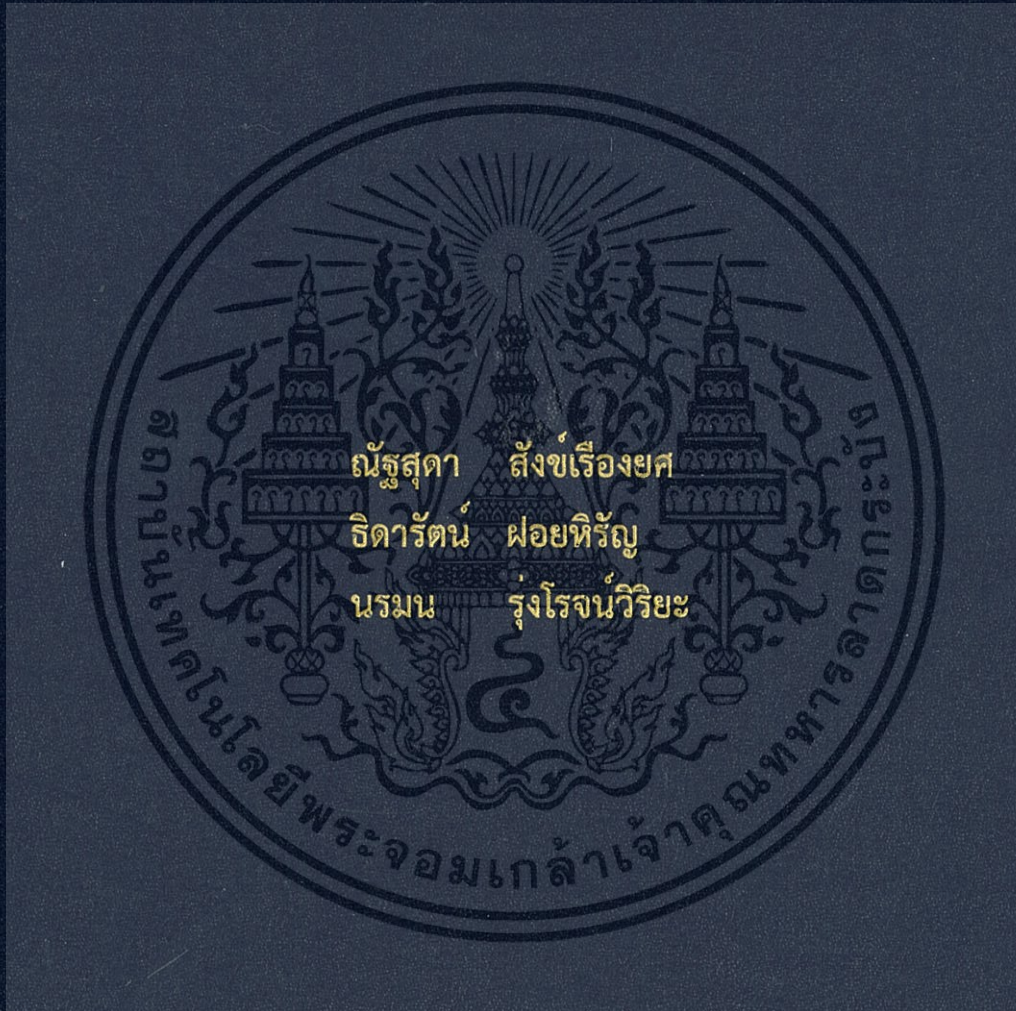


การศึกษาสารประกอบโลหะฟอสเฟตที่ใช้เป็นสารหน่วงไฟ
ในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

STUDY OF METAL PHOSPHATE COMPOUNDS AS
FLAME RETARDANTS IN HDPE



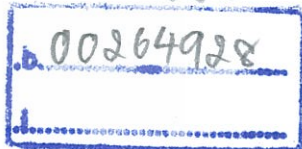
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การศึกษาสารประกอบโลหะฟอสเฟตที่ใช้เป็นสารหน่วงไฟ
ในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

STUDY OF METAL PHOSPHATE COMPOUNDS AS
FLAME RETARDANTS IN HDPE



TB00066



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF METAL PHOSPHATE COMPOUNDS AS
FLAME RETARDANTS IN HDPE



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 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาสารประกอบโลหะฟอสเฟตที่ใช้เป็นสารหน่วงไฟในพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูง
Study Of Metal Phosphate Compounds As Flame Retardants In HDPE

ชื่อนักศึกษา นางสาวณัฐสุดา สังข์เรืองยศ รหัสนักศึกษา 56050490
นางสาวธิดารัตน์ ฝอยศิริธัญ รหัสนักศึกษา 56050508
นางสาวนรมน รุ่งโรจน์วิริยะ รหัสนักศึกษา 56050511

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา เคมี
ปีการศึกษา 2559
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. อธิธิพล แจ้งชัด
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร. บรรจง บุญชม

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร. ตะวัน สุขน้อย ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.บุณณมา ศิริพันธ์โนน กรรมการ	
รศ.ดร.อธิธิพล แจ้งชัด กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	
ผศ.ดร.บรรจง บุญชม กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาสารประกอบโลหะฟอสเฟตที่ใช้เป็นสารหน่วงไฟในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

Study Of Metal Phosphate Compounds As Flame Retardants In HDPE

ชื่อนักศึกษา นางสาวณัฐสุดา สังข์เรืองยศ รหัสนักศึกษา 56050490
นางสาวธิดารัตน์ ฝอยหิรัญ รหัสนักศึกษา 56050508
นางสาวนรมน รุ่งโรจน์วิริยะ รหัสนักศึกษา 56050511

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา เคมี

มหาวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. อธิพิล แจ้งชัด

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร. บรรจง บุญชม

บทคัดย่อ

ปัจจุบันนี้มีการใช้ผลิตภัณฑ์จากพลาสติกอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ราคาถูก และขึ้นรูปง่าย อย่างไรก็ตามพลาสติกมีข้อเสียคือ ติดไฟง่ายและเกิดการลุกลามของเปลวไฟอย่างรวดเร็ว โดยสารเติมแต่งจำพวกสารหน่วงไฟ (FR) สามารถแก้ปัญหานี้ได้ อย่างไรก็ตามสารหน่วงไฟเชิงพาณิชย์ในปัจจุบัน มีราคาสูง ความหนาแน่นมาก และยังต้องใส่ในปริมาณมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาสารหน่วงไฟประเภทฟอสเฟตชนิดใหม่โดยเลือก HDPE เป็นตัวแทนของพลาสติก ทำการศึกษาชนิด FR และอัตราส่วนต่างๆ ใน HDPE ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการหน่วงไฟและสมบัติเชิงกล เปรียบเทียบกับ FR เชิงพาณิชย์ได้แก่ ATH โดยในงานวิจัยนี้ได้สังเคราะห์สารหน่วงไฟ 6 ชนิด ได้แก่ $\text{CaNH}_4\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, $\text{Mn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ด้วยวิธีการตกตะกอน แล้วทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA และ DSC จากนั้นผสม HDPE กับ FR ด้วยเครื่องผสมระบบปิดและขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป เพื่อทดสอบสมบัติการหน่วงไฟในระบบเดี่ยวตามมาตรฐาน UL-94 และในอัตราส่วน HDPE:FR ที่ 70:30 (w/w) จากการศึกษาผลของปริมาณสารหน่วงไฟ พบว่า $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ มีอัตราการลามไฟช้าที่สุด เป็นที่น่าสังเกตว่า $\text{Mn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ มีสมบัติการหน่วงไฟที่ดีและมีสมบัติด้านการหยุดตัว (Anti-dripping) จากการศึกษาผลของปริมาณการเติม FR พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ FR จะทำให้อัตราการลามไฟลดลง แต่ทำให้สมบัติเชิงกลของพลาสติก HDPE ลดลง คาดว่าเป็นปัญหาเนื่องจากการยึดติดและการกระจายตัวของสารหน่วงไฟใน HDPE ซึ่งสามารถยืนยันได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการศึกษาลักษณะวิทยาด้วยเทคนิค SEM จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ และ $Mn_3(PO_4)_2 \cdot 3H_2O$ มีศักยภาพที่จะพัฒนาใช้เป็น FR เซิงพาณิชย์สำหรับพลาสติก

คำสำคัญ : เมทอลฟอสเฟต, ระบบเดี่ยว, สารต้านการหยุดตัวของพลาสติกเมื่อได้รับความร้อน, สารหน่วงไฟ, แอมโมเนียมฟอสเฟต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title Study Of Metal Phosphate Compounds As Flame Retardants In HDPE

Students Miss.Natsuda Sangruengyot Student ID 56050490
 Miss.Thidarat Foihirun Student ID 56050508
 Miss.Noramom Roongrojviriya Student ID 560505511

Degree Bachelor of Science (Industrial chemistry)

Department Chemistry

Faculty Science

University King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)

Academic Year 2016

Advisor Assoc.Prof.Dr.Ittipol Jangchud

Co-advisor Asst.Prof.Dr.Banjong Boonchom

Abstract

Nowadays, plastic products have been used dramatically in daily life due to their low density, relatively cheap, and ease of processing. However, one of the most important drawbacks of plastics is their flammability. Commercial flame retardants (FRs) can be used to solve this problem. However, they are expensive, heavy, and high loading. This research is aimed to study novel phosphate flame retardants in high density polyethylene (HDPE) as a representative of plastics. FR types and loadings were comparatively studied with a commercial FR (ATH). In this research, 6 compounds were synthesized by a simple precipitation method, such as, $\text{CaNH}_4\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, $\text{Mn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ and $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. HDPE and FR were compounded by using an internal mixer and shaped into samples by a compression molding machine. UL-94 standard and LOI study about flame retarding efficiency. By testing at a fixed HDPE/FR ratio (70/30 by weight), it was found that $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ was retarded with lower burning rates. It was noted that $\text{Mn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ showed a low burning rate with anti-dripping effect. As the FR loading was increased, burning rates of FR filled HDPE were decreased. However, mechanical properties tends to decrease. These problems might be derived from FR agglomerates and poor FR-HDPE interfacial bonding. These defects

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

were confirmed by SEM results. It can be concluded that $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and $\text{Mn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ showed promising results to be used as commercial FRs for plastics.

Keywords : Metal phosphate, Single system, Anti-dripping agent, Flame retardant, Ammonium phosphate



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจาก รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจัต ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ และ ผศ.ดร.บรรจง บุญชม ที่ปรึกษาโครงการพิเศษร่วม ที่สละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำปรึกษา คำแนะนำและความช่วยเหลือในการดำเนินงานโครงการพิเศษตลอดมา จึงขอขอบพระคุณอาจารย์ทั้งสองท่านมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย และ ผศ.ดร. ปุณณมา ศิริพันธ์ โนน อาจารย์ คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษที่ให้คำแนะนำ ตรวจสอบตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่อง เพื่อให้โครงการพิเศษฉบับนี้ถูกต้องและสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และ คุณสุจิต สอนสะอาด เจ้าหน้าที่ประจำ อาคารฝึกงานอุตสาหกรรมเคมี และ พอลิเมอร์เทคโนโลยีรวมทั้ง คุณขวัญใจ พูลสวัสดิ์ ที่คอยอำนวยความสะดวกตลอดการทำโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณ ผศ. ดร. พูนทรัพย์ ศรีภพนาถกุล ภาควิชาวิทยาการ และวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องทดสอบค่าดัชนีออกซิเจนต่ำที่สุด (Limiting oxygen index; LOI)

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่อาคารและสถานที่ รวมจนถึงแม่บ้าน ที่ช่วยเหลืออำนวยความสะดวกในการเปิดปิดอาคารทั้งในและนอกเวลาราชการ

ขอขอบพระคุณ คุณสุธิดา แซ่มชื่น นักศึกษาปริญญาโท ที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด

นอกจากนี้ยังมีบุคคลท่านอื่นๆ ที่ให้ความช่วยเหลือโดยไม่ได้กล่าวถึง ผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ณัฐสุดา สังข์เรืองยศ

ธิดารัตน์ ฝอยศิริญ

นรมน รุ่งโรจน์วิริยะ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป	ญ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขต.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 พลาสติก.....	5
2.1.1 สมบัติทั่วไปของพลาสติก	5
2.1.2 สารเติมแต่งในพลาสติก	5
2.2 กลไกการติดไฟและดับไฟ.....	6
2.2.1 กลไกการติดไฟ.....	6
2.2.2 กลไกการดับไฟ.....	7
2.3 สารหน่วงไฟ.....	8
2.3.1 การยับยั้งการติดไฟ.....	8
2.3.2 ประเภทของสารหน่วงไฟ.....	9
2.3.3 สารหน่วงไฟที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม	9
2.4 สารหน่วงไฟในระบบเดี่ยว.....	10
2.4.1 การสังเคราะห์สารหน่วงไฟประเภทฟอสเฟต.....	10
2.4.2 กลไกการหน่วงไฟของสารหน่วงไฟประเภทฟอสเฟต.....	13
2.4.3 การยึดเกาะระหว่างโมเลกุลของน้ำในโครงสร้างกับโลหะฟอสเฟต	13
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	22
3.1 พลาสติกและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	22
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	23
3.3 สังเคราะห์สารประกอบโลหะประเภทฟอสเฟต.....	25
3.4 การศึกษาสารประกอบโลหะประเภทฟอสเฟตชนิดต่างๆ ที่มีผลต่อการหน่วงไฟ....	29
3.5 การศึกษาผลของอัตราส่วนของ HDPE ต่อสารหน่วงไฟ (FR)	29
3.6 การศึกษาสมบัติต่างๆ ของ HDPE เมื่อผสมสารหน่วงไฟ	30
3.6.1 ทดสอบสมบัติทางกายภาพ.....	30
3.6.2 ทดสอบสมบัติเชิงกล	31
3.6.3 ทดสอบสมบัติทางความร้อน	32
3.6.4 ทดสอบสมบัติการติดไฟและการลามไฟ.....	33
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	37
4.1 สังเคราะห์สารประกอบโลหะประเภทฟอสเฟต.....	37
4.1.1 ศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD	37
4.1.2 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR	41
4.1.3 ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA.....	43
4.2 การศึกษาสารประกอบโลหะประเภทฟอสเฟตชนิดต่างๆ ที่มีผลต่อการหน่วงไฟ....	44
4.2.1 ศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC.....	44
4.2.2 ศึกษาสมบัติการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94.....	45
4.3 ผลของอัตราส่วนของ HDPE ต่อสารประกอบโลหะประเภทฟอสเฟต	46
4.3.1 ศึกษาสมบัติการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94	46
4.3.2 ศึกษาปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนที่ต่ำที่สุด ที่ทำให้เกิดการเผาไหม้.....	47
4.3.3 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC	47
4.4 การศึกษาสมบัติต่างๆ ของ HDPE เมื่อผสมสารหน่วงไฟ	48
4.4.1 ศึกษาความหนาแน่นของสารหน่วงไฟที่สังเคราะห์ขึ้น.....	48
4.4.2 ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของสารหน่วงไฟ	49
4.4.3 ศึกษาสมบัติเชิงกล	54
4.5 วิเคราะห์ต้นทุน	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	58
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	58
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	59
เอกสารอ้างอิง	60
ภาคผนวก	65
ภาคผนวก ก	66
ภาคผนวก ข	69
ภาคผนวก ค	72



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 สรุปการทดสอบสมบัติต่างๆ ของ HDPE ผสมสารหน่วงไฟที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้.....	4
2.1 เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสีย ในการสังเคราะห์สารประกอบแต่ละวิธี.....	12
2.2 พีคของหมู่ฟอสเฟต	19
2.3 ผลการวิเคราะห์ LOI, ปริมาณชั้นเถ้า, ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัส	20
2.4 การวิเคราะห์ LOI.....	20
3.1 สมบัติบางประการของ HDPE.....	22
3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	23
3.3 อัตราส่วนของ HDPE ต่อสารหน่วงไฟ (FR).....	29
3.4 เกณฑ์การแบ่งกลุ่มพฤติกรรมของวัสดุต่อการติดไฟตามมาตรฐาน UL-94	34
3.5 เกณฑ์การแบ่งกลุ่มพฤติกรรมของวัสดุต่อการติดไฟตามมาตรฐาน UL-94 แบบแนวนอน.....	35
3.6 เกณฑ์การแบ่งการติดไฟของวัสดุตามมาตรฐาน LOI.....	36
4.1 ร้อยละผลผลิตของสารหน่วงไฟที่สังเคราะห์ขึ้น.....	37
4.2 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของสารหน่วงไฟที่สังเคราะห์ขึ้น	41
4.3 ปริมาณน้ำในโครงสร้างและปริมาณชั้นเถ้าของสารหน่วงไฟที่สังเคราะห์ขึ้นที่ได้จากเทคนิค TGA และจากทฤษฎี	44
4.4 ค่าเอนทาลปี (ΔH) ของสารหน่วงไฟที่สังเคราะห์ขึ้น.....	45
4.5 ผลการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 ของสารประกอบโลหะฟอสเฟตชนิดต่างๆ	46
4.6 ผลการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 ของ HDPE:FR ในอัตราส่วนแตกต่างกัน	46
4.7 Limiting oxygen index (%) ของ HDPE:FR ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน.....	47
4.8 ผลการวิเคราะห์ DSC ของพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วน 70:30 (โดยน้ำหนัก).....	48
4.9 ผลการวิเคราะห์ DSC ของพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วน 50:50 (โดยน้ำหนัก).....	48
4.10 ต้นทุนสารหน่วงไฟที่สังเคราะห์ขึ้นเทียบกับราคา ATH.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ภาพความเสียหายจากการเกิดเพลิงไหม้	1
1.2 ปริมาณการใช้พลาสติก	2
2.1 ผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากพลาสติก.....	5
2.2 องค์ประกอบของการเผาไหม้	6
2.3 ตัวอย่างการสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล	10
2.4 ตัวอย่างการสังเคราะห์แบบโซลเจล.....	11
2.5 ตัวอย่างการสังเคราะห์ด้วยคอมบัสชัน	11
2.6 ตัวอย่างการสังเคราะห์ด้วยการตกตะกอน	11
2.7 ตัวอย่างการสังเคราะห์ด้วยการตกตะกอนร่วม.....	12
2.8 FT-IR ของ $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$	14
2.9 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD.....	15
2.10 วิเคราะห์อุณหภูมิที่สลายตัวของ MAP.....	15
2.11 กราฟ FTIR ของ $Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$	16
2.12 กราฟ TGA ของ $MnPO_4 \cdot H_2O$	17
2.13 กราฟ TGA ของ $Mn_3(PO_4)_2 \cdot 3H_2O$	18
2.14 กราฟ FTIR ของ $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$	18
2.15 กราฟ TGA ของ $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$	19
3.1 แผนผังการเตรียมสารประกอบโลหะประเภทฟอสเฟต	28
3.2 การทดสอบแบบ Flexural test	31
3.3 ลักษณะของตัวอย่างและวิธีการทดสอบความทนต่อแรงกระแทกแบบไอซอด	32
3.4 ลักษณะชิ้นงานที่ทำการทดสอบ.....	33
3.5 การทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 โดยการเผาชิ้นงานแบบแนวนอน	34
3.6 การทดสอบ Limiting Oxygen Index	35
4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD ของ FR (a) CaN, (b) MgN, (c) MgH, (d) MgP, (e) MnP และ (f) ZnP	40
4.2 ความหนาแน่น (Density) ของสารหน่วงไฟชนิดต่างๆ.....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 ภาพ SEM ที่เตรียมจาก HDPE กับ ATH ในอัตราส่วน 70:30, 60:40 และ 50:50 (โดยน้ำหนัก) ตามลำดับที่กำลังขยาย 300 เท่า (a), (b) และ (c) ที่กำลังขยาย 2000 เท่า (d), (e) และ (f).....	50
4.4 ภาพ SEM ที่เตรียมจาก HDPE กับ MgN ในอัตราส่วน 70:30, 60:40 และ 50:50 (โดยน้ำหนัก) ตามลำดับที่กำลังขยาย 300 เท่า (a), (b) และ (c) ที่กำลังขยาย 2000 เท่า (d), (e) และ (f).....	52
4.5 ภาพ SEM ที่เตรียมจาก HDPE กับ MnP ในอัตราส่วน 70:30, 60:40 และ 50:50 (โดยน้ำหนัก) ตามลำดับที่กำลังขยาย 300 เท่า (a), (b) และ (c) ที่กำลังขยาย 2000 เท่า (d), (e) และ (f).....	53
4.6 ความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) ของ HDPE:FR ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน.....	54
4.7 โมดูลัสโค้งงอ (Flexural modulus) ของ HDPE:FR ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน.....	55
4.8 ค่าความแข็งแรงกระแทกของ HDPE:FR ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน.....	56
4.9 ความแข็ง (Hardness) ของ HDPE:FR ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน.....	56



คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
FR	สารหน่วงไฟ (Flame retardant)
ATH	อะลูมินา ไตรไฮเดรต (Alumina trihydrate)
HDPE	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene)
MgN	แมกนีเซียม แอมโมเนียมฟอสเฟต เฮกซะไฮเดรต (Magnesium ammonium phosphate hexahydrate)
CaN	แคลเซียม แอมโมเนียมฟอสเฟต มอนอไฮเดรต (Calcium ammonium phosphate monohydrate)
MgH	แมกนีเซียม ไฮโดรเจนฟอสเฟต ไตรไฮเดรต (Magnesium hydrogenphosphate trihydrate)
MgP	ไตรแมกนีเซียมไดฟอสเฟต ออกตะไฮเดรต (Trimagnesium diphosphate octahydrate)
MnP	ไตรแมงกานีสไดฟอสเฟต ไตรไฮเดรต (Trimanganese diphosphate trihydrate)
ZnP	ไตรซิงค์ไดฟอสเฟต เตตระไฮเดรต (Trizinc diphosphate tetrahydrate)
DSC	Differential scanning calorimetry
FT-IR	Fourier transform infrared spectroscopy
LOI	Limiting oxygen index
TGA	Thermogravimetric analysis
XRD	วิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer)
SEM	กล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

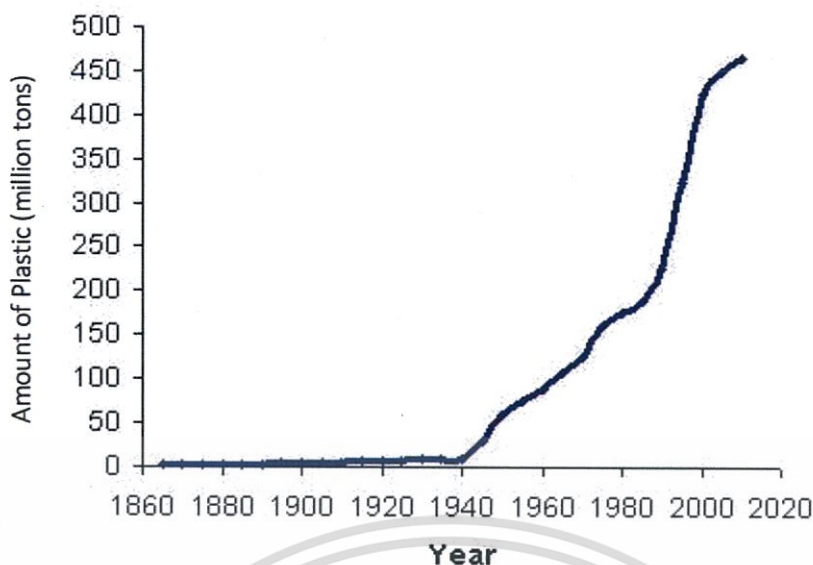
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเกิดเพลิงไหม้เป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดความเสียหายทั้งทางชีวิตและทรัพย์สิน [1] โดยในปัจจุบันมีการใช้พลาสติกในชีวิตประจำวันมากขึ้น [2] เนื่องจากสามารถใช้ทดแทน ไม้ เหล็ก สแตนเลส โดยมีสมบัติที่ดี เช่น ความแข็งแรงสูง ทนดินฟ้าอากาศ น้ำหนักเบา ผลิตได้ง่าย และยิ่งไปกว่านั้นคือมีราคาถูก เหมาะแก่การใช้งาน ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นไปตามความต้องการของผู้บริโภค อย่างไรก็ตามพลาสติกมีข้อจำกัดคือ เสถียรภาพทางความร้อนต่ำ ส่วนใหญ่ติดไฟง่าย เมื่อเกิดเพลิงไหม้จะทำให้พลาสติกหลอมและกลายเป็นเชื้อเพลิง เกิดการลุกไหม้อย่างต่อเนื่องและลามไฟอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามสมบัติของพลาสติกสามารถปรับปรุงได้โดยการใช้สารเติมแต่ง (Additives) ดังนั้นในการใช้งานพลาสติกบางประเภท จึงมีการใช้สารเติมแต่งจำพวกสารหน่วงไฟ (Flame retardant; FR) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ถูกนำมาใส่ในพลาสติก เพื่อมาปรับปรุงสมบัติการลามไฟของพลาสติก ทำให้ติดไฟยากขึ้น หรือสามารถดับไฟได้ด้วยตนเอง (Self-extinguishing)



รูปที่ 1.1 ภาพความเสียหายจากการเกิดเพลิงไหม้ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 ปริมาณการใช้พลาสติก [2]

สารหน่วงไฟ (Flame retardant; FR) นั้นมีหลากหลายประเภท เช่น สารประกอบฮาโลเจน (Halogen-based flame retardant) และสารประกอบที่ไม่มีฮาโลเจน (Halogen-free flame-retardant) ในอดีตนิยมใช้สารหน่วงไฟประเภทฮาโลเจน เช่น พอลิโบรมิเนต ไดฟีนิล-อีเทอร์ (PBDEs) และเฮกซะโบรโมไซโคลอโดดีเคน (HBCD) [3] พบว่าเมื่อสารเหล่านี้เกิดการเผาไหม้จะปล่อยสารพิษออกมาทำลายสิ่งมีชีวิต และสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีการสังเคราะห์สารหน่วงไฟประเภทสารประกอบที่ไม่มีฮาโลเจน (Halogen-free flame retardant) เพื่อให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งในอุตสาหกรรมนิยมใช้ อะลูมินา ไตรไฮเดรต (Alumina trihydrate; ATH) เป็นสารหน่วงไฟเนื่องจากมีสมบัติในการดูดซับความร้อนและอุณหภูมิการเริ่มสลายตัวอยู่ที่ 220 °C ซึ่งอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการขึ้นรูปของพลาสติก เช่น พอลิเอทิลีน (Polyethylene) และพอลิโพรพิลีน (Polypropylene) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ATH มีข้อเสียคือ ความหนาแน่นสูง เมื่อผสมในพลาสติกพบว่าทำให้ชิ้นงานมีน้ำหนักมากขึ้น อีกทั้งยังมีราคาแพงและต้องใช้ในปริมาณมาก จึงเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิตสินค้า [4]

สารประกอบโลหะฟอสเฟตได้มีการนำมาใช้เป็นสารหน่วงไฟอันเนื่องมาจากมีสมบัติในการดูดซับความร้อนและลดอุณหภูมิของระบบลงขณะเกิดการเผาไหม้ในพลาสติก อีกทั้งยังไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม และการใช้สารประกอบฟอสเฟตร่วมกับไนโตรเจนจะเกิดปรากฏการณ์เสริมกัน (Synergistic effect) ทำให้ประสิทธิภาพการหน่วงไฟดียิ่งขึ้น

ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาและค้นหาสารหน่วงไฟชนิดใหม่ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการหน่วงไฟในระบบเดี่ยว ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถลดต้นทุนในการผลิตได้ โดยในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสารหน่วงไฟเชิงเปรียบเทียบระหว่างสารหน่วงไฟประเภทฟอสเฟตที่สังเคราะห์ขึ้นกับสารหน่วงไฟมาตรฐานที่ใช้ในอุตสาหกรรม (ATH) โดยเลือกใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เป็นตัวแทนของพลาสติก เนื่องจากการใช้ HDPE ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ อย่างแพร่หลาย และคาดว่าสารหน่วงไฟประเภทฟอสเฟตที่สังเคราะห์ขึ้นจะมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ทดแทนสารหน่วงไฟมาตรฐานในอุตสาหกรรม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการสังเคราะห์สารหน่วงไฟประเภทฟอสเฟต ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แคลเซียม แอมโมเนียมฟอสเฟต มอนอไฮเดรต (Calcium ammonium phosphate monohydrate; $\text{CaNH}_4\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (CaN))
- แมกนีเซียม แอมโมเนียมฟอสเฟต เฮกซะไฮเดรต (Magnesium ammonium phosphate hexahydrate; $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (MgN))
- แมกนีเซียม ไฮโดรเจนฟอสเฟต ไตรไฮเดรต (Magnesium hydrogenphosphate trihydrate; $\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (MgH))
- ไตรแมกนีเซียมไดฟอสเฟต ออกตะไฮเดรต (Trimagnesium diphosphate octahydrate; $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (MgP))
- ไตรแมงกานีสไดฟอสเฟต ไตรไฮเดรต (Trimanganese diphosphate trihydrate; $\text{Mn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (MnP))
- ไตรซิงค์ไดฟอสเฟต เตตระไฮเดรต (Trizinc diphosphate tetrahydrate; $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (ZnP))

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาแนวเปรียบเทียบผลของชนิดสารประกอบโลหะฟอสเฟต เพื่อใช้เป็นสารหน่วงไฟสำหรับพลาสติก โดยเน้นศึกษาปัจจัยบางประการ ได้แก่ ผลของชนิดโลหะฟอสเฟต และผลของปริมาณสารหน่วงไฟที่สังเคราะห์ได้ต่อปริมาณของพลาสติก ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการหน่วงไฟ และสมบัติเชิงกล

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) สังเคราะห์สารหน่วงไฟประเภทฟอสเฟตด้วยวิธีตกตะกอนได้แก่
 - $\text{CaNH}_4\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
 - $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
 - $\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
 - $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
 - $\text{Mn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
 - $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

3) ผสมอัตราส่วนของพลาสติก (HDPE) ต่อสารหน่วงไฟที่สังเคราะห์ได้ เป็น 70:30 (โดยน้ำหนัก) ด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) และขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine)

4) ทดสอบประสิทธิภาพการหน่วงไฟของตัวอย่างพลาสติกที่ผสมสารหน่วงไฟในอัตราส่วน 70:30 (โดยน้ำหนัก) ใช้วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน UL-94 แบบแนวตั้งและแนวนอน

5) เลือกสารหน่วงไฟที่มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดีที่สุด และเลือกสารหน่วงไฟจากสมบัติบางประการ เช่น สมบัติการต้านการหดตัวของพลาสติกเมื่อโดนความร้อนเมื่อเทียบกับ ATH ซึ่งเป็นสารหน่วงไฟที่ใช้ในอุตสาหกรรม จากนั้นศึกษาผลของปริมาณสารหน่วงไฟในอัตราส่วนต่างๆ ในพลาสติก ได้แก่ 70:30, 60:40 และ 50:50 (โดยน้ำหนัก) ที่ส่งผลต่อการหน่วงไฟในระบบเดี่ยว

6) ศึกษาสมบัติต่างๆ ของสารหน่วงไฟที่สังเคราะห์ขึ้น แสดงดังตารางที่ 1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถสังเคราะห์สารท่อนงไฟประเภทฟอสเฟตด้วยวิธีตกตะกอน โดยสารท่อนงไฟที่สังเคราะห์นั้นมีประสิทธิภาพการท่อนงไฟที่ดี ท่อนงการติดไฟระดับ V_0 หรือ V_1 ในระบบเดี่ยว ต้นทุนการผลิตต่ำ และมีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์
- 2) สารท่อนงไฟที่สังเคราะห์มีสมบัติเป็นสารต้านการหยดตัวของพลาสติกเมื่อได้รับความร้อน (Anti-dripping agent)
- 3) สามารถใช้ความรู้ที่ได้เป็นแนวทางการศึกษาสารท่อนงไฟชนิดอื่นๆ ในอนาคต

ตารางที่ 1.1 สรุปการทดสอบสมบัติต่างๆ ของ HDPE ผสมสารท่อนงไฟที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้

สมบัติ	การทดสอบ
สมบัติทางกายภาพ	- ความหนาแน่น (Density)
สัณฐานวิทยา	- Scanning electron microscopy (SEM)
สมบัติเชิงกล	- ความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) - โมดูลัสโค้งงอ (Flexural modulus) - ความทนต่อแรงกระแทก (Impact strength) - ความแข็ง (Hardness)
สมบัติทางความร้อน	- Thermogravimetric analysis (TGA) - Differential scanning calorimetry (DSC)
สมบัติการลามไฟตามมาตรฐาน	- UL-94 แบบแนวนอนและแนวตั้ง - Limiting oxygen index (LOI)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติก

2.1.1 สมบัติทั่วไปของพลาสติก

ในปัจจุบันนี้มีการนำพลาสติกมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากพลาสติกนั้นมีน้ำหนักเบา บางประเภททนทานต่อสารเคมี เป็นฉนวนไฟฟ้าและมีความเหนียวทนทาน แต่อย่างไรก็ตามพลาสติกนั้นยังมีข้อเสีย คือ ความแข็งแรงนั้นน้อยกว่าเหล็ก อีกทั้งมีสมบัติทนความร้อนได้น้อย เมื่อพลาสติกได้รับความร้อนจะทำให้เกิดการหดตัวและเสียสภาพได้ง่าย จึงจำเป็นต้องมีการใส่สารเติมแต่งบางชนิด เช่น สารหน่วงไฟ เพื่อปรับปรุงสมบัติของพลาสติก บางประการให้ดีขึ้น



รูปที่ 2.1 ผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากพลาสติก [6]

2.1.2 สารเติมแต่งในพลาสติก (Additives)

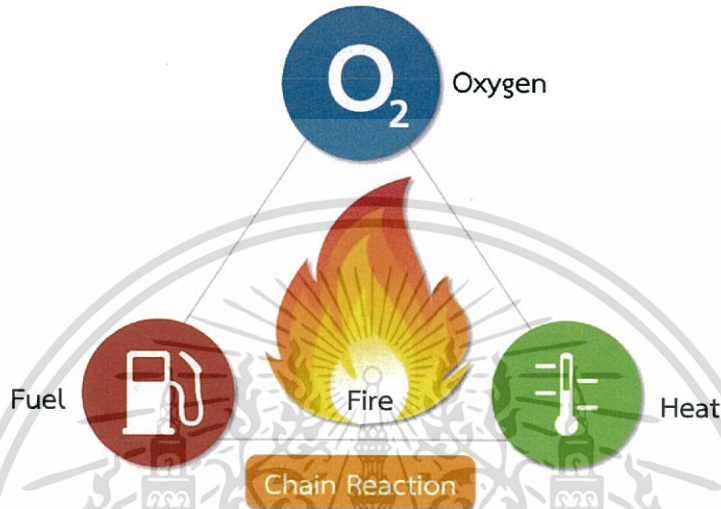
สารเติมแต่งเป็นสารที่มีการใส่เพิ่มลงไปในพลาสติก เพื่อปรับปรุงสมบัติของพลาสติกให้ดียิ่งขึ้น โดยสารเติมแต่งนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายชนิด อาทิเช่น เส้นใยเสริมแรง สารตัวเติมหรือฟิลเลอร์ (Filler) สารหน่วงไฟ (Flame retardant; FR) และพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 กลไกการติดไฟและดับไฟ

2.2.1 กลไกการติดไฟ

องค์ประกอบของการเผาไหม้ ประกอบด้วย 4 ปัจจัย โดย 3 ปัจจัยหลัก คือ องค์ประกอบของไฟ ได้แก่ เชื้อเพลิง (Fuel), ออกซิเจน (Oxygen) และความร้อน (Heat) ซึ่งจะทำให้เกิดการติดไฟ แต่การติดไฟอย่างต่อเนื่องจำเป็นต้องมีปัจจัยที่ 4 คือ ปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain reaction) [7]



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบของการเผาไหม้

1) เชื้อเพลิง วัสดุที่สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว โดยเชื้อเพลิงที่อยู่ในสถานะก๊าซเท่านั้นที่ลุกติดไฟได้ แต่เชื้อเพลิงที่อยู่ในสถานะของแข็งและของเหลวจะติดไฟได้ก็ต่อเมื่อเชื้อเพลิงนั้นสัมผัสกับความร้อนและทำให้โมเลกุลที่ผิวของเชื้อเพลิงเกิดการเปลี่ยนสถานะเป็นก๊าซเท่านั้น จึงจะเกิดการลุกติดไฟ โดยเชื้อเพลิงแต่ละชนิดจะอาศัยอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะเป็นก๊าซที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ความต่างต่างนั้นขึ้นกับสมบัติของเชื้อเพลิง 4 ประการ ได้แก่

1.1 ความสามารถในการติดไฟ (Flammability limit) คือ ปริมาณไอของเชื้อเพลิงในอากาศที่พร้อมจะติดไฟ ซึ่งเชื้อเพลิงแต่ละชนิดก็จะมีปริมาณไอที่แตกต่างกัน โดยปริมาณไอมี 2 ค่า ได้แก่ ค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของไอเชื้อเพลิง

- ค่าต่ำสุดของไอเชื้อเพลิง (Lower flammability limit) คือ ปริมาณต่ำสุดของไอเชื้อเพลิงที่เป็นเปอร์เซ็นต์ในอากาศ ที่สามารถเกิดการติดไฟได้

- ค่าสูงสุดของไอเชื้อเพลิง (Upper flammability limit) คือ ปริมาณสูงสุดของไอเชื้อเพลิงที่เป็นเปอร์เซ็นต์ในอากาศ ที่สามารถเกิดการติดไฟได้

