

การศึกษาด้านการลามไฟระบบอินตumesเซนต์ชนิดใหม่  
ที่เตรียมได้จากเปลือกหอยแมลงภู่สำหรับไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPC)

STUDY OF NOVEL INTUMESCENT FLAME RETARDANTS FROM  
MUSSEL SHELL WASTE FOR WOOD PLASTIC COMPOSITES (WPC)



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-SC-M-014-027

การศึกษาด้านการลามไฟระบบอินตumesเซนต์ชนิดใหม่  
ที่เตรียมได้จากเปลือกหอยแมลงภู่สำหรับไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPC)

STUDY OF NOVEL INTUMESCENT FLAME RETARDANTS FROM  
MUSSEL SHELL WASTE FOR WOOD PLASTIC COMPOSITES (WPC)



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2560

KMITL-2017-SC-M-014-027

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF NOVEL INTUMESCENT FLAME RETARDANTS FROM  
MUSSEL SHELL WASTE FOR WOOD PLASTIC COMPOSITES (WPC)



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE  
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2017

KMITL-2017-SC-M-014-027

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ “การศึกษาสารต้านการลามไฟระบบอินตุมเสเซนต์ชนิดใหม่ที่เตรียมได้จากเปลือกหอยแมลงภู่สำหรับไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPC)”  
“STUDY OF NOVEL INTUMESCENT FLAME RETARDANTS FROM MUSSEL SHELL WASTE FOR WOOD PLASTIC COMPOSITES (WPC)”

ชื่อนักศึกษา นางสาวสุธิดา แซ่มชื่น  
รหัสประจำตัว 57605056  
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์)  
ภาควิชา เคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล แจ่มชัด  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม อาจารย์วราธรรม อุ้นจิตติชัย  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บรรจง บุญชม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ ประธานกรรมการ	
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ อาจารย์บัณฑิตประจำ (ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง)	
รองศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกสถาบันฯ	
อาจารย์วราธรรม อุ้นจิตติชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บรรจง บุญชม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	
รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล แจ่มชัด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	

วัน/ เดือน/ ปี ที่สอบ จันทร์ที่ 3 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 เวลา 09.00-12.00 น.  
สถานที่สอบ ณ ห้อง 301 อาคารพระจอมเกล้า

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.คุณณี ฐานะบริพัทธ์)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 19 เดือน 11 พ.ศ. 60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาด้านการลามไฟระบบอินตูดิเมสเซนส์ชนิดใหม่ที่เตรียมได้จากเปลือกหอยแมลงภู่มสำหรับไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPC)
ชื่อนักศึกษา	นางสาวสุธิดา แซ่มชื่น
รหัสประจำตัว	57605056
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพอลิเมอร์)
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อ.วรรณธรรม อุ่นจิตติชัย ผศ.ดร.บรรจง บุญชม

### บทคัดย่อ

ไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPC) เป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เพื่อใช้เป็นวัสดุในอุตสาหกรรมก่อสร้าง พื้นระเบียง และเฟอร์นิเจอร์ หนึ่งในข้อจำกัดสำคัญของไม้พลาสติกคอมโพสิตคืออันตรายจากการติดไฟ ซึ่งสามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยการเติมสารหน่วงการติดไฟ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมสารหน่วงการติดไฟฟอสฟอรัสจากเปลือกหอยแมลงภู่มด้วยวิธีตกตะกอนแบบง่าย ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้คือแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรต ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , CaHP) มีการเตรียม CaHP 2 แบบ คือ CaHP ที่เตรียมจากเปลือกหอยชนิดไม่กำจัดสิ่งปนเปื้อน (US-CaHP) และเปลือกหอยชนิดกำจัดสิ่งปนเปื้อน (TS-CaHP) ตรวจสอบโครงสร้างด้วยเทคนิค XRD, XRF และ FTIR ทำการผสม CaHP ที่สังเคราะห์ได้ใน WPC ที่เตรียมจาก HDPE ผสมเส้นใยกาบมะพร้าวควบคุมปริมาณที่ 50 php ด้วยเทคนิคหลอมผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด และขึ้นรูปตัวอย่างด้วยการฉีดขึ้นรูป พบว่าสมบัติการหน่วงการติดไฟและสมบัติเชิงกลของ WPC ที่ผสม CaHP ทั้งสองชนิดไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ จากการศึกษาการเติม US-CaHP ปริมาณ 20-40 php พบว่าสมบัติการหน่วงการติดไฟของ WPC ดีขึ้น เห็นได้จากอัตราการลามไฟและค่าความร้อนจากการเผาไหม้ของ WPC ที่ต่ำลง ส่วนค่าดัชนีออกซิเจน (LOI) ของ WPC เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณสารหน่วงการติดไฟ พบว่าค่ามอดูลัสโค้งงอและค่าความแข็งกดของ WPC มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นแต่ค่าความแข็งแรงโค้งงอและค่าความแข็งแรงกระแทกของ WPC มีค่าลดลง จากการศึกษาสารหน่วงการติดไฟ US-CaHP ปริมาณ 0.5-0.8 ส่วนโดยน้ำหนัก ในระบบอินตูดิเมสเซนส์ (MA:CaHP:CF, IFRs) โดยใช้ร่วมกับเมลามีน (MA) และเส้นใยกาบมะพร้าว (CF) เป็นสารให้ฟองและสารให้ Char ตามลำดับ ควบคุมอัตราส่วน MA และ CF คงที่ที่ 0.17 และ 1 ส่วนโดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากการทดลอง พบว่าประสิทธิภาพการหน่วงการติดไฟของ WPC ดีที่สุดเมื่อใช้อัตราส่วนของ IFRs ที่ 0.17:0.7:1 ซึ่งให้ผลการลามไฟตามมาตรฐาน UL94 V เป็น V-1 และให้ค่า LOI สูงที่สุด อย่างไรก็ตามพบว่า การใส่ IFRs ทำให้สมบัติเชิงกลของ WPC มีค่าลดลง คาดว่าเนื่องจากเกิดการรวมกลุ่มก้อนของ US-CaHP และ/หรือ MA ทำให้เกิดช่องว่างเป็นรอยตำหนิ ซึ่งยืนยันได้จาก SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำสำคัญ : แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรต เปลือกหอยแมลงภู ไม้พลาสติกคอมโพสิต  
สารหน่วงการติดไฟระบบอินตูลเมสเซนส์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Study of Novel Intumescent Flame Retardants from Mussel Shell Waste for Wood Plastic Composite (WPC)
<b>Student Name</b>	Miss Suthida Chamcheun
<b>Student ID</b>	57605056
<b>Degree</b>	Master of Science (Polymer Technology)
<b>Department</b>	Chemistry
<b>Year</b>	2017
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Ittipol Jangchud
<b>Thesis Co-advisors</b>	Mr. Woratham Oonjittichai Asst. Prof. Dr. Banjong Boonchom

### Abstract

Wood plastic composites (WPC) have been drawn increasing attention as building materials, decking and WPC furniture. One of WPC disadvantages is fire hazard. This problem can be solved by adding flame retardants (FRs) additives into WPC. In this research, phosphorous FRs from mussel shell waste were synthesized by a simple precipitation method yielding calcium dihydrogen phosphate monohydrate ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , CaHP). Two types of CaHP were investigated including CaHP prepared from untreated shell (US-CaHP) and treated shell (TS-CaHP). By XRD, XRF and FTIR, structures of US-CaHP and TS-CaHP were characterized. CaHP was mixed with HDPE-coconut coir fiber (controlled loading at 50 php) WPC by using an internal mixer. WPC samples were prepared by an injection molding machine. It was found that no significant difference was found in flammability and mechanical properties of WPC with either US-CaHP or TS-CaHP. As US-CaHP loading was increased from 20 to 40 php, it was found that flame retardant properties of WPC were improved as burning rate and heat of combustion of WPC were decreased while limiting oxygen index (LOI) of WPC was increased. Flexural modulus and hardness of WPC were increased with increasing US-CaHP loading but flexural and impact strengths of WPC were decreased. In the intumescent system (MA:CaHP:CF, IFRs), US-CaHP was studied in a range of 0.5-0.8 by weight ratio with melamine (MA) and coconut coir fiber (CF) as a blowing agent and char source, respectively. MA and CF were controlled at 0.17 and 1 by weight ratio, respectively. It was found that the greatest flame retardant efficiency of WPC was observed when IFRs ratio was fixed at 0.17:0.7:1 as V-1 (according to UL94 V) and the highest LOI were achieved. However, mechanical properties of WPC were decreased when IFRs were added. As confirmed

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

by SEM, this might be attributed to the presence of agglomerates generated by US-CaHP and/or MA resulting in voids as defects in specimens.

**Keywords :**  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , Mussel Shell, WPC, Intumescent Flame Retardant



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับความช่วยเหลือและดูแลเป็นอย่างดี โดยเฉพาะอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจัต ที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ อาจารย์วรธรรม อุ่นจิตติชัย และ ผศ.ดร.บรรจง บุญชม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่คอยให้คำปรึกษา และให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธี ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และ รศ.ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย อาจารย์คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ทุนอุดหนุนการศึกษาและทุนนำเสนองานในการประชุมวิชาการ PCT-6

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ โดยเฉพาะ ผศ.ดร.พูนทรัพย์ ตริภพนาถกุล ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องทดสอบการลามไฟ LOI ให้คำปรึกษาในการใช้เครื่องมือและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง Bomb calorimeter ให้คำปรึกษาในการใช้เครื่องมือและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และ คุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่ประจำอาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์เทคโนโลยี รวมทั้ง คุณขวัญใจ พูลสวัสดิ์ ที่คอยอำนวยความสะดวกตลอดการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ บริษัท เอ็ม.บี.เจ เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด โดยเฉพาะคุณบำรุง เจษฎาพงศ์-ไพบุลย์ และคุณอุษอร พรหมนิมิตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมี และคอยช่วยเหลือให้คำปรึกษาต่าง ๆ ตลอดการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ บริษัท เบ็นไมเยอร์ เคมีคอลส์ (ที) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมีในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ บริษัท เมทเธอร์-โทเลโด (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง TGA-FTIR และ เครื่อง DSC

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่อาคารและสถานที่ รวมจนถึงแม่บ้าน ที่ช่วยเหลืออำนวยความสะดวกในการเปิดปิดอาคารทั้งในและนอกเวลาราชการ

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และพี่ ๆ น้อง ๆ เพื่อน ๆ ทุกคน ที่คอยช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก่อให้เกิดประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจ นับเป็นความยินดีอย่างยิ่ง และหากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขออภัยไว้ ณ ที่นี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในที่สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาต หากฝ่าฝืนจะดำเนินการตามกฎหมายที่เกี่ยวข้อง  
ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>6</b>
2.1 วัสดุประกอบหรือคอมโพสิต.....	6
2.1.1 นิยามและองค์ประกอบของวัสดุประกอบหรือคอมโพสิต.....	6
2.1.2 ชนิดของคอมโพสิต.....	6
2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติวัสดุคอมโพสิต.....	7
2.1.4 ข้อดีและข้อเสียของวัสดุคอมโพสิต.....	7
2.1.5 การประยุกต์ใช้งานวัสดุคอมโพสิต.....	8
2.2 ไม้พลาสติกคอมโพสิต.....	9
2.2.1 นิยามของไม้พลาสติกคอมโพสิต.....	9
2.2.2 โครงสร้างของไม้พลาสติกคอมโพสิต.....	9
2.2.3 กระบวนการผลิตไม้พลาสติกคอมโพสิต.....	10
2.2.4 สมบัติของไม้พลาสติกคอมโพสิต.....	11
2.2.5 การใช้งานไม้พลาสติกคอมโพสิต.....	11
2.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง.....	12
2.3.1 สมบัติทั่วไป.....	12
2.3.2 ข้อและดีข้อเสีย.....	13
2.3.3 การประยุกต์ใช้งาน.....	13
2.4 เส้นใยธรรมชาติ.....	14
2.4.1 ลักษณะทั่วไปของเส้นใยธรรมชาติ.....	14
2.4.2 องค์ประกอบของเส้นใยธรรมชาติ.....	14
2.4.3 สมบัติของเส้นใยธรรมชาติ.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.4 ข้อดีข้อเสียของเส้นใยธรรมชาติ.....	18
2.5 เส้นใยมะพร้าว.....	18
2.5.1 ลักษณะทั่วไปของเส้นใยมะพร้าว.....	18
2.5.2 การใช้งานเส้นใยมะพร้าว.....	19
2.5.3 การเตรียมเส้นใยมะพร้าว.....	20
2.6 เปลือกหอย.....	20
2.6.1 โครงสร้างของเปลือกหอย.....	20
2.6.2 ชั้นของเปลือกหอย.....	21
2.6.3 การใช้ประโยชน์เปลือกหอย.....	21
2.6.4 แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรต.....	21
2.7 สารเติมแต่งในพอลิเมอร์.....	22
2.7.1 สารต้านออกซิเดชัน.....	23
2.7.2 สารช่วยผสม.....	24
2.7.3 สารหล่อลื่น.....	25
2.7.4 สารหน่วงการติดไฟ.....	25
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>40</b>
3.1 สารเคมีใช้ในการทดลอง.....	40
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	43
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	44
3.4 กระบวนการผลิตขึ้นรูป.....	47
3.5 การวิเคราะห์และทดสอบ.....	47
3.5.1 การวิเคราะห์ CaHP ที่เตรียมได้.....	47
3.5.1.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาของ CaHP.....	47
3.5.1.2 การวิเคราะห์การกระจายของขนาดอนุภาคของ CaHP.....	47
3.5.1.3 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของ CaHP.....	47
3.5.1.4 การวิเคราะห์อุณหภูมิและหมู่ฟังก์ชันการสลายตัวของ CaHP.....	47
3.5.1.5 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของ CaHP.....	47
3.5.1.6 การวัดค่าความถ่วงจำเพาะของ CaHP.....	47
3.5.1.7 วิเคราะห์หาค่าองค์ประกอบทางเคมีของ CaHP.....	48
3.5.2 การทดสอบสมบัติการหน่วงการติดไฟของ WPC.....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.2.1 การทดสอบยูแอล 94 แบบแนวตั้ง (UL94 V).....	49
3.5.2.2 การทดสอบดัชนีออกซิเจน.....	50
3.5.2.3 เครื่องวิเคราะห์พลังงานความร้อน.....	50
3.5.3 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ.....	51
3.5.3.1 การวิเคราะห์หาความหนาแน่นของตัวอย่าง.....	51
3.5.3.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาของไม้พลาสติกคอมโพสิต.....	53
3.5.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	53
3.5.4.1 การหาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก การเกิดผลึกและปริมาณ ผลึก.....	53
3.5.5 สมบัติเชิงกล.....	53
3.5.5.1 การทดสอบความแข็งกด.....	53
3.5.5.2 การทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทก.....	54
3.5.5.3 การทดสอบสมบัติความทนต่อแรงเค้นงอ.....	54
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....</b>	<b>56</b>
4.1 วิเคราะห์ลักษณะและโครงสร้างของ CaHP.....	57
4.1.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ US-CaHP และ TS-CaHP....	57
4.1.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของ US-CaHP และ TS-CaHP.....	57
4.1.3 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ US-CaHP และ TS-CaHP.....	58
4.2 การศึกษาผลของการกำจัดและไม่กำจัดสิ่งปนเปื้อนของเปลือกหอยแมลงภู.....	59
4.2.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล.....	60
4.2.2 ผลการทดสอบการหน่วงการติดไฟ.....	62
4.3 การศึกษาผลของปริมาณ US-CaHP เป็นสารหน่วงการติดไฟระบบเดี่ยว.....	64
4.3.1 ความหนาแน่นของคอมโพสิต.....	64
4.3.2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	65
4.3.3 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยา.....	66
4.3.3.1 สัณฐานวิทยาของ US-CaHP.....	66
4.3.3.2 สัณฐานวิทยาของคอมโพสิต.....	67
4.3.4 สมบัติเชิงกลของคอมโพสิต.....	69
4.3.5 ผลการทดสอบการหน่วงการติดไฟ.....	72
4.3.5.1 วิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวของ US-CaHP.....	72
4.3.5.2 ผลการทดสอบการหน่วงการติดไฟของคอมโพสิต.....	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 การศึกษาผลของปริมาณ US-CaHP เป็นสารหน่วงไฟระบบอินตูลิเมสเซนส์.....	81
4.4.1 ความหนาแน่นของคอมโพสิต.....	81
4.4.2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	82
4.4.3 สันฐานวิทยาของคอมโพสิต.....	82
4.4.4 สมบัติเชิงกลของคอมโพสิต.....	84
4.4.5 ผลการทดสอบการหน่วงการติดไฟของคอมโพสิต.....	87
4.4.5.1 วิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวของคอมโพสิต.....	87
4.4.5.2 ผลการทดสอบการหน่วงการติดไฟ.....	89
4.5 การวิเคราะห์ต้นทุน.....	95
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>97</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	97
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	98
<b>เอกสารอ้างอิง.....</b>	<b>99</b>
<b>ภาคผนวก.....</b>	<b>105</b>
ภาคผนวก ก.....	106
ภาคผนวก ข.....	109
ภาคผนวก ค.....	110
ภาคผนวก ง.....	111
ภาคผนวก จ.....	114
ภาคผนวก ฉ.....	121
ภาคผนวก ช.....	122
ภาคผนวก ซ.....	124
ภาคผนวก ฌ.....	126
ภาคผนวก ฎ.....	127
ประวัติผู้เขียน.....	131

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบลักษณะเด่นของไม้พลาสติกคอมโพสิตกับไม้และพลาสติก.....	11
2.2 ข้อมูลมูลค่าทางการตลาดของวัสดุที่ใช้สำหรับทำพื้นระเบียง (Decking).....	12
2.3 สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง.....	13
2.4 ส่วนประกอบของเส้นใยธรรมชาติชนิดต่าง ๆ.....	17
2.5 สมบัติทางกายภาพของเส้นใยธรรมชาติชนิดต่าง ๆ.....	18
2.6 ข้อดีและข้อเสียของเส้นใยธรรมชาติ.....	18
2.7 สมบัติโดยทั่วไปของแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรต.....	22
2.8 สมบัติบางประการของ $Mg(OH)_2$ และ $Al(OH)_3$ .....	25
2.9 โครงสร้างผลึกของ $Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$ .....	36
2.10 ค่า LOI และ UL94 ของพอลิเมอร์ผสมสูตร.....	36
2.11 ค่าอัตราการเผาไหม้ของพอลิเมอร์ผสมสูตร.....	38
3.1 สมบัติบางประการของ HDPE.....	41
3.2 ขนาดของเส้นใยกาบมะพร้าว.....	41
3.3 สมบัติบางประการของ APP.....	42
3.4 สมบัติบางประการของ MA.....	42
3.5 สมบัติบางประการของ ATH.....	42
3.6 สมบัติบางประการของ HDPE-g-MA.....	42
3.7 สูตรผสมที่เตรียมเป็นส่วนในร้อยละของพอลิเมอร์ (ระบบเดี่ยว).....	46
3.8 สูตรผสมที่เตรียมเป็นส่วนในร้อยละของพอลิเมอร์(ระบบอินตุมเนสเซนซ์).....	46
3.9 เกณฑ์การแบ่งกลุ่มพฤติกรรมของวัสดุต่อการติดไฟตามมาตรฐาน UL94 V.....	49
3.10 เกณฑ์การแบ่งกลุ่มพฤติกรรมของวัสดุต่อการติดไฟตามมาตรฐาน LOI.....	50
4.1 อักษรย่อที่ใช้ในงานวิจัย.....	56
4.2 องค์ประกอบธาตุใน US-CaHP และ TS-CaHP.....	57
4.3 ค่าความหนาแน่นของ WPC ที่มีปริมาณ US-CaHP และสารหน่วงการติดไฟเชิงพาณิชย์ที่แตกต่างกัน.....	65
4.4 $T_m$ , $T_c$ และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ HDPE ในชิ้นงานคอมโพสิต.....	66
4.5 ค่าความหนาแน่นของ WPC ที่มีอัตราส่วนของ IFRs ต่างกัน.....	82
4.6 $T_m$ , $T_c$ และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ HDPE ในชิ้นงานคอมโพสิต.....	82
4.7 เลขคลื่นจากพีคการสั่นที่สำคัญของก๊าซจากเทคนิค TGA-FTIR จากการสลายตัวของ Intu-CaHP0.7.....	89
4.8 การทดสอบการลามไฟของชิ้นงานคอมโพสิต.....	94
4.9 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบการผลิต WPC ทนไฟเปรียบเทียบกับสารหน่วงการติดไฟเชิงพาณิชย์และสารหน่วงการติดไฟจากเปลือกหอยแมลงภู่.....	96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก-1 องค์ประกอบธาตุและสารประกอบออกไซด์ในเปลือกหอยแมลงภู่นิวชนิดไม่กำจัดสิ่งปนเปื้อน.....	107
ก-2 องค์ประกอบธาตุและสารประกอบออกไซด์ในเปลือกหอยแมลงภู่นิวชนิดกำจัดสิ่งปนเปื้อน...	107
ข-1 ปริมาณองค์ประกอบในสูตรคอมโพลีเมอร์ (%wt) (ระบบเดี่ยว).....	109
ข-2 ปริมาณองค์ประกอบในสูตรคอมโพลีเมอร์ (%wt) (ระบบอินทิวเมสเซนส์).....	109
จ-1 $T_m$ $T_c$ และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ HDPE ในชิ้นงานคอมโพลีเมอร์.....	119
ฉ-1 ตารางผลการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค (Histogram result table).....	121
ช-1 อุณหภูมิการสลายตัวของ US-CaHP .....	122



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ตัวอย่างไม้พลาสติกคอมโพสิตเป็นระเบียบ (Decking).....	1
1.2 กลไกการทำงานของสารหน่วงการติดไฟระบบอินตุมเนสเซนส์.....	2
1.3 สัดส่วนการใช้พอลิเมอร์ในการผลิตไม้พลาสติกคอมโพสิต.....	3
1.4 กาบมะพร้าวซึ่งเป็นกากเหลือจากอุตสาหกรรม.....	4
1.5 เปลือกหอยเหลือทิ้ง.....	4
2.1 ชนิดของคอมโพสิต.....	7
2.2 การใช้งานพลาสติกคอมโพสิต.....	8
2.3 ตัวอย่างการใช้งานไม้พลาสติกคอมโพสิต.....	9
2.4 การผลิตไม้พลาสติกคอมโพสิตในอุตสาหกรรม.....	10
2.5 โครงสร้างของ HDPE.....	12
2.6 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จาก HDPE.....	13
2.7 ส่วนประกอบของเส้นใยธรรมชาติ.....	14
2.8 โครงสร้างของเซลลูโลส.....	15
2.9 โครงสร้างของเอมิเซลลูโลส.....	16
2.10 โครงสร้างของลิกนิน.....	16
2.11 เส้นใยมะพร้าว.....	19
2.12 ตัวอย่างการใช้งานเส้นใยมะพร้าว.....	19
2.13 เปลือกหอยแมลงภู่.....	21
2.14 แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรต.....	22
2.15 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของ HDPE.....	23
2.16 การทำงานของสารต้านออกซิเดชันปฐมภูมิ.....	24
2.17 การทำงานของสารต้านออกซิเดชันทุติยภูมิ.....	24
2.18 ไตรโดคลอโรโพรพิลฟอสเฟต.....	27
2.19 แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต.....	27
2.20 เมลามีนพอลิฟอสเฟต.....	28
2.21 กลไกการหน่วงการติดไฟ.....	28
2.22 กลไกการดับไฟของสารหน่วงไฟระบบอินตุมเนสเซนส์.....	30
2.23 ชั้น Char ปกคลุมผิวหน้าของวัสดุ.....	30
2.24 ค่าปริมาณออกซิเจนต่ำสุดที่ทำให้ชิ้นงานติดไฟได้และเวลาการเริ่มติดไฟของคอมโพสิต ที่ผสมสารหน่วงการติดไฟชนิดต่าง ๆ.....	33
2.25 อัตราการปลดปล่อยความร้อนและความแข็งแรงโค้งงอของคอมโพสิตที่ผสมสารหน่วง การติดไฟชนิดต่าง ๆ.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.26	35
2.27	37
2.28	39
3.1	45
3.2	48
3.3	49
3.4	50
3.5	51
3.6	53
3.7	54
3.8	55
4.1	58
4.2	59
4.3	62
4.4	64
4.5	67
4.6	67
4.7	68
4.8	69
4.9	70
4.10	71
4.11	72
4.12	73
4.13	74
4.14	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 ค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ของ WPC ที่มีปริมาณ US-CaHP แตกต่างกัน.....	76
4.16 DSC เทอร์โมแกรมของ US-CaHP และ WPC .....	78
4.17 ค่า LOI ของ WPC ที่มีปริมาณ US-CaHP แตกต่างกัน .....	79
4.18 แผนภาพจำลองกลไกการทำงานของ US-CaHP ที่เติมลงใน WPC .....	80
4.19 SEM micrographs แสดงการกระจายตัวของ IFRs ใน WPC ของพื้นผิวที่แตกหักที่อุณหภูมิต่ำ.....	83
4.20 สมบัติความแข็งแรงโค้งงอของ WPC ที่อัตราส่วน IFRs แตกต่างกัน.....	84
4.21 สมบัติการรับแรงกระแทกของ WPC ที่อัตราส่วน IFRs แตกต่างกัน.....	85
4.22 สมบัติความแข็งของ WPC ที่อัตราส่วน IFRs แตกต่างกัน.....	86
4.23 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวของ Intu-CaHP0.7 ด้วยเทคนิค TGA .....	87
4.24 ค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ของ WPC ที่อัตราส่วน IFRs แตกต่างกัน .....	91
4.25 DSC เทอร์โมแกรมของ Intu-CaHP0.7.....	92
4.26 ชิ้นงานก่อนและหลังจากการทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL94 V.....	92
4.27 ค่า LOI ของ WPC ที่อัตราส่วน IFRs แตกต่างกัน.....	93
4.28 แผนภาพจำลองกลไกการทำงานของสารหน่วงไฟ IFRs ที่เติมลงใน WPC.....	95
ก-1 เปลือกหอยแมลงภู่นิวคลีโอไมด์กำจัดสิ่งปนเปื้อน.....	106
ก-2 เปลือกหอยแมลงภู่นิวคลีโอไมด์กำจัดสิ่งปนเปื้อน.....	106
ก-3 สันฐานวิทยาของเปลือกหอยแมลงภู่นิวคลีโอไมด์กำจัดสิ่งปนเปื้อนหลังบด ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	108
ก-4 สันฐานวิทยาของเปลือกหอยแมลงภู่นิวคลีโอไมด์กำจัดสิ่งปนเปื้อนหลังบด ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	108
จ-1 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ HDPE.....	114
จ-2 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ WPC.....	114
จ-3 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ WPCUS-CaHP20.....	115
จ-4 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ WPCUS-CaHP25.....	115
จ-5 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ WPCUS-CaHP30.....	116
จ-6 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ WPCUS-CaHP35.....	116
จ-7 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ WPCUS-CaHP40.....	117
จ-8 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ Intu-CaHP0.5.....	117
จ-9 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ Intu-CaHP0.6.....	118
จ-10 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ Intu-CaHP0.7.....	118
จ-11 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ Intu-CaHP0.8.....	119

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ฌ-1 การทดสอบลามไฟตามมาตรฐาน UL94 V ของ WPC เมื่อทำการจุดไฟ 30 วินาที.....	126
ฌ-2 การเปรียบเทียบการทดสอบลามไฟตามมาตรฐาน UL94 V ของ WPC ที่เติม US-CaHP กับสารหน่วงไฟเชิงพาณิชย์.....	126
ญ-1 TGA-FTIR ที่อุณหภูมิ 250°C .....	127
ญ-2 TGA-FTIR ที่อุณหภูมิ 340°C.....	127
ญ-3 TGA-FTIR ที่อุณหภูมิ 350°C .....	128
ญ-4 TGA-FTIR ที่อุณหภูมิ 410°C .....	128
ญ-5 TGA-FTIR ที่อุณหภูมิ 440°C .....	129
ญ-6 TGA-FTIR ที่อุณหภูมิ 480°C.....	129
ญ-7 TGA-FTIR ที่อุณหภูมิ 500°C.....	130



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ไม้เทียมชนิดไม้พลาสติกคอมโพสิต (Wood plastic composites, WPC) เป็นวัสดุประกอบ-พอลิเมอร์ (Polymer composite) ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่เป็นเมทริกซ์ (Matrix) คือพอลิเมอร์ และส่วนเสริมแรง (Reinforcement) คือเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งในปัจจุบันไม้พลาสติกคอมโพสิตมีบทบาทในชีวิตประจำวันมากขึ้น เนื่องจากสมบัติเด่นของไม้พลาสติกคอมโพสิตที่ดีกว่าไม้หลายประการ คือดู-ความชื้นต่ำ น้ำหนักเบา ไม่ถูกทำลายจากปลวก และแมลง จึงนิยมนำไปทำเป็นพื้นระเบียง (Decking) แต่ข้อด้อยประการสำคัญของไม้ธรรมชาติ และ WPC คือติดไฟง่าย และเป็นเชื้อเพลิงที่ดี



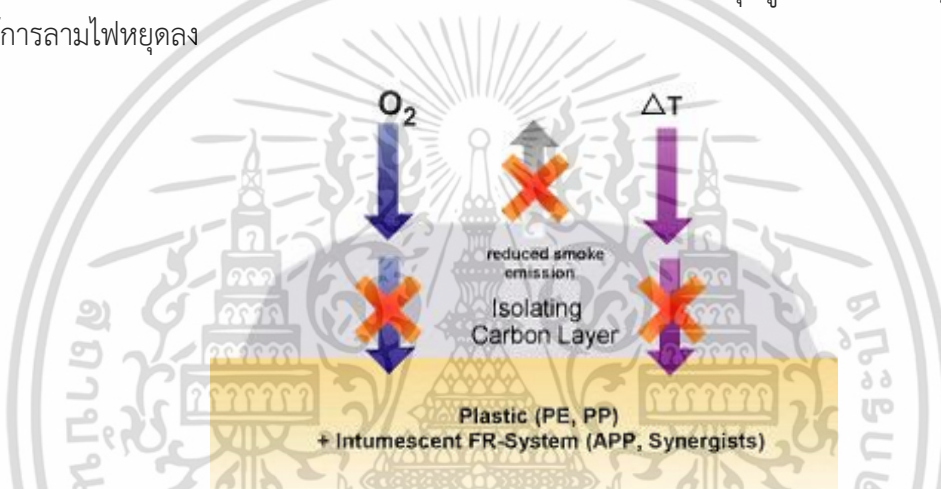
รูปที่ 1.1 ตัวอย่างไม้พลาสติกคอมโพสิตเป็นพื้นระเบียง (Decking) [1]

กระบวนการในการเผาไหม้ (Burning) ประกอบด้วย 5 ขั้นตอน คือการให้ความร้อน (Heating) การเสื่อมสลาย (Decomposition) การจุดติดไฟ (Ignition) การเผาไหม้ (Combustion) และการแผ่ขยายของไฟ (Propagation) โดยไม้พลาสติกคอมโพสิตเป็นวัสดุอินทรีย์ที่ติดไฟได้ง่าย เนื่องจากพอลิเมอร์ส่วนใหญ่มีจุดหลอมเหลวที่ไม่สูงมากนักและเส้นใยธรรมชาติยังเป็นวัสดุอินทรีย์ที่ติดไฟง่ายอีกด้วย จากปัญหาเบื้องต้นที่กล่าวมางานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาเพื่อให้ไม้พลาสติกคอมโพสิตสามารถหน่วงการติดไฟได้นานขึ้น และช่วยบรรเทาความเสียหายจากการเกิดอัคคีภัย

การต้านทานการติดไฟ คือการขัดขวางกระบวนการเผาไหม้ โดยวิธีที่ง่ายที่สุด คือการเติมสารหน่วงการติดไฟ (Flame retardants, FRs) ลงไปในไม้พลาสติกคอมโพสิต โดยสารหน่วงการติดไฟในปัจจุบันมีหลายชนิด ได้แก่ สารประกอบฮาโลเจน (Halogen flame retardant) แต่เนื่องจากข้อจำกัดเกี่ยวกับความปลอดภัยต่อมนุษย์ และสิ่งแวดล้อมจึงทำให้สารหน่วงการติดไฟประเภทสารอนินทรีย์ เช่น แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Magnesium hydroxide,  $Mg(OH)_2$ , MOH) และ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminum hydroxide,  $Al(OH)_3$ , ATH) ได้รับความนิยม ทั้งนี้ต้องใส่ในปริมาณมาก (50-60% โดยน้ำหนัก) ทำให้ส่งผลต่อต้นทุนการผลิต น้ำหนักของ WPC และให้ผลทางลบกับสมบัติเชิงกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารหน่วงการติดไฟประเภทสารประกอบฟอสฟอรัส (Phosphorus flame retardants) เช่น แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (Ammonium polyphosphate, APP) มีข้อดี คือหาง่าย ไม่เป็นพิษ และมีประสิทธิภาพการหน่วงไฟดีกับวัสดุที่มีปริมาณออกซิเจนสูง จึงได้รับความนิยมมากขึ้น โดยเฉพาะในปัจจุบัน มักใช้เป็นสารหน่วงการติดไฟใน WPC โดยเตรียมเป็นสารหน่วงการติดไฟระบบอินตุมสเซนซ์ (Intumescent flame retardant, IFRs) ซึ่งเป็นสารหน่วงการติดไฟระบบใหม่ที่ได้รับคามนิยมอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ไม่เป็นพิษต่อมนุษย์ มีประสิทธิภาพในการหน่วงการติดไฟสูง และใช้ปริมาณที่น้อยทำให้ประหยัดต้นทุน โดยสารหน่วงการติดไฟระบบอินตุมสเซนซ์ประกอบไปด้วย 3 องค์ประกอบ ได้แก่ แหล่งให้กรดอนินทรีย์จำพวกสารประกอบฟอสฟอรัส สารทำให้เกิด Char และสารให้ฟอง การทำงานของสารหน่วงไฟระบบอินตุมสเซนซ์ คือ เมื่อได้รับความร้อนวัสดุจะเกิดการพองตัวสูงขึ้นเกิดโครงสร้างลักษณะคล้ายโฟม ซึ่งเป็นฉนวนทางความร้อน และทำหน้าที่เป็นแนวกันความร้อนระหว่างเปลวไฟกับวัสดุที่ถูกเผาไหม้ได้ดังรูปที่ 1.2 ทำให้การลามไฟหยุดลง



รูปที่ 1.2 กลไกการทำงานของสารหน่วงการติดไฟระบบอินตุมสเซนซ์ [2]

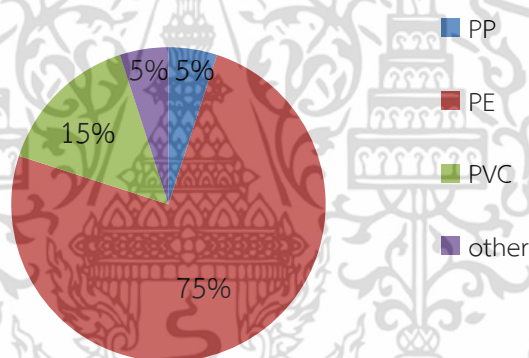
จากงานวิจัยของ Boonchom B. [3] ทำการศึกษาการเตรียมสารประกอบฟอสฟอรัส ได้แก่ แคลเซียมไดไฮโดรเจนพอสเฟตโมโนไฮเดรต ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , CaHP) อย่างง่าย โดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate,  $\text{CaCO}_3$ ) และกรดฟอสฟอริกเป็นสารตั้งต้นมีอะซิโตนเป็นตัวกลาง จากการทดลอง พบว่าเมื่อนำ CaHP ที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง XRD ให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับ CaHP มาตรฐาน และเมื่อนำ CaHP ใช้เป็นสารหน่วงการติดไฟใน HDPE จากงานวิจัยของ ดวงพร ปริสาวงศ์ และคณะ [4] ทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณ CaHP ต่อการหน่วงไฟในระบบเดี่ยวใน HDPE โดยทำการทดสอบสมบัติการลามไฟเพื่อหาอัตราส่วนที่มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดีที่สุด โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง HDPE และ CaHP เป็น 100:0, 80:20, 60:40 และ 40:60 โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อทดสอบสมบัติการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 V ขึ้นงานในทุกอัตราส่วนเกิดการติดไฟ และลุกไหม้จนหมด เมื่อทดสอบอัตราการเผาไหม้ของชิ้นงาน พบว่าเมื่อใส่ CaHP ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้อัตราการเผาไหม้มีแนวโน้มลดลง ดังนั้นสรุปได้ว่า CaHP ที่ใช้เป็นสารหน่วงไฟในระบบเดี่ยวสามารถช่วยในการหน่วงไฟได้แต่ไม่สามารถช่วยให้วัสดุเกิดการดับไฟได้ด้วยตัวเอง

จากงานวิจัยของ สิทธิโชค ปุณณะนิต และคณะ [5] จึงศึกษาการปรับปรุงสมบัติการทนไฟของ WPC ที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และเส้นใยกาบมะพร้าวที่ควบคุมปริมาณที่ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

50 php โดยใช้สารหน่วงการติดไฟระบบอินตุมেসเซนต์ซึ่งประกอบด้วยแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) เป็นแหล่งให้กรดอินทรีย์ เส้นใยกาบมะพร้าว (CF) เป็นสารทำให้เกิด Char และ เมลามีน (MA) เป็นสารให้ฟอง จากการทดลอง พบว่าการปรับปรุงสมบัติการทนไฟของ WPC โดยใช้สารหน่วงการติดไฟระบบอินตุมেসเซนต์ที่อัตราส่วนของ MA:APP:CF เป็น 0.17:0.5:1 (โดยน้ำหนัก) ให้ประสิทธิภาพในการหน่วงไฟของ WPC ดีที่สุดให้ผลการลามไฟตามมาตรฐาน UL94 V เป็น V-0 นั่นคือวัสดุสามารถดับไฟได้ด้วยตัวเอง (Self-extinguishing)

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการเตรียม CaHP จากวัตถุดิบเหลือใช้จากธรรมชาติ อย่างเช่น เปลือกหอยซึ่งมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตและสามารถนำมาทำปฏิกิริยากับกรดฟอสฟอริก เกิดเป็นสารกลุ่มฟอสเฟอรัสเพื่อใช้เป็นสารหน่วงการติดไฟใน WPC โดยศึกษาในระบบอินตุมেসเซนต์ซึ่งมีเมลามีนเป็นสารให้ฟอง และเส้นใยกาบมะพร้าวเป็นสารให้ Char โดยคาดว่าจะการใช้ CaHP ในระบบอินตุมেসเซนต์เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการหน่วงการติดไฟของ WPC ให้ดีขึ้น

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย พอลิเมอร์ เส้นใยธรรมชาติ และเปลือกหอย โดยเลือกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) เป็นตัวแทนพอลิเมอร์ เนื่องจาก HDPE มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ และเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีปริมาณการใช้อย่างมากในอุตสาหกรรมการผลิตไม้พลาสติกคอมโพสิตดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 สัดส่วนการใช้พอลิเมอร์ในการผลิตไม้พลาสติกคอมโพสิต [6]

การเลือกใช้เส้นใยกาบมะพร้าว (Coconut coir fiber, CF) เป็นส่วนเสริมแรง เนื่องจากเป็นวัสดุเหลือใช้จึงมีราคาถูก หาได้ง่ายในประเทศ โดยในประเทศไทยมีเนื้อที่การปลูกมะพร้าวมากถึงประมาณ 1.31 ล้านไร่ มีผลผลิตมะพร้าวมากกว่า 1.06 ล้านตันต่อปี [7] จึงเหมาะกับการนำเส้นใยมะพร้าวซึ่งเป็นกากเหลือจากอุตสาหกรรมมาใช้เป็นส่วนเสริมแรงในไม้พลาสติกคอมโพสิต ทั้งยังลดปริมาณการใช้พอลิเมอร์ซึ่งเป็นวัสดุที่ต้องใช้เวลานานในการย่อยสลาย ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ ปลอดภัยกับมนุษย์ และสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้เส้นใยมะพร้าวยังมีความหนาแน่นต่ำทำให้มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงจำเพาะ (Specific strength) สูง ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกนำเส้นใยจากกากมะพร้าวมาเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต ซึ่งเป็นการเอาสมบัติที่ดีของเส้นใยมะพร้าวมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด และเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับเส้นใยมะพร้าวอีกทางหนึ่ง



รูปที่ 1.4 กาบมะพร้าวซึ่งเป็นกากเหลือจากอุตสาหกรรม [8]

การเลือกใช้เปลือกหอยแมลงภูเป็นตัวแทนเปลือกหอย เนื่องจากหาได้ง่าย ราคาถูก ซึ่งจะช่วยลดปริมาณขยะและช่วยเพิ่มมูลค่าให้เศษวัสดุเหลือใช้



รูปที่ 1.5 เปลือกหอยเหลือทิ้ง [9]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงปรับปรุงแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากเปลือกหอยแมลงภูซึ่งเป็นเศษวัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติมาทำปฏิกิริยากับกรดฟอสฟอริก เพื่อผลิตเป็น CaHP ซึ่งเป็นสารประกอบฟอสฟอรัส โดยมีความเป็นไปได้ที่ใช้ทดแทนสารหน่วงการติดไฟกลุ่มฟอสฟอรัสระบบเดี่ยว และใช้ออกประกอบในสารหน่วงการติดไฟระบบอินตุมเมสเซนต์ (IFRs) ใน WPC ได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาความเป็นไปได้ในเตรียมแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรต (CaHP) จากเปลือกหอยแมลงภูเพื่อใช้เป็นสารหน่วงการติดไฟชนิดใหม่ที่เตรียมได้จากวัสดุธรรมชาติทั้งในระบบเดี่ยวและระบบอินตุมเมสเซนต์ เพื่อใช้กับ WPC ที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และเส้นใยมะพร้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาการเตรียม CaHP จากเปลือกหอยแมลงภู่เพื่อใช้เป็นสารหน่วงการติดไฟจากธรรมชาติ
  - 1.1) ศึกษาการเตรียม CaHP จากเปลือกหอยแมลงภู่บดที่อนุภาคผ่านตะแกรงขนาด 150-200 เมช
  - 1.2) ศึกษาผลของการกำจัด และไม่กำจัดสิ่งปนเปื้อนของเปลือกหอยแมลงภู่
- 2) ศึกษาการใช้ CaHP เป็นสารหน่วงการติดไฟระบบเดี่ยวในปริมาณ ต่าง ๆ ได้แก่ 20, 25, 30, 35 และ 40 php โดยเปรียบเทียบกับสารหน่วงการติดไฟเชิงพาณิชย์ ได้แก่ แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (ATH)
- 3) ศึกษาอัตราส่วนการใช้ CaHP ในสารหน่วงการติดไฟระบบอินตุมเมสเซนส์ที่อัตราส่วนของเมลามีน, CaHP และเส้นใยกาบมะพร้าวเป็น 0.17:0.5:1, 0.17:0.6:1, 0.17:0.7:1 และ 0.17:0.8:1 (โดยน้ำหนัก)
- 4) ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของไม้พลาสติกคอมโพสิตได้แก่
  - 4.1) สมบัติการหน่วงการติดไฟตามมาตรฐาน UL 94, Limiting Oxygen Index (LOI), อัตราการลามไฟ (Burning rate) และค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ (Heat of combustion)
  - 4.2) สมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) โมดูลัสโค้งงอ (Flexural modulus) ความแข็งกด (Hardness) และความแข็งแรงกระแทก (Impact strength)
  - 4.3) ความหนาแน่น (Density)
  - 4.4) สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)
  - 4.5) สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) และเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถนำ CaHP ที่เตรียมจากเปลือกหอยแมลงภู่ ใช้เป็นสารหน่วงการติดไฟในกลุ่มพอสฟอรัสจากธรรมชาติได้
- 2) สามารถนำวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร และอุตสาหกรรม ทั้งเปลือกหอยแมลงภู่ และเส้นใยกาบมะพร้าวมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด และยังช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้
- 3) เป็นองค์ความรู้สำหรับการวิจัยต่อไปในการพัฒนาไม้พลาสติกคอมโพสิตสูตรต้านการลามไฟต่อไปในอนาคต

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 วัสดุประกอบหรือคอมโพสิต

### 2.1.1 นิยามและองค์ประกอบของวัสดุประกอบหรือคอมโพสิต

วัสดุประกอบหรือคอมโพสิต (Composites) หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยองค์ประกอบสองส่วนหรือมากกว่าที่แตกต่างอย่างเห็นได้ชัด (Distinct components) อยู่ด้วยกัน โดยเมื่อทั้งสองส่วนอยู่ด้วยกันแล้วทำให้เกิดสมบัติที่ดีขึ้น โดยเฉพาะทำให้วัสดุแข็งแรงขึ้นหรือเกิดการเสริมแรง (Reinforcing effect) องค์ประกอบสองส่วนหลักของคอมโพสิต [10] คือ

1. ส่วนเสริมแรง คือส่วนที่เป็นโครงสร้างที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุคอมโพสิต วัสดุที่เป็นส่วนเสริมแรงมีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง ส่วนเสริมแรงเป็นส่วนรับแรงหลัก (Principle load-carrying members) ของวัสดุคอมโพสิต ตัวอย่างของส่วนเสริมแรงที่สำคัญได้แก่ เส้นใย (Fibers) ชนิดต่างๆ เช่น เส้นใยแก้ว (Glass fibers) เส้นใยคาร์บอน (Carbon fibers) และเส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers) เป็นต้น

2. เมทริกซ์ คือองค์ประกอบที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) ทำหน้าที่เป็นตัวกลางถ่ายเทแรงที่ได้รับ (Load transfer medium) ไปสู่ส่วนเสริมแรงและเป็นวัสดุที่ทำหน้าที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกันให้อยู่ในตำแหน่งและการเรียงตัวที่กำหนด โดยล้อมรอบและป้องกันส่วนเสริมแรงจากการเสียหายเนื่องจากสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิสูง ความชื้น เป็นต้น มักมีความแข็งแรงและมอดุลัสน้อยกว่าส่วนเสริมแรง เมทริกซ์ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ พอลิเมอร์ โลหะ และเซรามิกส์

### 2.1.2 ชนิดของคอมโพสิต

ชนิดของคอมโพสิตสามารถแบ่งตามลักษณะส่วนเสริมแรงและลักษณะการเกิดของคอมโพสิต [11] ได้ดังนี้

1. การแบ่งตามลักษณะส่วนเสริมแรงสามารถแบ่งได้ ดังนี้

- 1.1 คอมโพสิตแบบเส้นใย (Fibrous composites) คือคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใย (Fibers) อาจเป็นเส้นใยสั้น (Short fiber) หรือเส้นใยยาวต่อเนื่อง (Continuous fiber) มักเป็นเส้นใยขนาดเล็กและมอดุลัสสูง ทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยสูงกว่าแนวอื่น

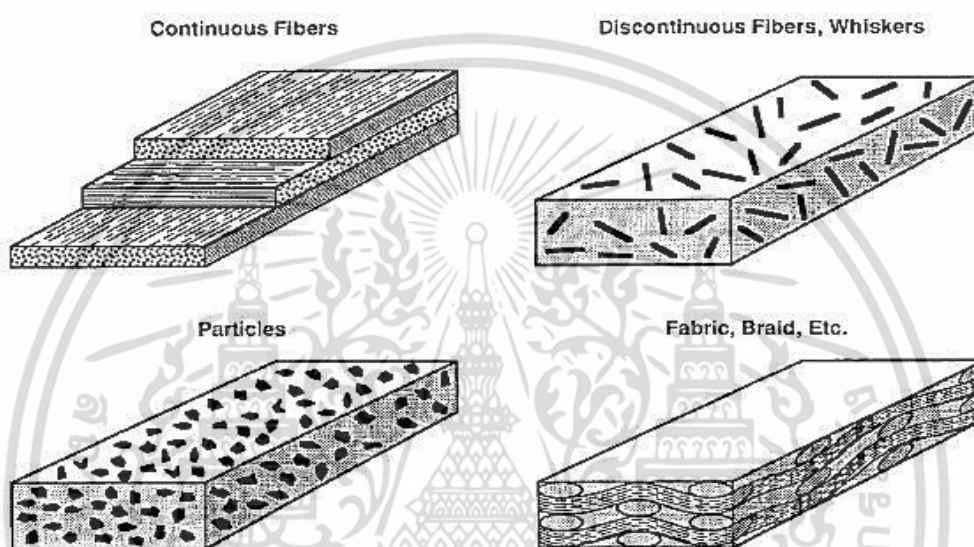
- 1.2 คอมโพสิตแบบแผ่นหรือลามิเนต (Laminar composites) คือคอมโพสิตที่ประกอบด้วยชั้นหรือแผ่นวัสดุที่ยึดติดกันด้วยตัวเชื่อมเมทริกซ์ มีลักษณะเป็นชั้น ๆ คล้ายแซนวิชหรือเป็นโครงสร้างคล้ายรังผึ้ง

- 1.3 คอมโพสิตแบบเป็นก้อน (Particulate composites) หรือคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเม็ด (Beads) แผ่น (Flake) หรือผง (Powder) ที่มีขนาดเล็ก (มักขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน)

## 2. การแบ่งตามลักษณะการเกิดของคอมโพสิต ได้ดังนี้

2.1 คอมโพสิตจากธรรมชาติ (Natural composites) คือวัสดุคอมโพสิตที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ไม้ ฟัน และกระดูก ไม้เป็นคอมโพสิตของเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose) เป็นส่วนเสริมแรง โดยมีสารจำพวกลิกนิน (Lignin) เป็นเมทริกซ์ยึดเซลลูโลสไว้ด้วยกัน ส่วนกระดูกและฟันเป็นคอมโพสิตของผลึกแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite) อยู่ในเมทริกซ์ของสารอินทรีย์เหนียวคอลลาเจน (Collagen) เป็นต้น

2.2 คอมโพสิตจากการสังเคราะห์ (Synthetic composites) คือวัสดุคอมโพสิตที่ได้จากวัสดุสังเคราะห์ เช่น พลาสติกเสริมแรง วัสดุไฟเบอร์กลาส เป็นต้น



รูปที่ 2.1 ชนิดของคอมโพสิต [12]

### 2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุคอมโพสิต

สมบัติของคอมโพสิตขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ [10] ได้แก่

1. การยึดกันระหว่างเมทริกซ์และส่วนเสริมแรง
2. สมบัติของส่วนเสริมแรง
3. ขนาดและรูปร่างของส่วนเสริมแรง
4. ปริมาณของส่วนเสริมแรง
5. กระบวนการผลิต
6. การจัดเรียงตัวและการกระจายตัวของส่วนเสริมแรง
7. ตำหนิในชิ้นงานคอมโพสิต เช่น ช่องว่าง (Voids) และรอยตำหนิ (Flaws)

### 2.1.4 ข้อดีและข้อเสียของวัสดุคอมโพสิต

1. ข้อดีของวัสดุคอมโพสิต [10]

1.1 มีสมบัติต่อน้ำหนักหรือความหนาแน่นสูง เช่น ความแข็งแรงจำเพาะ (Specific strength) โมดูลัสจำเพาะ (Specific modulus) ความแข็งจำเพาะ (Specific stiffness) เป็นต้น เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตมีความหนาแน่นต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.2 วัสดุคอมโพสิตมีน้ำหนักเบา
- 1.3 มีสมบัติหลากหลาย สามารถสร้างวัสดุคอมโพสิตให้เหมาะสมกับความต้องการ (Tailor-made properties) เพื่อความเหมาะสมในการใช้งาน เช่น เลือกชนิดเส้นใยและ เมทริกซ์ให้เหมาะสมกับการใช้งาน กำหนดปริมาณเส้นใยในคอมโพสิต การจัดเรียงให้เส้นใย (ส่วนเสริมแรง) เรียงตัวตามแนวรับแรง เป็นต้น
- 1.4 มีอายุการใช้งานยาวนาน มีสมบัติต้านทานการสึกกร่อนดี
- 1.5 มีสมบัติเชิงกลดี เช่น การรับแรงและแดมป์ (Damping) ความทนต่อการล้า (Fatigue resistance) เป็นต้น
- 1.6 มีเสถียรภาพของรูปร่างสูง เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficients of thermal expansion, CTE) ต่ำ เมื่อเทียบกับวัสดุอื่น
2. ข้อเสียของวัสดุคอมโพสิต [10]
  - 2.1 ต้นทุนการผลิตสูง เนื่องจากราคาของวัตถุดิบและเครื่องมือในการขึ้นรูปคอมโพสิตมีราคาแพง
  - 2.2 มักมีสมบัติแอนไอโซโทรปี (Anisotropy) เนื่องจากเรียงตัวของส่วนเสริมแรงเป็นสาเหตุให้คอมโพสิตไม่แข็งแรงในแนวตั้งฉากกับแนวเรียงตัว
  - 2.3 การต่อหรือเชื่อมติดกับวัสดุอื่นทำได้ยาก
  - 2.4 การตรวจวิเคราะห์ (Analysis) สมบัติของคอมโพสิตทำได้ยาก
  - 2.5 การทำลายและการนำกลับมาใช้ใหม่ทำได้ยาก

#### 2.1.5 การประยุกต์ใช้งานวัสดุคอมโพสิต

ในการประยุกต์ใช้งานวัสดุคอมโพสิตดังรูปที่ 2.2 แสดงชนิด การออกแบบรูปร่างและโครงสร้างของคอมโพสิตสามารถประยุกต์ใช้ได้กับการใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ (Automotive) เครื่องบิน (Aircraft) และอุปกรณ์กีฬา (Sporting goods) เป็นต้น และมีการใช้งานคอมโพสิตทดแทนวัสดุอื่น ๆ เช่น โลหะ วัสดุไม้ เป็นต้น เนื่องจากมีน้ำหนักเบา สมบัติจำเพาะดี ผลิตภัณฑ์คอมโพสิตมีชิ้นส่วนน้อยชิ้น ไม่ต้องการการประกอบมาก สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ [11]



รูปที่ 2.2 การใช้งานพลาสติกคอมโพสิต [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ไม้พลาสติกคอมโพสิต

