ก
ผลการทดสอบปีติทางความร้อนจากเครื่อง DSC

รูปที่ ก-1 กราฟจากเครื่อง DSC ของ HDPE



รูปที่ ก-2 กราฟจากเครื่อง DSC ของ CaHP:EG ในอัตราส่วน 2:1

^exo



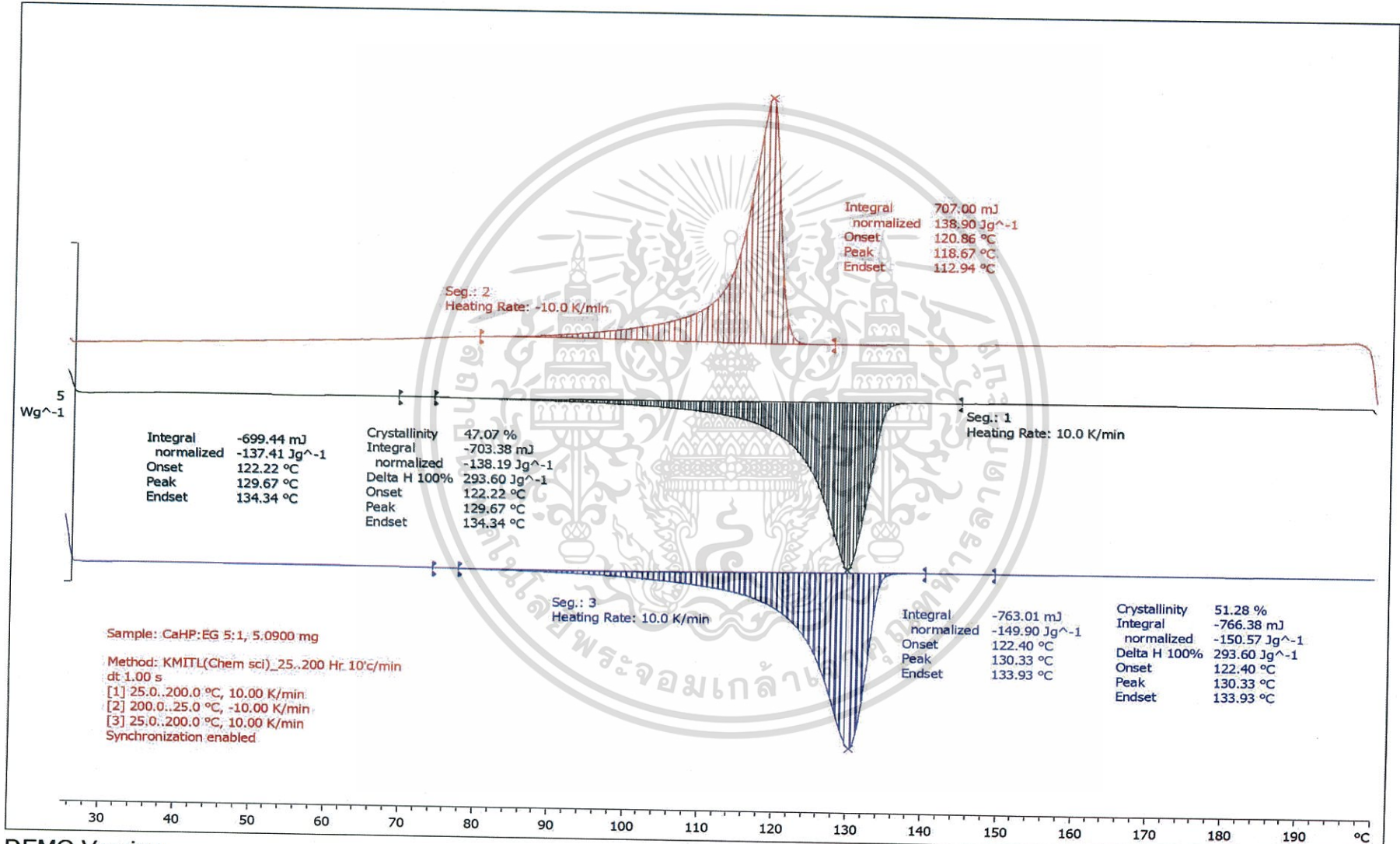
DEMO Version

Not signed

STAR® SW 14.00 T6

รูปที่ ก-3 กราฟจากเครื่อง DSC ของ CaHP:EG ในอัตราส่วน 3:1

^exo



Sample: CaHP:EG 5:1, 5.0900 mg
Method: KMITL(Chem sci)_25..200 Hr. 10 $^{\circ}C$ /min
dt 1.00 s
[1] 25.0..200.0 $^{\circ}C$, 10.00 K/min
[2] 200.0..25.0 $^{\circ}C$, -10.00 K/min
[3] 25.0..200.0 $^{\circ}C$, 10.00 K/min
Synchronization enabled

DEMO Version

Not signed

STAR[®] SW 14.00 T6

รูปที่ ก-4 กราฟจากเครื่อง DSC ของ CaHP:EG ในอัตราส่วน 5:1

ภาคผนวก ข
Datasheet ของสารเติมแต่งต่างๆ

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. APPARENCE: 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: 25/500/1000 kg 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IV. HEALTH HAZARD DATA

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

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 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 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. ENVIRONMENTABLE 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

PRODUCT DATA SHEET

Rev.No. : MMCPL/PDS/F/2012-2013

Rev.Dt. : 10 th June 2012

CARBOFOIL

PU-1800

1 Manufacturer

METACHEM MFG.CO.PVT.LTD.
 8/20 Erandwana, Off Karve Road,
 Pune-411004.,Maharashtra,India
 Tel.No. : 91 20 25439582, 25439583
 Fax.No : 91 20 25439581
 Email : chemical@metachem.in
www.metachem.in

2 Product Identification

Trade name : CRABOFOIL PU-1800

Manufacturer : METACHEM MFG.CO.PVT.LTD

3 Product Description

FLEXIFOIL PU-1800 is expandable, non-halogenated, solid Flame retardant
 With excellent processability for use in Polyurethane foam application.

Colour : Black shiny

Physical state : Solid

Appearance & Odour : Black shining flakes, Odourless

Typical particle size distribution

+60# : 70% Minimum

-100# : 15% Maximum

Density : 0.5 to 0.65 gm/cc

Expansion at 500 °C/1gm/90 sec : 180 cc Minimum

Moisture content : 1.0% Maximum

pH : 7±1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้