1.2 จุดวาบไฟ (Flash point) คือ อุณหภูมิต่ำสุดที่ทำให้เชื้อเพลิงคายไอออกมาแล้วผสมกับออกซิเจนในอากาศด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมถึงจุดที่มีค่าต่ำสุดถึงค่าสูงสุดของไอเชื้อเพลิง ทำให้เกิดประกายไฟขึ้นมา เป็นไฟวาบขึ้นและดับลงไป

1.3 จุดติดไฟ (Fire point) คือ อุณหภูมิที่เชื้อเพลิงได้รับความร้อนจนถึงจุดที่ติดไฟ โดยไฟที่เกิดขึ้นจะติดแบบต่อเนื่อง โดยปกติจุดติดไฟนั้นจะมีอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดวาบไฟ ประมาณ 7 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ความหนาแน่นไอ (Vapor density) คือ อัตราส่วนน้ำหนักเชื้อเพลิงในสถานะก๊าซต่อน้ำหนักของอากาศ โดยความหนาแน่นไอแสดงถึงก๊าซที่เกิดขึ้นนั้นมีน้ำหนักเบาหรือหนักกว่าอากาศ

2) ออกซิเจน ภายในอากาศซึ่งมีก๊าซออกซิเจนอยู่ถึง 21% โดยประมาณ แต่การเผาไหม้นั้นจะเกิดอย่างต่อเนื่องได้ออกซิเจนที่มีจะต้องไม่ต่ำกว่า 16% ไม่เช่นนั้นไฟจะดับลง

3) ความร้อน คือ พลังงานที่จะทำให้เชื้อเพลิงแต่ละชนิดคายไอออกมา โดยความร้อนจำเป็นต้องมีอย่างเพียงพอ เนื่องจากหากความร้อนไม่เพียงพอก็จะไม่เกิดการติดไฟขึ้น

4) ปฏิกริยาลูกโซ่ หรือการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง กระบวนการเผาไหม้นี้จะเริ่มตั้งแต่ว่าการเกิดไฟขึ้น ซึ่งเริ่มจากที่เชื้อเพลิงได้รับความร้อนจนเกิดการติดไฟ จากนั้นโมเลกุลของเชื้อเพลิงจะเกิดการแตกตัว จนเกิดเป็นก๊าซหรือไอระเหยที่ลุกติดไฟอย่างต่อเนื่อง เมื่อใดที่ปฏิกริยาหยุดลง การสันดาปก็จะหยุดลงเช่นกัน

2.2.2 กลไกการดับไฟ

การดับไฟสามารถทำได้ ถ้าหากปัจจัยที่ทำให้เกิดการติดไฟปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งนั้นหายไป โดยกลไกการดับไฟมี 4 กลไก ดังนี้ [8]

1) การดับไฟโดยการลดอุณหภูมิ การลดอุณหภูมิของเชื้อเพลิงสามารถทำได้โดยใช้น้ำ หรือสารดับเพลิงเข้าไปดูดซับความร้อนในบริเวณที่มีการลุกไหม้ จนกระทั่งอุณหภูมิของเชื้อเพลิงนั้นต่ำลงจนไม่สามารถทำให้เกิดไอเชื้อเพลิงในปริมาณเพียงพอที่จะลุกไหม้อีกต่อไป ซึ่งวิธีนี้ต้องทำให้อุณหภูมิในระบบลดต่ำลงถึงจุดวาบไฟ จึงจะสามารถดับไฟลงได้

2) การดับไฟโดยการกำจัดออกซิเจน สามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่ การเจือจางออกซิเจนและการปิดกั้นออกซิเจน

- การเจือจางออกซิเจน ทำได้โดยการปล่อยก๊าซเฉื่อยเข้าไปในบริเวณที่เกิดเพลิงไหม้ เพื่อให้สัดส่วนของออกซิเจนในอากาศลดลงไปถึงระดับหนึ่งที่จะทำให้ไฟดับลง ซึ่งในทั่วไปจะใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในการดับไฟ

- การปิดกั้นออกซิเจน วิธีนี้จะใช้โฟมดับเพลิงในการดับไฟ ซึ่งโฟมที่ใช้นั้นจะไปปิดกั้นที่ผิวหน้าของเชื้อเพลิง เพื่อไม่ให้ไอของเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นสัมผัสกับอากาศและทำให้ออกซิเจนไม่สามารถเข้าไปในกระบวนการเผาไหม้ได้ ส่งผลให้บริเวณที่เกิดการลุกไหม้เกิดการดับลง

3) การดับไฟโดยการกำจัดเชื้อเพลิง วิธีนี้จะเป็นการนำเชื้อเพลิงออกไปจากบริเวณที่ลุกไหม้สามารถทำได้โดยการใส่สารดับเพลิงเคลื่อนไปที่ผิวของเชื้อเพลิงและกั้นไม่ให้ไอเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นลอยไปบริเวณที่มีการลุกไหม้ เมื่อไม่มีเชื้อเพลิงไฟที่เกิดขึ้นก็จะดับลง

4) การดับไฟโดยการตัดปฏิกิริยาลูกโซ่ วิธีการดับไฟจะเกิดขึ้นโดยสารดับเพลิงจะเข้าไปจับกับอนุมูลอิสระที่เกิดจากการเผาไหม้และยับยั้งไม่ให้เกิดกระบวนการเผาไหม้ดำเนินต่อไป โดยสารดับเพลิงเมื่อได้รับความร้อน จะเกิดการแตกตัวออกเป็นอะตอม ซึ่งจะมีบางอะตอมที่มีแรงดึงดูดที่รุนแรง (Highly-affinity) กับอนุมูลอิสระ เมื่ออนุมูลอิสระที่เกิดจากการเผาไหม้ถูกจับไว้ปฏิกิริยาลูกโซ่ที่เกิดขึ้นก็ไม่สามารถดำเนินต่อไปได้ ทำให้ไฟดับลงในที่สุด

2.3 สารหน่วงไฟ (Flame retardant)

สารหน่วงไฟ คือ สารเติมแต่งชนิดหนึ่ง ที่มีการใส่ลงไปในพลาสติก เพื่อให้ทนทานต่อการติดไฟหรือลามไฟ เมื่อพลาสติกเกิดการติดไฟ สารหน่วงไฟจะทำให้การลุกลามของไฟนั้นช้าลง ช่วยในเรื่องหน่วงการติดไฟ

2.3.1 การยับยั้งการติดไฟ [9]

สารหน่วงไฟนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดมีการยับยั้งการติดไฟที่แตกต่างกัน ทั้งนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ทางกายภาพและทางเคมี

2.3.1.1 การยับยั้งการติดไฟทางกายภาพ แบ่งได้เป็น 3 วิธี ได้แก่

1) การทำให้ระบบเย็น กลไกนี้เกิดขึ้นเมื่อสารหน่วงไฟได้รับความร้อนจากการเผาไหม้ จะเกิดปฏิกิริยาคูดความร้อน (Endothermic reaction) ภายในระบบบางส่วนและเกิดการสลายตัวหรือสลายพันธะไป ทำให้ความร้อนในระบบลดลง ดังนั้นความร้อนในระบบนั้นไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง อีกทั้งสารหน่วงไฟนี้ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิดน้ำ (Hydration) ซึ่งน้ำที่เกิดขึ้นในระบบนั้น ทำให้ความร้อนของวัสดุที่ถูกเผาไหม้ลดลงและพื้นผิวของวัสดุนั้นเย็นขึ้น ตัวอย่างของสารหน่วงไฟประเภทนี้ประกอบด้วย โลหะไฮดรอกไซด์ เช่น อะลูมินา ไตรไฮดรอกไซด์ $Al(OH)_3$ และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ $Mg(OH)_2$ เป็นต้น

2) การเกิดขึ้นเคลือบบนพื้นผิว เมื่อมีการเผาไหม้เกิดขึ้น สารหน่วงไฟจะหลอมแล้วมาเคลือบที่พื้นผิวของวัสดุ ช่วยให้การสลายตัวจากความร้อนของวัสดุลดลงและการถ่ายเทความร้อนจากบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ไปยังวัสดุลดลง ส่งผลให้การเผาไหม้ไม่เกิดการลามไฟไปยังบริเวณอื่น ตัวอย่างของสารหน่วงไฟประเภทนี้ประกอบด้วย สารประกอบโบรอนและฟอสเฟต เช่น บอริก, บอแรกซ์, ซิลิเกต และฟอสเฟต เป็นต้น

3) การเจือจางเชื้อเพลิง เมื่อสารหน่วงไฟติดไฟจะเกิดการสลายตัวและปลดปล่อยก๊าซที่ไม่ติดไฟขึ้นมา เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ เป็นต้น ส่งผลให้ก๊าซติดไฟได้ที่จะเกิดจากการสลายตัวจากการเผาไหม้ลดลง ถือเป็นกาเจือจางความเข้มข้นของเชื้อเพลิงและยังสามารถทำให้ระบบเย็นขึ้นจากไอน้ำได้อีกด้วย ตัวอย่างของสารหน่วงไฟประเภทนี้ ได้แก่ โซเดียมคาร์บอเนต, โซเดียมโบคาร์บอเนต, ซิงค์คลอไรด์, แคลเซียมซัลเฟต, แมกนีเซียมซัลเฟต และฟอสเฟต เป็นต้น

2.3.1.2 การยับยั้งการติดไฟทางเคมี แบ่งได้เป็น 2 วิธี ได้แก่

1) การเกิดปฏิกิริยาในวัฏภาคไอ (Vapor phase) ตัวอย่างของสารหน่วงไฟประเภทนี้ ประกอบด้วย สารประกอบฮาโลเจน และฟอสเฟต เป็นต้น เมื่อสารหน่วงไฟได้รับความร้อน จะเกิดอนุมูลอิสระขึ้น เช่น $Cl\cdot$, $Br\cdot$ ซึ่งอนุมูลอิสระนี้จะไปจับกับอนุมูลอิสระที่เกิดจากการเผาไหม้ เช่น $H\cdot$, $OH\cdot$ กลายเป็นโมเลกุลที่เสถียร เกิดเป็นก๊าซ ซึ่งวิธีนี้จะลดความร้อนในวัฏภาคไอจากการกำจัดอนุมูลอิสระที่เกิดจากการเผาไหม้ ทำให้ระบบเย็นขึ้นและสามารถลดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องลงได้

2) การเกิดปฏิกิริยาในวัฏภาคควบแน่น (Condensed phase) ตัวอย่างของสารหน่วงไฟประเภทนี้ ได้แก่ สารประกอบฟอสเฟต เป็นต้น สารหน่วงไฟสามารถเกิดการสลายตัวให้อยู่ในรูปของก๊าซที่ไม่ติดไฟได้ หรือเกิดเป็นชั้นถ่าน (Char layer) ซึ่งจะมีหน้าที่ป้องกันความร้อนจากการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นไม่ให้เข้าถึงเนื้อพอลิเมอร์และช่วยให้เนื้อวัสดุภายในไม่ถูกเผาไหม้เนื่องจากผิวหน้าของวัสดุไม่โดนความร้อน นอกจากนี้พบว่าสารหน่วงไฟสามารถเกิดปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปลดปล่อยน้ำออกไป (Dehydration) และทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ กลายเป็นชั้นเถ้าที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นร่างแห (Crosslinking) ที่ช่วยเคลือบผิวหน้าของวัสดุเอาไว้ ทำให้ไฟไม่เกิดการลุกลาม

2.3.2 ประเภทของสารหน่วงไฟ [10]

สารหน่วงไฟสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายชนิด หลายประเภท โดยในที่นี้จะแบ่งตามองค์ประกอบทางเคมีในสารหน่วงไฟ ซึ่งแบ่งออกได้เป็นประเภทใหญ่ๆ 2 ประเภท ได้แก่

2.3.2.1 สารหน่วงไฟประเภทฮาโลเจน (Halogen-based flame retardant)

เป็นประเภทของสารหน่วงไฟที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีประสิทธิภาพการทำงานสูง อีกทั้งสามารถใช้กับพอลิเมอร์ได้หลายชนิด โดยหลักการหน่วงไฟนั้นเกิดขึ้น เมื่อสารหน่วงไฟได้รับความร้อนจนเกิดอนุมูลอิสระขึ้น ซึ่งไปจับกับอนุมูลอิสระที่เกิดจากการเผาไหม้ ทำให้เกิดเป็นก๊าซที่ไม่ติดไฟ จึงสามารถช่วยลดความร้อนในวัฏภาคโอลงได้ โดยส่วนมากจะนิยมสารประกอบโบรมีนมากกว่าสารประกอบฮาโลเจนตัวอื่น เนื่องจากมีประสิทธิภาพมากกว่า ทั้งนี้สารประกอบฮาโลเจนนั้นมีสารบางชนิดที่เกิดการติดไฟ จะปล่อยก๊าซพิษออกมาส่งผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม ทำให้มีการหลีกเลี่ยงในการใช้งาน ยกเว้นการใช้งานในบางประเภทเท่านั้น

2.3.2.2 สารหน่วงไฟประเภทไม่มีฮาโลเจน (Halogen-free flame retardant)

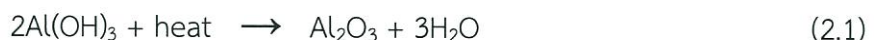
1) สารหน่วงไฟประเภทฟอสเฟต (Phosphate-based flame retardants) มีประสิทธิภาพการหน่วงไฟได้ดีกับพอลิเมอร์ที่มีองค์ประกอบของออกซิเจน เช่น เซลลูโลส เป็นต้น จะสามารถเพิ่มการก่อดำของชั้นเถ้าได้มากขึ้น โดยการก่อดำของชั้นเถ้า นั้นจะมาพร้อมกับการปลดปล่อยน้ำ ซึ่งจะทำให้ระบบมีความเย็นเพิ่มขึ้นและทำให้วัสดุเกิดการเผาไหม้น้อยลง เจือจางก๊าซที่เกิดการติดไฟได้ ถือเป็นทางเลือกการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องลง

2) สารหน่วงไฟประเภทโบรอน (Boron-based flame retardants) จะใช้ในรูปแบบของบอแรกซ์ (Sodium borate) เมื่อเกิดการเผาไหม้ จะเกิดการสร้างชั้นฟิล์มขึ้นมาปกป้องพื้นผิว พอลิเมอร์ไม่ได้รับความร้อนและป้องกันอนุมูลอิสระที่ส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ต่อเนื่อง โดยที่บอแรกซ์และกรดบอริกจะทำหน้าที่ในการปลดปล่อยน้ำออกมา เพื่อระบายความร้อนในระบบ ทำให้อุณหภูมิในระบบลดลง โดยในอุตสาหกรรมมีการใช้สารหน่วงไฟประเภทโบรอน เช่น Zinc borate hydrate เป็นต้น

2.3.3 สารหน่วงไฟที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม

2.3.3.1 อะลูมินา ไตรไฮเดรต (Alumina trihydrate; ATH) [11]

เป็นสารหน่วงไฟที่ใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม โดยนิยมใช้ในยางและพลาสติก ซึ่งสารหน่วงไฟชนิดนี้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยไม่เกิดก๊าซที่กัดกร่อนและไม่ปลดปล่อยควันที่เป็นพิษ หลักการคือ เมื่อชั้นงานเกิดการเผาไหม้ ATH จะสลายตัวด้วยความร้อนประมาณ 220°C กลายเป็น อะลูมิเนียมออกไซด์และน้ำ ดังสมการที่ 2.1 ซึ่งไอน้ำจะทำหน้าที่ให้พื้นผิวเย็น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาคูดความร้อน (Endothermic reaction) นอกจากนี้อะลูมิเนียมออกไซด์ยังทำหน้าที่ในการสร้างชั้นเถ้าขึ้นมาปกคลุมพื้นผิวของวัสดุ ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้ต่อนั้นไม่เพียงพอ ทำให้การเกิดควันและอัตราการลามไฟนั้นลดลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3.2 แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Magnesium hydroxide) [12]

นิยมนำมาใช้เป็นสารหน่วงไฟอันดับ 2 เนื่องจากมีราคาสูงกว่า ATH เพราะมีประสิทธิภาพการหน่วงไฟที่ดีกว่า โดยมีอุณหภูมิการสลายตัวประมาณ 300 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิสลายตัวที่สูงเมื่อเทียบกับ ATH จึงนิยมนำมาใช้กับพลาสติกที่มีอุณหภูมิการขึ้นรูปสูง

2.4 สารหน่วงไฟประเภทฟอสเฟตในระบบเดี่ยว

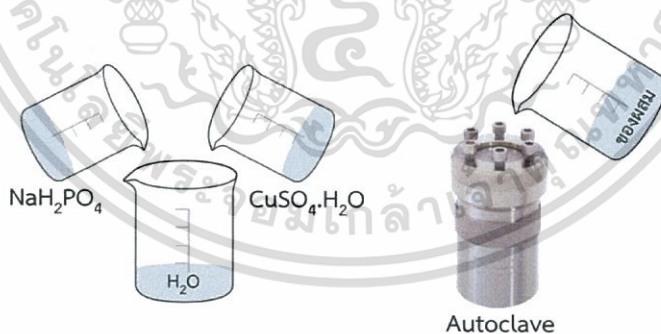
สารหน่วงไฟประเภทฟอสเฟต คือ สารที่มีฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบ สารหน่วงไฟประเภทนี้ จะสามารถยับยั้งการลามไฟได้ทั้งวัฏภาคก๊าซและวัฏภาคควบแน่น โดยสารหน่วงไฟชนิดนี้จะทำหน้าที่สร้างชั้นเถ้าและปลดปล่อยน้ำ เพื่อทำให้ระบบที่เกิดการเผาไหม้มีอุณหภูมิลดลง

ระบบเดี่ยว ประกอบด้วย พลาสติกและสารหน่วงไฟ ในงานวิจัยนี้พลาสติกที่จะนำมาผสมกับสารหน่วงไฟเพื่อทำการศึกษาคือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density-polyethylene; HDPE) และสารหน่วงไฟที่นำมาทำระบบเดี่ยวนั้น จะใช้สารหน่วงไฟที่มีส่วนประกอบของฟอสเฟต เนื่องจากมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เมื่อเจอความร้อนจะสามารถรบกวนการติดไฟได้ดี

2.4.1 การสังเคราะห์สารหน่วงไฟประเภทฟอสเฟต [13]

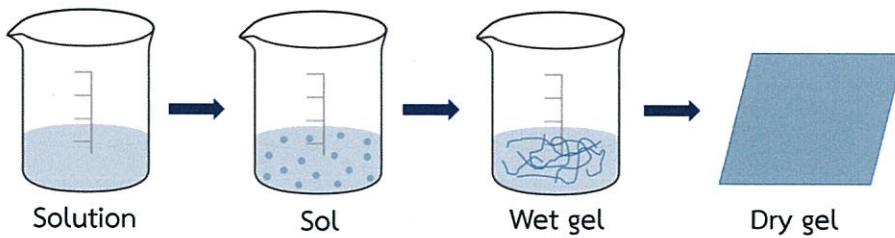
การสังเคราะห์ฟอสเฟต มีหลากหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีส่งผลให้สมบัติทางกายภาพและทางเคมีแตกต่างกันออกไป ได้แก่

1) ไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) คือ การสังเคราะห์สารภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง โดยให้ความร้อนแก่ตัวทำปฏิกิริยา เช่น เกลือของโลหะไฮดรอกไซด์หรือเกลือของโลหะออกไซด์ที่อยู่ในสถานะสารแขวนลอยหรือสารละลาย ทำให้เกิดตะกอนที่มีลักษณะเป็นผงปราศจากน้ำ (Anhydrous powders) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นผลึกเชิงเดี่ยว มีความบริสุทธิ์สูง โดยในการสังเคราะห์จะต้องทำในหม้ออัดความดัน (Autoclave) เนื่องจากต้องใช้ความดันและความร้อนสูง



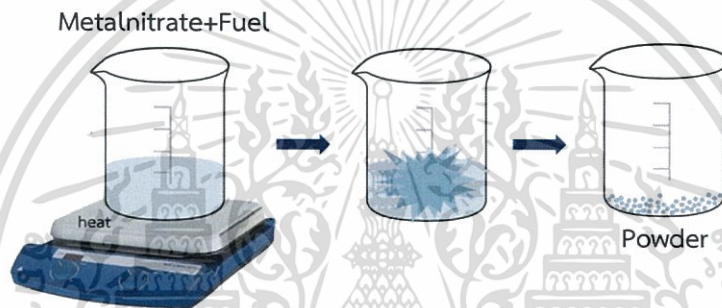
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างการสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล [13]

2) การสังเคราะห์แบบโซลเจล (Sol-gel) เป็นวิธีการสังเคราะห์สารที่มีความบริสุทธิ์สูงและเป็นเนื้อเดียวกัน โดยจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่อยู่ในสถานะคอลลอยด์ (Sol) ไปเป็นของแข็งในลักษณะวุ้นที่มีความหนืดสูง (Gel)



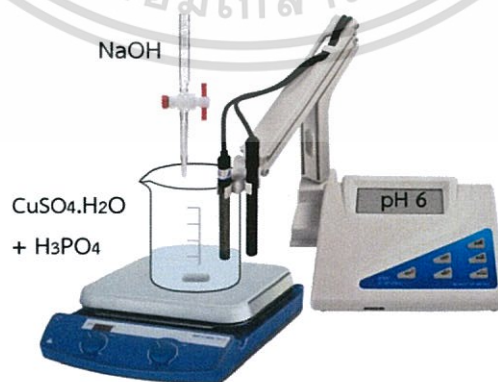
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการสังเคราะห์แบบโซลเจล [13]

3) การสังเคราะห์ด้วยวิธีคอมบัสชัน (Combustion) มีการใช้สารประกอบประเภทไนเตรต และเชื้อเพลิงที่มาจากสารอินทรีย์ โดยเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reactions) สารอินทรีย์จะสลายตัว ทำให้ได้พลังงานความร้อนออกมา เพื่อใช้ในปฏิกิริยาคอมบัสชัน



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างการสังเคราะห์ด้วยวิธีคอมบัสชัน [13]

4) การตกตะกอน (Precipitation) เป็นวิธีการสังเคราะห์แบบเปียก สังเคราะห์ได้ง่ายและใช้เวลาไม่นาน โดยมีการเติมสารที่ทำให้เกิดการตกตะกอนเพื่อให้โมเลกุลหรือไอออนที่อยู่ในสารละลายหลุดออกจากสารละลาย ซึ่งตะกอนที่ได้จะมีรูปร่างแบบแอนไอโซโทรปี (Anisotropy) อันเนื่องมาจากอัตราการเติบโตของตะกอนตามแนวแกนของผลึกแตกต่างกัน



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างการสังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) การสังเคราะห์ด้วยวิธีตกตะกอนร่วม (Co-precipitation method) เป็นการสังเคราะห์โลหะฟอสเฟตมากกว่า 2 ชนิด ให้เข้าไปอยู่ในตำแหน่งแลตทิซในโครงสร้าง โดยวิธีการสังเคราะห์คล้ายกับวิธีตกตะกอน เพียงแต่มีสารละลายโลหะมากกว่า 2 ชนิดผสมกับสารประกอบฟอสเฟตแล้วปรับ pH เพื่อให้สารเกิดการตะกอน



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการสังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม [13]

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสีย ในการสังเคราะห์สารประกอบแต่ละวิธี [13]

วิธีการสังเคราะห์	ข้อดี	ข้อเสีย
ไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal)	<ul style="list-style-type: none"> - ผลิตภัณฑ์คือผงที่ปราศจากน้ำ - สารมีความบริสุทธิ์สูงและเป็นเนื้อเดียวกัน 	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้พลังงานสูงในการสังเคราะห์ - อุปกรณ์มีราคาแพง
โซลเจล (Sol-gel)	<ul style="list-style-type: none"> - ลักษณะของผลิตภัณฑ์คือของแข็งที่จับกันเป็นรู้น - สารมีความบริสุทธิ์สูงและเป็นเนื้อเดียวกันในระดับโมเลกุล - สังเคราะห์ที่อุณหภูมิห้อง 	<ul style="list-style-type: none"> - ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นรู้นที่มีความหนืดสูง ทำให้ไม่เหมาะที่จะนำมาขึ้นรูปกับพลาสติก
คอมบัสชัน (Combustion)	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่ต้องอาศัยแหล่งพลังงานจากภายนอกในการสังเคราะห์และเกิดปฏิกิริยาได้เร็ว 	<ul style="list-style-type: none"> - มีความอันตรายสูงเพราะเกิดการปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมามาก - ได้ผลิตภัณฑ์น้อย
การตกตะกอน (Precipitation)	<ul style="list-style-type: none"> - สังเคราะห์ได้ง่ายและรวดเร็ว - ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นผง - อุปกรณ์ราคาถูกและหาได้ง่าย - สังเคราะห์ที่อุณหภูมิห้อง 	<ul style="list-style-type: none"> - จำเป็นต้องควบคุม pH เพื่อให้เกิดการตกตะกอน
การตกตะกอนร่วม (Co-precipitation)	<ul style="list-style-type: none"> - สังเคราะห์ได้ง่ายและรวดเร็ว - ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นผง - อุปกรณ์ราคาถูกและหาได้ง่าย - สังเคราะห์ที่อุณหภูมิห้อง 	<ul style="list-style-type: none"> - จำเป็นต้องควบคุม pH เพื่อให้เกิดการตกตะกอน

2.4.2 กลไกการหน่วงไฟของสารหน่วงไฟประเภทฟอสเฟต [14]

สารหน่วงไฟประเภทฟอสเฟตสามารถต้านการติดไฟได้ทั้งในวัฏภาคควบแน่น (Condense phase) และวัฏภาคไอ (Vapor phase)

2.4.2.1 กลไกการหน่วงไฟในวัฏภาคควบแน่น (Condense phase)

สารหน่วงไฟประเภทฟอสเฟตจะทำหน้าที่ในการสร้างชั้นเถ้าให้มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเพื่อมาปกคลุมบนพื้นผิวของพอลิเมอร์ โดยในการสร้างชั้นเถ้านี้จะเกิดปฏิกิริยาไปพร้อมๆ กับการปลดปล่อยน้ำขณะเผาไหม้ ซึ่งชั้นเถ้าจะทำหน้าที่ในการปกคลุมพื้นผิวของพลาสติก ปิดกั้นพลาสติกจากเปลวไฟและความร้อน ลดปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้ ทำให้สารหน่วงไฟประเภทฟอสเฟตเป็นส่วนสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพต้านการติดไฟและลดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง

2.4.2.2 กลไกการหน่วงไฟในวัฏภาคไอ (Vapor phase)

ในวัฏภาคไอ (Vapor phase) จะสามารถเกิดปฏิกิริยาทั้งทางกายภาพและทางเคมี ซึ่งจะช่วยในการยับยั้งการติดไฟและการลามไฟอย่างต่อเนื่อง

1) ปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical method) ไอระเหยของสารหน่วงไฟประเภทฟอสเฟต จะทำหน้าที่ในการยับยั้งการติดไฟ แสดงให้เห็นได้จากเมื่อไตรฟีนิลฟอสเฟต (Triphenylphosphate) ได้รับความร้อนจะเกิดการแตกตัวของโมเลกุลเล็กๆ ออกมา เช่น P_2 , PO , PO_2 และ HPO_2 อันเนื่องมาจากการแตกของสายโซ่ ซึ่งยืนยันได้จาก Mass spectroscopy โดยโมเลกุลเหล่านี้จะจับกับ $H\cdot$ ที่เกิดจากการเผาไหม้ ทำให้อนุมูลอิสระที่ก่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องลดลง สารหน่วงไฟฟอสเฟตจึงเป็นสารที่ยับยั้งการลามไฟ

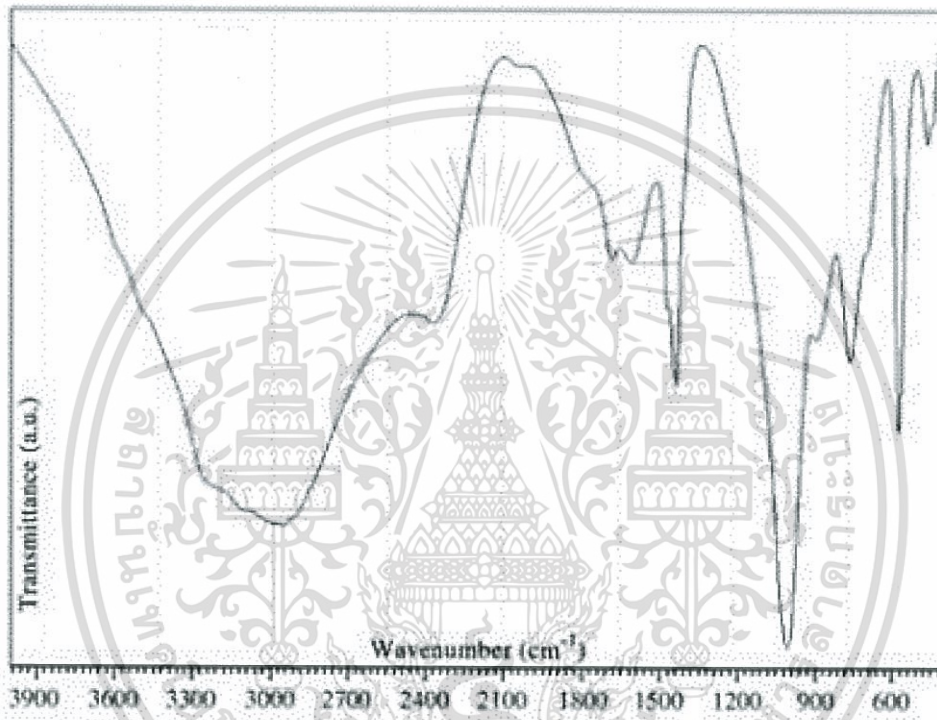
2) ปฏิกิริยาทางกายภาพ (Physical method) เป็นการแสดงถึงความสามารถในการดูดซับความร้อนของสารหน่วงไฟ รวมถึงการนำความร้อนออกบริเวณที่มีการติดไฟ ส่งผลให้ความร้อนในระบบลดลง โดยสารหน่วงไฟประเภทฟอสเฟตนี้จะทำหน้าที่ในการปลดปล่อยน้ำเพื่อให้ความร้อนในระบบลดลง

2.4.3 การยึดเกาะระหว่างโมเลกุลของน้ำในโครงสร้างกับโลหะฟอสเฟต [15]

น้ำในโครงสร้าง (Bound water) คือ น้ำที่ยึดเกาะอยู่กับโครงสร้างของสารประกอบซึ่งจะสลายตัวได้ยากกว่าน้ำอิสระ อันเนื่องมาจากเกิดการยึดเกาะด้วยพันธะทางเคมี เช่น น้ำที่ยึดเหนี่ยวในรูปของผลึกน้ำ (Hydrate) ในสารมอนอแคลเซียม ฟอสเฟต มอนอไฮเดรต ($CaH_4(PO_4)_2 \cdot H_2O$)

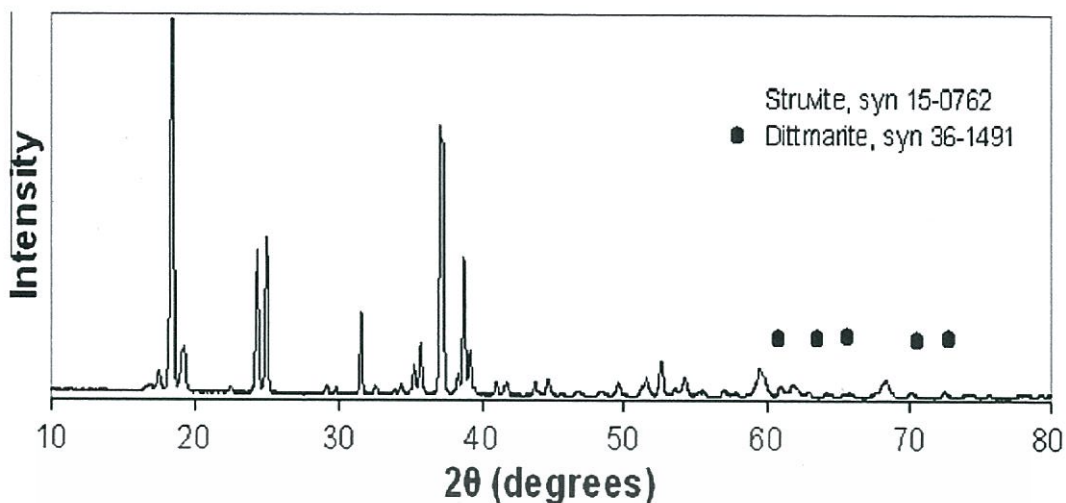
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

G.Kurtulus และคณะ [16] สังเคราะห์แมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$; MAP) ซึ่งเตรียมได้จากสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต ผสมกับ ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ทำการปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นกรองและนำไปอบที่อุณหภูมิ $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ ทำให้ได้ตะกอนของ MAP ลักษณะผงสีขาว จากนั้นนำตะกอนมาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) พบพิกัดสำคัญดังนี้ OH Stretching เลขคลื่นที่ $3600, 3500, 3260$ และ 3115 cm^{-1} , NH_4 group เลขคลื่นที่ 1600 และ 1400 cm^{-1} , Phosphate group เลขคลื่น $1006, 571, 463,$ และ 438 cm^{-1} ดังรูปที่ 2.8



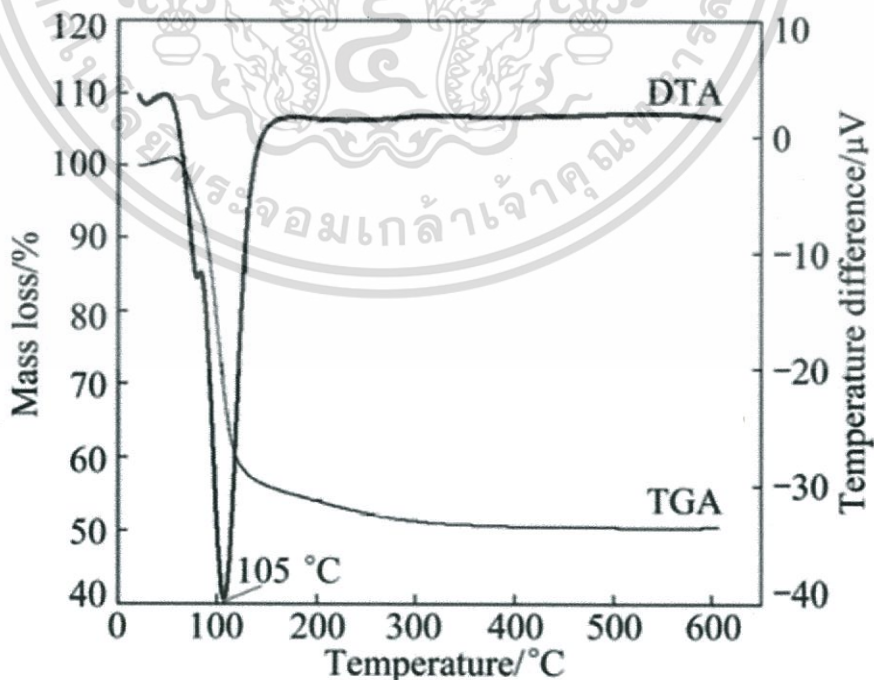
รูปที่ 2.8 กราฟ FT-IR ของ $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ [16]

T. Roncal-Herrero และคณะ [17] สังเคราะห์ MAP โดยการผสมแมกนีเซียมคลอไรด์-เฮกซะไฮเดรต, ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต, แอมโมเนียมคลอไรด์และปรับ pH ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นอบตะกอน MAP เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD [17]

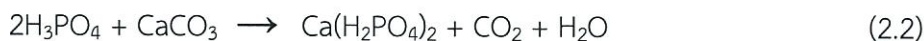
Yi-qing Chen และคณะ [18] สังเคราะห์ MAP โดยเตรียมจากแมกนีเซียมคลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต, โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โดเดคอะไฮเดรต และแอมโมเนียมที่ได้มาจากน้ำทิ้ง โดยใช้อัตราส่วน 1:1:1 ซึ่งจะทำให้การปั่นกวและควบคุม pH โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นจะได้นตะกอนออกมา ทำการกรองและอบที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ซึ่งตะกอน MAP ที่ได้นำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิควิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวด้วย TGA พบว่ามี การสลายตัวเริ่มต้นที่ 60-120 °C เพียง 1 ชั้น ซึ่งเป็นการสลายตัวของโมเลกุลน้ำและแอมโมเนีย เมื่อคิดเปอร์เซ็นต์การสลายตัวอยู่ที่ 51% โดยเหลือ $MgHPO_4$ ดังรูปที่ 2.10