### 2.2.1 นิยามของไม้พลาสติกคอมโพสิต

ไม้พลาสติกคอมโพสิตหรือวัสดุทดแทนไม้ เรียกสั้น ๆ ว่า “ไม้เทียม” คือวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับไม้ทุกประการ แต่เกิดจากกระบวนการผสมระหว่างเส้นใยธรรมชาติซึ่งทำหน้าที่เป็นส่วนเสริมแรงกับพลาสติกซึ่งทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ สามารถใช้งานได้เสมือนกับไม้จริง กล่าวคือสามารถนำไปใช้ในงานก่อสร้างอาคาร โดยใช้กับอุปกรณ์และเครื่องมือเกี่ยวกับการก่อสร้างได้เช่นเดียวกับงานไม้ เช่น การเลื่อย การเจาะ การตอกตะปู และการทำลวดลาย เป็นต้น ใช้เป็นไม้สำหรับปูพื้นบ้าน ไม้ปูพื้นริมสระว่ายน้ำ ไม้ระแนง ไม้ฝา รวมถึงสามารถนำมาผลิตเป็นเฟอร์นิเจอร์ เช่น โต๊ะ เก้าอี้ เติียงนอน เป็นต้น [14] ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างการใช้งานไม้พลาสติกคอมโพสิต [15]

### 2.2.2 โครงสร้างของไม้พลาสติกคอมโพสิต

โครงสร้างของไม้พลาสติกคอมโพสิตประกอบด้วยเส้นใยไม้และพลาสติก ซึ่งโครงสร้างของเส้นใยไม้และพลาสติกจัดเป็นวัสดุประเภทพอลิเมอร์เช่นเดียวกัน แต่แตกต่างกันตรงที่เส้นใยไม้เป็นวัสดุพอลิเมอร์จากธรรมชาติ ในขณะที่พลาสติกส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้น ดังนั้นสมบัติไม้จึงมีความไม่แน่นอน แต่ไม้พลาสติกคอมโพสิตสามารถกำหนดสมบัติตามความต้องการได้

โครงสร้างของพลาสติกมีหลากหลายชนิดแบ่งตามโครงสร้างทางเคมีและการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุล โดยพลาสติกมีโครงสร้างทางเคมีที่ต่างกันจึงทำให้มีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีต่างกัน ในการเลือกใช้พลาสติกที่นำมาประกอบกับเส้นใยไม้นั้น นอกจากการคำนึงถึงสมบัติที่ต้องการแล้วต้องคำนึงถึงความเป็นไปได้ในการผลิต และความเข้ากันได้ระหว่างเส้นใยไม้กับพลาสติก

โครงสร้างของไม้เป็นวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากโครงสร้างของไม้ประกอบขึ้นจากเซลล์เนื้อไม้ที่มีรูปร่างหลากหลายเรียงตัวเป็นชั้น ๆ แต่ละชั้นมีสมบัติต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของเซลล์ ความอุดมสมบูรณ์ของน้ำ อาหาร แสงแดดและสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ที่ต้นไม้ได้รับในขณะที่

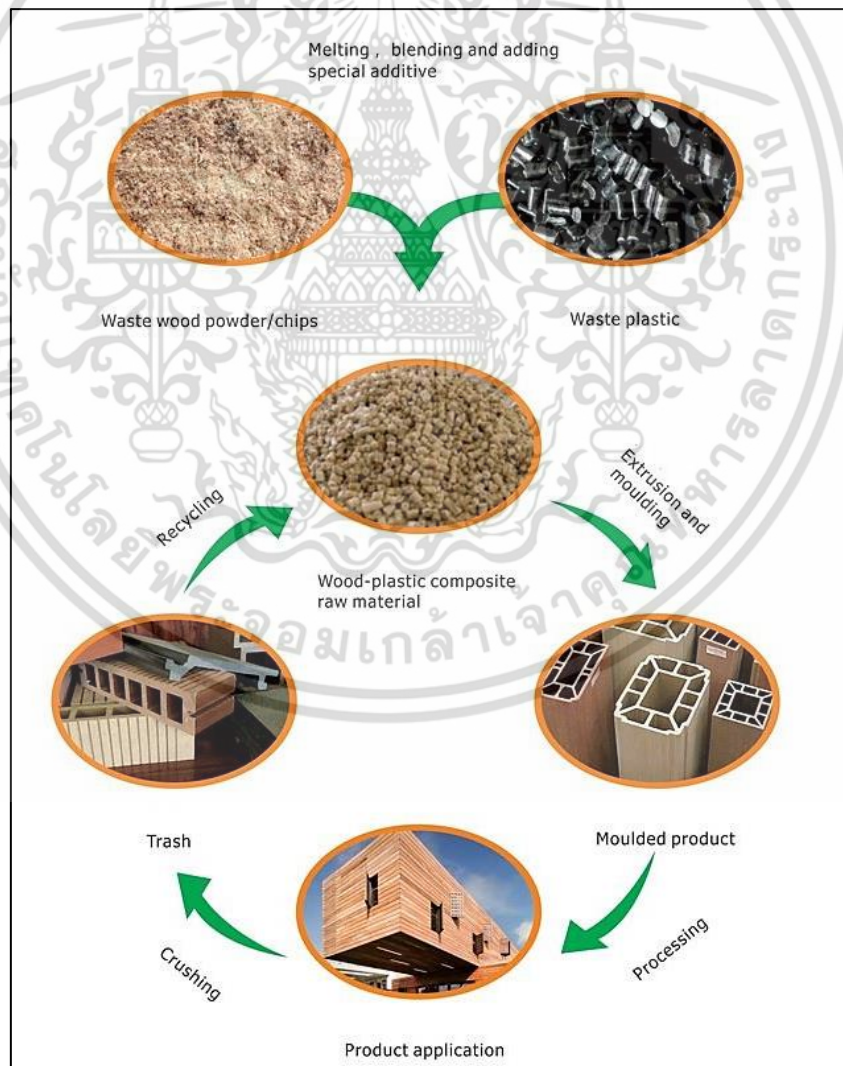
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการสร้างเซลล์นั้น ๆ จึงทำให้ไม่มีสมบัติทางกายภาพและเคมีที่แตกต่างกันไป นอกจากนี้สมบัติของไม้ยังขึ้นกับชนิดของไม้อีกด้วย [14]

### 2.2.3 กระบวนการผลิตไม้พลาสติกคอมโพสิต

การเตรียมวัตถุดิบและกระบวนการผลิต (Processing) ไม้พลาสติกคอมโพสิตขึ้นอยู่กับวิธีการขึ้นรูปที่เลือกใช้ เช่น กระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding process) ทั้งนี้เนื่องมาจากในการขึ้นรูปแต่ละวิธีมีข้อจำกัดแตกต่างกันออกไป บางวิธีอาจใช้ขนาดของวัตถุดิบที่ไม่ละเอียด แต่บางวิธีจำเป็นต้องเตรียมวัตถุดิบให้มีความละเอียดสูง เป็นผลทำให้ขั้นตอนในการเตรียมวัตถุดิบแตกต่างกันออกไป

ในปัจจุบันกระบวนการผลิตไม้พลาสติกคอมโพสิตในระดับอุตสาหกรรม ดังรูปที่ 2.4 นิยมขึ้นรูปไม้พลาสติกคอมโพสิตเป็นลักษณะเม็ดคอมปาวด์ (WPCs compound) ก่อน จากนั้นนำเม็ดคอมปาวด์ที่ได้ไปขึ้นรูปด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น ไม้พลาสติกคอมโพสิตสำหรับปูพื้นขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีด (Extrusion process) หรือเฟอร์นิเจอร์ที่มีรายละเอียดสูงมักขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding process) เป็นต้น [16]



รูปที่ 2.4 การผลิตไม้พลาสติกคอมโพสิตในอุตสาหกรรม [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.4 สมบัติของไม้พลาสติกคอมโพสิต

ไม้พลาสติกคอมโพสิตเป็นวัสดุที่นำทั้งเส้นใยไม้และพลาสติกมาผสมกัน จึงทำให้สมบัติเดิมของทั้งเส้นใยไม้และพลาสติกเปลี่ยนไป ทั้งนี้สัดส่วนของเส้นใยไม้และพลาสติกมีต่อสมบัติของไม้พลาสติกคอมโพสิตด้วย โดยส่วนใหญ่แล้วถ้าปริมาณของวัตถุดิบตัวใดมากกว่าสมบัติโดยรวม โน้มเอียงไปตามวัตถุดิบนั้น ซึ่งสามารถสรุปลักษณะเด่นของไม้พลาสติกคอมโพสิตที่ดีกว่าไม้และพลาสติกได้ [14] ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบลักษณะเด่นของไม้พลาสติกคอมโพสิตกับไม้และพลาสติก [14]

ไม้	พลาสติก	ไม้พลาสติกคอมโพสิต
ไม่ทนต่อแสง UV เมื่อใช้เป็นเวลานาน จึงเกิดการผุและหัก	ไม่ทนต่อแสง UV เมื่อใช้เป็นเวลานาน จึงกรอบและแตก	ทนทานต่อแสง UV ไม่กรอบ ไม่แตก และหักได้ยาก
ดูดซับน้ำได้มาก	ดูดซับน้ำได้น้อย	ดูดซับน้ำได้น้อย
เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ มีการยืดหดตัวได้น้อย	เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมิมีการยืดหดตัวได้มาก	เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีการยืดหดตัวตามความยาวเฉลี่ย 1 mm/m
มีสมบัติเชิงกลต่ำกว่า	มีสมบัติเชิงกลต่ำกว่า	มีสมบัติเชิงกลสูงกว่า
มีปัญหาจากปลวกและแมลงที่กัดกินเนื้อไม้	ไม่มีปัญหาจากปลวกและแมลงที่กัดกิน	ไม่มีปัญหาจากปลวกและแมลงที่กัดกินเนื้อไม้
มีน้ำหนักมาก	มีน้ำหนักเบากว่าไม้	มีน้ำหนักเบากว่าไม้
ลามไฟ สามารถติดไฟได้ง่าย	ขึ้นกับชนิดของพลาสติก แต่ส่วนใหญ่ติดไฟง่าย	สามารถพัฒนาให้เป็นวัสดุทดแทนไม้ที่เมื่อติดไฟแล้วสามารถดับไฟได้เอง

### 2.2.5 การใช้งานไม้พลาสติกคอมโพสิต

การใช้งานไม้พลาสติกคอมโพสิตสามารถใช้งานได้หลายประเภท [17] ดังนี้

1. ไม้พลาสติกคอมโพสิตที่เนื้อเป็นแบบตัน มีทั้งลักษณะผิวไม้แบบเรียบและมีลายไม้ ใช้การยึดติดด้วยสกรูเกลียวเหมือนงานไม้ทั่วไป สามารถเหลา เจาะ ขัด กลึง หรือตัดได้เหมือนไม้จริง และสามารถรับน้ำหนักได้ดีจึงเหมาะกับการใช้งานได้ทุกประเภท เช่น พื้นระเบียง ระแนง กันสาด ระแนงบังตา ไม้ฝาหรือผนัง รั้ว เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้เป็นเฟอร์นิเจอร์ไม้พลาสติกคอมโพสิต เช่น โต๊ะกลางยาว ชุดรับแขก เก้าอี้ เป็นต้น

2. ไม้พลาสติกคอมโพสิตที่มีเนื้อแบบกลวง น้ำหนักเบา มีลักษณะผิวแบบร่องกันลื่น และมีลายไม้สลักอีกด้าน ใช้การยึดติดด้วยร่องลื่นด้านข้างของไม้ (T-clip) โดยใช้สกรูเกลียวปล่อยยึดเข้ากับโครงสร้างพื้น นิยมใช้ในงานพื้นระเบียงภายนอกบ้าน เช่น พื้นในสวน พื้นรอบสระว่ายน้ำ เป็นต้น เพราะไม้พลาสติกคอมโพสิตทนปลวก ทนน้ำ

ตารางที่ 2.2 เป็นการรวบรวมข้อมูลมูลค่าทางการตลาดของวัสดุที่ใช้สำหรับทำพื้น-ระเบียง (Decking) ของบริษัท ฟรีโดเนีย กรุ๊ป ประเทศสหรัฐอเมริกาตั้งแต่ปี 2535 ถึง 2555 พบว่ามีมูลค่าทางการตลาดในการใช้ไม้พลาสติกคอมโพสิตมาแทนวัสดุไม้มากเพิ่มขึ้นทุกปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลมูลค่าทางการตลาดของวัสดุที่ใช้สำหรับทำพื้นระเบียง (Decking) [17]

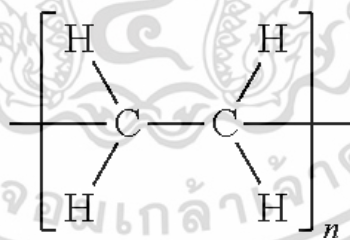
ปี	มูลค่าทางการตลาด (ล้านบาท)	ส่วนแบ่งในตลาด (%)		
		ไม้	พลาสติก	ไม้พลาสติกคอมโพสิต
2535	690	97	1	2
2545	1020	91	2	7
2548	1530	77	4	19
2549	1650	73	5	22
2555	1950	66	6	30

## 2.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

### 2.3.1 สมบัติทั่วไป

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง เป็นเทอร์โมพลาสติกชนิดหนึ่งที่ได้จากการสังเคราะห์สารปิโตรเลียม โดยผ่านกระบวนการซีเกอร์ (Ziegler process) มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงเกือบตลอด องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น  $(CH_2)_n$  ดังรูปที่ 2.5 มีความเป็นผลึกสูงเนื่องจากโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรง ไม่มีขั้ว มีสมบัติทนทานต่อสารเคมีสูง ต้านทานการซึมผ่านก๊าซและไอน้ำได้ดี มีสมบัติทนแรงกระแทกได้ดี โดยคุณสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงดังตารางที่ 2.3 ขึ้นอยู่กับ 4 ตัวแปรหลัก [18] คือ

1. ความหนาแน่น (Density)
2. น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight, MW)
3. การกระจายของน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight distribution, MWD)
4. สารเติมแต่ง (Additives)



HDPE

รูปที่ 2.5 โครงสร้างของ HDPE [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง [18]

สมบัติ	ค่าทดสอบ
ความเป็นผลึก (Crystalline, %)	60-80
ความหนาแน่น (Density, g/cm <sup>3</sup> )	0.962-0.968
จุดหลอมเหลว (Melting point, °C)	128-135
จุดคราก (Yield point, MPa)	28-40
มอดูลัส (Tensile modulus, MPa)	900-1200
ความแข็งแรงดึง (Tensile strength, MPa)	25-45
ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength, kJ/m <sup>2</sup> )	120
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (Elongation at break, %)	50-900

### 2.3.2 ข้อดีและข้อเสีย

1. ข้อดีของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง [19]
  - 1.1 ราคาไม่แพง
  - 1.2 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ
  - 1.3 ทนความชื้น
  - 1.4 ทนทานต่อกรดและเบส
  - 1.5 น้ำหนักเบา
2. ข้อเสียของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง [19]
  - 2.1 ไม่ทนทานต่อรังสี UV
  - 2.2 ไม่ทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศ
  - 2.3 ละลายในตัวทำละลายที่มีองค์ประกอบของคลอรีน

### 2.3.3 การประยุกต์ใช้งาน

การประยุกต์ใช้งานทั่วไปของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โดยนำมาใช้งานในปริมาณมากและหลากหลาย เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ดี ขึ้นรูปง่าย ราคาถูก ทั้งในอุตสาหกรรมเกษตร ประมง บรรจุก๊าซ เป็นต้น โดยนิยมนำมาผลิตเป็นฟิล์มสำหรับวัสดุและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เช่น แผ่นพลาสติกคลุมดิน ภาชนะบรรจุอาหาร ฉนวนสำหรับสายเคเบิล รวมทั้งชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมรถยนต์ เช่น ถังน้ำมันและบังโคลน เป็นต้น [19] ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จาก HDPE [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

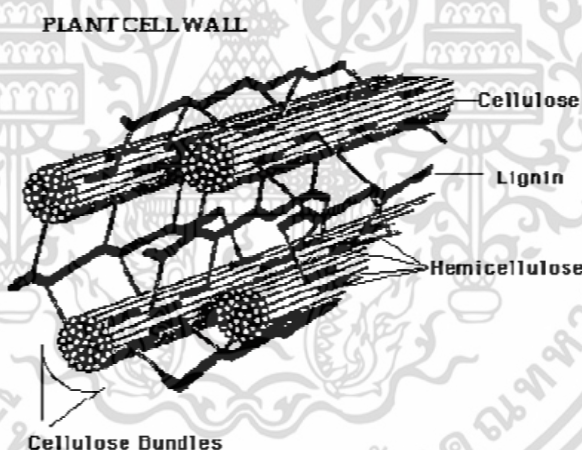
## 2.4 เส้นใยธรรมชาติ

### 2.4.1 ลักษณะทั่วไปของเส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุอินทรีย์ที่ได้จากส่วนต่าง ๆ ของพืช สัตว์และสินแร่ เช่น ฝ้าย (Cotton) เส้นใยมะพร้าว (Coconut coir) เส้นใยไหม (Silk) และแร่ใยหิน (Asbestos) เป็นต้น ซึ่งหาได้ง่าย ราคาถูก มีปริมาณมาก สามารถเกิดขึ้นใหม่และใช้ได้ต่อเนื่องเมื่อเทียบกับเส้นใยสังเคราะห์ รวมทั้งข้อดีของเส้นใยธรรมชาติช่วยลดความเสียหายของเครื่องจักรที่ใช้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ ช่วยลดต้นทุนการผลิต ช่วยปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ให้ดีขึ้น ดังนั้นเส้นใยธรรมชาติจึงเป็นเส้นใยที่นิยมนำมาใช้เป็นสารตัวเติม (Fillers) ในพลาสติก [21]

### 2.4.2 องค์ประกอบของเส้นใยธรรมชาติ

โครงสร้างของเส้นใยธรรมชาติที่ได้จากพืชประกอบด้วย 3 องค์ประกอบหลักได้แก่ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ดังรูปที่ 2.7 โดยทั่วไปปริมาณขององค์ประกอบทั้งสามในพืชแต่ละชนิดแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช สายพันธุ์ พื้นที่ การปลูก โดยเซลลูโลสอยู่ชั้นในสุดของผนังเซลล์ซึ่งจัดเรียงตัวอยู่ในชั้นไมโครไฟบริล (Microfibril) ที่ห่อหุ้มด้วยเมทริกซ์ของเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ซึ่งมีลักษณะแข็งหุ้มอยู่ชั้นนอกสุดของผนังเซลล์พืช [22]

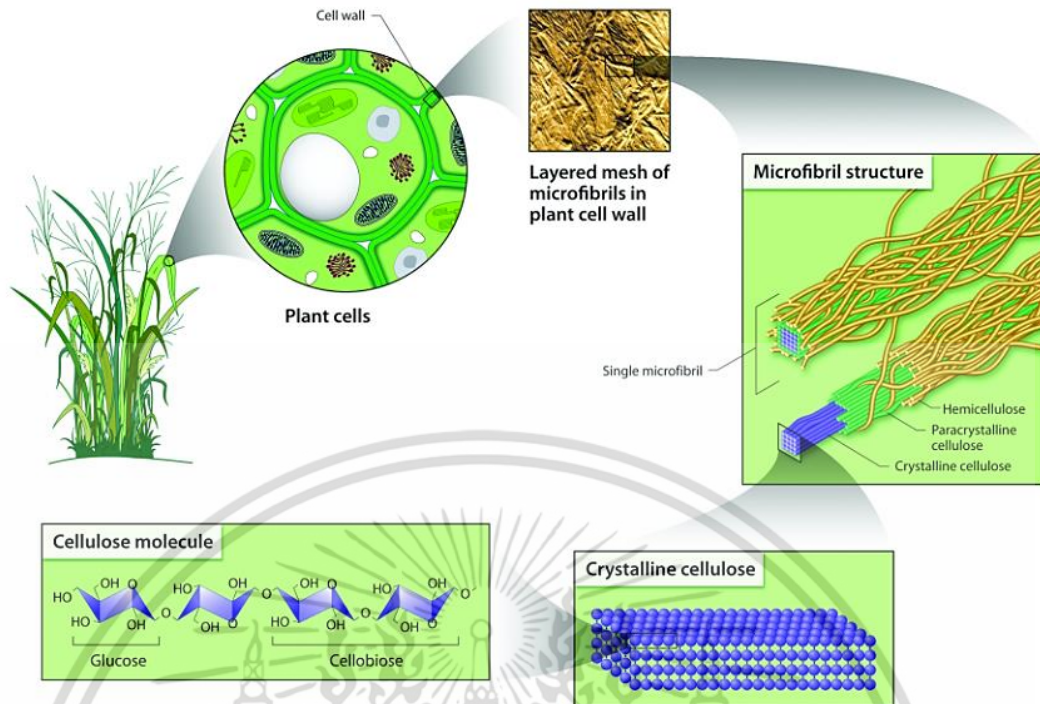


รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของเส้นใยธรรมชาติ [23]

#### 1. เซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharides) เชิงเส้นตรงที่ประกอบด้วยหน่วยซ้ำ ๆ กัน มีสูตรโมเลกุลทั่วไปคือ  $(C_6H_{12}O_5)_n$  ดังรูปที่ 2.8 เป็นโครงสร้างในเนื้อเยื่อพืช โดยพบรวมกับลิกนิน เพนโตแซน กัม แทนนิน ไขมัน สารที่ทำให้เกิดสี เป็นต้น เซลลูโลสมีหน่วยโมเลกุลยาวและแข็ง โครงสร้างของเซลลูโลสเป็นสายโซ่ตรงโดยที่สายโซ่โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวแบบ Fully extended chains ซึ่งมีแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่โมเลกุลด้วยพันธะไฮโดรเจนมีผลทำให้เกิดโครงสร้างผลึก ทำให้เซลลูโลสมีค่าองศาความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) สูง ส่งผลให้เซลลูโลสมีอุณหภูมิการหลอมตัวสูงมากจึงเกิดการสลายตัวก่อนการหลอมเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของเซลลูโลส [21]

### 1.1 สมบัติทางกายภาพของเซลลูโลส

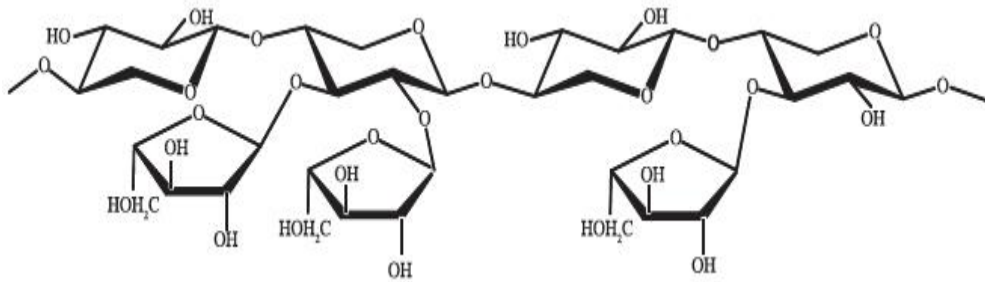
เซลลูโลสมีความหนาแน่นประมาณ  $1.5 \text{ g/cm}^3$  ความหนาแน่นของเส้นใยเดี่ยวมีค่าไม่แน่นอน ซึ่งแปรไปตามแหล่งที่มาและการปรับปรุงทางเคมี เซลลูโลสเป็นของแข็งไม่มีสี มีการดูดคายไอน้ำและของเหลวอื่น ๆ ปริมาณความชื้นของเซลลูโลสมีผลต่อสมบัติบางประการ เช่น ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เซลลูโลสไม่ละลายน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ แต่ละลายในกรดเข้มข้น เช่น 40% ของกรดไฮโดรคลอริก และ 78% ของกรดฟอสฟอริก เป็นต้น

### 2. เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลสมีสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ  $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$  โดย  $n$  คือจำนวนหน่วยซ้ำของเฮมิเซลลูโลส ดังรูปที่ 2.9 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยพอลิแซคคาไรด์คล้ายกับเซลลูโลส แต่มีข้อแตกต่างกับเซลลูโลส 3 ประการคือ

- เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด เช่น กลูโคส กาแลกโตส แมนโนส ซาโลส รวมทั้งกรดกลูคูโรนิกและกรดกาแลกทูโรนิก ในขณะที่เซลลูโลสประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสชนิดเดียวเป็นส่วนใหญ่
- สายโซ่พอลิเมอร์ของเฮมิเซลลูโลสส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นสายโซ่กึ่ง ในขณะที่สายโซ่พอลิเมอร์ของเซลลูโลสเป็นสายโซ่ตรง
- ระดับการเกิดพอลิแซคคาไรด์จากน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวของเซลลูโลส (Degree of polymerization) สูงกว่าเฮมิเซลลูโลส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



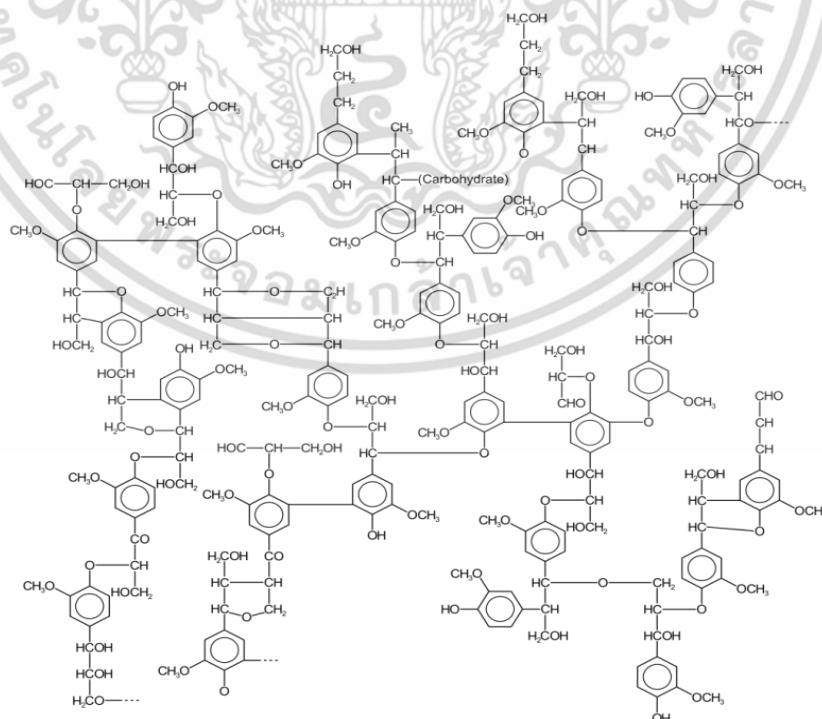
รูปที่ 2.9 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส [21]

### 2.1 สมบัติทางกายภาพของเฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลสโดยส่วนใหญ่พบที่ชั้นนอกสุดของผนังเซลล์ และพบเป็นส่วนน้อยในผนังเซลล์ชั้นที่สอง โดยสามารถถูกย่อยและสกัดออกจากเซลล์ผนังพืชได้ในสภาวะไม่รุนแรง เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลมีโซ่กิ่งเป็นจำนวนมากคล้ายกับโครงสร้างของเพกติน โมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสชอบน้ำทำให้เกิดการรวมตัวกับน้ำกลายเป็นเจลได้ ขณะที่เมื่อเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ไม่สามารถสกัดออกได้ด้วยน้ำ แต่สามารถละลายได้ในเบส

### 3. ลิกนิน

ลิกนินเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเชิงซ้อน มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ดังรูปที่ 2.10 และเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ โครงสร้างของลิกนินประกอบด้วยอะลิฟาติกและอะโรมาติกอยู่ร่วมกัน สารอะโรมาติกในโครงสร้างของลิกนินทำให้ลิกนินมีเสถียรภาพสูง ไม่ละลายน้ำ นอกจากนี้ลิกนินยังเป็นส่วนสำคัญที่ทำหน้าที่ยึดเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเข้าไว้ด้วยกัน ทำให้พืชที่มีปริมาณลิกนินอยู่มากมีความแข็งแรงและทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศสูง



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของลิกนิน [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม้แต่ละชนิดมีอัตราส่วนระหว่างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่ไม่เท่ากัน ขึ้นกับอายุของไม้และชนิดของไม้ โดยที่หากลิกนินมีมากแสดงว่ามีความแข็งแรงสูง ดังแสดงในตารางที่ 2.4 แสดงส่วนประกอบของเส้นใยธรรมชาติชนิดต่าง ๆ

ตารางที่ 2.4 ส่วนประกอบของเส้นใยธรรมชาติชนิดต่าง ๆ [22]

ชนิดเส้นใย	เซลลูโลส (%)	เฮมิเซลลูโลส (%)	ลิกนิน (%)
กล้วย	60-65	25-30	5-8
สับปะรด	80	16-19	12
มะพร้าว	43	1	45
ลินิน	70-72	14	4-5
ปอกระเจา	61-63	13	5-13
ฝ้าย	90	6	-
ป่านรามี่	80-85	3-4	0.5
ป่านศรนารายณ์	60-67	10-15	8-12
ฟางข้าว	40	28	18

#### 2.4.3 สมบัติของเส้นใยธรรมชาติ

สมบัติที่แตกต่างกันของเส้นใยขึ้นกับโครงสร้างทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และการจัดเรียงตัวของโมเลกุล [22]

1. ความยาวของเส้นใย (Fiber length) ธรรมชาติโดยทั่วไป เส้นใยมีความยาวที่ค่อนข้างแตกต่างกันมากขึ้นกับสภาพดินฟ้าอากาศ น้ำ หรือธาตุอาหารในดิน ซึ่งความยาวของเส้นใยมีผลต่อสมบัติและการนำไปใช้งาน

- เส้นใยสั้นเป็นเส้นใยยาวมาก่อนแล้วจากนั้นนำมาตัดให้เป็นเส้นใยให้มีขนาดตามที่กำหนด

- เส้นใยยาวเป็นเส้นใยที่เกิดจากการสังเคราะห์มากกว่าเส้นใยจากธรรมชาติ

2. ขนาดเส้นใย (Fiber size) เส้นใยธรรมชาติมักมีขนาดไม่สม่ำเสมอ คุณภาพของเส้นใยธรรมชาติมักวัดจากความละเอียดของเส้นใย การวัดความละเอียดมักวัดจากเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของเส้นใยในหน่วยของไมโครเมตร

3. ความหยักของเส้นใย (Crimp) ความหยักของเส้นใยช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะ (Cohesiveness) ระหว่างเส้นใยทำให้สามารถคืนตัวจากแรงอัด (Resilience) ได้ดี มีความต้านทานต่อแรงเสียดสี (Abrasion) และมีความยืดหยุ่น

4. องค์ประกอบทางเคมีและการจัดเรียงตัวของโมเลกุล โมเลกุลหรือพอลิเมอร์ที่อยู่ในเส้นใยมีการจัดเรียงตัวที่แตกต่างกัน เมื่อแต่ละโมเลกุลมีการจัดเรียงตัวอย่างไรทิศทางทำให้เส้นใยบริเวณนั้นมีความเป็นอสัณฐาน (Amorphous) ส่วนบริเวณที่โมเลกุลจัดเรียงซ้อนกันอย่างเป็นระเบียบมีความเป็นผลึก (Crystallinity) เกิดขึ้น โดยเส้นใยที่มีความเป็นผลึกมากมีความแข็งแรงมากกว่าเส้นใยที่มีความเป็นผลึกน้อยกว่า แต่หากพิจารณาถึงทิศทางการจัดเรียงตัวของโมเลกุล หากโมเลกุลจัดเรียงตัวอยู่ในทิศทางที่ขนานกับแกนตามความยาวของเส้นใยช่วยให้เส้นใยมีความแข็งแรงมากขึ้น เนื่องจากโมเลกุลจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกับแรงที่กระทำต่อเส้นใย แต่หากโมเลกุลของเส้นใยนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใยจัดเรียงตัวไม่ขนานกับแกนตามยาวของเส้นใย ทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงน้อยกว่า ตารางที่ 2.5 แสดงสมบัติทางกายภาพของเส้นใยธรรมชาติชนิดต่าง ๆ

ตารางที่ 2.5 สมบัติทางกายภาพของเส้นใยธรรมชาติชนิดต่าง ๆ [22]

ชนิดเส้นใย	ความยาว (mm)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	มอดุลัส (GPa)	ความแข็งแรงดึง (MPa)	เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (%)
กล้วย	8-30	0.8-2.5	1,350	1.4	95	5.9
สับปะรด	10-90	0.2-8.8	1,543	14.5	413	3.4
มะพร้าว	50-350	0.1-0.4	1,440	0.9	200	29.0
ลินิน	500	-	1,540	100.0	1,000	2.0
ปอกระเจา	1,800	0.1-0.2	1,500	32.0	350	1.7
ฝ้าย	-	-	1,600	11.0	350	2.0-10.0
ป่านรามิ	-	-	-	33.0	585	2.0-3.5
ป่านศรนารายณ์	-	0.5-2.0	1,450	100.0	1,100	-

#### 2.4.4 ข้อดีและข้อเสียของเส้นใยธรรมชาติ

ในปัจจุบันมีการใช้ส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยธรรมชาติมากขึ้นเนื่องจากมีข้อดีมากกว่าเส้นใยสังเคราะห์หลายประการ [22] ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ข้อดีและข้อเสียของเส้นใยธรรมชาติ [22]

เส้นใยธรรมชาติ	เส้นใยสังเคราะห์
ข้อดี	ข้อดี
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. สามารถย่อยสลายได้ง่าย</li> <li>2. สามารถเสริมแรงได้</li> <li>3. มีใช้ได้ไม่หมดสิ้น</li> <li>4. เป็นฉนวนทางความร้อน</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. นำไปใช้ได้หลากหลาย</li> <li>2. สามารถปรับปรุงสมบัติได้หลากหลาย</li> <li>3. มีอายุการใช้งานยาวนาน</li> </ol>
ข้อเสีย	ข้อเสีย
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. อายุการใช้งานสั้น</li> <li>2. ปรับปรุงสมบัติได้น้อย</li> <li>3. มีข้อจำกัดในการใช้งาน</li> <li>4. ติดไฟได้</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ย่อยสลายยาก</li> <li>2. ราคาแพง</li> <li>3. การผลิตทำได้ยากและใช้พลังงานสูง</li> <li>4. มีข้อจำกัด</li> </ol>

## 2.5 เส้นใยมะพร้าว

### 2.5.1 ลักษณะทั่วไปของเส้นใยมะพร้าว

มะพร้าวมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Cocos nucifera* L. อยู่ในตระกูลปาล์ม ลักษณะรูปทรงปาล์ม (Palm shape) เป็นต้นไม้ขนาดใหญ่ตรงมีความสูงประมาณ 15-20 เมตร มีขนาดทรงพุ่ม 3 เมตร ใบยาวเรียวยาวสีเขียว ลำต้นสีน้ำตาล ผิวสัมผัสหยาบ [24] โดยเส้นใยมะพร้าวได้มาจากส่วน

เอกลสารนี้ไม่ผ่านการใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของกาบมะพร้าว ดังรูปที่ 2.11 เส้นใยมะพร้าวเป็นเส้นใยจากธรรมชาติซึ่งมีราคาถูกกว่าเส้นใยสังเคราะห์เป็นอย่างมากซึ่งประเทศไทยมีเนื้อที่การปลูกมะพร้าวมากถึงประมาณ 1.31 ล้านไร่ มีผลผลิตมะพร้าวมากกว่า 1.06 ล้านตันต่อปี เห็นได้ว่าประเทศไทยมีผลผลิตมะพร้าวปริมาณมาก ราคาถูก จึงเหมาะกับการนำเส้นใยมะพร้าวซึ่งเป็นกากเหลือจากอุตสาหกรรมมาใช้เป็นส่วนเสริมแรงในไม้พลาสติกคอมโพสิต ทั้งยังลดปริมาณการใช้พอลิเมอร์ซึ่งเป็นวัสดุที่ต้องใช้เวลานานในการย่อยสลาย ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ ปลอดภัยกับมนุษย์และสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้เส้นใยมะพร้าวยังมีความหนาแน่นต่ำทำให้น้ำหนักเบาและมีความแข็งแรงจำเพาะสูง



รูปที่ 2.11 เส้นใยมะพร้าว [24]

### 2.5.2 การใช้งานเส้นใยมะพร้าว

เส้นใยมะพร้าวมีข้อดีมากมายดังนั้นเส้นใยมะพร้าวจึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรม รวมทั้งเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในชีวิตประจำวัน [25] ดังรูปที่ 2.12 ได้แก่

- ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตที่นอนเพื่อสุขภาพ เนื่องจากที่นอนจากเส้นใยมะพร้าวมีความสามารถในการหมุนเวียนอากาศสูงกว่าที่นอนจากยางพารา
- ใช้ผลิตเชือกเกลียวที่มีความเหนียว แข็งแรง ทนทาน มีสมบัติใกล้เคียงกับเชือกปอ
- ใช้ในอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น การใช้เป็นฐานรองเพื่อการยึดเกาะของต้นกล้า และต้นกล้วยไม้ หรือใช้แทนหญ้าและฟางคลุมพื้นดินรอบ ๆ ต้นไม้เพื่อรักษาความชื้น
- ใช้เป็นส่วนเสริมแรงของคอมโพสิตเพื่อทำเป็นวัสดุทดแทนไม้
- ใช้ผลิตเป็นส่วนประกอบของอิฐมวลเบา



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างการใช้งานเส้นใยมะพร้าว [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.3 การเตรียมเส้นใยมะพร้าว

การเตรียมเส้นใยเพื่อใช้เป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรงในไม้พลาสติกคอมโพสิตสามารถเตรียมได้ 3 กระบวนการ [12] คือ

1. กระบวนการเชิงกล (Mechanical pulp, MP) เป็นการใช้แรงงานกลเพื่อให้ได้เส้นใยที่มีขนาดต่าง ๆ ตามต้องการ เครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิตเชิงกลได้แก่ เครื่องบด (Grinding machine)

2. กระบวนการความร้อนเชิงกล (Thermomechanical pulp, TMP) เป็นกระบวนการที่ใช้ทั้งความร้อนและแรงเชิงกล เริ่มจากการนำชิ้นไม้เข้าไปในเครื่องนึ่งไอน้ำภายใต้ความดันไอจนอุณหภูมิไอน้ำสูงกว่า 140°C ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้ลิกนินอ่อนตัว เรียกว่า จุดเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition point) หรือจุดอ่อนตัว (Softening point) แล้วจึงทำการบดชิ้นไม้ด้วยวิธีการเสียดสี (Attrition action) ซึ่งอุปกรณ์ประกอบไปด้วยจานบดที่มีผิวหยาบเป็นร่องสองจาน โดยจานหนึ่งหรือจานสองหมุนสวนทางเสียดสีกันให้ชิ้นไม้ที่อยู่ระหว่างจานทั้งสองแตกแยกออกจากกันเป็นเส้นใยหรือกลุ่มของเส้นใย ผลผลิตของเส้นใยได้ประมาณ 90-95% ขึ้นอยู่กับสถานะในการแยก ได้แก่ อุณหภูมิ ความดันไอน้ำ เวลาในการนึ่งชิ้นไม้ และเวลาในการบดเยื่อ มีความแปรผันขึ้นอยู่กับชนิดไม้ ความหนาแน่นของไม้ ความชื้น และรูปทรงทางเรขาคณิตของชิ้นไม้

3. กระบวนการทางเคมี (Chemical pulp, CP) เป็นกระบวนการใช้สารเคมีในการเตรียมเส้นใย โดยนำชิ้นไม้เข้าไปในถังปฏิกรณ์ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูงประมาณ 125-182°C ซึ่งไม่มีกระบวนการเชิงกลในการแยก แต่ใช้สารเคมีที่มีสถานะเป็นเบส (Alkaline process) หรือสารเคมีที่มีสถานะเป็นกรด (Acidic (sulfite) process) เข้าทำปฏิกิริยาละลายลิกนินที่อ่อนตัวจากชิ้นไม้จนได้เป็นเส้นใย ได้ผลผลิตเพียง 40-60% ระยะเวลาที่ใช้มากกว่า 1-5 ชั่วโมง ต้นทุนสูง แต่เส้นใยที่ได้มีความบริสุทธิ์มากกว่าการแยกเส้นใยชนิดอื่น เนื่องจากลิกนินและเฮมิเซลลูโลสถูกแยกออกเกือบทั้งหมด ลักษณะของเส้นใยยุบและอ่อนตัวจากเดิมที่มีความแข็งแรงต่าง รูปทรงกลมลักษณะคล้ายโบว์รีบบิ้น มีพื้นที่ผิวมากขึ้นเพื่อเกิดพันธะไฮโดรเจน ซึ่งเป็นลักษณะที่ต้องการในกระบวนการทำกระดาษ

## 2.6 เปลือกหอย

### 2.6.1 โครงสร้างของเปลือกหอย

โครงสร้างเปลือกหอยประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ถึง 95% และวัสดุอินทรีย์ปริมาณเล็กน้อย แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นวัสดุอินทรีย์ที่ได้รับความสนใจว่าเป็นชีววัสดุในธรรมชาติชนิดหนึ่งที่สามารถให้ผลผลิตทางด้านอุตสาหกรรมที่หลากหลาย เช่น สารตัวเติมในอุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมสี และอุตสาหกรรมทางการแพทย์ [26] โดยในประเทศไทยมีการบริโภคและส่งออกเนื้อหอยแมลงภู่ประมาณปีละ 1 แสนตัน โดยเปลือกหอยดังรูปที่ 2.13 เป็นส่วนที่ไร้ประโยชน์ถูกทิ้ง ทำให้เป็นปัญหาเรื่องมลพิษทางสิ่งแวดล้อม ดังนั้นหากสามารถนำเปลือกหอยมาใช้ประโยชน์ได้ เป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มและกำจัดปัญหามลพิษทางสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 2.13 เปลือกหอยแมลงภู [27]

### 2.6.2 ชั้นของเปลือกหอย

เปลือกหอยประกอบด้วยสารจำพวกแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นส่วนใหญ่ และมีสารอื่น ๆ เป็นส่วนน้อย เช่น แคลเซียมฟอสเฟต แมกนีเซียมฟอสเฟต แมกนีเซียมซิลิเกต แมกนีเซียมคาร์บอเนต โปรตีนประเภทคอนโคไอลิน (Concholin) เป็นต้น โดยชั้นของเปลือกหอยแบ่งออกเป็น 3 ชั้น ดังนี้ [26]

- ชั้นนอกสุด เรียกว่า ชั้นผิววนอก (Periostracum layer) ประกอบด้วย โปรตีนประเภทคอนโคไอลินเป็นชั้นที่บาง หลุดได้ง่าย และสารให้สีจำพวกโลหะออกไซด์
- ชั้นกลาง เรียก ชั้นแคลเซียม (Prismatic layer) ประกอบด้วย ผลึกรูปต่าง ๆ กันของสารประกอบแคลเซียม ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแคลไซต์ (Calcite) เป็นชั้นที่หนาและมีความแข็งแรงที่สุดของเปลือกหอย
- ชั้นในสุด เรียก ชั้นมุก (Nacreous layer) ประกอบด้วยผลึกรูปต่าง ๆ กันของสารประกอบแคลเซียมซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูปของอราโกไนท์ (Aragonite) เป็นชั้นที่เรียบ มีสีขาวขุ่นและเป็นมันวาว

### 2.6.3 การใช้ประโยชน์เปลือกหอย

การใช้ประโยชน์เปลือกหอยสามารถใช้ได้หลายด้าน [27] ได้แก่

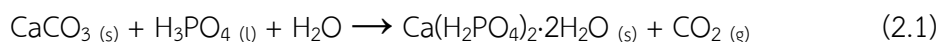
- ด้านตกแต่งเพื่อความสวยงาม โดยเปลือกหอยมีความโดดเด่นในด้านสีที่สวยงาม ความมันวาว และรูปทรงที่เป็นเอกลักษณ์ ดังนั้นจึงมีการนำเปลือกหอยมาประดิษฐ์เป็นเครื่องประดับ เช่น ต่างหู สร้อยคอ เป็นต้น รวมทั้งยังนำมาประดิษฐ์เป็นวัสดุตกแต่งบ้านและสวน
- ด้านการแพทย์ โดยในปัจจุบันมีหลากหลายงานวิจัยที่ศึกษาโดยการนำเปลือกหอยไปพัฒนาให้เป็นกระดูกเทียมเพื่อปลูกถ่ายในมนุษย์
- ด้านอุตสาหกรรม โดยในประเทศไทยมีเปลือกหอยเหลือทิ้งเป็นปริมาณมากจึงทำให้มีราคาถูกลง ซึ่งองค์ประกอบหลักของเปลือกหอยคือแคลเซียมคาร์บอเนตจึงสามารถนำมาใช้เป็นสารตัวเติมเพิ่มเนื้อในอุตสาหกรรมพลาสติกยางได้

### 2.6.4 แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรต

แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรตดังรูปที่ 2.14 เตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากเปลือกหอยและกรดฟอสฟอริกโดยใช้อะซิโตนเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวกลาง ซึ่งสามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิห้องและใช้เวลาประมาณ 15 นาที [3] ดังสมการที่ 2.1 สมบัติโดยทั่วไปของแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตแสดงดังตารางที่ 2.7



ตารางที่ 2.7 สมบัติโดยทั่วไปของแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรต [3]

สมบัติ	ค่าที่แสดง
ความหนาแน่น (Density, g/cm <sup>3</sup> )	2.31
จุดวาบไฟ	เป็นวัสดุที่ไม่ติดไฟ
ลักษณะ	เป็นผงสีขาว
อุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition temperature, °C)	ประมาณ 100-500

ในปัจจุบันการใช้ประโยชน์ของแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตมักใช้ในงานทางด้าน-การเกษตร เช่น ใช้เป็นปุ๋ยที่มีปริมาณฟอสฟอรัสสูง เป็นต้น



รูปที่ 2.14 แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรต [3]

## 2.7 สารเติมแต่งในพอลิเมอร์

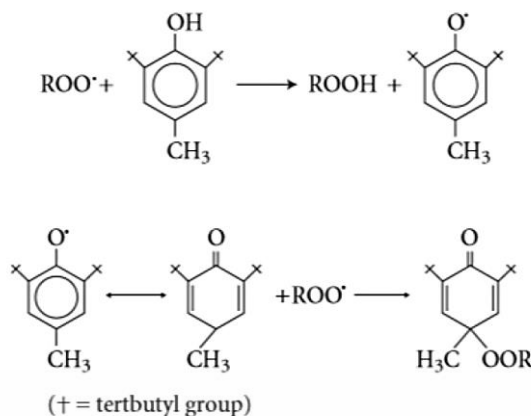
สารเติมแต่ง (Additives) ในพอลิเมอร์ คือสารที่เติมเข้ากับพอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการ เนื่องด้วยความแตกต่างทางด้านสมบัติและโครงสร้างระหว่างไม้กับพอลิเมอร์ที่อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพและสมบัติของไม้พลาสติกคอมโพสิตได้ เช่น ความเข้ากันได้ (Compatibility) ของเส้นใยไม้และพอลิเมอร์ เสถียรภาพทางความร้อน (Heat stability) ความยากง่ายในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ เป็นต้น นอกจากนี้สารเติมแต่งในพอลิเมอร์ช่วยปรับปรุงสมบัติพื้นฐานแล้ว ยังมีสารเติมแต่งอีกหลายชนิดที่เมื่อเติมลงไปในพอลิเมอร์แล้วทำให้มีสมบัติจำเพาะมากขึ้น เช่น สารหน่วงการติดไฟ เป็นต้น

ลักษณะทั่วไปของสารเติมแต่งอาจมีสถานะเป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ บางชนิดผสมอยู่ในพลาสติกทุกชนิด บางชนิดมีอยู่ในพลาสติกที่ใช้เฉพาะทาง บางชนิดไม่เป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ เช่น สารตัวเติมและบางชนิดสามารถละลายได้ดีในพอลิเมอร์ เช่น สารต้านการออกซิเดชัน สารเติมแต่งที่ดีควรมีสมบัติ [28] ดังนี้

1. ทำหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพและราคาถูก
2. มีความเสถียรภายใต้สภาวะในกระบวนการผลิตและการใช้งาน
3. ไม่ควรเคลื่อนตัวหรือแพร่ (Bleeding) ออกจากชิ้นพลาสติกไปเจือปนกับวัสดุข้างเคียงได้ง่ายและแยกตัวออกมาสะสมบริเวณผิวของพลาสติก (Blooming)

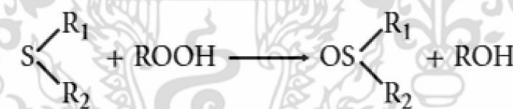
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 2.16 การทำงานของสารต้านการออกซิเดชันปฐมภูมิ [29]

2. สารต้านการออกซิเดชันทุติยภูมิ (Secondary antioxidant) คือสารที่ทำหน้าที่ช่วยเสริมกับสารต้านการออกซิเดชันปฐมภูมิ ในบางครั้งการใช้สารต้านการออกซิเดชันปฐมภูมิไม่สามารถป้องกันการเกิดเปอร์ออกไซด์ได้ จึงต้องเติมสารอีกชนิดลงไปเพื่อเป็นกลไกป้องกันขั้นที่สอง โดยสารต้านการออกซิเดชันทุติยภูมิสลายเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นได้แต่ไม่สามารถยับยั้งการเกิดอนุมูลอิสระได้ ดังรูปที่ 2.17 ทัวไปสารต้านการออกซิเดชันทุติยภูมิมี 2 ชนิดคือ อะลิฟาติกซัลไฟด์ (Aliphatic sulfides) และสารอินทรีย์ฟอสไฟต์ (Organic phosphites)



รูปที่ 2.17 การทำงานของสารต้านการออกซิเดชันทุติยภูมิ [29]

### 2.7.2 สารช่วยผสม

สารช่วยผสม (Compatibilizer) เป็นสารเติมแต่งที่ส่วนใหญ่เติมลงในพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว เพื่อทำให้สารเติมแต่งชนิดอื่น ๆ ที่มีขั้ว เช่น สารตัวเติมทั้งเสริมแรงและไม่เสริมแรง สามารถกระจายตัวได้ดีขึ้น โดยปกติสารช่วยผสมประกอบด้วยด้านที่มีขั้วเพื่อเกิดพันธะหรือแรงดึงดูดกับส่วนเสริมแรงที่มีขั้วและด้านที่ไม่มีขั้วเกิดพันธะหรือแรงดึงดูดกับพอลิเมอร์ซึ่งไม่มีขั้ว ทำให้ส่วนเสริมแรงยึดเกาะกับพอลิเมอร์ได้ดีขึ้นส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต

โดยทั่วไปสารช่วยผสมที่นิยมใช้สำหรับพอลิเอทิลีน คือพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิก-แอนไฮไดรด์ (Polyethylene grafted maleic anhydride, PE-g-MA) สามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างพอลิเอทิลีนกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์โดยมีเปอร์ออกไซด์ เช่น Tert-butyl peroxide เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม PE-g-MA ช่วยปรับปรุงการยึดติดและการกระจายตัวของเส้นใยมะพร้าวที่มีขั้วในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงซึ่งไม่มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซัว โดย PE-g-MA โครงสร้างมีทั้งส่วนที่ไม่ว่องไวซึ่งสามารถเกิดแรงยึดเหนี่ยวแบบแวนเดอร์วาลส์กับพอลิเมอร์และส่วนที่ว่องไวเกิดพันธะโควาเลนต์กับหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนผิวเส้นใย [30]

### 2.7.3 สารหล่อลื่น

สารหล่อลื่น (Lubricants) คือสารเติมแต่งที่เติมลงไปในพอลิเมอร์เพื่อช่วยให้กระบวนการผลิตในขั้นตอนต่าง ๆ เป็นไปได้ง่ายยิ่งขึ้น การนำสารหล่อลื่นมาใช้ช่วยทำให้แรงเสียดทานระหว่างโมเลกุลลดลง ช่วยปรับสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ ช่วยลดอุณหภูมิของกระบวนการให้ลดลง ช่วยประหยัดพลังงาน และเพิ่มอัตราการผลิต ซึ่งสารหล่อลื่นแบ่งออกเป็นสองประเภท คือสารหล่อลื่นภายในและสารหล่อลื่นภายนอก [29]

- สารหล่อลื่นภายใน (Internal lubricants) คือสารที่ช่วยในการไหลและลดความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลว กล่าวคือสารหล่อลื่นภายในเป็นสารที่โมเลกุลขนาดเล็กสามารถเข้าได้ดีกับพอลิเมอร์ดังนั้นเมื่อเติมลงไปจึงช่วยช่วยลดแรงระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้

- สารหล่อลื่นภายนอก (External lubricants) คือสารที่เมื่อเติมลงไปแต่ไม่สามารถละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ได้ ในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปสารหล่อลื่นภายนอกจะเกิดขึ้นฟิล์มอยู่ระหว่างผิวพอลิเมอร์และโลหะร้อนทำให้แรงยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์และโลหะลดลง

### 2.7.4 สารหน่วงการติดไฟ

สารหน่วงการติดไฟ (Flame retardant) คือสารเติมแต่งที่เติมลงไปในพอลิเมอร์ เพื่อลดหรือหน่วงกระบวนการเผาไหม้ของพอลิเมอร์ในช่วงต่าง ๆ เช่น ช่วงที่มีความร้อนเพิ่มขึ้น ช่วงที่วัสดุเกิดการสลายตัว และช่วงของการจุดติดของประกายไฟหรือป้องกันไม่ให้เปลวไฟเกิดการขยายตัวเป็นวงกว้าง ทำให้สามารถลดความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการเกิดอัคคีภัยได้ [31]

#### 1. ประเภทของสารหน่วงการติดไฟ

##### 1.1 สารหน่วงการติดไฟประเภทสารอนินทรีย์ (Inorganic flame retardants)

สารหน่วงการติดไฟประเภทอนินทรีย์ที่นิยมใช้ ได้แก่ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และสารประกอบโบรอน สารหน่วงการติดไฟประเภทนี้สลายตัวเพื่อปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำเพื่อลดปริมาณก๊าซที่ติดไฟได้และทำให้พอลิเมอร์เย็นลงเนื่องจากปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic reaction) ดังตารางที่ 2.8 ซึ่งสารหน่วงการติดไฟประเภทนี้มีราคาถูกไม่เป็นพิษ แล้วยังมีสมบัติในการลดควันที่เกิดจากการเผาไหม้ อย่างไรก็ตามสารประเภทนี้มีความคงทนต่ำ ต้องใส่ในปริมาณสูงจึงสามารถหน่วงการติดไฟในพอลิเมอร์ได้ ซึ่งการใส่สารหน่วงไฟในปริมาณสูงทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ลดลง น้ำหนักมากและต้นทุนการผลิตสูง [32]