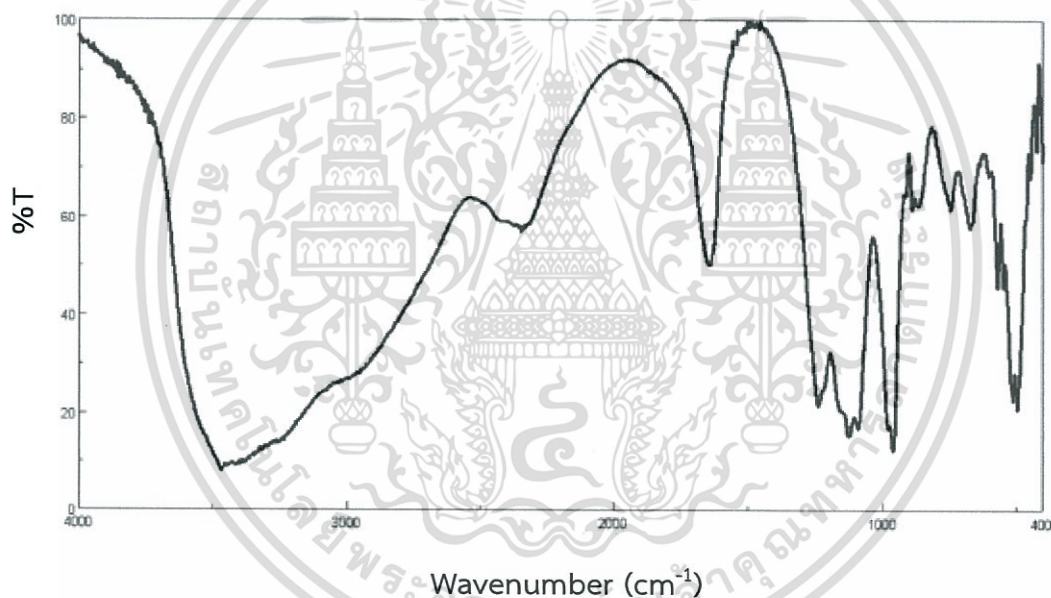
รูปที่ 2.10 วิเคราะห์อุณหภูมิที่สลายตัวของ MAP [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Lama Nour Aldeen และคณะ [19] สังเคราะห์ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ โดยนำ กรดฟอสฟอริก ใส่ในบีกเกอร์ และวางในอ่างน้ำ (Water bath) เพื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 85 °C และใส่แคลเซียมคาร์บอเนต จำนวน 4.577 กรัม ($\text{CaCO}_3 / \text{H}_2\text{O} = 1/2$ Weight) โดยปั่นกวนเป็นเวลา 60 นาที และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 90 °C จะได้ผลิตภัณฑ์ดังสมการที่ 2.2

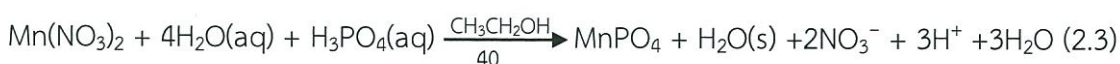


จากกราฟ FT-IR พบว่าที่ความยาวคลื่น 3466 cm^{-1} เป็นการสั่นของโมเลกุลน้ำ (OH Stretching), ที่ความยาวคลื่น 1240 cm^{-1} และ 1124 cm^{-1} เป็นการสั่นของ PO_2^- (Asymmetric stretching), ที่ความยาวคลื่น 959 cm^{-1} และ 888 cm^{-1} เป็นการสั่นของ $\text{P}(\text{OH})_2$ (Asymmetric stretching), ที่ความยาวคลื่น 568 cm^{-1} เป็นการสั่นของ PO_2 (Bending), ที่ความยาวคลื่น 500 cm^{-1} เป็นการสั่นของ PO_2 (Rocking) และที่ความยาวคลื่น 671 cm^{-1} เป็นการสั่นของน้ำ (Rocking) ดังรูปที่ 2.11



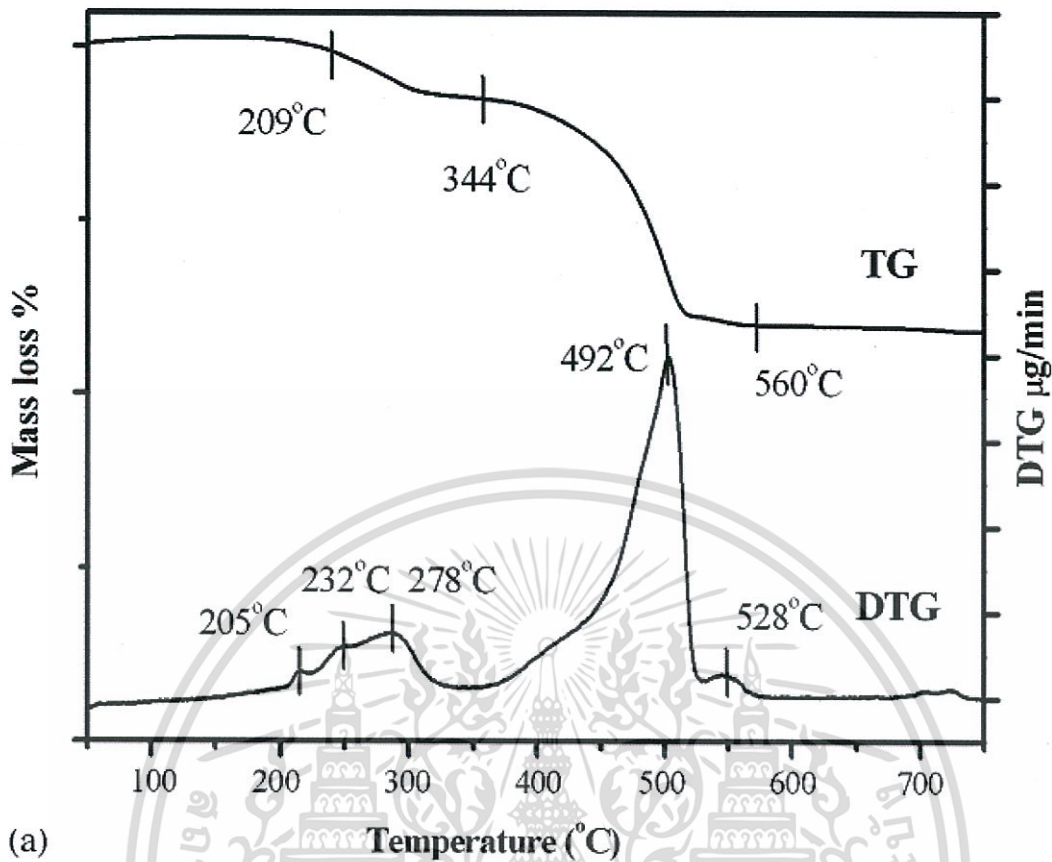
รูปที่ 2.11 กราฟ FT-IR ของ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ [19]

Banjong Boonchom และคณะ [20] สังเคราะห์ $\text{MnPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ โดยวิธีการตกตะกอน สารตั้งต้นที่ใช้คือ $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ จำนวน 5 กรัม ละลายลงในกรดฟอสฟอริก ความเข้มข้น 70% จำนวน 5 มิลลิลิตร และใส่เอทานอลจำนวน 20 มิลลิลิตร เพื่อปรับให้เป็นเบส จากนั้นทำการปั่นกวน โดยควบคุมอุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ตะกอนสีเขียวอมเทา ดังสมการ 2.3



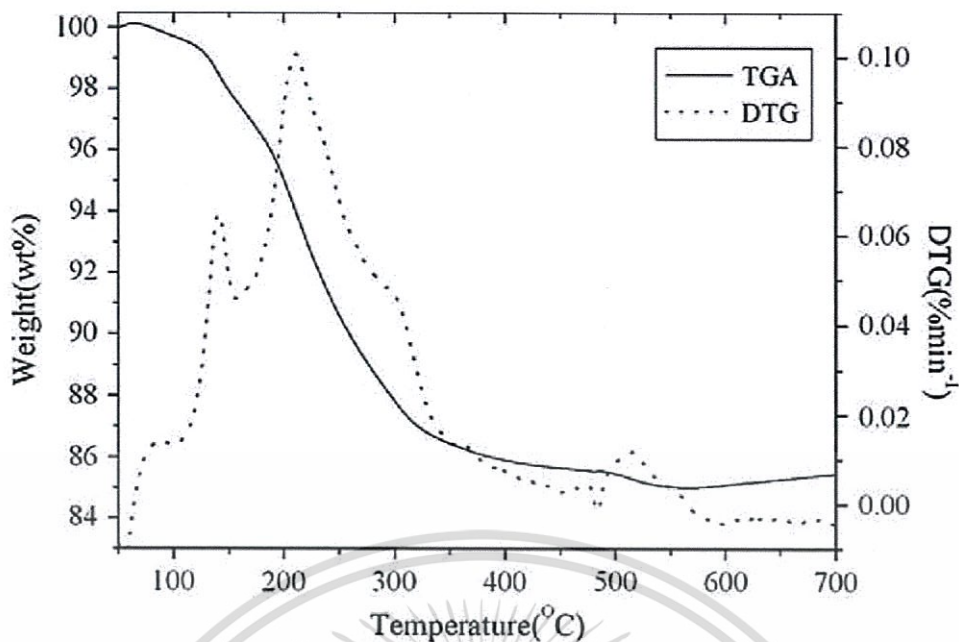
เมื่อนำมาวิเคราะห์ TGA พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวแบ่งออกเป็น 2 ช่วง โดยช่วงแรกคือ 209–345 °C และ 345–560 °C เป็นการหลุดออกของน้ำ โดยเปอร์เซ็นต์การสลายตัวทั้งหมดคือ 15.45% ดังรูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 กราฟ TGA ของ $\text{MnPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ [20]

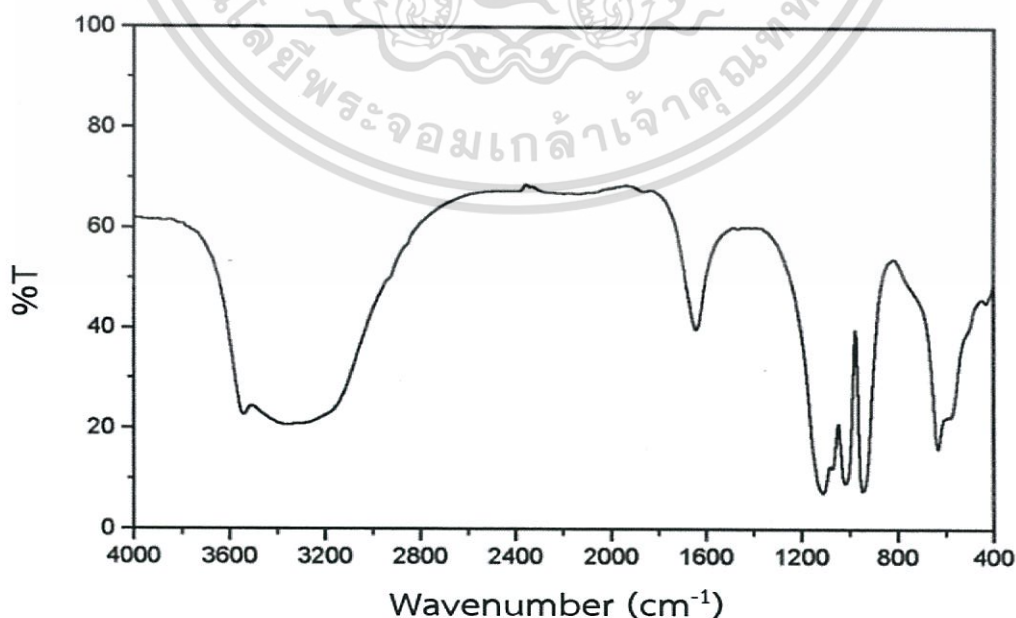
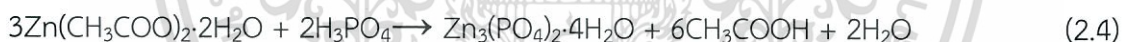
Ping Zhang และคณะ [21] ได้ทำการสังเคราะห์ Nanoflaky manganese phosphate; $(\text{Mn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O})$ ผสมสารหน่วงไฟ เพื่อดูการเสริมประสิทธิภาพกันในการหน่วงการติดไฟ โดยที่ นำแมงกานีสไนเตรต ผสมกับสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต โดเดคะไฮเดรต ($\text{Na}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) แล้วใส่กรดไนตริก (HNO_3) ทำการปั่นกวนเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นกรองตะกอน Nanoflaky-manganese phosphate ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนและเอทานอล จากนั้นอบตะกอนที่ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อนำตะกอนมาวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA พบว่า อุณหภูมิการสลายตัวแยกได้เป็น 3 ช่วง ดังนี้ $30\text{-}150^\circ\text{C}$ ซึ่งบ่งบอกถึงการสลายตัวของน้ำอิสระ โดยคิดเป็น 2.5%, $158\text{-}453^\circ\text{C}$ เป็นการสลายตัวของน้ำในโครงสร้างคิดเป็น 11.9% และ $453\text{-}600^\circ\text{C}$ โดยที่การสลายตัวทั้งหมดของ Nanoflaky manganese phosphate คิดเป็น 14.6% ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 กราฟ TGA ของ $\text{Mn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ [21]

Kjell Ove Kongshaug และคณะ [22] ได้สังเคราะห์ $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล โดยทำการผสม $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ จำนวน 1.0 โมล, น้ำ จำนวน 34.4 โมล, กรดฟอสฟอริก (ความเข้มข้น 85%) จำนวน 2.0 โมล และไดเอทิลีนไดรเอมีน จำนวน 1.5 โมล

O.Pawling และคณะ [23] สังเคราะห์ $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ แสดงดังสมการที่ 2.4 เมื่อนำตะกอนมาตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR และ TGA แสดงผล ดังรูปที่ 2.14 และ 2.15 ตามลำดับ



รูปที่ 2.14 กราฟ FT-IR ของ $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ [23]

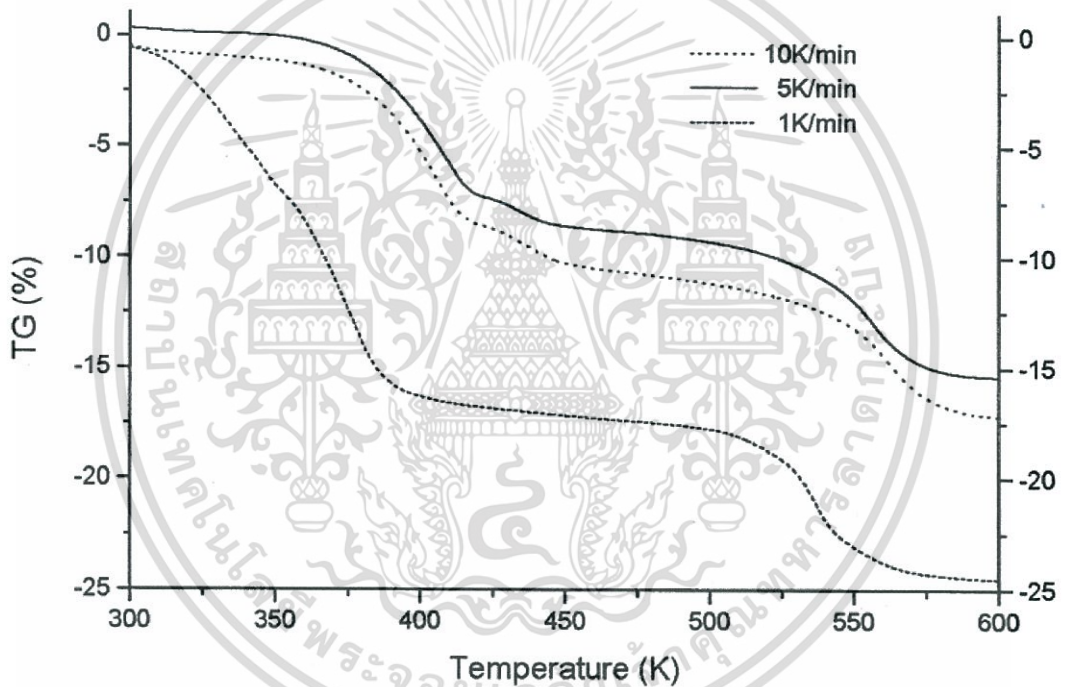
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานในชั้นเรียน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการวิเคราะห์ FT-IR พบพีคของพันธะไฮโดรเจนที่อยู่โนโครงสร้างผลึก ที่เลขคลื่น 3546 cm^{-1} , OH Stretching ที่ $3300\text{--}3400\text{ cm}^{-1}$, พีคของ Water bending ที่ 1639 cm^{-1} และพีคของหมู่ฟอสเฟต แสดงดังตารางที่ 2.2

จากการนำตะกอนมาวิเคราะห์ TGA แสดงดังรูปที่ 2.15 พบว่าการหลุดออกของโมเลกุลน้ำเริ่มที่อุณหภูมิ $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ เมื่ออุณหภูมิถึง $99\text{ }^{\circ}\text{C}$ แสดงว่าน้ำหลุดออกจำนวน 2 โมเลกุล ดังนั้นจึงเหลือสารประกอบ $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ และเมื่ออุณหภูมิถึง $264\text{ }^{\circ}\text{C}$ พบว่าสารประกอบที่เหลืออยู่คือ $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$ ทั้งนี้ได้มีการตรวจสอบด้วยวิธี XRD

ตารางที่ 2.2 พีคของหมู่ฟอสเฟต [23]

V_1	$952, 929\text{ cm}^{-1}$	V_3	$1156, 1130, 1105, 1066, 1026, 1000\text{ cm}^{-1}$
V_2	$472, 455, 431, 409, 388\text{ cm}^{-1}$	V_4	$635, 600, 576, 561, 524, 502\text{ cm}^{-1}$



รูปที่ 2.15 กราฟ TGA ของ $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ [23]

Sarah Deh และคณะ [24] ได้ทำการปรับปรุงสมบัติของผ้าฝ้ายด้วยการใส่สารหน่วงไฟประเภทฟอสเฟต พบว่าการผสมไนโตรเจนและซิลิกอนลงในสารหน่วงไฟ จะทำให้ประสิทธิภาพการหน่วงไฟดียิ่งขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของชั้นเถ้า ซึ่งสามารถพิสูจน์ประสิทธิภาพการหน่วงไฟได้จากการวิเคราะห์ LOI และปริมาณชั้นเถ้าจากตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ผลการวิเคราะห์ LOI, ปริมาณชั้นเถ้า, ปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟต [24]

Sample	LOI	Char (wt%) \pm 0.1wt %	P (wt%)	N (wt%)
Cotton fabric (Cell)	19.0	0	0	0
Cell-Nitrogen	18.3	0	0	0.77
Cell-Phosphorus	23.9	3.9	1.0	0
Cell-Nitrogen-Phosphorus	26.8	7.3	2.1	0.69

Sabyasachi Gaan และคณะ [25] ศึกษาผลของสารประกอบ Organophosphorus ที่แตกต่างกัน 6 ชนิด โดยวิเคราะห์ด้วยวิธี LOI ซึ่งสารประกอบ Organophosphorus ได้แก่ Pyrovatex-CP (PCP), Tributylphosphate (TBP), Triallyl-phosphate (TAP), Diammonium-phosphate (DAP), Phosphoric acid (PA) และ Triallyl-phosphoric triamide (TPT) โดยสารประกอบที่กล่าวมานี้จะนำมาปรับปรุงสมบัติการต้านการลามไฟในผ้าฝ้าย ซึ่งผลการวิเคราะห์ LOI แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การวิเคราะห์ LOI [25]

% Phosphorus ในผ้าฝ้าย	ค่า LOI ของผ้าฝ้ายที่ผสมสารประกอบ Organophosphorus					
	PA	TBP	DAP	TPT	PCP	TAP
1	24.0	22.5	24.5	21.5	23.5	21.5
2	27.0	23.5	28.5	23.5	26.0	23.5
4	31.0	25.0	35.5	26.0	31.0	25.0

จากผลการวิเคราะห์ค่า LOI พบว่าผ้าฝ้ายบริสุทธิ์ที่ไม่ได้ผ่านการใส่สารหน่วงไฟ มีค่า LOI ที่ 18.5 โดยจากตารางที่ 2.4 พบว่าค่า LOI ของ DAP มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับปริมาณเปอร์เซ็นต์ฟอสฟอรัสเดียวกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า Diammonium phosphate เป็นสารหน่วงไฟที่ดี

กษมา จารุกัจจร และคณะ [26] ได้ปรับปรุงการต้านการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีน (Polypropylene; PP) และเส้นใยป่านครนารายณ์ พบว่ามีการใช้สารหน่วงไฟ 2 ชนิด คือ แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (Ammonium polyphosphate; APP) และซิงค์บอเรต (Zinc borate; Zb) หรือแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Magnesium hydroxide; Mg(OH)₂) ซึ่งมีปริมาณการใส่สารหน่วงไฟที่แตกต่างกันโดยในงานวิจัยนี้มีการผสมพอลิโพรพิลีนกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride grafted polypropylene; MAPP) ที่ 1, 3 และ 5 phr เพื่อให้มีการผสมเป็นเนื้อเดียวกันมากยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้ทำการศึกษาปริมาณสารหน่วงไฟที่ผสมลงในพอลิเมอร์คอมโพสิตในปริมาณ 10, 20, 30 และ 40 phr ศึกษาสมบัติการลามไฟ สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกล เป็นต้น ซึ่งพบว่าการใส่ APP ในปริมาณ 10-30 phr จะไม่ส่งผลต่อการต้านการลามไฟมากนัก แต่หากใส่สารหน่วงไฟปริมาณ 40 phr พบว่าเกิดการติดไฟน้อยกว่า 10 วินาที และสามารถดับไฟได้ด้วยตนเอง อย่างไรก็ตามการใส่ APP ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ลดลง เนื่องจากเมื่อใส่ APP ลงในพอลิเมอร์คอมโพสิตมากขึ้น ทำให้ APP และพอลิเมอร์คอมโพสิตไม่เป็นเนื้อเดียวกัน สมบัติเชิงกลจึงลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปได้ดังนี้

- การสังเคราะห์สารประกอบโลหะฟอสเฟตสามารถนำมาใช้เป็นสารหน่วงไฟได้ โดยใช้วิธีการตกตะกอน เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายต่อการผลิตและได้ผลผลิตมาก

- pH จะส่งผลต่อการตกตะกอน โดยปกติ pH ที่ทำให้เกิดการตกตะกอนอยู่ระหว่าง 6-9

- สารหน่วงไฟที่มีองค์ประกอบของฟอสเฟตและไนโตรเจน จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการหน่วงไฟดียิ่งขึ้น

- เมื่อปริมาณสารหน่วงไฟเพิ่มขึ้น จะทำให้อัตราการลามไฟลดลง แต่ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง เนื่องจากความไม่เข้ากันระหว่างสารหน่วงไฟและพอลิเมอร์

- ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดับไฟ คือ ชนิด, อัตราส่วนของสารหน่วงไฟ, ความสามารถในการเกิดชั้นเถ้า, ความต่อเนื่องของชั้นเถ้า และประสิทธิภาพการทำงานของสารให้ฟอง

- อุณหภูมิการสลายตัวของสารหน่วงไฟที่จะทำให้การหน่วงไฟมีประสิทธิภาพ คือ 180 °C ขึ้นไป เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิการขึ้นรูปของพลาสติกทั่วไป ทำให้สารไม่สลายตัวระหว่างการขึ้นรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาแนวเปรียบเทียบผลของชนิดสารประกอบโลหะฟอสเฟต เพื่อใช้เป็นสารหน่วงไฟสำหรับพลาสติก (HDPE) ในระบบเดี่ยว โดยแบ่งงานวิจัยเป็นดังนี้

- 1) สังเคราะห์โลหะประเภทฟอสเฟต
- 2) การศึกษาสารประกอบโลหะประเภทฟอสเฟตชนิดต่างๆ ที่มีผลต่อการหน่วงไฟ
- 3) ผลของอัตราส่วนของ HDPE ต่อสารประกอบโลหะประเภทฟอสเฟต
- 4) การศึกษาสมบัติต่างๆของ HDPE เมื่อผสมสารหน่วงไฟ

3.1 พลาสติกและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ HDPE

สมบัติ	InnoPlus HD1600J	หน่วย	วิธีทดสอบ
ดัชนีการไหล (Melt index, 190 °C/2.16 kg)	12	g/10 min	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
มอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus)	1323	MPa	ASTM D 790
ความแข็งแรงกระแทก (Notched izod impact strength)	30	kJ/m ²	ASTM D 256

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

สารเคมี	เกรด	บริษัทผลิต
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)	เกรดฉีดขึ้นรูป HD1600J	บริษัทพีทีที โกลบอล เคมิคอล จำกัด
แมกนีเซียมคาร์บอเนต (Magnesium carbonate)	เกรดการค้า	Ajax Finechem Pty.,Ltd.
แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate)	เกรดการค้า	Ajax Finechem Pty.,Ltd.
แมงกานีสคลอไรด์เตตระไฮเดรต (Manganese chloride tetrahydrate)	เกรดการค้า	Loba chemie.,Ltd.
ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide)	เกรดการค้า	บริษัทอัมรินทร์เซรามิก คอร์ปอเรชั่น จำกัด
แมกนีเซียมคลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต (Magnesium chloride hexahydrate)	เกรดการค้า	Loba chemie.,Ltd.
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide)	เกรดการค้า	Loba chemie.,Ltd
กรดฟอสฟอริกเข้มข้น 85% (Phosphoric acid)	เกรดการค้า	บริษัทแกมมาโก้ (ประเทศไทย) จำกัด
แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 25%(Ammonium hydroxide)	เกรดการค้า	Carlo Erba reagent S.p.A.,Ltd
อะซิโตน (Acetone)	เกรดการค้า	บริษัทเซนพ้อย จำกัด

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. บริภัณฑ์เครื่องแก้ว
2. ขาตั้ง (Stand), ที่จับบิวเรต (Burette clamp)
3. เครื่องปั่นกวน (Stirrer, รุ่น C-MAG HS 7)
4. เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
5. เครื่องวัดค่าพีเอช (pH Meter, รุ่น 827-pH lab, Metrohm Co., Ltd.)
6. เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง (รุ่น ML 3002/01, ITS (Thailand) Co., Ltd.)
7. ชุดกรองลดความดันแบบสุญญากาศ และกระดาษกรองเบอร์ 42
8. ตู้อบลมร้อน (Hot airoven, รุ่น ML204, Memmert (Germany) Co., Ltd.)
9. เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer, รุ่น MX500-D75L90, Chareon Tut Co., Ltd.)
10. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine, รุ่น MGLP-2UAT, Mach group Co., Ltd.)
11. เครื่องบดเม็ดพลาสติก (Grinder, Bosco Engineering Co., Ltd.)
12. เครื่องปั๊มลม (รุ่น Bebicon 400, Hitachi Co., Ltd.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. ตะเกียงบุนเซน (Bunsen burner)
14. ขวดพิคโนมิเตอร์ (Pycnometer)
15. ไมโครมิเตอร์ (Micrometer, รุ่น G, Mitutoyo Co., Ltd.)
16. เวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier caliper, Mitutoyo Co., Ltd.)
17. เครื่อง Fourier transform infrared spectrometer (FT-IR, รุ่น FT-IR Spectrum Gx, Perkin Elmer Co., Ltd.)
18. เครื่อง Thermal gravimetric analyzer (TGA, รุ่น TG 209 F3 Tarsus[®], Netzsch Co., Ltd.)
19. เครื่อง X-ray diffractometer (XRD, รุ่น D8 Advance, Bruker AXS Co., Ltd.)
20. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM, รุ่น JSM-5410LV, Lloyd Instrument Ltd.)
21. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, รุ่น LR5K, Lloyd Instrument Ltd.)
22. เครื่องวัดความแข็งกด (Hardness Tester, รุ่น DSTFDDR, Italia Co., Ltd.)
23. เครื่องทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทก (Impact tester, รุ่น Yasuda 199311, Yasuda Seiki Seisakusho Ltd.)
24. เครื่องทำรอยบาก (Ceast, รุ่น Yasuda No. 7686, Yasuda Seiki Seisakusho Ltd.)
25. เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC, รุ่น DSC 204 F1, Netzsch)
26. เครื่องกรองสุญญากาศ (รุ่น A-35, Tokyo rikakokai Co., Ltd.)
27. เครื่องวัดความแข็ง Shore D (รุ่น GS-720N, TECLOCK Co., Ltd.)

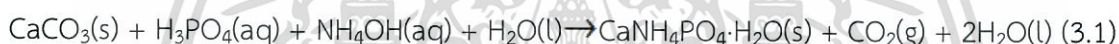
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 สังเคราะห์สารประกอบโลหะประเภทฟอสเฟต

การสังเคราะห์สารหน่วงไฟประเภทฟอสเฟต ด้วยวิธีการตกตะกอน ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายต่อการสังเคราะห์, อุปกรณ์ราคาถูก และใช้เวลาน้อย ในงานวิจัยนี้จึงสังเคราะห์สารหน่วงไฟ 6 ชนิด ได้แก่

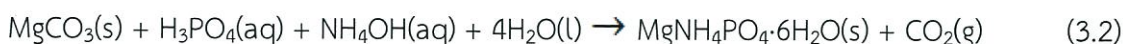
1) การสังเคราะห์ $\text{CaNH}_4\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (CaN)

ชั่งแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) จำนวน 10 กรัม ลงในบีกเกอร์ที่ 1 (ขนาด 250 มิลลิลิตร) จากนั้นวางลงบนเครื่องปั่นกวนในตู้ดูดควัน เตรียมกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 2.5 โมลาร์ จำนวน 40 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ที่ 2 (ขนาด 100 มิลลิลิตร) และปิเปตน้ำ จำนวน 1.8 มิลลิลิตร จากนั้นนำบีกเกอร์ที่ 2 พร้อมกับน้ำที่เตรียมไว้ค่อยๆ เทลงในบีกเกอร์ที่ 1 แล้วทำการปั่นกวนเพื่อละลาย CaCO_3 และใส่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นเวลา 10 นาที ณ อุณหภูมิห้อง โดยทำการจุ่มวัด pH ด้วยเครื่อง pH meter และวัดอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาตลอดการทดลอง ต่อมาใส่แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 2 (w/v) (2% NH_4OH) ลงในบิวเรต (ขนาด 50 มิลลิลิตร) แล้วไหลลงในบีกเกอร์ที่ 1 เมื่อ CaCO_3 ละลายหมดแล้ว จำนวน 29.4 มิลลิลิตร เพื่อปรับให้ได้ pH 7 จากนั้นทำการปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง ต่อมานำไปกรองตะกอนด้วยชุดกรองลดความดันแบบสุญญากาศ พร้อมทั้งล้างตะกอนด้วยอะซิโตน เพื่อกำจัดกรดฟอสฟอริกที่ไม่ทำปฏิกิริยา จากนั้นนำไปอบเพื่อกำจัดอะซิโตน และน้ำอิสระเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50°C แสดงดังสมการที่ 3.1



2) การสังเคราะห์ $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (MgN)

ชั่งแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3) จำนวน 8.4 กรัมลงในบีกเกอร์ที่ 1 (ขนาด 250 มิลลิลิตร) แล้ววางลงบนเครื่องปั่นกวนในตู้ดูดควัน เตรียมกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 2.5 โมลาร์ จำนวน 40 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ที่ 2 (ขนาด 100 มิลลิลิตร) จากนั้นนำบีกเกอร์ที่ 2 ค่อยๆ เทลงในบีกเกอร์ที่ 1 แล้วทำการปั่นกวนเพื่อละลาย MgCO_3 และใส่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิห้อง โดยทำการจุ่มวัด pH ด้วยเครื่อง pH meter และวัดอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาตลอดการทดลอง ต่อมาใส่แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 25 (w/v) (25% NH_4OH) ลงในบิวเรต (ขนาด 50 มิลลิลิตร) แล้วไหลลงในบีกเกอร์ที่ 1 จำนวน 7.5 มิลลิลิตร เมื่อ MgCO_3 ละลายหมดแล้ว เพื่อปรับเป็น pH 7 จากนั้นทำการปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง ต่อมานำไปกรองตะกอนด้วยชุดกรองลดความดันแบบสุญญากาศ พร้อมทั้งล้างตะกอนด้วยอะซิโตน เพื่อกำจัดกรดฟอสฟอริกที่ไม่ทำปฏิกิริยา จากนั้นนำไปอบเพื่อกำจัดอะซิโตนและน้ำอิสระเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50°C แสดงดังสมการที่ 3.2



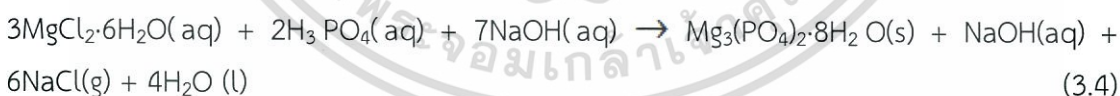
3) การสังเคราะห์ $\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (MgH)

ตวงแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ที่ 1 (ขนาด 250 มิลลิลิตร) แล้ววางลงบนเครื่องปั่นกวนในตู้ดูดควัน เตรียมกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ จำนวน 10 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ที่ 2 (ขนาด 100 มิลลิลิตร) จากนั้นนำบีกเกอร์ที่ 2 ค่อยๆ เทลงในบีกเกอร์ที่ 1 แล้วทำการปั่นกวนและไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิห้อง โดยทำการวัด pH ด้วยเครื่อง pH meter และวัดอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาตลอดการทดลอง ต่อมาใส่โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1.0 โมลาร์ลงในบิวเรต (ขนาด 50 มิลลิลิตร) แล้วไหลลงในบีกเกอร์ที่ 1 ปริมาตร 23.90 มิลลิลิตร เพื่อปรับให้ได้ pH 6 จากนั้นทำการปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง ต่อมานำไปกรองตะกอนด้วยชุดกรองลดความดันแบบสุญญากาศ พร้อมทั้งล้างตะกอนด้วยอะซิโตน เพื่อกำจัดกรดฟอสฟอริกที่ไม่ทำปฏิกิริยา จากนั้นนำไปอบเพื่อกำจัดอะซิโตนและน้ำอิสระเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 °C แสดงดังสมการที่ 3.3



4) การสังเคราะห์ $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (MgP)

ตวงแมกนีเซียมคลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ปริมาตร 15 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ที่ 1 (ขนาด 100 มิลลิลิตร) แล้ววางลงบนเครื่องปั่นกวนในตู้ดูดควัน เตรียมกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ จำนวน 10 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ที่ 2 (ขนาด 100 มิลลิลิตร) จากนั้นนำบีกเกอร์ที่ 2 ค่อยๆ เทลงในบีกเกอร์ที่ 1 แล้วทำการปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิห้อง โดยทำการวัด pH ด้วยเครื่อง pH meter และวัดอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาตลอดการทดลอง ต่อมาใส่โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1.0 โมลาร์ ลงในบิวเรต (ขนาด 50 มิลลิลิตร) แล้วไหลลงในบีกเกอร์ที่ 1 จำนวน 49 มิลลิลิตร เพื่อปรับให้เป็น pH 9 จากนั้นปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง ต่อมานำไปกรองตะกอนด้วยชุดกรองลดความดันแบบสุญญากาศ พร้อมทั้งล้างตะกอนด้วยอะซิโตน เพื่อกำจัดกรดฟอสฟอริกที่ไม่ทำปฏิกิริยา จากนั้นนำไปอบเพื่อกำจัดอะซิโตนและน้ำอิสระเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 °C แสดงดังสมการที่ 3.4



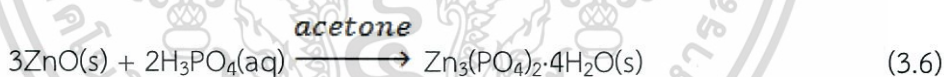
5) การสังเคราะห์ $Mn_3(PO_4)_2 \cdot 3H_2O$ (MnP)

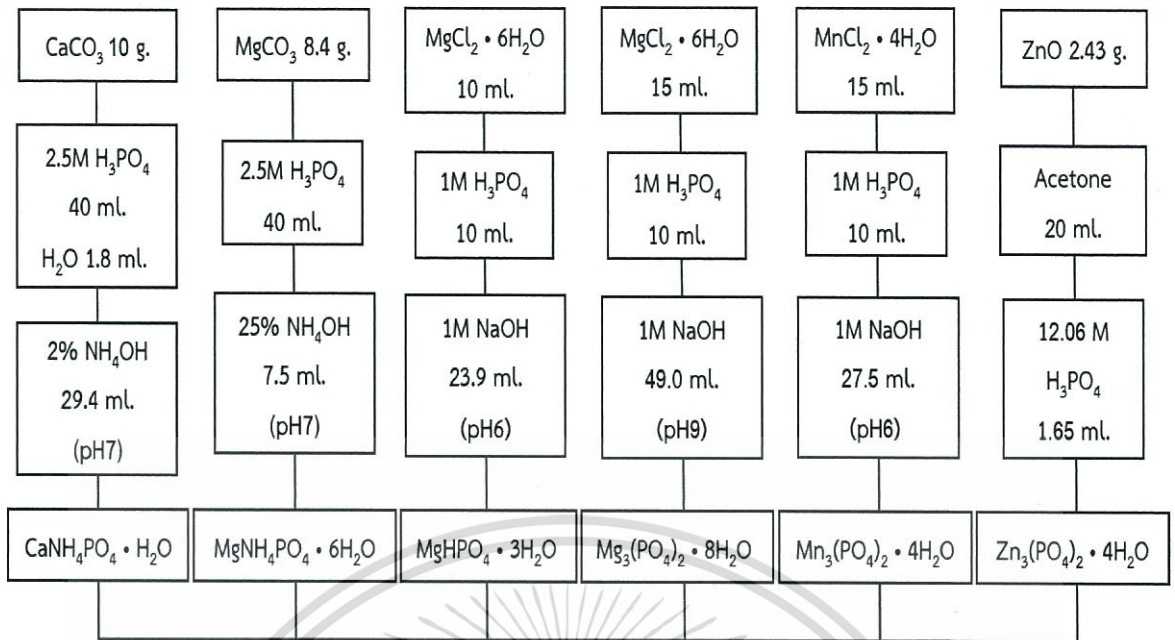
ตวงแมงกานีสคลอไรด์เตตระไฮเดรต ($MnCl_2 \cdot 4H_2O$) ปริมาตร 15 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ที่ 1 (ขนาด 250 มิลลิลิตร) แล้ววางลงบนเครื่องปั่นกวนในตู้ดูดควัน เตรียมกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ จำนวน 10 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ที่ 2 (ขนาด 80 มิลลิลิตร) จากนั้นนำบีกเกอร์ที่ 2 ค่อยๆ เทลงในบีกเกอร์ที่ 1 แล้วปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิห้อง โดยทำการจุ่มวัด pH ด้วยเครื่อง pH meter และวัดอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาตลอดการทดลอง ต่อมาใส่โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1.0 โมลาร์ ลงในบิวเรต (ขนาด 50 มิลลิลิตร) จำนวน 27.50 มิลลิลิตร แล้วไขลงในบีกเกอร์ที่ 1 เพื่อปรับให้ได้ pH 6 จากนั้นทำการปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปกรองตะกอนด้วยชุดกรองลดความดันแบบสุญญากาศ พร้อมทั้งล้างตะกอนด้วยอะซิโตนเพื่อกำจัดกรดฟอสฟอริกที่ไม่ทำปฏิกิริยา จากนั้นนำไปอบเพื่อกำจัดอะซิโตนและน้ำอิสระเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 °C แสดงดังสมการที่ 3.5