ตารางที่ 2.8 สมบัติบางประการของ  $Mg(OH)_2$  และ  $Al(OH)_3$  [32]

สมบัติ	$Al(OH)_3$	$Mg(OH)_2$
ปริมาณน้ำ (Bound water, %)	32	31
อุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition temperature, °C)	220	320
เอนทาลปีการสลายตัว (Enthalpy of decomposition, J/g)	-280	-382
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	2.42	2.36

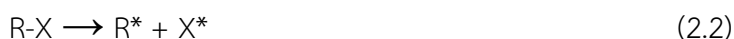
เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 สารหน่วงการติดไฟฮาโลเจน (Halogen based flame retardants)

สารหน่วงการติดไฟประเภทฮาโลเจนมีกลไกการหน่วงไฟด้วยการขัดขวางทางเคมีในวัฏภาคก๊าซของสารหน่วงการติดไฟดังปฏิกิริยา [33]

### 1.2.1 การแตกตัวและปลดปล่อยฮาโลเจนเรดิคัล (Halogen radicals)



โดย  $X^*$  คือ  $Cl^*$  หรือ  $Br^*$  และ  $R-X$  คือ สารหน่วงการติดไฟ

1.2.2 ฮาโลเจนเรดิคัลรวมตัวกับโมเลกุลพอลิเมอร์ที่เสียหายให้เป็นฮาโลเจนไฮดรอกไซด์ (Halogen hydroxides)



โดย  $RH$  คือ โมเลกุลพอลิเมอร์ที่เสียหาย และ  $HX$  คือ ฮาโลเจนไฮดรอกไซด์

### 1.2.3 เรดิคัลที่มีพลังงานสูงถูกลดพลังงานลง (Neutralization)



โดยสารหน่วงการติดไฟประเภทฮาโลเจนที่นิยมใช้ ได้แก่ โบรมีนและคลอรีน โดยให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดเมื่อเทียบกับสารหน่วงการติดไฟทุกประเภท ทำให้ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างกว้างขวางมาก แต่ในปัจจุบันสารหน่วงการติดไฟประเภทนี้ได้รับความนิยมลดลงอย่างมาก และในบางประเทศได้มีการห้ามใช้ เนื่องจากปัญหาความเป็นพิษจากธาตุหมู่ฮาโลเจนซึ่งเป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์เนื่องจากเป็นสารก่อมะเร็ง

## 1.3 สารหน่วงการติดไฟประเภทแอนติโมนีไตรออกไซด์ (Antimony trioxide)

แอนติโมนีไตรออกไซด์ เป็นสารลักษณะผงสีขาว มีอุณหภูมิการหลอมเหลวสูงถึง  $656^{\circ}C$  โดยทั่วไปถ้าใช้สารหน่วงการติดไฟประเภทนี้ร่วมกับสารฮาโลเจนเป็นการช่วยเสริมการหน่วงไฟการติดไฟ (Synergism) ให้ดีขึ้น แต่ข้อเสียของสารหน่วงการติดไฟประเภทนี้คือมีความถ่วงจำเพาะสูงถึง 5.7 ทำให้เมื่อใส่ลงไปพอลิเมอร์แล้วเป็นผลทำให้คอมโพสิตมีความหนาแน่นสูงขึ้น [32]

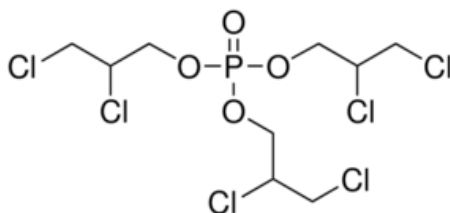
## 1.4 สารหน่วงการติดไฟประเภทฟอสฟอรัส

สารหน่วงการติดไฟประเภทฟอสฟอรัสที่นิยมใช้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากสารหน่วงการติดไฟประเภทนี้หาได้ง่าย มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟกับวัสดุที่มีปริมาณออกซิเจนสูง เช่น เซลลูโลส และอนุพันธ์ของเซลลูโลสสูง สารหน่วงไฟประเภทนี้มีกลไกการหน่วงการติดไฟด้วยการขัดขวางทางกายภาพและทางเคมี และสารหน่วงไฟประเภทนี้ยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ โดยทั่วไปถ้าใช้สารหน่วงไฟประเภทนี้ร่วมกับสารประกอบไนโตรเจนเป็นการช่วยเสริมการหน่วงไฟให้ดีขึ้น สารหน่วงไฟประเภทฟอสฟอรัสประกอบด้วยหลายกลุ่ม [34] ได้แก่

- กลุ่มคลอโรฟอสเฟต (Chlorophosphates) ได้แก่ ไตรไคลโอโรโพรพิลฟอสเฟต (Tris(dichloropropyl) phosphate, TDCP) ดังรูปที่ 2.18 เป็นสารหน่วงไฟที่มีเสถียรภาพ

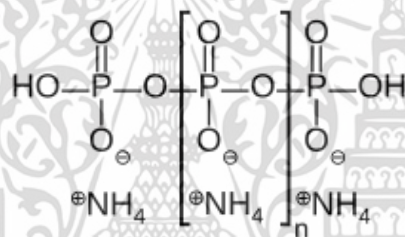
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางความร้อนสูง ประกอบด้วยฟอสฟอรัส 7.2% และคลอรีน 49% เป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง มักใช้กับพอลิเมอร์จำพวกพอลิเอสเทอร์ (Polyester) และ โฟมพอลิยูรีเทน (Polyurethane foams)



รูปที่ 2.18 ไตรไคลโอโรโพรพิลฟอสเฟต [34]

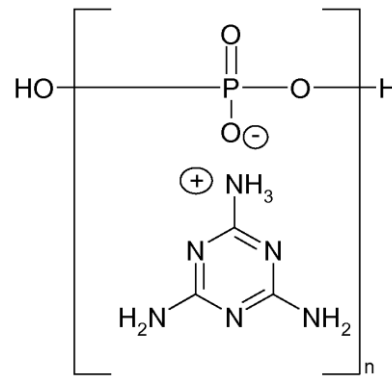
- กลุ่มแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต เป็นสารหน่วงการติดไฟที่เป็นองค์ประกอบหลักในหน่วงไฟระบบอินทิวเมสเซนซ์ (Intumescent flame retardant, IFRs) ซึ่งมักใช้กับพอลิเมอร์กลุ่มที่เป็นสารเคลือบ และพอลิโอเลฟิน (Polyolefins) โดยเป็นสารหน่วงการติดไฟที่มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง มีองค์ประกอบของฟอสฟอรัสประมาณ 30%



รูปที่ 2.19 แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต [34]

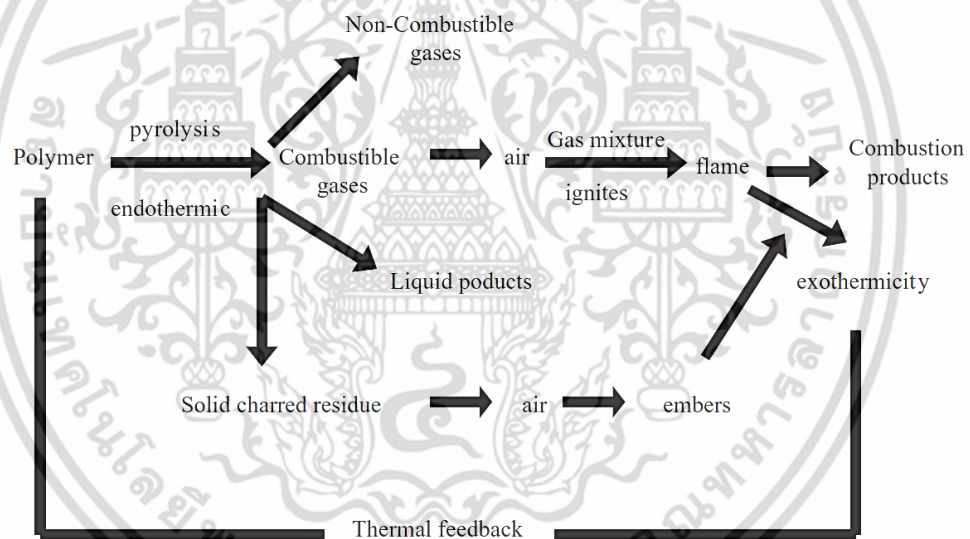
- กลุ่มเอทิลีนไดเอมีนฟอสเฟต (Ethylene diamine phosphate, EDAP) เป็นสารหน่วงการติดไฟที่มักใช้กับพอลิโอเลฟินโดยเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ (Halogen free flame retardant) แต่สารหน่วงการติดไฟประเภทนี้มีข้อเสีย คือมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ต่ำประมาณ 250°C จึงเป็นข้อจำกัดในการใช้งาน

- กลุ่มอนุพันธ์ของเมลามีน (Melamine derivatives) ได้แก่ เมลามีนพอลิฟอสเฟต (Melamine polyphosphate, MPP) ดังรูปที่ 2.20 เป็นสารหน่วงการติดไฟที่มีองค์ประกอบของธาตุฟอสฟอรัส และไนโตรเจนซึ่งหากใช้ธาตุสองตัวนี้ร่วมกันเป็นการเสริมกันของประสิทธิภาพในการหน่วงการติดไฟ



รูปที่ 2.20 เมลามีนฟอสเฟต [34]

2. กลไกการทำงานของสารหน่วงการติดไฟ (Mechanisms of flame retardancy)  
 สารหน่วงการติดไฟมีหลายชนิดและแต่ละชนิดถูกควบคุมด้วยกลไกการหน่วงการติดไฟที่แตกต่างกันดังรูปที่ 2.21 โดยกลไกการหน่วงการติดไฟแบ่งได้เป็น 2 แบบได้แก่ กลไกการหน่วงการติดไฟด้วยการขัดขวางทางกายภาพและทางเคมี [35]



รูปที่ 2.21 กลไกการหน่วงการติดไฟ [35]

### 2.1 การขัดขวางทางกายภาพ

- การทำให้ระบบเย็นตัวลง (Cooling) กลไกการหน่วงไฟนี้สารหน่วงไฟสามารถดูดความร้อนบางส่วนไปทำให้สลายตัวในรูปของการหลอม หรือการระเหิด ซึ่งมีผลทำให้ระบบได้รับความร้อนน้อยลงจนระบบมีพลังงานไม่เพียงพอที่สามารถก่อให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้แบบลูกโซ่ได้ หรือสารหน่วงการติดไฟสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) เกิดน้ำระเหยออกมา ทำให้พื้นผิววัสดุเย็นลงตัวอย่างเช่น อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น

- การทำให้เกิดชั้นเคลือบบนพื้นผิววัสดุ (Solid phase mechanism) กลไกการหน่วงการติดไฟเกิดขึ้นเมื่อระบบได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิการเผาไหม้ ทำให้สารหน่วงการติดไฟเกิดการหลอมละลายมาปกคลุมบริเวณผิวหน้าของพอลิเมอร์ช่วยป้องกันไม่ให้ก๊าซออกซิเจนมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้ได้เห็นใบแจ้งลิขสิทธิ์แล้วไม่ควรนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมผัสกับพอลิเมอร์และกักขังไอระเหยที่สามารถลุกติดไฟซึ่งเกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ไม่ทำให้ไปสู่ผิวหน้าของพอลิเมอร์ทำให้พอลิเมอร์ไม่เกิดการเผาไหม้ นอกจากนี้ยังช่วยลดการถ่ายเทความร้อนจากจุดที่เกิดการติดไฟไปยังจุดอื่นๆ ทำให้เปลวไฟไม่เกิดการลามต่อ ตัวอย่างเช่น บอริก บอแรกซ์ ซิลิเกต ฟอสเฟต และพอลิฟอสเฟต

- การปลดปล่อยก๊าซที่ไม่ติดไฟ (Non-Combustible gases) กลไกการหน่วงการติดไฟนี้ คือการที่สารสลายตัวใช้ก๊าซที่ไม่ติดไฟ เช่น ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซแอมโมเนีย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ และไอน้ำ เป็นต้น ส่งผลให้ก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ซึ่งเป็นก๊าซที่ติดไฟง่ายเจือจางลงจนมีความเข้มข้นต่ำกว่าจุดติดไฟได้ และทำให้ปริมาณออกซิเจนภายในระบบลดลง พอลิเมอร์จึงไม่สามารถเกิดการเผาไหม้ต่อไปได้ ตัวอย่างเช่น โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมโบคาร์บอเนต แอมโมเนียมเฮไลด์ ซิงค์คลอไรด์ แคลเซียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต อะลูมิเนียมซัลเฟต แอมโมเนียมซัลฟาเมต และฟอสเฟต เป็นต้น

## 2.2 การขัดขวางทางเคมี

- วัฏภาคก๊าซ (Gas หรือ Vapor phase) กลไกการหน่วงการติดไฟนี้ คือเมื่อสารหน่วงไฟถูกความร้อนแล้วเกิดอนุมูลอิสระที่สามารถไปจับกับอนุมูลอิสระที่เกิดจากการเผาไหม้พอลิเมอร์ได้กลายเป็นก๊าซที่ไม่ติดไฟ ทำให้ปฏิกิริยาการแผ่โซ่อนุมูลอิสระสิ้นสุดลง (Free-radical chain propagation) การลุกไหม้สิ้นสุดลง ตัวอย่างเช่น สารประกอบฮาโลเจน และการทำงานร่วมกันของสารหน่วงไฟที่เป็นสารประกอบฮาโลเจน และแอนติโมนีไตรออกไซด์

- วัฏภาคของแข็ง (Solid หรือ Condensed phase) กลไกการหน่วงไฟนี้ คือสารหน่วงการติดไฟทำหน้าที่เร่งให้เกิดการสลายตัวเร็วขึ้นเกิดเป็นก๊าซที่ไม่ติดไฟและชั้น Char เพื่อให้ส่วนที่มีการลุกติดไฟกับส่วนที่ยังไม่ลุกติดไฟแยกห่างออกจากกันมากขึ้น และในที่สุดไฟไม่สามารถลุกลามไปถึงส่วนนั้นได้ นอกจากนี้การทำให้เกิดชั้น Char ยังทำให้ผิวหน้าวัสดุไม่สัมผัสกับความร้อนและก๊าซทำให้การลามไฟหยุดลง ตัวอย่างเช่น สารประกอบฟอสฟอรัส การทำงานของสารหน่วงไฟที่เป็นสารประกอบฟอสฟอรัสและไนโตรเจน

## 3. สารหน่วงการติดไฟระบบอินตุมสเซนซ์ (IFRs)

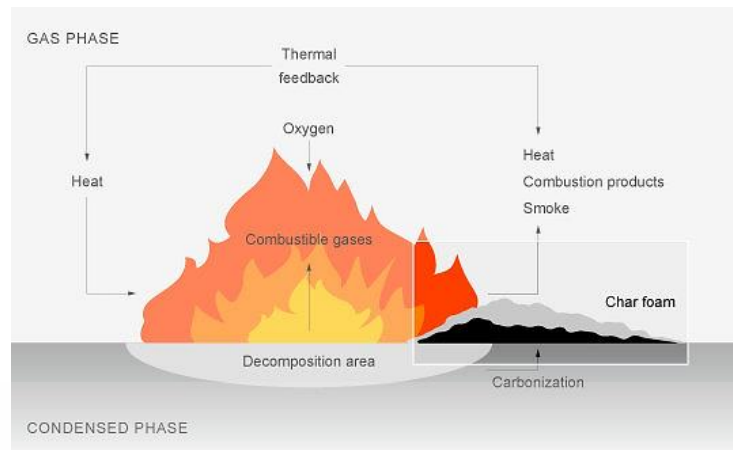
การทำงานของสารหน่วงไฟประเภทนี้คือ เมื่อได้รับความร้อนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีเกิดเป็นชั้นโฟม ซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันความร้อนและการสัมผัสออกซิเจนให้กับวัสดุ ส่งผลให้การลุกไหม้สิ้นสุดลง [31] ดังรูปที่ 2.22

### 3.1 องค์ประกอบของสารหน่วงการติดไฟระบบอินตุมสเซนซ์

- แหล่งให้กรดอนินทรีย์ (Inorganic acid source) คือสารอนินทรีย์ที่มีความเป็นกรดหรือวัสดุที่สามารถสลายตัวให้อนุภาคที่มีฤทธิ์เป็นกรดในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 100-250°C เช่น กรดฟอสฟอริก และกรดบอริก เป็นต้น

- สารทำให้เกิด Char (Char source) มักเป็นสารจำพวกพอลิแอลกอฮอล์ เช่น แป้ง พอลิเอไมด์6 ซอร์บิทอล และเส้นใยธรรมชาติ เป็นต้น

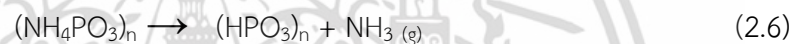
- สารให้ฟอง (Blowing agent) คือสารที่สลายตัวให้ฟองก๊าซที่ไม่ติดไฟ เช่น เมลามีนและยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ เป็นต้น



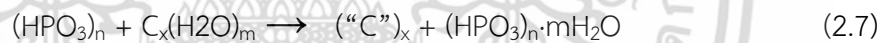
รูปที่ 2.22 กลไกการดับของสารหน่วงไฟระบบอินตุมสเซนซ์ [36]

### 3.2 กลไกการเกิดอินตุมสเซนซ์ (Intumescent mechanism) [36]

- ขั้นแรก เมื่อพอลิเมอร์ได้รับความร้อนสูงถึงอุณหภูมิการสลายตัว แหล่งให้กรดอินทรีย์ สลายตัวให้กรดและก๊าซที่ไม่ติดไฟดังสมการที่ 2.6



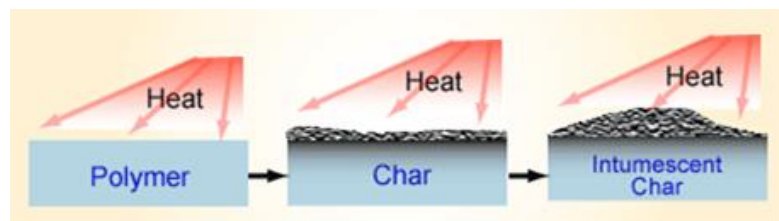
- ขั้นที่สอง กรดที่สลายตัวได้ทำปฏิกิริยากับสารให้ Char เกิดเป็นชั้น Char ดังสมการที่ 2.7



- ขั้นที่สาม เมื่อถึงอุณหภูมิหนึ่งสารให้ฟองสลายตัวให้ก๊าซ ดังสมการที่ 2.8



- ขั้นที่สี่ ชั้น Char เกิดเป็นชั้นโฟมขยายใหญ่ขึ้นปกคลุมบริเวณผิวหน้าของวัสดุดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 ชั้น Char ปกคลุมบริเวณผิวหน้าของวัสดุ [37]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของสารหน่วงไฟระบบอินตุมเมสเซนต์ [36]

- ชนิดและอัตราส่วนระหว่างองค์ประกอบทั้งสามของสารหน่วงการติดไฟระบบอินตุมเมสเซนต์ ได้แก่ แหล่งให้กรดอินทรีย์ สารทำให้เกิด Char และสารให้ฟอง
- ความสามารถในการเกิดชั้น Char และความต่อเนื่องของชั้น Char ถ้าชั้น Char มีความต่อเนื่องปกคลุมทั่วพื้นผิวของวัสดุสามารถเป็นฉนวนป้องกัน ความร้อนและการสัมผัสออกซิเจนให้กับวัสดุ ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟดี
- การทำงานของสารให้ฟอง ถ้าสารให้ฟองสามารถสลายตัวให้ฟองก๊าซและกระจายตัวทั่วภายในชั้น Char ส่งผลให้ชั้น Char ขยายตัวสูงขึ้น มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟดี

### 3.4 ข้อดีข้อเสียของสารหน่วงการติดไฟระบบอินตุมเมสเซนต์ [36]

ในปัจจุบันสารหน่วงการติดไฟจำพวกฮาโลเจนได้ถูกจำกัดการใช้งานเนื่องจากสามารถปลดปล่อยสารประกอบฮาโลเจนที่มีความเป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ดังนั้นสารหน่วงการติดไฟแบบอินตุมเมสเซนต์ จึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ซึ่งนิยมใช้กับพอลิเมอร์และวัสดุคอมโพสิตที่มีเส้นใยไม้เป็นองค์ประกอบเพราะไม่เพียงแต่สามารถป้องกันการลามไฟได้อย่างมีประสิทธิภาพ ยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ไม่มีพิษ แต่สารหน่วงการติดไฟระบบอินตุมเมสเซนต์ก็ยังมีข้อเสีย เช่น มีราคาแพง ช่วงอุณหภูมิการสลายตัวต่ำจึงทำให้เป็นข้อจำกัดในกระบวนการผลิต

### 3.5 การเลือกใช้สารหน่วงการติดไฟ [36]

การเลือกใช้สารหน่วงการติดไฟขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการได้แก่ ความเข้ากันได้ การไหลออกจากเนื้อสาร ความเป็นพิษ และเสถียรภาพทางความร้อน

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กนกอร แสงสุวรรณ [38] ศึกษาการเตรียมไม้พลาสติกคอมโพสิตจากพอลิเอเลฟินและเส้นใยมะพร้าวในปริมาณ 50 php ใช้เส้นใยมะพร้าวเบอร์ 4 โดยปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ศึกษาผลของปริมาณสารช่วยผสม (Compatibilizer) โดยใช้พอลิพรอพิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรยด์ (PP-g-MA) ที่ปริมาณ 1, 2 และ 3% โดยน้ำหนัก

การผสมไม้พลาสติกคอมโพสิตทำด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) นำของผสมที่เตรียมได้มาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) จากนั้นขึ้นงานแต่ละสูตรที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และสัณฐานวิทยา พบว่าไม้พลาสติกคอมโพสิตสูตรที่ใช้ เส้นใยมะพร้าวเบอร์ 4 ในปริมาณ 50 php และใช้ปริมาณของสารช่วยผสม PP-g-MA ที่ 3% โดยน้ำหนัก ให้ค่าความแข็งแรงกด (Hardness) ความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) โมดูลัสโค้งงอ (Flexural modulus) และความต้านทานการยึดเหนี่ยวตะปู (Screw holding) สูงที่สุด นอกจากนี้ปริมาณของสารช่วยผสม PP-g-MA ที่ 3% โดยน้ำหนัก ยังให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำที่ต่ำที่สุด เนื่องจากเมื่อการเติม PP-g-MA ทำให้ความเข้ากันได้ของเส้นใยมะพร้าวซึ่งเป็นส่วนที่มีขี้และพอลิเมอร์ซึ่งไม่มีขี้ดีขึ้น ช่องว่างระหว่างผิวสัมผัสของเส้นใยและพอลิเมอร์ลดลง แรงยึดเหนี่ยวระหว่างภูมิภาคของเส้นใยและพอลิเมอร์มีความแข็งแรงขึ้นเพราะมีการยึดเกาะกันได้ดีขึ้นจึงทำให้สมบัติเชิงกลเพิ่มสูงขึ้น และการยึดติดกันได้ดีของเส้นใยและพอลิเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สูงขึ้นยังทำให้หมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของเส้นใยลดลง เป็นผลทำให้น้ำจากสิ่งแวดล้อมสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับเส้นใยได้น้อยลงค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของคอมโพสิตจึงลดลงด้วย

ธีรพัฒน์ อุณหโชค และพจนีย์ ศรธรรมลี [39] ได้ทำการศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และเส้นใยผักตบชวา (Hyacinth fibers) ที่เตรียมจากกระบวนการทางเคมี ซึ่งปัจจัยการศึกษา ได้แก่

- ศึกษาผลของปริมาณสารช่วยผสมพอลิเอทิลีนต่อกึ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PE-g-MA) ที่ปริมาณ 1-5% (โดยน้ำหนัก)

- อัตราส่วนระหว่างปริมาณ LDPE และเส้นใยผักตบชวา (100:0, 70:30, 60:40 และ 50:50 โดยน้ำหนัก)

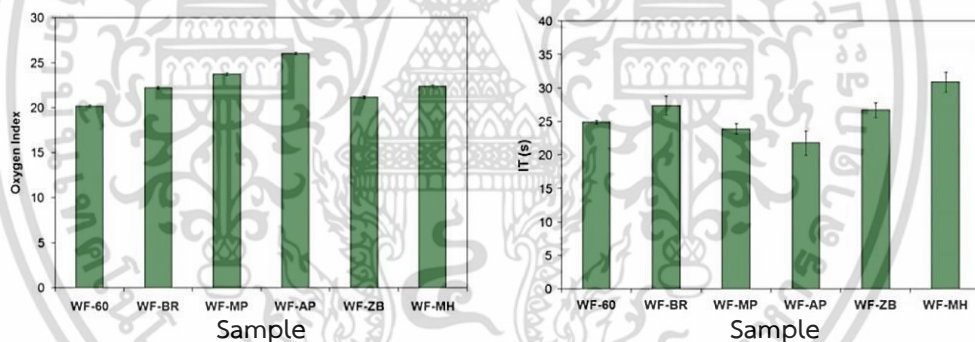
- ศึกษาขนาดของเส้นใยผักตบชวา (30-50, 50-80, >80 เมช)

การผสมสูตรทำด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวและทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปนำชิ้นงานคอมโพสิตที่เตรียมได้มาศึกษาสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ความแข็งแรงดึง ยิงมอดูลัส ความแข็งกดเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก จากศึกษาผลของปริมาณสารช่วยผสมพอลิเอทิลีนต่อกึ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PE-g-MA) ที่ปริมาณ 1-5% โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณสารช่วยผสมมีผลต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตให้เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ที่ปริมาณ PE-g-MA 3% โดยน้ำหนัก ให้ผลของสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด และให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำที่ต่ำที่สุด เนื่องมาจากการเติม PE-g-MA ทำให้การยึดเกาะกันของเส้นใยกับพอลิเมอร์ดีขึ้นสมบัติเชิงกลจึงเพิ่มสูงขึ้น และการยึดติดกันที่ดีของเส้นใยกับพอลิเมอร์ยังทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยลดลงความมีขั้วลดลงจึงทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำลดลงด้วย ตอนที่ 2 ศึกษาอัตราส่วนระหว่างปริมาณ LDPE และ เส้นใยผักตบชวา (100:0, 70:30, 60:40 และ 50:50 โดยน้ำหนัก) โดยใช้ PE-g-MA ที่ปริมาณ 3% โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่ออัตราส่วนของเส้นใยผักตบชวามากขึ้นทำให้การดูดซับน้ำของคอมโพสิตเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนของเส้นใยซึ่งมีขั้วและมีหมู่ไฮดรอกซิลที่มากขึ้นจึงทำให้สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้มากขึ้น และที่ปริมาณเส้นใยเท่ากับ 30 ทำให้สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตดีที่สุด ตอนที่ 3 ศึกษาขนาดของเส้นใยผักตบชวา (30-50, 50-80, >80 เมช) ที่อัตราส่วนของ LDPE และเส้นใยผักตบชวาเป็น 70:30 และใช้ PE-g-MA ที่ปริมาณ 3% พบว่าคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยขนาด 50-80 เมช ให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดเนื่องจากเมื่อเติมเส้นใยมีขนาดใหญ่ (30-50 เมช) เส้นใยบางส่วนเกิดการขัดขวางการจัดเรียงตัวของผลึกของสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้ผลึกที่ได้ไม่สมบูรณ์เป็นผลให้สมบัติเชิงกลลดลงด้วย และเส้นใยที่มีขนาดเล็ก (>80 เมช) ให้ค่าสมบัติเชิงกลที่ต่ำเนื่องมาจากเส้นใยขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวที่สูงกว่าเส้นใยขนาดใหญ่มักชอบรวมกันเป็นกลุ่มก้อน กระจายตัวไม่ดีในเมทริกซ์ นอกจากนี้การเติมเส้นใยขนาดเล็กมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำที่สูงกว่าเส้นใยขนาดใหญ่ เนื่องจากพื้นที่ผิวที่มากกว่าทำให้การดูดซับน้ำทำได้มากขึ้น ดังนั้นจากการศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE และเส้นใยผักตบชวา สรุปว่าปริมาณ PE-g-MA ที่เหมาะสมคือ 3% โดยน้ำหนักอัตราส่วนที่ดีที่สุดของ LDPE และเส้นใยผักตบชวาเป็น 70:30 และขนาดของเส้นใยผักตบชวาที่ดีที่สุดคือ 50-80 เมช

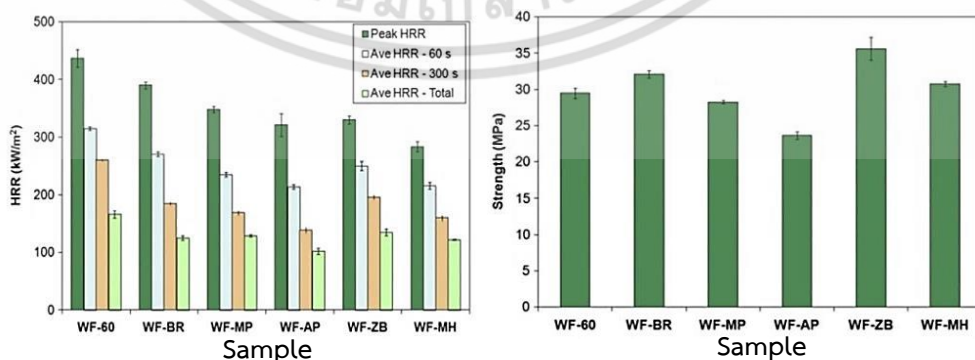
Nicole M.S. และคณะ [40] ศึกษาประสิทธิภาพของสารหน่วงการติดไฟหลายชนิดเพื่อใช้เป็นสารหน่วงการติดไฟในคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีน (PE) และผงไม้ (Wood flour) โดยใช้อัตราส่วนเป็น 40:60 โดยน้ำหนัก ซึ่งสารหน่วงการติดไฟที่ทำการศึกษามี 5 ชนิด ได้แก่

- เดคาโบรโมไดฟีนิลออกไซด์ (Decabromodiphenyl oxide, BR)
- แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Magnesium hydroxide, MH)
- เมลามีนฟอสเฟต (Melamine phosphate, MP)
- แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (AP)
- ซิงค์บอเรต (Zinc borate, ZB)

การผสมสารหน่วงการติดไฟกับคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนและผงไม้ ที่ปริมาณสารหน่วงการติดไฟ 10%wt ใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin-screw extruder) ขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติต่าง ๆ ด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป โดยสมบัติที่ทดสอบ ได้แก่ สมบัติเชิงกลด้านความยืดหยุ่น (Flexural modulus of elasticity, MOE) ตามมาตรฐาน ASTM D790 และทดสอบประสิทธิภาพในการทนไฟด้วยเครื่อง Cone calorimeter ซึ่งวัดอัตราการปลดปล่อยความร้อน (Heat release, HRR) เวลาการเริ่มติดไฟ (Ignition time, IT) อัตราการสูญเสียน้ำหนักจากการเผาไหม้ (Mass loss rate, MLR) และค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ (Effective heat of combustion, EHO) นอกจากนี้ยังวัดค่าปริมาณออกซิเจนต่ำที่สุดที่ทำให้ชิ้นงานติดไฟได้ (LOI) ซึ่งผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.24 และ 2.25 พบว่าสารหน่วงการติดไฟแต่ละชนิดให้ผลการทดลองที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.24 ค่าปริมาณออกซิเจนต่ำที่สุดที่ทำให้ชิ้นงานติดไฟได้และเวลาการเริ่มติดไฟของคอมโพสิตที่ผสมสารหน่วงการติดไฟชนิดต่างๆ [40]



รูปที่ 2.25 อัตราการปลดปล่อยความร้อนและความแข็งแรงโค้งงอของคอมโพสิตที่ผสมสารหน่วงการติดไฟชนิดต่างๆ [40]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากงานวิจัยนี้ พบว่าสารหน่วงการติดไฟที่มีประสิทธิภาพที่สุดสำหรับใช้กับคอมโพสิตระหว่าง PE และผงไม้ ที่อัตราส่วนเป็น 40:60 โดยน้ำหนัก คือแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (AP) ซึ่งเห็นว่า AP เมื่อเติมลงไปคอมโพสิตแล้วให้ค่า LOI สูงที่สุด และมีเวลาติดไฟช้าที่สุดเมื่อเทียบกับสารหน่วงการติดไฟชนิดอื่นที่เติมลงในคอมโพสิตที่มีปริมาณเท่ากัน เนื่องจาก AP มีองค์ประกอบของทั้งฟอสฟอรัสและไนโตรเจนซึ่งให้ประสิทธิภาพหน่วงการติดไฟที่เสริมกันในการหน่วงการติดไฟ และ AP ยังสามารถเกิดชั้น Char ซึ่งเป็นโครงสร้างสามมิติร่วมกับผงไม้ สามารถปกคลุมพื้นผิวของพอลิเมอร์ได้ดี นอกจากนั้นการสลายตัวของ AP ให้ก๊าซแอมโมเนียซึ่งเป็นก๊าซที่ไม่ติดไฟช่วยเจือจางก๊าซที่ติดไฟได้ในกระบวนการเผาไหม้ ดังนั้นจึง AP มีประสิทธิภาพในการหน่วงการติดไฟสูงในคอมโพสิต แต่การเติม AP ลงในคอมโพสิตส่งผลให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอต่ำกว่าคอมโพสิตที่ไม่เติมสารหน่วงไฟเล็กน้อย เนื่องจากการเติม AP เหมือนกับการเติมสารตัวเติมไม่เสริมแรงลงในคอมโพสิตเป็นเหมือนจุดบกพร่องในชิ้นงาน จึงทำให้คอมโพสิตรับแรงได้ต่ำลง

Zhang Q. และคณะ [41] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพที่เสริมกันของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) และเมลามีน (MA) โดยใช้เป็นสารหน่วงการติดไฟสำหรับพอลิออกซิเมทิลีน (Polyoxymethylene, POM) ทำการศึกษาโดยขึ้นรูปคอมโพสิตด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ ทดสอบการหน่วงการติดไฟตามมาตรฐาน UL94 แบบแนวตั้ง ศึกษาในระบบอินตูเมสเซนซ์ โดย MA ทำหน้าที่เป็นสารให้ฟอง APP เป็นแหล่งให้กรดอินทรีย์จำพวกสารกลุ่มฟอสฟอรัส และโนโวลาค (Novolac) ทำหน้าที่เป็นสารทำให้เกิด Char ในอัตราส่วนของ MA:APP:Novolac เท่ากับ 1:3:1 พบว่าเมื่อทดสอบตามมาตรฐาน UL94 แบบแนวตั้ง ให้ผลการทดสอบเป็น V-0 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการจุดไฟที่ชิ้นงานแบบแนวตั้งการเผาไหม้หยุดเองภายใน 10 วินาที และไม่มีการหยดของเปลวไฟ เนื่องจากกลไกในการหน่วงการติดไฟของสารหน่วงไฟระบบอินตูเมสเซนซ์ คือเมื่อชิ้นงานได้รับความร้อน APP เป็นสารกลุ่มฟอสฟอรัสให้กรดอินทรีย์จะปลดปล่อยกรดสามารถเกิดเป็นชั้น Char ร่วมกับโนโวลาคได้ และเมื่อทำงานร่วมกับ MA ทำให้ชั้น Char พองตัวสูงขึ้น ซึ่งชั้น Char ที่พองตัวสามารถเป็นฉนวนป้องกันไม่ให้พอลิเมอร์สัมผัสกับออกซิเจนและความร้อนการลามไฟจึงหยุดลงได้

สิทธิโชค ปุณณะนิธิ และคณะ [5] ศึกษาสมบัติไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPCs) ชนิดทนไฟระบบอินตูเมสเซนซ์ โดยทำการเตรียม WPC จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) และเส้นใยคาบมะพร้าว (CF) โดยใช้ APP และ MA เป็นสารหน่วงไฟระบบอินตูเมสเซนซ์ ทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการหน่วงการติดไฟ ได้แก่

- ปริมาณของ APP ที่เหมาะสม
- อัตราส่วนของสารหน่วงไฟ (MA:APP:F)
- การใช้สารหน่วงไฟในรูปมาสเตอร์แบตช์ (Masterbatch)

การผสมวัตถุดิบด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง และทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป ทดสอบสมบัติการลามไฟ ได้แก่ ตามมาตรฐาน UL94 แบบแนวตั้งและ LOI ทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความทนต่อแรงโค้งงอและความแข็งแรงกระแทก ความหนาแน่น สันฐานวิธยาด้วย SEM ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC และ TGA จากการทดลอง พบว่าปริมาณ APP ที่เหมาะสมที่ทำให้ไม้พลาสติกคอมโพสิตมีประสิทธิภาพในการหน่วงการติดไฟดีเท่ากับ 25 php และอัตราส่วนของ MA:APP:F เป็น 0.17:0.5:1 โดยน้ำหนัก คืออัตราส่วนที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลอง เกิด

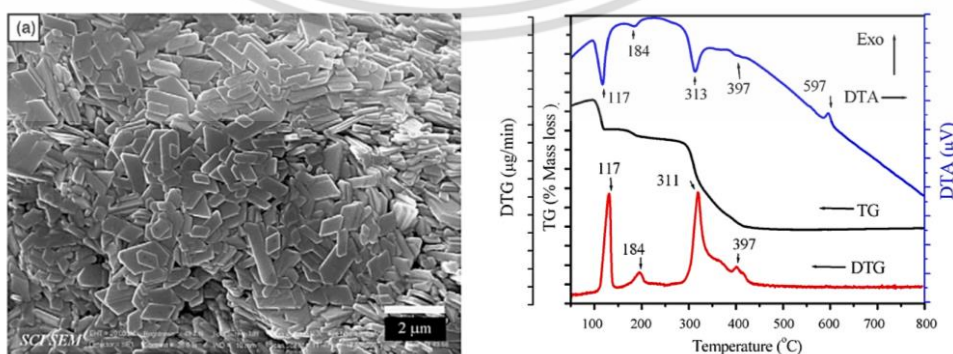
เป็นสารหน่วงการติดไฟระบบอินตูเมสเซนซ์ที่มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟดี เนื่องจาก APP มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่จะขอสงวนการตีพิมพ์  
ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบของทั้งฟอสฟอรัสและไนโตรเจนซึ่งให้ประสิทธิภาพหน่วงการติดไฟที่เสริมกันในการหน่วงการติดไฟ และ APP ยังสามารถเกิดขึ้น Char ซึ่งเป็นโครงสร้างสามมิติร่วมกับเส้นใยคาบมะพร้าว สามารถปกคลุมพื้นผิวของ WPC ได้ดี นอกจากนั้นการสลายตัวของ APP ให้ก๊าซแอมโมเนียซึ่งเป็นก๊าซที่ไม่ติดไฟช่วยเจือจางก๊าซที่ติดไฟได้ในกระบวนการเผาไหม้ ดังนั้นจึง APP มีประสิทธิภาพในการหน่วงการติดไฟสูงใน WPC ให้ผลการลามไฟตามมาตรฐาน UL94 V เป็น V-0 และ LOI เท่ากับ 29 การใช้สารหน่วงการติดไฟที่น้อยในปริมาณน้อยจึงส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลดีผ่านมาตรฐาน มอก. 876-2547 และมีความหนาแน่นต่ำ การใช้สารหน่วงไฟในรูปมาสเตอร์แบทช์ คือการนำสารหน่วงไฟ APP และ MA มาเคลือบลงบนเส้นใยคาบมะพร้าว จากผลการทดลอง พบว่าเมื่อนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับสารหน่วงการติดไฟรูปแบบการผสมแบบปกติ (เติมสารหน่วงไฟที่ละตัว) แต่มีข้อดีคือช่วยลดต้นทุนและทำให้อัตราการผลิตเพิ่มสูงขึ้น

Boonchom B. [3] ศึกษาการเตรียมแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรต ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) โดยใช้สารตั้งต้น คือแคลเซียมคาร์บอเนตและกรดฟอสฟอริกมีอะซิโตนเป็นตัวกลาง ทำการปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที แล้วนำตะกอนที่ได้ไปกรอง จากนั้นทิ้งไว้ให้อะซิโตนระเหยที่อุณหภูมิห้องเป็น 24 ชั่วโมง ได้เป็นผง  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  นำไปวิเคราะห์และทดสอบ ได้แก่ วิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวด้วยเครื่อง TGA วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง XRD ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR และศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง SEM พบว่าสัณฐานวิทยาของ  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมหนา เป็นดั่งรูปที่ 2.26 วิเคราะห์อุณหภูมิการสลาย จากกราฟ TGA เห็นว่า  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  มีการสลายตัว 3 ช่วง ได้แก่ 97-151, 151-278 และ 278-500°C ที่การหายไปของน้ำหนัก (Weight loss) 3.8, 2.1, และ 15.2% ตามลำดับ ซึ่งทั้ง 3 ช่วงการสลายตัวนี้เป็นการสลายตัวของน้ำโดยโมเลกุลของน้ำที่สลายตัวคิดเป็น 3 โมเลกุล ซึ่งเห็นว่าโมเลกุลของน้ำใน  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  มีการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงเนื่องมาจากน้ำที่สลายตัวเป็นน้ำในโครงผลึกของ  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  ซึ่งโมเลกุลของน้ำนี้สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ดีกับ  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  ที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้สลายตัวให้น้ำเท่ากับ 21.32% โดยใกล้เคียงผง  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  มาตรฐานตามทฤษฎีมองค์ประกอบของน้ำ 21.48%

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของ  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  ที่เตรียมได้ด้วยเครื่อง XRD เทียบกับ  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  มาตรฐาน (PDF# 0903047) จากการวิเคราะห์ พบว่าให้ค่าต่าง ๆ ที่ใกล้เคียงกันดังตารางที่ 2.9



รูปที่ 2.26 สัณฐานวิทยาและกราฟ TGA ของ  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.9 โครงสร้างผลึกของ  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  [3]

Lattice parameters	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$		
	This work	PDF#0903047	DIF. (This work-PDF)
a (Å)	6.27(4)	6.25	+0.02
b (Å)	11.32(1)	11.89	-0.57
c (Å)	5.94(2)	5.63	+0.31
$\beta$ (Å)	114.11(0)	114.20	-0.09
Average particle size (nm)	63 ±16	-	-

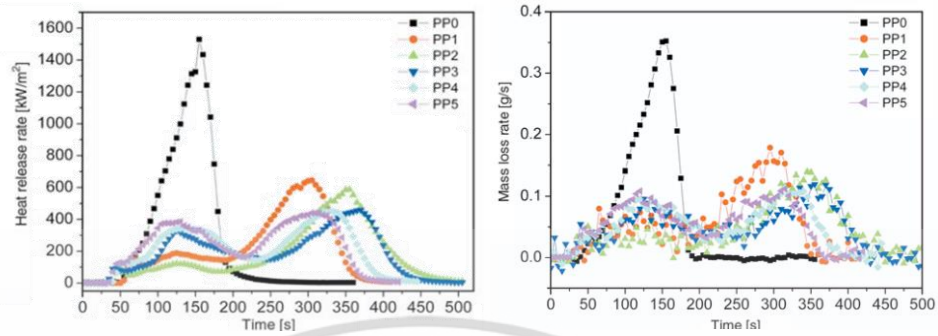
Chen X.L. และคณะ [42] ศึกษาประสิทธิภาพการเสริมกันของผงเหล็กและสารหน่วงการติดไฟระบบอินตุมเนสเซนต์ (IFRs) ในพอลิพรอพิลีน (PP) ใช้สารหน่วงการติดไฟได้แก่ แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) และเพนตะอิริทริทอล (PER) ในอัตราส่วน 3:1 โดยน้ำหนัก ศึกษาการใส่ผงเหล็กขนาด 80-150 นาโนเมตร ที่ปริมาณ 1-5 %wt ทำการผสมโดยใช้เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป ศึกษาสมบัติการทนไฟ ได้แก่ ทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL94 แบบแนวตั้ง ค่าปริมาณออกซิเจนต่ำสุดที่ทำให้ชิ้นงานติดไฟ (LOI) และทดสอบประสิทธิภาพการทนไฟด้วยเครื่อง Cone calorimeter พบว่า เมื่อเติมสารหน่วงไฟในพอลิพรอพิลีนทำให้ค่า LOI เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนและเมื่อเติมผงเหล็กลงไปทำให้ค่า LOI เพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นได้ว่าผงเหล็กและสารหน่วงไฟระบบอินตุมเนสเซนต์มีประสิทธิภาพที่เสริมกัน ดังตารางที่ 2.10 แต่เมื่อเพิ่มปริมาณผงเหล็กค่า LOI ที่วัดได้ใกล้เคียงกัน แสดงว่าปริมาณผงเหล็ก 1%wt เป็นปริมาณที่มากเพียงพอที่สามารถเกิดประสิทธิภาพที่เสริมกันกับสารหน่วงไฟระบบอินตุมเนสเซนต์

ตารางที่ 2.10 ค่า LOI และ UL94 ของพอลิเมอร์ผสมสูตร [42]

Formula	PP (%)	IFRs (%)	Fe (%)	UL94 V	LOI
PPO	100	-	-	No rating	18.0
PP1	70	30	0	V-0	31.0
PP2	70	29	1	V-0	32.5
PP3	70	28	2	V-0	32.0
PP4	70	27	3	V-0	32.0
PP5	70	25	5	V-0	31.5

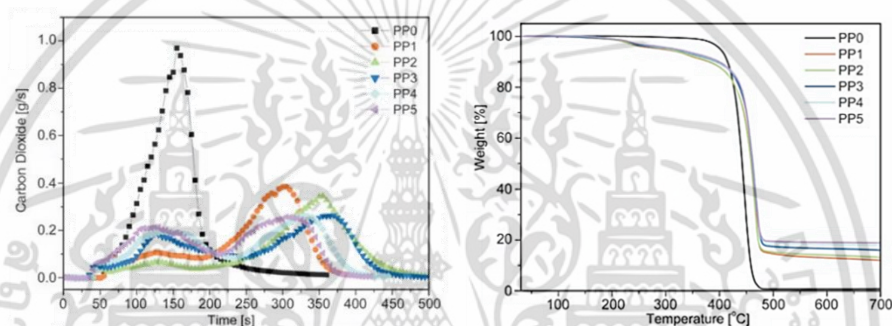
การทดสอบประสิทธิภาพการลามไฟด้วยเครื่อง Cone calorimeter พบว่าการเติมผงเหล็กลงไปใน PP ที่เติม IFRs ให้ค่าอัตราการปลดปล่อยความร้อน (HRR) อัตราการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกการเผาไหม้ (MLR) และปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ลดลงดังรูปที่ 2.27 (a-c) เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรใน PP ที่เติม IFRs ที่ไม่ได้ใส่ผงเหล็ก วิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ที่ใส่และไม่ใส่สารหน่วงการติดไฟ ดังรูปที่ 2.27 (d) พบว่าที่อุณหภูมิการสลายตัว 500°C การเติมสารหน่วงไฟลงไปทำให้มีปริมาณเถ้าเหลือ 14.4% และเมื่อเติมผงเหล็กลงไปทำให้ปริมาณเถ้าที่เหลือเพิ่มขึ้นอีก เนื่องจากเมื่อผงเหล็กทำปฏิกิริยากับออกซิเจนทำให้เกิดเป็นเหล็กออกไซด์ซึ่งสามารถเกิด

ชั้น Char ร่วมกับสารหน่วงการติดไฟระบบอินตุมเมสเซนต์ทำให้การลามไฟหยุดลงได้ ดังนั้นผงเหล็กและสารหน่วงไฟระบบอินตุมเมสเซนต์มีประสิทธิภาพที่เสริมกัน



(a) อัตราการปลดปล่อยความร้อน

(b) อัตราการสูญเสียน้ำหนักจากการเผาไหม้



(c) ปริมาณ CO ที่ปลดปล่อย

(d) อุณหภูมิการสลายตัว

รูปที่ 2.27 การทดสอบประสิทธิภาพการลามไฟด้วยเครื่อง Cone calorimeter [42]

Sarang D. และคณะ [43] ศึกษาการเตรียมฟิล์มพอลิพรอพิลีนที่เติมสารหน่วงการติดไฟที่มี 2 องค์ประกอบคือแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตและแคลเซียมคาร์บอเนตปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่

- ศึกษาผลของปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (A) 10, 20, 30% โดยน้ำหนัก
- ศึกษาผลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (C) 10, 20, 30% โดยน้ำหนัก
- ศึกษาผลของอัตราส่วนผสมระหว่างแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตต่อแคลเซียมคาร์บอเนต (A:C) ที่อัตราส่วน 10:5, 15:7.5, 25:12.5 และ 30:15 โดยน้ำหนัก

การผสมทำด้วยเครื่องผสมระบบปิดแบบใบกวน Roller blade (Brabender roller blade melt mixer) นำของผสมที่เตรียมได้มาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ สมบัติการต้านทานการลามไฟแบบแนวตั้ง (Horizontal flame spread testing) วิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวด้วยเครื่อง TGA-FTIR และวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง XRD พบว่า การทดสอบการต้านทานการลามไฟแบบแนวตั้ง เมื่อเปรียบเทียบอัตราการเผาไหม้ระหว่างสูตรที่ใช้แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตและแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารหน่วงการติดไฟในปริมาณที่เท่ากัน พบว่าให้ค่าอัตราการเผาไหม้ที่ใกล้เคียงกัน โดยหากใส่ในปริมาณเพิ่มมากขึ้นทำให้อัตราการลามไฟลดลงหรือช่วยทำให้วัสดุมีความสามารถในการทนไฟมากขึ้น ส่วนสูตรที่ใช้แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตและแคลเซียมคาร์บอเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นสารหน่วงการติดไฟร่วมกัน พบว่ามีอัตราการเผาไหม้ที่ต่ำกว่าแบบใช้สารหน่วงการติดไฟชนิดเดียว ดังตารางที่ 2.11

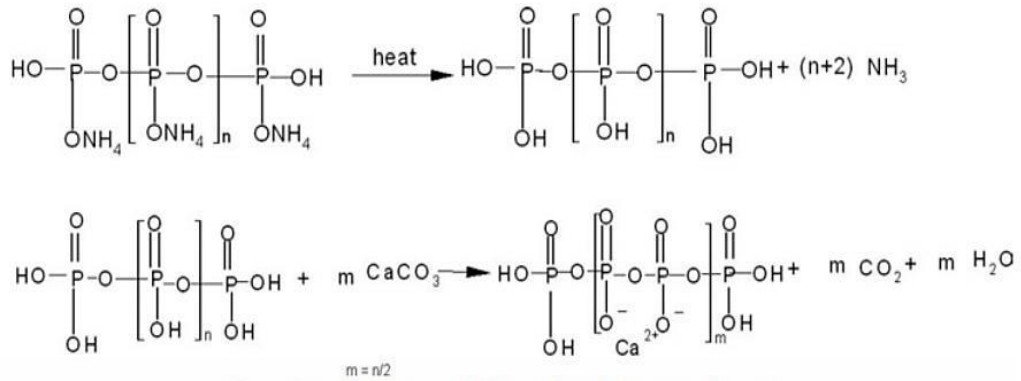
ตารางที่ 2.11 ค่าอัตราการเผาไหม้ของพอลิเมอร์ผสมสูตร [43]

สูตร	อัตราการลามไฟ (mm/min)
PP	9.03
A10	8.20
A20	7.70
A30	6.40
C10	8.30
C20	7.70
C30	6.70
AC10:5	6.80
AC15:7.5	6.02
AC20:10	5.10
AC25:12.5	3.60
AC30:15	2.78

จากการวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต แคลเซียมคาร์บอเนตและแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตและแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วน 2:1 ด้วยเครื่อง TGA พบว่าแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตมีการสลายตัวสองขั้นได้แก่ ที่อุณหภูมิ 310°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิการสลายตัวของก๊าซแอมโมเนียและกรดพอลิฟอสฟอริก วิเคราะห์โดย TGA-FTIR พบพีคการสั่นที่ความยาวคลื่น 930-966 และ 715-1250  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นช่วงการสั่นของสารประกอบก๊าซแอมโมเนีย และที่อุณหภูมิประมาณ 570°C เป็นการสลายตัวของโครงตาข่ายพอลิฟอสเฟต (Polyphosphate network)

การสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตมีหนึ่งขั้นคือที่อุณหภูมิ 550°C ซึ่งสลายตัวให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นพีคการสั่นที่ความยาวคลื่น 669 และ 2250-2235  $\text{cm}^{-1}$  โดยแคลเซียมคาร์บอเนตเปลี่ยนรูปเป็นแคลเซียมออกไซด์

การสลายตัวของสารผสมระหว่างแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตและแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วน 2:1 พบว่ามีการเกิดปฏิกิริยาของสารทั้งสองตัวโดยมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ 370°C การเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดพอลิฟอสฟอริกและแคลเซียมคาร์บอเนตแล้วการสลายตัวให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซแอมโมเนียและน้ำ โดยวิเคราะห์โดย TGA-FTIR พบพีคการสั่นที่ความยาวคลื่น 930-966 และ 715-1250  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นช่วงการสั่นของสารประกอบแอมโมเนีย พีคการสั่นที่ความยาวคลื่น 669 และ 2250-2235  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นช่วงการสั่นของสารประกอบคาร์บอนไดออกไซด์ และพีคการสั่นที่ความยาวคลื่น 1250-2100  $\text{cm}^{-1}$  และ 3400-4000  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นช่วงการสั่นของโมเลกุลน้ำ ดังนั้นสามารถเขียนสมการการเกิดปฏิกิริยาได้ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 ปฏิกิริยาระหว่างแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตและแคลเซียมคาร์บอเนตที่อุณหภูมิ 370°C [43]

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง XRD โดยทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเส้นที่ เกิดขึ้นจากการเผาไหม้สารผสมระหว่างแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตและแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่ง เกิดปฏิกิริยาขึ้น พบว่าโครงสร้างผลึกของเส้นมีความใกล้เคียงกับโครงสร้างผลึกของ  $\beta$ -Calcium meta phosphate ( $\text{Ca}(\text{PO}_3)_2$ ) ซึ่งเป็นโครงสร้างตาข่ายสามมิติของแคลเซียมพอสเฟต โดยการเกิด เป็นโครงตาข่ายพอลิฟอสเฟตเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการหน่วงการติดไฟใน PP เนื่องจากสามารถเป็น ฉนวนป้องกันไม่ให้ PP สัมผัสกับออกซิเจนและความร้อน การลามาไฟจึงช้าลงได้ นอกจากนี้ แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตยังสามารถสลายตัวให้ก๊าซแอมโมเนียซึ่งไม่ติดไฟเนื่องจากก๊าซที่ติดไฟได้ที่ เกิดขึ้น จึงทำให้เกิดการหน่วงการติดไฟที่ดีใน PP

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าการเตรียมไม้พลาสติกคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ (พอลิโอลิ- ฟิน) และเส้นใยธรรมชาติในอัตราส่วนและขนาดของเส้นใยธรรมชาติที่เหมาะสม สามารถเพิ่ม ความสามารถในการรับแรงของไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPC) ได้ ทั้งยังช่วยลดต้นทุนในการผลิตด้วย เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติเป็นองค์ประกอบที่มีราคาถูก [39] การใช้ PE-g-MA เป็นสารช่วยผสมในไม้- พลาสติกคอมโพสิตสามารถช่วยให้เกิดการผสมที่ดี ปรับปรุงการยึดติดระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์ เมทริกซ์และเส้นใยธรรมชาติที่มีความแตกต่างระหว่างขั้วได้ โดยส่งผลให้วัสดุที่ได้มีความแข็งแรงและ ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น [38, 39] การเติมสารหน่วงการติดไฟในไม้พลาสติกคอมโพสิตช่วยปรับปรุง สมบัติการทนไฟได้ เนื่องจากไม้พลาสติกคอมโพสิตเป็นวัสดุอินทรีย์ที่ติดไฟได้ดี โดยการใช้สารหน่วง การติดไฟกลุ่มฟอสฟอรัสเมื่อเติมในไม้พลาสติกคอมโพสิตให้ประสิทธิภาพการหน่วงไฟได้ดีที่สุด [40] และหากเตรียมเป็นสารหน่วงการติดไฟระบบอินตุมเนสเซนส์สามารถให้ประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น [5, 43] ซึ่งเมื่อใช้สารหน่วงไฟระบบอินตุมเนสเซนส์ร่วมกับผงเหล็กให้ประสิทธิภาพที่เสริมกัน [42] เปลือกหอย ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถเตรียมเป็นสารกลุ่มฟอสฟอรัสได้ [3] โดย สารประกอบฟอสฟอรัสที่เตรียมได้จากเปลือกหอยเมื่อเติมลงในพอลิเมอร์สามารถช่วยหน่วงการติดไฟ ได้ [4] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการปรับปรุงสมบัติไม้พลาสติกคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิด ความหนาแน่นสูงและเส้นใยกาบมะพร้าว ให้มีสมบัติการต้านทานการลามาไฟที่ดี โดยใช้สารหน่วงการ ติดไฟที่เตรียมได้จากเปลือกหอยแมลงภู่อซึ่งเป็นวัสดุจากธรรมชาติ ศึกษาค่าความหนาแน่น สมบัติ เชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และสมบัติการหน่วงการติดไฟของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPC) ระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) และเส้นใยคาบมะพร้าว (CF) ที่ปริมาณ 50 php ให้มีสมบัติทนไฟ โดยใช้สารหน่วงการติดไฟซึ่งปรับปรุงจากแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากเปลือกหอยแมลงภู่ซึ่งเป็นวัสดุจากธรรมชาติทำปฏิกิริยากับกรดฟอสฟอริก เพื่อผลิตเป็นแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรต (CaHP) โดยคาดว่าจะมีความสามารถใช้ทดแทนสารหน่วงการติดไฟกลุ่มฟอสฟอรัส และใช้เป็นองค์ประกอบในสารหน่วงการติดไฟระบบอินตุมเนสเซนซ์ (IFRs) โดยในงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 3 ตอน ได้แก่

ตอนที่ 1 ศึกษาการเตรียม CaHP จากเปลือกหอยแมลงภู่บดที่อนุภาคผ่านตะแกรงขนาด 150-200 เมช ทั้งชนิดกำจัดและไม่กำจัดสิ่งปนเปื้อนของเปลือกหอยแมลงภู่ เปรียบเทียบการใช้เป็นสารหน่วงการติดไฟที่ปริมาณ 25 และ 40 php

ตอนที่ 2 ศึกษาการใช้ CaHP เป็นสารหน่วงการติดไฟระบบเดี่ยว ในปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 20, 25, 30, 35 และ 40 php

ตอนที่ 3 การศึกษาสารหน่วงการติดไฟ CaHP ในระบบอินตุมเนสเซนซ์ (IFRs) โดยใช้ร่วมกับ เมลามีน (MA) และเส้นใยมะพร้าว (CF) เป็นสารให้ฟองและสารให้เถ้า ตามลำดับ ควบคุมอัตราส่วน MA และ CF คงที่ ที่ 0.17 และ 1 ส่วนโดยน้ำหนัก ศึกษาอัตราส่วนของ MA:CaHP:CF ที่ 0.17:0.5:1, 0.17:0.6:1, 0.17:0.7:1 และ 0.17:0.8:1

### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เกรดชนิดขึ้นรูป HD1600J, บริษัท พีทีที โกลบอล เคมิคอล จำกัด สมบัติบางประการของ HDPE ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงได้ดังตารางที่ 3.1
2. เส้นใยคาบมะพร้าว (CF) เบอร์ 4 ขนาด 40-80 เมช, บริษัท ดับบิวพีซี ดีไซน์ จำกัด สมบัติบางประการของเส้นใยคาบมะพร้าวที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงได้ดังตารางที่ 3.2
3. สารหน่วงการติดไฟ
  - แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) เกรดการค้า, บริษัท คลาเรียนท์ เคมิคอล (ประเทศไทย) จำกัด สมบัติบางประการของ APP ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงได้ดังตารางที่ 3.3
  - เมลามีน (MA) เกรดการค้า, บริษัท ไทยเคเค จำกัด สมบัติบางประการของ MA ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงได้ดังตารางที่ 3.4
  - อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (ATH) ชื่อทางการค้า APYRAL®, บริษัท เบ็นไมเยอร์ เคมีคอลส์ (ที) จำกัด สมบัติบางประการของ ATH ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงได้ดังตารางที่ 3.5
4. สารหล่อลื่น
  - ไชพอลิเอทิลีน (PE-wax) เกรด PE H 110, บริษัท เอส.คิว.ไอ กรุ๊ป จำกัด
  - กรดไขมันไม่อิ่มตัวผสมซิงค์และแคลเซียม (Blend of unsaturated fatty acid soaps with Zn and Ca) ชื่อทางการค้า R-10, บริษัท เวล อิน เอ็นเตอร์ไพรส์ (ประเทศไทย) จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สารต้านออกซิเดชัน
  - กลุ่มฟีนอลิก (Phenolic antioxidant) ชื่อทางการค้า Anox 20, บริษัท เคมทูลา จำกัด
  - กลุ่มฟอสไฟต์ (Phosphite antioxidant) ชื่อทางการค้า Alkanox 240, บริษัท เคมทูลา จำกัด
6. สารช่วยผสม
  - พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์ (HDPE-g-MA) เกรด NB 1016PE, บริษัท ออฟติมอลเทค จำกัด สมบัติบางประการของ HDPE-g-MA ที่ใช้ใน งานวิจัยนี้ แสดงได้ดังตารางที่ 3.6
7. เปลือกหอยแมลงภู่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมอาหาร (แคะเนื้อหอยแมลงภู่) จากอำเภอ- คลองด่าน จังหวัดสมุทรปราการ
8. กรดฟอสฟอริก 85% (โดยน้ำหนัก) เกรดการค้า, บริษัทแกมมาโก้ (ประเทศไทย) จำกัด
9. อะซิโตน เกรดการค้า, บริษัท เซนพ้อย (ประเทศไทย) จำกัด
10. น้ำกลั่น
11. ไนโตรเจนเหลว เกรดการค้า, บริษัทลินด์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)
12. โซเดียมไฮดรอกไซด์ เกรดการค้า, บริษัทแกมมาโก้ (ประเทศไทย) จำกัด
13. โซเดียมไฮโปคลอไรต์ 6% (โดยน้ำหนัก) ชื่อทางการค้า สารฟอกขาวไฮเตอร์, บริษัท คาโอ อินดัสเตรียล (ประเทศไทย) จำกัด
14. Surfactant plevitro 75%, บริษัท เมทเลอร์-โทเลโด (ประเทศไทย) จำกัด
15. กรดบอริก เกรดวิเคราะห์, บริษัท ฟิชเชอร์ โซเลนท์ฟิค (ประเทศไทย) จำกัด

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ HDPE\*

สมบัติ	InnoPlus HD1600J	หน่วย	วิธีการทดสอบ
ดัชนีการไหล (190°C /2.16 kg)	12	g/10 min	ASTM D 1238
ความหนาแน่น	0.958	g/cm <sup>3</sup>	ASTM D 1505
จุดหลอมเหลว	129	°C	ASTM D 3418
เปอร์เซ็นต์การดัดยัด ณ จุดขาด	210	%	ASTM D 638
มอดุลัสโค้งงอ	1323	MPa	ASTM D 790
ความแข็งแรงกระแทก	30	J/m	ASTM D 256

\*ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.2 ขนาดของเส้นใยกาบมะพร้าว\*

เบอร์	ตะแกรง (เมช)	ขนาดรูตะแกรงเฉลี่ย (mm)	ขนาด (mm)			Aspect ratio
			กว้าง	ยาว	หนา	
4	40	0.337	0.40	2.99	0.25	7.48
	60	0.215	0.25	1.91	0.17	7.64
	80	0.165	0.16	1.91	0.12	11.94

\*ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของ APP\*

สมบัติ	APP	หน่วย
ลักษณะ	ผงสีขาว	-
ปริมาณฟอสฟอรัส	31-32	% (w/w)
ปริมาณไนโตรเจน	14-15	% (w/w)
ความชื้น	0.25	% (w/w)
ค่า pH	5.5-7.5	-
ขนาดอนุภาค	15	$\mu\text{m}$
ความหนาแน่น	1.900	$\text{g}/\text{cm}^3$

\*ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.4 สมบัติบางประการของ MA\*

สมบัติ	MA	หน่วย
ลักษณะ	ผงสีขาว	-
ความชื้น	0.10	% (w/w)
ค่า pH	7.5-9.5	-
อุณหภูมิการสลายตัว	350-450	$^{\circ}\text{C}$
ความหนาแน่น	1.570	$\text{g}/\text{cm}^3$

\*ข้อมูลจากบริษัทผู้จำหน่าย

ตารางที่ 3.5 สมบัติบางประการของ ATH\*

สมบัติ	APYRAL <sup>®</sup>	หน่วย
ลักษณะ	ผงสีขาว	-
ปริมาณอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์	99.5	% (w/w)
ความแข็ง	3	Mohs
ขนาดอนุภาค	45	$\mu\text{m}$
อุณหภูมิการสลายตัวให้โมเลกุลน้ำ	220	$^{\circ}\text{C}$
ความหนาแน่น	2.420	$\text{g}/\text{cm}^3$

\*ข้อมูลจากบริษัทผู้จำหน่าย

ตารางที่ 3.6 สมบัติบางประการของ HDPE-g-MA\*

สมบัติ	NB 1016PE	หน่วย
ความหนาแน่น	0.925	$\text{g}/\text{cm}^3$
อุณหภูมิการหลอมเหลว	118-127	$^{\circ}\text{C}$
ดัชนีการไหล (190 $^{\circ}\text{C}$ /2.16 kg)	1-2	$\text{g}/10 \text{ min}$
ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์	2	%

\*ข้อมูลจากบริษัทผู้จำหน่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer, รุ่น MX500-D75L90, Chareon Tut Co., Ltd.)
2. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder, รุ่น 5HP, Bosco Engineering Co., Ltd.)
3. เครื่องบดผง (รุ่น Bebicon 400, Hitachi Co., Ltd.)
4. เครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก (รุ่น TTI 200/80, บริษัท ประทานกิจการ จำกัด)
5. เครื่อง Thermal gravimetric analyzer (TGA, รุ่น TG 209 F3 Tarsus<sup>®</sup>, Netzsch Co., Ltd.)
6. เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC, รุ่น DSC 204 F1 Phoenix<sup>®</sup> (ASC), Netzsch Co., Ltd.)
7. เครื่อง X-ray diffractometer (XRD, รุ่น D8 Advance, Bruker AXS Co., Ltd.)
8. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM, รุ่น LR5K, Lloyd-Instrument Ltd.)
9. เครื่องวัดความแข็งกด (รุ่น DSTFDDR, Italia Co., Ltd.)
10. เครื่องทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทก (รุ่น Yasuda 199311, Yasuda seiki seisakusho Ltd.)
11. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM, รุ่น LEO1455 VP, LEO (Germany) Co., Ltd.)
12. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven, รุ่น ML204, Memmert (Germany) Co., Ltd.)
13. เครื่องทำรอยบาก (Notch maker, รุ่น Yasuda No. 7686, Yasuda seiki seisakusho Ltd.)
14. เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Mastersizer X, รุ่น MSX15, Malvern Instruments Ltd.)
15. เครื่องร่อนแยกขนาด (Sieve shaker, รุ่น 01409023, Retsch Co., Ltd.)
16. ตะแกรงขนาด 100, 150, 200 และ 250 เมช
17. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR, รุ่น FTIR Spectrum Gx, Perkin Elmer Co., Ltd.)
18. เครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ (รุ่น IKA<sup>®</sup> 5000, Cole-parmer (USA) Co., Ltd.)
19. เครื่อง X-ray fluorescence spectrometer (XRF, รุ่น SRS 3400, Bruker AXS (Germany) Co., Ltd.)
20. เครื่อง Thermal gravimetric analyzer ต่อกับเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (TGA-FTIR, รุ่น TGA-FTIR2 STAR<sup>®</sup> system, Mettler toledo Co., Ltd.)
21. ชุดวัดความหนาแน่น (Density kit, รุ่น ML-DNY-43, Mettler toledo Co., Ltd.)
22. เครื่องบดแบบลูกบอล (Ball mill) พร้อมลูกบดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1, 1.5 และ 2 cm
23. เครื่องปั่นกวน
24. ไมโครมิเตอร์ และเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์
25. เครื่องชั่งตวงวัด 2 ตำแหน่งและ 4 ตำแหน่ง
26. ตะเกียงบุนเสน
27. ปีกเกอร์ขนาด 25, 150, 500 และ 1000 ml

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

28. เดซิเคเตอร์
29. เครื่องกรองลดความดัน
30. กระดาษลิตมัสสีแดงและสีน้ำเงิน

### 3.3 ขั้นตอนการทดลอง

#### ตอนที่ 1 การเตรียม CaHP จากเปลือกหอยแมลงภู

##### 1.1 การเตรียมเปลือกหอยแมลงภูชนิดกำจัดและไม่กำจัดสิ่งปนเปื้อน

###### 1.1.1 การเตรียมเปลือกหอยชนิดไม่กำจัดสิ่งปนเปื้อน (Untreated shell, US)

ซึ่งเปลือกหอยแมลงภูปริมาณ 2 kg มาล้างด้วยน้ำสะอาด 2 ครั้ง เพื่อตัดแยกสิ่งเจือปนต่าง ๆ ออกไป จากนั้นนำมาแช่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตรเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดกาบโปรตีนที่เหลืออก (ไม่มีชิ้นส่วนเนื้อหอยแมลงภูติดที่เปลือก) หลังจากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำสะอาดอีก 3 ครั้งหรือจนกว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หมด ตรวจสอบการตกค้างของโซเดียมไฮดรอกไซด์จากน้ำที่ใช้ล้างเปลือกหอยแมลงภู โดยใช้กระดาษลิตมัสสีแดง หากกระดาษลิตมัสไม่เปลี่ยนสีแสดงว่าไม่มีการตกค้างของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เปลือกหอย จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

###### 1.1.2 การเตรียมเปลือกหอยชนิดกำจัดสิ่งปนเปื้อน (Treated shell, TS)

ซึ่งเปลือกหอยชนิดไม่กำจัดสิ่งปนเปื้อนปริมาณ 500 g แช่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์เข้มข้นร้อยละ 6 โดยปริมาตร (สารฟอกขาวไฮเตอร์) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อกำจัดตรงควัตถุสีซึ่งอยู่บนนอกของเปลือกหอย หลังจากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำสะอาด 4 ครั้งหรือจนกว่าสารละลายโซเดียมไฮเปอร์คลอไรต์หมด ตรวจสอบจากน้ำที่ใช้ล้างเปลือกหอยแมลงภูโดยใช้กระดาษลิตมัสสีแดง หากไม่เปลี่ยนสีแสดงว่าไม่มีการตกค้างของสารละลายโซเดียมไฮเปอร์คลอไรต์ จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

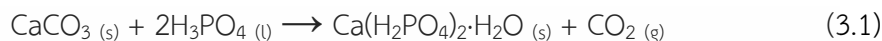
##### 1.2 การบดเปลือกหอยแมลงภู

นำเปลือกหอยที่ผ่านขั้นตอนการกำจัดและไม่กำจัดสิ่งปนเปื้อนมาบดด้วยเครื่องบดให้เปลือกหอยแตกเป็นชิ้นขนาดเล็ก จากนั้นนำมาบดให้ละเอียดด้วยหม้อบดแบบลูกบอล โดยใช้ลูกบด 3 ขนาด ได้แก่ ลูกบดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1, 1.5 และ 2 cm จำนวนรวม 22 ลูก ใส่เปลือกหอยปริมาณ 300 g ลงในหม้อบด ใส่น้ำลงในหม้อบดปริมาณ 2 ใน 3 เท่าของหม้อบด จากนั้นนำหม้อบดวางในรางหมุน หมุนหม้อบดเป็นเวลา 2 วัน นำเปลือกหอยบดละเอียดที่ได้อบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาคัดแยกขนาดโดยใช้เครื่องร่อนที่มีตะแกรงขนาด 100, 150 และ 200 เมช โดยเลือกอนุภาคของเปลือกหอยแมลงภูบดที่ผ่านตะแกรงขนาด 150 เมช แต่ไม่ผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช เพื่อใช้ในการทดลอง เนื่องจากเป็นขนาดที่ร่อนออกมาได้มากที่สุด

##### 1.3 การเตรียม CaHP จากเปลือกหอยแมลงภูที่บดละเอียด

นำเปลือกหอยที่ผ่านการร่อนปริมาณ 20 g ใส่ในบีกเกอร์ที่หนึ่ง (ขนาด 1,000 ml) เติมน้ำกลั่นเพื่อเป็นตัวกลางปริมาณ 200 ml นำบีกเกอร์ที่หนึ่งไปวางบนเครื่องปั่นกวนในตัวดูดควัน ต่อมานำบีกเกอร์ที่สอง (ขนาด 250 ml) เติมน้ำกลั่นประมาณ 20 ml จากนั้นค่อย ๆ เทกรดฟอสฟอริกเข้มข้นร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก ปริมาณ 82 ml ลงในบีกเกอร์ที่สอง เพื่อเจือจางกรด หลังจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นค่อย ๆ เทสารละลายจากบีกเกอร์ที่สองลงในบีกเกอร์ที่หนึ่ง โดยเทสารละลายพร้อมทั้งทำการปั่น กวนบีกเกอร์ที่หนึ่งไปด้วย ทำการปั่นกวนเป็นเวลา 20 นาทีที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้จน ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นหมด จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้กรองด้วยชุดกรองลดความดันพร้อมล้างตะกอน ด้วยอะซิโตน เพื่อชะล้างกรดฟอสฟอริกที่ไม่ทำปฏิกิริยา ตรวจสอบกรดตกค้างจากอะซิโตนที่ใช้ล้าง ตะกอนโดยใช้กระดาษลิตมัสสีน้ำเงิน หากกระดาษลิตมัสไม่เปลี่ยนสีแสดงว่าไม่มีการตกค้างของกรด ตั้งตะกอนที่ได้ไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อระเหยอะซิโตน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการเตรียม CaHP จากเปลือกหอยแมลงภู่อ

## ตอนที่ 2 ศึกษาการใช้ CaHP เป็นสารหน่วงการติดไฟระบบเดียว

### 2.1 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสม

เตรียมพอลิเมอร์ผสมสูตรโดยชั่งส่วนผสมตามอัตราส่วนดังตารางที่ 3.7 โดยเตรียมสูตรละ 700 g ในการผสมแต่ละครั้งใช้ปริมาณสารผสมรวม 350 g ผสมโดยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) โดยตั้งสภาวะของเครื่องดังนี้

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

การผสมแบ่งเป็นสองช่วงได้แก่ นาทีที่หนึ่งใส่ HDPE ลงในเครื่องผสมทิ้งไว้ 2 นาที เพื่อให้ HDPE หลอม จากนั้นนาทีที่สามค่อย ๆ เติม CF ที่เขย่าวรวมกับสารเติมแต่งต่าง ๆ ทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยควบคุมเวลาการเติมเป็นเวลา 3 นาที ผสมต่ออีก 10 นาที จนครบเวลา 15 นาที จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมสูตรตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปบดให้มีขนาดเล็กเพื่อนำไปฉีดขึ้นรูปต่อไป

ตารางที่ 3.7 สูตรผสมที่เตรียมเทียบเป็นส่วนในร้อยละของพอลิเมอร์ (ระบบเดี่ยว)

สูตร	ส่วนประกอบของไม้พลาสติกคอมโพสิต (php)							
	HDPE	CF	FRs	HDPE-g-MA	PE wax	Anox 20	Alkanox 240	R10
WPC	100	50	-	3	4	0.05	0.05	2
WPCAPP25	100	50	25	3	4	0.05	0.05	2
WPCATH25	100	50	25	3	4	0.05	0.05	2
WPCATH40	100	50	40	3	4	0.05	0.05	2
WPCUS-CaHP20	100	50	20	3	4	0.05	0.05	2
WPCUS-CaHP25	100	50	25	3	4	0.05	0.05	2
WPCUS-CaHP30	100	50	30	3	4	0.05	0.05	2
WPCUS-CaHP35	100	50	35	3	4	0.05	0.05	2
WPCUS-CaHP40	100	50	40	3	4	0.05	0.05	2
WPCBS-CaHP25	100	50	25	3	4	0.05	0.05	2
WPCBS-CaHP40	100	50	40	3	4	0.05	0.05	2

\*อ้างอิงสูตรจากบริษัทไม้พลาสติกคอมโพสิตเชิงพาณิชย์

### ตอนที่ 3 ศึกษาการใช้ CaHP เป็นสารหน่วงการติดไฟระบบอินตุมสเซนส์

การศึกษานี้เป็นการติดไฟ US-CaHP ปริมาณ 0.5-0.8 ส่วนโดยน้ำหนัก ในระบบอินตุมสเซนส์ (IFRs) โดยใช้ร่วมกับเมลามีน (MA) เป็นสารให้ฟอง และเส้นใยคาบมะพร้าว (CF) เป็นสารทำให้เกิด Char ควบคุมอัตราส่วน MA และ CF คงที่ ที่ 0.17 และ 1 ส่วนโดยน้ำหนัก ซึ่งส่วนผสมตามอัตราส่วนดังตารางที่ 3.8 โดยสภาวะการผสมและปริมาณพอลิเมอร์ผสมสูตรที่เตรียมเช่นเดียวกับตอนที่ 2

ตารางที่ 3.8 สูตรผสมที่เตรียมเทียบเป็นส่วนในร้อยละของพอลิเมอร์ (ระบบอินตุมสเซนส์)

สูตร	ส่วนประกอบของไม้พลาสติกคอมโพสิต (php)								
	HDPE	IFRs			HDPE-g-MA	PE wax	Anox 20	Alkanox 240	R10
		MA	สารกลุ่มฟอสฟอรัส	CF					
Intu-APP0.5	100	8.5	25	50	3	4	0.05	0.05	2
Intu-CaHP0.5	100	8.5	25	50	3	4	0.05	0.05	2
Intu-CaHP0.6	100	8.5	30	50	3	4	0.05	0.05	2
Intu-CaHP0.7	100	8.5	35	50	3	4	0.05	0.05	2
Intu-CaHP0.8	100	8.5	40	50	3	4	0.05	0.05	2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นใดได้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 กระบวนการฉีดขึ้นรูป

นำไม้พลาสติกคอมโพสิตผสมสูตรที่บดเป็นเม็ด มาอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นก่อนไปฉีดขึ้นรูปโดยใช้เครื่องฉีดขึ้นรูป โดยตั้งสภาวะของเครื่องดังนี้ (สภาวะของเครื่องฉีดขึ้นรูปส่วนอื่นแสดงในภาคผนวก ค)

อุณหภูมิการฉีดขึ้นรูป	180-190°C
อุณหภูมิการหล่อเย็น	10°C

### 3.5 การวิเคราะห์และทดสอบ

#### 3.5.1 การวิเคราะห์ CaHP ที่เตรียมได้

##### 3.5.1.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาของ CaHP

ติดเทปคาร์บอนลงบนสตัป (Stub) นำผง CaHP ที่เตรียมได้โรยลงบนเทปคาร์บอน จากนั้นนำไปเคลือบทองคำ แล้ววิเคราะห์ด้วย SEM

##### 3.5.1.2 การวิเคราะห์การกระจายของขนาดอนุภาคของ CaHP

นำผง CaHP ที่เตรียมได้มาวิเคราะห์การกระจายของขนาดอนุภาค โดยใช้เครื่อง Mastersizer X วิเคราะห์แบบเปียก (Wet analysis) ซึ่งมีน้ำเป็นตัวกลาง โดยนำตัวอย่าง CaHP เทลงใน Recirculator ที่มีน้ำอยู่จนถึงระดับ Obscuration ที่ประมาณ 15-30% กดปุ่มให้เครื่องทำการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค

##### 3.5.1.3 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของ CaHP

นำผง CaHP ตรวจสอบวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันโดยทำการอัดเม็ดร่วมกับ KBr ใช้เทคนิค FTIR ในช่วงเลขคลื่น 400  $\text{cm}^{-1}$  ถึง 4000  $\text{cm}^{-1}$

##### 3.5.1.4 การวิเคราะห์อุณหภูมิและหมู่ฟังก์ชันการสลายตัวของ CaHP

นำผง CaHP ที่เตรียมได้ตรวจสอบหาอุณหภูมิการสลายตัวขององค์ประกอบต่าง ๆ โดยใช้เครื่อง TGA ต่อเข้ากับเครื่อง FTIR เพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันขณะสลายตัวของ CaHP ใช้น้ำหนักสารตัวอย่างประมาณ 40 mg ให้ความร้อนด้วยอัตรา 10°C/min จากอุณหภูมิ 30°C ถึงอุณหภูมิ 900°C ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์องค์ประกอบของการสลายตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ

##### 3.5.1.5 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของ CaHP

นำผง CaHP ที่เตรียมได้มาตรวจวิเคราะห์โครงสร้างผลึก โดยใช้เครื่อง XRD ใช้น้ำหนักของสารตัวอย่างประมาณ 1-2 g กำหนดมุมการวิเคราะห์ ( $2\theta$ ) ในช่วง 10 องศา ถึง 60 องศา ที่อัตราการสแกน (Scan rate) 2 องศาต่อนาที

##### 3.5.1.6 การวัดค่าความถ่วงจำเพาะของ CaHP

วัดค่าความถ่วงจำเพาะของ CaHP ตามมาตรฐาน ASTM D792 (Method B) [44] มาตรฐานนี้ใช้กับวัสดุที่อยู่ในรูปของผง (Powder) หรือเกล็ด (Flakes) โดยใช้ขวดพิคโนมิเตอร์ (Pycnometer) ในการวัดค่า

1. ขั้นตอนการทดสอบ
  - 1.1 ชั่งน้ำหนักของขวดพิกโนมิเตอร์เปล่า
  - 1.2 เติมน้ำกลั่นลงในขวดพิกโนมิเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนักขวดพิกโนมิเตอร์ร่วมกับน้ำหนักของน้ำ
  - 1.3 ล้างทำความสะอาดขวดพิกโนมิเตอร์ แล้วอบให้แห้ง
  - 1.4 เติม CaHP ประมาณ 3 g ลงในขวดพิกโนมิเตอร์ ชั่งน้ำหนักของขวดพิกโนมิเตอร์ร่วมกับ CaHP
  - 1.5 เติมน้ำกลั่นลงในขวดพิกโนมิเตอร์ ชั่งน้ำหนักของขวดพิกโนมิเตอร์ร่วมกับน้ำหนักของ CaHP และน้ำกลั่น แล้วคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะได้ดังสมการ

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ} = \frac{a}{a + b - m} \tag{3.2}$$

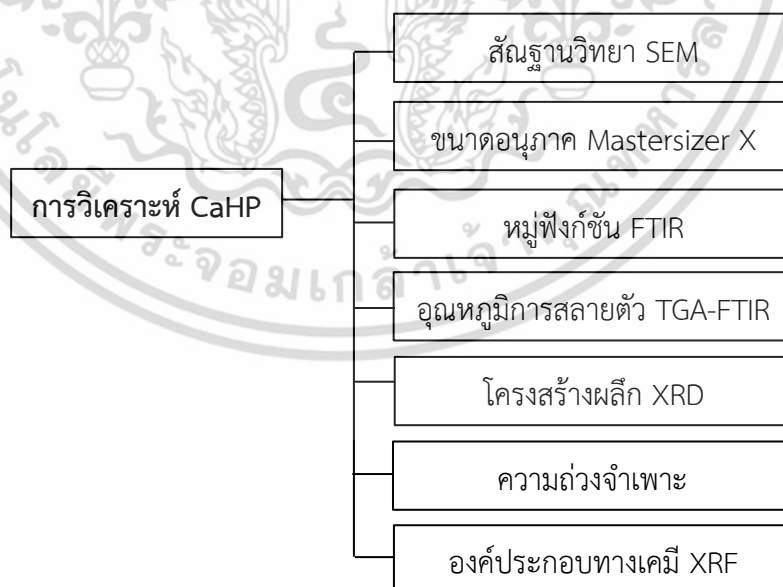
เมื่อ

- a = น้ำหนักวัสดุทดสอบ
- b = น้ำหนักของขวดพิกโนมิเตอร์ร่วมกับน้ำหนักของน้ำกลั่น
- m = น้ำหนักของขวดพิกโนมิเตอร์ร่วมกับน้ำหนักของวัสดุทดสอบและน้ำกลั่น

ความหนาแน่น = ความหนาแน่นน้ำ × ความถ่วงจำเพาะ (3.3)

### 3.5.1.7 วิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีของ CaHP

นำผง CaHP ที่เตรียมได้มาตรวจวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมี ใช้ น้ำหนักสารตัวอย่างปริมาณ 0.5 g ทำการอัดเม็ดร่วมกับกรดบอริกปริมาณ 4.5 g อัดเม็ดตัวอย่างด้วย เครื่องอัดไฮโดรลิกใช้แรง 150 kN จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF



รูปที่ 3.2 แผนผังการวิเคราะห์ CaHP ที่เตรียมได้จากเปลือกหอยแมลงภู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.2 การทดสอบสมบัติการหน่วงการติดไฟของ WPC

#### 3.5.2.1 การทดสอบยูแอล 94 แบบแนวตั้ง (UL94 V)

วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน UL94 แบบแนวตั้ง [45] เป็นการทดสอบเบื้องต้นสำหรับไม้พลาสติกที่นำมาใช้ประโยชน์ในที่ที่มีความเสี่ยงต่อการจุดติดไฟ พิจารณาถึงขีดความสามารถในการติดไฟได้ของวัสดุ โดยวิธีนี้ไม่ได้มีจุดมุ่งหมายที่แสดงให้เห็นถึงอันตรายของวัสดุภายใต้การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจริง แต่เป็นเพียงการประเมินเบื้องต้นในการจุดติดของเปลวไฟสำหรับชิ้นงาน

วิธีการทดสอบ UL94 V ทำได้โดยนำชิ้นงานทดสอบขนาด  $13 \times 125 \times 3 \text{ mm}^3$  ซึ่งเป็นขนาดที่มาตรฐานระบุไว้ จำนวน 5 ชิ้นงาน โดยทำการเผาแบบแนวตั้งดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การทดสอบ UL94 V [45]

การทดสอบใช้เปลวไฟสีน้ำเงิน ความสูงของเปลวไฟ 20 mm เผาทำมุม  $45^\circ$  กับชิ้นงานเป็นเวลา 10 วินาที จากนั้นนำเปลวไฟออกจากชิ้นงานพร้อมทั้งสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นตามเกณฑ์การแบ่งกลุ่มพฤติกรรมของวัสดุต่อการติดไฟตามมาตรฐาน UL94 V ดังตารางที่ 3.9 ในการทดสอบนี้ต้องทำในสถานที่ที่ไม่มีลมเนื่องจากลมทำให้ผลการทดสอบคลาดเคลื่อน โดยประสิทธิภาพการต้านการลามไฟของวัสดุตามมาตรฐาน UL94 V เรียงตามลำดับ คือ  $V-2 < V-1 < V-0$

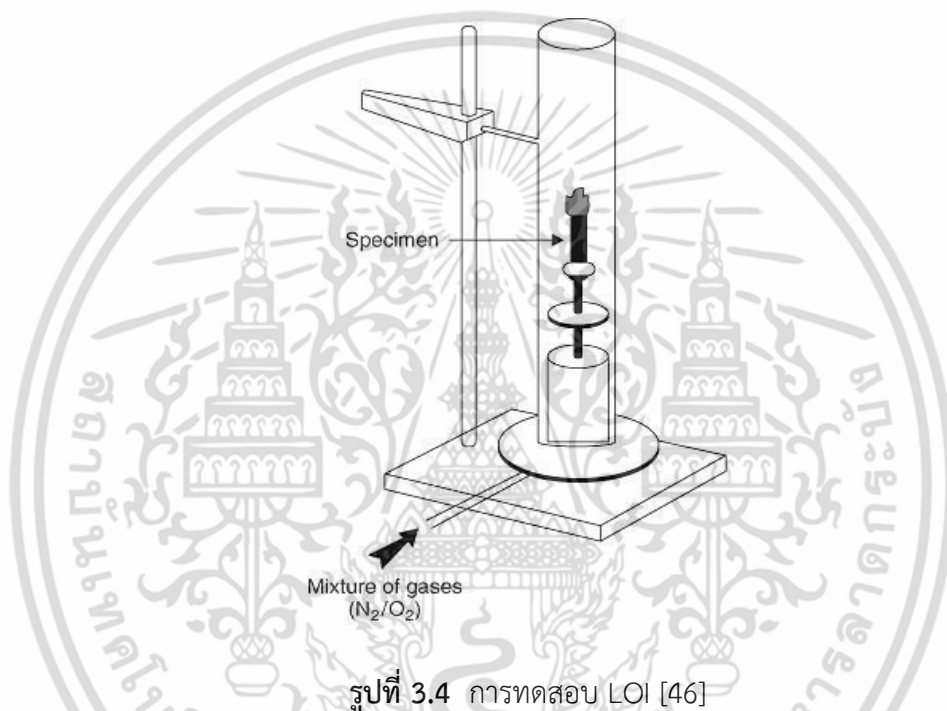
ตารางที่ 3.9 เกณฑ์การแบ่งกลุ่มพฤติกรรมของวัสดุต่อการติดไฟตามมาตรฐาน UL94 V [45]

หลักเกณฑ์การแบ่งกลุ่มตามมาตรฐาน UL94 V	
V-0	การเผาไหม้หยุดภายใน 10 วินาที โดยไม่มีการหยดของเปลวไฟ
V-1	การเผาไหม้หยุดภายใน 30 วินาที โดยไม่มีการหยดของเปลวไฟ
V-2	การเผาไหม้หยุดภายใน 30 วินาที โดยมีการหยดของเปลวไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.2.2 การทดสอบดัชนีออกซิเจน

ค่าดัชนีออกซิเจน (LOI) เป็นการทดสอบหาปริมาณออกซิเจนต่ำสุดที่ทำให้ชิ้นงานติดไฟได้ตามมาตรฐาน ASTM D2863 [46] โดยการทดสอบต้องวางชิ้นงานเป็นแนวตั้งกับหลอดแก้วและติดชิ้นงานกับตัวล๊อค ดังรูปที่ 3.4 จากนั้นนำหลอดก๊าซผสมระหว่างก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจนในอัตราส่วนที่ควบคุม (แสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก ข) ป้อนเข้าไปที่ฐานของหลอดทดสอบอย่างต่อเนื่อง โดยก๊าซออกตรงช่องว่างบริเวณด้านบนของหลอด จากนั้นนำเปลวไฟมาจ่อตรงส่วนบนสุดของชิ้นงานทดสอบ เพื่อให้เกิดการเผาไหม้เหมือนกับการจุดเทียนไข ถ้าหากไม่เกิดการลุกไหม้ให้เพิ่มปริมาณก๊าซออกซิเจนจนกระทั่งชิ้นงานติดไฟ ซึ่งผลการทดสอบรายงานเป็นเปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนที่ทำให้ชิ้นงานติดไฟดังตารางที่ 3.10



ตารางที่ 3.10 เกณฑ์การแบ่งกลุ่มพฤติกรรมของวัสดุต่อการติดไฟตามมาตรฐาน LOI [46]

LOI (%)	ประเภทของวัสดุ
< 21	วัสดุที่ติดไฟได้ (Flammable materials)
21-24	วัสดุที่ติดไฟได้ช้า (Slow burning materials)
24-100	วัสดุที่สามารถดับไฟเองได้ (Self-extinguishing materials)
> 100	วัสดุที่ไม่ติดไฟ (Non-flammable materials)

### 3.5.2.3 เครื่องวิเคราะห์พลังงานความร้อน

วิเคราะห์พลังงานความร้อนของตัวอย่างในระบบ Isoperibol ด้วย Bomb calorimeter มีหลักการทำงานโดยเมื่อใส่ตัวอย่างลงไปในกลุ่มบอมบ์ ระบบเผาตัวอย่างจนไฟลุกไหม้ทำให้เกิดความร้อน ซึ่งความร้อนที่ออกมาจากระบบสามารถถ่ายเทให้กับน้ำที่ล้อมรอบลูกบอมบ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอร์โมมิเตอร์อิเล็กทรอนิกส์จึงวัดค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำ โดยค่าที่ได้เครื่องมือจะประมวลผลและรายงานค่าเป็นค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ (Heat of combustion)

1. เตรียมชิ้นงานตัวอย่างให้มีขนาดประมาณ  $1 \times 1 \times 0.3 \text{ cm}^3$
2. ขั้นตอนการทดสอบ

2.1 เปิดวาล์วถังก๊าซออกซิเจนและเปิดเครื่องทำความเย็นที่อุณหภูมิ  $20^\circ\text{C}$  รอจนเครื่องทำความเย็นถึงอุณหภูมิ  $20^\circ\text{C}$  จึงเปิดเครื่อง Bomb calorimeter

2.2 ชั่งน้ำหนักตัวอย่างด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งและบันทึกน้ำหนัก

2.3 บรรจุตัวอย่างลงในลูกบอมบ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (a)

2.4 กดเปิดโปรแกรมที่เครื่อง Bomb calorimeter กรอกน้ำหนัก

ตัวอย่างลงในโปรแกรม

2.5 แขนวลูกบอมบ์ที่เครื่องดังแสดงที่รูป 3.5 (b) กด Start เพื่อเริ่มการทดสอบ โดยการทดสอบแต่ละครั้งใช้เวลาประมาณ 25 นาที



(a) ภายนอกและภายในลูกบอมบ์

(b) การแขวนลูกบอมบ์

รูปที่ 3.5 เครื่อง Bomb calorimeter [47]

### 3.5.3 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

#### 3.5.3.1 การวิเคราะห์หาความหนาแน่นของตัวอย่าง

วิเคราะห์ความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM D792 (Method A) [44] โดยใช้เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ประกอบกับ Density kit ความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่างถูกกำหนดจากของเหลวที่ทราบความหนาแน่น ( $\rho_0$ ) โดยในการทดลองใช้น้ำกลั่นและทำการทดสอบที่อุณหภูมิ  $22.4^\circ\text{C}$  ( $\rho_0 = 0.9977 \text{ g/cm}^3$  ที่  $22.4^\circ\text{C}$ )

1. การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

เตรียมชิ้นงานตัวอย่างให้มีขนาดประมาณ  $5 \times 5 \times 3 \text{ mm}^3$

2. ขั้นตอนการทดสอบ [48]

2.1 จัดเตรียมอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (a) และรอจนกระทั่งน้ำกลั่นอุณหภูมิคงที่จึงเริ่มทำการทดสอบ

2.2 หยด Surfactant pervitro 75% ทำหน้าที่ลดความตึงผิวของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ชั่งชิ้นงานตัวอย่างในอากาศโดยวางชิ้นงานตัวอย่างบน Pan ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (b) กดบันทึกค่าน้ำหนักที่ชั่งได้

2.4 หลังจากนั้นชั่งชิ้นงานตัวอย่างในน้ำกลั่น

- กรณีที่ตัวอย่างมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำกลั่น ให้จัดวาง Basket แบบคว่ำ Basket ดังรูปที่ 3.6 (c) จากนั้นใส่ตัวอย่างให้อยู่ภายใต้ Basket โดยไม่ให้มีฟองอากาศเกิดขึ้น ก่อนทำการกดบันทึกค่าน้ำหนัก

- กรณีที่ตัวอย่างมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำกลั่น ให้จัดวาง Basket แบบหงาย ดังรูปที่ 3.5 (d) จากนั้นใส่ตัวอย่างลงไปบน Basket และกดบันทึกค่าน้ำหนัก

2.5 หลังจากวัดค่าน้ำหนักของตัวอย่างในตัวกลางที่เป็นอากาศและตัวกลางที่เป็นน้ำกลั่นแล้วกดปุ่มคำนวณ เครื่องจะแสดงค่าความหนาแน่นของตัวอย่าง

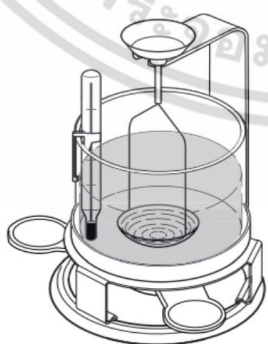
2.6 ก่อนทดสอบชิ้นงานตัวอย่างทุกครั้งควรทำการทดสอบความแม่นยำของเครื่องมือโดยใช้เม็ดพอลิเมอร์ที่ทราบความหนาแน่นที่แน่นอน

ค่าความหนาแน่นของตัวอย่าง ( $\rho$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{ความหนาแน่นของตัวอย่าง : } \rho = \frac{A}{A-B} (\rho_0 - \rho_L) + \rho_L \quad (3.4)$$

$$\text{ปริมาตรของตัวอย่าง : } V = \frac{\alpha(A-B)}{(\rho_0 - \rho_L)} \quad (3.5)$$

เมื่อ	$\rho$	=	ความหนาแน่นของตัวอย่าง
	A	=	น้ำหนักของตัวอย่างที่ชั่งในอากาศ
	B	=	น้ำหนักของตัวอย่างที่ชั่งในของเหลว
	V	=	ปริมาตรของตัวอย่าง
	$\rho_0$	=	ความหนาแน่นของของเหลวที่ทราบความหนาแน่น
	$\rho_L$	=	ความหนาแน่นของอากาศ ( $0.0012 \text{ g/cm}^3$ )
	$\alpha$	=	Weight correction factor (0.99985)



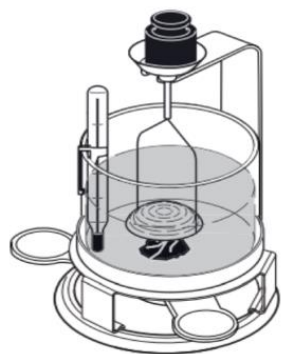
(a) การจัดวางอุปกรณ์



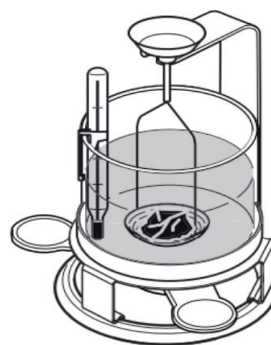
(b) ชั่งชิ้นงานในอากาศ

รูปที่ 3.6 อุปกรณ์ทดสอบเพื่อหาค่าความหนาแน่น [48]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c) กรณีชิ้นงานความหนาแน่น  
น้อยกว่าน้ำกลั่น



(d) กรณีชิ้นงานความหนาแน่น  
มากกว่าน้ำกลั่น

รูปที่ 3.6 อุปกรณ์ทดสอบเพื่อหาค่าความหนาแน่น (ต่อ) [48]

### 3.5.3.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาของไม้พลาสติกคอมโพสิต

เพื่อดูการกระจายตัวของ CF และ CaHP โดยนำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการฉีดขึ้นรูป แซนไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นหักชิ้นงานภายใต้ไนโตรเจนเหลว จากนั้นนำชิ้นงานที่หักแล้วไปเคลือบด้วยทองคำ วิเคราะห์สัณฐานวิทยาที่ภาคตัดขวางของชิ้นงานด้วยเครื่อง SEM

### 3.5.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

#### 3.5.4.1 การหาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก การเกิดผลึก และปริมาณผลึก

นำตัวอย่างจากชิ้นงานฉีดขึ้นรูปมาศึกษาสมบัติทางความร้อน โดยใช้เครื่อง DSC ซึ่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 3-5 mg นำมาให้ความร้อนด้วยอัตราการให้ความร้อน 10°C/min จากอุณหภูมิ 25°C ถึง 200°C และทำให้เย็นโดยการลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 10°C/min จนถึงอุณหภูมิ 25°C และให้ความร้อนอีกครั้งด้วยอัตราเท่าเดิม นำข้อมูลจากกราฟที่ได้มาหาค่าอุณหภูมิของการหลอมเหลวผลึก ( $T_m$ ) อุณหภูมิการเกิดผลึก ( $T_c$ ) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก

$$\text{ความเป็นผลึกของ HDPE (\%)} = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} \times \frac{100}{\% \text{ HDPE}} \times 100 \quad (3.6)$$

เมื่อ  $\Delta H_f$  คือ พลังงานความร้อนในการหลอมเหลวผลึก

$\Delta H_f^0$  คือ พลังงานความร้อนในการหลอมเหลวผลึกของ PE ที่มีความเป็นผลึก 100%  
มีค่า เท่ากับ 293 J/g [49]

### 3.5.5 สมบัติเชิงกล

#### 3.5.5.1 การทดสอบความแข็งกด

นำชิ้นงานที่ฉีดขึ้นรูปที่มีความหนาประมาณ 3 mm มาทดสอบด้วย เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Dead load ชนิด Shore D ที่อุณหภูมิห้อง กดตัวอย่างเป็นเวลา 3 วินาที แล้วอ่านค่าที่วัดได้ ตามมาตรฐาน ASTM D2240 [50]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.5.2 การทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทก

การทดสอบความแข็งแรงกระแทก ตามมาตรฐาน ASTM D256 [51] แบบไอซอด (Izod type) นำชิ้นงานตัวอย่าง 10 ชิ้น ทำการบากชิ้นงานเป็นรูปตัววี (V-notch) โดยมีรัศมีร่องบาก (Root radius) 0.254 mm และมีความลึก 2.54 mm ด้วยเครื่องทำรอยบาก ค่าความแข็งแรงกระแทกของตัวอย่างที่มีรอยบากสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.7

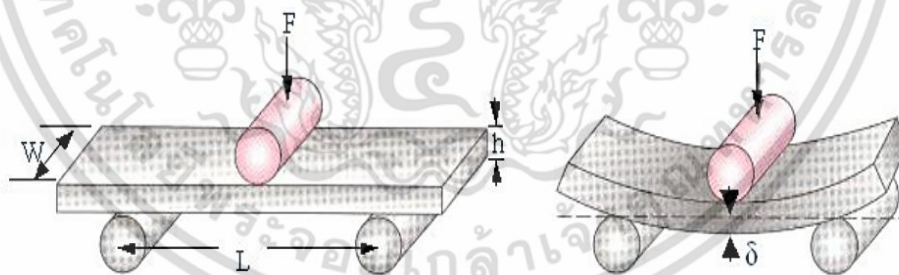
$$\text{ความแข็งแรงกระแทก } (W_k) = \frac{W}{A_k} \quad (3.7)$$

เมื่อ	$W_k$	=	ค่าความแข็งแรงกระแทกของตัวอย่างที่มีรอยบาก ( $\text{kJ/m}^2$ )
	$W$	=	ค่าพลังงานกระแทกที่วัดได้ (kJ)
	$A_k$	=	พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างที่หักรอยบากแล้ว ( $\text{m}^2$ )

### 3.5.5.3 การทดสอบสมบัติความทนต่อแรงโค้งงอ

การทดสอบความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอ ตามมาตรฐาน ASTM D790 [52] โดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ทดสอบความทนทานต่อแรงโค้งงอแบบ 3 จุด ซึ่งทดลองตั้งฉากกับชิ้นงานทดสอบที่อยู่ในลักษณะแนวนอนโดยมีตัวรองรับดังรูปที่ 3.8 การทดสอบแบบนี้ชิ้นงานทดสอบได้รับทั้งแรงเค้นดึง (Tensile stress) และแรงเค้นกด (Compression stress) ซึ่งแรงเค้นกดเกิดขึ้นบนชิ้นงานทดสอบ ส่วนแรงเค้นดึงเกิดใต้ชิ้นงานทดสอบ ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790 โดยใช้ชิ้นงานทดสอบ 10 ชิ้น และมีสถานะในการทดสอบดังนี้

- โหลดเซลล์ 5 kN
- ความเร็วในการกด 10 mm/min
- ระยะห่างระหว่างแท่นรองรับ  $15 \pm 1$  เท่าของความหนาชิ้นงาน



รูปที่ 3.7 การทดสอบความทนทานต่อแรงโค้งงอแบบ 3 จุด [53]

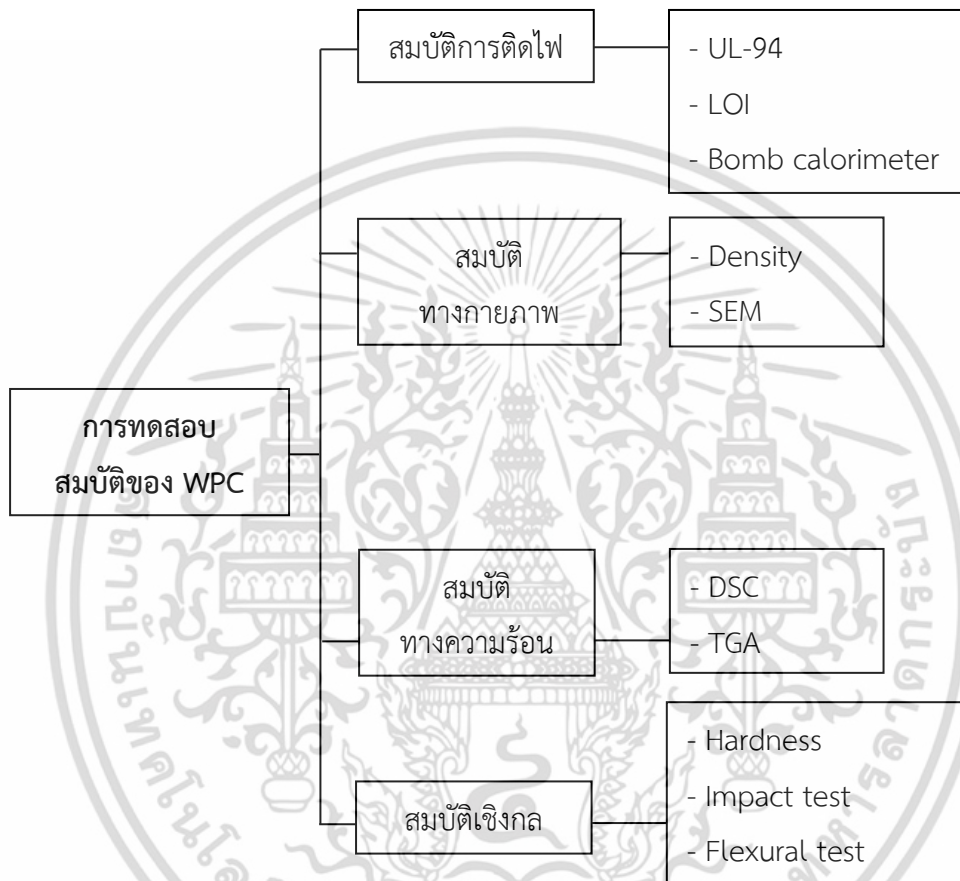
ความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	F	คือ แรงกดสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการโค้งงอ (N)
	L	คือ ระยะห่างระหว่างตำแหน่งที่รองรับชิ้นงานทดสอบ (mm)
	W	คือ ความกว้างของชิ้นงานทดสอบ (mm)
	h	คือ ความหนาของชิ้นงานทดสอบ (mm)
	$\Delta F$	คือ ผลต่างของแรงกดในช่วงความชันเป็นเส้นตรง (N)
	$\Delta d$	คือ ผลต่างของระยะโค้งงอในช่วงความชันเป็นเส้นตรง (mm)



รูปที่ 3.8 แผนผังการทดสอบสมบัติของ WPC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPC) ที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนชนิด-ความหนาแน่นสูง (HDPE) และเส้นใยคาบมะพร้าว (CF) ปริมาณ 50 php ให้มีสมบัติทนไฟ โดยใช้สารหน่วงการติดไฟแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรต (CaHP) ซึ่งเตรียมจากแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากเปลือกหอยแมลงภู่ทำปฏิกิริยากับกรดฟอสฟอริก โดยคาดว่าสามารถใช้ทดแทนสารหน่วงการติดไฟกลุ่มฟอสฟอรัส และใช้เป็นองค์ประกอบในสารหน่วงการติดไฟระบบอินตุมสเซนซ์ (IFRs) โดยในงานวิจัยนี้ศึกษาเตรียม CaHP จากเปลือกหอยแมลงภู่บดชนิดก้ำจืดและไม่ก้ำจืด สิ่งปนเปื้อน ศึกษาเปรียบเทียบการใช้ CaHP ทั้งสองชนิดเป็นสารหน่วงการติดไฟที่ปริมาณ 25 และ 40 php ศึกษาการใช้ CaHP เป็นสารหน่วงการติดไฟในระบบสารหน่วงการติดไฟชนิดเดียวที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 20, 25, 30, 35 และ 40 php และการศึกษาสารหน่วงการติดไฟ CaHP ในระบบอินตุมสเซนซ์ (IFRs) โดยใช้ร่วมกับเมลามีน (MA) และเส้นใยมะพร้าว (CF) เป็นสารให้ฟองและสารให้ Char ตามลำดับ ควบคุมอัตราส่วน MA และ CF คงที่ที่ 0.17 และ 1 ส่วนโดยน้ำหนัก ศึกษาปริมาณ CaHP ที่ 0.5-0.8 ส่วนโดยน้ำหนัก เพื่อหาปริมาณสารหน่วงการติดไฟที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด รวมทั้งศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของ WPC ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางความร้อน