6) การสังเคราะห์ $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ (ZnP)

ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) จำนวน 2.43 กรัม ลงในบีกเกอร์ที่ 1 (ขนาด 100 มิลลิลิตร) ที่บรรจุอะซิโตน จำนวน 20 มิลลิลิตร เพื่อให้ ZnO เกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และตวงกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 12.06 โมลาร์ จำนวน 1.65 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ที่ 2 (ขนาด 100 มิลลิลิตร) จากนั้นนำบีกเกอร์ที่ 2 ค่อยๆ เทลงในบีกเกอร์ที่ 1 แล้วปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้องจะได้ตะกอนของ $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ต่อมาทำการกรองแล้วล้างตะกอนด้วยอะซิโตนเพื่อให้ น้ำอิสระหลุดออก, กำจัดกรดฟอสฟอริกที่ไม่ทำปฏิกิริยาออก และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แสดงดังสมการที่ 3.6





กรองตะกอนด้วยเครื่องกรองลดความดันแบบ
สุญญากาศพร้อมทั้งล้างตะกอนด้วยเอซิโตน

อบตะกอนที่อุณหภูมิ
50 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง

รูปที่ 3.1 แผนผังการเตรียมสารประกอบโลหะประเภทฟอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การศึกษาสารประกอบโลหะประเภทฟอสเฟตชนิดต่างๆ ที่มีผลต่อการหน่วงไฟ

การศึกษาสารประกอบโลหะประเภทฟอสเฟตชนิดต่างๆ ที่มีผลต่อการหน่วงไฟ โดยกำหนดอัตราส่วนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) : สารหน่วงไฟที่สังเคราะห์ขึ้น (FR) เป็น 70:30 (โดยน้ำหนัก) จากนั้นผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) โดยตั้งสภาวะของเครื่องดังนี้

- อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม 165 °C
- ความเร็วรอบ (Rotor speed) 45 rpm
- เวลาที่ใช้ในการผสม 15 นาที

เมื่อผสมสารในแต่ละสูตรแล้ว ปล่อยให้สารให้เย็นตัวลง จากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องบดเม็ดพลาสติกเพื่อให้ได้เม็ดที่มีขนาดเล็ก แล้วทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) และทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 แบบแนวนอนและแนวตั้ง

ปัจจัยที่นำมาพิจารณาในการเลือกสารหน่วงไฟ ได้แก่ อัตราการลามไฟ และสมบัติบางประการของสารหน่วงไฟ เช่น สมบัติการต้านการหยดของพลาสติกเมื่อได้รับความร้อน เป็นต้น

3.5 การศึกษาผลของอัตราส่วนของ HDPE ต่อสารหน่วงไฟ (FR)

ผลของอัตราส่วนของ HDPE ต่อสารหน่วงไฟ (FR) ที่เหมาะสมโดยตั้งสภาวะของเครื่องดังนี้

- อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม 165 °C
- ความเร็วรอบ (Rotor speed) 45 rpm
- เวลาที่ใช้ในการผสม 15 นาที

เมื่อผสมสารในแต่ละสูตรแล้ว ปล่อยให้สารให้เย็นตัวลง จากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องบดเม็ดพลาสติกเพื่อให้ได้เม็ดที่มีขนาดเล็ก แล้วทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) และทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 แบบแนวนอนและแนวตั้ง โดยอัตราส่วนแสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนของ HDPE ต่อสารหน่วงไฟ (FR)

อัตราส่วน HDPE:FR	ส่วนประกอบโดยน้ำหนัก	
	HDPE (g)	FR (g)
70 : 30	28	12
60 : 40	24	16
50: 50	20	20

3.6 การศึกษาสมบัติต่างๆ ของ HDPE เมื่อผสมสารหน่วงไฟ

สารหน่วงไฟ เป็นสารเติมแต่งที่ใส่ในพลาสติกเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของพลาสติกให้ดีขึ้น ดังนั้นเมื่อใส่สารหน่วงไฟลงไป อาจส่งผลให้สมบัติของพลาสติกเปลี่ยนแปลงไป จึงได้มีการศึกษาสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.6.1 ทดสอบสมบัติทางกายภาพ

1) การหาค่าความถ่วงจำเพาะโดยใช้ขวดพิคโนมิเตอร์ [27] เป็นวิธีหาความถ่วงจำเพาะของสารในรูปแบบของผง (Powder) ที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 792 โดยมีขั้นตอนทดสอบดังต่อไปนี้

1. ล้างขวด Pycnometer ด้วยอะซิโตนและไปอบให้แห้ง
2. ชั่งน้ำหนักขวด Pycnometer เปล่า และบันทึกน้ำหนัก
3. ชั่งน้ำหนักขวด Pycnometer ที่บรรจุน้ำกลั่น และบันทึกน้ำหนัก
4. ล้างขวด Pycnometer แล้วนำไปอบให้แห้งและบันทึกน้ำหนัก
5. บรรจุผงที่จะทำการทดสอบลงในขวด Pycnometer ประมาณ 1-5 กรัม ชั่งน้ำหนักและบันทึกผล
6. เติมน้ำลงในขวด Pycnometer ในข้อที่ 5 และชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกผล

จากนั้นคำนวณหาค่า Specific gravity ของผงทดสอบ ด้วยสมการที่ 3.7

$$\text{Specific gravity} = \frac{a}{a+b-c} \quad (3.7)$$

กำหนดให้

- a คือ น้ำหนักของผงทดสอบ
- b คือ น้ำหนักของขวด Pycnometer รวมกับน้ำหนักของน้ำ
- c คือ น้ำหนักของขวด Pycnometer รวมกับน้ำหนักของน้ำ และรวมกับน้ำหนักผงทดสอบ

2) สันฐานวิทยา [27] เป็นวิธีการศึกษาพื้นผิวของวัสดุทดสอบว่า มีความต่อเนื่องกันระหว่างเฟสของพลาสติกกับเฟสของสารที่นำมาผสม และศึกษาการกระจายตัวของสารที่นำมาผสม โดยในงานวิจัยนี้มีการเตรียมชิ้นงานทดสอบโดยการขึ้นรูปพลาสติก HDPE ที่ผสมกับ สารหน่วงไฟที่สังเคราะห์ขึ้น จากนั้นนำชิ้นงานดังกล่าวมาแช่ในโตรเจนเหลวเป็นเวลา 90 นาที หักชิ้นงาน อนุกรมมิติต่ำ แล้วนำชิ้นงานมาเคลือบด้วยทองคำ จากนั้นนำไปวิเคราะห์

3.6.2 ทดสอบสมบัติเชิงกล

1) ความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) และมอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus) [28,29] คือ การวัดความสามารถของวัสดุที่ทนต่อแรงกระทำที่จะทำให้ตัวอย่างโค้งงอโดยไม่เกิดการแตกหรือเสียรูป โดยในการทดสอบจะใช้หัวกด (Loading pin) กดวัสดุทดสอบที่วางอยู่บนตัวรองรับ (Supporting jig) ซึ่งเป็นตัวกำหนดระยะห่าง (Span) โดยกดในลักษณะตั้งฉากกับวัสดุทดสอบ ซึ่งการทดสอบทำตามมาตรฐาน ASTM D 790 โดยมีสภาวะทดสอบดังต่อไปนี้

- ชั้นงานทดสอบ 5 ชั้นในแต่ละรอบการทดสอบ
- โหลดเซลล์ (Load cell) 5 kN
- ความเร็วในการกด 10 mm/min
- ระยะห่างระหว่างแท่นรองรับ 15 เท่าของความหนาชิ้นงาน

ในการทดสอบสามารถคำนวณค่า ความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) และมอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus) ได้ดังสมการที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ

$$\text{Flexural strength} = \frac{3FL}{2Wh^2} \quad (3.8)$$

$$\text{Flexural modulus} = \frac{L^3}{4Wh^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta d} \quad (3.9)$$

กำหนดให้

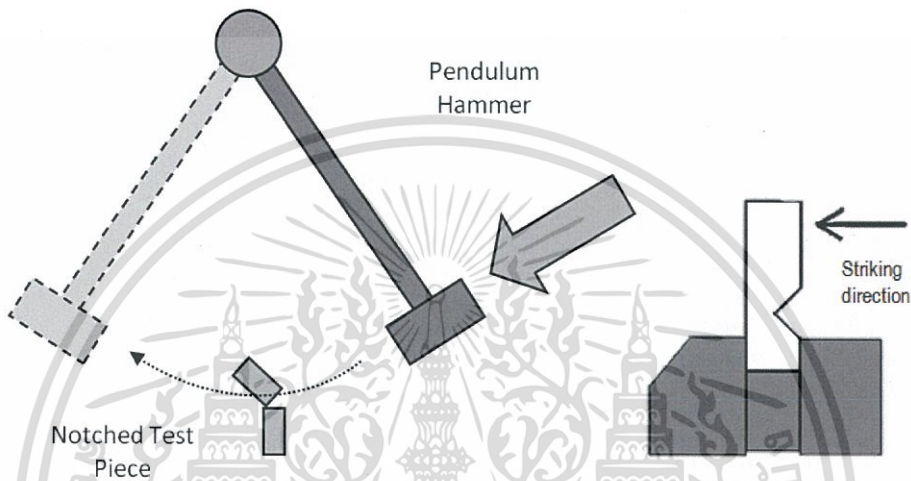
- F คือ แรงกดสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการโค้งงอ (N)
- L คือ ระยะห่างระหว่างตำแหน่งของวัสดุที่รองรับชิ้นงานทดสอบ (mm)
- W คือ ความกว้างของชิ้นงานที่ทดสอบ (mm)
- h คือ ความสูงของชิ้นงาน (mm)
- ΔF คือ ผลต่างของแรงกดในช่วงความชันเป็นเส้นตรง (N)
- Δd คือ ระยะโค้งงอ (mm)



รูปที่ 3.2 การทดสอบแบบ Flexural test [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ความทนต่อแรงกระแทก (Impact strength) [31] เป็นการวัดความสามารถในการดูดซับพลังงานของวัสดุ ซึ่งเป็นตัวกำหนดสมบัติทางด้านความเหนียว (Toughness) โดยชิ้นงานจะได้รับแรงกระแทกอย่างฉับพลันจนเกิดการแตกหัก การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 256 ลักษณะชิ้นงานเป็นแท่งยาวและมีหน้าตัดขวางเป็นสี่เหลี่ยม ขนาด $64 \times 12.7 \times 3.2 \text{ mm}^3$ วางชิ้นงานทดสอบแบบไอซอด (Izod test) นั่นคือ วางชิ้นงานในแนวตั้งและให้แรงกระแทกด้านที่มีรอยบาก ทำการบากชิ้นงานเป็นรูปตัววี (V notch) โดยมีรัศมีร่องบาก (Root radius) 0.254 mm และมีความลึก 2.54 mm



รูปที่ 3.3 ลักษณะของตัวอย่างและวิธีการทดสอบความทนต่อแรงกระแทกแบบไอซอด [32]

3) ความแข็ง (Hardness) [33] เป็นการวัดค่าความแข็งของวัสดุที่ทนต่อการเสีรูปร่างจากการให้แรงกด ภายใต้เงื่อนไขของการใช้แรงและชนิดของหัวกด การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 2240 โดยวัดค่าความแข็งแบบ Durometer หัวกดชนิด Shore D กดพอลิเมอร์ในแนวตั้งฉากจนสุดระยะของหัวกด ที่ระยะเวลาคงที่ (5 วินาที) ความหนาของชิ้นงานควรหนาเกิน 0.25 นิ้ว และอ่านค่าได้จากหน้าปัด ค่าความแข็งที่ได้ไม่มีหน่วย

3.6.3 สมบัติทางความร้อน

1) Differential scanning calorimetry (DSC) [34,35] เป็นเทคนิคที่ใช้เพื่อศึกษาปริมาณความร้อน ซึ่งใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของพอลิเมอร์ วัดการเปลี่ยนแปลงของพลังงานเมื่อถูกเพิ่มอุณหภูมิในสภาวะที่ควบคุม

หลักการทำงาน คือ มีสารตัวอย่างและสารอ้างอิงที่เฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยาจะถูกให้ความร้อนในบรรยากาศไนโตรเจน โดยสภาวะที่ทำการทดสอบมี ดังนี้

- ช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ $25\text{-}350 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $10 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$

โดย DSC สามารถคำนวณเพื่อหาปริมาณของผลึกได้ (% Crystallinity; X_c) ดังสมการที่

3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\% \text{ Crystallinity} = \frac{\Delta H_f}{\Delta H^{\circ}f} \times 100 \quad (3.10)$$

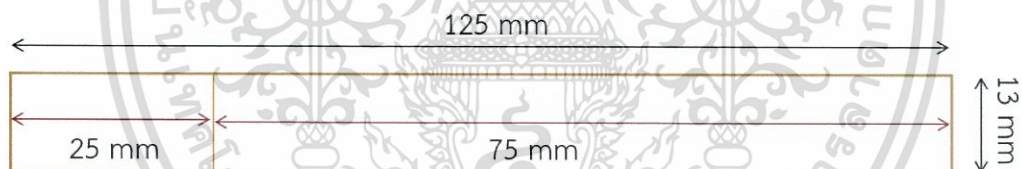
กำหนดให้ ΔH_f คือ เอนทาลปี (Enthalpy) ของการหลอมเหลวพอลิเมอร์
 $\Delta H^{\circ}f$ คือ เอนทาลปีของการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ที่มีผลึก 100% โดยมีค่าเท่ากับ 293.6 J/g [5]

2) Thermogravimetric analysis (TGA) [36] เป็นเทคนิคที่ใช้เพื่อศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน โดยให้สารตัวอย่างได้รับความร้อนภายใต้สภาวะที่กำหนด พร้อมกับการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารตัวอย่างโดยสภาวะที่ทำการทดสอบมี ดังนี้

- น้ำหนักสารตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ 5-15 มิลลิกรัม
- ทำการทดสอบภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน
- ช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ 30-900 °C
- อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 °C/min

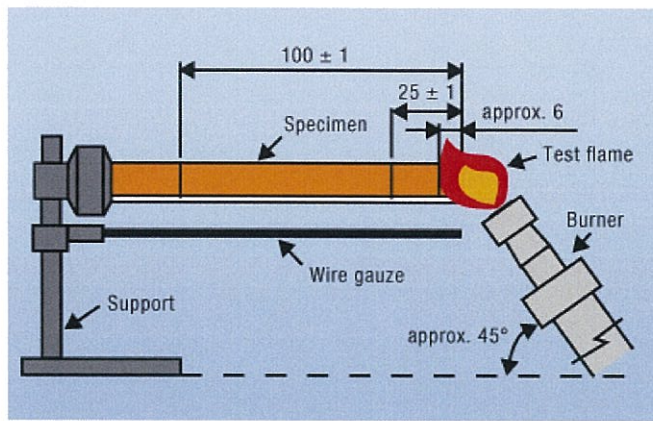
3.6.4 สมบัติการติดไฟ และการลามไฟ

1) การทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 (Horizontal burning test) [37] การทดสอบการลามไฟของพลาสติก จะใช้ชิ้นงานทดสอบที่มีขนาด $125 \times 13 \times 3 \text{ mm}^3$ โดยวิธีนี้จะทำการเผาชิ้นงานแบบแนวนอน ความสูงของเปลวไฟ 20 mm โดยใช้เปลวไฟสีน้ำเงินที่ทำมุม 45 องศา



รูปที่ 3.4 ลักษณะชิ้นงานที่ทำการทดสอบ

ทำการจ่อเปลวไฟที่ชิ้นงานเป็นเวลา 30 วินาที หลังจากครบ 30 วินาที นำเปลวไฟออก ถ้าชิ้นงานเกิดการติดไฟ รอกันกว่าชิ้นงานเกิดการลามไฟไปถึง 25 mm ทำการจับเวลา จะยุติการเผาไหม้เมื่อชิ้นงานลามไฟไปถึง 75 mm จดบันทึกเวลา ทำการทดสอบชิ้นงานเป็นจำนวน 5 ชิ้น



รูปที่ 3.5 การทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 โดยการเผาชิ้นงานแบบแนวนอน [38]

สามารถนำเวลาที่บันทึกได้ มาคำนวณหาค่า Burning rate ดังสมการที่ 3.11

$$\text{Burning rate (mm/min)} = 60 \times \frac{L}{t} \quad (3.11)$$

เมื่อ L คือ ระยะที่เปลวไฟเผาไหม้ชิ้นงาน (75 mm)

t คือ เวลาในการเผาไหม้

ตารางที่ 3.4 เกณฑ์การแบ่งกลุ่มพฤติกรรมของวัสดุต่อการติดไฟตามมาตรฐาน UL-94 [37,38]

ความหนาของชิ้นงาน	Burning rate
3-13 mm	ไม่ควรเกิน 40 mm/min
น้อยกว่า 3 mm	ไม่ควรเกิน 75 mm/min

2) การทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 (Vertical burning test) [37] เป็นวิธีทดสอบการติดไฟและลามไฟของพลาสติกจะใช้ชิ้นงานทดสอบที่มีขนาด $125 \times 13 \times 3 \text{ mm}^3$ ทำการเผาชิ้นงานแบบแนวตั้ง โดยใช้เปลวไฟสีน้ำเงินที่ทำมุม 45 องศา ทำการทดสอบชิ้นงาน 5 ตัวอย่าง โดยหลักการทดสอบเป็นดังนี้

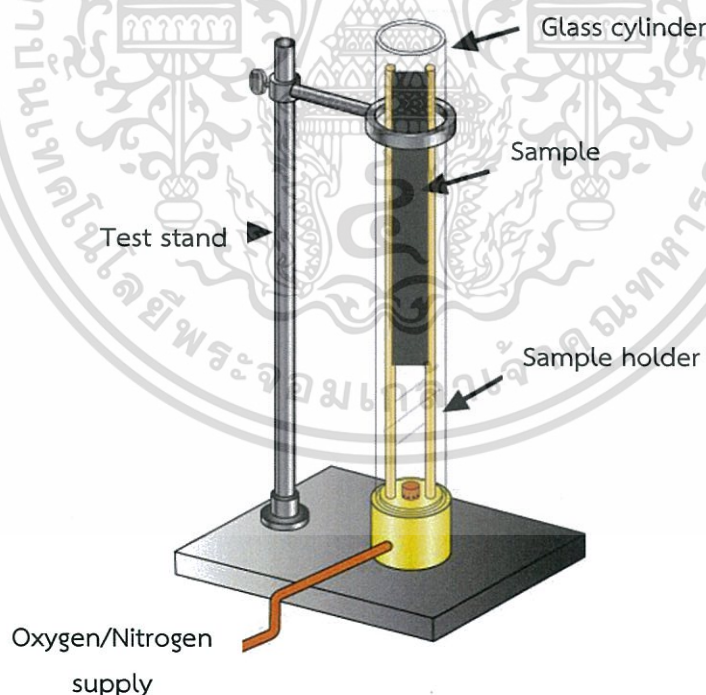
- ครั้งแรกจะทำการจุดไฟเป็นเวลา 10 วินาที เมื่อครบกำหนด นำไฟออก จากนั้นจับเวลาจนกระทั่งไฟดับลง เป็นการจับเวลาการลามไฟ คือ t_1
- ครั้งที่สอง ทำการจุดไฟอีกครั้งเป็นเวลา 10 วินาที จับเวลาที่ไฟติดอีกครั้ง คือ t_2
- ครั้งที่สาม จับเวลาต่อจากครั้งที่สอง จนกว่าไฟจะดับลง เพื่อดูเวลาการลามไฟ คือ t_3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 เกณฑ์การแบ่งกลุ่มพฤติกรรมของวัสดุต่อการติดไฟตามมาตรฐาน UL-94 แบบแนวนอน [37,38]

UL-94	ลักษณะของวัสดุ
V ₀	การเผาไหม้หยุดภายใน 10 วินาที โดยไม่มีการหยดของพลาสติกเมื่อได้รับความร้อน
V ₁	การเผาไหม้หยุดภายใน 30 วินาที โดยไม่มีการหยดของพลาสติกเมื่อได้รับความร้อน
V ₂	การเผาไหม้หยุดภายใน 30 วินาที โดยมีการหยดของพลาสติกเมื่อได้รับความร้อน

3) การหาค่า Limiting oxygen index (LOI) [39,40] เป็นวิธีการทดสอบ เพื่อหาปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนที่ต่ำที่สุด (Minimum concentration oxygen) ที่สามารถทำให้วัสดุเกิดการติดไฟได้ โดยมาตรฐานทดสอบ ASTM D 2863 ชิ้นงานที่นำมาทำการทดสอบ จะถูกวางตามแนวตั้งของปล่องแก้วและติดตั้งตัวชิ้นงานกับตัวล้อการทดสอบนี้จะทำภายใต้สภาวะของก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจน ซึ่งจะฉีดเข้าที่ฐานของปล่องแก้วจากนั้นจะนำเปลวไฟมาจ่อที่ขอบด้านบนของชิ้นงานเพื่อให้เกิดการติดไฟ ถ้าชิ้นงานยังไม่ติดไฟ ให้เพิ่มปริมาณก๊าซออกซิเจนจนกระทั่งชิ้นงานเกิดการติดไฟ



รูปที่ 3.6 การทดสอบ Limiting oxygen index [41]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการรายงานผลจะรายงานเป็นเปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการติดไฟ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ 3.12 ดังนี้

$$\text{LOI (\%)} = 100 \times \frac{[\text{O}_2]}{[\text{O}_2]+[\text{N}_2]} \quad (3.12)$$

ตารางที่ 3.6 เกณฑ์การแบ่งการติดไฟของวัสดุตามมาตรฐาน LOI [39,40]

LOI (%)	ระดับการติดไฟ
ต่ำกว่า 21	วัสดุที่ติดไฟได้ (Combustible)
มากกว่า 21	วัสดุที่สามารถดับไฟได้ด้วยตัวเอง (Self-extinguishing)
100	วัสดุที่ไม่ติดไฟ (Intrinsically non-flammable)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสารหน่วงไฟประเภทฟอสเฟต ที่มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟในระบบเดี่ยว โดยผสม HDPE และสารหน่วงไฟที่เตรียมได้ในอัตราส่วน 70:30 (โดยน้ำหนัก) จากนั้นทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการหน่วงไฟ และทำการเลือกสารหน่วงไฟเปรียบเทียบกับ ATH จากสมบัติบางประการ เช่น อัตราการลามไฟต่ำ, การต้านการหดตัวของพลาสติกเมื่อได้รับความร้อน โดยปรับอัตราส่วนของ HDPE และสารหน่วงไฟที่เลือก ในอัตราส่วน 70:30, 60:40 และ 50:50 (โดยน้ำหนัก) เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดีที่สุด รวมทั้งศึกษาสมบัติต่างๆ ของวัสดุ เช่น สมบัติเชิงกล, สมบัติทางความร้อน และสัญญาณวิทยา เป็นต้น ซึ่งแบ่งการวิจารณ์ผลเป็น 5 ตอน คือ สังเคราะห์สารประกอบโลหะประเภทฟอสเฟต, การศึกษาสารประกอบโลหะประเภทฟอสเฟตชนิดต่างๆ ที่มีผลต่อการหน่วงไฟ, ผลของอัตราส่วนของ HDPE ต่อสารประกอบโลหะประเภทฟอสเฟต, การศึกษาสมบัติต่างๆ ของ HDPE เมื่อผสมสารหน่วงไฟ และวิเคราะห์ต้นทุน

จากการสังเคราะห์สารประกอบโลหะฟอสเฟต ด้วยวิธีการตกตะกอน พบว่าสารหน่วงไฟที่สังเคราะห์ขึ้นทั้งหมดมีลักษณะเป็นผงของแข็ง สีขาว ยกเว้น MnP ที่มีสีชมพูอ่อน และแสดงร้อยละผลผลิต (%Yield) ของสารหน่วงไฟที่สังเคราะห์ขึ้น ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ร้อยละผลผลิตของสารหน่วงไฟที่สังเคราะห์ขึ้น

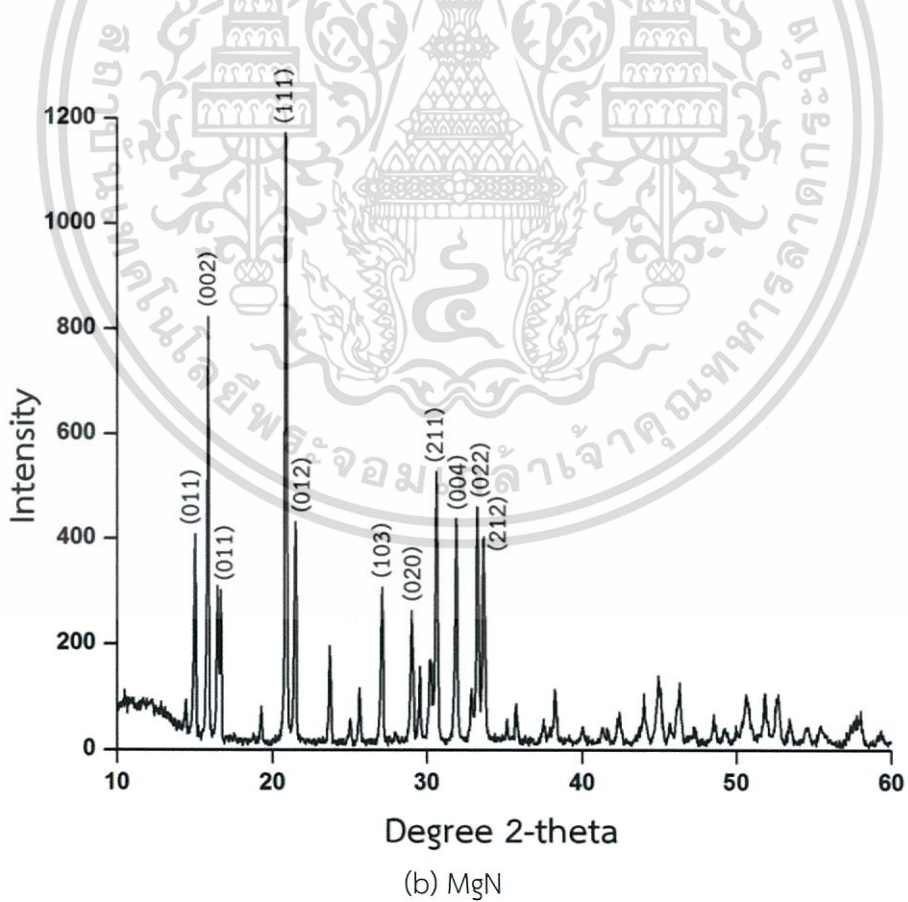
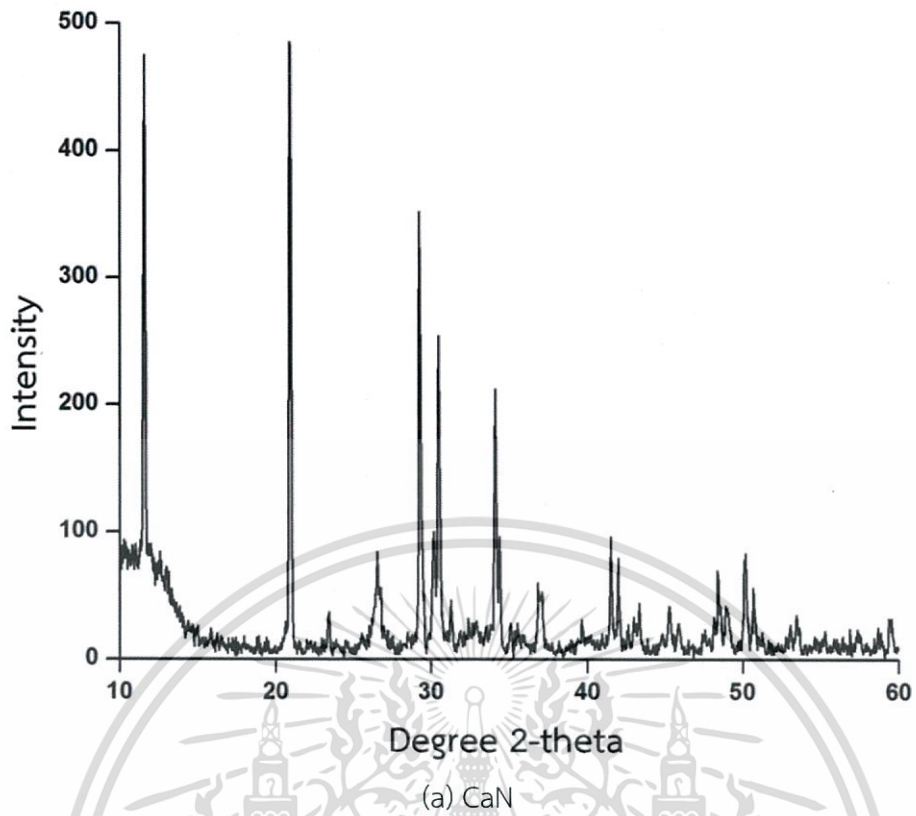
สารหน่วงไฟ	ร้อยละผลผลิต (%Yield)
$\text{CaNH}_4\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (CaN)	89.8
$\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (MgN)	84.3
$\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (MgH)	45.4
$\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (MgP)	96.5
$\text{Mn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (MnP)	80.0
$\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (ZnP)	52.5

4.1 สังเคราะห์สารประกอบโลหะประเภทฟอสเฟต

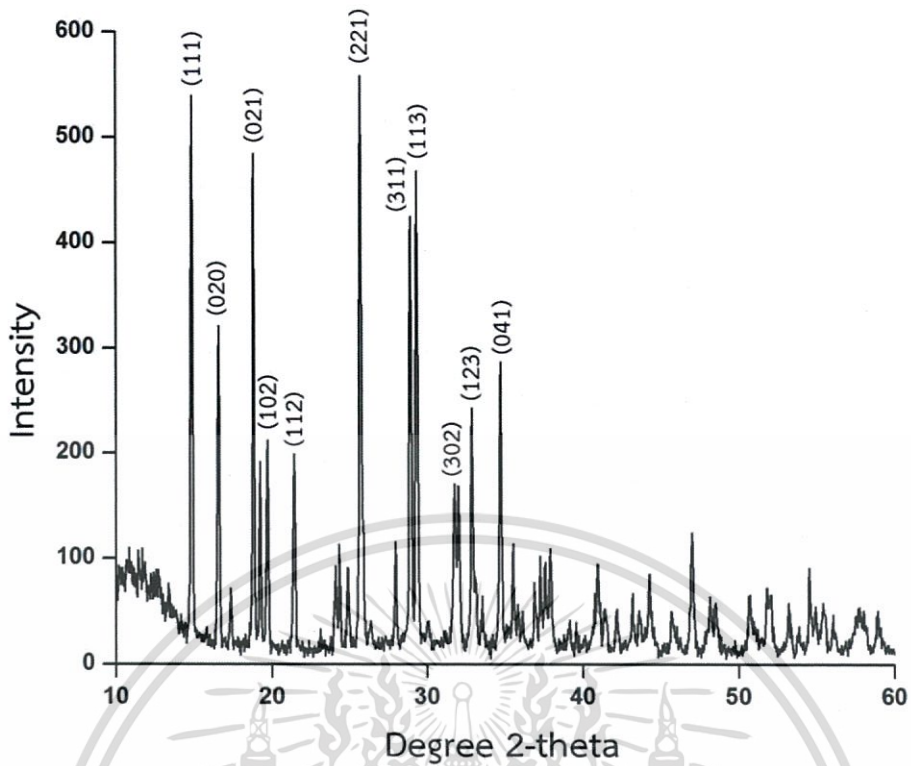
4.1.1 ศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD

จากรูปที่ 4.1 แสดงการศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD พบว่าสารหน่วงไฟที่สังเคราะห์ขึ้นมีองค์ประกอบของธาตุและโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน โดย MgN, MgH, MnP และ ZnP มีโครงสร้างผลึกเป็นออร์โธโรมบิก (Orthorhombic system) ในขณะที่ MgP มีโครงสร้างผลึกเป็นโมโนคลินิก (Monoclinic system) และ CaN ไม่พบโครงสร้างผลึก ซึ่งทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับข้อมูลมาตรฐาน จึงยืนยันได้ว่าสามารถสังเคราะห์สารหน่วงไฟได้จริงด้วยวิธีตกตะกอน แสดงผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของสารหน่วงไฟที่สังเคราะห์ขึ้น ดังตารางที่ 4.2

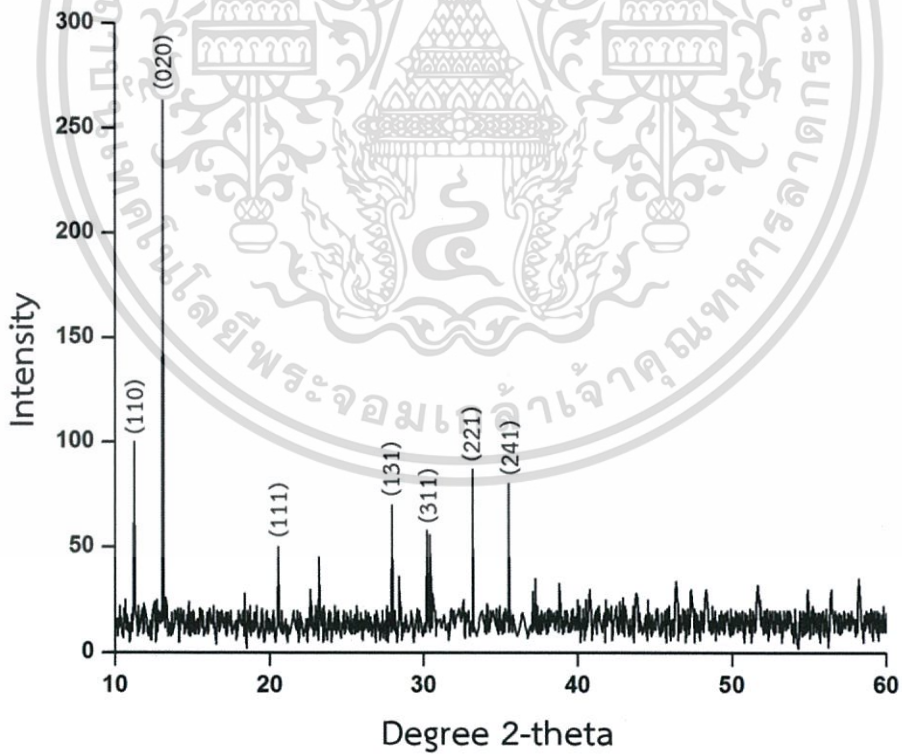
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