#### ตารางที่ 4.1 อักษรย่อที่ใช้ในงานวิจัย

อักษรย่อ	ความหมาย
WPC	ไม้พลาสติกคอมโพสิตเตรียมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและเส้นใยมะพร้าวปริมาณ 50 php
CF	เส้นใยมะพร้าว
CaHP	แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรตเตรียมจากเปลือกหอยแมลงภู่
US-CaHP	แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรตเตรียมจากเปลือกหอยแมลงภู่ชนิดไม่ก้ำจืดสิ่งปนเปื้อน
TS-CaHP	แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรตเตรียมจากเปลือกหอยแมลงภู่ชนิดก้ำจืดสิ่งปนเปื้อน
APP	แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (ตัวแทนสารหน่วงการติดไฟกลุ่มฟอสฟอรัส)
ATH	อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (ตัวแทนสารหน่วงการติดไฟกลุ่มที่สลายตัวให้น้ำ)
MA	เมลามีน (สารให้ฟอง)
IFRs	สารหน่วงการติดไฟระบบอินตุมสเซนซ์ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างสารให้ฟอง (MA) : สารกลุ่มฟอสฟอรัส (CaHP) : สารให้เถ้า (CF)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.1 วิเคราะห์ลักษณะและโครงสร้างของ CaHP

### 4.1.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ US-CaHP และ TS-CaHP

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของ CaHP ที่เตรียมจากเปลือกหอยแมลงภู่นิตไม่กำจัดสิ่งปนเปื้อน (US-CaHP) และ CaHP ที่เตรียมจากเปลือกหอยแมลงภู่นิตกำจัดสิ่งปนเปื้อน (TS-CaHP) ด้วยเทคนิค XRF แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่า องค์ประกอบธาตุหลักของ US-CaHP และ TS-CaHP เหมือนกันคือ ออกซิเจนมีปริมาณมากที่สุด (ประมาณ 55%) รองลงมาคือฟอสฟอรัส (ประมาณ 25%) และแคลเซียม (ประมาณ 20%) ตามลำดับ โดยจากผลการวิเคราะห์คาดว่า สารประกอบที่เกิดมากที่สุด ใน US-CaHP และ TS-CaHP คือ แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรต ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , CaHP) องค์ประกอบธาตุที่แตกต่างกัน คือ ธาตุโลหะ ได้แก่ โครเมียม เหล็ก และสตรอนเทียมซึ่งพบใน US-CaHP เท่านั้น เนื่องมาจากธาตุที่แตกต่างกันข้างต้นส่วนใหญ่เป็นรงควัตถุที่อยู่ในผิวชั้นนอกของเปลือกหอยแมลงภู่นิต เมื่อทำการกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกจากเปลือกหอยจึงทำให้ธาตุเหล่านี้หลุดออกไป ดังนั้นจึงทำให้ไม่พบธาตุและสารประกอบบางชนิดใน TS-CaHP โดยจากผลการวิเคราะห์คาดว่าธาตุโลหะที่พบในปริมาณที่แตกต่างกันเป็นสารประกอบ  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Cr}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{Sr}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของ Boonchom B. และคณะ [54] ศึกษาการเตรียม  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  โดยใช้โลหะเหล็ก (Iron metal) และกรดฟอสฟอริกเป็นสารตั้งต้น ใช้สภาวะการเตรียมเหมือนกับการเตรียม CaHP ในงานวิจัยนี้ พบว่าสามารถเตรียมสารประกอบ  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ได้ ดังนั้นในการเตรียม US-CaHP จึงมีโอกาสที่เกิดสารประกอบเหล่านี้ร่วมด้วย อย่างไรก็ตามผลการทดสอบจาก XRF พบว่าธาตุโลหะ ได้แก่ โครเมียม เหล็ก และสตรอนเทียม มีปริมาณเพียงเล็กน้อยจึงไม่น่าส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเตรียม CaHP ซึ่งเป็นสารประกอบหลักที่มีมากที่สุด

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบธาตุใน US-CaHP และ TS-CaHP

ธาตุ	สารตัวอย่าง (%wt)	
	US-CaHP	TS-CaHP
O	56.7	55.2
Ca	17.6	19.9
Cr	0.1	-
Fe	0.2	-
Cu	0.4	0.4
Sr	0.1	-
P	24.9	24.5

### 4.1.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของ US-CaHP และ TS-CaHP

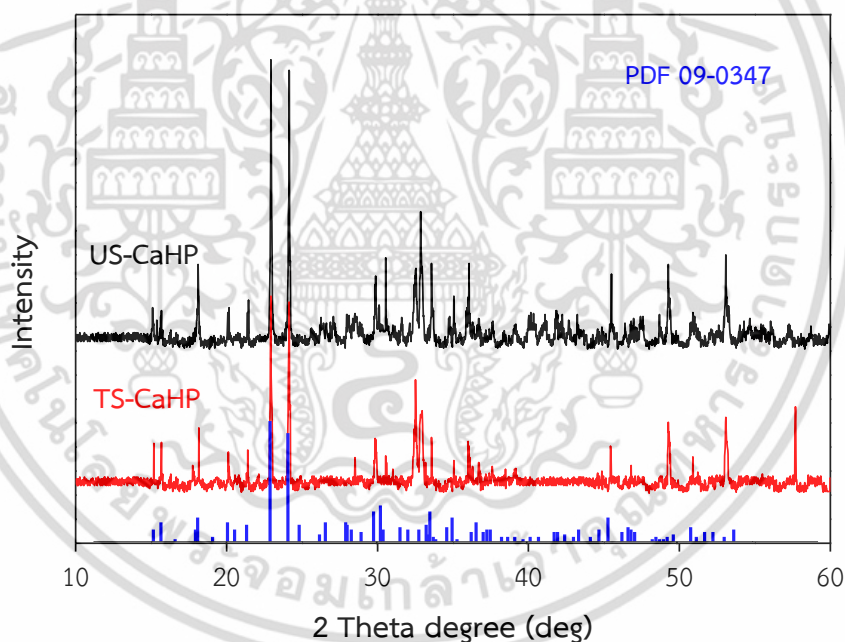
ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD แสดงดังรูปที่ 4.1 เป็น XRD pattern ของ US-CaHP และ TS-CaHP โดยผลการวิเคราะห์ของ US-CaHP พบพีคที่ตำแหน่ง 2 Theta ที่สำคัญคือ 15.06, 15.73, 18.10, 20.05, 22.91, 24.19, 29.80, 30.52, 33.01, 33.53, 35.38, 36.06, 45.48,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

49.43 และ 53.12 องศา พีคดังกล่าวแสดงโครงสร้างผลึกของ US-CaHP เป็นแบบโมโนคลินิก (Monoclinic system)

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ของ TS-CaHP พบพีคที่ตำแหน่ง 2 Theta ที่สำคัญ คือ 15.10, 15.68, 18.12, 20.01, 22.94, 24.14, 29.88, 30.60, 32.68, 33.58, 35.92, 36.00, 45.50, 49.28 และ 53.08 องศา พีคดังกล่าวแสดงโครงสร้างผลึกของ TS-CaHP เป็นแบบโมโนคลินิก (Monoclinic system)

ผลการวิเคราะห์ TS-CaHP และ US-CaHP ที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค XRD พบว่าให้พีคที่ตำแหน่ง 2 Theta ที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่า US-CaHP และ TS-CaHP มีโครงสร้างผลึกที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นการเตรียม CaHP จากเปลือกหอยแมลงภู่ที่กำจัดและไม่กำจัดสิ่งปนเปื้อนไม่มีผลต่อลักษณะโครงสร้างผลึกของ CaHP เนื่องจากจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF พบว่าสารประกอบโลหะที่แตกต่างที่แทรกอยู่ในโครงสร้างกันมีปริมาณเพียงเล็กน้อยจึงไม่น่าส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเตรียม CaHP ซึ่งเป็นสารประกอบหลักที่มีมากที่สุด เมื่อนำ XRD pattern ที่ได้จากการวิเคราะห์ของ US-CaHP และ TS-CaHP เปรียบเทียบกับ XRD pattern สารมาตรฐาน CaHP ตาม PDF #09-0347 [55] พบว่าให้พีค 2 Theta ที่ใกล้เคียงกัน จึงสามารถยืนยันได้ว่าสามารถสังเคราะห์ CaHP จากเปลือกหอยแมลงภูได้จริง

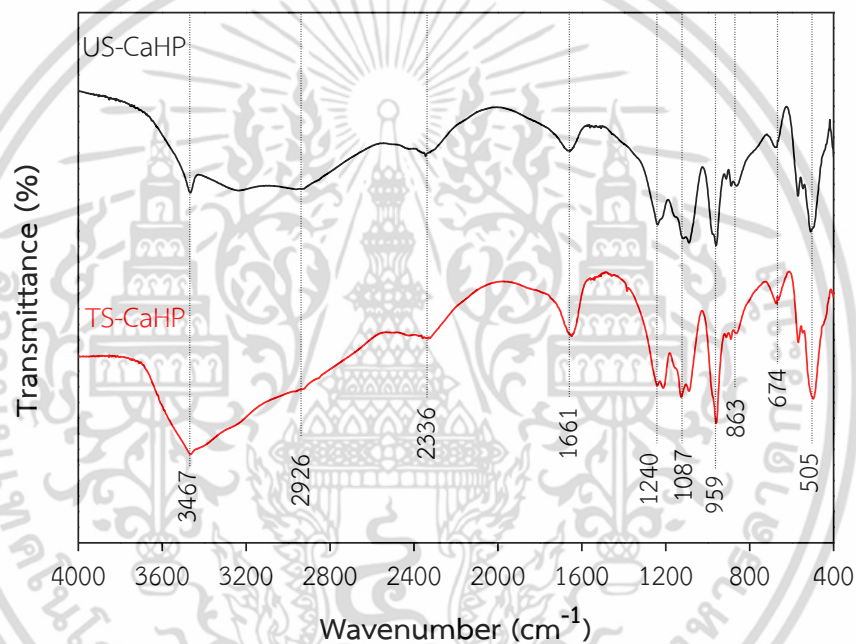


รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของ US-CaHP และ TS-CaHP ด้วยเทคนิค XRD

#### 4.1.3 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ US-CaHP และ TS-CaHP

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR แสดงดังรูปที่ 4.2 เป็นสเปกตรัมของ US-CaHP และ TS-CaHP ซึ่งพบพีคการสั่นสำคัญที่ตรงกันที่เลขคลื่น 505, 674, 863, 959, 1087, 1240 และ 3467  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีคการสั่นของ  $\text{PO}_2$  bending, พีคการสั่น O-H rocking ของโมเลกุลน้ำ, พีคการสั่นแบบสมมาตรของ  $\text{P}(\text{OH})_2$  stretching, พีคการสั่นแบบไม่สมมาตรของ  $\text{P}(\text{OH})_2$  stretching, พีคการสั่นของ  $\text{PO}_2$  stretching, พีคการสั่นของ P-O-H bending และ พีคการสั่น O-H เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

stretching ของโมเลกุลน้ำตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบพิคการสั่นที่ตรงกันที่เลขคลื่น 1661, 2336 และ 2926  $\text{cm}^{-1}$  จากงานวิจัยของ Chapman A.C. [56] ที่ศึกษาสเปกตรัมการสั่นของสารประกอบฟอสฟอรัส พบว่าพิคทั้งสามเป็นพิคการสั่น O-H stretching ของ  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  จากผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR พบว่าทั้ง US-CaHP และ TS-CaHP ที่เตรียมได้มีหมู่ฟังก์ชันใกล้เคียงกัน แสดงว่าการกำจัดและไม่กำจัดสิ่งปนเปื้อนของเปลือกหอยแมลงภู่มิมีผลต่อการเตรียม CaHP เนื่องจากจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF พบว่าสารประกอบโลหะที่แตกต่างกันที่แทรกอยู่ในโครงสร้างมีปริมาณเพียงเล็กน้อยจึงไม่น่าส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเตรียม CaHP จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย XRD พบว่า CaHP ที่เตรียมได้ทั้งสองชนิดมีโครงสร้างผลึกเหมือนกับ CaHP มาตรฐาน และหมู่ฟังก์ชันของ US-CaHP และ TS-CaHP ที่เตรียมได้ใกล้เคียงกับ CaHP ที่เตรียมได้จากงานวิจัยของ Boonchom B. [3] ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่าสามารถสังเคราะห์ CaHP จากเปลือกหอยแมลงภู่มิได้จริง



รูปที่ 4.2 ผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของ US-CaHP และ TS-CaHP ด้วยเทคนิค FTIR

#### 4.2 การศึกษาผลของการกำจัดและไม่กำจัดสิ่งปนเปื้อนของเปลือกหอยแมลงภู่มิ

การศึกษาลักษณะการเติม CaHP ที่เตรียมจากเปลือกหอยแมลงภู่มิชนิดกำจัดสิ่งปนเปื้อน (TS-CaHP) และไม่กำจัดสิ่งปนเปื้อน (US-CaHP) ปริมาณ 25 และ 40 php ใน WPC โดยเปรียบเทียบค่าสมบัติเชิงกล ได้แก่ ค่าความแข็งแรงโค้งงอ โมดูลัสโค้งงอ และค่าความแข็งแรงกระแทก สมบัติการหน่วงการติดไฟ ได้แก่ อัตราการลามไฟของวัสดุ ค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ และค่า LOI เพื่อศึกษาว่าชั้นรงควัตถุสี (สิ่งปนเปื้อนของเปลือกหอย) ใน US-CaHP มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ช่างตันหรือไม่ โดยหากการมีอยู่ของรงควัตถุสีไม่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ อย่างมีนัยสำคัญ การเตรียม CaHP แบบไม่กำจัดสิ่งปนเปื้อนของเปลือกหอย (US-CaHP) เป็นการลดขั้นตอนการเตรียม ซึ่งวิธีนี้สามารถลดต้นทุนและเวลาการผลิต CaHP ได้ทางหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

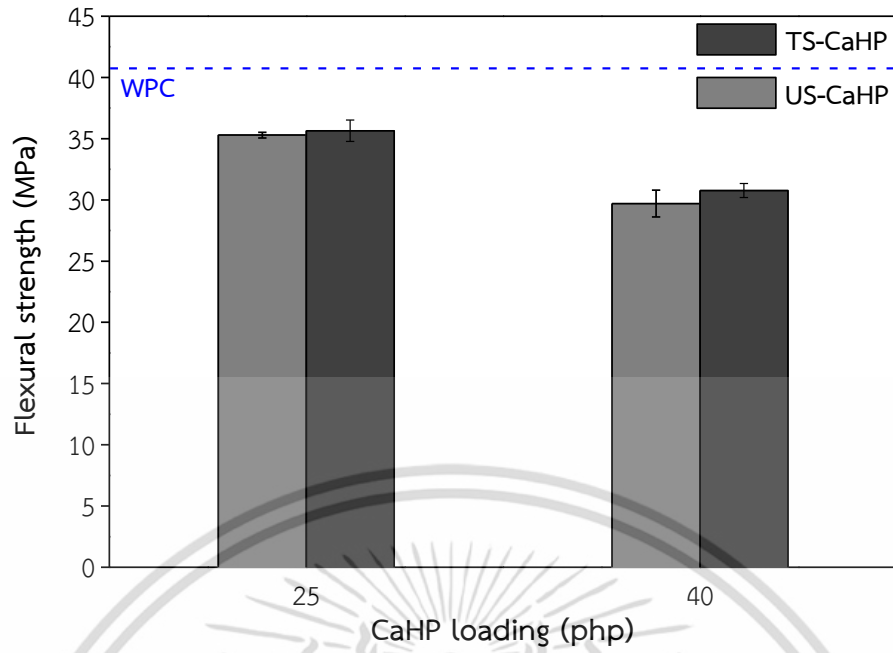
#### 4.2.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลเปรียบเทียบการเติม CaHP ที่เตรียมจากเปลือกหอยแมลงภู่น้ำที่กำจัดและไม่กำจัดสิ่งปนเปื้อนในปริมาณ 25 และ 40 php ดังแสดงในรูปที่ 4.3 จากรูปที่ 4.3 (a) เมื่อเติม US-CaHP และ TS-CaHP ลงใน WPC พบว่าส่งผลให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอลดลงเปรียบเทียบกับ WPC สูตรที่ไม่เติม CaHP และเมื่อเติม CaHP ในปริมาณที่สูงขึ้น (40 php) ให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอมีแนวโน้มลดลงอีก เนื่องจาก US-CaHP และ TS-CaHP ที่เติมลงไปมีลักษณะเป็นอนุภาคของแข็งที่มีขี้ เมื่อใส่ลงในพอลิเมอร์เมทริกซ์ (HDPE) ซึ่งไม่มีขี้ จึงไม่เกิดอันตรกิริยาที่ดีระหว่างกันส่งผลให้ความแข็งแรงโค้งงอมีค่าลดลง

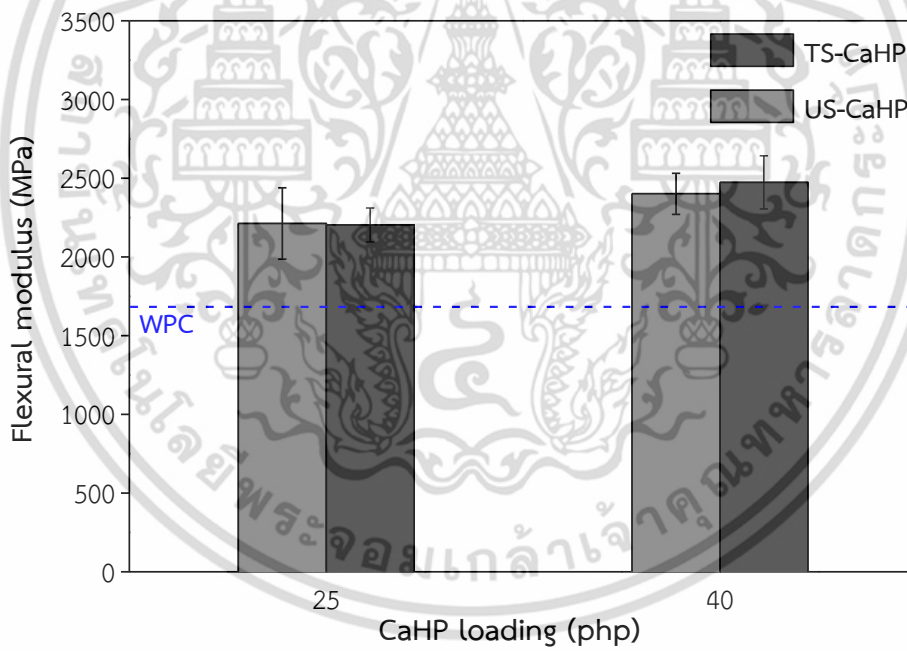
จากรูปที่ 4.3 (b) พบว่าการเติมอนุภาค US-CaHP และ TS-CaHP ลงไปทำให้ค่ามอดูลัสโค้งงอมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณ US-CaHP และ TS-CaHP เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาค US-CaHP และ TS-CaHP มีค่าความแข็ง (ประมาณ 2-2.5 Mohs) มากกว่าความแข็งของ WPC ดังนั้นเมื่อเติม CaHP ซึ่งเป็นอนุภาคของแข็งใน WPC จึงทำให้เมื่อ WPC ได้รับแรงจึงเปลี่ยนรูปร่างได้ยากขึ้นค่ามอดูลัสโค้งงอมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น

ผลการศึกษสมบัติการรับแรงกระแทกของวัสดุแสดงในรูปที่ 4.3 (c) พบว่าการเติมอนุภาค US-CaHP และ TS-CaHP เป็นการเพิ่มวิภูภาคของแข็ง และทำให้ความต่อเนื่องของวิภูภาคหลักลดลง ทำให้เมื่อ WPC ได้รับแรงกระทำจากภายนอกอย่างรวดเร็วจึงไม่สามารถส่งผ่านแรงได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับ WPC ที่ไม่เติม CaHP ดังนั้นคอมโพสิตทุกสูตรผสมที่เติม CaHP จึงแตกหักได้ง่ายกว่า WPC ที่ไม่เติม CaHP และเมื่อเติมในปริมาณที่สูงขึ้น (40 php) พบว่าสมบัติการรับแรงกระแทกของวัสดุมีค่าลดลง

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล ได้แก่ ค่าความแข็งแรงโค้งงอ มอดูลัสโค้งงอ และค่าความแข็งแรงกระแทก พบว่าการเติม US-CaHP และ TS-CaHP ในปริมาณที่เท่ากัน ให้ผลการทดสอบที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจาก US-CaHP และ TS-CaHP มีลักษณะโครงสร้างผลึกที่ใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 4.1 นอกจากนี้การกำจัดและไม่กำจัดสิ่งปนเปื้อนของเปลือกหอยแมลงภู่น้ำเป็นการกำจัดตรงควัตถุปริมาณเล็กน้อยที่แทรกอยู่ในโครงสร้างจึงไม่น่าส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความแข็งของ TS-CaHP ดังนั้นเมื่อเติมลงใน WPC จึงทำให้ WPC มีพฤติกรรมมารับแรงที่เหมือนกัน



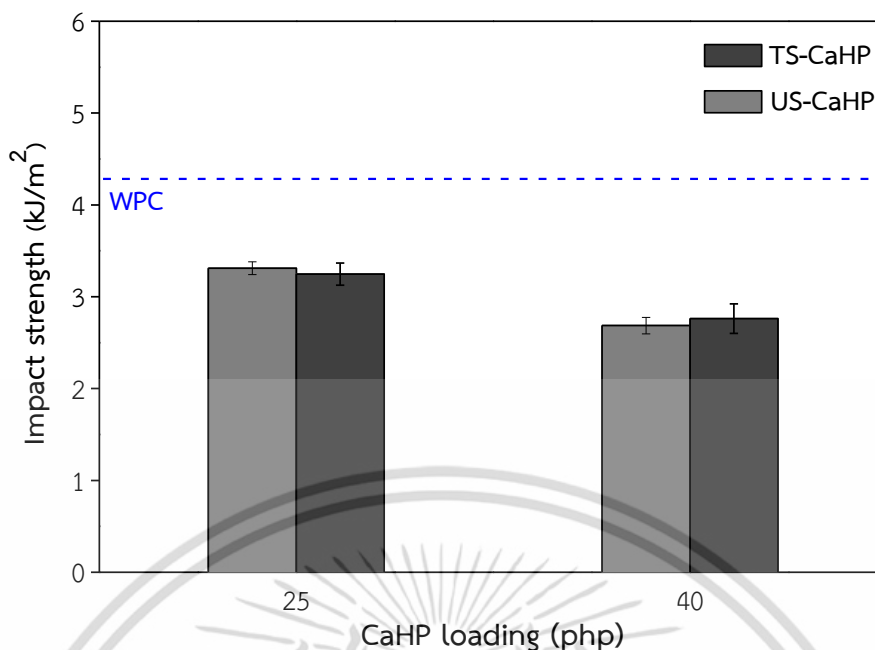
(a) ค่าความแข็งแรงโค้งงอ



(b) มอดุลัสโค้งงอ

รูปที่ 4.3 สมบัติเชิงกลของ WPC ที่เติม US-CaHP และ TS-CaHP ปริมาณ 25 และ 40 php

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c) ค่าความแข็งแรงกระแทก

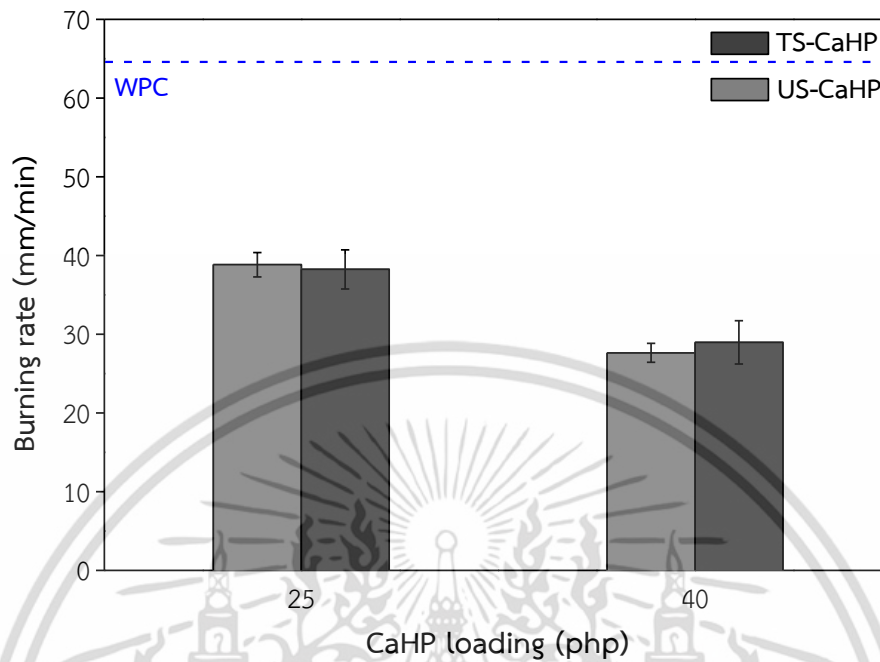
รูปที่ 4.3 สมบัติเชิงกลของ WPC ที่เติม US-CaHP และ TS-CaHP ปริมาณ 25 และ 40 php (ต่อ)

#### 4.2.2 ผลการทดสอบการหน่วงการติดไฟ

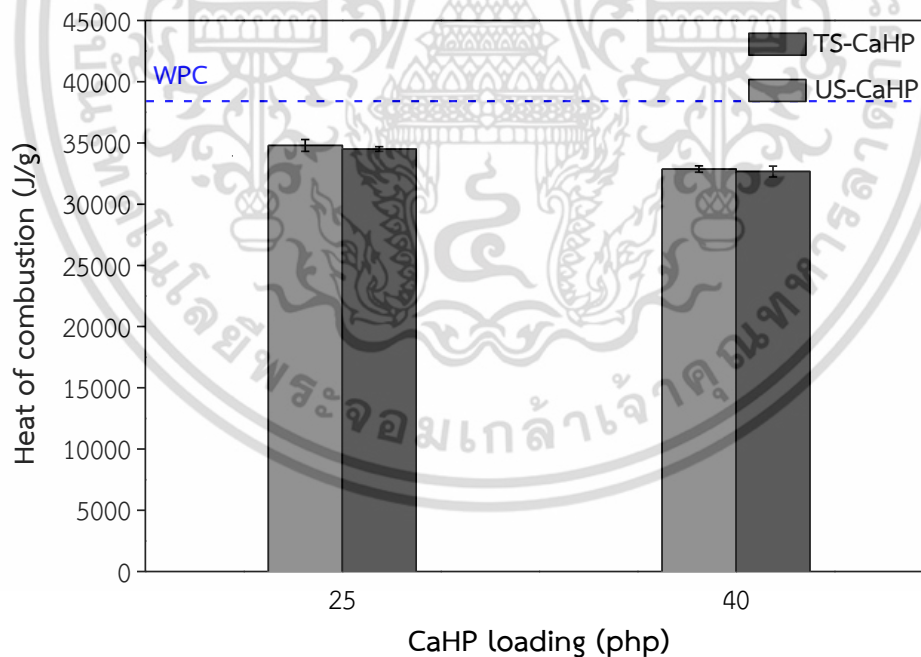
ผลการศึกษาสมบัติการหน่วงการติดไฟเปรียบเทียบการเติม CaHP ที่เตรียมจากเปลือกหอยแมลงภู่ที่กำจัดและไม่กำจัดสิ่งปนเปื้อนในปริมาณ 25 และ 40 php ดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อเติม US-CaHP และ TS-CaHP ลงใน WPC ทำให้ WPC หน่วงการติดไฟได้ดีขึ้น เห็นได้จากค่าอัตราการลามไฟและค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้มีแนวโน้มลดลงจาก WPC ที่ไม่เติม CaHP นอกจากนี้ค่า LOI ของ WPC ที่เติม US-CaHP และ TS-CaHP มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าวัสดุต้องใช้เวลาออกซิเจนปริมาณสูงขึ้นในการติดไฟ นั่นคือวัสดุติดไฟได้ยากขึ้น ดังนั้นการเติม US-CaHP และ TS-CaHP ช่วยให้ WPC มีสมบัติหน่วงการติดไฟได้ดีขึ้น แต่ทั้งนี้การเติม US-CaHP และ TS-CaHP ไม่สามารถช่วยให้ WPC ดับไฟได้ด้วยตัวเองแสดงให้เห็นจากค่า LOI ที่ไม่ถึงค่ามาตรฐาน (LOI=24) ที่แสดงว่าวัสดุสามารถดับไฟเองได้

เมื่อเติม US-CaHP และ TS-CaHP ลงใน WPC ในปริมาณที่เท่ากันเปรียบเทียบสมบัติการติดไฟ ได้แก่ อัตราการลามไฟของวัสดุ ค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ และค่า LOI ให้ผลการทดสอบที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งผลการทดสอบไม่เป็นไปตามงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chen X.L. และคณะ [42] พบว่าการเติมผงเหล็กออกไซด์ลงในพอลิเมอร์ที่ผสมสารหน่วงการติดไฟกลุ่มฟอสฟอรัสช่วยเสริมประสิทธิภาพกัน ทำให้พอลิเมอร์หน่วงการติดไฟได้ดีขึ้น โดยจากงานวิจัยของ Chen X.L. และคณะ เติมเหล็กออกไซด์ปริมาณมากกว่า 1% โดยน้ำหนักร่วมกับสารหน่วงการติดไฟลงในพอลิเมอร์จึงได้ผลการทดลองดังกล่าว แต่ในงานวิจัยนี้เหล็กออกไซด์ที่ได้จากรงควัตถุสีของเปลือกหอยแมลงภู่แบบไม่กำจัดสิ่งปนเปื้อน (US-CaHP) มีเพียง 0.2% แสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งปริมาณนี้อาจไม่เพียงพอในการช่วยเสริมประสิทธิภาพกับสารหน่วงการติดไฟ ดังนั้นจากผลการ

ทดสอบแสดงว่าการใช้ CaHP ที่เตรียมจากเปลือกหอยแมลงภู่นิตกกำจัดหรือไม่กำจัดสิ่งปนเปื้อนไม่ส่งผลต่อสมบัติการหน่วงการติดไฟของ WPC



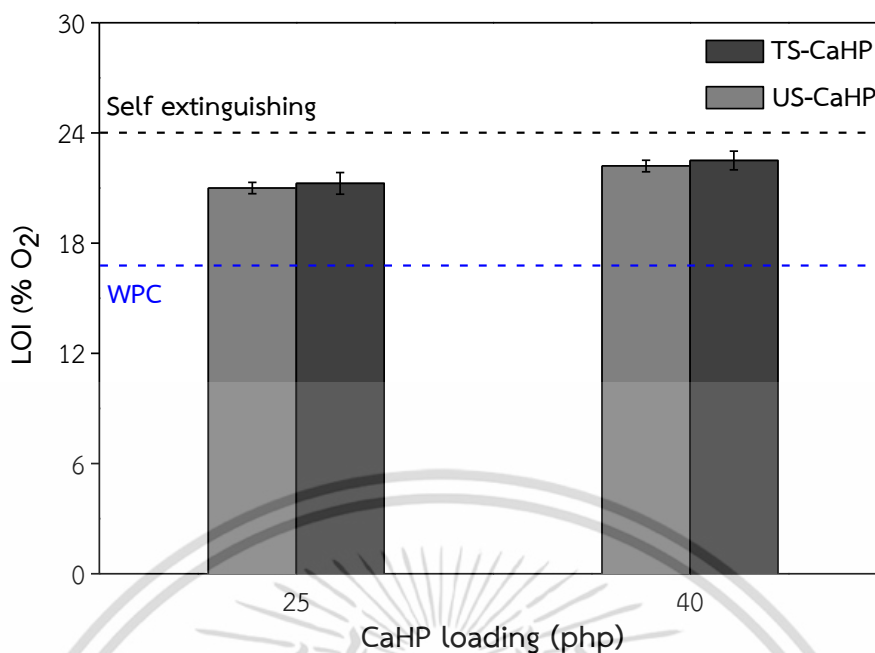
(a) ค่าอัตราการลามไฟ



(b) ค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้

**รูปที่ 4.4** สมบัติหน่วงการติดไฟของ WPC ที่เติม US-CaHP และ TS-CaHP ที่ปริมาณ 25 และ 40 php

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c) ค่า LOI

รูปที่ 4.4 สมบัติหน่วงการติดไฟของ WPC ที่เติม US-CaHP และ TS-CaHP ที่ปริมาณ 25 และ 40 php (ต่อ)

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะและโครงสร้างของ CaHP ที่เตรียมจากเปลือกหอยแมลงภู่ ชนิดกำจัดและไม่กำจัดสิ่งปนเปื้อนด้วยเทคนิค XRF, XRD และ FTIR พบว่า US-CaHP และ TS-CaHP พบธาตุโลหะที่แตกต่างกัน ได้แก่ โครเมียม เหล็ก และสตรอนเทียม แต่จากการวิเคราะห์ พบว่ามีธาตุโลหะเหล่านี้ในปริมาณเล็กน้อย จึงไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเตรียม CaHP ซึ่งเป็นสารประกอบหลักที่มีมากที่สุด และเมื่อนำ CaHP ที่เตรียมได้เติมใน WPC พบว่าการเติม US-CaHP และ TS-CaHP ในปริมาณที่เท่ากันไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการหน่วงการติดไฟ ดังนั้นจึงเลือกทำการศึกษาในตอนต่อไปโดยเตรียม CaHP จากเปลือกหอยแมลงภู่ที่ไม่กำจัดสิ่งปนเปื้อน (US-CaHP) เนื่องจากสามารถลดขั้นตอนการกำจัดสิ่งปนเปื้อนของเปลือกหอยแมลงภู่ จึงทำให้ประหยัดต้นทุนและเวลาในการผลิตได้

#### 4.3 การศึกษาผลของปริมาณ US-CaHP เป็นสารหน่วงการติดไฟระบบเดี่ยว

##### 4.3.1 ความหนาแน่นของคอมโพสิต

ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานคอมโพสิตที่คำนวณได้จากเครื่อง Density kit และค่าความหนาแน่นที่คำนวณได้จากสูตร (แสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก ง) แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่าค่าความหนาแน่นของแต่ละสูตรผสมในทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาผลของการเติม US-CaHP โดย US-CaHP มีความหนาแน่น 1.9912 g/cm<sup>3</sup> (แสดงวิธีหาค่าความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM D792 ในภาคผนวก ง) ซึ่งสูงกว่าความหนาแน่นของ WPC (0.9833 g/cm<sup>3</sup>) พบว่าการเพิ่มปริมาณ US-CaHP เป็น 20, 25, 30, 35 และ 40 php ทำให้ค่าความหนาแน่นของ WPC มีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มสัดส่วนของวัสดุที่มีความหนาแน่นสูงกว่าลงใน WPC เป็นไปตามกฎของของผสม (Rule of mixture)

เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของ WPC ที่เติม US-CaHP กับ WPC ที่เติม APP และ ATH ซึ่งเป็นสารหน่วงการติดไฟเชิงพาณิชย์ พบว่าเมื่อเติมสารหน่วงการติดไฟไปในปริมาณที่เท่ากัน WPC ที่เติม ATH มีความหนาแน่นสูงที่สุด รองลงมาเป็น WPC ที่เติม US-CaHP และ APP ตามลำดับ เนื่องจาก ATH มีค่าความหนาแน่น 2.420 g/cm<sup>3</sup> ซึ่งสูงกว่า US-CaHP มาก APP มีความหนาแน่น 1.900 g/cm<sup>3</sup> ซึ่งใกล้เคียงกับ US-CaHP ซึ่งมีความหนาแน่น 1.9912 g/cm<sup>3</sup> จึงทำให้ได้ค่าความหนาแน่นของวัสดุที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.3 ค่าความหนาแน่นของ WPC ที่มีปริมาณ US-CaHP และสารหน่วงการติดไฟเชิงพาณิชย์ที่แตกต่างกัน

สูตร	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	
	ค่าที่ได้จาก Density kit	ค่าที่ได้จากการคำนวณสูตร
WPC	0.9833±0.0076	0.9969±0.0021
WPCAPP25	1.0643±0.0038	1.0620±0.0013
WPCATH25	1.1647±0.0034	1.1549±0.0038
WPCATH40	1.2185±0.0032	1.2121±0.0042
WPCUS-CaHP20	1.0670±0.0018	1.0649±0.0017
WPCUS-CaHP25	1.0753±0.0032	1.0760±0.0036
WPCUS-CaHP30	1.0860±0.0029	1.0884±0.0032
WPCUS-CaHP35	1.0947±0.0028	1.0957±0.0032
WPCUS-CaHP40	1.1152±0.0008	1.1164±0.0113

#### 4.3.2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน

การทดสอบสมบัติทางความร้อนจากเทคนิค DSC ดังแสดง DSC เทอร์โมแกรมในภาคผนวก จ พบว่าการทดสอบที่ First heat และ Second heat ให้ค่าพลังงานความร้อนในการหลอมเหลวผลึก ( $\Delta H_f$ ) ที่ไม่ต่างกัน ดังนั้นจึงเลือกพิจารณาที่ First heat จากตารางที่ 4.4 แสดง  $T_m$ ,  $T_c$  และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของชิ้นงานคอมโพสิต พบว่า WPC ที่เติม US-CaHP ทุกสูตรผสมมีค่า  $T_m$  และความเป็นผลึกที่ใกล้เคียงกัน และมีค่าใกล้เคียงกับ WPC ที่ไม่เติม CaHP แสดงว่าการเติมสารหน่วงการติดไฟ US-CaHP ไม่เข้าไปรบกวนการเกิดผลึกของ HDPE ผลึกที่ได้จึงมีขนาดใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาจากค่า  $T_c$  พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับ WPC ซึ่งบ่งบอกให้ทราบว่า US-CaHP ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (Nucleating agent) สำหรับ HDPE ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของดวงพร ปรีสาวงศ์ และคณะ [4] ได้ทำการศึกษาการเติม CaHP เพื่อเป็นสารหน่วงการติดไฟใน HDPE ซึ่งพบว่าสารหน่วงการติดไฟ CaHP ไม่สามารถทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกใน HDPE ได้ เนื่องจากโดยธรรมชาติของ HDPE เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถเกิดผลึกได้รวดเร็ว ดังนั้นการเติม US-CaHP ลงไปจึงไม่สามารถทำให้อุณหภูมิเกิดผลึกของ HDPE เปลี่ยนแปลงได้

เมื่อเปรียบเทียบ WPC ที่ไม่เติม CaHP กับ HDPE พบว่า WPC มีค่า  $T_m$  และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกลดลงเล็กน้อย เนื่องจากเมื่อเติมเส้นใยมะพร้าวลงใน HDPE เป็นการลดความต่อเนื่องของพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง ส่งผลให้ความสมบูรณ์ของผลึก HDPE ที่เกิดขึ้นน้อยลง จึงให้ขนาดและเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ HDPE ลดลง เมื่อพิจารณา  $T_c$  พบว่า มีค่าใกล้เคียงกันแสดงว่าการเติมเส้นใยคาบมะพร้าวไม่ได้ส่งผลต่ออุณหภูมิการตกผลึก แสดงให้เห็นว่าเส้นใยคาบมะพร้าวที่เติมลงไปไม่ได้ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกให้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ เพราะ HDPE เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถเกิดผลึกได้รวดเร็ว ดังนั้นการเติมเส้นใยคาบมะพร้าวลงไปจึงไม่สามารถทำให้อุณหภูมิเกิดผลึกของ HDPE เปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของกนกอร แสงสุวรรณ [38] ได้ทำการศึกษา WPC ที่เตรียมจาก HDPE และเส้นใยมะพร้าวเบอร์ 4 พบว่าการเติมเส้นใยมะพร้าวลงใน HDPE ทำให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ HDPE ลดลงเล็กน้อย และการเติมเส้นใยมะพร้าวไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิการตกผลึกของ HDPE

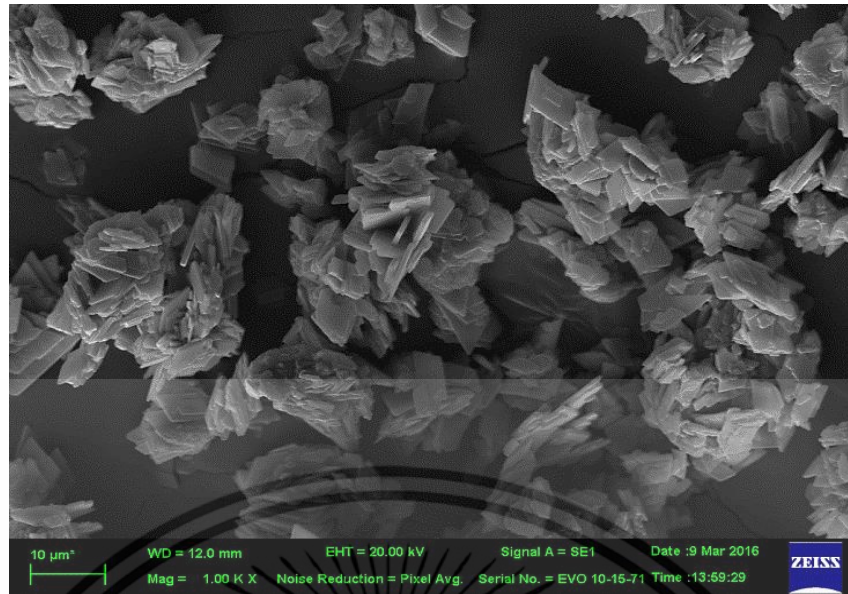
ตารางที่ 4.4  $T_m$ ,  $T_c$  และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ HDPE ในชิ้นงานคอมโพสิต

สูตร	$T_m$ (°C)	$T_c$ (°C)	ความเป็นผลึก (%)
HDPE	133.3	116.7	73
WPC	129.2	116.7	64
WPCUS-CaHP20	127.8	116.3	63
WPCUS-CaHP25	128.8	116.3	62
WPCUS-CaHP30	128.5	115.8	61
WPCUS-CaHP35	128.8	116.5	63
WPCUS-CaHP40	130.7	116.7	62

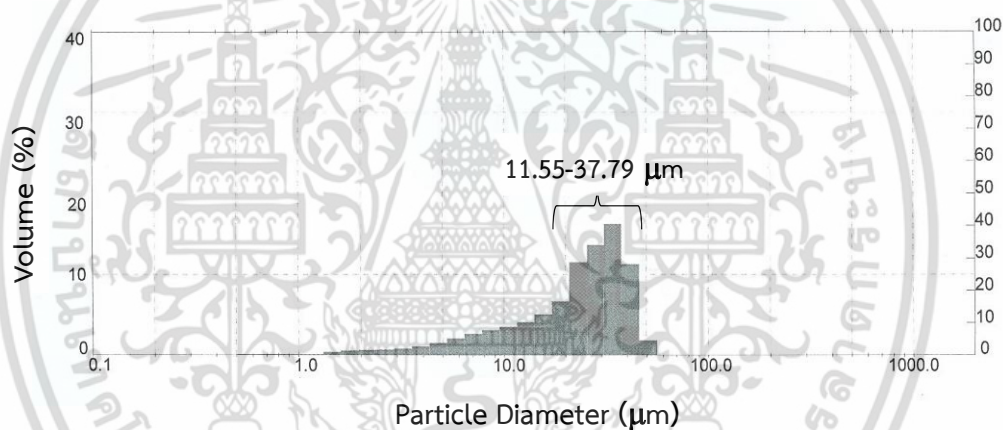
### 4.3.3 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยา

#### 4.3.3.1 สัณฐานวิทยาของ US-CaHP

ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของ US-CaHP ด้วย SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่า US-CaHP มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยม มีขนาดไม่สม่ำเสมอ บางส่วนพบเป็นแผ่น บางส่วนซ้อนกันค่อนข้างหนา และพบว่าขนาดอนุภาคของ US-CaHP มีทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ปะปนกัน มีทั้งที่อยู่แบบก้อนเดี่ยว ๆ แต่ส่วนใหญ่เกาะรวมกันเป็นกลุ่ม อยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerates) เมื่อนำ US-CaHP ไปวิเคราะห์ลักษณะการกระจายของขนาดอนุภาคโดยใช้เครื่อง Mastersizer X ซึ่งเป็นการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของแสงเลเซอร์ (Light scattering) เมื่อกระทบกับอนุภาค ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.6 พบว่าการกระจายตัวของอนุภาคส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 11.55-37.79  $\mu\text{m}$  ซึ่งมีปริมาณของขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงนี้ประมาณ 60% โดยปริมาตรและค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคเป็น 15.59  $\mu\text{m}$  โดยคาดว่าขนาดของ US-CaHP ที่ได้ส่วนใหญ่เป็นขนาดของ US-CaHP ที่เกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อน เนื่องจากก่อนที่ทำการวิเคราะห์ขนาดด้วยเครื่อง Mastersizer X ไม่ได้ทำการโซนิเคชันเพื่อแยก US-CaHP ให้เป็นอนุภาคเดี่ยว ๆ ก่อน



รูปที่ 4.5 SEM micrograph แสดงสัณฐานวิทยาของ US-CaHP ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

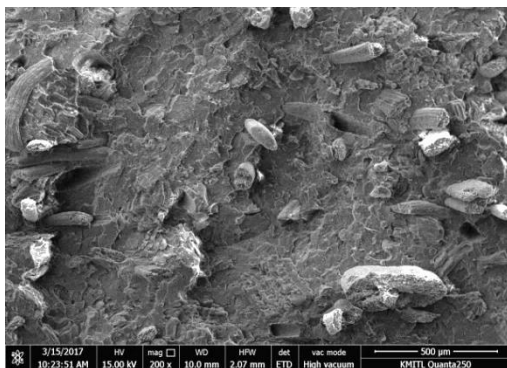


รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาค US-CaHP กับเปอร์เซ็นต์ในการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสงเลเซอร์เมื่อกระทบกับอนุภาค

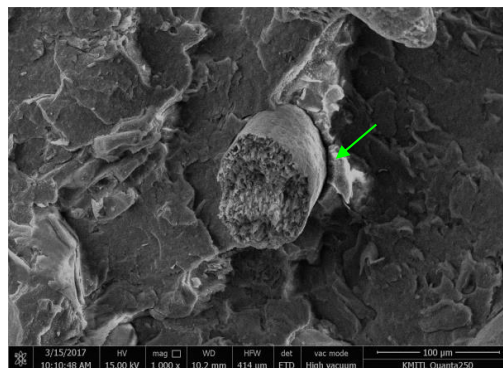
#### 4.3.3.2 สัณฐานวิทยาของคอมโพสิต

ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของ WPC ที่ไม่เติม CaHP แสดงดังรูปที่ 4.8 การกระจายตัวของเส้นใยคาบมะพร้าว (CF) ใน HDPE แสดงในรูปที่ 4.7 (a) ที่กำลังขยาย 200 เท่า พบว่าเมื่อผสม CF ในปริมาณ 50 php ลงใน HDPE การกระจายตัวของ CF ดี ไม่เกาะกลุ่มกันเป็นก้อน (Good distribution) การยึดติดกันระหว่าง CF และ HDPE แสดงดังรูปที่ 4.7 (b) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า พบว่ามีการยึดติดระหว่างวัฏภาค (Interfacial adhesion) ที่ดี เห็นได้จากรอยต่อระหว่าง CF และ HDPE ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ไม่มีช่องว่างเกิดขึ้น (บริเวณที่ชี้ด้วยลูกศรสีเขียว) เนื่องจากในสูตรผสมได้มีการเติม HDPE-g-MA ซึ่งเป็นสารช่วยผสมจึงทำให้ความเข้ากันได้ระหว่าง CF ซึ่งมีขี้ด และ HDPE ซึ่งไม่มีขี้ดดีขึ้น การยึดติดระหว่างวัฏภาคจึงดีขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) WPC กำลังขยาย 200 เท่า



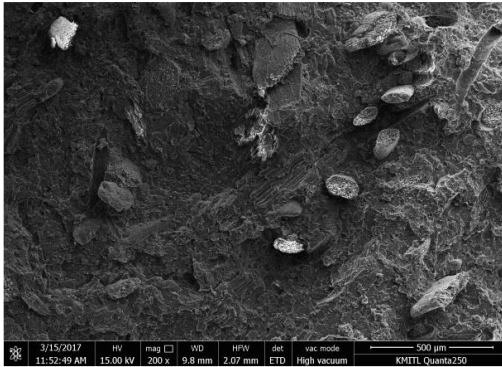
(b) WPC กำลังขยาย 1,000 เท่า

#### รูปที่ 4.7 SEM micrographs แสดงการกระจายตัวของ CF ใน HDPE ของพื้นผิวที่แตกหักที่อุณหภูมิต่ำ

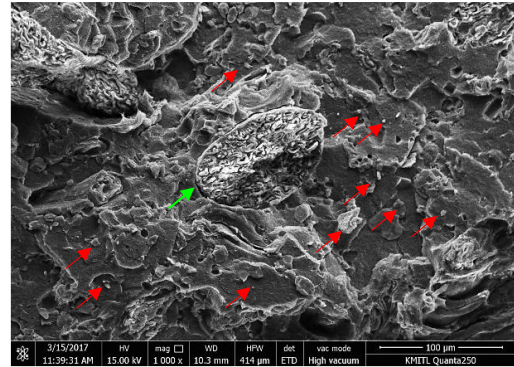
การศึกษาการกระจายตัวของ US-CaHP ใน WPC ที่ปริมาณ 25 และ 40 php แสดงในรูปที่ 4.8 การกระจายตัวของ CF ใน HDPE สูตรที่ WPC เต็ม US-CaHP 25 php แสดงในรูปที่ 4.8 (a) ที่กำลังขยาย 200 เท่า พบว่าการกระจายตัวของ CF ที่ดี ไม่เกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อน รูปที่ 4.8 (b) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า แสดงการยึดติดกันของ CF และ HDPE และการกระจายตัวของ US-CaHP พบว่าการยึดติดระหว่างวัฏภาคดีเห็นได้จากรอยต่อระหว่าง CF และ HDPE ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ (บริเวณที่ชี้ด้วยลูกศรสีเขียว) และอนุภาค US-CaHP มีการกระจายตัวเป็นอนุภาคเดี่ยว ๆ และไม่เกาะกลุ่มกันเป็นก้อน แสดงว่า US-CaHP มีการแตกตัวและการกระจายตัวที่ดีใน WPC (บริเวณที่ชี้ด้วยลูกศรสีแดง)

เมื่อเพิ่มปริมาณการเติม US-CaHP เป็น 40 php ลงใน WPC ดังแสดงดังรูปที่ 4.9 (c) ที่กำลังขยาย 200 เท่า พิจารณาการกระจายตัวของ CF ใน HDPE พบว่าการกระจายตัวที่ดีแต่เกิดรูหรือช่องว่าง (Voids) ขึ้นในชิ้นงานเล็กน้อย เนื่องมาจากการเติม US-CaHP ซึ่งเป็นสารที่มีความชื้นและดูดความชื้นได้ดี เมื่อเติมในปริมาณมาก (40 php) นำสูตรผสมที่ได้ขึ้นรูปเป็นชิ้นงานยังคงมีความชื้นบางส่วนหลงเหลืออยู่ จึงทำให้เกิดรูหรือช่องว่างในชิ้นงาน รูปที่ 4.8 (d) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า แสดงการยึดติดกันของ CF และ HDPE และการกระจายตัวของ US-CaHP พบว่า การยึดติดระหว่างวัฏภาคดีเห็นได้จากรอยต่อระหว่าง CF และ HDPE ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ (บริเวณที่ชี้ด้วยลูกศรสีเขียว) การกระจายตัวของอนุภาค US-CaHP (บริเวณที่ชี้ด้วยลูกศรสีแดง) มีทั้งส่วนที่แตกตัวออกเป็นอนุภาคเดี่ยวและบางส่วนเกิดการเกาะกัน แสดงว่าเมื่อเติม US-CaHP ในปริมาณมากมีโอกาสสูงขึ้นที่การแตกตัวและการกระจายตัวไม่ดี เนื่องจาก US-CaHP มีความชื้น ดูดความชื้นได้ง่าย และจากสัณฐานวิทยาของ US-CaHP มีลักษณะเป็นแผ่นมีพื้นที่ผิวสูง ดังนั้นจึงชอบจับตัวเป็นกลุ่มก้อนดังแสดงในรูปที่ 4.5 และการเติม US-CaHP ในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้ความหนืดของระบบสูงขึ้นเป็นผลให้การผสมทำได้ยากขึ้น การแตกตัวออกจากกันของ US-CaHP แตกตัวได้ไม่ดี จึงทำให้ US-CaHP มีโอกาสจับตัวเป็นกลุ่มก้อนใน WPC

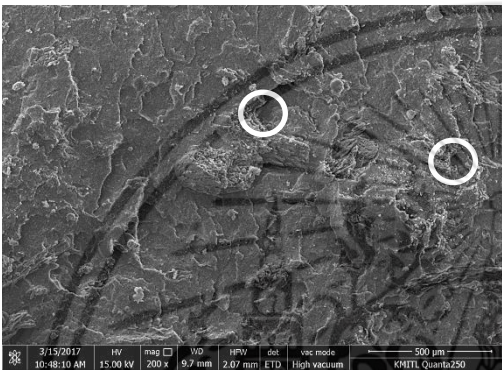
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



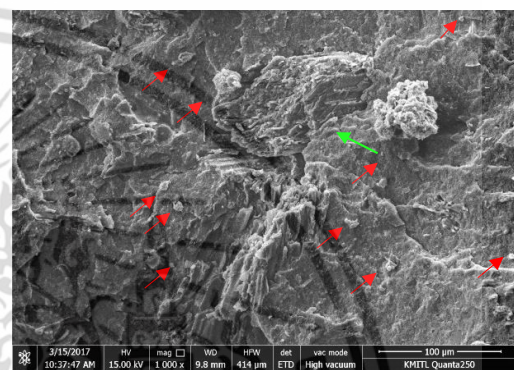
(a) WPCUS-CaHP25 กำลังขยาย 200 เท่า



(b) WPCUS-CaHP25 กำลังขยาย 1,000 เท่า



(c) WPCUS-CaHP40 กำลังขยาย 200 เท่า



(d) WPCUS-CaHP40 กำลังขยาย 1,000 เท่า

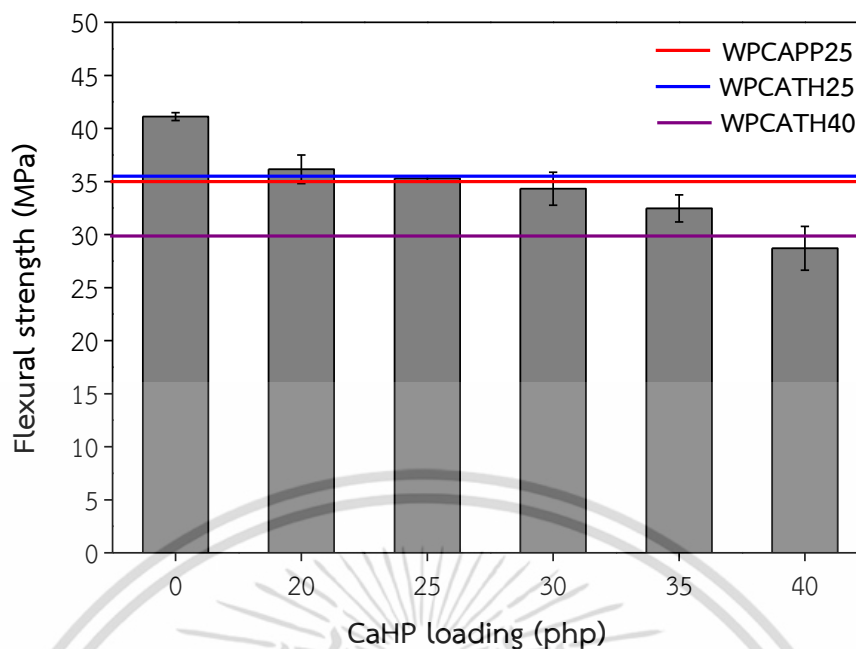
รูปที่ 4.8 SEM micrographs แสดงการกระจายตัวของ CF และ US-CaHP ปริมาณ 25 และ 40 php ใน WPC ของพื้นผิวที่แตกหักที่อุณหภูมิต่ำ

#### 4.3.4 สมบัติเชิงกลของคอมโพสิต

จากรูปที่ 4.9 แสดงค่าความแข็งแรงโค้งงอของ WPC ที่เติม US-CaHP ในปริมาณต่าง ๆ พบว่าการเติม US-CaHP ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอมีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก US-CaHP ที่เติมลงไปมีลักษณะเป็นอนุภาคของแข็งที่มีขั้ว เมื่อเติมลงในพอลิเมอร์เมทริกซ์ (HDPE) ซึ่งไม่มีขั้ว จึงไม่เกิดอันตรกิริยาที่ดีระหว่างกันส่งผลให้ความแข็งแรงโค้งงอมีค่าลดลง นอกจากนี้การผสม US-CaHP ใน WPC ซึ่งทำหน้าที่คล้ายสารตัวเติมไม่เสริมแรง (Non-reinforcing filler) ใน WPC ทำให้เกิดรอยตำหนิหรือช่องว่าง ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้ความแข็งแรงโค้งงอของวัสดุคอมโพสิตลดลง ดังนั้น WPC ที่เติม US-CaHP ทุกสูตรผสมจึงค่าความแข็งแรงโค้งงอน้อยกว่า WPC ที่ไม่เติม US-CaHP โดย WPC ที่เติม US-CaHP ปริมาณ 40 php ค่าความแข็งแรงโค้งงอที่ได้ต่ำที่สุด เนื่องมาจาก US-CaHP ที่เติมลงไปเกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อน แสดงดังรูปที่ 4.8 (c) และ 4.8 (d) ซึ่งเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงานส่งผลให้การรับแรงของชิ้นงานลดลงอย่างมาก

ค่าความแข็งแรงโค้งงอของ WPC ที่เติม US-CaHP เป็นสารหน่วงการติดไฟเทียบกับการเติม APP และ ATH ในปริมาณที่เท่ากัน พบว่า WPC ที่เติมสารหน่วงการติดไฟ US-CaHP ให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอที่ใกล้เคียงกับ WPC ที่เติม ATH และ APP

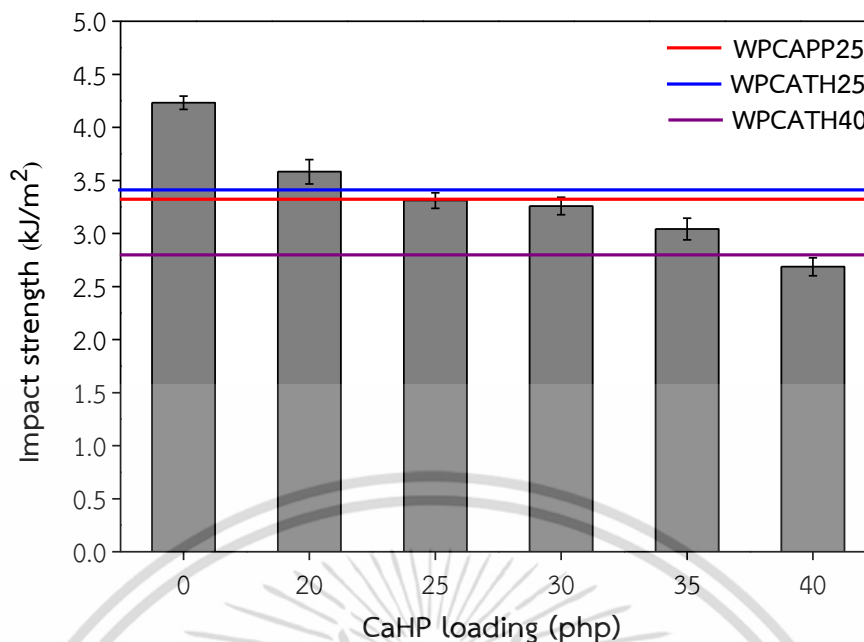
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ความแข็งแรงโค้งงอของ WPC ที่มีปริมาณ US-CaHP ต่างกัน

ผลการศึกษาศักยภาพการรับแรงกระแทกแบบไอซอดของ WPC แสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าการเติมอนุภาค US-CaHP ทำให้ค่าความแข็งแรงกระแทกของ WPC มีค่าลดลง เนื่องจากรูปร่างทางสัณฐานวิทยาของ US-CaHP มีลักษณะเป็นแผ่นที่มีความเหลี่ยม และขอบเกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งดูได้จากผลของ SEM ในรูปที่ 4.5 โดยบริเวณที่เป็นเหลี่ยมเป็นเหมือนจุดศูนย์รวมแรงเค้น ทำให้ WPC รับแรงกระแทกได้ไม่ดี ทำให้เมื่อ WPC ได้รับแรงกระทำจากภายนอกอย่างรวดเร็ว จึงไม่สามารถส่งผ่านแรงได้ดี ดังนั้น WPC ที่เติม US-CaHP ทุกสูตรผสมจึงแตกหักได้ง่ายกว่า WPC ที่ไม่เติม US-CaHP การเพิ่มปริมาณ US-CaHP ให้ค่าความแข็งแรงกระแทกมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเพิ่มส่วนที่ส่งผ่านแรงหรือกระจายแรงไม่ได้ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์ และการเติม US-CaHP ในปริมาณสูง (40 php) พบว่ามีอนุภาค US-CaHP บางส่วนเกิดการกระจุกตัวกันหรือมีการกระจายตัวที่ไม่ดี ซึ่งยืนยันจากผลของ SEM ในรูปที่ 4.8 (c) และ 4.8 (d) การกระจุกตัวกันของอนุภาค US-CaHP เป็นเหมือนจุดบกพร่องในชิ้นงานจึงทำให้ค่าความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลง

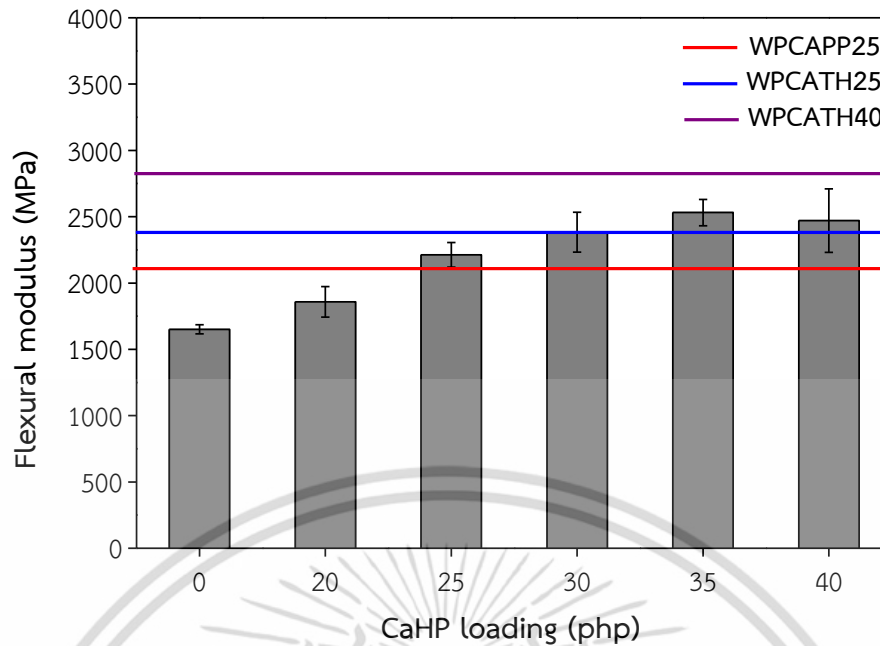
ผลการศึกษาศักยภาพการรับแรงกระแทกของ WPC ที่เติม US-CaHP เป็นสารหน่วงการติดไฟเทียบกับ WPC ที่เติม APP และ ATH พบว่า การใส่สารหน่วงการติดไฟที่ปริมาณเท่ากัน WPC ที่เติม US-CaHP ให้สมบัติการรับแรงกระแทกที่ใกล้เคียงกับ WPC ที่เติม APP และ ATH



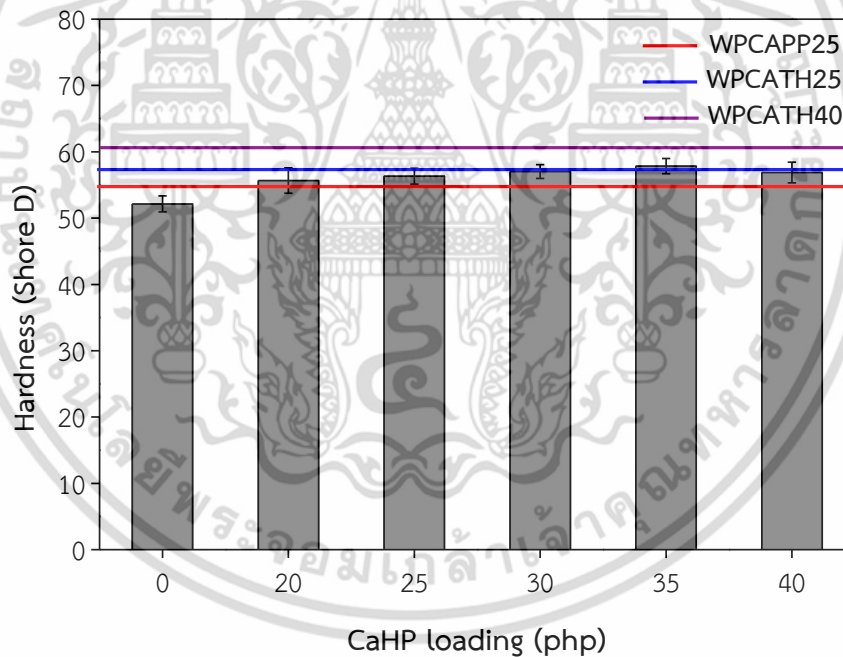
รูปที่ 4.10 สมบัติการรับแรงกระแทกของ WPC ที่มีปริมาณ US-CaHP ต่างกัน

จากรูปที่ 4.11 (a) และ 4.11 (b) พบว่า การเติมอนุภาค US-CaHP ลงใน WPC ทำให้ค่ามอดูลัสโค้งงอและค่าความแข็งกดของ WPC เพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณ US-CaHP เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคของ US-CaHP เป็นสารอนินทรีย์ซึ่งเตรียมจาก  $\text{CaCO}_3$  โดย US-CaHP มีค่าความแข็งประมาณ 2-2.5 Mohs [57] ซึ่งมากกว่าเมื่อเทียบกับความแข็งของ WPC ซึ่งมีองค์ประกอบเป็น HDPE และ CF ที่ปริมาณ 50 php ดังนั้นเมื่อเติม US-CaHP ซึ่งเป็นอนุภาคของแข็งใน WPC จึงทำให้เมื่อได้รับแรง WPC เปลี่ยนรูปร่างได้ยากขึ้นค่ามอดูลัสโค้งงอมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นและการเติมอนุภาคของแข็งซึ่งทำหน้าที่คล้ายสารตัวเติม สมบัติความแข็งของ WPC จึงเป็นไปตามกฎของของผสม แต่เมื่อเติม US-CaHP ในปริมาณที่มาก (40 php) พบว่าค่ามอดูลัสโค้งงอและค่าความแข็งกดมีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากเมื่อเติม US-CaHP ปริมาณมากใน WPC เป็นผลให้ US-CaHP เกาะตัวกันเป็นก้อนซึ่งเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน นอกจากนี้ยังเกิดรูหรือช่องว่างในชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.8 (c) และ 4.8 (d) จึงทำให้ค่ามอดูลัสโค้งงอและค่าความแข็งกดลดลงเล็กน้อย

ค่ามอดูลัสโค้งงอและค่าความแข็งกดของ WPC ที่เติม US-CaHP เป็นสารหน่วงการติดไฟเทียบกับ WPC ที่เติม APP และ ATH พบว่าเมื่อใส่สารหน่วงการติดไฟในปริมาณการเท่ากัน WPC ที่เติม US-CaHP ให้ค่าค่ามอดูลัสโค้งงอและค่าความแข็งกดต่ำกว่า WPC ที่เติม ATH แต่สูงกว่า WPC ที่เติม APP คาดว่าเนื่องจาก US-CaHP มีความแข็งประมาณ 2-2.5 Mohs ซึ่งสูงกว่า APP มีความแข็งประมาณ 1.5 Mohs แต่ US-CaHP มีความแข็งต่ำกว่า ATH ซึ่งมีความแข็งประมาณ 3 Mohs



(a) ค่ามอดูลัสโค้งงอ



(b) ค่าความแข็งกดของวัสดุ

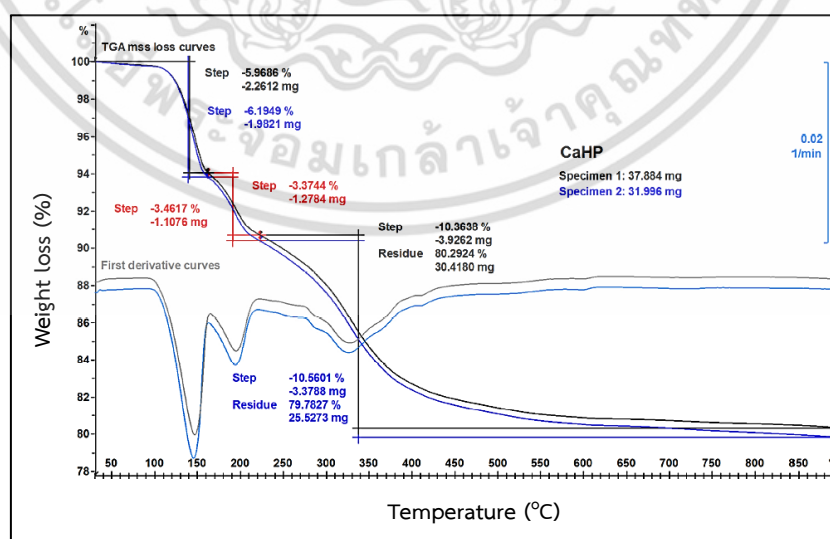
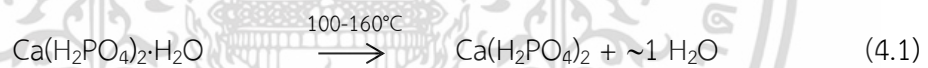
รูปที่ 4.11 สมบัติความแข็งของ WPC ที่มีปริมาณ US-CaHP แตกต่างกัน

#### 4.3.5 ผลการทดสอบการหน่วงการติดไฟ

##### 4.3.5.1 วิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวของ US-CaHP

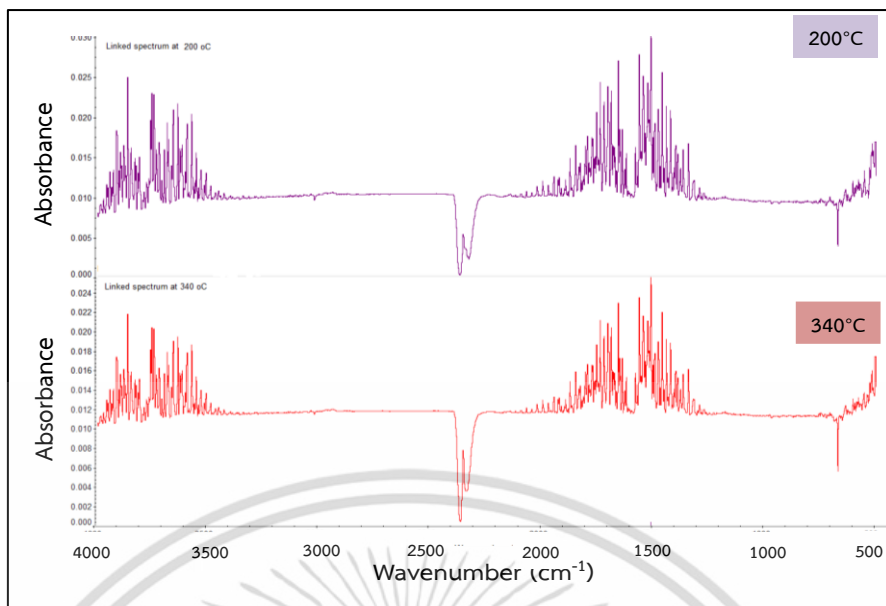
ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA แสดงดังรูปที่ 4.12 เป็นกราฟ TGA ของ US-CaHP ที่อุณหภูมิการสลายตัว 30-900°C พบว่า US-CaHP ที่เตรียมได้มีการสลายตัวสามช่วง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ใต้เงื่อนไขลิขสิทธิ์นี้ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิคือ 100-160, 160-280 และ 280-450°C มีการหายไปของน้ำหนัก (Weight loss) ประมาณ 6.1, 3.5 และ 10.5% ตามลำดับ โดยการสลายตัวของ US-CaHP ทั้งสามช่วงอุณหภูมิเป็นการสลายตัวของโมเลกุลน้ำ ซึ่งยืนยันผลการทดลองด้วยเทคนิค TGA-FTIR แสดงดังรูปที่ 4.13 เป็น FTIR สเปกตรัมของก๊าซที่เกิดจากการสลายตัวของ US-CaHP ที่อุณหภูมิ 200°C และ 340°C ซึ่งพบช่วงพีคการสั่นที่สำคัญที่เลขคลื่น 1250-2100  $\text{cm}^{-1}$  และ 3400-4000  $\text{cm}^{-1}$  โดยพีคการสั่นทั้งสองช่วงเป็นพีคการสั่นของโมเลกุลน้ำ ซึ่งสามารถยืนยันได้จากงานวิจัยของ Seefeldt H. และคณะ [58] ได้ทำการศึกษาการเติมสารหน่วงการติดไฟใน WPC ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA-FTIR ศึกษาการสลายตัวของสารหน่วงการติดไฟที่สลายตัวให้โมเลกุลของน้ำ พบว่าในช่วงของพีคการสั่นของโมเลกุลของน้ำที่สอดคล้องกัน ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าการสลายตัวของ US-CaHP ที่ช่วงต่าง ๆ คือการสลายตัวของน้ำจริง จากการคำนวณคิดเป็นการสลายตัวของน้ำ 3 โมเลกุลใน US-CaHP (แสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก ข) โดยการสลายตัวของ US-CaHP ช่วงแรกที่อุณหภูมิ 100-160°C คาดว่าเป็นการสลายตัวของน้ำ 1 โมเลกุล ซึ่งเป็นการสลายตัวของโมโนไฮเดรตใน US-CaHP โดยเป็นโมเลกุลน้ำที่หลุดออกได้ง่ายที่สุดเนื่องจากเป็นโมเลกุลของน้ำที่อยู่นอกโครงผลึก อุณหภูมิการสลายตัวจึงต่ำ แสดงดังสมการที่ 4.1 และการสลายตัวของ US-CaHP ช่วงที่สองและสามที่อุณหภูมิ 160-280 และ 280-450°C คาดว่าเป็นการสลายตัวของน้ำ 2 โมเลกุล เป็นการสลายตัวของน้ำในโครงผลึก US-CaHP ซึ่งยึดกันด้วยพันธะที่แข็งแรงกว่าจึงทำให้โมเลกุลของน้ำสลายตัวออกมาที่อุณหภูมิสูง แสดงดังสมการที่ 4.2 ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Boonchom B. [3] พบว่า CaHP ที่เตรียมได้มีการสลายตัว 3 ช่วงอุณหภูมิได้แก่ 97-151, 151-278 และ 278-500°C ซึ่งเป็นการสลายตัวของน้ำ 3 โมเลกุล และการสลายตัวของ US-CaHP ให้เถ้าสารประกอบ  $\text{CaP}_2\text{O}_6$  ที่ปริมาณ 79%



รูปที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวของ US-CaHP ด้วยเทคนิค TGA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



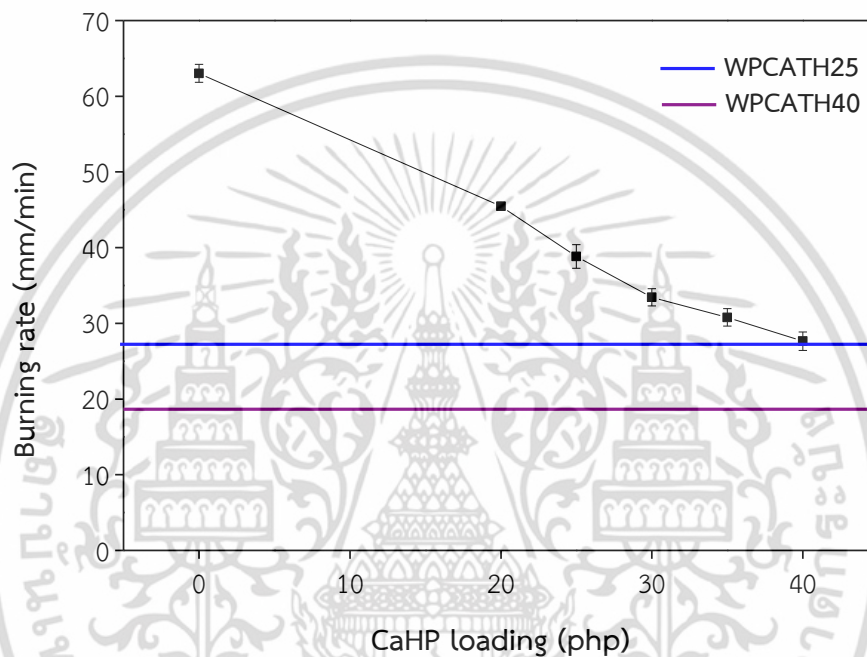
รูปที่ 4.13 ผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของ US-CaHP ขณะสลายตัวที่อุณหภูมิ 200°C และ 340°C ด้วยเทคนิค TGA-FTIR

#### 4.3.5.2 ผลการทดสอบการหน่วงการติดไฟของคอมโพสิต

ผลการศึกษาอัตราการลามไฟ (Burning rate) ของ WPC แสดงดังรูปที่ 4.14 พบว่าเมื่อเติม US-CaHP ลงใน WPC การลามไฟของ WPC ที่เติม US-CaHP มีอัตราที่ช้าลงอย่างน้อย 29% เทียบกับ WPC ที่ไม่ได้เติม US-CaHP เนื่องจาก US-CaHP ขณะสลายตัวเกิดการปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำ สามารถยืนยันได้จากการศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวของ US-CaHP แสดงดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 ซึ่งการสลายตัวให้โมเลกุลน้ำนั้นช่วยในกลไกการหน่วงการติดไฟ เกิดปฏิกิริยาคูดความร้อน (Endothermic reaction) ในระบบ ช่วยลดความร้อนจากการเผาไหม้ ทำให้พื้นผิวของ WPC เย็นลงและการสลายตัวให้โมเลกุลน้ำยังช่วยเจือจางก๊าซ และเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ที่ทำให้เกิดการลามไฟได้ นอกจากนี้การสลายตัวของ US-CaHP ยังเหลือเถ้าซึ่งเป็นสารประกอบของแคลเซียมและฟอสฟอรัส ( $\text{CaP}_2\text{O}_6$ ) ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่เคลือบบนพื้นผิวของชิ้นงานเกิดเป็นชั้นฉนวนทางความร้อน ช่วยให้เชื้อเพลิงและก๊าซที่ติดไฟได้ไม่สัมผัสกับพื้นผิวของ WPC ซึ่งจากงานวิจัยของ Sarang D. และคณะ [43] ได้ศึกษาการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารหน่วงการติดไฟร่วมกับสารหน่วงการติดไฟกลุ่มฟอสฟอรัสใน PP พบว่าแคลเซียมคาร์บอเนตและสารหน่วงการติดไฟกลุ่มฟอสฟอรัสสามารถเกิดเป็นเถ้า  $\beta$ -calcium metaphosphate ( $\text{Ca}(\text{PO}_3)_2$ )<sub>n</sub> สามารถปกคลุมพื้นผิวพอลิเมอร์ขณะเผาไหม้ทำให้การลามไฟหยุดลงได้ แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่เถ้าของ US-CaHP มีโอกาสปกคลุมบนผิวของ WPC และช่วยลดการลามไฟของชิ้นงานได้ ดังนั้นการเติม US-CaHP จึงสามารถช่วยหน่วงการติดไฟของ WPC ได้ และเมื่อเพิ่มปริมาณ US-CaHP ทำให้อัตราการลามไฟมีแนวโน้มลดลง โดยการเติม US-CaHP ที่ปริมาณ 40 php มีอัตราการลามไฟต่ำที่สุดคือ 27.64 mm/min ซึ่งลดลงจาก WPC ที่ไม่ได้เติม US-CaHP ถึง 52.35% อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ไม่สามารถใส่ในปริมาณเกิน 40 php ได้เนื่องจากข้อจำกัดของการผสม

เมื่อเปรียบเทียบการเติม US-CaHP กับสารหน่วงการติดไฟเชิงพาณิชย์ ATH ในปริมาณที่เท่ากัน พบว่า WPC ที่เติม ATH ทำให้อัตราการลามไฟที่ต่ำกว่า คาดว่าเนื่องจากการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สลายตัวของ US-CaHP ให้โมเลกุลของน้ำประมาณ 21% และเหลือปริมาณเถ้าประมาณ 79% เปรียบเทียบกับ ATH ซึ่งสลายตัวให้โมเลกุลของน้ำที่อุณหภูมิ 220°C ปริมาณ 32% และเหลือปริมาณเถ้า 68% โดยกลไกหลักของการหน่วงการติดไฟของ US-CaHP และ ATH คือกลไกการสลายตัวให้โมเลกุลของน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาคูดความร้อนในระบบ ช่วยลดความร้อนจากการเผาไหม้ ทำให้พื้นผิวของ WPC เย็นลง เมื่อ US-CaHP สลายตัวให้โมเลกุลของน้ำที่ปริมาณต่ำกว่า ATH จึงทำให้ประสิทธิภาพในการหน่วงการติดไฟของ US-CaHP ต่ำกว่า ATH แต่เมื่อเติม US-CaHP ในปริมาณที่สูงขึ้นให้ประสิทธิภาพในการหน่วงการติดไฟใกล้เคียงกับ WPC ที่เติม ATH ปริมาณ 25 php แสดงให้เห็นว่าต้องใช้ US-CaHP ในปริมาณที่มากกว่า ATH จึงให้ประสิทธิภาพการหน่วงไฟใกล้เคียงกัน

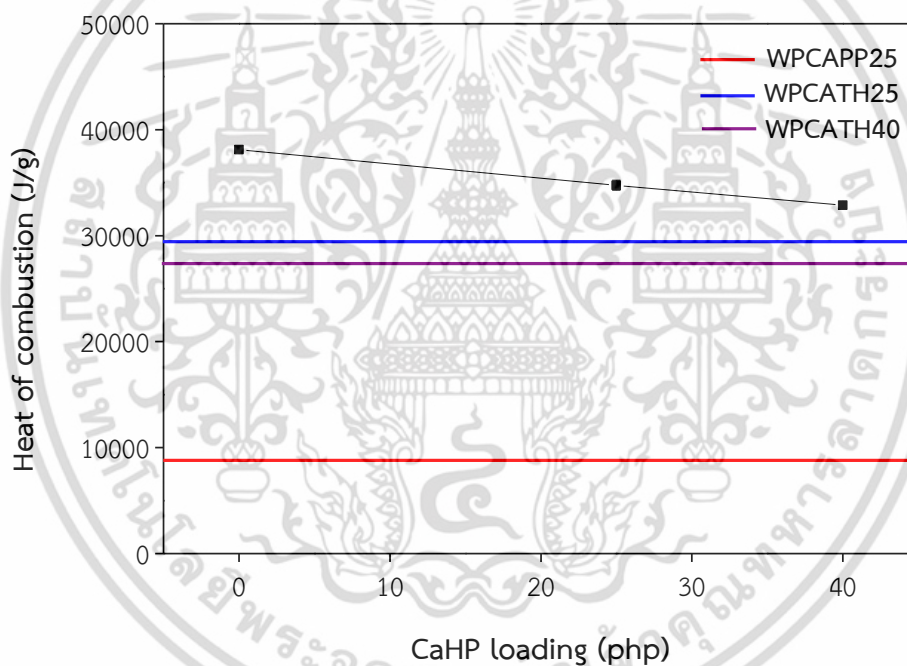


รูปที่ 4.14 อัตราการลามไฟของ WPC ที่มีปริมาณ US-CaHP แตกต่างกัน

จากการศึกษาค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ (Heat of combustion) ด้วยเครื่อง Bomb calorimeter แสดงดังรูปที่ 4.15 พบว่าเมื่อเติม US-CaHP ลงไปให้ค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้มีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับ WPC ที่ไม่เติม US-CaHP แสดงให้เห็นว่าการเติม US-CaHP ช่วยให้ความร้อนในระบบลดลง เนื่องจาก US-CaHP ขณะสลายตัวเกิดการปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำและเกิดปฏิกิริยาคูดความร้อนในระบบจึงช่วยลดความร้อนจากการเผาไหม้ ส่งผลให้ค่าพลังงานความร้อนในระบบลดลง ค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ที่วัดได้จึงลดลงด้วย ซึ่งเป็นไปตามงานวิจัยของ Nicole M.S. และคณะ [40] ได้ศึกษาการเติมสารหน่วงการติดไฟชนิดต่าง ๆ ลงใน WPC เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหน่วงการติดไฟ ศึกษาประสิทธิภาพการหน่วงการติดไฟโดยวัดจากเครื่อง Cone calorimeter พบว่า WPC ที่เติมสารหน่วงการติดไฟให้ค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ (Effective heat of combustion, EHOc) ลดลง ซึ่งแสดงว่าสารหน่วงการติดไฟมีประสิทธิภาพที่ดี

เมื่อเปรียบเทียบการเติม US-CaHP กับสารหน่วงไฟเชิงพาณิชย์ ATH และ APP ลงใน WPC พบว่าค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ของ WPC ที่เติมสารหน่วงการติดไฟ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณที่เท่ากัน WPC ที่เติม APP ให้ค่าที่ต่ำที่สุด รองลงมาคือ WPC ที่เติม ATH และ WPC ที่เติม US-CaHP ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการหน่วงการติดไฟของ APP ดีที่สุด รองลงมาคือ ATH และ US-CaHP ตามลำดับ เนื่องจาก APP มีองค์ประกอบของทั้งฟอสฟอรัสและไนโตรเจน ซึ่งให้ประสิทธิภาพหน่วงการติดไฟที่เสริมกัน สามารถเกิดขึ้น Char ปกคลุมพื้นผิวของ WPC ได้ดี ทำให้ค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ที่วัดได้ต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับวิจัยของ Umemura T. และคณะ [59] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการหน่วงการติดไฟของ WPC เปรียบเทียบการเติมสารหน่วงการติดไฟได้แก่ APP และ ATH ที่ปริมาณเท่ากัน พบว่าการเติม APP ลงใน WPC ให้สามารถทำให้เกิดชั้น Char ปกคลุมที่พื้นผิวของ WPC ได้ดี โดยทดสอบผ่านมาตรฐาน UL94 V เป็น V-0 แต่การเติม ATH ให้อัตราการลามไฟที่ต่ำกว่า WPC ที่ไม่เติมสารหน่วงการติดไฟแต่ไม่ผ่านมาตรฐาน UL94 V ดังนั้นประสิทธิภาพการหน่วงการติดไฟของ APP จึงสูงกว่า ATH และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ ATH กับ US-CaHP พบว่า US-CaHP สลายตัวให้โมเลกุลของน้ำที่ปริมาณต่ำกว่า ATH จึงทำให้ประสิทธิภาพในการหน่วงการติดไฟของ US-CaHP ต่ำกว่า ATH ทำให้ค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ที่วัดได้ของ WPC ที่เติม US-CaHP สูงที่สุด

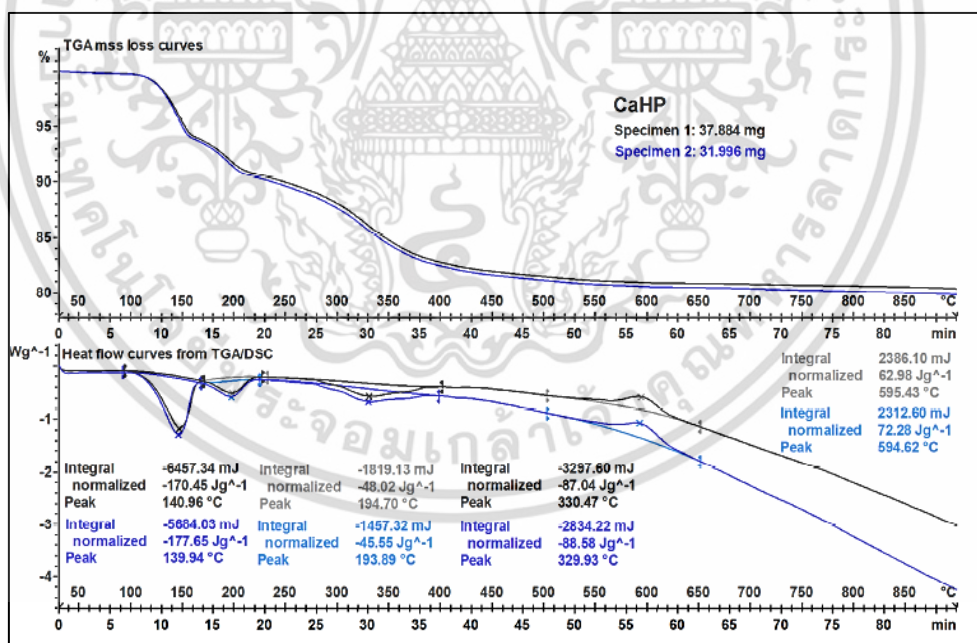


รูปที่ 4.15 ค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ของ WPC ที่มีปริมาณ US-CaHP ต่างกัน

ผลการศึกษาค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้สามารถยืนยันได้จากผลการวิเคราะห์จากเทคนิค TGA-DSC ซึ่งได้เทอร์โมแกรมดังรูปที่ 4.16 (a) แสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวด้วยเทคนิค TGA ร่วมกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานทางความร้อน (การดูดหรือคายพลังงาน) ด้วยเทคนิค DSC ของ US-CaHP พบว่าจากกราฟ TGA มีการสลายตัวสามช่วงอุณหภูมิ ได้แก่ 100-160, 160-280 และ 280-450°C ซึ่งเมื่อศึกษาร่วมกับ DSC เทอร์โมแกรม พบว่า การสลายตัวแต่ละช่วงนั้นมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานแบบดูดความร้อน การสลายตัวแต่ละช่วงถูกยืนยันได้ว่าเป็นน้ำจาก TGA-FTIR แสดงดังรูปที่ 4.13 แต่ที่อุณหภูมิ 500-600°C เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบการคายพลังงาน (Exothermic reaction) ขึ้น เนื่องจาก  $\text{CaP}_2\text{O}_6$  ซึ่งเป็นเถ้าสารประกอบที่เหลือเอนกสารนี้เป็นเถ้าที่สวมน้ำสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก US-CaHP เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Boonchom B. [3] ที่ศึกษาการเตรียม CaHP ซึ่งพบว่าเมื่อนำ CaHP ที่เตรียมได้มาผ่านการแคลไซด์ที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง  $\text{CaP}_2\text{O}_6$  เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากโครงสร้างผลึกแบบแกมมา ( $\gamma\text{-CaP}_2\text{O}_6$ ) เป็นโครงสร้างผลึกแบบเบต้า ( $\beta\text{-CaP}_2\text{O}_6$ ) จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนแบบคายพลังงานใน DSC เทอร์โมแกรม

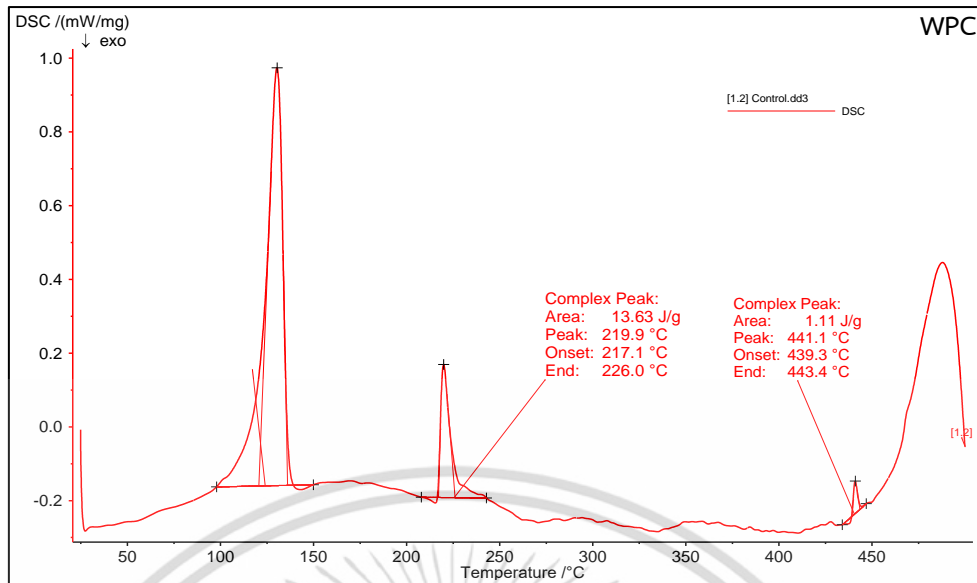
รูปที่ 4.16 (b) และ (c) แสดงผลการทดสอบทางความร้อนจากเทคนิค DSC ของ WPC ที่เติมและไม่เติม US-CaHP พบว่า WPC ที่ไม่เติม US-CaHP มีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนที่ 2 ช่วงหลัก ได้แก่การเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิ 100-150°C ซึ่งเป็นช่วงที่ผลึก HDPE หลอม (Crystal melting) และช่วงอุณหภูมิ 200-230°C ซึ่งเป็นช่วงที่ CF เริ่มเกิดการสลายตัว ยืนยันได้จากงานวิจัยของ Morslyede F.R. และคณะ [60] ที่ทำการศึกษาวัสดุย่อยสลายได้จากแป้งผสมกับเส้นใยมะพร้าว พบว่าการสลายตัวของเส้นใยมะพร้าวเริ่มที่อุณหภูมิ 220°C ส่วน DSC เทอร์โมแกรมของ WPC ที่เติม US-CaHP 40 phr พบช่วงการเปลี่ยนแปลงความร้อนสี่ช่วงหลัก ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิ 100-150°C ซึ่งเป็นช่วงที่ ผลึก HDPE หลอม ช่วงอุณหภูมิ 230-250°C ซึ่งเป็นช่วงที่ CF เกิดการสลายตัว การเปลี่ยนแปลงที่ช่วงอุณหภูมิ 270-280 และ 350-360°C ซึ่งเป็นช่วงที่ US-CaHP สลายตัวให้โมเลกุลของน้ำเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับผล DSC เทอร์โมแกรมของ US-CaHP แสดงดังภาพที่ 4.16 (a) จึงสามารถยืนยันได้ว่าการสลายตัวของ US-CaHP ให้โมเลกุลของน้ำเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อน ซึ่งช่วยลดความร้อนของระบบทำให้ค่าพลังงานความร้อนของการเผาไหม้ลดลง ส่งผลให้เกิดการหน่วงการติดไฟใน WPC ได้



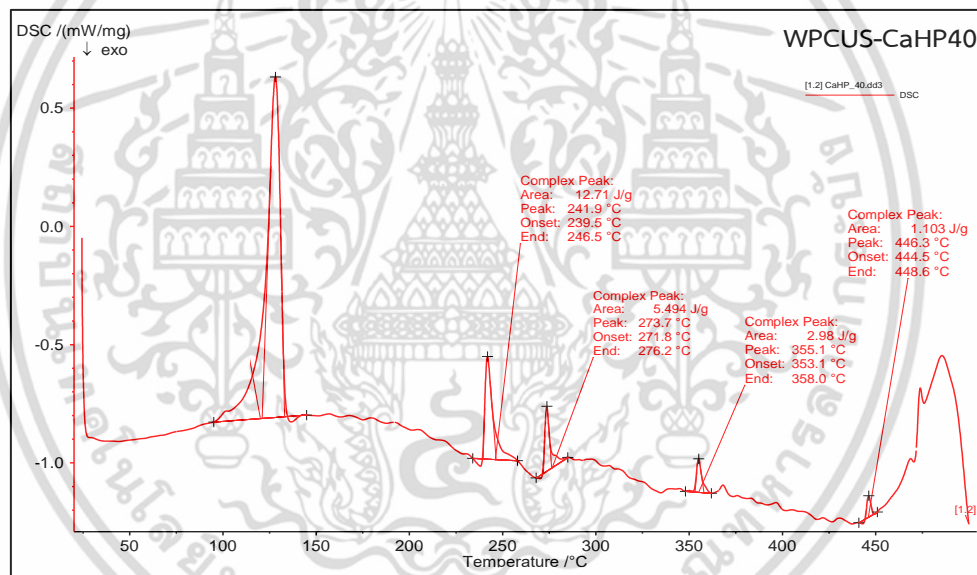
(a) TGA-DSC เทอร์โมแกรมของ US-CaHP

รูปที่ 4.16 DSC เทอร์โมแกรมของ US-CaHP และ WPC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b) DSC เทอร์โมแกรมของ WPC



(c) DSC เทอร์โมแกรมของ WPCUS-CaHP40

รูปที่ 4.16 DSC เทอร์โมแกรมของ US-CaHP และ WPC (ต่อ)

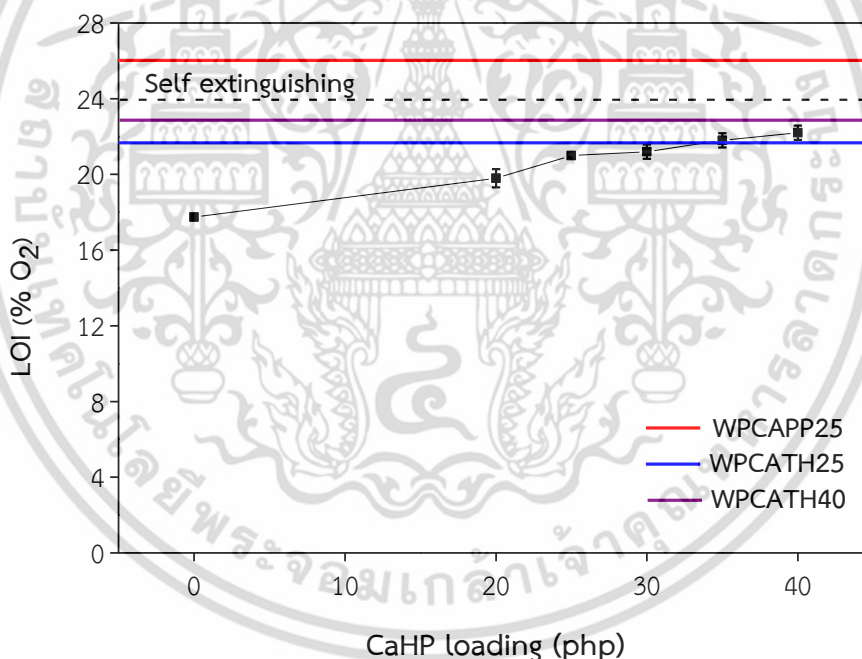
ผลการทดสอบค่าดัชนีออกซิเจนที่ต่ำที่สุดที่ทำให้ชิ้นงานติดไฟหรือ LOI ของ WPC แสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่าเมื่อเติม US-CaHP ลงใน WPC ค่า LOI ของ WPC เพิ่มสูงขึ้น แสดงว่าต้องใช้ก๊าซออกซิเจนปริมาณมากขึ้นเพื่อให้ชิ้นงานติดไฟได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า WPC มีความทนไฟมากยิ่งขึ้น เนื่องจาก US-CaHP ขณะสลายตัวเกิดการปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำและเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อน ช่วยลดความร้อนจากการเผาไหม้ทำให้พื้นผิวของวัสดุเย็นลง การสลายตัวให้โมเลกุลน้ำยังช่วยเจือจางก๊าซ และเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ที่ทำให้เกิดการลามไฟ นอกจากนี้เมื่อ US-CaHP สลายตัวยังเกิดเถ้าของสารประกอบ  $\text{CaP}_2\text{O}_6$  คาดว่ามีโอกาสเคลือบบนผิวหน้าพอลิเมอร์ ซึ่งเถ้าของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารประกอบ  $\text{CaP}_2\text{O}_6$  สามารถเป็นชั้นฉนวนทางความร้อน ทำให้ WPC ไม่สัมผัสกับเชื้อเพลิงและก๊าซที่ติดไฟได้ ซึ่งเป็นกลไกที่ทำให้ WPC หน่วงการติดไฟได้ดีขึ้น

เมื่อทำการเติม US-CaHP ในปริมาณต่าง ๆ พบว่าการเติม US-CaHP ในปริมาณ 20 และ 25 php ลงใน WPC ให้ค่า LOI เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ US-CaHP เป็น 40 php พบว่าค่า LOI เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องมาจากการเติมในปริมาณ 20 และ 25 php โดยส่วนใหญ่อนุภาค CaHP มีการกระจายตัวเป็นอนุภาคเดี่ยว ๆ และไม่เกาะกลุ่มกันเป็นก้อน แสดงได้จากผลสัณฐานวิทยาจาก SEM ดังรูปที่ 4.8 (a) และ (b) US-CaHP มีการแตกตัวและการกระจายตัวที่ดีใน WPC ทำให้พื้นที่ผิวของ US-CaHP สัมผัสกับ WPC มาก ประสิทธิภาพในการหน่วงการติดไฟจึงดี ส่วนการเติม US-CaHP ปริมาณ 40 php พบว่าอนุภาค US-CaHP ชอบเกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ดังรูปที่ 4.8 (c) และ (d) จึงทำให้พื้นที่ผิวของ US-CaHP สัมผัสกับ WPC น้อยลงเป็นผลให้ประสิทธิภาพของการหน่วงการติดไฟไม่ดีเท่าที่ควร

ค่า LOI ของ WPC ที่เติม US-CaHP เทียบกับ WPC ที่เติม APP และ ATH พบว่าปริมาณการเติมสารหน่วงไฟที่เท่ากัน WPC ที่เติม APP ให้ค่า LOI ที่สูงสุด รองลงมาคือ WPC ที่เติม ATH และ WPC ที่เติม US-CaHP ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบสอดคล้องกับค่าอัตราการลามไฟและค่าความร้อนจากการเผาไหม้ของ WPC ข้างต้น



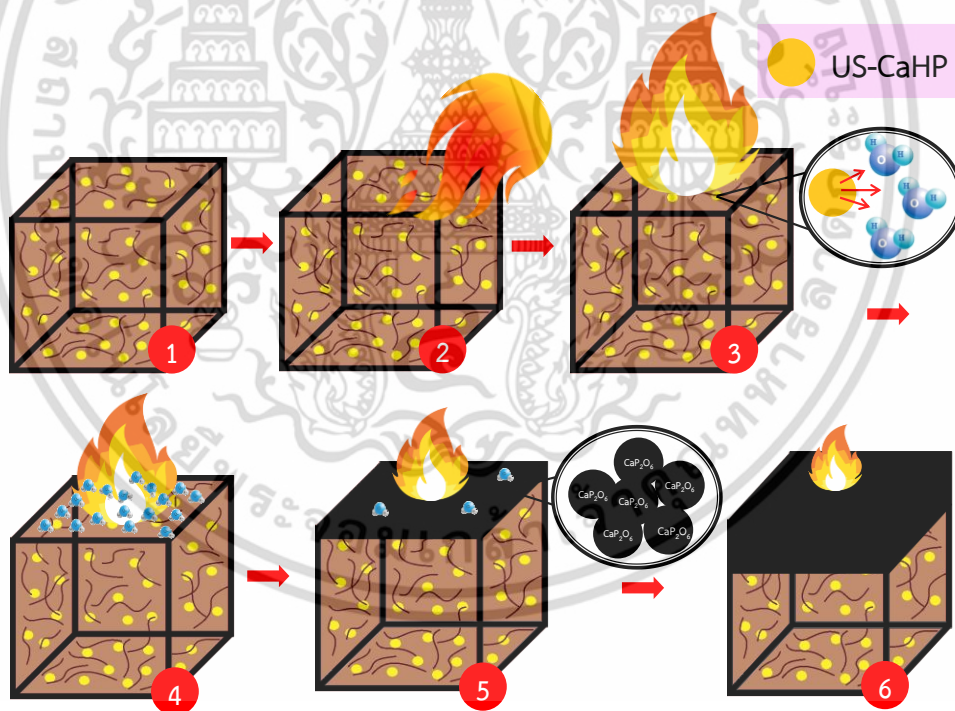
รูปที่ 4.17 ค่า LOI ของ WPC ที่มีปริมาณ US-CaHP ต่างกัน

จากผลการทดสอบสมบัติการหน่วงการติดไฟของ WPC ข้างต้น เห็นได้ว่าการเติมสารหน่วงไฟ US-CaHP ที่เตรียมจากวัสดุจากธรรมชาติ ให้ผลการทดสอบที่มีแนวโน้มว่า WPC มีสมบัติการหน่วงการติดไฟที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อทดสอบผลการลามไฟตามมาตรฐาน UL94 V ของ WPC ที่เติม US-CaHP ในปริมาณต่าง ๆ (แสดงรูปถ่ายการทดสอบในภาคผนวก ฉ) พบว่าการเติม US-CaHP ที่มีปริมาณต่าง ๆ เปรียบเทียบกับ WPC ที่ไม่เติม US-CaHP เมื่อทำการทดสอบตาม

มาตรฐาน UL94 V แล้วไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ นั่นคือไม่สามารถดับไฟได้เองภายใน 30 วินาที ซึ่งงานเกิดการติดไฟและลุกไหม้จนหมด แสดงว่าไม่ผ่านมาตรฐาน UL94 V

เมื่อเปรียบเทียบการเติม US-CaHP กับสารหน่วงไฟเชิงพาณิชย์ ATH และ APP ปริมาณที่เท่ากันใน WPC ทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL94 V พบว่า WPC ที่เติม APP ให้ผลการทดสอบเป็น V-1 คือวัสดุติดไฟและสามารถดับไฟได้ด้วยตัวเองในเวลา 30 วินาที แต่ WPC ที่เติม ATH ให้ผลการทดสอบที่เหมือนกับ WPC ที่เติม US-CaHP คือไม่สามารถดับไฟได้ภายใน 30 วินาที แสดงว่าไม่ผ่านมาตรฐาน UL94 V

รูปที่ 4.18 แสดงแผนภาพจำลองกลไกการทำงานของสารหน่วงการติดไฟ US-CaHP ที่เติมลงใน WPC โดยเมื่อทำการเผาไหม้ชิ้นงาน WPC ที่เติม US-CaHP (เม็ดสีเหลือง) US-CaHP สลายตัวให้โมเลกุลของน้ำ เป็นการเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อนช่วยลดความร้อนจากการเผาไหม้ ทำให้พื้นผิวของวัสดุเย็นลง และการสลายตัวให้โมเลกุลน้ำช่วยเจือจางก๊าซและเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ จึงทำให้อัตราการลามไฟลดลง เมื่อ US-CaHP สลายตัวให้โมเลกุลของน้ำ US-CaHP เหลือเป็นสารประกอบแคลเซียมและฟอสฟอรัส ( $\text{CaP}_2\text{O}_6$ ) ปกคลุมบนพื้นผิวของ WPC เกิดเป็นชั้นถ้ำของแข็ง ซึ่งเป็นฉนวนความร้อนที่ขวางกั้นก๊าซออกซิเจนและเชื้อเพลิงไม่ให้สัมผัสกับ WPC กลไกต่าง ๆ เหล่านี้ ช่วยทำให้อัตราการลามไฟของ WPC ช้าลง และสามารถหน่วงการติดไฟใน WPC ได้ แต่ไม่สามารถช่วยให้ WPC ดับไฟได้ด้วยตัวเอง (ไม่ผ่านมาตรฐาน UL94 V)