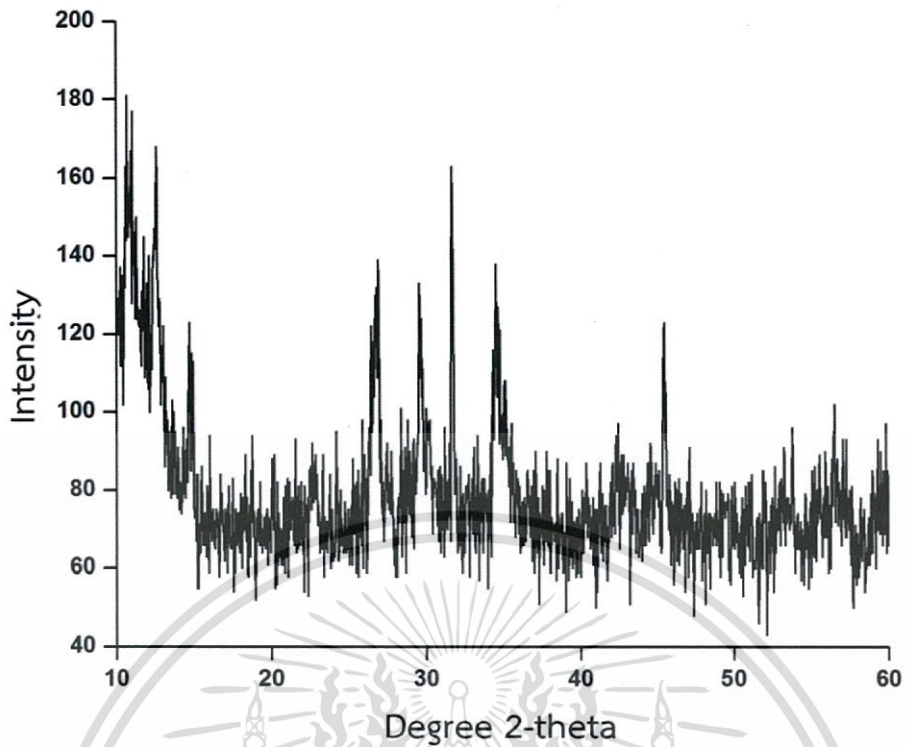


(c) MgH

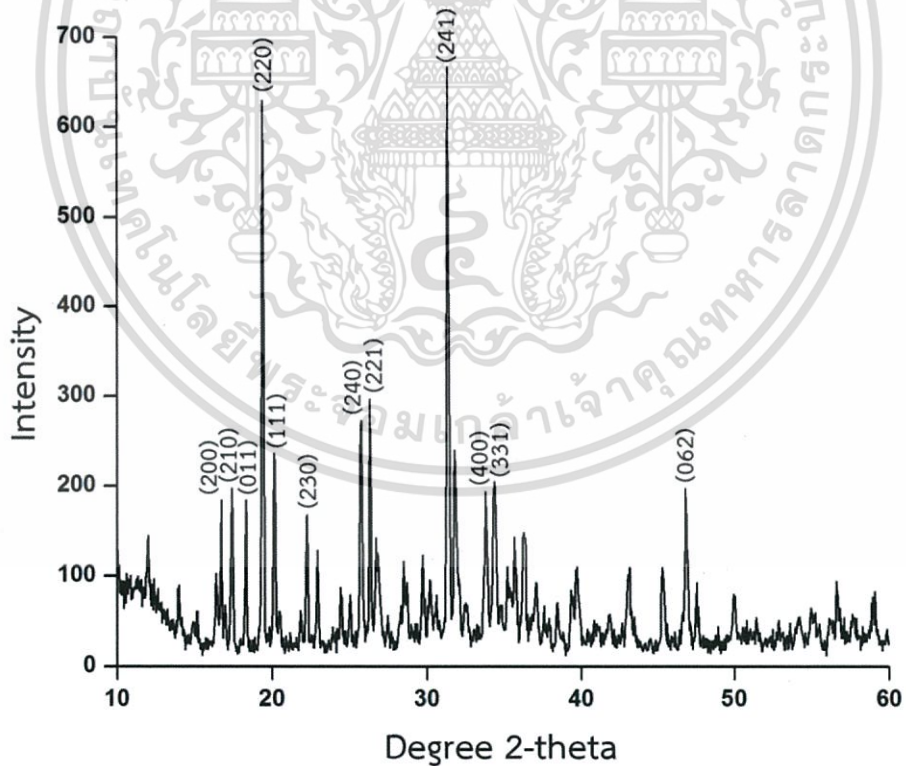


(d) MgP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(e) MnP



(f) ZnP

รูปที่ 4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD ของ FR (a) CaN, (b) MgN, (c) MgH, (d) MgP, (e) MnP และ (f) ZnP
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของสารหน่วงไฟที่สังเคราะห์ขึ้น

FR	ข้อมูลมาตรฐาน	2 θ	โครงสร้างผลึก
CaN	PDF #20-0202 ของ CaNH ₄ PO ₄ ·H ₂ O	11.305, 19.493, 29.061, 31.360, 34.465	N/A
MgN	PDF #71-2089 ของ MgNH ₄ PO ₄ ·6H ₂ O	15.000(011), 15.800(002), 16.560(011), 20.880(111), 21.480(012), 27.080(103), 29.000(020), 30.600(211), 31.920(004), 33.280(022), 33.680(121)	ออร์โธโรมบิก (Orthorhombic system)
MgH	PDF #27-0023 ของ MgHPO ₄ ·3H ₂ O	14.897(111), 16.586(020), 17.349(200), 18.816(021), 19.247(210), 19.731(102), 21.426(112), 25.702(221), 28.907(311), 29.341(113), 31.755(302), 32.870(123), 34.742(041)	ออร์โธโรมบิก (Orthorhombic system)
MgP	PDF #84-1148 ของ Mg ₃ (PO ₄) ₂ ·8H ₂ O	11.259(110), 13.197(020), 20.570(111), 27.942(131), 30.293(311), 33.285(221), 35.564(241)	โมนอคลินิก (Monoclinic system)
MnP	PDF #03-0426 ของ Mn ₃ (PO ₄) ₂ ·3H ₂ O	10.732, 12.618, 14.676, 17.512, 18.724 21.560, 22.760, 26.888, 29.460, 34.491, 38.424, 40.345, 42.403, 44.599, 46.794, 48.852, 51.184, 52.602, 56.433	ออร์โธโรมบิก (Orthorhombic system)
ZnP	PDF #76-0896 ของ Zn ₃ (PO ₄) ₂ ·4H ₂ O	16.719(200), 17.409(210), 18.272(011), 19.367(220), 20.114(111), 22.196(230), 25.691(240), 26.273(221), 31.322(241), 33.807(400), 34.292(331), 46.804(062)	ออร์โธโรมบิก (Orthorhombic system)

4.1.2 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR

จากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารหน่วงไฟที่สังเคราะห์ขึ้น โดยใช้เทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) แสดงภาพการวิเคราะห์ที่ภาคผนวก ก และได้ผลการศึกษาดังต่อไปนี้

1) CaNH₄PO₄·H₂O

จากผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ CaNH₄PO₄·H₂O พบพีกสำคัญดังนี้ O-H Stretching เลขคลื่นที่ 3552 cm⁻¹, O-H Bending เลขคลื่นที่ 1657 cm⁻¹, N-H Stretching เลขคลื่นที่ 3478 และ 3281 cm⁻¹, N-H Bending เลขคลื่นที่ 1437 cm⁻¹, P-O Stretching เลขคลื่นที่ 1143, 1070 และ 987 cm⁻¹, P-O Bending เลขคลื่นที่ 584 และ 519 cm⁻¹ ซึ่งผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับ J. Cooke [42]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

จากผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ พบพีกสำคัญดังนี้ O-H Stretching เลขคลื่นที่ 3594 cm^{-1} , O-H Bending เลขคลื่นที่ 1602 cm^{-1} , N-H Stretching เลขคลื่นที่ 3489 และ 3273 cm^{-1} , N-H Bending เลขคลื่นที่ 1446 cm^{-1} , P-O Stretching เลขคลื่น 1006 cm^{-1} , P-O Bending เลขคลื่นที่ 574 และ 474 cm^{-1} ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ G. Kurtulus และคณะ [15]

3) $\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

จากผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ $\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ พบพีกสำคัญดังนี้ O-H Stretching เลขคลื่นที่ 3529 , 3396 และ 3272 cm^{-1} , O-H Bending เลขคลื่นที่ 1698 และ 1649 cm^{-1} , P-O Stretching เลขคลื่นที่ 1174 , 1070 และ 1024 cm^{-1} , P-O Bending เลขคลื่นที่ 694 และ 529 cm^{-1} , H-P-O Stretching เลขคลื่นที่ 1248 cm^{-1} , H-P-O Bending เลขคลื่นที่ 887 cm^{-1} ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Ray L. Frost และคณะ [43]

4) $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$

จากผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ พบพีกสำคัญดังนี้ O-H Stretching เลขคลื่นที่ 3420 cm^{-1} , O-H Bending เลขคลื่นที่ 1639 cm^{-1} , P-O Stretching เลขคลื่นที่ 1067 cm^{-1} , P-O Bending เลขคลื่นที่ 598 cm^{-1} ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับ R. L.Frost และคณะ [44]

5) $\text{Mn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

จากผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ $\text{Mn}(\text{PO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ พบพีกสำคัญดังนี้ O-H Stretching เลขคลื่นที่ 3438 cm^{-1} , O-H Bending เลขคลื่นที่ 1639 cm^{-1} , P-O Stretching เลขคลื่นที่ 1034 cm^{-1} , P-O Bending เลขคลื่นที่ 584 cm^{-1} ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับ Ping Zhang และคณะ [20]

6) $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

จากผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ พบพีกสำคัญดังนี้ O-H Stretching เลขคลื่นที่ 3539 และ 3410 cm^{-1} , O-H Bending เลขคลื่นที่ 1639 cm^{-1} , P-O Stretching เลขคลื่นที่ 1107 และ 1024 cm^{-1} , P-O Bending เลขคลื่นที่ 951 cm^{-1} ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับ Jian Dong Wang และคณะ [45]

4.1.3 ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA แสดงการสลายตัวทางความร้อน แสดงภาพการวิเคราะห์ที่ภาคผนวก ข และได้ผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1) $\text{CaNH}_4\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$

เกิดการสลายตัว 4 ช่วง คือ 73-103 °C เป็นการสลายตัวของน้ำอิสระคิดเป็น 4%, 107-172 °C เป็นการสลายตัวของน้ำในโครงสร้างคิดเป็น 10%, 172-413 °C และ 413-633 °C เป็นการสลายตัวของ NH_3 คิดเป็น 9% โดยน่าจะเหลือ CaHPO_4 แสดงดังสมการที่ 4.1



2) $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

เกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 68-124 °C ซึ่งเป็นการสลายตัวของน้ำในโครงสร้าง 44% และ NH_3 7% โดยคาดว่าเหลือสารเป็น MgHPO_4 แสดงดังสมการที่ 4.2 ซึ่งให้ผลใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Yi-qing Chen และคณะ [17]



3) $\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

เกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 92-160 °C เป็นการสลายตัวของน้ำโครงสร้าง 31% ซึ่งแสดงดังสมการที่ 4.3 เป็นไปตามงานวิจัยของ บรรจง บุญชม [46]



4) $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$

เกิดการสลายตัว 2 ช่วง คือ 48-101 °C เป็นการสลายตัวของน้ำอิสระ 8% และ 101-226 °C เป็นการสลายตัวของน้ำในโครงสร้าง 35% แสดงดังสมการที่ 4.4



5) $\text{Mn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

เกิดการสลายตัว 2 ช่วง คือ 57-116 °C เป็นการสลายตัวของน้ำอิสระ 7% และ 116-782 °C เป็นการสลายตัวของน้ำในโครงสร้าง 13.20% แสดงดังสมการที่ 4.5 ซึ่งให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Ping Zhang และคณะ [20]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$

เกิดการสลายตัว 3 ช่วง คือ 46-108 °C เป็นการสลายตัวของน้ำอิสระ 4% และ 108-292 °C, 292-483 °C เป็นการสลายตัวของน้ำในโครงสร้าง 15% โดยการสลายตัวทั้งหมดเป็น 19% แสดงดังสมการที่ 4.6 และ 4.7 ซึ่งผลวิเคราะห์ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ O.Pawling และคณะ [22]



จากตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณน้ำในโครงสร้างและปริมาณชั้นเถ้าของสารหน่วงไฟที่สังเคราะห์ขึ้น พบว่าปริมาณน้ำในโครงสร้างที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับทางทฤษฎี ในขณะที่ปริมาณของชั้นเถ้าที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA นั้นมีค่าน้อยกว่าปริมาณชั้นเถ้าจากทฤษฎี เนื่องจากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่บริสุทธิ์ จึงเป็นผลให้เปอร์เซ็นต์ปริมาณชั้นเถ้าแตกต่างไปจากทฤษฎี โดยจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA สารหน่วงไฟที่มีปริมาณน้ำในโครงสร้างมากที่สุด คือ MgN เท่ากับ 44.0% และสารหน่วงไฟที่มีปริมาณชั้นเถ้ามากที่สุด คือ MnP เท่ากับ 80.4% ซึ่งสารหน่วงไฟที่มีปริมาณน้ำในโครงสร้างและชั้นเถ้ามากจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของการหน่วงไฟดียิ่งขึ้น เนื่องจากเมื่อเกิดการเผาไหม้สารหน่วงไฟจะปลดปล่อยน้ำทำให้ความร้อนในระบบลดลง และเกิดชั้นเถ้าปกคลุมพื้นผิวของพอลิเมอร์ส่งผลให้การเผาไหม้อย่างต่อเนื่องลดลง

ตารางที่ 4.3 ปริมาณน้ำในโครงสร้างและปริมาณชั้นเถ้าของสารหน่วงไฟที่สังเคราะห์ขึ้น ที่ได้จากเทคนิค TGA และจากทฤษฎี

สารหน่วงไฟ	ปริมาณน้ำในโครงสร้าง (%)		ปริมาณชั้นเถ้า (%)	
	จากทฤษฎี	จากเทคนิค TGA	จากทฤษฎี	จากเทคนิค TGA
CaN	10.5	10.0	84.2	77.6
MgN	44.0	44.0	52.2	49.6
MgH	31.0	31.0	67.8	64.3
MgP	36.9	35.0	68.5	57.6
MnP	13.2	13.2	90.7	80.4
ZnP	16.0	15.0	87.8	78.5

4.2 การศึกษาสารประกอบโลหะประเภทฟอสเฟตชนิดต่างๆ ที่มีผลต่อการหน่วงไฟ

4.2.1 ศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

เป็นการศึกษาสมบัติทางความร้อนของสารหน่วงไฟ โดยจะแสดงค่าเอนทาลปี (ΔH) แสดงดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ภาคผนวก ค โดยพบว่าสารหน่วงไฟทุกชนิดเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน จึงเท่ากับเป็นการลดความร้อนให้กับวัตถุ ขณะเดียวกันสลายตัวให้อิอน้ำ ทำให้ความร้อนในระบบลดลง โดยสารหน่วงไฟที่มีค่าเอนทาลปีมากที่สุดคือ MgN อันเนื่องมาจากการยึดเกาะระหว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะฟอสเฟตกับน้ำในโครงสร้างมีการยึดเกาะกันอย่างเหนียวแน่น ส่งผลให้ต้องใช้ปริมาณความร้อนสูงในการสลายโมเลกุลของน้ำในโครงสร้าง ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการลามไฟ

ตารางที่ 4.4 ค่าเอนทาลปี (ΔH) ของสารหน่วงไฟที่สังเคราะห์ขึ้น

สารหน่วงไฟ	ΔH (J/g)
ATH	N/A
CaN	35.3, 418.9
MgN	653.1
MgH	646.4
MgP	445.9
MnP	220.4
ZnP	54.9, 225.2, 73.6

4.2.2 ศึกษาสมบัติการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94

สารหน่วงไฟที่ใช้เป็นสารหน่วงไฟประเภทฟอสเฟต ที่มีความสามารถในการหน่วงไฟทั้งวัฏภาคไอและวัฏภาคควบแน่น ทำการทดลองโดยควบคุมอัตราส่วนของ HDPE เมื่อผสมกับ FR ที่อัตราส่วน 70:30 (โดยน้ำหนัก)

จากอัตราการลามไฟของ HDPE (pure) มีค่าเท่ากับ 37 mm/min [5] และชั้นเถ้าของ HDPE คิดเป็น 0.6% [47] เมื่อผสมสารหน่วงไฟลงใน HDPE ส่งผลให้อัตราการลามไฟลดลง แสดงดังตารางที่ 4.5 โดยพบว่า MgN มีอัตราการลามไฟที่ต่ำที่สุด เนื่องจาก MgN มีไนโตรเจนและฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบ ก่อให้เกิดปรากฏการณ์เสริมกัน (Synergistic effect) ทำให้ประสิทธิภาพการหน่วงไฟดีขึ้น โดย CaN มีองค์ประกอบเช่นเดียวกับ MgN แต่พบว่ามีอัตราการลามไฟสูงกว่า MgN เนื่องจากปริมาณน้ำในโครงสร้างของ MgN เท่ากับ 44.0% ซึ่งมีมากกว่า CaN ที่มีปริมาณน้ำในโครงสร้างเพียง 10.0% แสดงดังตารางที่ 4.3 ดังนั้นเมื่อเกิดการเผาไหม้ จึงทำให้ MgN เกิดการปลดปล่อยน้ำมากกว่า ส่งผลให้ความร้อนในระบบลดลง จึงทำให้อัตราการลามไฟต่ำกว่า CaN

นอกจากนี้ยังพบว่าสารประกอบโลหะฟอสเฟตทุกชนิด สามารถติดไฟ และเผาไหม้จนหมด โดยเกิดการหยดตัวของพลาสติกเมื่อได้รับความร้อน (Dripping) ยกเว้น HDPE:MnP เนื่องจากเมื่อเกิดการเผาไหม้จะทำให้ปริมาณชั้นเถ้าเกิดการเกาะกลุ่มอย่างหนาแน่นที่บริเวณพื้นผิวของพอลิเมอร์ จากตารางที่ 4.3 ปริมาณชั้นเถ้าของ MnP คิดเป็น 80.4% ซึ่งมีปริมาณมากที่สุด ทำให้การไหลของพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อนลดลง ดังนั้นจึงไม่เกิดการหยดตัวของพลาสติกเมื่อได้รับความร้อน เป็นไปตามทฤษฎี [48] จากเหตุผลที่กล่าวมาในข้างต้น จึงทำการเลือก MgN และ MnP มาศึกษาอิทธิพลของปริมาณ FR ต่อการหน่วงไฟในระบบเดี่ยว

ตารางที่ 4.5 ผลการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 ของสารประกอบโลหะฟอสเฟตชนิดต่างๆ

HDPE:FR	การหยุดตัว	ทดสอบตามมาตรฐาน UL-94	อัตราการลามไฟ (mm/min)
HDPE:CaN	หยุด	ติดไฟไหม้หมด	32.9± 0.1
HDPE:MgN	หยุด	ติดไฟไหม้หมด	29.6± 0.1
HDPE:MgH	หยุด	ติดไฟไหม้หมด	44.9± 0.1
HDPE:MgP	หยุด	ติดไฟไหม้หมด	29.9± 0.1
HDPE:MnP	ไม่หยุด	ติดไฟไหม้หมด	32.6± 0.1
HDPE:ZnP	หยุด	ติดไฟไหม้หมด	32.7± 0.1

4.3 ผลของอัตราส่วนของ HDPE ต่อสารประกอบโลหะประเภทฟอสเฟต

ทำการเลือกสารหน่วงไฟเปรียบเทียบกับ ATH จากสมบัติบางประการ เช่น การต้านการหยุดตัวของพลาสติกเมื่อได้รับความร้อน และอัตราการลามไฟต่ำ เป็นต้น เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่แตกต่างกันของ HDPE และ FR

4.3.1 ศึกษาสมบัติการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94

จากตารางที่ 4.6 แสดงผลการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 ของ HDPE:FR ในอัตราส่วน (โดยน้ำหนัก) ที่แตกต่างกัน โดยอัตราการลามไฟของ HDPE ซึ่งมีค่าเท่ากับ 37 mm/min [5] จากการทดลอง พบว่า HDPE:MgN และ HDPE:MnP สามารถติดไฟ และเผาไหม้จนหมดในทุกอัตราส่วน ในขณะที่ HDPE:ATH ในอัตราส่วน 50:50 (โดยน้ำหนัก) เป็น V_0 และมีเพียง HDPE:MnP ที่ต้านการหยุดตัวของพลาสติกเมื่อได้รับความร้อน เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการลามไฟของสารหน่วงไฟชนิดเดียวกัน พบว่าการเพิ่มปริมาณสารหน่วงไฟจะทำให้อัตราการลามไฟลดลง

ตารางที่ 4.6 ผลการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 ของ HDPE:FR ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

HDPE:FR (โดยน้ำหนัก)	การหยุดตัว	ทดสอบตามมาตรฐาน UL-94	อัตราการลามไฟ (mm/min)	
HDPE:ATH	70:30	หยุด	ติดไฟไหม้หมด	21.3± 0.1
	60:40	หยุด	ติดไฟไหม้หมด	20.9± 0.2
	50:50	หยุด	V_0	-
HDPE:MgN	70:30	หยุด	ติดไฟไหม้หมด	29.7± 0.2
	60:40	หยุด	ติดไฟไหม้หมด	22.7± 0.2
	50:50	หยุด	ติดไฟไหม้หมด	18.8± 0.1
HDPE:MnP	70:30	ไม่หยุด	ติดไฟไหม้หมด	32.6± 0.8
	60:40	ไม่หยุด	ติดไฟไหม้หมด	21.7± 0.2
	50:50	ไม่หยุด	ติดไฟไหม้หมด	14.5± 0.2

4.3.2 ศึกษาปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนที่ต่ำที่สุด ที่ทำให้เกิดการเผาไหม้

จากตารางที่ 4.7 แสดง Limiting oxygen index (LOI) ของ HDPE:FR ในอัตราส่วน (โดยน้ำหนัก) ที่แตกต่างกัน พบว่า LOI ของ HDPE (pure) มีค่าเท่ากับ 17% และเมื่อเติมสารหน่วงไฟจะทำให้ LOI ของพลาสติกเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วนเดียวกัน ค่า LOI ของ HDPE:ATH มีค่ามากกว่า HDPE:MgN และ HDPE:MnP เนื่องจาก ATH อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนสูง [4] ทำให้ต้องใช้ปริมาณความเข้มข้นสูงที่จะทำให้พลาสติกติดไฟ และพบว่า MgN มีค่า LOI สูงกว่า MnP เนื่องจาก MgN มีการหลุดออกของโมเลกุลน้ำในโครงสร้างยากกว่า ซึ่งอธิบายได้จากค่าเอนทัลปีของผลการวิเคราะห์ DSC และเมื่อเปรียบเทียบ LOI ของสารหน่วงไฟชนิดเดียวกันพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารหน่วงไฟจะทำให้ LOI เพิ่มขึ้น โดย HDPE:ATH ในอัตราส่วน 50:50 (โดยน้ำหนัก) มี LOI เท่ากับ 22% จึงเป็นวัสดุที่สามารถดับไฟได้ด้วยตัวเอง

ตารางที่ 4.7 Limiting oxygen index (%) ของ HDPE:FR ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

HDPE:FR (โดยน้ำหนัก)		Limiting oxygen index (%)
HDPE (pure)		17
HDPE:ATH	70:30	20
	60:40	20
	50:50	22
HDPE:MgN	70:30	18
	60:40	19
	50:50	19
HDPE:MnP	70:30	17
	60:40	18
	50:50	20

4.3.3 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

เป็นการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมและสารหน่วงไฟ โดยจะแสดงค่าดังนี้ ค่าเอนทัลปี (ΔH), ค่าองศาความเป็นผลึก (Degree of crystallization; X_c), อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิการตกผลึก (T_c) เป็นต้น แสดงดังตารางที่ 4.8 และ 4.9 ซึ่งเป็นการผสม HDPE:FR (โดยน้ำหนัก) ในอัตราส่วน 70:30 พบว่า ค่า T_m และ T_c ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วน 70:30 กับ อัตราส่วน 50:50 พบว่า ΔH และ X_c มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มสารหน่วงไฟในพอลิเมอร์ ทำให้ค่าความเป็นผลึกของ HDPE เพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ต้องใช้ปริมาณพลังงานความร้อนมาก และเมื่อเทียบที่อัตราส่วนเดียวกัน การผสม MgN ลงไปในพอลิเมอร์ ทำให้องศาความเป็นผลึกของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น จึงเป็นผลให้ต้องใช้พลังงานความร้อนมากในการสลายตัว ดังนั้นค่า ΔH และ X_c จึงมีค่ามาก จึงอาจสรุปได้ว่า สารหน่วงไฟที่สังเคราะห์ขึ้นนี้ เป็นสารก่อผลึกให้กับพอลิเมอร์

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ DSC ของพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วน 70:30 (โดยน้ำหนัก)

HDPE:FR	T _m (°C)	T _c (°C)	ΔH (J/g)	X _c (%)
HDPE (pure)	131.5	115.9	193.2	65.8
HDPE:ATH	129.5	118.1	183.9	62.6
HDPE:MgN	129.2	117.7	207.4	70.7
HDPE:MnP	130.1	118.2	182.6	62.2

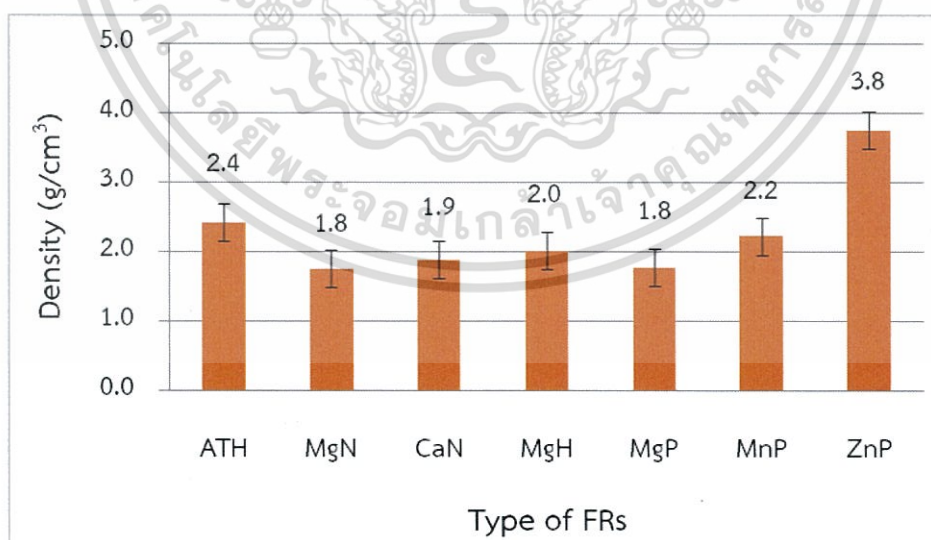
ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ DSC ของพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วน 50:50 (โดยน้ำหนัก)

HDPE:FR	T _m (°C)	T _c (°C)	ΔH (J/g)	X _c (%)
HDPE:MgN	128.9	118.1	253.6	86.4
HDPE:MnP	129.6	118.9	206.8	70.4

4.4 การศึกษาสมบัติต่างๆ ของ HDPE เมื่อผสมสารหน่วงไฟ

4.4.1 ศึกษาความหนาแน่นของสารหน่วงไฟที่สังเคราะห์ขึ้น

จากรูปที่ 4.2 แสดงค่าความหนาแน่น (Density) ของสารหน่วงไฟชนิดต่างๆ พบว่าค่าความหนาแน่นของ ATH, MgN, CaN, MgH, MgP, MnP และ ZnP เป็น 2.4, 1.8, 1.9, 2.0, 1.8, 2.2 และ 3.8 ตามลำดับ โดยสารหน่วงไฟที่มีค่าความหนาแน่นสูง จะสามารถลดปริมาณการใส่สารหน่วงไฟลงได้ จึงเป็นการลดต้นทุน แต่จะส่งผลให้ชิ้นงานมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจส่งผลต่อการใช้งาน ความหนาแน่นของสารที่สังเคราะห์ขึ้นนั้นเป็นไปตาม C. A. Murskyl และ R. M. Thompson [49]



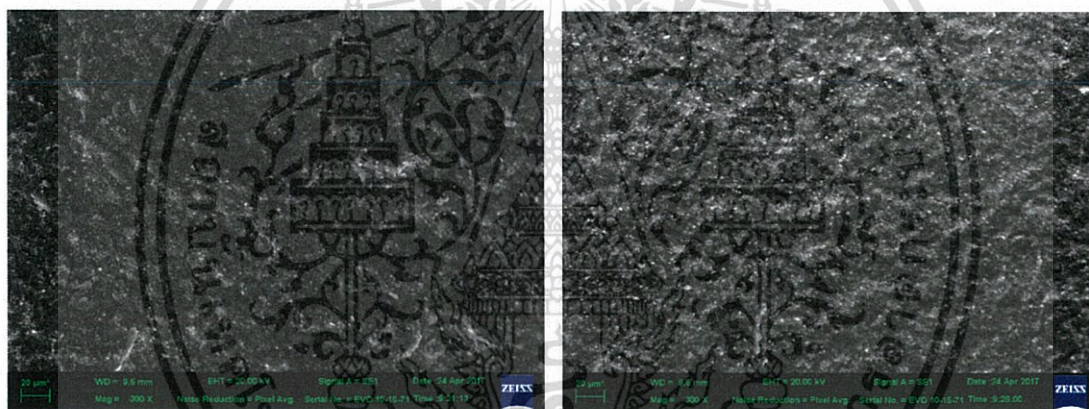
รูปที่ 4.2 ความหนาแน่น (Density) ของสารหน่วงไฟชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของสารหน่วงไฟ

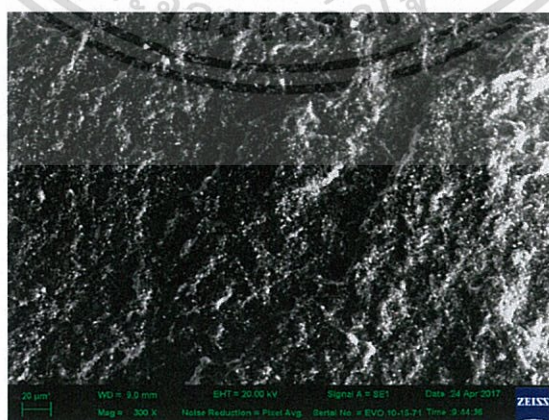
ศึกษาสัณฐานวิทยาของ HDPE ต่อสารหน่วงไฟที่สังเคราะห์ขึ้นในอัตราส่วนต่างๆ โดยสารหน่วงไฟที่นำมาศึกษาสัณฐานวิทยานั้น ได้แก่ สารหน่วงไฟที่ใช้ในอุตสาหกรรม คือ อะลูมินาไตรไฮดรต (ATH) และสารหน่วงไฟประเภทฟอสเฟตที่ทำการสังเคราะห์ขึ้น 2 ชนิด คือ แมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต เฮกซะไฮดรต ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$; MgN) และไตรแมงกานีส-ไดฟอสเฟต ไตรไฮดรต ($Mn_3(PO_4)_2 \cdot 3H_2O$; MnP) โดยสารหน่วงไฟแต่ละชนิดนั้นมีการศึกษาที่ 3 อัตราส่วน 70:30, 60:40 และ 50:50 (โดยน้ำหนัก) เพื่อดูการกระจายตัวและการยึดติดกันของ HDPE กับสารหน่วงไฟสามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 4.3, 4.4 และ 4.5

จากรูปที่ 4.3 ATH ผสมกับ HDPE ในอัตราส่วน 70:30, 60:40 และ 50:50 (โดยน้ำหนัก) ที่กำลังขยาย 300 เท่า จากภาพ (a), (b) และ (c) พบว่ามีการกระจายตัวของ ATH ในพอลิเมอร์เมทริกซ์อย่างสม่ำเสมอ โดยที่กำลังขยาย 2000 เท่า พบว่าอัตราส่วน 50:50 ภาพ (f) การกระจายตัวของ ATH นั้นสม่ำเสมอมาก นอกจากนี้ยังพบว่าการเกาะยึดติดระหว่าง ATH กับพอลิเมอร์เมทริกซ์นั้นมีการยึดเกาะที่ไม่ดี เนื่องจากสารหน่วงไฟมีการหลุดออกในลักษณะ Filler pull out ซึ่งแสดงถึงการเสียสภาพที่รอยต่อ พบช่องว่างและเห็นรอยต่อระหว่างอนุภาค



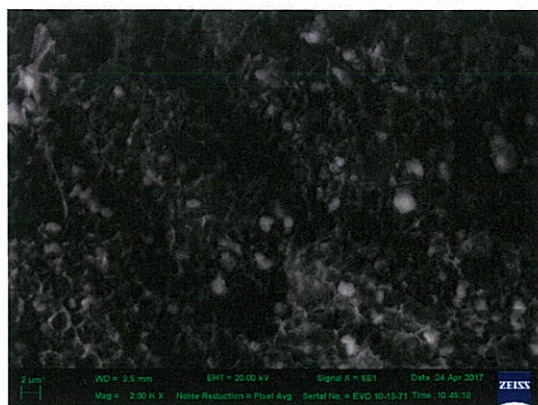
(a) 70:30

(b) 60:40

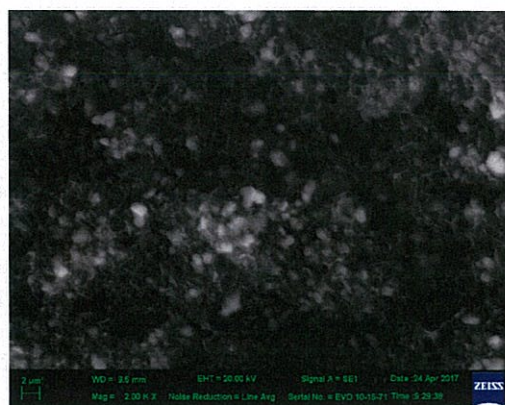


(c) 50:50

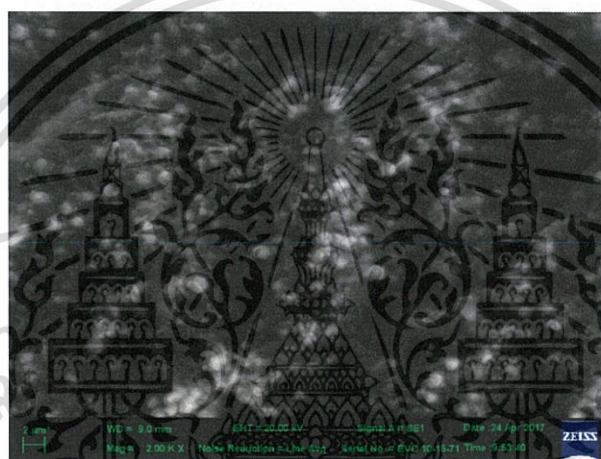
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(d) 70:30



(e) 60:40

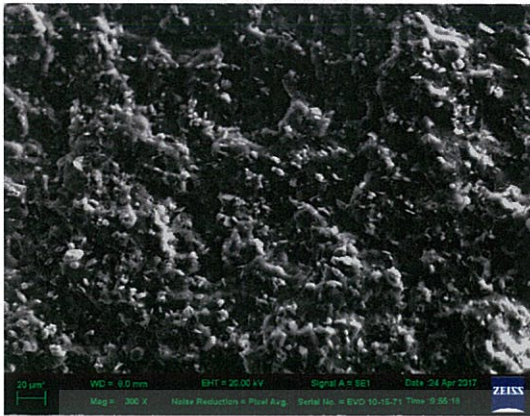


(f) 50:50

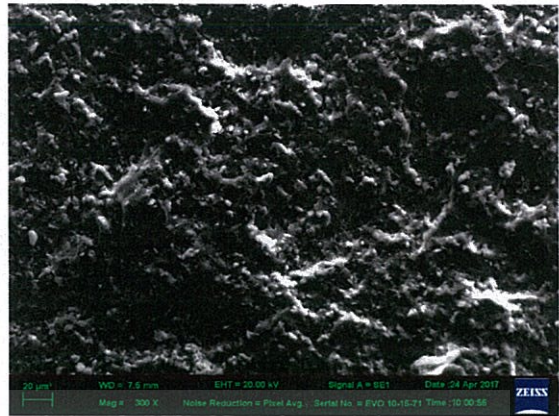
รูปที่ 4.3 ภาพ SEM ที่เตรียมจาก HDPE กับ ATH ในอัตราส่วน 70:30, 60:40 และ 50:50 (โดยน้ำหนัก) ตามลำดับที่กำลังขยาย 300 เท่า (a), (b) และ (c) ที่กำลังขยาย 2000 เท่า (d), (e) และ (f)

จากรูปที่ 4.4 MgN ผสมกับ HDPE ในอัตราส่วน 70:30, 60:40 และ 50:50 (โดยน้ำหนัก) ที่กำลังขยาย 300 เท่า จากภาพ (a), (b) และ (c) พบว่าการกระจายตัวของ MgN นั้นมีความสม่ำเสมอในทุกอัตราส่วน แต่เมื่อนำมาส่องที่กำลังขยาย 2000 เท่า ภาพ (f) ที่อัตราส่วน 50:50 พบว่าอนุภาคของ MgN มีการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนแอกโกลเมอเรต (Agglomerate) เกิดขึ้นทำให้การกระจายตัวไม่ดี ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล นอกจากนี้ยังพบช่องว่างและเห็นรอยต่อระหว่างอนุภาคเนื่องจากสารหน่วงไฟมีการหลุดออกในลักษณะ Filler pull out ซึ่งแสดงถึงการเสียสภาพที่รอยต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) 70:30



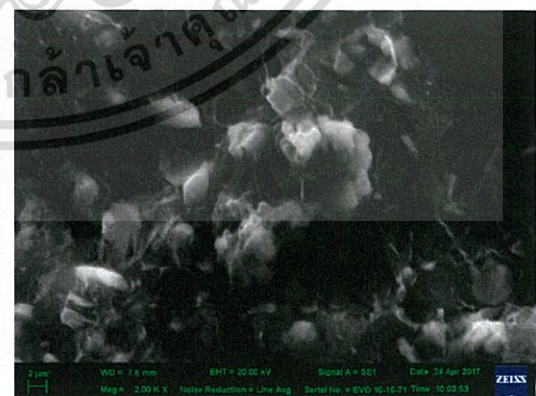
(b) 60:40



(c) 50:50

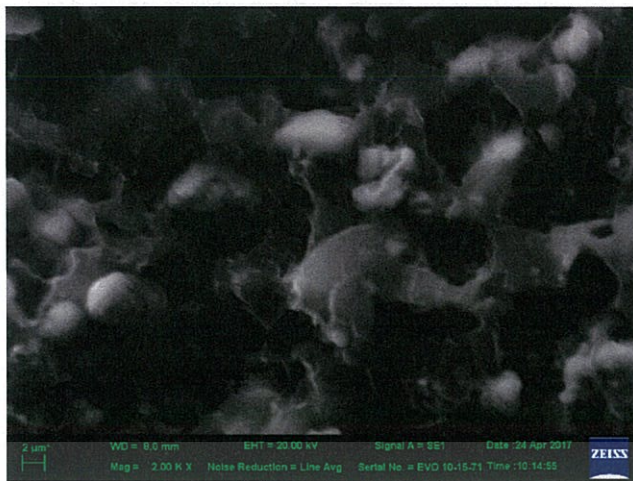


(d) 70:30



(e) 60:40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(f) 50:50

รูปที่ 4.4 ภาพ SEM ที่เตรียมจาก HDPE กับ MgN ในอัตราส่วน 70:30, 60:40 และ 50:50 (โดยน้ำหนัก) ตามลำดับที่กำลังขยาย 300 เท่า (a), (b) และ (c) ที่กำลังขยาย 2000 เท่า (d), (e) และ (f)