รูปที่ 4.18 แผนภาพจำลองกลไกการทำงานของ US-CaHP ที่เติมลงใน WPC

จากผลการทดสอบสมบัติการหน่วงการติดไฟของ WPC พบว่าการเติม US-CaHP เป็นสารหน่วงการติดไฟระบบเดียวให้ผลทดสอบการหน่วงการติดไฟที่มีแนวโน้มที่ดีขึ้น แต่ไม่สามารถผ่านมาตรฐานการลามไฟ UL94 V คือวัสดุไม่สามารถดับไฟได้ด้วยตัวเอง ดังนั้นจึงเลือกทำการศึกษาในตอนต่อไปโดยศึกษาการใช้ US-CaHP เป็นสารหน่วงการติดไฟในระบบอินตุมสเซนต์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(IFRs) ซึ่งม็องค์ประกอบของสารให้ฟอง (MA) สารกลุ่มฟอสฟอรัส (US-CaHP) และสารให้ Char (CF) โดยคาดว่า IFRs มีประสิทธิภาพในการหน่วงการติดไฟที่ดีกว่าการใช้สารหน่วงไฟในระบบเดี่ยว

#### 4.4 การศึกษาผลของปริมาณ US-CaHP เป็นสารหน่วงการติดไฟระบบอินตุมเอสเซนส์

สารหน่วงไฟระบบอินตุมเอสเซนส์ (IFRs) เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีเกิดขึ้น Char ทำหน้าที่เป็นฉนวนทางความร้อนและป้องกันการสัมผัสของความร้อนและก๊าซออกซิเจนที่ผิวหน้าของ WPC ส่งผลให้การติดไฟสิ้นสุดลง โดยสารหน่วงการติดไฟในระบบอินตุมเอสเซนส์ประกอบด้วย 3 องค์ประกอบ คือ

1. สารกลุ่มฟอสฟอรัส ในการทดลองนี้คือ US-CaHP
2. สารให้ Char ในการทดลองนี้คือ CF
3. สารให้ฟอง ในการทดลองนี้คือ MA

ในงานวิจัยนี้ศึกษาอัตราส่วนของสารหน่วงการติดไฟระบบอินตุมเอสเซนส์ MA:US-CaHP:CF จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของ สิทธิโชค ปุณณนินิ และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาค่าเตรียมสารหน่วงการติดไฟระบบอินตุมเอสเซนส์จากแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (APP) เมลามีน (MA) และเส้นใยกาบมะพร้าว (CF) ใน WPC พบว่าอัตราส่วนที่ดีที่สุดคือ 0.17:0.5:1 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษา IFRs ในอัตราส่วน 0.17:0.5:1 (Intu-CaHP0.5), 0.17:0.6:1 (Intu-CaHP0.6), 0.17:0.7:1 (Intu-CaHP0.7) และ 0.17:0.8:1 (Intu-CaHP0.8) โดยควบคุมอัตราส่วนของเมลามีน (MA) และเส้นใยมะพร้าว (CF) ที่ 0.17 และ 1 ตามลำดับ

##### 4.4.1 ความหนาแน่นของคอมโพสิต

ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานคอมโพสิตที่คำนวณได้จากเครื่อง Density kit และความหนาแน่นที่คำนวณได้จากสูตร (แสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก ง) แสดงดังตารางที่ 4.5 พบว่าค่าความหนาแน่นของแต่ละสูตรผสมในทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาผลของการเติม IFRs โดย US-CaHP มีความหนาแน่น  $1.9912 \text{ g/cm}^3$  และ MA มีความหนาแน่น  $1.570 \text{ g/cm}^3$  ซึ่งสูงกว่าความหนาแน่นของ WPC ( $0.9833 \text{ g/cm}^3$ ) พบว่าการเพิ่มปริมาณ IFRs ที่อัตราส่วน 0.17:0.5:1, 0.17:0.6:1 และ 0.17:0.7:1 ให้ค่าความหนาแน่นของ WPC มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ WPC ที่ไม่เติม IFRs เนื่องจากเป็นการเพิ่มสัดส่วนของวัสดุที่มีความหนาแน่นสูงกว่าลงใน WPC เป็นไปตามกฎของของผสม แต่อัตราส่วน IFRs ที่ 0.17:0.8:1 ให้ค่าความหนาแน่นที่ลดลงกว่าอัตราส่วนอื่น คาดว่าเนื่องจากความผิดปกติจากขั้นตอนการผสมโดยไม่สามารถผสมสารหน่วงการติดไฟลงไปในสูตรผสมได้หมด และการขึ้นรูปที่ผิดแปลกไปจากอัตราส่วนอื่นโดยเกิดการไหม้ของของผสมในเครื่องฉีดขึ้นรูปและเกิดการระเหิดออกมาที่บริเวณ Nozzle จึงทำให้อัตราส่วนของ IFRs ผิดแปลกไป ดังนั้นจึงไม่นำสูตร Intu-CaHP0.8 มาอธิบายร่วมด้วย

เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นของ Intu-CaHP และ Intu-APP ซึ่งเป็นชิ้นงานคอมโพสิตที่ใส่สารหน่วงการติดไฟเชิงพาณิชย์ พบว่าในอัตราส่วนของ IFRs ที่เท่ากัน Intu-CaHP และ Intu-APP ให้ค่าความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจาก APP ( $1.900 \text{ g/cm}^3$ ) มีความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกับ US-CaHP ( $1.9912 \text{ g/cm}^3$ )

รูปที่ 4.5 ค่าความหนาแน่นของ WPC ที่มีอัตราส่วนของ IFRs ต่างกัน

สูตร	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	
	ค่าที่ได้จาก Density kit	ค่าที่ได้จากการคำนวณสูตร
Intu-APP0.5	1.1341±0.0061	1.1383±0.0131
Intu-CaHP0.5	1.1487±0.0023	1.1408±0.038
Intu-CaHP0.6	1.1639±0.0114	1.1611±0.0046
Intu-CaHP0.7	1.1791±0.0047	1.1720±0.0113
Intu-CaHP0.8	1.1304±0.0381	1.1349±0.0214

#### 4.4.2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน

จากตารางที่ 4.5 แสดง  $T_m$ ,  $T_c$  และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของชิ้นงานคอมโพสิต พบว่า WPC ที่เติม IFRs ทุกสูตรมีค่า  $T_m$  และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่ใกล้เคียงกัน และมีค่าใกล้เคียงกับ WPC ที่ไม่เติม IFRs แสดงว่าการเติม IFRs ไม่รบกวนการเกิดผลึกของพอลิเมอร์เมทริกซ์ HDPE และผลึกที่ได้มีขนาดใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาจากค่า  $T_c$  พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับ WPC ซึ่งบ่งบอกให้ทราบว่า IFRs ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกใน HDPE เพราะธรรมชาติของ HDPE เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถเกิดผลึกได้รวดเร็ว ดังนั้นการเติม IFRs ลงไปจึงไม่สามารถทำให้อุณหภูมิเกิดผลึกของ HDPE เกิดเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ สิทธิโชค ปุณณะนิธิ และคณะ [5] แต่อัตราส่วน IFRs ที่ 0.17:0.8:1 ให้ค่า  $T_m$  และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ HDPE ลดลงกว่า WPC ที่เติม IFRs ในอัตราส่วนอื่น คาดว่าเนื่องจากความผิดปกติจากขั้นตอนการผสมและการขึ้นรูปที่ผิดแปลกไปจากอัตราส่วนอื่น ดังนั้นจึงไม่นำสูตร Intu-CaHP0.8 มาอธิบายร่วมด้วย

ตารางที่ 4.6  $T_m$ ,  $T_c$  และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ HDPE ในชิ้นงานคอมโพสิต

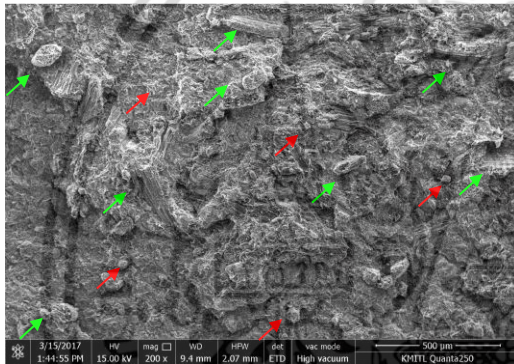
สูตร	$T_m$ (°C)	$T_c$ (°C)	ความเป็นผลึก (%)
WPC	129.2	116.7	64
Intu-CaHP0.5	128.6	116.8	63
Intu-CaHP0.6	128.5	117.9	63
Intu-CaHP0.7	128.5	116.5	60
Intu-CaHP0.8	121.8	117.1	56

#### 4.4.3 สัณฐานวิทยาของคอมโพสิต

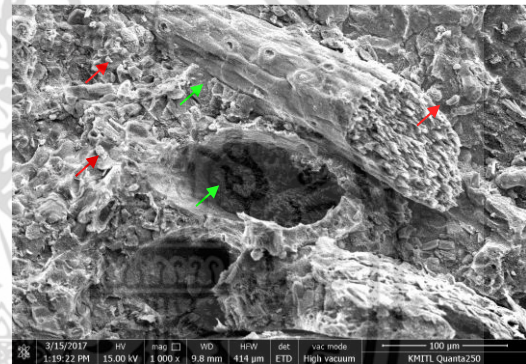
การศึกษาการกระจายตัวของ IFRs ใน WPC ที่อัตราส่วน 0.17:0.5:1 และ 0.17:0.8:1 แสดงในรูปที่ 4.19 โดยการกระจายตัวของ CF ใน HDPE ที่อัตราส่วน IFRs เท่ากับ 0.17:0.5:1 แสดงดังรูปที่ 4.19 (a) ที่กำลังขยาย 200 เท่า พบว่าการกระจายตัวของ CF ที่ดี ไม่เกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (บริเวณที่ชี้ด้วยลูกศรสีเขียว) รูปที่ 4.19 (b) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า แสดงการยึดติดของ CF และ HDPE พบว่าการยึดติดระหว่างวัฏภาคดี เห็นได้จากรอยต่อระหว่าง CF และ HDPE ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ เมื่อเติม IFRs ในอัตราส่วน 0.17:0.5:1 ลงใน WPC พบว่าโดยส่วนใหญ่ IFRs มีการกระจายตัวที่ดี แต่มีบางส่วนเกาะตัวเป็นกลุ่มก้อนเล็กน้อย (บริเวณที่ชี้ด้วยลูกศรสีแดง) แสดงว่า IFRs ส่วนใหญ่มีการแตกตัวและการกระจายตัวที่ดี ใน WPC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

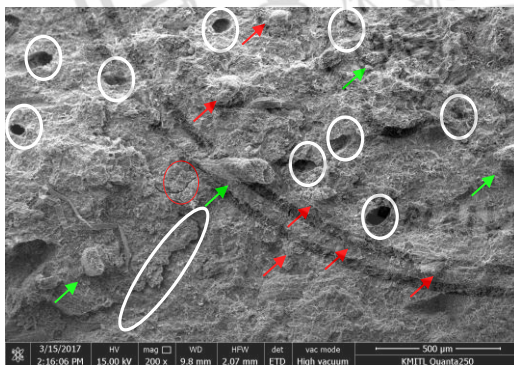
เมื่อเพิ่มปริมาณ IFRs ที่อัตราส่วน 0.17:0.8:1 ดังแสดงในรูปที่ 4.19 (c) ที่กำลังขยาย 200 เท่า เห็นได้ว่า CF กระจายตัวได้ดีใน HDPE (บริเวณที่ชี้ด้วยลูกศรสีเขียว) แต่เกิดรูและช่องว่างในชิ้นงานจำนวนมาก และรูปที่ 4.19 (d) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า แสดงการยึดติดกันระหว่าง CF และ HDPE และการกระจายตัวของ IFRs พบว่าการยึดติดระหว่างวัฏภาคไม้ดี เห็นได้จากมีช่องว่างเกิดขึ้นเนื่องจากปริมาณของ IFRs ที่เติมในมีปริมาณสูงทำให้การเปียกของ HDPE ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์เป็นไปไม่ได้ไม่ทั่วถึง เกิดช่องว่างซึ่งเป็นจุดบกพร่องในชิ้นงานขึ้น การกระจายตัวของ IFRs ส่วนใหญ่เกิดการกระจุกกันเป็นกลุ่มก้อน แสดงว่ามีโอกาสสูงขึ้นที่การแตกตัวและการกระจายตัวไม้ดีใน WPC เนื่องจากองค์ประกอบของ IFRs เป็นสารที่มีขี้และดูความชื้นง่ายจึงจับตัวเป็นกลุ่มก้อน เมื่อเติมในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ความหนืดของระบบสูงขึ้นและการผสมทำได้ยากขึ้นเป็นผลให้การแตกตัวของ IFRs ไม้ดี จึงมีโอกาสจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนใน WPC และช่องว่างที่เกิดขึ้น คาดว่าเนื่องมาจากความผิดปกติจากการขึ้นรูปที่ผิดแปลกไปจาก WPC ที่เติม IFRs ในอัตราส่วนอื่น โดยเกิดการไหม้ของผสมในเครื่องฉีดขึ้นรูปและเกิดการประทุออกมาที่บริเวณ Nozzle จึงทำให้ขณะขึ้นรูปอาจเกิดฟองก๊าซขึ้นจึงถูกกักอยู่ในชิ้นงานจึงทำให้ชิ้นงานสุทธนี้มีช่องว่างหรือรูที่เกิดขึ้นจำนวนมาก



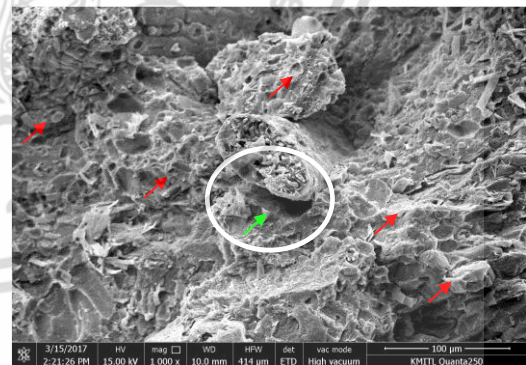
(a) Intu-CaHP0.5 กำลังขยาย 200 เท่า



(b) Intu-CaHP0.5 กำลังขยาย 1,000 เท่า



(c) Intu-CaHP0.8 กำลังขยาย 200 เท่า



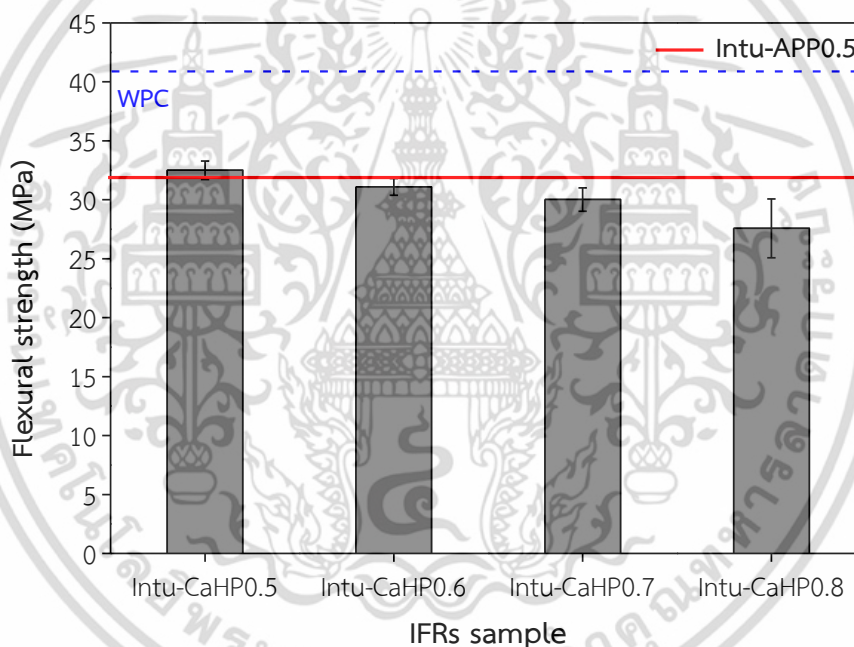
(d) Intu-CaHP0.8 กำลังขยาย 1,000 เท่า

**รูปที่ 4.19** SEM micrographs แสดงการกระจายตัวของ IFRs ใน WPC ของพื้นผิวที่แตกหักที่อุณหภูมิต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.4 สมบัติเชิงกลของคอมโพสิต

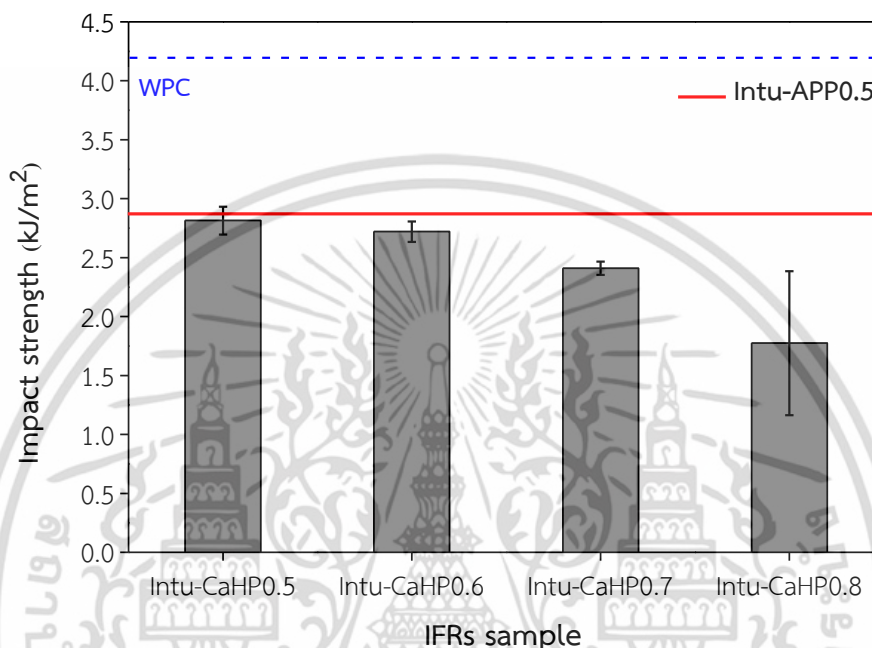
จากรูปที่ 4.20 แสดงค่าความแข็งแรงโค้งงอของ WPC ที่เติม IFRs ในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าการเติม IFRs ลงใน WPC ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอมีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก IFRs ที่เติมลงไปมีลักษณะเป็นอนุภาคของแข็งที่มีขี้ เมื่อใส่ลงในพอลิเมอร์เมทริกซ์ (HDPE) ซึ่งไม่มีขี้ ทำให้ไม่เกิดอันตรกิริยาที่ติระหว่างกัน จึงส่งผลให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอมีค่าลดลง ดังนั้นคอมโพสิตที่เติม IFRs ทุกสูตรผสมจึงมีค่าความแข็งแรงโค้งงอน้อยกว่า WPC ที่ไม่เติม IFRs แต่อัตราส่วน IFRs ที่ 0.17:0.8:1 ให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอลดลงกว่า WPC ที่เติม IFRs ในอัตราส่วนอื่นมาก และจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสูตร Intu-CaHP0.8 เห็นได้ว่ามีค่าสูงกว่า WPC ที่เติม IFRs ในอัตราส่วนอื่น แสดงว่าชิ้นงานที่ทำการทดสอบในแต่ละชิ้นมีความแปรปรวนของสูตรผสมเป็นอย่างมาก คาดว่าเนื่องมาจากความผิดปกติจากขั้นตอนการผสมและการขึ้นรูปที่ผิดปกติไปจากอัตราส่วนอื่น ดังนั้นจึงไม่นำสูตร Intu-CaHP0.8 มาอธิบายร่วมด้วย เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงโค้งงอของ Intu-CaHP กับ Intu-APP พบว่าที่อัตราส่วนการใส่สารหน่วงการติดไฟที่เท่ากันให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.20 สมบัติความแข็งแรงโค้งงอของ WPC ที่อัตราส่วน IFRs แตกต่างกัน

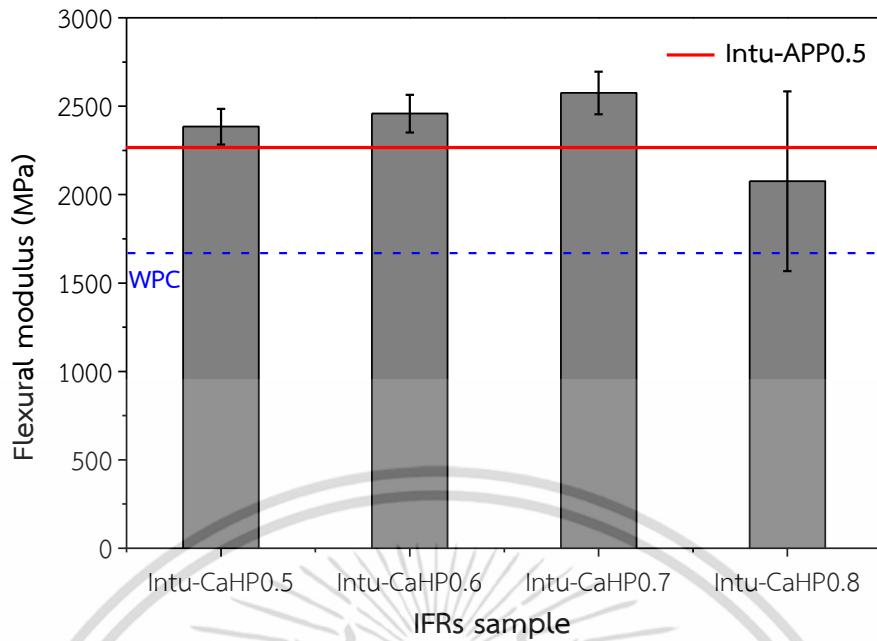
ผลการศึกษาสมบัติการรับแรงกระแทกแบบไอซอดของ WPC แสดงในรูปที่ 4.21 พบว่าการเติม IFRs ลงไปทำให้ค่าความแข็งแรงกระแทกของ WPC มีค่าลดลง เนื่องจากรูปร่างทางสัณฐานวิทยาของ US-CaHP ซึ่งเป็นหนึ่งใน IFRs มีลักษณะเป็นแผ่นที่มีความเหนียว และขอบเกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งดูได้จากผลของ SEM ในรูปที่ 4.5 โดยบริเวณที่เป็นเหนียวเป็นเหมือนจุดศูนย์รวมแรงเค้นทำให้ WPC รับแรงกระแทกได้ไม่ดี ทำให้เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำภายนอกอย่างรวดเร็วจึงไม่สามารถส่งผ่านแรงได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับ WPC ที่ไม่เติม IFRs ดังนั้น WPC ที่เติม IFRs ทุกสูตรผสมจึงแตกหักได้ง่ายกว่า WPC ที่ไม่เติม IFRs โดยการเพิ่มอัตราส่วนของ IFRs ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงกระแทกมีแนวโน้มลดลง แต่อัตราส่วน IFRs ที่ 0.17:0.8:1 ให้สมบัติการรับแรงกระแทกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดลงกว่า WPC ที่เติม IFRs ในอัตราส่วนอื่นมาก และจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสูตร Intu-CaHP0.8 เห็นได้ว่ามีค่าสูงกว่า WPC ที่เติม IFRs ในอัตราส่วนอื่น คาดว่าเนื่องมาจากความผิดปกติจากขั้นตอนการผสมและการขึ้นรูปที่ผิดแปลกไปจากอัตราส่วนอื่น ดังนั้นจึงไม่นำสูตร Intu-CaHP0.8 มาอธิบายร่วมด้วย ผลการศึกษาสมบัติการรับแรงกระแทกของ Intu-CaHP เทียบกับ Intu-APP พบว่า ที่อัตราส่วนการใส่สารหน่วงการติดไฟเท่ากัน Intu-CaHP และ Intu-APP ให้สมบัติการรับแรงกระแทกใกล้เคียงกัน

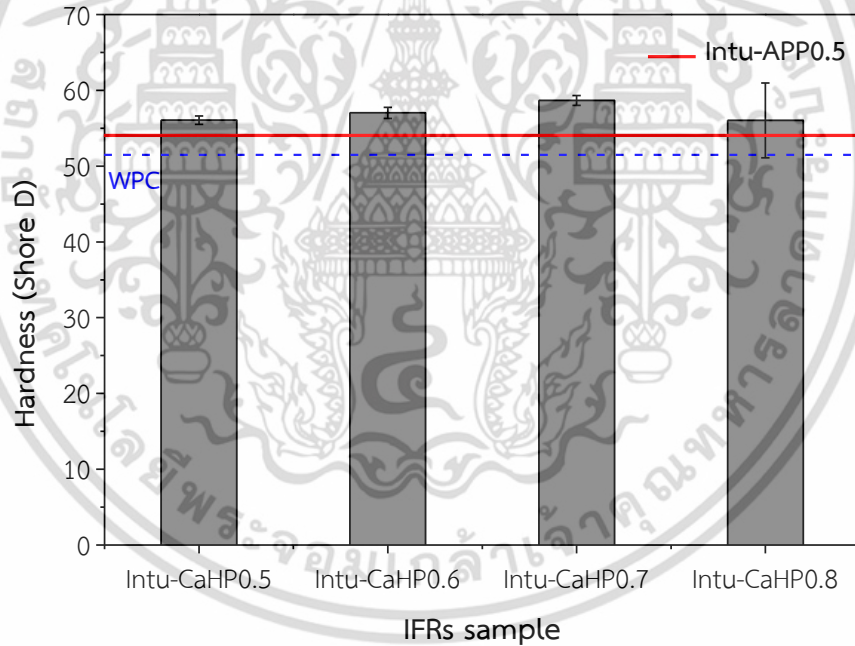


รูปที่ 4.21 สมบัติการรับแรงกระแทกของ WPC ที่อัตราส่วน IFRs ต่างกัน

จากรูปที่ 4.22 (a) และ 4.22 (b) พบว่าการเติม IFRs ลงไปทำให้ค่ามอดุลัสโค้งงอและค่าความแข็งกดของวัสดุเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนของ IFRs เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาค US-CaHP และ MA ใน IFRs มีค่าความแข็งมากกว่า WPC ดังนั้นเมื่อเติมลงใน WPC จึงทำให้เมื่อได้รับแรง WPC เปลี่ยนรูปร่างได้ยากขึ้นค่ามอดุลัสโค้งงอและค่าความแข็งกดของ WPC จึงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น แต่อัตราส่วน IFRs ที่ 0.17:0.8:1 ให้ค่ามอดุลัสโค้งงอ และค่าความแข็งกดลดลงกว่า WPC ที่เติม IFRs ในอัตราส่วนอื่นมาก และจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสูตร Intu-CaHP0.8 ที่มีค่าสูงกว่า WPC ที่เติม IFRs ในอัตราส่วนอื่น ซึ่งแสดงว่าชิ้นงานที่ทำการทดสอบในแต่ละชิ้นมีความแปรปรวนของสูตรผสมเป็นอย่างมาก คาดว่าเนื่องมาจากความผิดปกติจากขั้นตอนการผสมและการขึ้นรูปที่ผิดแปลกไปจากอัตราส่วนอื่น ดังนั้นจึงไม่นำสูตร Intu-CaHP0.8 มาอธิบายร่วมด้วย ผลการศึกษาค่ามอดุลัสโค้งงอและค่าความแข็งกดของ Intu-CaHP เทียบกับ Intu-APP พบว่าที่อัตราการใส่สารหน่วงการติดไฟเท่ากัน Intu-CaHP ให้ค่ามอดุลัสโค้งงอและค่าความแข็งกดที่สูงกว่า Intu-APP เนื่องจาก US-CaHP มีความแข็งประมาณ 2-2.5 Mohs ซึ่งสูงกว่า APP มีความแข็งประมาณ 1.5 Mohs



(a) ค่ามอดุลัสโค้งงอ



(b) ค่าความแข็งกดของวัสดุ

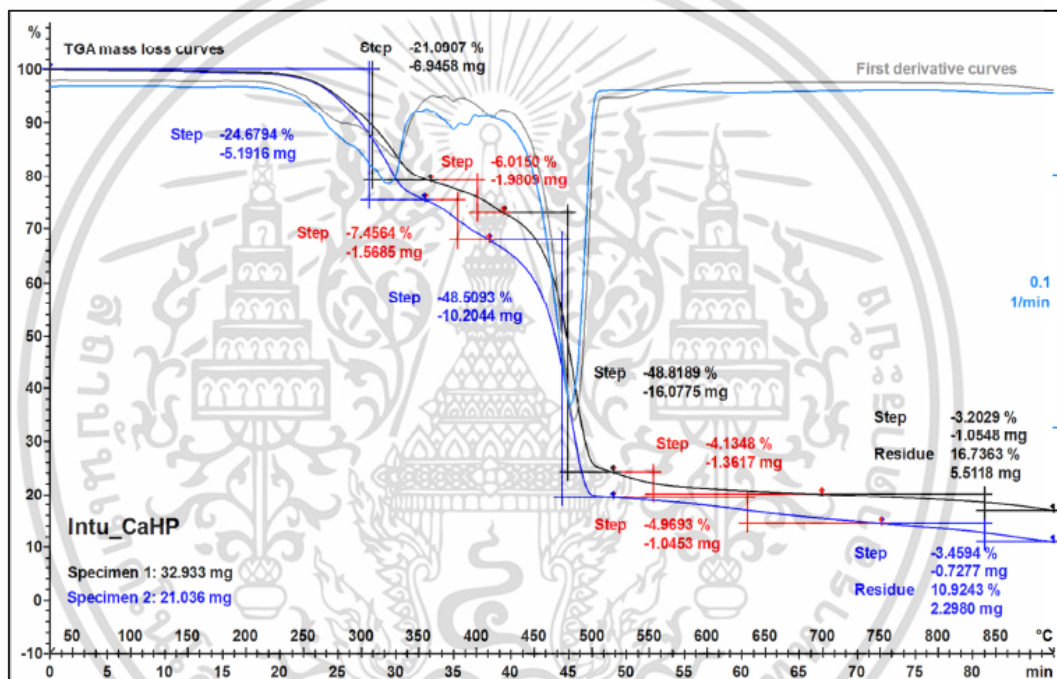
รูปที่ 4.22 สมบัติความแข็งของ WPC ที่อัตราส่วน IFRs ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.5 ผลการทดสอบการหน่วงการติดของคอมโพลีต

##### 4.4.5.1 วิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวของคอมโพลีต

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA แสดงดังรูปที่ 4.23 เป็นกราฟ TGA ของ Intu-CaHP0.7 ที่อุณหภูมิการสลายตัว 30-900°C พบว่า Intu-CaHP0.7 ซึ่งเป็น WPC ที่เติม IFRs มีการสลายตัวสามช่วงอุณหภูมิ คือ 220-330, 340-430 และ 440-550°C มีการหายไปของน้ำหนักประมาณ 24, 7 และ 48% ตามลำดับ โดยการสลายตัวของ Intu-CaHP0.7 ทั้งสามช่วงอุณหภูมิเป็นการสลายตัวของ CF, US-CaHP, MA และ HDPE ยืนยันผลการทดลองด้วยเทคนิค TGA-FTIR ซึ่งพิกการสั่นที่สำคัญแสดงดังตารางที่ 4.7 ซึ่งเป็นพิกการสั่นของก๊าซที่เกิดจากการสลายตัวของ Intu-CaHP0.7 ที่อุณหภูมิ 250, 340, 350, 410, 440, 480 และ 500°C โดยการสลายตัวของ Intu-CaHP0.7 มีปริมาณเข้าเหลืออยู่ประมาณ 15%



รูปที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวของ Intu-CaHP0.7 ด้วยเทคนิค TGA

ตารางที่ 4.7 แสดงพิกการสั่นที่สำคัญที่เกิดจากการสลายตัวของ Intu-CaHP0.7 ที่อุณหภูมิ 250, 340, 350, 410, 440, 480 และ 500°C (FTIR สเปกท럼แสดงในภาคผนวก ญ) โดยการสลายตัวของ Intu-CaHP0.7 ที่อุณหภูมิ 250°C พบพิกการสั่นที่สำคัญที่เลขคลื่น 1250-2100  $\text{cm}^{-1}$  และ 3400-4000  $\text{cm}^{-1}$  พบว่าพิกการสั่นทั้งสองช่วงเป็นพิกการสั่นของโมเลกุลน้ำ ที่เลขคลื่น 669  $\text{cm}^{-1}$  และ 2250-2395  $\text{cm}^{-1}$  พบว่าพิกการสั่นทั้งสองช่วงเป็นพิกการสั่นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการสลายตัวของ Intu-CaHP0.7 ช่วงแรกที่อุณหภูมิ 220-330°C คือการสลายตัวของน้ำซึ่งมาจาก US-CaHP และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมาจากการสลายตัวของ CF

การสลายตัวของ Intu-CaHP0.7 ที่อุณหภูมิ 340°C พบพิกการสั่นที่สำคัญที่เลขคลื่น 1250-2100  $\text{cm}^{-1}$  และ 3400-4000  $\text{cm}^{-1}$  พบว่าพิกการสั่นทั้งสองช่วงเป็นของน้ำ ที่เลข-เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่น  $669\text{ cm}^{-1}$  และ  $2250\text{-}2395\text{ cm}^{-1}$  พบว่าพีคการสั่นทั้งสองช่วงเป็นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เช่นเดียวกับการสลายตัวในช่วงแรก การสลายตัวที่อุณหภูมิ  $350^{\circ}\text{C}$  พบพีคการสั่นที่สำคัญที่เลขคลื่น  $1250\text{-}2100\text{ cm}^{-1}$  และ  $3400\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$  พบว่าพีคการสั่นทั้งสองช่วงเป็นของน้ำ ที่เลขคลื่น  $669\text{ cm}^{-1}$  และ  $2250\text{-}2395\text{ cm}^{-1}$  พบว่าพีคการสั่นทั้งสองช่วงเป็นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เลขคลื่น  $930\text{ cm}^{-1}$ ,  $966\text{ cm}^{-1}$  และ  $715\text{-}1250\text{ cm}^{-1}$  พบว่าพีคการสั่นทั้งสามช่วงเป็นของก๊าซแอมโมเนีย การสลายตัวที่อุณหภูมิ  $410^{\circ}\text{C}$  พบพีคการสั่นที่สำคัญที่เหมือนกับสเปกตรัมของก๊าซที่เกิดจากการสลายตัวของ Intu-CaHP0.7 ที่อุณหภูมิ  $350^{\circ}\text{C}$  ดังนั้นสามารถยืนยันได้ว่าการสลายตัวของ Intu-CaHP0.7 ช่วงที่สองที่อุณหภูมิ  $340\text{-}430^{\circ}\text{C}$  คือการสลายตัวของน้ำซึ่งมาจาก US-CaHP และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมาจากการสลายตัวของ CF และก๊าซแอมโมเนียซึ่งมาจากการสลายตัวของ MA การสลายตัวของ Intu-CaHP0.7 ที่อุณหภูมิ  $440^{\circ}\text{C}$  พบพีคการสั่นที่สำคัญที่เลขคลื่น  $1250\text{-}2100\text{ cm}^{-1}$  และ  $3400\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$  พบว่าพีคการสั่นทั้งสองช่วงเป็นของน้ำ ที่เลขคลื่น  $669\text{ cm}^{-1}$  และ  $2250\text{-}2395\text{ cm}^{-1}$  พบว่าพีคการสั่นทั้งสองช่วงเป็นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และที่เลขคลื่น  $930\text{ cm}^{-1}$ ,  $966\text{ cm}^{-1}$  และ  $715\text{-}1250\text{ cm}^{-1}$  พบว่าพีคการสั่นทั้งสามช่วงเป็นของก๊าซแอมโมเนีย เช่นเดียวช่วงการสลายตัวขั้นที่สอง การสลายตัวของ Intu-CaHP0.7 ที่อุณหภูมิ  $480^{\circ}\text{C}$  พบพีคการสั่นที่สำคัญที่เลขคลื่น  $669\text{ cm}^{-1}$  และ  $2250\text{-}2395\text{ cm}^{-1}$  พบว่าพีคการสั่นทั้งสองช่วงเป็นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เลขคลื่น  $930\text{ cm}^{-1}$ ,  $966\text{ cm}^{-1}$  และ  $715\text{-}1250\text{ cm}^{-1}$  พบว่าพีคการสั่นทั้งสามช่วงเป็นของก๊าซแอมโมเนีย ที่เลขคลื่น  $2800\text{-}2900\text{ cm}^{-1}$  พบว่าเป็นพีคการสั่นของก๊าซเอทิลีน ที่อุณหภูมินี้เห็นได้ว่าไม่มีพีคการสั่นของโมเลกุลน้ำซึ่งยืนยันได้ว่า US-CaHP สลายตัวให้โมเลกุลของน้ำสิ้นสุดแล้วซึ่งตรงกับผลการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ US-CaHP ด้วยเทคนิค TGA การสลายตัวของ Intu-CaHP0.7 ที่อุณหภูมิ  $500^{\circ}\text{C}$  พบพีคการสั่นที่สำคัญที่เลขคลื่น  $669\text{ cm}^{-1}$  และ  $2250\text{-}2395\text{ cm}^{-1}$  พบว่าพีคการสั่นทั้งสองช่วงเป็นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และที่เลขคลื่น  $2800\text{-}2900\text{ cm}^{-1}$  พบว่าเป็นพีคการสั่นของก๊าซเอทิลีน ที่อุณหภูมินี้จะเห็นได้ว่าไม่มีพีคการสั่นของก๊าซแอมโมเนียซึ่งยืนยันได้ว่า MA สลายตัวให้โมเลกุลของแอมโมเนียหมดแล้ว ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าการสลายตัวของ Intu-CaHP0.7 ช่วงที่สามที่อุณหภูมิ  $440\text{-}550^{\circ}\text{C}$  คือการสลายตัวของโมเลกุลน้ำซึ่งมาจาก US-CaHP ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมาจากการสลายตัวของเส้นกาบใยมะพร้าว ก๊าซแอมโมเนียซึ่งมาจากการสลายตัวของเมลามีนและก๊าซเอทิลีนซึ่งมาจากการสลายตัวของ HDPE

การวิเคราะห์พีคการสั่นทั้งหมดสอดคล้องกับงานวิจัยของ Seefeldt H. และคณะ [58] ซึ่งทำการวิเคราะห์การสลายตัวของสารหน่วงการติดไฟที่สลายตัวให้โมเลกุลของน้ำด้วยเทคนิค TGA-FTIR จากงานวิจัยของ Sarang D. และคณะ [43] ได้ศึกษาการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารหน่วงการติดไฟร่วมกับสารหน่วงการติดไฟกลุ่มฟอสฟอรัส (APP) ทำการวิเคราะห์การสลายตัวด้วยเทคนิค TGA-FTIR และงานวิจัยของ Morsyliede F.R. และคณะ [60] ซึ่งทำการวิเคราะห์การสลายตัวของเส้นใยมะพร้าวในแป้งด้วยด้วยเทคนิค TGA-FTIR ซึ่งผลการทดลองข้างต้นให้ผลที่สอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ 4.7 เลขคลื่นจากพีคการสั่นที่สำคัญของก๊าซจากเทคนิค TGA-FTIR จากการสลายตัวของ Intu-CaHP0.7

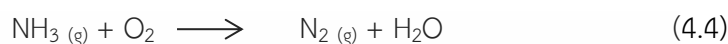
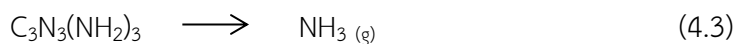
ช่วงการสลายตัว	อุณหภูมิสลายตัว (°C)	เลขคลื่น (cm <sup>-1</sup> )	สารที่คาดว่าจะเกิดขึ้น
ช่วงที่ 1 220-330°C	250	1250-2100 และ 3400-4000 669 และ 2250-2395	น้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
ช่วงที่ 2 340-430°C	340	1250-2100 และ 3400-4000 669 และ 2250-2395	น้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
	350	1250-2100 และ 3400-4000 669 และ 2250-2395 930, 966 และ 715-1250	น้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซแอมโมเนีย
	410	1250-2100 และ 3400-4000 669 และ 2250-2395 930, 966 และ 715-1250	น้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซแอมโมเนีย
ช่วงที่ 3 440-550°C	440	1250-2100 และ 3400-4000 669 และ 2250-2395 930, 966 และ 715-1250	น้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซแอมโมเนีย
	480	1250-2100 และ 3400-4000 669 และ 2250-2395 2800-2900	น้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซเอทิลีน
	500	669 และ 2250-2395 2800-2900	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซเอทิลีน

#### 4.4.5.2 ผลการทดสอบการหน่วงการติดไฟ

สารหน่วงการติดไฟระบบอินตุมสเซนต (IFRs) เมื่อได้รับความร้อนสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีเกิดเป็นชั้น Char ทำหน้าที่เป็นฉนวนทางความร้อน ป้องกันการสัมผัสของความร้อนและออกซิเจนของ WPC ส่งผลให้การติดไฟสิ้นสุดลง

ผลการศึกษาค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ แสดงดังรูปที่ 4.24 พบว่าเมื่อเติม IFRs ลงไปในอัตราส่วนต่าง ๆ ค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ลดลงเมื่อเทียบกับ WPC ที่ไม่ได้เติม IFRs และเมื่อเปรียบค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้กับ WPC ที่เติม US-CaHP ในระบบเดี่ยวและระบบอินตุมสเซนตพบว่า ที่สูตร WPC-CaHP40 (ระบบเดี่ยว) ให้ค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้คือ 32,500 J/g และสูตร Intu-CaHP0.7 (ระบบอินตุมสเซนต) ให้ค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้คือ 26,000 J/g ซึ่งมีค่าลดลงถึง 20% แสดงให้เห็นว่าการใช้ US-CaHP เป็นสารหน่วงการติดไฟระบบอินตุมสเซนตมีประสิทธิภาพในการหน่วงการติดไฟที่ดีกว่าการใช้เป็นสารหน่วงการติดไฟระบบเดี่ยว เนื่องจาก US-CaHP ในระบบ IFRs ขณะสลายตัวเกิดการปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อนทำให้ค่าพลังงานความร้อนในระบบลดลง ค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ที่วัดได้จึงลดลง นอกจากนี้การสลายตัวของ US-CaHP ยังให้เถ้าซึ่งเป็นสารประกอบของแคลเซียมและฟอสฟอรัส ( $\text{CaP}_2\text{O}_6$ ) เคลือบบนพื้นผิวของชิ้นงาน เมื่อทำงานร่วมกับ MA ซึ่งเป็นสารให้พองเกิดการสลายตัวให้ก๊าซแอมโมเนียเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศได้เป็นก๊าซไนโตรเจนดังสมการที่ 4.3 และ 4.4 โดยมีความเป็นไปได้ที่ทำให้ชิ้นเถ้า  $\text{CaP}_2\text{O}_6$  เกิดการพองตัวป้องกันไม่ให้ความร้อนจากการเผาไหม้ออกไปสู่ระบบจึงทำให้ค่าพลังงานจากการเผาไหม้ความร้อนลดลงได้



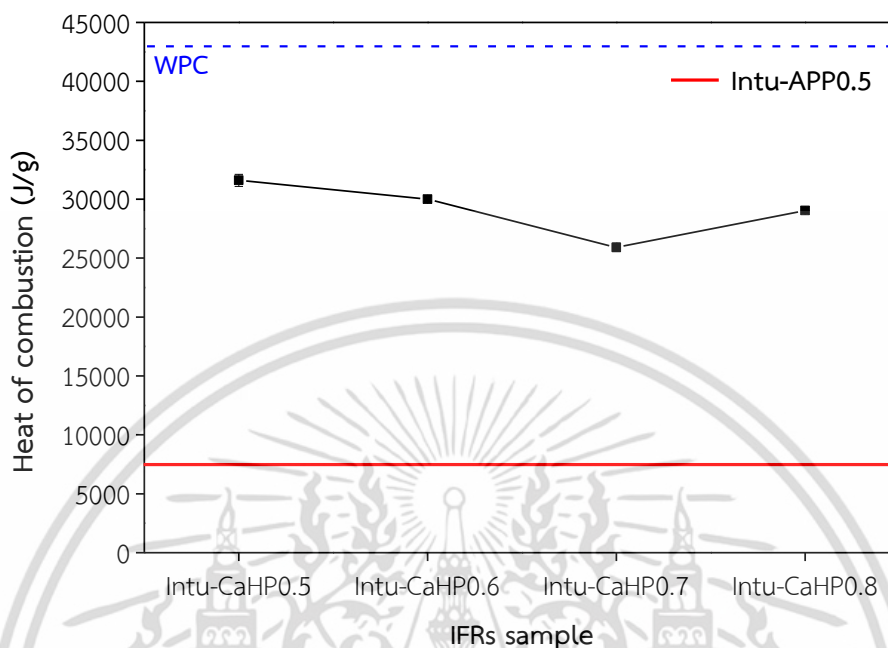
เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าผลการทดสอบมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tretsiakova-McNally S. และคณะ [61] ได้ทำการศึกษาค่าผลของการหน่วงการติดไฟของพอลิอะคริโลไนไตรล์ (PAN) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสและไนโตรเจนลงในสูตรผสมมากขึ้น ค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ลดลง เนื่องจากการเกิดประสิทธิภาพที่เสริมกันของฟอสฟอรัสและไนโตรเจน รวมถึงฟอสฟอรัสสามารถเกิดขึ้นถ่านคาร์บอนปกคลุมบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานได้จึงทำให้ความร้อนออกสู่ระบบลดลง ค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้จึงลดลงด้วย

การเพิ่มอัตราส่วนของ IFRs ลงใน WPC ให้ค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้มีแนวโน้มลดลง แต่เมื่อเพิ่มจนถึงอัตราส่วน 0.17:0.8:1 พบว่ากลับให้ค่าเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย คาดว่าเนื่องจากความผิดปกติจากการผสมและขึ้นรูปของ Intu-CaHP0.8 ที่ผิดแปลกไปจาก WPC ที่เติม IFRs ในอัตราส่วนอื่น โดยในขั้นตอนการผสมสูตร Intu-CaHP0.8 ไม่สามารถผสมสารหน่วงการติดไฟลงไปสูตรผสมได้หมด เมื่อทำการขึ้นรูปเกิดการไหม้ของของผสมในเครื่องฉีดขึ้นรูป และทะลุออกมาที่บริเวณ Nozzle จึงทำให้ขณะขึ้นรูปอาจเกิดพองก๊าซขึ้นจึงถูกกักอยู่ในชิ้นงานจึงทำให้ชิ้นงานสูตรนี้มีช่องว่างหรือรูที่เกิดขึ้นจำนวนมากซึ่งเป็นช่องว่างนี้เป็นพื้นที่ที่อากาศสามารถแทรกเข้าไปในชิ้นงานหรือเป็นทางให้อากาศผ่านได้ โดยในอากาศมีองค์ประกอบของก๊าซออกซิเจนซึ่งเป็นก๊าซที่ทำให้ไฟติด ดังนั้นเมื่ออัตราส่วนของ IFRs ที่ผิดแปลกไปและการเกิดรูหรือช่องว่างอยู่ภายในชิ้นงานจึงทำให้ประสิทธิภาพการหน่วงการติดไฟของ Intu-CaHP0.8 ไม่ดีเท่าที่ควร

เมื่อเปรียบเทียบ Intu-CaHP กับสารหน่วงการติดไฟเชิงพาณิชย์ Intu-APP พบว่าค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ของ Intu-APP0.5 ให้ค่าต่ำกว่า Intu-CaHP0.7 คาดว่าเนื่องจาก จากงานวิจัยของ Umemura T. และคณะ [59] ที่ศึกษาประสิทธิภาพการหน่วงการติดไฟของ WPC เปรียบเทียบการเติมสารหน่วงการติดไฟได้แก่ APP และ ATH ที่ปริมาณเท่ากัน พบว่าการเติม APP ใน WPC ขณะขึ้นงานเกิดการเผาไหม้ APP และเส้นใยไม่สามารถเกิดปฏิกิริยากัน ทำให้เกิดชั้น Char ซึ่งเป็นโครงข่ายสามมิติปกคลุมที่พื้นผิวของพอลิเมอร์ได้ดี โดยเมื่อใช้ APP ในระบบ IFRs ยิ่งเป็นการเสริมประสิทธิภาพให้กับ APP เนื่องจากชั้น Char ที่เกิดขึ้นสามารถพองตัวได้มากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มสมบัติการฉนวนทางความร้อนของชั้น Char สามารถป้องกันการสัมผัสความร้อนและก๊าซออกซิเจนบนพื้นผิวของ WPC ได้ ซึ่งการเกิดชั้น Char ที่ดียังช่วยให้ความร้อนจากการเผาไหม้ออกสู่ระบบได้น้อยลงจึงทำให้ค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ที่วัดได้ลดลง ส่วนการเติม US-CaHP ในระบบ IFRs ให้ค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้สูงกว่า Intu-APP0.5 เนื่องจากการเติม

US-CaHP ลงใน WPC ขณะเผาไหม้เกิดเป็นชั้นเถ้าของสารประกอบของแคลเซียมและฟอสฟอรัส เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในวงการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

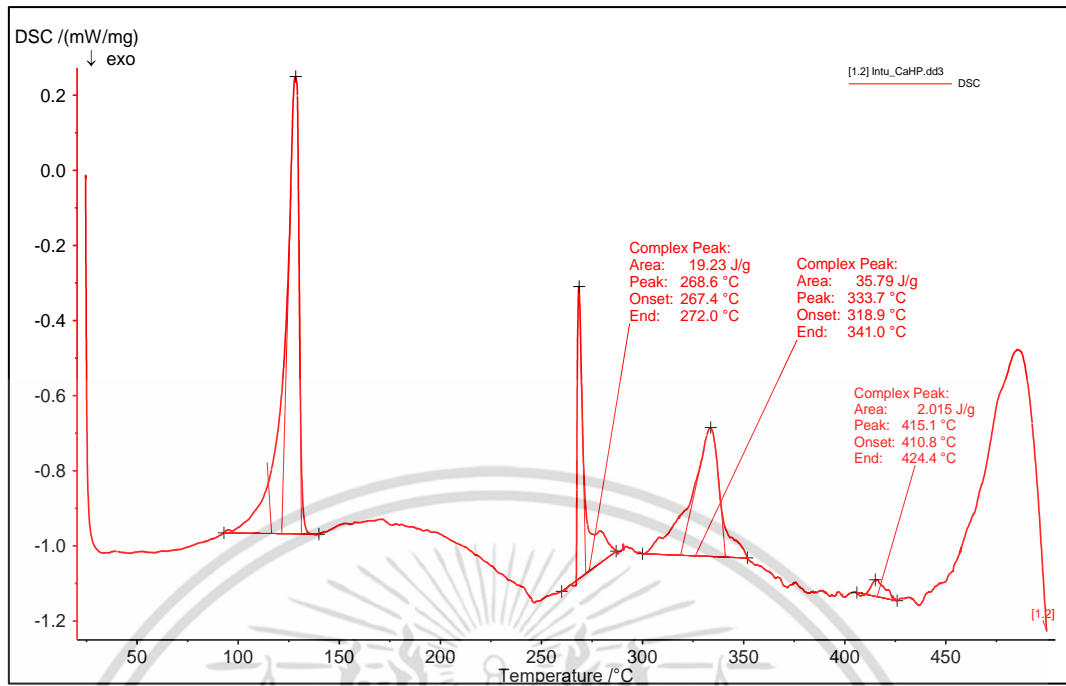
(CaP<sub>2</sub>O<sub>6</sub>) เคลือบบนพื้นผิวของชิ้นงานเมื่อ MA สลายตัวทำให้ชั้นเถ้าที่เคลือบอยู่พองขึ้นได้แต่ทั้งนี้ เนื่องจากชั้นเถ้าที่เคลือบเป็นเพียงชั้นบาง ๆ ไม่ได้เป็นโครงข่ายสามมิติจึงทำให้ความร้อนจากการเผาไหม้ออกสู่ระบบได้มากกว่า Intu-APP0.5



รูปที่ 4.24 ค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ของ WPC ที่อัตราส่วน IFRs แตกต่างกัน

การทดสอบค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ สามารถยืนยันได้จาก DSC เทอร์โมแกรมดังรูปที่ 4.25 แสดงผลการทดสอบทางความร้อนจากเทคนิค DSC ของ Intu-CaHP0.7 พบว่า Intu-CaHP0.7 มีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนที่สามช่วงหลัก ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิ 100-150°C ซึ่งเป็นช่วงที่ผลึก HDPE หลอม ช่วงอุณหภูมิ 260-270°C ซึ่งเป็นช่วงที่ CF เกิดการสลายตัว และการเปลี่ยนแปลงที่ช่วงอุณหภูมิ 300-370°C ซึ่งเป็นช่วงที่ US-CaHP สลายตัวให้โมเลกุลของน้ำซึ่งตรงกับผล DSC เทอร์โมแกรมของ US-CaHP แสดงดังภาพที่ 4.16 (a) และช่วง 300-370°C ยังเป็นช่วงการสลายตัวของ MA ซึ่งตรงกับผล TGA-FTIR ของ Intu-CaHP0.7 แสดงดังตารางที่ 4.5 โดยอุณหภูมิการสลายตัวของ MA ที่ได้จากการวิเคราะห์ TGA-FTIR คือประมาณ 350°C ซึ่งตรงกับอุณหภูมิการสลายตัวที่ได้รับจากเอกสารข้อมูลสารเคมี ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าการสลายตัวของ Intu-CaHP0.7 เกิดปฏิกิริยาคูดความร้อน เกิดการสลายตัวของน้ำและก๊าซแอมโมเนียที่อุณหภูมิข้างต้นจริง

รูปที่ 4.26 แสดงรูปชิ้นงานไม้พลาสติกคอมโพสิตสูตร Intu-CaHP0.7 หลังการทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL94 V เปรียบเทียบกับชิ้นงานก่อนทำการทดสอบ พบว่าเมื่อทำการเผาชิ้นงานตามมาตรฐาน UL94 V เป็นเวลา 10 วินาที เห็นได้ว่าชิ้นงานเกิดชั้นเคลือบที่พองตัวปกคลุมบริเวณพื้นผิวที่ทดสอบ ลักษณะของชั้นเคลือบมีรูพรุนและพองตัวขึ้น โดยคาดว่าชั้นเคลือบเป็นเถ้าของสารประกอบจากการที่ US-CaHP ที่สลายตัวให้น้ำ ดังนั้นจึงคาดว่า การเกิดชั้นเคลือบที่พองตัวขึ้นทำให้ค่าพลังงานความร้อนของการเผาไหม้ของ WPC ลดลง WPC จึงต้านการลามไฟได้