จากรูปที่ 4.5 MnP ผสมกับ HDPE ในอัตราส่วน 70:30, 60:40 และ 50:50 (โดยน้ำหนัก) ที่กำลังขยาย 300 เท่า จากภาพ (a), (b) และ (c) พบว่ามีการกระจายที่ดี แต่เมื่อนำมาส่องที่ กำลังขยาย 2000 เท่า ภาพ (f) 50:50 พบว่าการยึดเกาะนั้นไม่ดี เนื่องจากเห็นรอยต่อระหว่างอนุภาค MnP และพอลิเมอร์เมทริกซ์ นอกจากนี้ยังพบอนุภาค MnP เป็นก้อนที่ไม่มีเนื้อพอลิเมอร์มาเกาะ เห็นพื้นผิวเป็นหลุม แสดงว่าอนุภาค MnP นั้นถูกดึงหลุดออกไป เป็นการเสียสภาพที่รอยต่อ เมื่อนำมาเทียบกับภาพ (d) ที่อัตราส่วน 70:30 เห็นรอยต่อเช่นเดียวกับภาพ (d) แต่ไม่พบหลุมหรือ ช่องว่างที่อนุภาคถูกดึงหลุดออกไป แสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วน 70:30 มีการยึดเกาะติดกันได้ดีกว่า ที่อัตราส่วน 50:50

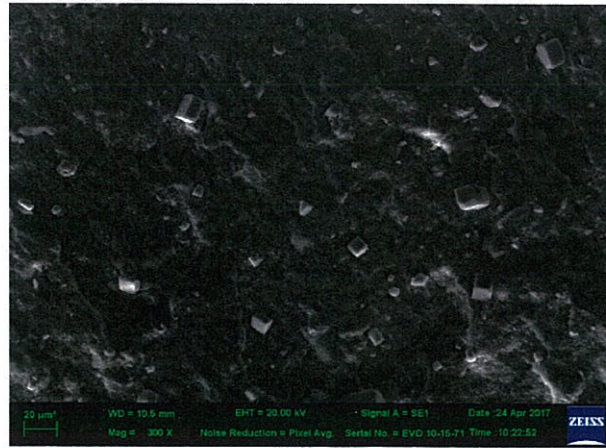


(a) 70:30



(b) 60:40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c) 50:50



(d) 70:30

(e) 60:40



(f) 50:50

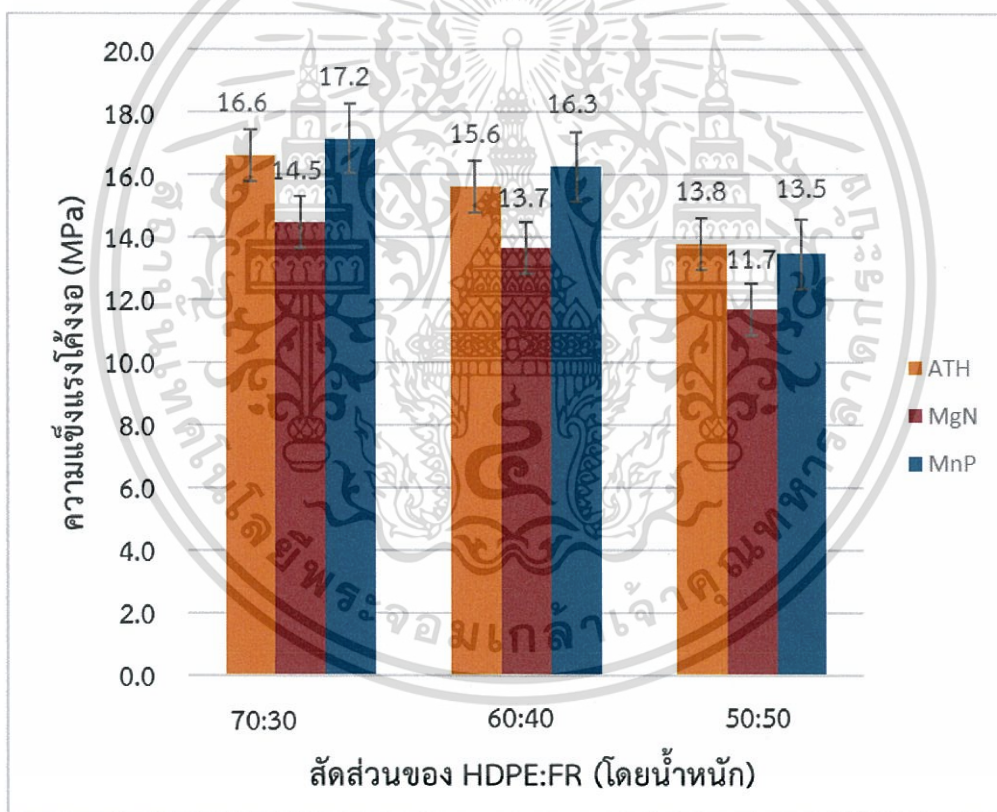
รูปที่ 4.5 ภาพ SEM ที่เตรียมจาก HDPE กับ MnP ในอัตราส่วน 70:30, 60:40 และ 50:50 (โดยน้ำหนัก) ตามลำดับที่กำลังขยาย 300 เท่า (a), (b) และ (c) ที่กำลังขยาย 2000 เท่า (d), (e) และ (f)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

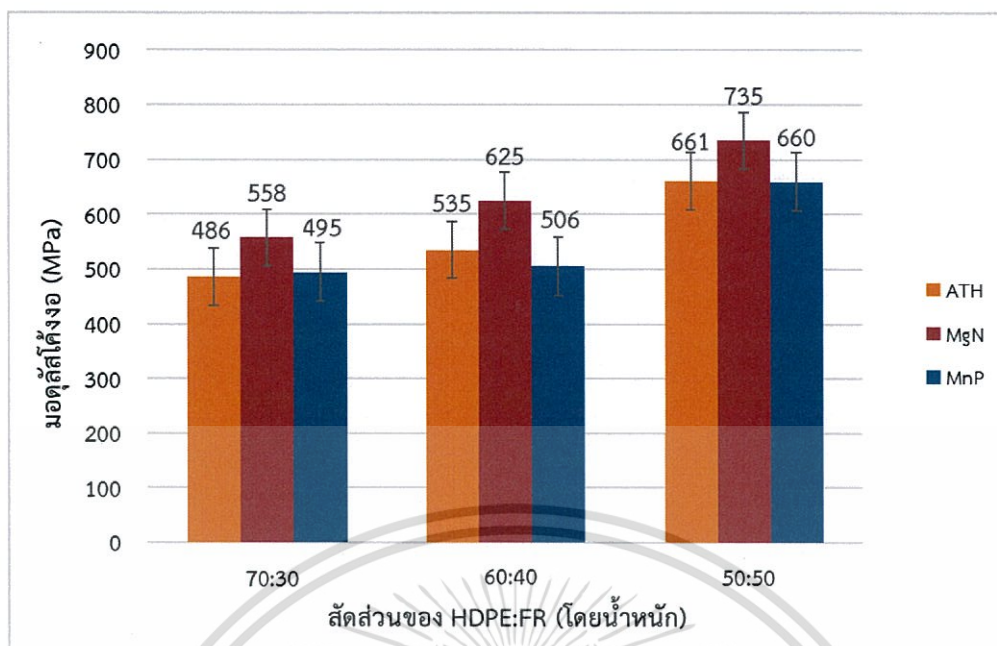
4.4.3 ศึกษาสมบัติเชิงกล

1) ความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) และมอดูลัสโค้งงอ (Flexural modulus)

จากรูปที่ 4.6 แสดงค่าความแข็งแรงโค้งงอของ HDPE เมื่อผสมกับ FR ในอัตราส่วน (โดยน้ำหนัก) ที่แตกต่างกัน เมื่อเพิ่มปริมาณสารหน่วงไฟ พบว่าค่าความแข็งแรงโค้งงอมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากสารหน่วงไฟได้เข้าไปกระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์ ทำให้เมื่อพอลิเมอร์ได้รับแรงกระทำ จะทำให้การส่งผ่านแรงหยุดชะงัก เกิดเป็นความเค้นตกค้าง ทำให้พอลิเมอร์เสียหายได้ง่ายขึ้น โดยเมื่อทำการศึกษาพื้นฐานวิทยาพบว่า การกระจายตัวของ HDPE:FR ในอัตราส่วน 50:50 มีการเกาะกลุ่มกันของสารหน่วงไฟ ทำให้เกิดเป็นข้อบกพร่องในชิ้นงาน จึงทำให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอในอัตราส่วน 50:50 แตกต่างจากอัตราส่วน 70:30 และ 60:40 อย่างเห็นได้ชัด โดยที่ค่าความแข็งแรงโค้งงอในอัตราส่วน 70:30 และ 60:40 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามค่ามอดูลัสโค้งงอมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากสารหน่วงไฟเป็นอนุภาคของแข็งที่ผสมลงในพอลิเมอร์ ดังนั้นเมื่อได้รับแรงกระทำจึงทำให้พอลิเมอร์เกิดการต้านการเสียรูปมากขึ้น แสดงดังรูป 4.7



รูปที่ 4.6 ความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) ของ HDPE:FR ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.7 มอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus) ของ HDPE:FR ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

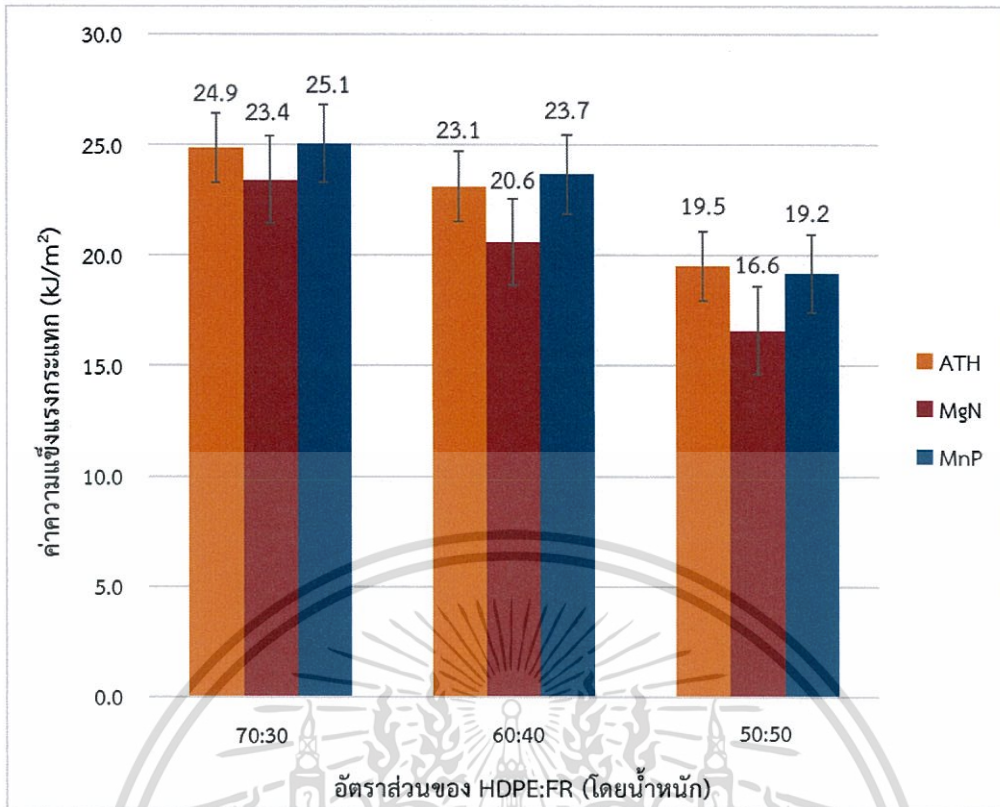
2) ความทนต่อแรงกระแทก (Impact strength)

จากรูปที่ 4.8 แสดงค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ของ HDPE:FR ในอัตราส่วน (โดยน้ำหนัก) ที่แตกต่างกัน เมื่อเพิ่มปริมาณสารหน่วงไฟ ทำให้ค่าความแข็งแรงกระแทกมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการกระจายตัวของ FR ในพอลิเมอร์ปริมาณมากนั้น ทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องในการส่งผ่านแรงเมื่อวัสดุได้รับแรงกระแทก จึงส่งผลให้ค่าความแข็งแรงกระแทกมีแนวโน้มลดลง

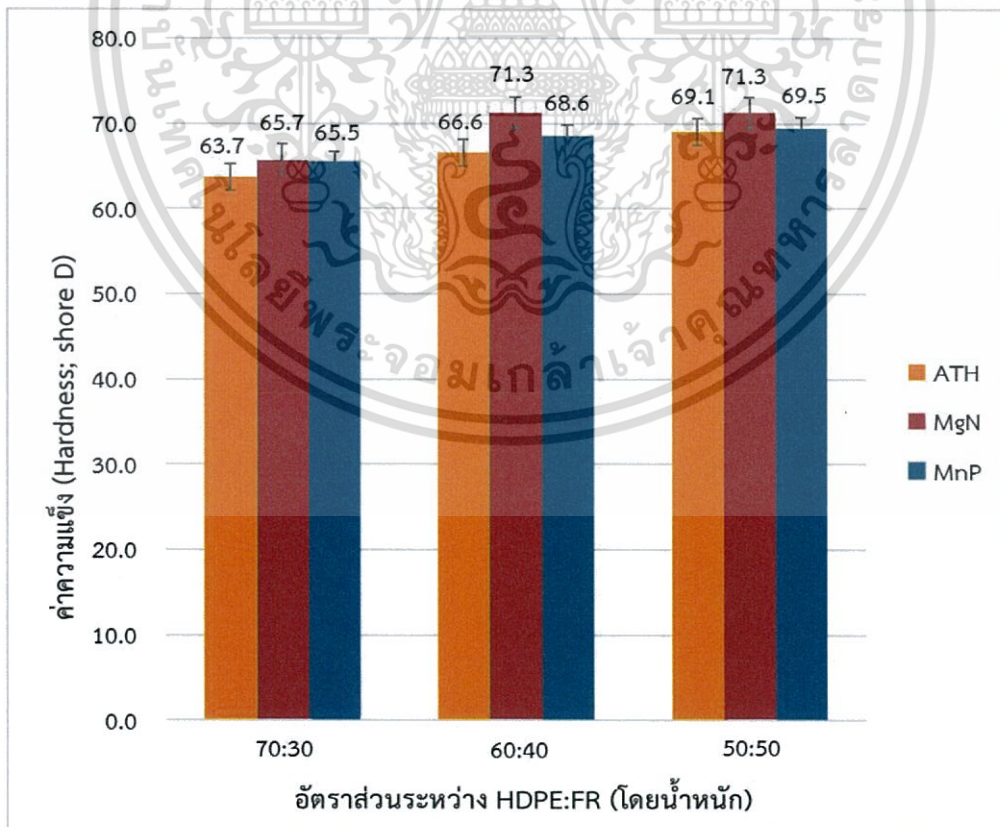
เมื่อเปรียบเทียบ FR ที่อัตราส่วนเดียวกัน พบว่า MgN มีค่าความทนต่อแรงกระแทกน้อยกว่า MnP และ ATH เนื่องจาก MgN มีผลึกจำนวนมาก ทำให้ชิ้นงานแข็ง จึงรับแรงกระแทกได้น้อยกว่า โดยที่ MnP และ ATH ให้ผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถยืนยันผลได้จาก DSC

3) ความแข็ง (Hardness)

จากรูปที่ 4.9 แสดงค่าความแข็งของ HDPE เมื่อผสมกับ FR ในอัตราส่วน (โดยน้ำหนัก) ที่แตกต่างกัน พบว่าปริมาณของสารหน่วงไฟส่งผลต่อค่าความแข็งที่ผิวชิ้นงาน โดยการเพิ่มปริมาณสารหน่วงไฟ จะทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารหน่วงไฟเป็นอนุภาคของแข็ง และเมื่อเปรียบเทียบในอัตราส่วนเดียวกัน พบว่า MgN มีค่าความแข็งที่ผิวมากกว่า MnP และ ATH เนื่องจากองค์ประกอบเป็นผลึกของ MgN มีค่ามากที่สุด ทำให้มีการเกิดผลึกมาก วัสดุจึงมีลักษณะแข็ง ซึ่งสามารถยืนยันได้จาก DSC



รูปที่ 4.8 ค่าความแข็งแรงกระแทกของ HDPE:FR ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.9 ความแข็ง (Hardness) ของ HDPE:FR ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 วิเคราะห์ต้นทุน

จากตารางที่ 4.10 แสดงการวิเคราะห์ต้นทุนของสารหน่วงไฟที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นเปรียบเทียบกับสารหน่วงไฟที่ใช้ในอุตสาหกรรม (ATH) พบว่าสารหน่วงไฟที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นทั้งหมดนั้นมีราคาถูกกว่า ATH โดยสารหน่วงไฟที่มีราคาถูกที่สุด คือ CaN

ตารางที่ 4.10 ต้นทุนสารหน่วงไฟที่สังเคราะห์ขึ้นเทียบกับราคา ATH

สารเคมี	ราคา (บาท/กิโลกรัม)
ATH	87.0
CaN	18.2
MgN	44.1
MgH	66.8
MgP	49.9
MnP	62.6
ZnP	65.9

หมายเหตุ : ราคาต้นทุนแบบประมาณการผลิตเชิงพาณิชย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการสังเคราะห์สารหน่วงไฟประเภทโลหะฟอสเฟต เพื่อหาสารหน่วงไฟที่มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟดีที่สุดในระบบเดี่ยวและศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารหน่วงไฟที่ส่งผลต่อสมบัติต่างๆ เช่น สมบัติเชิงกล, สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางความร้อน เป็นต้น สามารถสรุปได้ดังนี้

ตอนที่ 1 สังเคราะห์สารประกอบโลหะประเภทฟอสเฟต

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์โลหะฟอสเฟต จำนวน 6 ชนิด ได้แก่ CaN, MgN, MgH, MgP, MnP และ ZnP ด้วยวิธีการตกตะกอน พบว่าสามารถทำการสังเคราะห์ได้จริง ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR, XRD และ TGA

ตอนที่ 2 การศึกษาสารประกอบโลหะประเภทฟอสเฟตชนิดต่างๆ ที่มีผลต่อการหน่วงไฟ

เมื่อนำ HDPE มาผสมกับสารหน่วงไฟที่สังเคราะห์ขึ้นทั้ง 6 ชนิด เพื่อเปรียบเทียบกับ ATH ในอัตราส่วน 70:30 (โดยน้ำหนัก) แล้วทดสอบประสิทธิภาพการหน่วงไฟตามมาตรฐาน UL-94 พบว่าสารที่สังเคราะห์ขึ้นทั้ง 6 ชนิด มีอัตราการลามไฟสูงกว่า ATH อย่างไรก็ตาม MgN มีอัตราการลามไฟที่ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารที่สังเคราะห์ขึ้น และพบว่า MnP มีสมบัติด้านการหยุดตัวของพลาสติกเมื่อได้รับความร้อน ถึงแม้ว่าจะมีอัตราการลามไฟสูงกว่า MgN

ตอนที่ 3 ผลของอัตราส่วนของ HDPE ต่อสารประกอบโลหะประเภทฟอสเฟต

ทำการเลือก MgN และ MnP มาศึกษาปริมาณของสารหน่วงไฟที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการลามไฟเมื่อเปรียบเทียบกับ ATH โดยปรับอัตราส่วน FR เป็น 60:40 และ 50:50 (โดยน้ำหนัก) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารหน่วงไฟ จะทำให้อัตราการลามไฟลดลงและมีค่า LOI ที่สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราส่วนเดียวกัน MgN และ MnP มีอัตราการลามไฟสูงกว่า ATH โดยที่อัตราส่วน 50:50 (โดยน้ำหนัก) ของ ATH ให้ผลเป็น V_0 นั่นคือสามารถดับไฟได้ภายใน 10 วินาที และมีค่า LOI เท่ากับ 22% ในขณะที่ MnP มีอัตราการลามไฟเท่ากับ 14.5 mm/min และมีค่า LOI เท่ากับ 20% ซึ่งมีอัตราการลามไฟที่ต่ำกว่า MgN โดยมีอัตราการลามไฟเท่ากับ 18.8 mm/min และมีค่า LOI เท่ากับ 19%

การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA พบว่า MgN มีการสลายตัว 1 ช่วง ที่อุณหภูมิ 68-124 °C และ MnP เกิดการสลายตัว 2 ช่วง คือ 57-116 °C และช่วง 116-782 °C เมื่อศึกษาเสถียรภาพทางความร้อน HDPE:FR พบว่าเพิ่มปริมาณสารหน่วงไฟใน HDPE จะทำให้เอนทัลปี และ X_c มีแนวโน้มลดลง เมื่อเทียบกับ HDPE (pure)

ตอนที่ 4 การศึกษาสมบัติต่างๆของ HDPE เมื่อผสมสารหน่วงไฟ

การศึกษาสมบัติทางกายภาพ ค่าความหนาแน่นของ FR พบว่าค่าความหนาแน่นของ ATH, MgN, CaN, MgH, MgP, MnP และ ZnP เป็น 2.4, 1.8, 1.9, 2.0, 1.8, 2.2 และ 3.8 ตามลำดับ

จากการศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่า FR ที่ผสมกับ HDPE ที่อัตราส่วน 70:30 (โดยน้ำหนัก) มีการยึดเกาะที่ดีกว่าอัตราส่วนอื่น เนื่องจากไม่พบหลุมหรือช่องว่างของอนุภาคของ FR

เมื่อศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ FR ส่งผลให้ความแข็งแรงโค้งงอ และค่าความทนต่อแรงกระแทกมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่มอดุลัสโค้งงอมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อนำไปทดสอบความแข็งแบบ Shore D พบว่า MgN มีค่าความแข็งที่ผิวมากกว่า MnP และ ATH ตามลำดับ

จากการทดลอง พบว่าประสิทธิภาพของสารหน่วงไฟ ขึ้นกับปัจจัยหลายประการ เช่น องค์ประกอบของสารหน่วงไฟ, ปริมาณน้ำในโครงสร้าง และสมบัติด้านการหดตัว เป็นต้น โดยที่องค์ประกอบของสารหน่วงไฟ เป็นส่วนสำคัญในการสร้างชั้นเถ้าขึ้นมาปกคลุมที่พื้นผิวพอลิเมอร์ และจะต้องทำหน้าที่ปลดปล่อยน้ำในโครงสร้างอีกด้วย เพื่อให้อนุกรมิมของระบบลดลง ดังนั้นสารหน่วงไฟที่มีแอมโมเนียม, ฟอสเฟต และมีปริมาณน้ำในโครงสร้างมาก จะทำให้ประสิทธิภาพการหน่วงไฟดียิ่งขึ้น สอดคล้องกับ MgN

อย่างไรก็ตามเมื่อทำการศึกษาพบว่า MnP มีสมบัติด้านการหดตัวของพลาสติก ทำให้การลุกลามของเปลวไฟลดลง และเมื่อเปรียบเทียบกับ ATH พบว่าสารหน่วงไฟที่สังเคราะห์ขึ้นมีประสิทธิภาพการหน่วงไฟดีอกว่าไม่มากนัก มีความหนาแน่นต่ำ ราคาถูก และมีสมบัติด้านการหดตัวของพลาสติก ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ในอุตสาหกรรมในอนาคต

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรใส่สารช่วยผสม ให้สารหน่วงไฟไม่จับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน
2. ค้นหาวีธีเพิ่มประสิทธิภาพการหน่วงไฟของสารหน่วงไฟ เช่น ใช้ระบบ Intumescent หรือใช้โลหะฟอสเฟตแบบผสม เป็นต้น
3. ค้นหาวัดจากธรรมชาติมาสังเคราะห์สารหน่วงไฟ เช่น เปลือกไข่

เอกสารอ้างอิง

- [1] Shareyouressays.net. 2016. 3 8 8 words short essay on A House on Fire. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.shareyouressays.com/1344/388-words-short-essay-on-a-house-on-fire>.
- [2] Mainland High School. 2560. Properties of plastic. [Online]. Available : <http://mainland.cctt.org/istf2010/Plastic.asp>.
- [3] พรพรรณ หนูสวัสดิ์. 2555. สารหน่วงการติดไฟสำหรับวัสดุพอลิเมอร์. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.ftiplastic.com/images/download/122/%E0%B8%89%E0%B8%9A%E0%B8%B1%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%88%2058%2016%20%E0%B8%95.%E0%B8%84.55.pdf>.
- [4] J.M. Huber Corporation. 2015. Alumina Trihydrate (ATH). [Online]. Available : [https://www.hubermaterials.com/userfiles/files/PFDocs/Huber's%20Alumina%20Trihydrate%20\(ATH\)%20A%20Versatile%20Pigment%20for%20Coatings,%20Inks,%20Adhesives,%20Caulks%20and%20Sealants%20Applications.pdf](https://www.hubermaterials.com/userfiles/files/PFDocs/Huber's%20Alumina%20Trihydrate%20(ATH)%20A%20Versatile%20Pigment%20for%20Coatings,%20Inks,%20Adhesives,%20Caulks%20and%20Sealants%20Applications.pdf).
- [5] ณัฐนันท รักตะขบ และคณะ. 2558. “การศึกษาสารหน่วงไฟระบบเดี่ยวและระบบอินตุมเอสเซนต์จากเปลือกหอยแมลงภู่.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] Integrating Global Trade Leads. 2560. Color masterbatch for molding products. [Online]. Available : http://www.weiku.com/products/9290046/Color_masterbatch_for_molding_products.html.
- [7] บริษัท อนุสรณ์ เบสเชฟ จำกัด. 2017. มาตรฐานและเกร็ดความรู้. [Online]. เข้าถึงได้จาก : http://www.thaippe.com/index.php?page=shop.browse&category_id=629&option=coc_virtuemart&Itemid=49.html.
- [8] กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2548. คู่มือการป้องกันและระงับอัคคีภัยในโรงงานอุตสาหกรรม โรงงานผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติก และโฟม. กรุงเทพมหานคร : ไพร์เทค อินโนเวชั่น.
- [9] Menahem Lewin and Edward D Weil. 2001. “Mechanisms and modes of action in flame retardancy of polymers.” Page 31-62. in A R Horrocks and D price. **Fire retardant materials**. Cambridge : Woodhead publishing.
- [10] Sergio Bocchini and Giovanni Camino. 2010. “Halogen-containing flame retardants.” Page 75-105. in Charles.A. Wikie and Alexander B. Morgan. **Fire retardancy of polymeric materials**. Boca Raton : Taylor & Francis Group.
- [11] Zuhair Ameer and Diyar Habbeeb. 2016. “Production Nanoparticles by Chemical Precipitation for Use as Flame Retardant of PVC.” *Australian journal of basic and applied sciences*. 2016(10) : 167-176.
- [12] Martin Marietta Magnesia Specialties LLC. n.d. **Overview of Flame Retardants Including Magnesium Hydroxide**. Maryland : n.p.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] มนตรี ทองคำ และบรรจง บุญชม. 2556. การสังเคราะห์และศึกษาจลนพลศาสตร์ของตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการผลิตพลังงานเชื้อเพลิงทางเลือก. [Online]. เข้าถึงได้จาก : http://doi.nrct.go.th/ListDoi/listDetail?Resolve_DOI=10.14457%2FKMITL.res.2013.122.
- [14] Paul Joseph and John R. Ebdon. 2010. "Phosphorus-based flame retardants." Page 107-127. in Charles.A. Wikie and Alexander B. Morgan. **Fire retardancy of polymeric materials**. Boca Raton : Taylor & Francis Group.
- [15] เหมือนหมาย อภินทนาพงศ์. 2550. **Chapter2 Drying**. [Online]. เข้าถึงได้จาก : https://www.slideshare.net/a_muanmai/chapter2-drying.
- [16] G. Kurtulus and A.C. Tas. 2011. "Transformations of neat and heated struvite ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$)." *Materials Letters*. 2011(65) : 2883-2886.
- [17] T. Roncal-Herrero and E.H. Oelkers. 2011. "Experimental determination of struvite dissolution and precipitation rates as a function of pH." *Applied Geochemistry*. 2011(26) : 921-928.
- [18] Yi-qing CHEN *et al.* 2015. "Thermal decomposition of magnesium ammonium phosphate and adsorption properties of its pyrolysis products toward ammonia nitrogen." *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2015(25) : 497-503.
- [19] Lama Nour Aldeen *et al.* 2016. "Synthesis of monocalcium phosphate from the Syrian phosphoric acid and calcium carbonate." *Chemistry and material research*. 2016(8) : 73-77.
- [20] Banjong Boonchom *et al.* 2008. "Nanocrystalline serrabrancaite ($MnPO_4 \cdot H_2O$) prepared by a simple precipitation route at low temperature." *Journal of alloys and compounds*. 2008(454) : 78-82.
- [21] Ping Zhang *et al.* 2009. "Synergistic effect of nanoflaky manganese phosphate on thermal degradation and flame retardant properties of intumescent flame retardant polypropylene system." *Polymer degradation and stability*. 2009(94) : 201-207.
- [22] Kjell Ove Kongshaug *et al.* 2001. "The synthesis and crystal structure of a hydrated magnesium phosphate $Mg_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$." *Solid state sciences*. 2001(3) : 353-359.
- [23] O. Pawling and R. Trettin. 1999. "Synthesis and characterization of α -hopeite, $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$." *Materials research bulletin*. 1999(34) : 1959-1966.
- [24] Sarah Deh *et al.* 2016. "Synergistic effects in the pyrolysis of phosphorus-based flame retardant: The role of Si- and N-based compounds." *Polymer degradation and stability*. 2016(130) : 155-164.
- [25] Sabyasachi Gaan and Gang Sun. 2007. "Effect of phosphorus flame retardants on thermo-oxidative decomposition of cotton." *Polymer degradation and stability*. 2007(92) : 968-974.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [26] กษมา จารุกำจร และ นิธินาถ ศุภกาญจน์. 2555. การปรับปรุงการด้านการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://203.158.6.11:8080/sutir/bitstream/123456789/4611/2/Fulltext.pdf>.
- [27] ASTM international. 2008. **Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of plastics by displacement.** West Conshohocken : n.p.
- [28] นิลุล เพือกบัวขาว. 2550. “สมบัติเชิงกลและสมบัติสัณฐานวิทยาของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปใหม่ โดยมีโซเดียมคาร์บอเนตเป็นสารเติมแต่ง.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [29] ASTM international. n.d. **Standard test methods for flexural properties of unreinforced and. Reinforced plastics and electrical insulating materials.** West Conshohocken : n.p.
- [30] Instron Ltd. n.d. **Flexure Fixture, 3-Point Bend.** [Online]. Available : <http://www.instron.us/en-us/products/testing-accessories/grips/flexure-fixtures/3-4-point-flexure-fixtures/2810-400>.
- [31] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. n.d. การวัดคุณสมบัติความเหนียว (Toughness) ของวัสดุด้วยการทดสอบแรงกระแทก (Impact test). [Online]. Available : <https://www.mtec.or.th/mcu/phml/index.php/th/2014-09-12-03-39-42/45-toughness-impact-test>.
- [32] Presto Group. 2015. **ASTM D256 10E1 for Izod pendulum impact resistance.** [Online]. Available : <http://www.testing-instruments.com/blog/astm-d256-10e1-standard-to-determine-the-izod-pendulum-impact-resistance/>.
- [33] โพรโททริกส์ อินเตอร์เทรต. 2557. **เครื่องวัดความแข็ง Hardness tester meter.** [Online]. Available : <http://xn--22cdalc9e9dm1bc5d8bq6duh2a7hg.com/tag/%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0%B8%B7%E0%B9%88%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B8%A7%E0%B8%B1%E0%B8%94%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B9%81%E0%B8%82%E0%B9%87%E0%B8%87%E0%B8%A2%E0%B8%B2%E0%B8%87/>.
- [34] Polymer Science Learning Center. 2560. **วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์เบื้องต้น.** [Online]. Available : http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/s_muangpil/%E0%B8%84%E0%B8%A1%20441%20%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%88%202%20%E0%B9%82%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0%B8%87%E0%B8%AA%E0%B8%A3%E0%B9%89%E0%B8%B2%E0%B8%87%E0%B9%81%E0%B8%A5%E0%B8%B0%E0%B8%AA%E0%B8%A1%E0%B8%9A%E0%B8%B1%E0%B8%95%E0%B8%B4%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%88%E0%B8%AA%E0%B8%B3%E0%B8%84%E0%B8%B1%E0%B8%8D%E0%B8%82

<http://www.tint.or.th/nkc/nkc51/nkc5102/nkc5102t.html>

- [35] เกศินี เหมวิเชียรและพิริยาร สุวรรณมาลา. 2560. การทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ ตอนที่ 1. [Online]. Available : <http://www0.tint.or.th/nkc/nkc51/nkc5102/nkc5102t.html>.
- [36] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2560. 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>.
- [37] Underwriters Laboratories Inc. (UL). 2560. Test for Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances. [Online]. Available : <http://u.dianyuan.com/bbs/u/38/1139982637.pdf>.
- [38] BASF. 2560. Material testing. [Online]. Available : http://www.plasticsportalasia.net/wa/plasticsEU~en_GB/portal/show/common/content/campaigns/fire_protection/englisch/material.html.
- [39] Anonymous. 2016. Oxygen Index. [Online]. Available : https://www.uclan.ac.uk/about_us/facilities/assets/OXYGEN_INDEX.pdf.
- [40] Intertek. 2560. Oxygen Index ASTM D2863. [Online]. Available : <http://www.intertek.com/polymers/testlopedia/oxygen-index-astm-d2863/>.
- [41] WHA International, Inc. 2560. OXYGEN INDEX (OI). [Online]. Available : http://www.wha-international.com/oxygen_index_oi.php.
- [42] J.Cooke. 2005. Spectroscopy in Inorganic Chemistry (Theory). [Online]. Available : <http://www.chem.ualberta.ca/~inorglab/specttheory.pdf>.
- [43] Ray L. Frost *et al.* 2011. "Raman Spectroscopy of newberyite $Mg(PO_3OH) \cdot 3H_2O$: A cave mineral." *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2011(79) : 1149-1153.
- [44] R.L. Frost *et al.* 2002. "Raman and infrared spectroscopic study of the vivianite-group phosphates vivianite, baricite and bobierite." *Mineralogical Magazine*. 2002(66) : 1063-1073.
- [45] Jian Bong Wang *et al.* 2011 "One-Step Preparation and Characterization of Zing Phosphate Nanocrystals with Modified Surface." *Soft Nanoscience Letters*. 2011(1) : 81-85.
- [46] Banjong Boonchom *et al.* 2009 "Kinetic and thermodynamic studies of $MgHPO_4 \cdot 3H_2O$ by non-isothermal decomposition data." *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2009(98) : 863-871.
- [47] A.aboulkas *et al.* 2010 "Thermal degradation behaviors of polyethylene and polypropylene.Part I: Pyrolysis kinetics and machanisms." *Energy conversion and management*. 2010(51) : 1363-1369.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [48] Y-Z Wang. 2008. **Advances In Fire Retardant Materials.** Cambridge : Woodhead.
- [49] C. A. Murskyl และ R. M. Thompson. n.d. "A Specific Gravity Index For Minerats." *The Canadian Mineralogist.* n.d.(2) : 273-287.



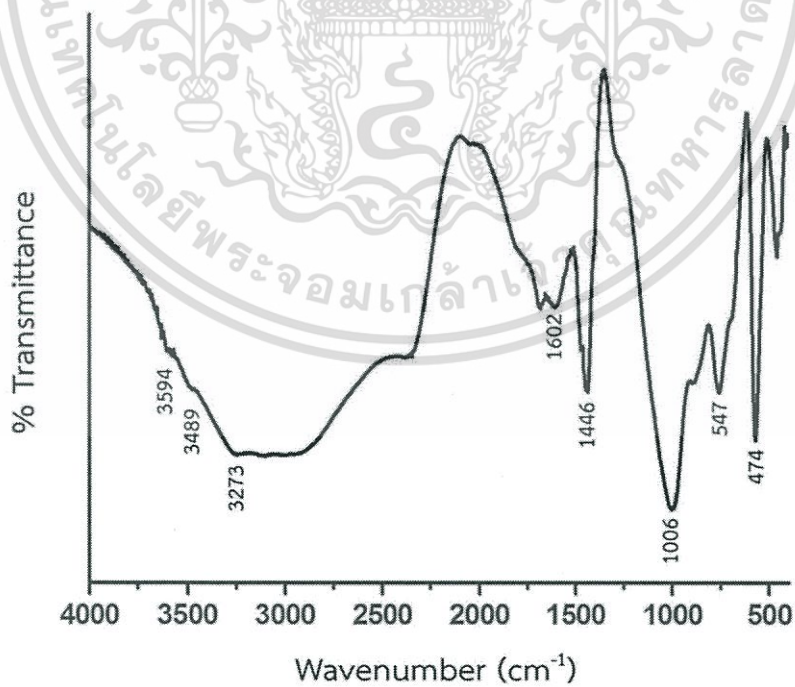
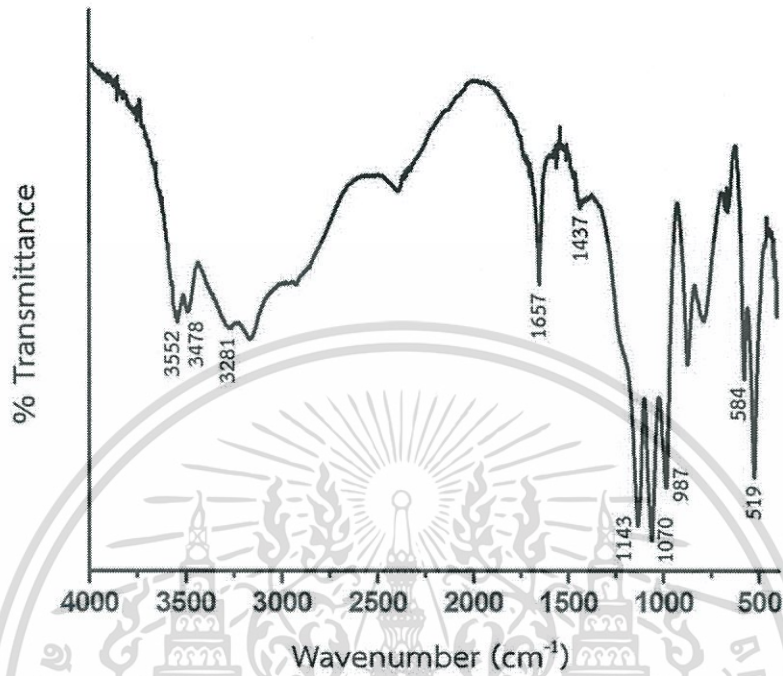
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



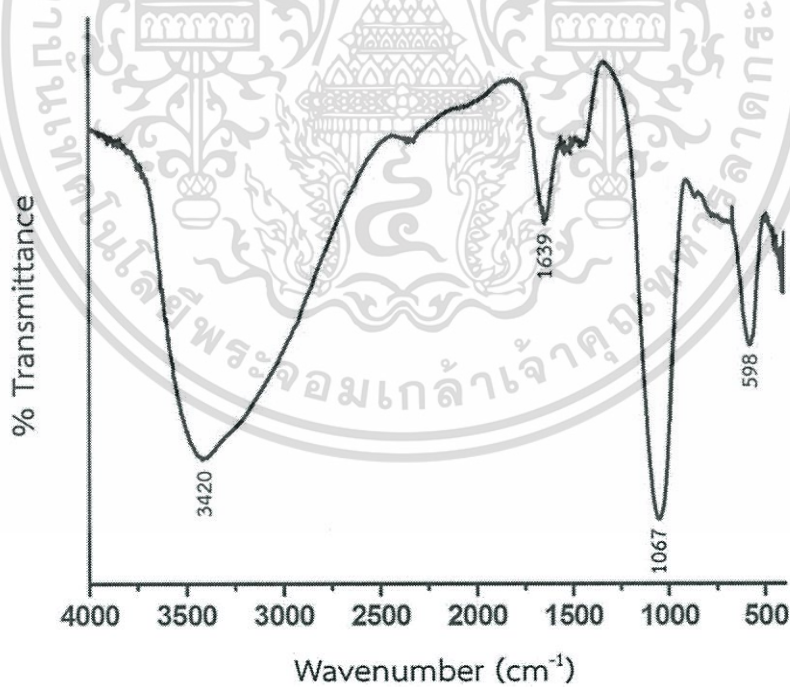
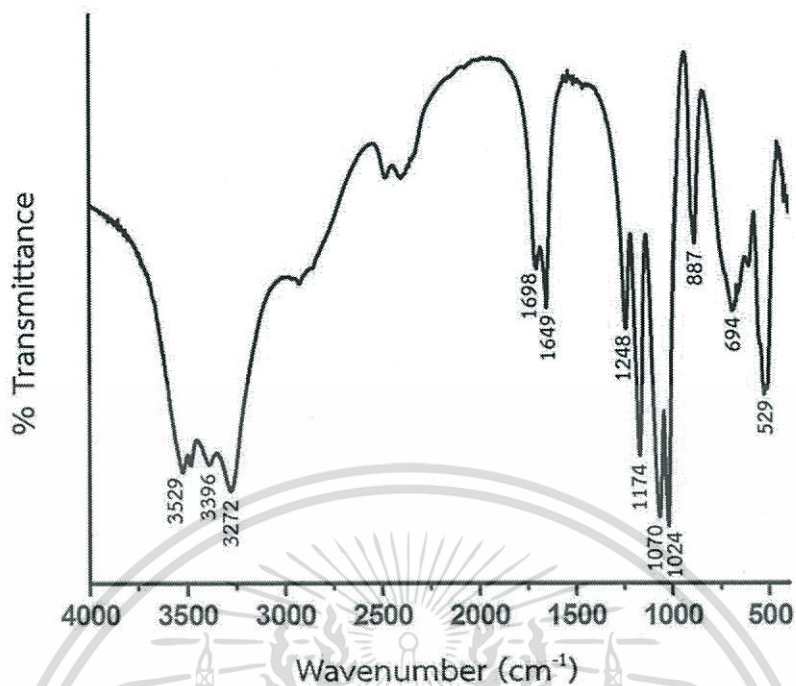
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดยเทคนิค FT-IR

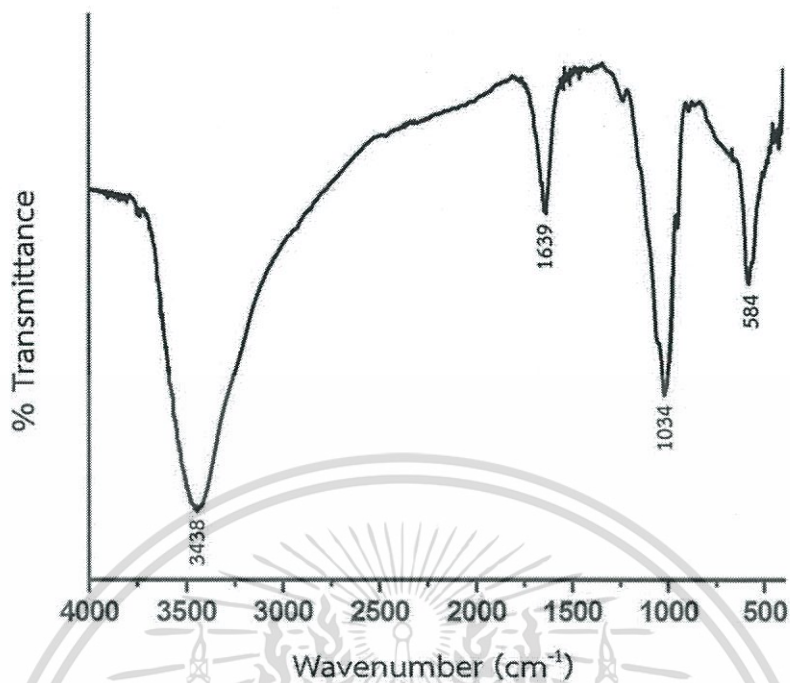


รูปที่ ก-1 และ ก-2 คือกราฟ FT-IR ของ CaN และ MgN ตามลำดับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

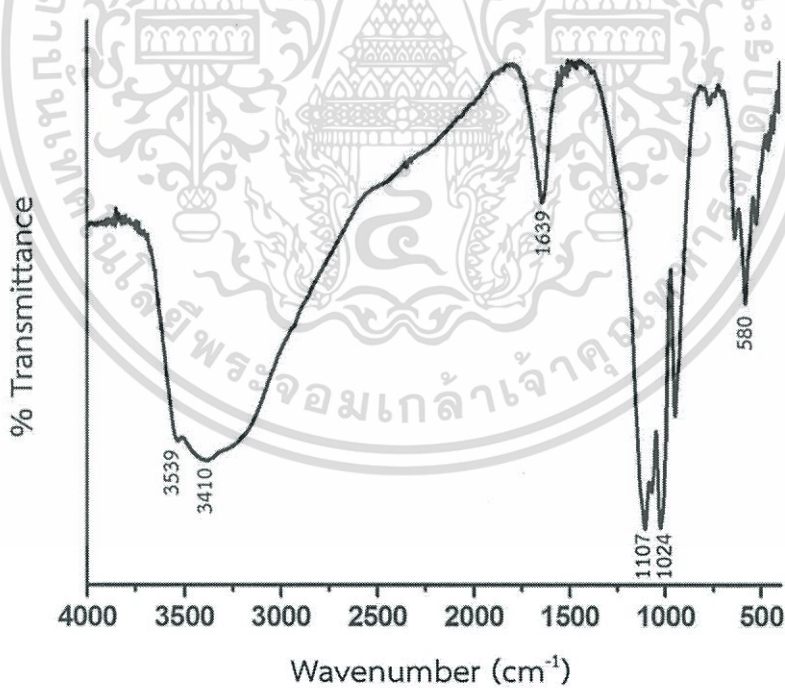


รูปที่ ก-3 และ ก-4 คือกราฟ FT-IR ของ MgH และ MgP ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(5)



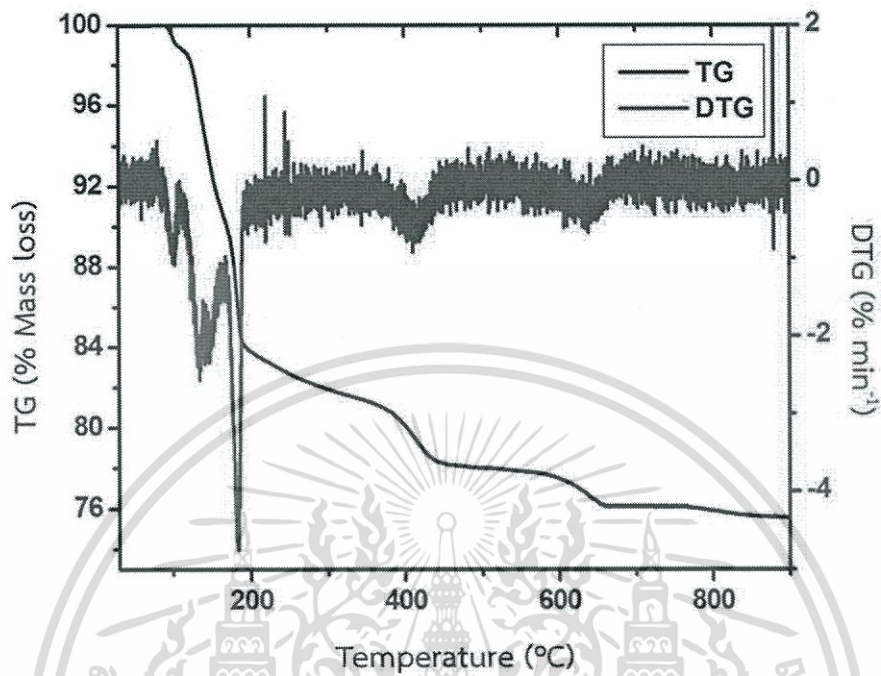
(6)

รูปที่ ก-5 และ ก-6 คือ กราฟ FT-IR ของ MnP และ ZnP ตามลำดับ

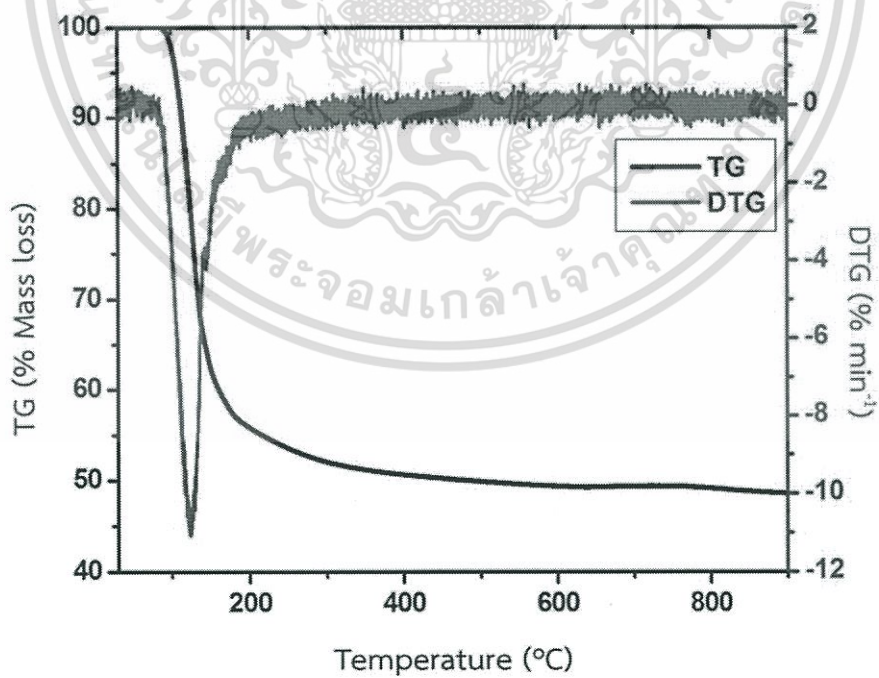
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

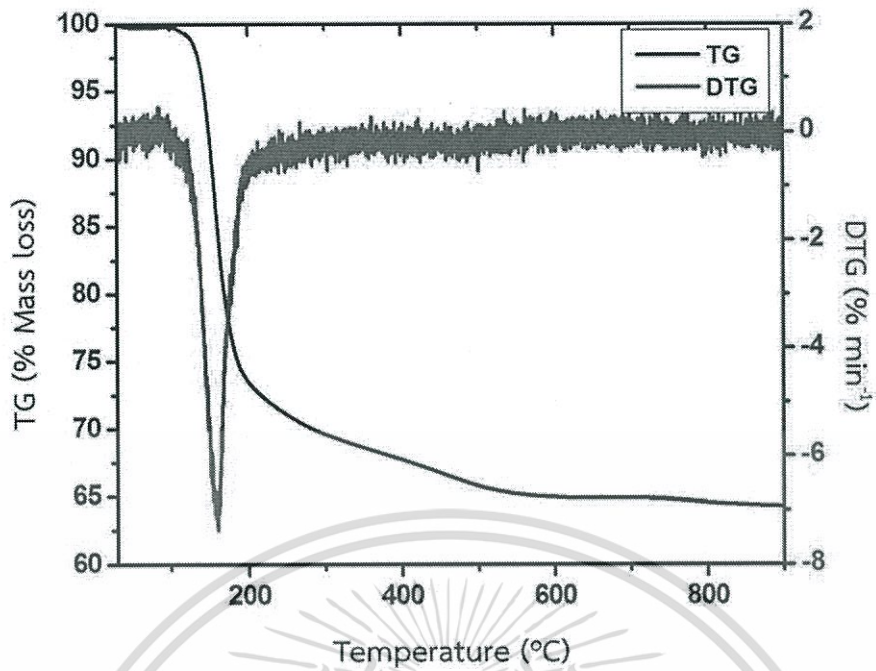


(1)

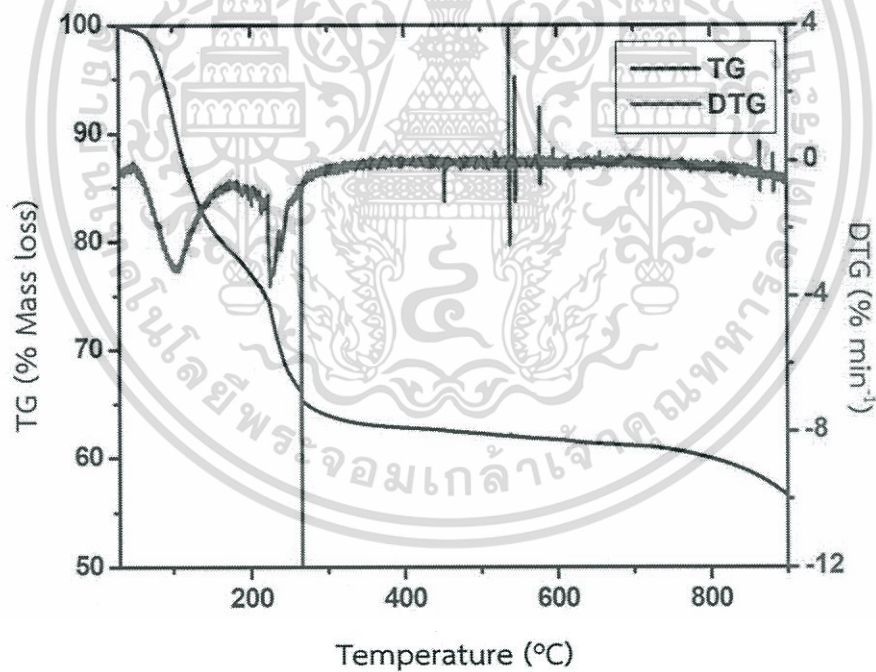


(2)

รูปที่ ข-1 และ ข-2 ภาพการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA ของ CaN และ MgN เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



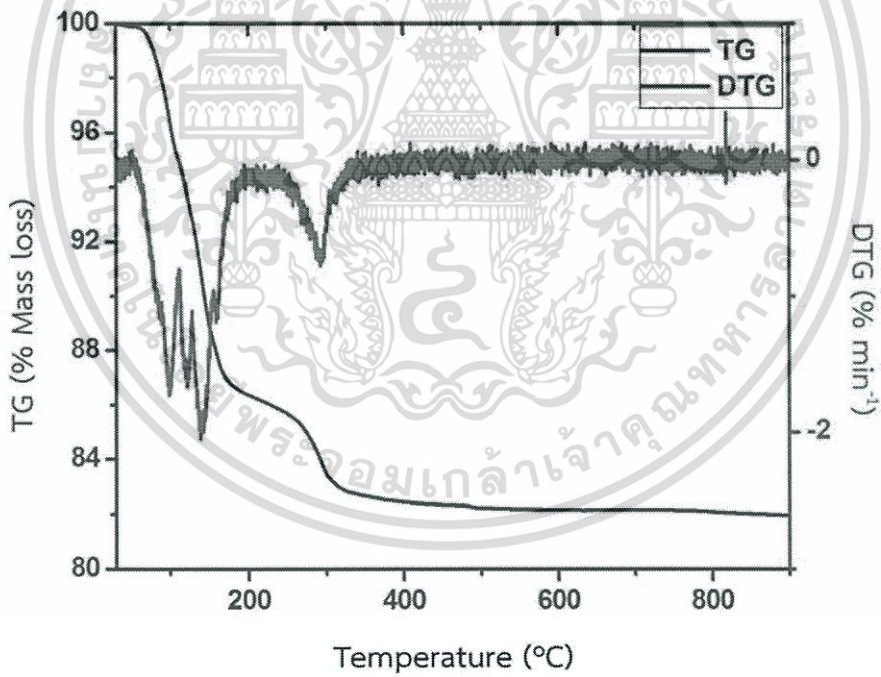
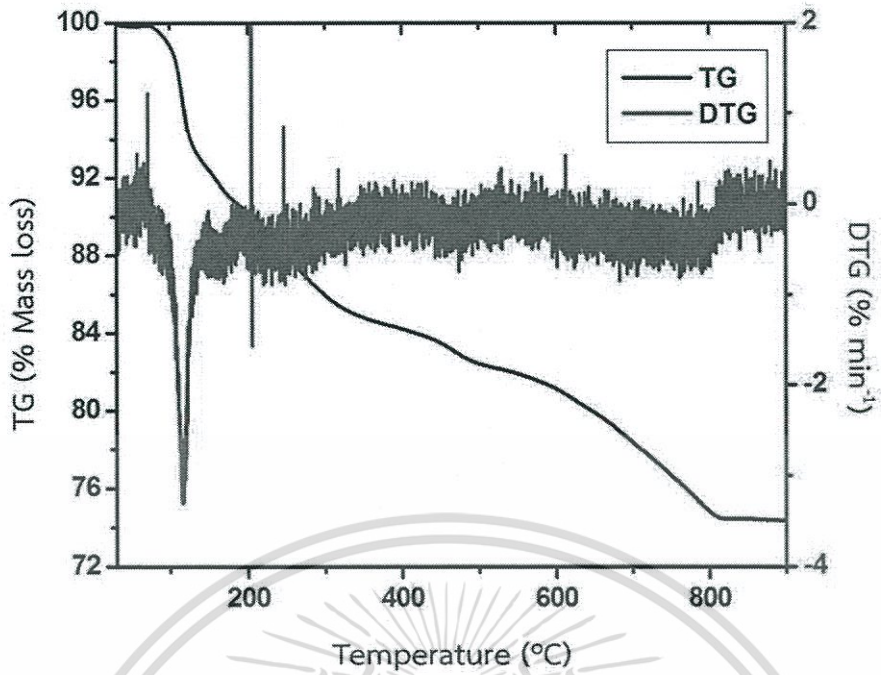
(3)



(4)

รูปที่ ข-3 และ ข-4 ภาพการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA ของ MgH และ MgP ตามลำดับ

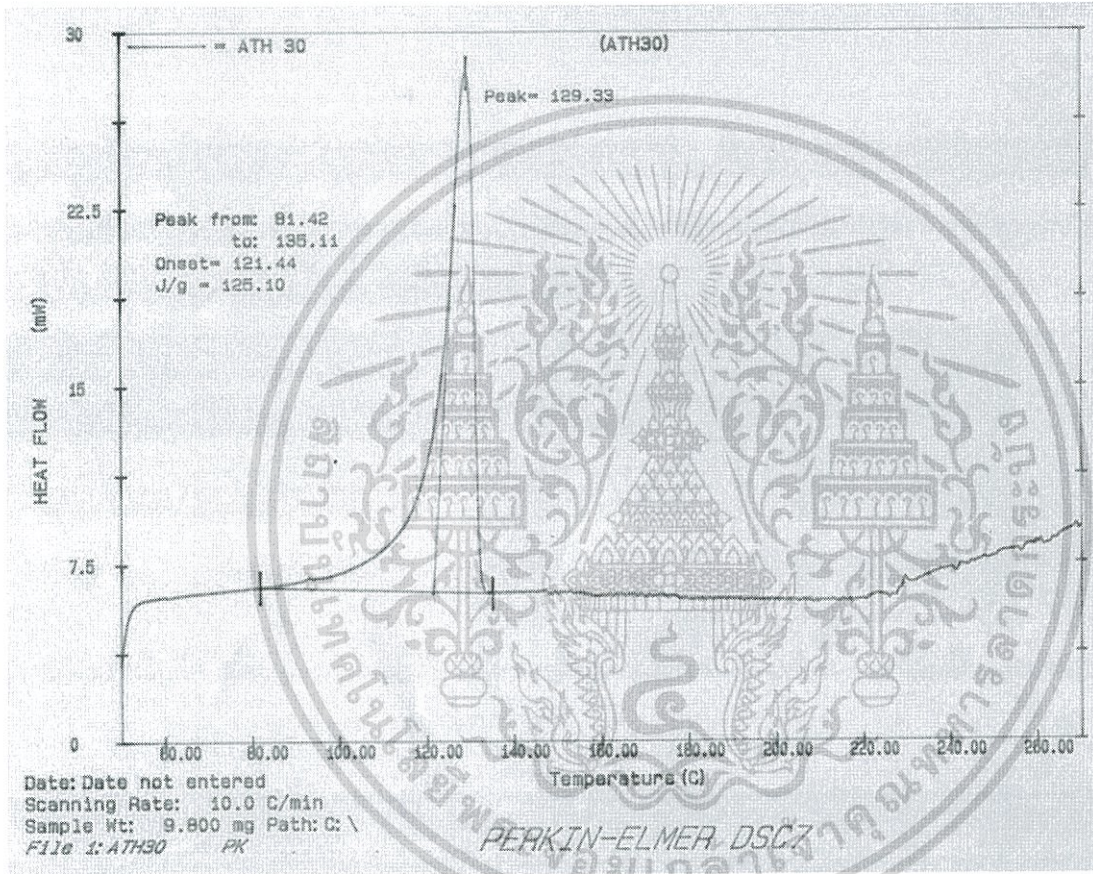
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(6)

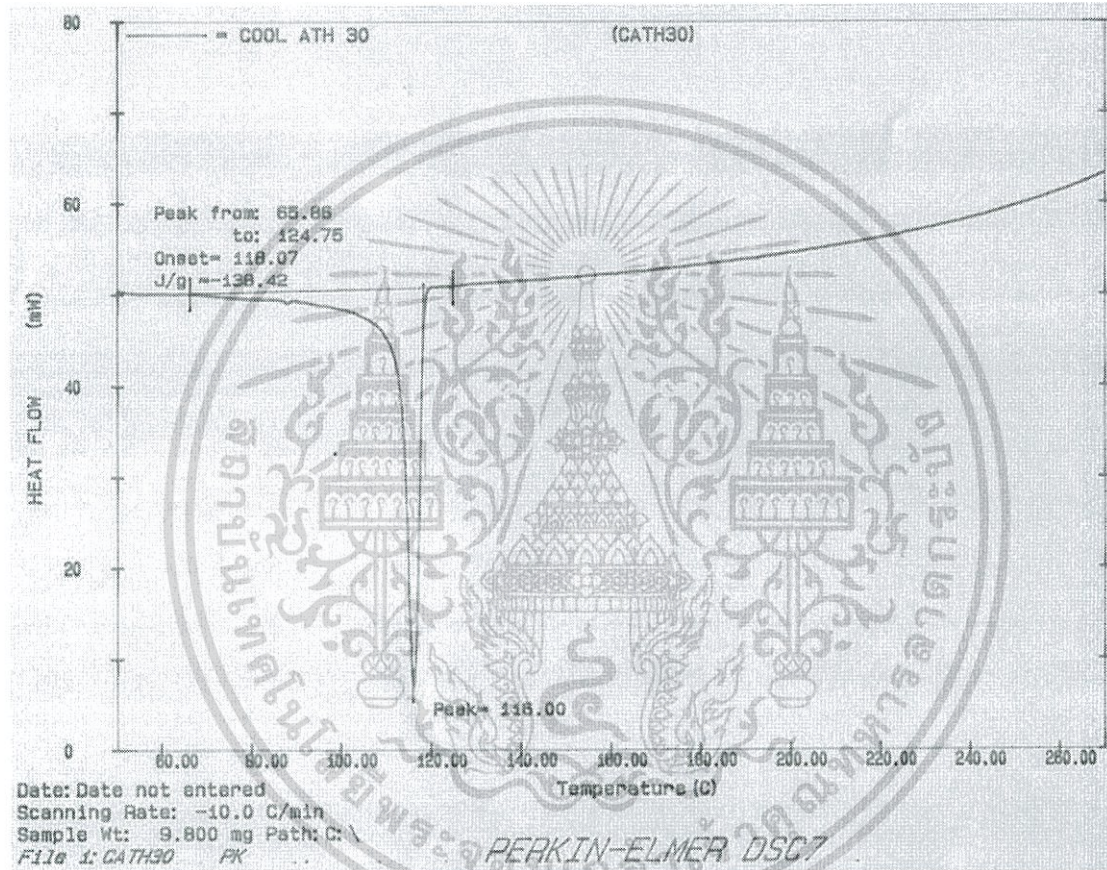
รูปที่ ข-5 และ ข-6 ภาพการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA ของ MnP และ ZnP ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



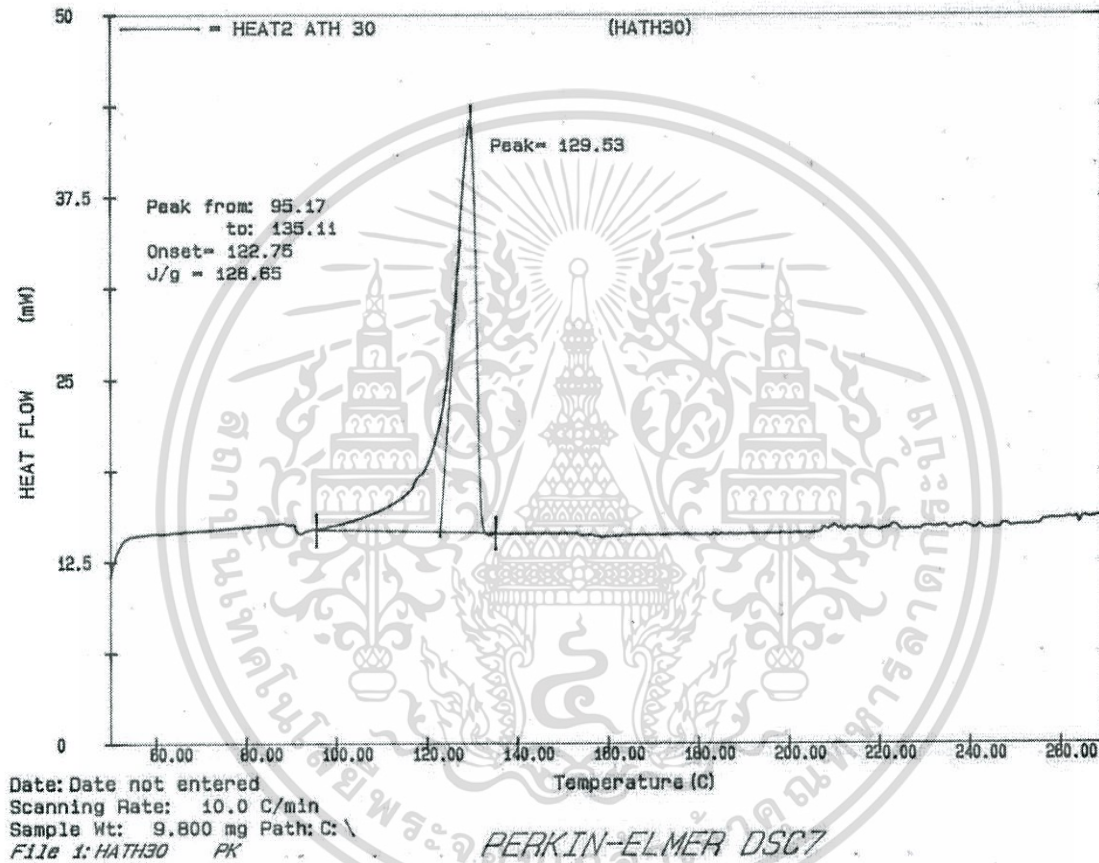
(1)

รูปที่ ค-1 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของ HDPE:ATH ในอัตราส่วน 70:30 (โดยน้ำหนัก) เมื่อให้ความร้อนครั้งที่ 1



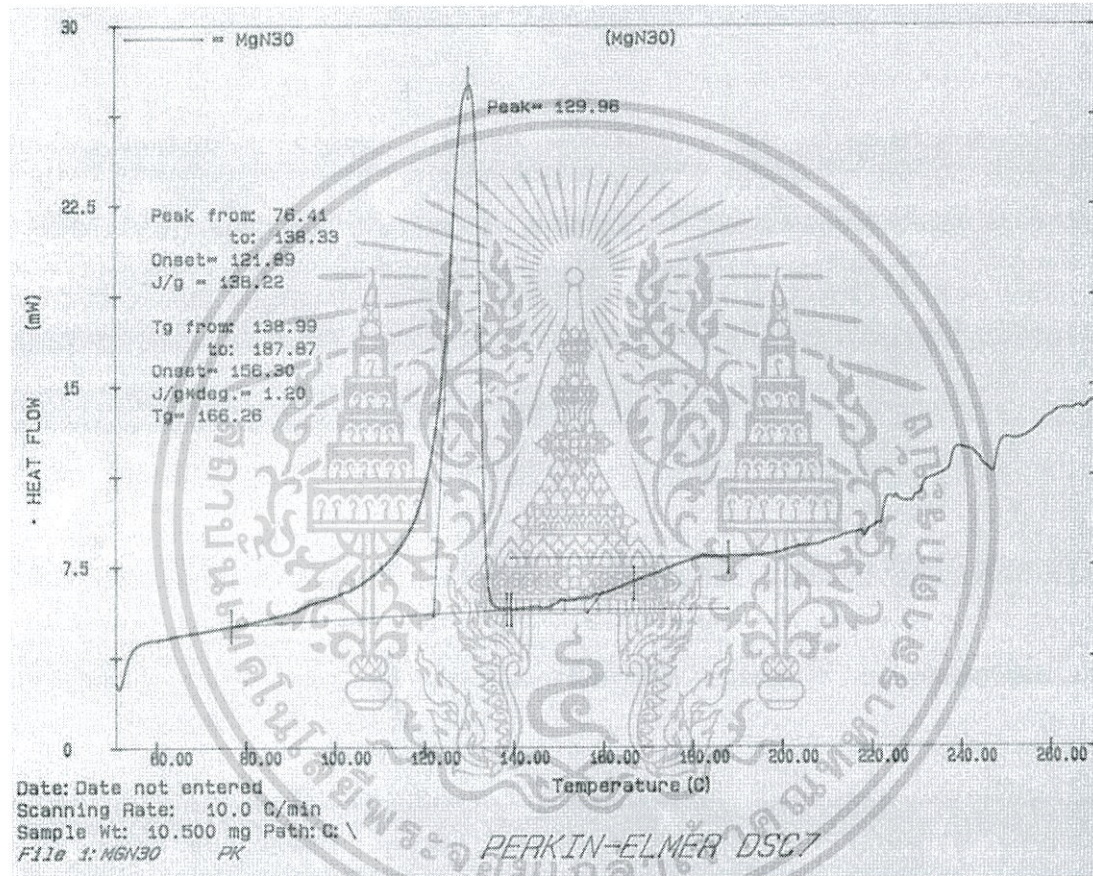
(2)

รูปที่ ค-2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของ HDPE:ATH ในอัตราส่วน 70:30 (โดยน้ำหนัก) เมื่อทำการลดอุณหภูมิ



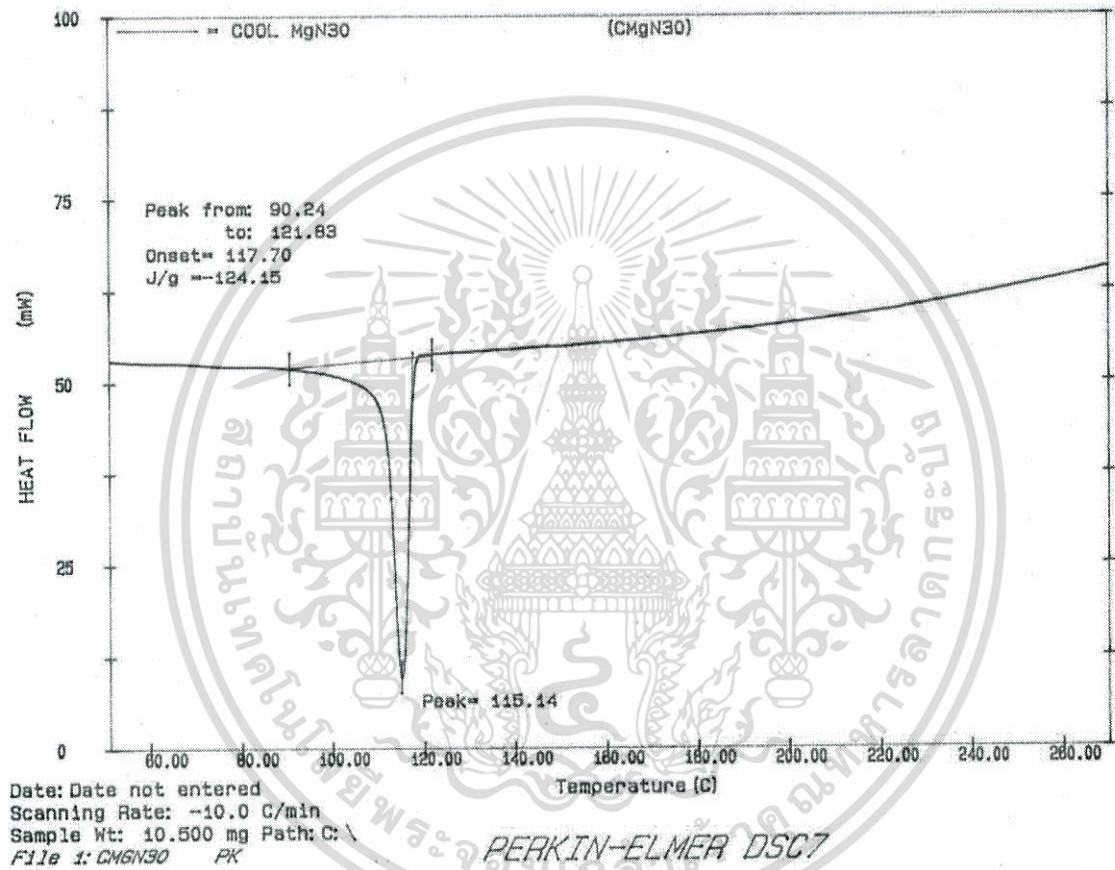
(3)

รูปที่ ค-3 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของ HDPE:ATH ในอัตราส่วน 70:30 (โดยน้ำหนัก) เมื่อให้ความร้อนครั้งที่ 2



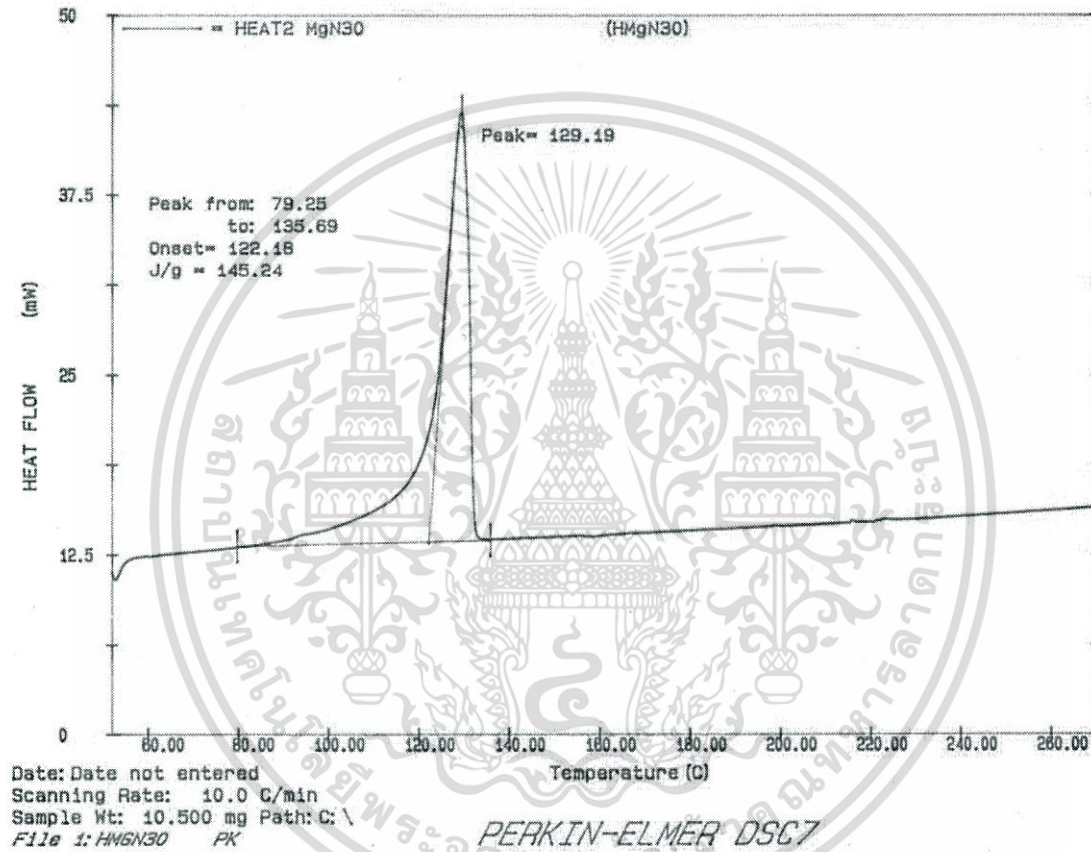
(4)

รูปที่ ค-4 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของ HDPE:MgN ในอัตราส่วน 70:30 (โดยน้ำหนัก) เมื่อให้ความร้อนครั้งที่ 1



(5)

รูปที่ ค-5 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของ HDPE:ATH ในอัตราส่วน 70:30 (โดยน้ำหนัก) เมื่อทำการลดอุณหภูมิ



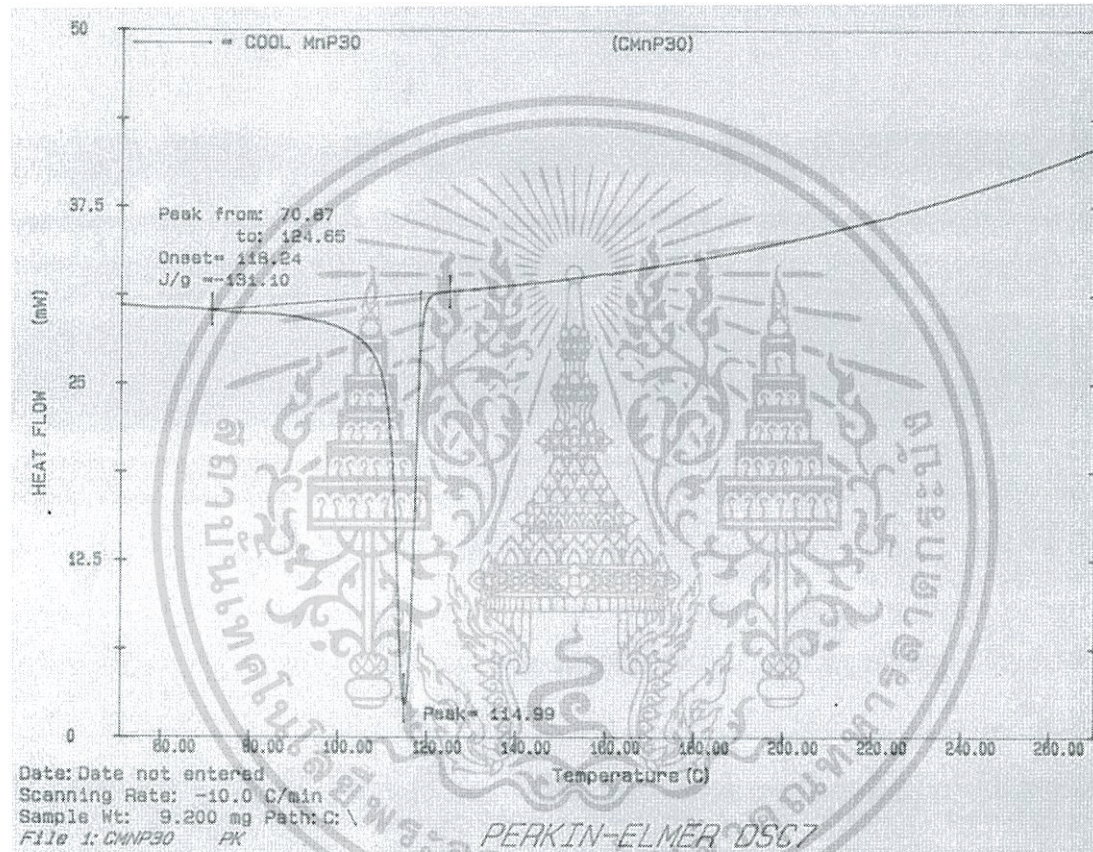
(6)

รูปที่ ค-6 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของ HDPE:MgN ในอัตราส่วน 70:30 (โดยน้ำหนัก) เมื่อให้ความร้อนครั้งที่ 2



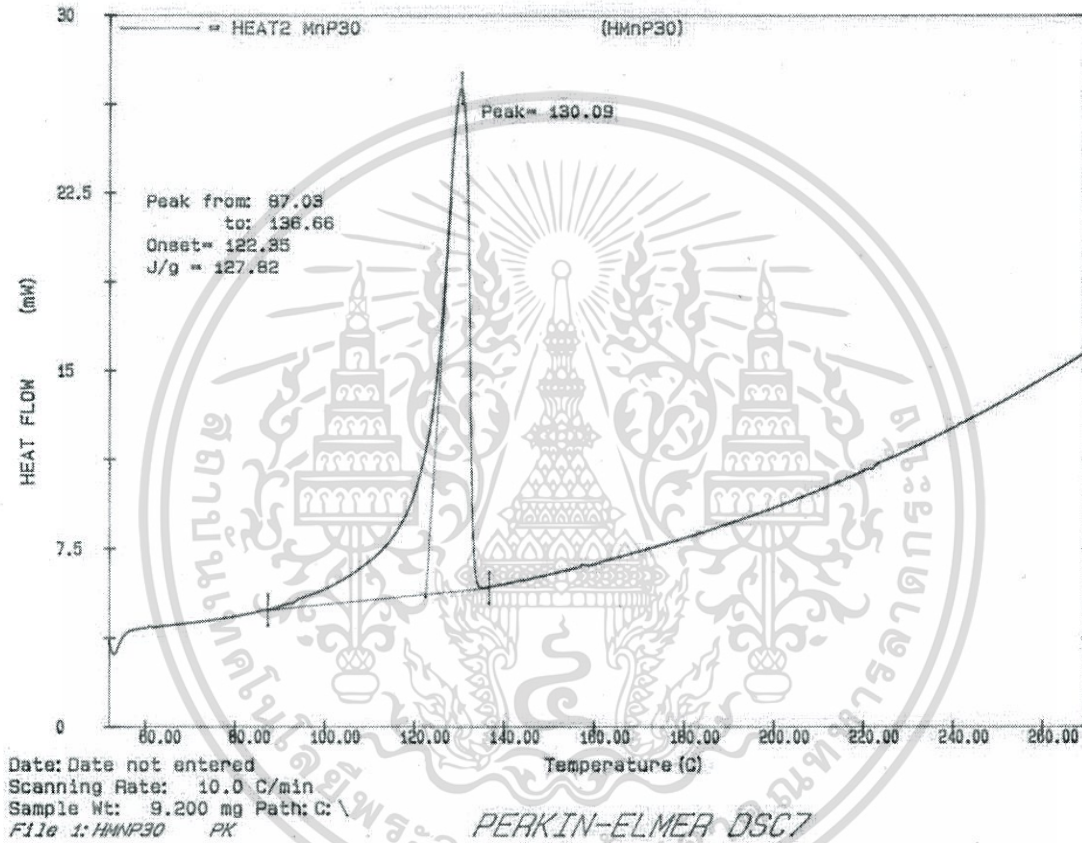
(7)

รูปที่ ค-7 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของ HDPE:MnP ในอัตราส่วน 70:30 (โดยน้ำหนัก) เมื่อให้ความร้อนครั้งที่ 1



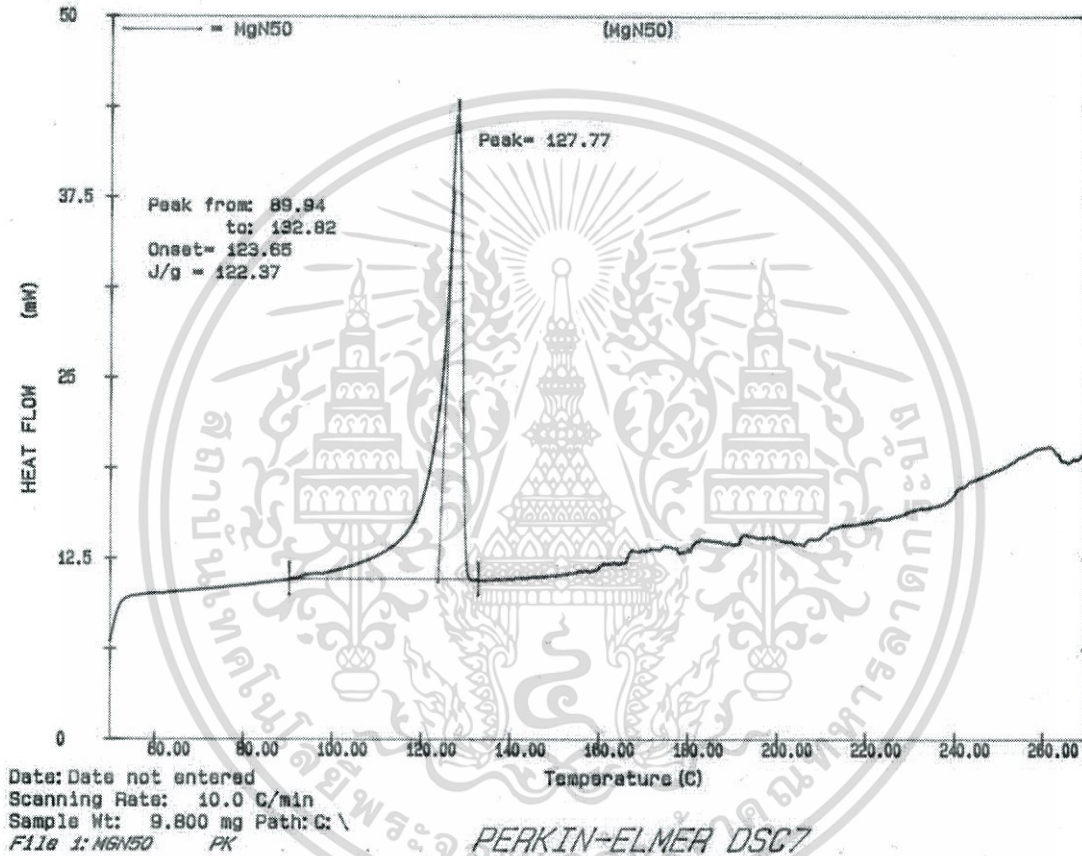
(8)

รูปที่ ค-8 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของ HDPE:MnP ในอัตราส่วน 70:30 (โดยน้ำหนัก) เมื่อทำการลดอุณหภูมิ



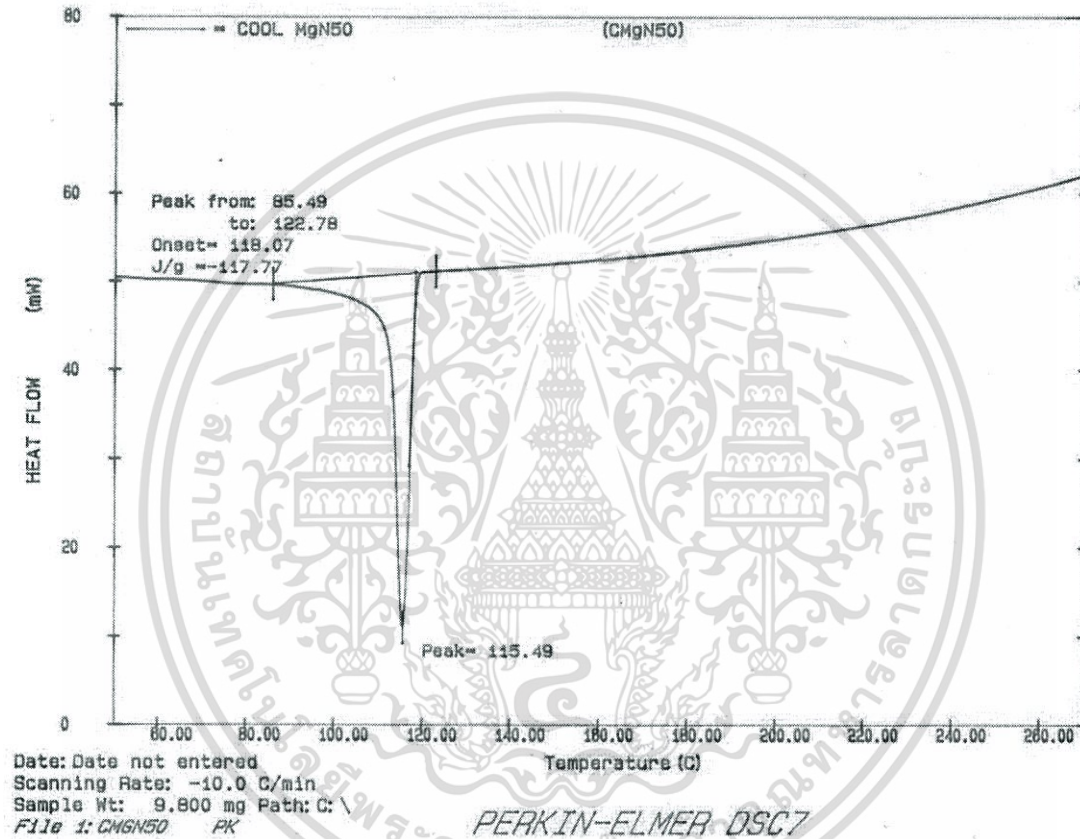
(9)

รูปที่ ค-9 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของ HDPE:MnP ในอัตราส่วน 70:30 (โดยน้ำหนัก) เมื่อให้ความร้อนครั้งที่ 2



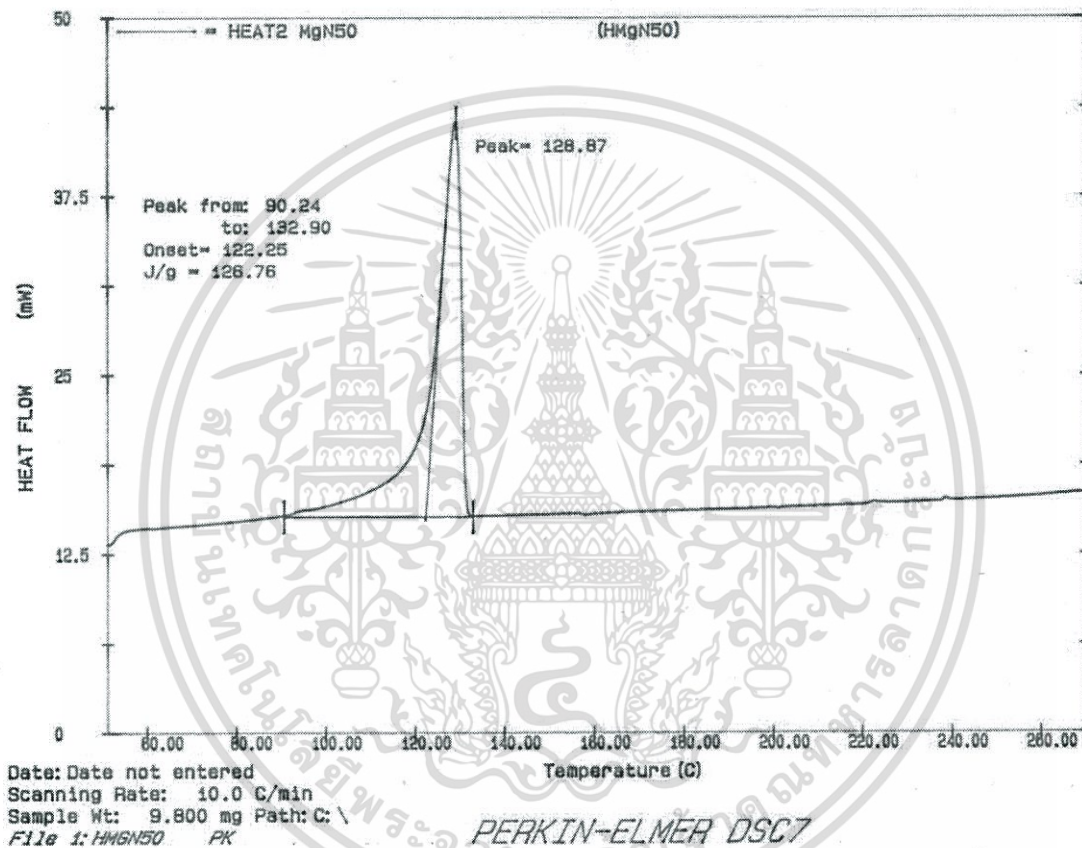
(10)

รูปที่ ค-10 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของ HDPE:MgN ในอัตราส่วน 50:50 (โดยน้ำหนัก) เมื่อให้ความร้อนครั้งที่ 1



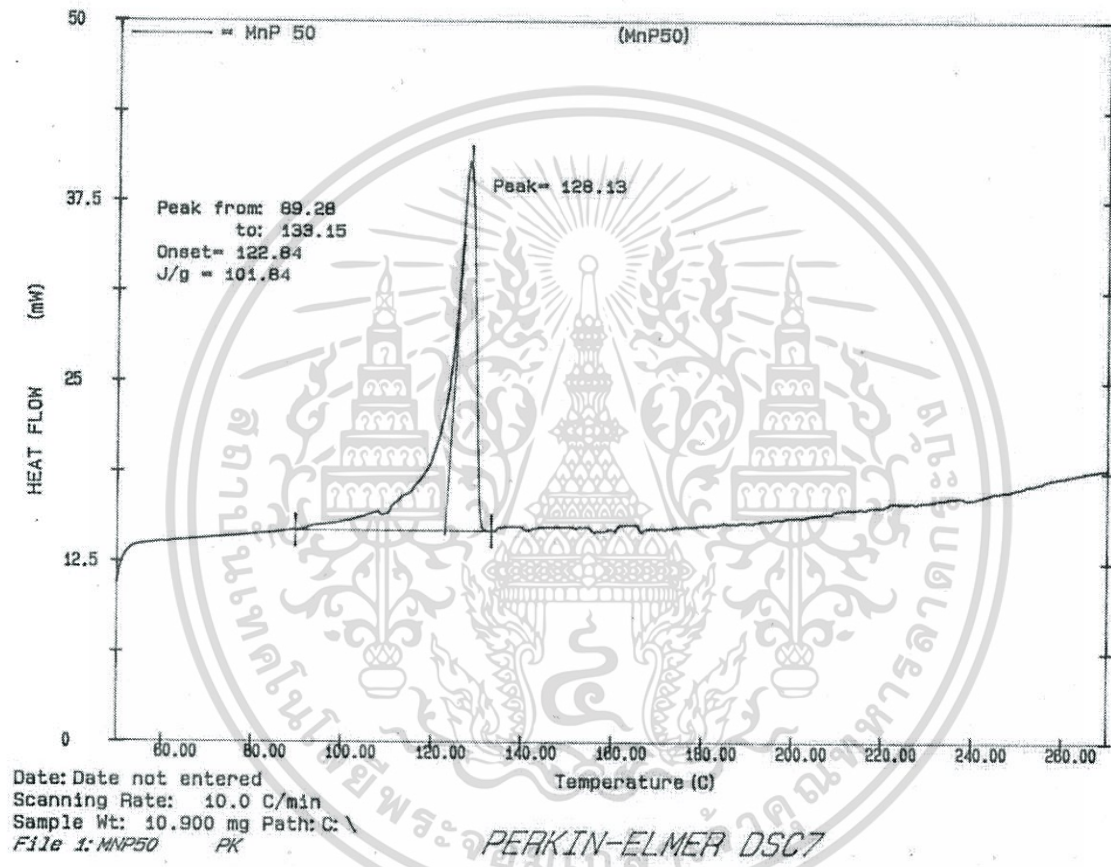
(11)

รูปที่ ค-11 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของ HDPE:MgN ในอัตราส่วน 50:50 (โดยน้ำหนัก) เมื่อทำการลดอุณหภูมิ



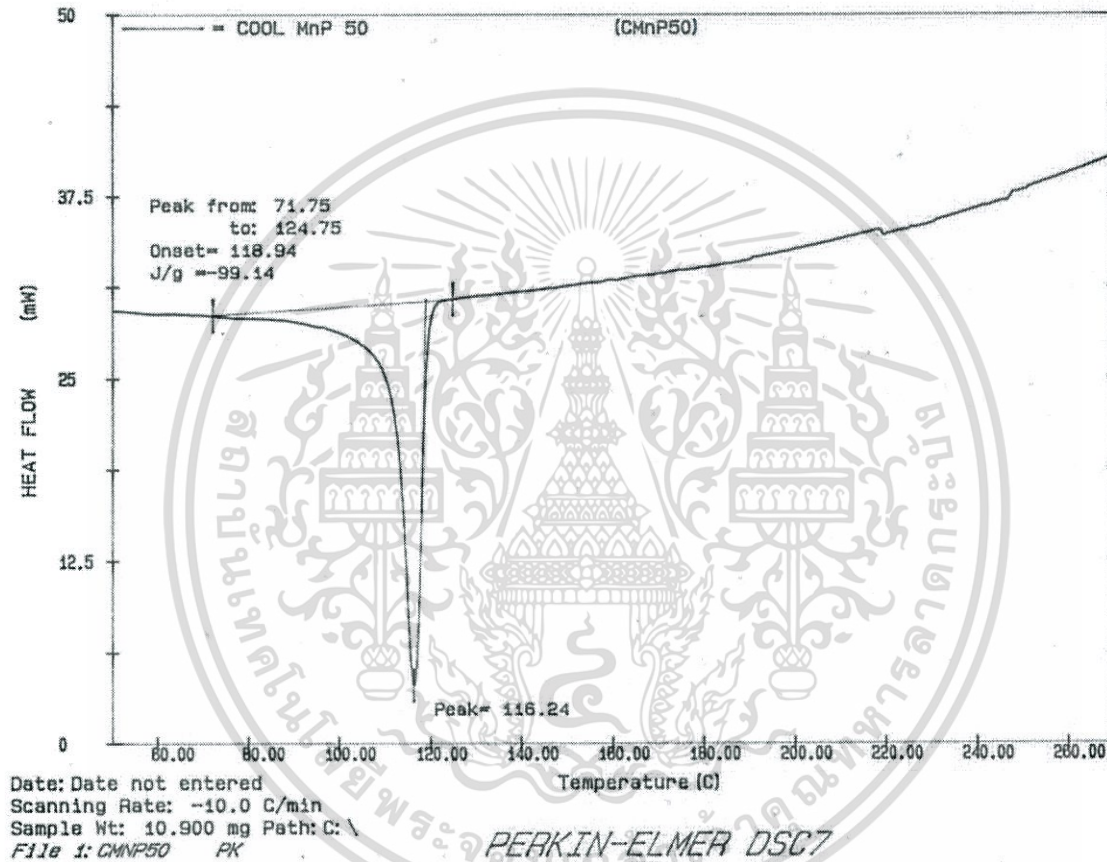
(12)

รูปที่ ค-12 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของ HDPE:MgN ในอัตราส่วน 50:50 (โดยน้ำหนัก) เมื่อให้ความร้อนครั้งที่ 2



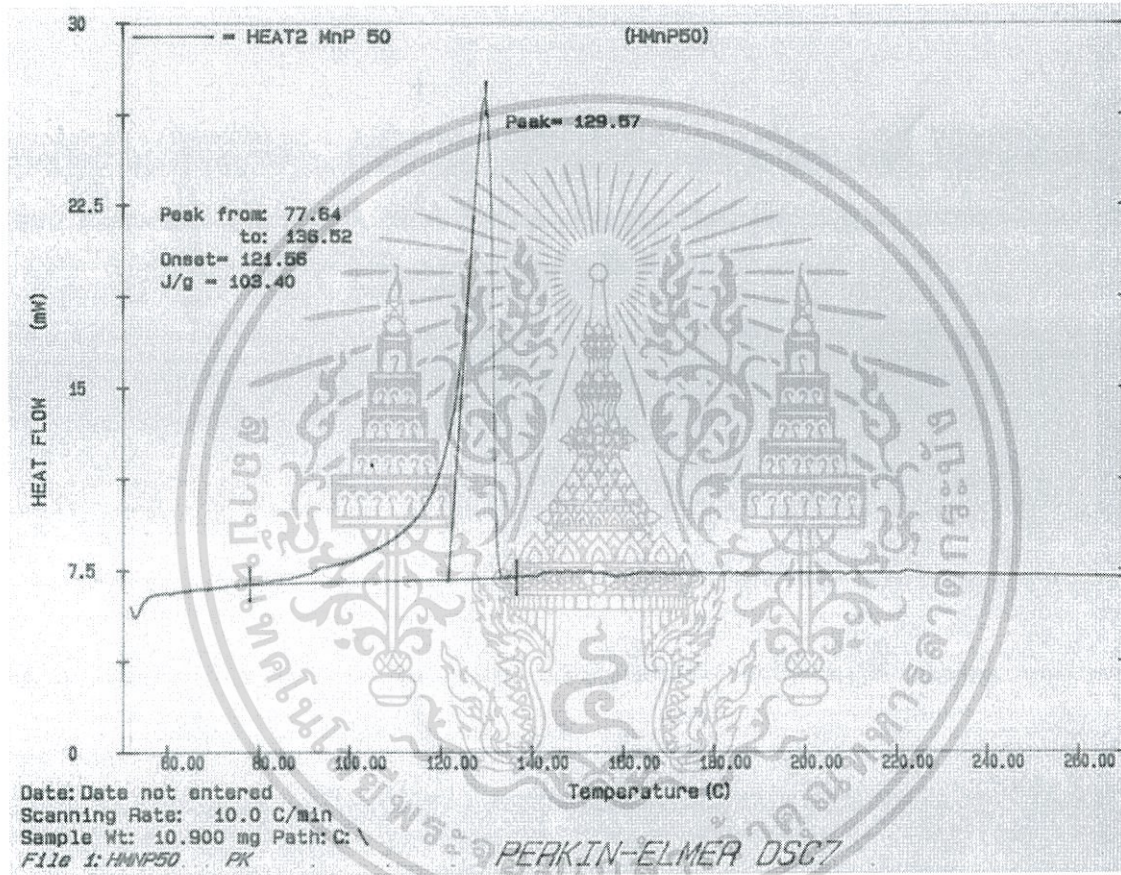
(13)

รูปที่ ค-13 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของ HDPE:MnP ในอัตราส่วน 50:50 (โดยน้ำหนัก) เมื่อให้ความร้อนครั้งที่ 1



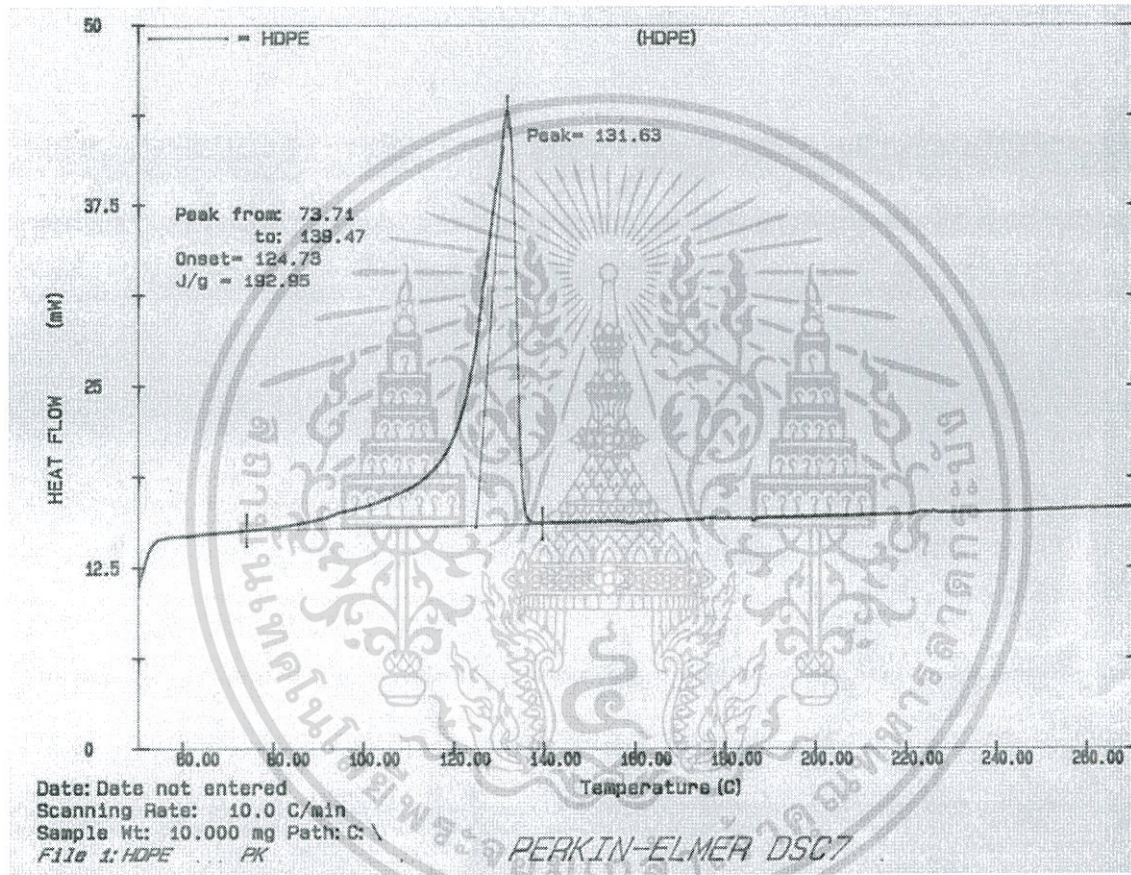
(14)

รูปที่ ค-14 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของ HDPE:MnP ในอัตราส่วน 50:50 (โดยน้ำหนัก) เมื่อทำการลดอุณหภูมิ



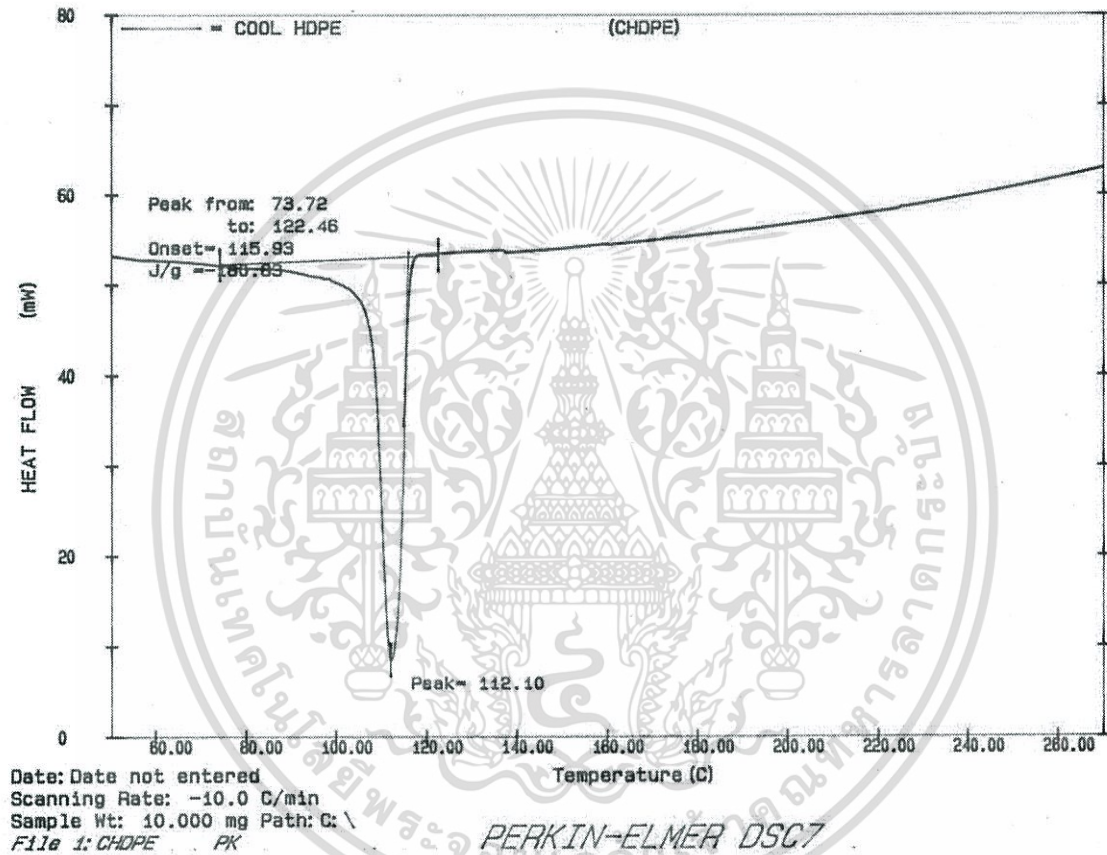
(15)

รูปที่ ค-15 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของ HDPE:MnP ในอัตราส่วน 50:50 (โดยน้ำหนัก) เมื่อให้ความร้อนครั้งที่ 2



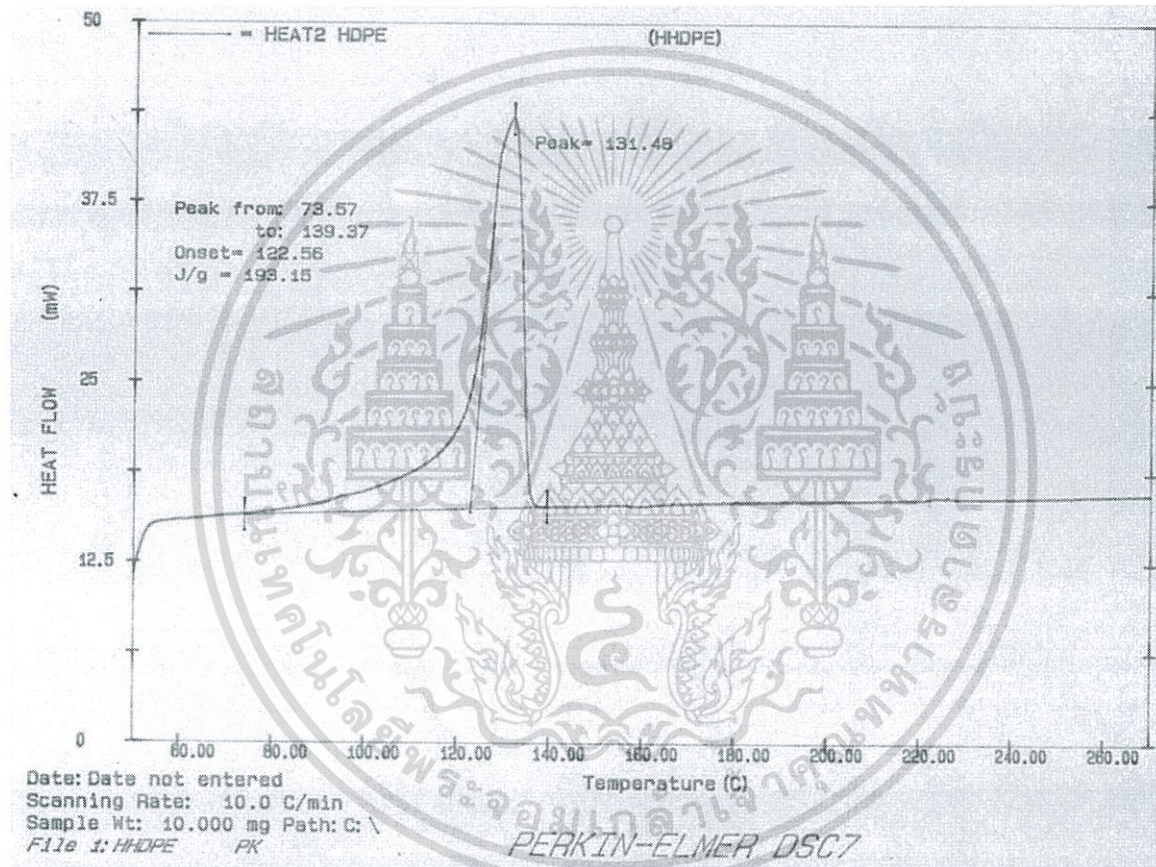
(16)

รูปที่ ค-16 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของ HDPE (pure) เมื่อให้ความร้อนครั้งที่ 1



(17)

รูปที่ ค-17 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของ HDPE เมื่อทำการลดอุณหภูมิ



(18)

รูปที่ ค-18 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของ HDPE (pure) เมื่อให้ความร้อนครั้งที่ 2