รูปที่ 4.25 DSC เทอร์โมแกรมของ Intu-CaHP.0.7



รูปที่ 4.26 ชิ้นงานก่อนและหลังจากการทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL94 V

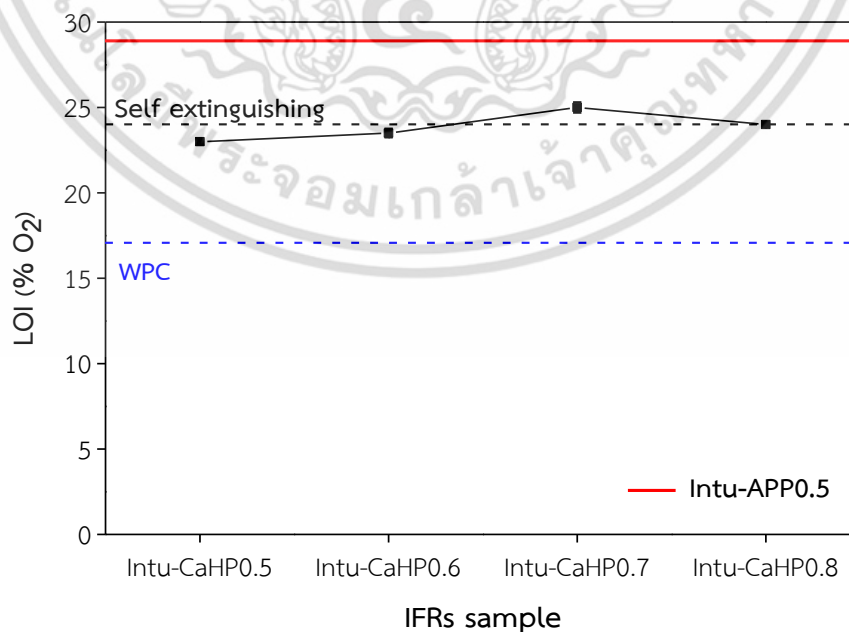
ผลการศึกษาค่า LOI ของ WPC แสดงดังรูปที่ 4.27 พบว่าเมื่อเติม IFRs ใน WPC ค่า LOI ของ WPC เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นได้ว่าต้องใช้ก๊าซออกซิเจนปริมาณที่สูงขึ้นเพื่อให้ชิ้นงานติดไฟได้ ซึ่งแสดงว่า WPC มีความทนไฟมากยิ่งขึ้น เนื่องจาก US-CaHP ขณะสลายตัวเกิดการปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อน ทำให้ค่าพลังงานความร้อนในระบบลดลง พื้นผิวของ WPC เย็นลง ช่วยเจือจางก๊าซและเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ และนอกจากนี้การสลายตัวของ US-CaHP ยังให้เถ้าซึ่งเป็นสารประกอบแคลเซียมและฟอสฟอรัส ( $\text{CaP}_2\text{O}_6$ ) เคลือบบนพื้นผิวของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ซื้อได้หนังสือเรียบร้อยแล้ว  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำงานร่วมกับ MA ซึ่งเป็นสารให้ฟองเกิดการสลายตัวให้ก๊าซเกิดการฟองตัวเป็นชั้นเคลือบป้องกันไม่ให้ความร้อนและออกซิเจนเข้ามาสัมผัสที่พื้นผิว WPC ทำให้การลามไฟเป็นไปได้ยากยิ่งขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบค่า LOI ของการใช้ US-CaHP เป็นสารหน่วงการติดไฟระบบเดี่ยวเทียบกับการใช้ในระบบอินตุมเอสเซนส์ พบว่าสูตร WPCUS-CaHP (ระบบเดี่ยว) ให้ค่า LOI เท่ากับ 22 ส่วน สูตร Intu-CaHP0.7 (ระบบอินตุมเอสเซนส์) ให้ค่า LOI เท่ากับ 25 แสดงให้เห็นว่าการใช้ US-CaHP ในระบบอินตุมเอสเซนส์ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าในระบบเดี่ยว และเมื่อทำการเติม IFRs ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น พบว่าให้ค่า LOI เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน แต่เมื่อเพิ่มจนถึงอัตราส่วน 0.17:0.8:1 พบว่ากลับให้ค่าเพิ่มต่ำลง คาดว่าเนื่องมาจากความผิดปกติจากการผสมและขึ้นรูปของ Intu-CaHP0.8 ที่ผิดแปลกไปจาก WPC ที่เติม IFRs ในอัตราส่วนอื่น ดังนั้นอัตราส่วนของ IFRs ที่ผิดแปลกไปในขณะทำการผสมและขณะขึ้นรูปเกิดรูหรือช่องว่างอยู่ภายในชิ้นงาน จึงทำให้ประสิทธิภาพการหน่วงการติดไฟของ Intu-CaHP0.8 ไม่ดีเท่าที่ควร

ค่า LOI ของ WPC ที่เติม IFRs เป็นสารหน่วงการติดไฟเทียบระหว่าง Intu-APP และ Intu-CaHP พบว่าค่า LOI ของ Intu-CaHP0.7 ต่ำกว่า Intu-APP0.5 คาดว่าเนื่องจากการเติม APP ลงไปใน WPC ขณะขึ้นงานเกิดการเผาไหม้ APP และเส้นใยคาบมะพร้าวสามารถเกิดปฏิกิริยากันทำให้เกิดชั้น Char ซึ่งเป็นโครงข่ายสามมิติปกคลุมที่พื้นผิวของ WPC ได้ดี เมื่อเตรียม APP ในระบบ IFRs ยิ่งเป็นการเสริมประสิทธิภาพให้กับ APP เนื่องจากชั้น Char ที่เกิดขึ้นสามารถฟองตัวเป็นฉนวนทางความร้อนได้มากขึ้น ทำให้สามารถป้องกันการสัมผัสความร้อนและก๊าซออกซิเจนของพื้นผิว WPC ได้ ซึ่งการเกิดชั้น Char ช่วยให้ประสิทธิภาพในการหน่วงการติดไฟดีขึ้น ขณะที่การเติม US-CaHP ในระบบ IFRs ลงไปใน WPC ขณะเผาไหม้เกิดเป็นชั้นเถ้าของสารประกอบแคลเซียมและฟอสฟอรัส ( $\text{CaP}_2\text{O}_6$ ) เคลือบบนพื้นผิวของชิ้นงานโดยเมื่อทำงานร่วมกับ MA สามารถทำให้ชั้นเถ้าที่เคลือบอยู่ฟองขึ้นได้ แต่ทั้งนี้เนื่องมาจากชั้นเถ้าที่เคลือบเป็นเพียงชั้นบาง ๆ ไม่ได้เป็นโครงข่ายสามมิติ และถึงแม้ว่า US-CaHP สามารถสลายตัวให้โมเลกุลของน้ำเพื่อช่วยในการหน่วงการติดไฟแต่ประสิทธิภาพในการหน่วงการติดไฟที่ได้ต่ำกว่า Intu-APP0.5



รูปที่ 4.27 ค่า LOI ของ WPC ที่อัตราส่วน IFRs ต่างกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือเป็นความผิดทางกฎหมาย ผู้ที่นำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจะมีความผิดตามกฎหมายว่าด้วยลิขสิทธิ์ และผู้เผยแพร่เอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตจะมีความผิดตามกฎหมายว่าด้วยลิขสิทธิ์ ทั้งนี้หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต ผู้ที่นำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจะมีความผิดตามกฎหมายว่าด้วยลิขสิทธิ์ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการลามไฟตามมาตรฐาน UL94 V แสดงตารางที่ 4.8 พบว่าการเติม IFRs ใน 0.17:0.5:1 และ 0.17:0.6:1 ลงใน WPC ไม่ผ่านมาตรฐาน UL94 V คือไม่สามารถดับไฟได้ใน 30 วินาที ซึ่งงานเกิดการไหม้ไฟจนหมด แต่เมื่อนำมาทดสอบหาอัตราการลามไฟ พบว่ามีอัตราการลามไฟต่ำลงกว่า WPC ที่ไม่เติมสารหน่วงการติดไฟถึง 7 และ 10 เท่า ตามลำดับ ที่อัตราส่วน IFRs 0.17:0.7:1 ผ่านมาตรฐาน UL94 V เป็น V-1 คือ สามารถดับไฟได้ภายใน 30 วินาที โดยที่ไม่มีการหยดของเปลวไฟ ซึ่งเป็นไปตามผลการทดสอบ LOI โดย IFRs อัตราส่วนนี้มีค่า LOI มากกว่า 24 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงการดับไฟได้ด้วยตัวเอง

ผลการลามไฟตามมาตรฐาน UL94 V ของ WPC ที่เติม IFRs เป็นสารหน่วงการติดไฟเทียบระหว่าง Intu-APP0.5 กับ Intu-CaHP0.7 พบว่า Intu-APP0.5 ให้ผลการทดสอบเป็น V-0 คือวัสดุติดไฟและสามารถดับไฟได้ด้วยตัวเองในเวลา 10 วินาที แต่ Intu-CaHP0.7 ให้ผลการทดสอบเป็น V-1

ตารางที่ 4.8 การทดสอบการลามไฟของชิ้นงานคอมโพสิต

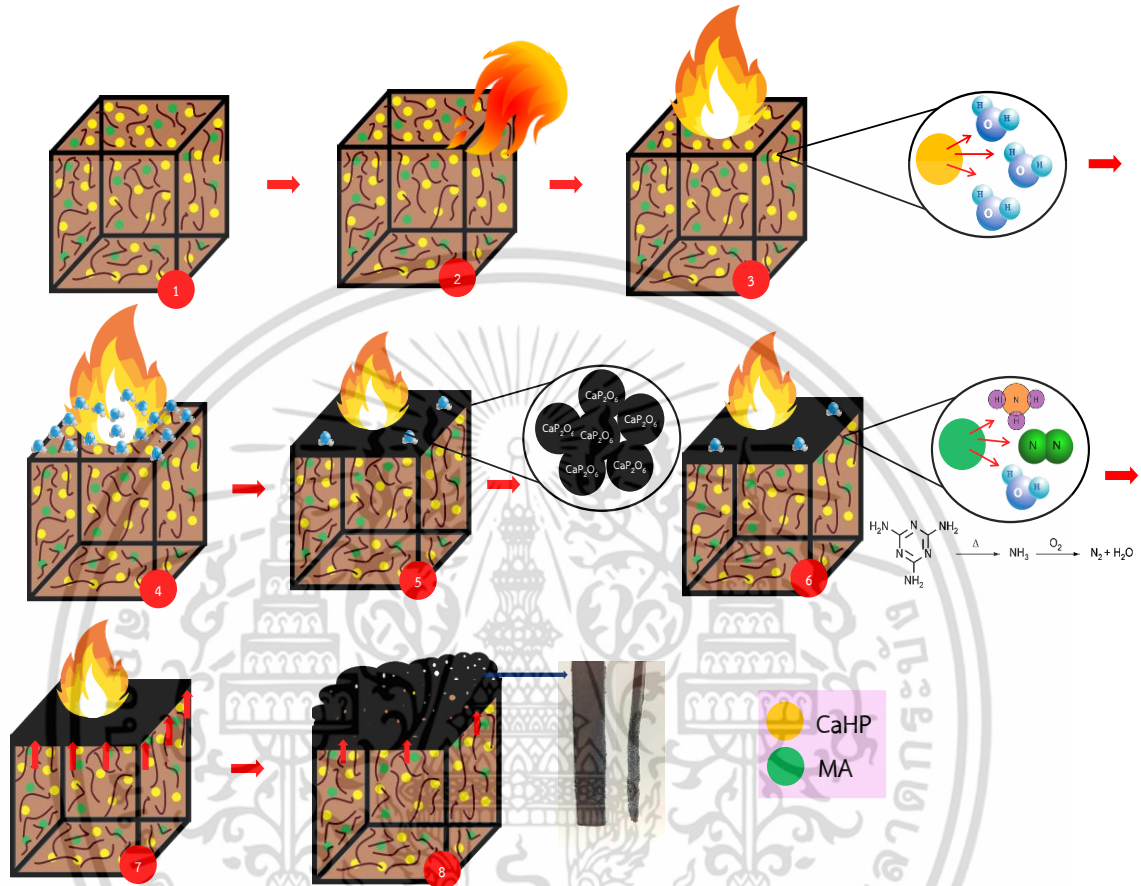
สูตร	การทดสอบการลามไฟ	
	UL94 V	อัตราการลามไฟ (mm/min)
Intu-APP0.5	V0	-
WPC	-	52.80±2.40
Intu-CaHP0.5	-	8.41±0.34
Intu-CaHP0.6	-	5.20±0.22
Intu-CaHP0.7	V1	-
Intu-CaHP0.8	V1	-

จากผลการทดลองการเติม US-CaHP ลงใน WPC ในระบบเดี่ยวและระบบอินตุมเอสเซนส์ พบว่าการเติม US-CaHP ในระบบอินตุมเอสเซนส์ให้ผลการทดสอบการหน่วงการติดไฟที่ดีกว่า เนื่องจากเมื่อ WPC ที่เติม IFRs เมื่อเกิดการเผาไหม้ US-CaHP สลายตัวให้โมเลกุลของน้ำและเกิดเถ้า  $\text{CaP}_2\text{O}_6$  ทำงานร่วมกับ MA ทำให้ชั้นเถ้าพองขึ้น ดังนั้นจึงสามารถเป็นชั้นฉนวนทางความร้อนได้ดีขึ้น สามารถป้องกันการสัมผัสกับความร้อนและก๊าซที่ติดไฟได้กับ WPC นอกจากการมีอยู่ของ MA ยังเป็นการเสริมประสิทธิภาพ CaHP ซึ่งเป็นสารหน่วงการติดไฟกลุ่มฟอสฟอรัสด้วย และจากงานวิจัยของ Nikolaeva M. และคณะ [62] พบว่าการใช้ MA เป็นสารหน่วงการติดไฟชนิดเดียวสามารถช่วยหน่วงการติดไฟของ WPC ได้ ดังนั้นการใช้ US-CaHP ในระบบ IFRs ดีกว่าการใช้ในระบบเดี่ยว

รูปที่ 4.28 แสดงแผนภาพจำลองกลไกการทำงานของสารหน่วงการติดไฟ IFRs ที่เติมลงใน WPC เมื่อทำการเผาไหม้ WPC ที่เติม IFRs พบว่ากลไกการดับไฟที่เกิดขึ้น คือเมื่อ US-CaHP สลายตัวให้โมเลกุลของน้ำ ซึ่งการสลายตัวให้โมเลกุลของน้ำเป็นการเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อน ช่วยลดความร้อนจากการเผาไหม้ทำให้พื้นผิวของ WPC เย็นลง การสลายตัวให้โมเลกุลน้ำยังช่วยเจือจางก๊าซ และเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ทำให้เกิดการลามไฟ และการสลายตัวของ US-CaHP ยังให้เถ้าของสารประกอบแคลเซียมและฟอสฟอรัส ( $\text{CaP}_2\text{O}_6$ ) เคลือบบนพื้นผิวของชิ้นงาน เมื่อทำงานร่วมกับ MA ซึ่งเป็นสารให้พองสลายตัวที่อุณหภูมิ 350°C การสลายตัวของ MA ช่วยให้ชั้นเถ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\text{CaP}_2\text{O}_6$  ที่เคลือบบริเวณผิวของชิ้นงานพองตัวขึ้น จึงเป็นฉนวนทางความร้อน ป้องกันการสัมผัสความร้อนและก๊าซออกซิเจนของพื้นผิว WPC นอกจากนี้ก๊าซแอมโมเนียมและไนโตรเจนที่สลายตัวออกมาจาก MA ยังช่วยเจือจางเชื้อเพลิงและก๊าซที่ติดไฟได้ ซึ่งกลไกดังกล่าวทำให้อัตราการลามไฟช้าลง และดับไฟได้ในที่สุด



รูปที่ 4.28 แผนภาพจำลองการกลไกการทำงานของสารหน่วงไฟ IFRs ที่เติมลงใน WPC

#### 4.5 การวิเคราะห์ต้นทุน

การวิเคราะห์ต้นทุนเป็นการแจกแจงถึงค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ในการผลิตวัสดุเพื่อใช้ในการประเมินราคาสินค้าเพื่อขายและใช้เปรียบเทียบราคากับวัสดุที่ต้องการแข่งขัน

จากตารางที่ 4.8 แสดงการวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบการผลิต WPC ทนไฟเปรียบเทียบสารหน่วงการติดไฟเชิงพาณิชย์และสารหน่วงการติดไฟ CaHP ที่เตรียมจากเปลือกหอยแมลงภู่ พบว่าต้นทุนวัตถุดิบของ WPC ที่ใช้สารหน่วงการติดไฟที่เตรียมจากวัสดุธรรมชาติ (Intu-CaHPO.7) มีราคาประมาณ 47 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ WPC ที่เติมสารหน่วงการติดไฟเชิงพาณิชย์ (Intu-APP0.5) เห็นได้ว่ามีราคาถูกกว่าถึงแม้ว่าใส่ในปริมาณมากกว่า เนื่องมาจากราคาของ US-CaHP ถูกกว่าราคาของ APP ถึง 7 เท่า แต่ประสิทธิภาพการเติม US-CaHP ยังไม่เทียบเท่ากับ APP ที่เป็นสารหน่วงการติดไฟที่นิยมใช้ในเชิงพาณิชย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบการผลิต WPC ทนไฟเปรียบเทียบสารหน่วงการติดไฟเชิงพาณิชย์และสารหน่วงการติดไฟจากเปลือกหอยแมลงภู่

รายการ	ราคาต่อหน่วย (บาท/กิโลกรัม)	สูตรที่ใช้สารหน่วง- การติดไฟเชิงพาณิชย์		สูตรที่ใช้สารหน่วงการติดไฟ จากเปลือกหอยแมลงภู่	
		ปริมาณที่ใช้ (กรัม)	เป็นเงิน (บาท)	ปริมาณที่ใช้ (กรัม)	เป็นเงิน (บาท)
HDPE	55	519.21	28.56	493.58	27.15
CF	3	259.61	0.78	246.79	0.74
APP	230	129.80	29.85	-	-
US-CaHP*	28	-	-	172.75	4.84
MA	150	44.13	6.62	41.95	6.29
PE-g-MA	95	15.58	1.48	14.81	1.41
Alkanox 240	337	0.26	0.09	0.25	0.08
Anox 20	430	0.26	0.11	0.25	0.11
PE-wax	190	20.77	3.95	19.74	3.75
R-10	200	10.38	2.08	9.87	1.97
รวมต้นทุนการผลิต WPC ที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม			73.51 บาท		46.34 บาท

หมายเหตุ: \*ราคาต้นทุนแบบประมาณการผลิตเชิงพาณิชย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

## 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPC) ที่เตรียมจาก HDPE และ CF ที่ปริมาณ 50 php ให้มีสมบัติทนไฟ โดยเปรียบเทียบการเติมสาร CaHP ซึ่งเตรียมจากเปลือกหอยแมลงภู่ทั้งชนิดกำจัดสิ่งปนเปื้อน (TS-CaHP) และไม่กำจัดสิ่งปนเปื้อน (US-CaHP) ของ จากนั้นศึกษา การใช้ US-CaHP ในระบบสารหน่วงการติดไฟชนิดเดียวในปริมาณต่าง ๆ และศึกษา อัตราส่วนการใช้ US-CaHP ในสารหน่วงการติดไฟระบบอินตูลูเมสเซนส์ที่อัตราส่วนของ MA, CaHP และ CF ในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อหาปริมาณสารหน่วงการติดไฟที่มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่สุด รวมทั้งทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของ WPC เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน เป็นต้น สามารถสรุปได้ดังนี้

**ตอนที่ 1** ศึกษาการเตรียม CaHP และเปรียบเทียบการใช้ US-CaHP และ TS-CaHP

การศึกษาผลการเตรียม CaHP และเปรียบเทียบการใช้ US-CaHP และ TS-CaHP จากผลการวิเคราะห์ลักษณะและโครงสร้างของ CaHP ที่เตรียมจากเปลือกหอยแมลงภู่ชนิดกำจัดและไม่กำจัดสิ่งปนเปื้อนด้วยเทคนิค XRF, XRD และ FTIR พบว่า US-CaHP และ TS-CaHP พบธาตุโลหะที่แตกต่างกัน ได้แก่ โครเมียม, เหล็ก และสตรอนเทียม แต่จากผลการวิเคราะห์พบว่าธาตุโลหะเหล่านี้ในปริมาณเล็กน้อยจึงไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเตรียม CaHP ซึ่งเป็นสารประกอบหลักที่มีมากที่สุดและเมื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบผลของสมบัติเชิงกลและสมบัติการติดไฟของ WPC ที่เติม US-CaHP และ TS-CaHP ในปริมาณ 25 และ 40 php พบว่าการเติม US-CaHP และ TS-CaHP ในปริมาณที่เท่ากันไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการหน่วงการติดไฟ แสดงว่าการมีอยู่ของรงควัตถุสี (สิ่งปนเปื้อน) ของเปลือกหอยแมลงภู่ไม่ส่งผลต่อการเตรียม CaHP และสมบัติต่าง ๆ ของ WPC

**ตอนที่ 2** ศึกษาการใช้ US-CaHP ระบบสารหน่วงการติดไฟระบบเดียว

การศึกษาผลของปริมาณการใช้ US-CaHP เป็นสารหน่วงการติดไฟระบบเดียวใน WPC พบว่าค่าความหนาแน่นของ WPC มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ US-CaHP เพิ่มขึ้นตามกฎของของผสม และ WPC ที่เติม US-CaHP ทุกสูตรผสมมีปริมาณความเป็นผลึกใกล้เคียงกัน เมื่อปริมาณ US-CaHP เพิ่มขึ้น อนุภาคของ US-CaHP มีการกระจายตัวที่ไม่ดีใน WPC โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสูตรที่มีปริมาณ 40 php เนื่องจาก US-CaHP มีขั้ว ดูดความชื้นง่าย เมื่อใส่ในปริมาณมากมีโอกาสเกาะรวมกันเป็นกลุ่มก้อน และพบว่าเมื่อปริมาณ US-CaHP เพิ่มขึ้น ทำให้ค่ามอดุลัสโค้งงอ และความแข็งกตเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความแข็งแรงโค้งงอและค่าความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลง ผลจากการศึกษาสมบัติการติดไฟ พบว่าอัตราการลามไฟและค่าความร้อนจากการเผาไหม้ลดลง นอกจากนี้ค่า LOI เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ US-CaHP เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า WPC หน่วงการติดไฟได้ดีขึ้น โดยกลไกหลักของการหน่วงการติดไฟของ US-CaHP คือการปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำและเกิดขึ้นสารอินทรีย์เคลือบที่ผิว WPC แต่ WPC ที่เติม US-CaHP เป็นสารหน่วงการติดไฟในระบบเดียวไม่สามารถดับไฟได้ด้วยตัวเองคือ ไม่ผ่านมาตรฐาน UL94 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### **ตอนที่ 3** ศึกษาอัตราส่วนการใช้ US-CaHP ในสารหน่วงการติดไฟระบบอินตุมเมสเซนต์

การศึกษาผลของอัตราส่วนการใช้ US-CaHP เป็นสารหน่วงการติดไฟระบบอินตุมเมสเซนต์ใน WPC พบว่าค่าความหนาแน่นของ WPC มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วน IFRs เพิ่มขึ้น ตามกฎของของผสม และพบว่า WPC ที่เติม IFRs ในอัตราส่วนต่าง ๆ มีปริมาณความเป็นผลึกใกล้เคียงกัน เมื่ออัตราส่วน IFRs เพิ่มขึ้น อนุภาค US-CaHP และ MA มีการกระจายตัวที่ไม่ดีใน WPC เนื่องจาก US-CaHP และ MA มีความชอบน้ำสูง ดูดความชื้นง่าย เมื่อใส่ในปริมาณมากมีโอกาสเกาะรวมกันเป็นกลุ่มก้อน เกิดช่องว่าง (Voids) ในชิ้นงาน และพบว่าเมื่ออัตราส่วน IFRs เพิ่มขึ้น ทำให้ค่ามอดูลัสโค้งงอและความแข็งแรงเพิ่มขึ้นถึงค่าค่าหนึ่งแล้วลดลง ในขณะที่ค่าความแข็งแรงโค้งงอและค่าความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลง ผลจากการศึกษาสมบัติการติดไฟ พบว่าอัตราการลามไฟและค่าความร้อนจากการเผาไหม้ลดลง นอกจากนี้ค่า LOI เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วน IFRs เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า WPC หน่วงการติดไฟได้ดีขึ้น ซึ่งดีกว่าการใช้ US-CaHP ในระบบเดี่ยว อัตราส่วนของ MA:US-CaHP:CF ที่ 0.17:0.7:1 มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟดีที่สุด เมื่อทดสอบสมบัติการลามไฟตามมาตรฐาน UL94 V ให้ผลเป็น V-1 คือสามารถดับไฟภายใน 30 วินาที

## **5.2 ข้อเสนอแนะ**

1. ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพสารหน่วงการติดไฟ US-CaHP โดยใช้สารหน่วงการติดไฟชนิดอื่น เพื่อเสริมประสิทธิภาพ (Synergism) เช่น ซิงค์บอเรต เป็นต้น
2. ศึกษาประเด็นอื่นๆ เพิ่มเติม เพื่อหาสูตรที่ให้ประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดีที่สุด ได้แก่ ปริมาณของ MA และ CF ที่เหมาะสมในระบบอินตุมเมสเซนต์
3. ศึกษาสมบัติของไม้พลาสติกคอมโพสิตที่เตรียมได้เพิ่มเติม เช่น อายุการใช้งาน ความทนทานต่อดินฟ้าอากาศ การดูดน้ำ ความต้านทานการยัดติดของตะปูเกลียวและความทนทานต่อแมลง เช่น ปลวก มอด เป็นต้น
4. การวิเคราะห์ขนาดของ US-CaHP ควรทำการโซนิเคชัน (Sonication) กับอนุภาค US-CaHP ก่อน แล้วจึงนำไปวัดขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Mastersizer X เพื่อให้เกิดการแตกของกุ่มก้อนของอนุภาค US-CaHP
5. การเตรียมพอลิเมอร์ผสมสูตรควรใส่ US-CaHP ก่อนสารชนิดอื่น ๆ เพื่อให้ US-CaHP มีการกระจายตัวที่ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์
6. นำความรู้ที่ได้จากงานวิจัยไปเตรียมสารหน่วงการติดไฟ CaHP ที่เตรียมจากวัสดุธรรมชาติชนิดอื่น ๆ เช่น กระจุก เปลือกไข่ เป็นต้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Modern Kitchen Trends Co., Ltd. 2014. **Composite Outdoor Furniture.** [Online]. Available : <http://photos.arunahotel.net/clean-dark-composite-outdoor-furniture>.
- [2] Paint and Coating Industry Co., Ltd. 2004. **Foam Protect Intumescent Coatings and Paint for Fire Protection.** [Online]. Available : <http://www.pcimag.com/articles/83956-foam-protects-intumescent-coating-and-paints-for-fire-protection>.
- [3] Boonchom B. 2009. "Parallelogram-like Microparticles of Calcium Dihydrogen Phosphate Monohydrate,  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  Obtained by a Rapid Precipitation Route in Aqueous and Acetone Media." *J.Alloy.Comp.* 482 : 199-202.
- [4] ดวงพร ปริสวรงค์ ญัฐธินันท์ รักตะขบ และศศิธร รุ่งสง่า 2558. "การศึกษาสารหน่วงไฟระบบเดี่ยวจากเปลือกหอยแมลงภู่." โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] สิทธิโชค ปุณณะนิตี สุธิดา แซ่มชื่น และสุพรรณภางค์ รักษาวงศ์. 2556. "การศึกษาไม้พลาสติก (WPCs) ชนิดทนไฟระบบอินตุมเนสเซนต์." โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] Pablo C. and Macarcia V. 2008. **Market and Technology Trends and Challenges for Wood Plastic Composites in North America.** [Online]. Available : <http://www.swts.org/meeting/AM08/proceedings/WS-15.pdf>.
- [7] ประภาพร กิตติเสนาชัย. 2555. **ศักยภาพในการแข่งขันของมะพร้าว.** [Online]. Available : <http://tpson.moc.go.th/img/news/1064-img.pdf>.
- [8] ส.พานิช. 2556. **กาบมะพร้าว.** [Online]. Available : <http://www.nanagarden.com/product/108890>.
- [9] Bell C. 2014. **Farmer Develops Mussel Fertilizer.** [Online]. Available : <http://www.stuff.co.nz/business/farming/agribusiness/9849293/Farmer-develops-mussel-fertilizer>.
- [10] อธิพิล แจ้งชัด. 2544. **เอกสารประกอบการสอนวิชาพอลิเมอร์คอมโพสิต.** ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] Ersa N. 2013. **Classes and Characteristics of Composites Materials.** [Online]. Available : <http://materials-engineeringscience.blogspot.com/2011/06/classes-and-characteristics-of.html>.
- [12] วรธรรม อุ๋นจิตติชัย. 2556. **กระบวนการเคมีอุตสาหกรรมด้านอุตสาหกรรมไม้และวัสดุทดแทนไม้.** กรุงเทพฯ : สำนักวิจัยและพัฒนาป่าไม้ กรมป่าไม้.
- [13] Kedal Co., Ltd. 2015. **Recycled Plastic Wood.** [Online]. Available : <http://www.kedal.co.uk/recycled-plastic-lumber-timber-wood.html>.
- [14] ธนดล สัตตบงกช. 2545. **ไม้ประกอบและไม้พลาสติก.** [Online]. Available : <http://www.plasticmart.co.th/image/1176038014/wood%20composite.pdf>.
- [15] Teko Global Vision Pvt., Ltd. 2015. **WPC Decking Advantage and Feature.** [Online]. Available : [http://www.tekoglobal.com/products/wood\\_plastic\\_composite\\_wpc](http://www.tekoglobal.com/products/wood_plastic_composite_wpc).
- [16] Vikram Y. 2005. **Wood Plastic Composite Decking Manufacturing Process.** [Online]. Available : [http://firecenter.berkeley.edu/bwmg/docs/BMWG\\_Decks\\_WPC\\_CourtesyWSU.pdf](http://firecenter.berkeley.edu/bwmg/docs/BMWG_Decks_WPC_CourtesyWSU.pdf).
- [17] Anatole A.K. 2007. **Wood Plastic Composites.** New York : John Wiley & Son.
- [18] Young R.J. and Lovell P.A. 2011. **Introduction to Polymers.** 3<sup>rd</sup> ed. Ohio : CRC Press.
- [19] Sepe M. 2014. **Performance in Polyethylene.** [Online]. Available : <http://www.ptonline.com/columns/materials-performance-in-polyethylene-density-matters>.
- [20] พิบูลย์สิน. 2554. **พลาสติกคลุมดิน.** [Online]. Available : <https://piboonsinmarketing.wordpress.com/tag/พลาสติกคลุมดิน>.
- [21] Alma H. and Shanks R. 2013. **Natural Fibre Composites.** 1<sup>st</sup> ed. Cambridge : Woodhead Publishing.
- [22] สุรัชย์ ศรีชินราช. 2557. **องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้.** [Online]. Available : [http://www.buranapagroup.com/en/knowledge\\_chemicals.php](http://www.buranapagroup.com/en/knowledge_chemicals.php).
- [23] อรพิน ภูมิภมร. 2553. **คาร์โบไฮเดรตในอาหาร : พอลิแซ็กคาไรด์.** กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [24] ธีรรัตน์ คงขุนเทียน. 2557. **ใยมะพร้าว (COIR).** [Online]. Available : <http://www.thaitextile.org/fibers/content.php>.
- [25] เจริญ สมานวนกิจ. 2497. **ความรู้เรื่องมะพร้าว.** กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [26] จอม ปัทมคันธิน. 2555. **เปลือกหอย.** นนทบุรี : สำนักพิมพ์ชบาเงิน.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [27] ศูนย์วิจัยและพัฒนาประมงน้ำจืดสุราษฎร์ธานี. 2556. **ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับหอยแมลงภู่**. [Online]. Available : <http://www.fisheriers.go.th/if-suratthani/web2/index>.
- [28] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2547. **สารปรับแต่งพอลิเมอร์ (Polymer Additive)**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : บริษัทบูคเน็ท จำกัด.
- [29] อรุษา สรวารี. 2546. **สารเติมแต่งพอลิเมอร์ เล่ม1**. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [30] มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์. 2552. **เคมีพอลิเมอร์**. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [31] Constantine P. and Pantelis K. 2014. **Polymer Green Flame Retardants**. Oxford : Elsevier B.V.
- [32] Lowden A.L. and Terence R.H. 2013. **Flammability Behavior of Wood and a Review of the Methods for Its Reduction**. Berlin : Springer.
- [33] กษมา จารุกำจร และนิธินาถ ศุภกาญจน์ 2554. **การปรับปรุงการต้านการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์**. รายงานการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [34] Sergei V.L. and Edward D.W. 2006. **A Review of recent Progress in Phosphorus based Flame Retardant**. New York : SAGE Publications.
- [35] Alexander B.M. and Charles A.W. 2007. **Flame Retardant Polymer Nanocomposites**. New York : John Wiley & Son.
- [36] Adrian B. 2015. **Intumescent Flame Retardant Systems**. [Online]. Available : <http://www.flameretardants-online.com/web/en/home/index.html>.
- [37] Crowcon Detection Instruments Co., Ltd 2014. **Flammable Risk**. [Online]. Available : <http://www.crowcon.com/service-and-support/flammable-risk.html>.
- [38] กนกอร แสงสุวรรณ. 2553. “วัสดุทดแทนไม้พอลิเมอร์คอมโพสิตจากพอลิโอเลฟินและเยื่อเชิงกลจากมะพร้าว.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [39] อธิพัฒน์ อุณหโชค และพจนีย์ ศรธรรมลี. 2543. “การศึกษาไม้เทียมพอลิเมอร์คอมโพสิตจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและเส้นใยผักตบชวา.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [40] Nicole M.S., White R.H., Mueller S.A. and Osswald T.A. 2010. "Evaluation of Various Fire Retardants for Use in Wood Flour – Polyethylene Composites." *Polymer degrade. Stabil.* 95 : 1903-1910.
- [41] Zhang Q. and Chen Y. 2011 "Synergistic Effects of Ammonium polyphosphate /Melamine Intumescent System with Macromolecular Char Former in Flame-Retardants Polyoxymethylene." *J. Polymer Res.* 18 : 293-303.
- [42] Chen X.L., Jio C.M. and Wang. Y. 2009 "Synergistic Effects of Iron Powder on Intumescent Flame Retardant Polypropylene System" *Express Polymer Lett.* 6 : 359-365.
- [43] Sarang D. 2009. "Calcium Carbonate and Ammonium Polyphosphate-Based Flame Retardant Composition for Polypropylene." *J. Appl. Polymer Sci.* 120 : 1866-1873.
- [44] American Standard for Testing and Materials. 1996. **Standard Test Method for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement : ASTM D792.** Annual Books of ASTM Standards. 8.01 : 175-178.
- [45] UL Testing Standard. 1988. **Standard for Tests for Flammability of Plastic Materials for Parts in Device and Appliances.** [Online]. Available : [http://ul.com/wpcontent/uploads/2014/04/ul\\_UL94CertificationsAndLimitations.pdf](http://ul.com/wpcontent/uploads/2014/04/ul_UL94CertificationsAndLimitations.pdf).
- [46] American Standard for Testing and materials. 1998. **Standard Test Method for Flammability of Plastic Using the Oxygen Index Method : ASTM D2863.** Annual Books of ASTM Standards. 8.02 : 154-164.
- [47] มหาวิทยาลัยรามคำแหง 2551. **การหาค่าพลังสะสมในผลิตภัณฑ์โดยเครื่อง Bomb Calorimeter.** [Online]. Available : [http://e-book.ram.edu/e-book/f/FY473\(51\)/FY473-13.pdf](http://e-book.ram.edu/e-book/f/FY473(51)/FY473-13.pdf).
- [48] Mettler-Toledo, LLC. 2010. **Density Kit for Solids and Liquids Determination.** [Online]. Available : [http://www.mt.com/in/en/home/library/operating-instructions/laboratory-weighing/\\_NC\\_density\\_OI/\\_jcr:content/download/file/file.res/Operating\\_Instructions\\_Density%20Kit\\_\(OP-EN\).pdf](http://www.mt.com/in/en/home/library/operating-instructions/laboratory-weighing/_NC_density_OI/_jcr:content/download/file/file.res/Operating_Instructions_Density%20Kit_(OP-EN).pdf)
- [49] Billmeyer F.W. 1984. **Text book of Polymer Science.** New York : John Wiley & Sons.

- [50] American Standard for Testing and Materials. 1992. **Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness : ASTM D2240**. Annual Book of ASTM Standards 8.02 : 226-229
- [51] American Standard for Testing and Materials. 1996. **Standard Test Method for Impact Resistance for Plastics and Electrical Insulating Materials : ASTM D256**. Annual Book of ASTM Standards 8.01 : 1-18.
- [52] American Standard for Testing and Materials. 1996. **Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials : ASTM D790**. Annual Book of ASTM Standards 8.01 : 155-165.
- [53] กิตติพงษ์ อำนวยสวัสดิ์. 2547. **Mechanical Properties**. [Online]. Available : [http://www.nano.kmitl.ac.th/files/course/year\\_2\\_1/92536212\\_Instrumentation\\_for\\_Nanostructure\\_Materials/Weeks4\\_Mechanical\\_Properties.pdf](http://www.nano.kmitl.ac.th/files/course/year_2_1/92536212_Instrumentation_for_Nanostructure_Materials/Weeks4_Mechanical_Properties.pdf).
- [54] Boonchom B., Danvirutai C., Youngme S. and Maensiri S. 2008. "Simple Synthesis, Magnetic Properties, and Nonisothermal Decomposition Kinetics of  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ " *Ind. Eng. Chem. Res.* 47 : 7642–7647.
- [55] De Wolff P. 1957 **Technisch physische dienst, Delft, The Netherlands, ICDD Grant-in-Aid (1957)**. Netherlands.
- [56] Chapman A.C. 1968. "Spectra of Phosphorus Compounds-III The Vibrational Assignment and Force Constants of  $\text{P}_4\text{O}_6$  and  $\text{P}_4\text{O}_{10}$ ." *Spectrochim. Acta* 24A. 24 : 1687-1696.
- [57] Perry D.L. 2011. **Handbook of Inorganic Compound**. Florida : CRC Press.
- [58] Seefeldt H. and Braun, U. 2012. **A New Flame Retardant for Wood Materials Tested in Wood Plastic Composites**. [Online]. Available : <http://online.library.wiley.com/doi/10.1002/mame.201100382/full>.
- [59] Umemura T., Arao Y., Nakamura S., Tomita Y. and Tanaka T. 2014. "Synergy Effects of Wood Flour and Flame Retardants in Flammability of Wood-Plastic Composites." *Energy Procedia*. 56 : 48-56.
- [60] Morslyede F.R., Borsen C. and Eliton S.M. 2008. "Biodegradable Composites Based on Starch/EVOH/Glycerol Blends and Coconut fibers." *J. Appl. Polym. Sci.* 78 : 220-226.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [61] Tretsiakova-McNally S. and Joseph P. 2015. "Pyrolysis Combustion Flow Calorimetry Studies on some Reactively Modified Polymers." *Polymers*. 7 : 453-467.
- [62] Nikolaeva M. and Karki T. 2011. "A Review of Fire Retardant Process and Chemistry, with Discussion of the Case of Wood Plastic Composites." *BALT FOR*. 17 : 314-326.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

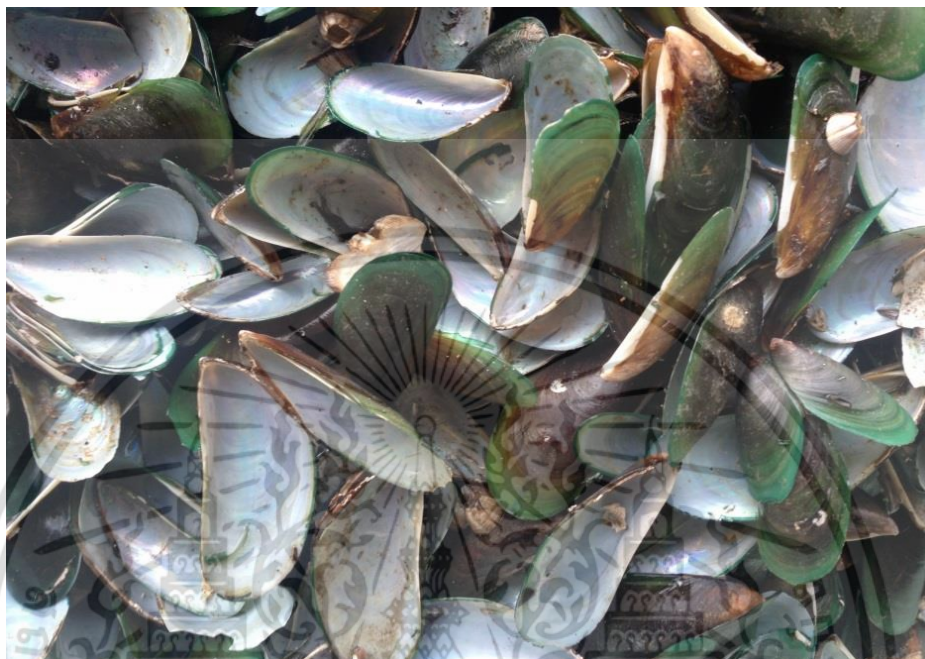


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### สมบัติของเปลือกหอยแมลงภู่นิคมำจัดและไม่กำจัดสิ่งปนเปื้อน

ก-1 ลักษณะของเปลือกหอยแมลงภู่นิคมำจัดและไม่กำจัดสิ่งปนเปื้อน



รูปที่ ก-1 เปลือกหอยแมลงภู่นิคมำจัดสิ่งปนเปื้อน



รูปที่ ก-2 เปลือกหอยแมลงภู่นิคมำจัดสิ่งปนเปื้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก-2 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบธาตุและสารประกอบออกไซด์ในเปลือกหอยแมลงภู่นิตกกำจัดและไม่กำจัดสิ่งปนเปื้อนด้วยเทคนิค XRF

ตารางที่ ก-1 องค์ประกอบธาตุและสารประกอบออกไซด์ในเปลือกหอยแมลงภู่นิตกไม่กำจัดสิ่งปนเปื้อน

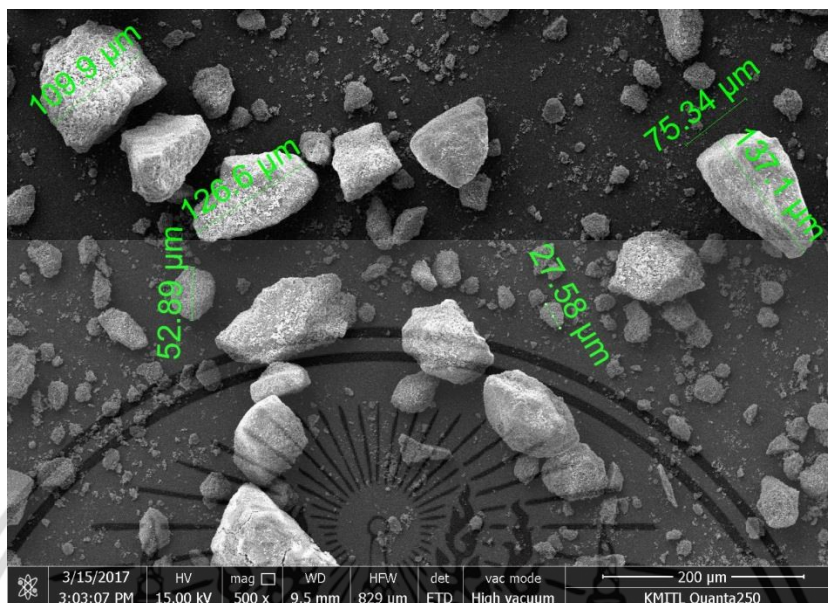
ธาตุ	ปริมาณ (%wt)	สารประกอบออกไซด์ (%wt)	ปริมาณ (%wt)
O	28.400	-	-
Na	0.348	Na <sub>2</sub> O	0.578
S	0.227	SO <sub>3</sub>	0.465
Ca	69.399	CaO	96.855
Cr	0.242	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.354
Fe	0.521	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.745
Cu	0.482	CuO	0.552
Sr	0.381	SrO	0.451
Compton	0.730	Compton	0.730
Rayleigh	16.60	Rayleigh	16.60
Norm.	100.00	Norm.	100.00

ตารางที่ ก-2 องค์ประกอบธาตุและสารประกอบออกไซด์ในเปลือกหอยแมลงภู่นิตกกำจัดสิ่งปนเปื้อน

ธาตุ	ปริมาณ (%wt)	สารประกอบออกไซด์ (%wt)	ปริมาณ (%wt)
O	28.500	-	-
Na	1.620	Na <sub>2</sub> O	2.190
S	0.202	SO <sub>3</sub>	0.336
Ca	69.200	CaO	96.734
Cu	0.478	CuO	0.740
Compton	0.760	Compton	0.760
Rayleigh	17.76	Rayleigh	17.76
Norm.	100.00	Norm.	100.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก-3 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของเปลือกหอยแมลงภู่นิวทิก้าจัดและไม่กำจัดสิ่งปนเปื้อนจาก SEM



รูปที่ ก-3 สัณฐานวิทยาของเปลือกหอยแมลงภู่นิวทิก้าจัดสิ่งปนเปื้อนเบื้องต้นหลังบด ที่กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ ก-4 สัณฐานวิทยาของเปลือกหอยแมลงภู่นิวทิก้าจัดสิ่งปนเปื้อนเบื้องต้นหลังบด ที่กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### ปริมาณองค์ประกอบในสูตรคอมโพสิต

ตารางที่ ข-1 ปริมาณองค์ประกอบในสูตรคอมโพสิต (%wt) (ระบบเดี่ยว)

สูตร	ปริมาณสาร (%wt)			
	HDPE	CF	FRs	Additive *
WPC	62.85	31.43	-	5.72
WPCAPP25	54.32	27.16	13.58	4.94
WPCATH25	54.32	27.16	13.58	4.94
WPCATH40	50.23	25.11	20.09	4.57
WPCUS-CaHP20	55.83	27.92	11.17	5.08
WPCUS-CaHP25	54.32	27.16	13.58	4.94
WPCUS-CaHP30	52.88	26.44	15.86	4.81
WPCUS-CaHP35	51.52	25.76	18.03	4.69
WPCUS-CaHP40	50.23	25.11	20.09	4.57
WPCBS-CaHP25	54.32	27.16	13.58	4.94
WPCBS-CaHP40	50.23	25.11	20.09	4.57

หมายเหตุ\* ประกอบด้วย PE-g-MA, PE-wax, Anox 20, Alkanox2 40 และ R-10

ตารางที่ ข-2 ปริมาณองค์ประกอบในสูตรคอมโพสิต (%wt) (ระบบอินตุมเมสเซนต์)

สูตร	ส่วนประกอบของไม้พลาสติกคอมโพสิต (php)				Additive *
	HDPE	IFRs		CF	
		MA	สารกลุ่มฟอสฟอรัส		
Intu-APP0.5	51.92	4.42	12.98	25.96	4.72
Intu-CaHP0.5	51.92	4.42	12.98	25.96	4.72
Intu-CaHP0.6	50.61	4.30	15.18	25.30	4.61
Intu-CaHP0.7	49.36	4.19	17.28	24.68	4.49
Intu-CaHP0.8	48.17	4.10	19.27	24.08	4.38

หมายเหตุ\* ประกอบด้วย PE-g-MA, PE-wax, Anox20, Alkanox240 และ R-10

## ภาคผนวก ค

### สภาวะการฉีดขึ้นรูป

#### อุณหภูมิในการฉีดขึ้นรูป (°C)

Nozzle Temp.	190
Zone 1 Temp.	185
Zone 2 Temp.	180

#### เวลาในการฉีดขึ้นรูป (s)

DIE CLS/OPN	50	MELTING	500
SID-COR ACT	50	DECOMPRS	2
1 <sup>st</sup> STG INJ	30	COOLING	300
2 <sup>nd</sup> STG INJ	30	3 <sup>rd</sup> STG INJ	30

#### ความเร็วในการฉีดขึ้นรูป (%)

RAPID CLS. SPD.	50	DIE CHANGE SPD.	44
HIGH CLS. SPD.	60	DIE ADJ. SPD.	33
CLAMPING SPD.	55	MELTING SPD.	50
DIE OPN. SLW. 1	30	DECOMP. SPD.	0
RAPID OPN. SPD.	30	SCREW-INJ. SPD.	0
DIE OPN. SLW. 2	30	1 <sup>st</sup> STG ING	30
EJECTION SPD.	30	2 <sup>nd</sup> STG ING	30
PLUNGER SPD.	40	3 <sup>rd</sup> STG ING	30

#### ความดันในการฉีดขึ้นรูป (kg/cm<sup>2</sup>)

DIE CLS.	30	MELTING	50
CLS LOW.	50	DECOMP.	39
CLS HI.	50	PLUNGER	40
DIE OPN.	30	EJECTOR	40
1 <sup>st</sup> INJ	50	SCW-IN	44
2 <sup>nd</sup> INJ	55	DIE ADJ	60
3 <sup>rd</sup> INJ	60		

#### อุณหภูมิหล่อเย็น (°C)

Cooling Temp.	10
---------------	----

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

### การคำนวณค่าความหนาแน่น

ง-1 การคำนวณความหนาแน่นที่ได้จากสูตร

ความหนาแน่นของสารผสมหาได้ดังสมการ

$$\text{ความหนาแน่นของชิ้นงาน} = \frac{\text{น้ำหนักของชิ้นงาน (g)}}{\text{ปริมาตรรวมของชิ้นงาน (cm}^3\text{)}} \quad (\text{ง-1})$$

เมื่อ

น้ำหนักของชิ้นงาน = ชั่งด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง หน่วยเป็น g

ปริมาตรรวมของชิ้นงาน = ขนาดของชิ้น กว้าง × หนา × สูง หน่วยเป็น cm<sup>3</sup>

### ตัวอย่างการคำนวณ

#### สูตร WPC

ชิ้นงาน	กว้าง (cm)	หนา (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
1	1.275	0.33	6.31	2.639	2.6549	0.9940
2	1.275	0.33	6.31	2.6456	2.6549	0.9965
3	1.27	0.33	6.31	2.6421	2.6445	0.9991
4	1.275	0.33	6.31	2.6444	2.6549	0.9960

$$\text{ความหนาแน่นของชิ้นงาน} = \frac{2.6390 \text{ g}}{1.275 \times 0.33 \times 6.31 \text{ (cm}^3\text{)}}$$

$$\text{ความหนาแน่นของชิ้นงาน} = 0.9940 \text{ g/cm}^3$$

#### สูตร WPCUS-CaHP40

ชิ้นงาน	กว้าง (cm)	หนา (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
1	1.275	0.33	6.285	2.9504	2.6444	1.1157
2	1.275	0.33	6.28	2.9903	2.6423	1.1317
3	1.275	0.33	6.285	2.9352	2.6444	1.1100
4	1.275	0.33	6.28	2.9278	2.6423	1.1080

$$\text{ความหนาแน่นของชิ้นงาน} = \frac{2.9504 \text{ g}}{1.275 \times 0.33 \times 6.285 \text{ (cm}^3\text{)}}$$

$$\text{ความหนาแน่นของชิ้นงาน} = 1.1157 \text{ g/cm}^3$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สูตร Intu-CaHP0.7

ชิ้นงาน	กว้าง (cm)	หนา (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
1	1.277	0.33	6.28	3.1326	2.6465	1.1837
2	1.277	0.33	6.28	3.0969	2.6465	1.1702
3	1.277	0.33	6.28	3.0659	2.6465	1.1585
4	1.277	0.33	6.28	3.1113	2.6465	1.1756

$$\text{ความหนาแน่นของชิ้นงาน} = \frac{3.1326 \text{ g}}{1.277 \times 0.33 \times 6.28 \text{ (cm}^3\text{)}}$$

$$\text{ความหนาแน่นของชิ้นงาน} = 1.1837 \text{ g/cm}^3$$

## ง-2 การหาความหนาแน่นของ US-CaHP

วัดค่าความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ASTM D792 (Method B) ใช้กับวัสดุที่เป็นผง โดยใช้ขวดพิคโนมิเตอร์ (Pycnometer)

ความถ่วงจำเพาะของสารหาได้ดังสมการ

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ} = \frac{a \text{ (g)}}{a+b-m \text{ (g)}} \quad (\text{ง-2})$$

เมื่อ

$$a = \text{น้ำหนักวัสดุทดสอบ (g)}$$

$$b = \text{น้ำหนักขวดพิคโนมิเตอร์รวมกับน้ำกลั่น (g)}$$

$$c = \text{น้ำหนักขวดพิคโนมิเตอร์รวมกับน้ำกลั่นและวัสดุทดสอบ (g)}$$

ความหนาแน่นของสารหาได้ดังสมการ

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{\text{ความหนาแน่นของน้ำ (g/cm}^3\text{)}}{\text{ความถ่วงจำเพาะของสาร}} \quad (\text{ง-3})$$

## ตัวอย่างการคำนวณ

ครั้งที่ทำการทดลอง	น้ำหนักวัสดุทดสอบ (g)	น้ำหนักขวดพิคโนมิเตอร์รวมกับน้ำกลั่น (g)	น้ำหนักขวดพิคโนมิเตอร์รวมกับน้ำกลั่นและ US-CaHP (g)
1	2.0346	44.2352	45.2264
2	2.3214	44.2341	45.4120
3	2.1678	44.2348	45.3133
เฉลี่ย	2.1746	44.2347	45.3172

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{ความถ่วงจำเพาะ} &= \frac{2.1746 \text{ g}}{2.1746+44.2347-45.3172 \text{ g}} \\ &= 1.9912 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความหนาแน่นของสาร} &= \frac{1.0000 \text{ g/cm}^3}{1.9912} \\ &= 1.9912 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

ดังนั้นความหนาแน่นของ US-CaHP ที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้คือ  $1.9912 \text{ g/cm}^3$

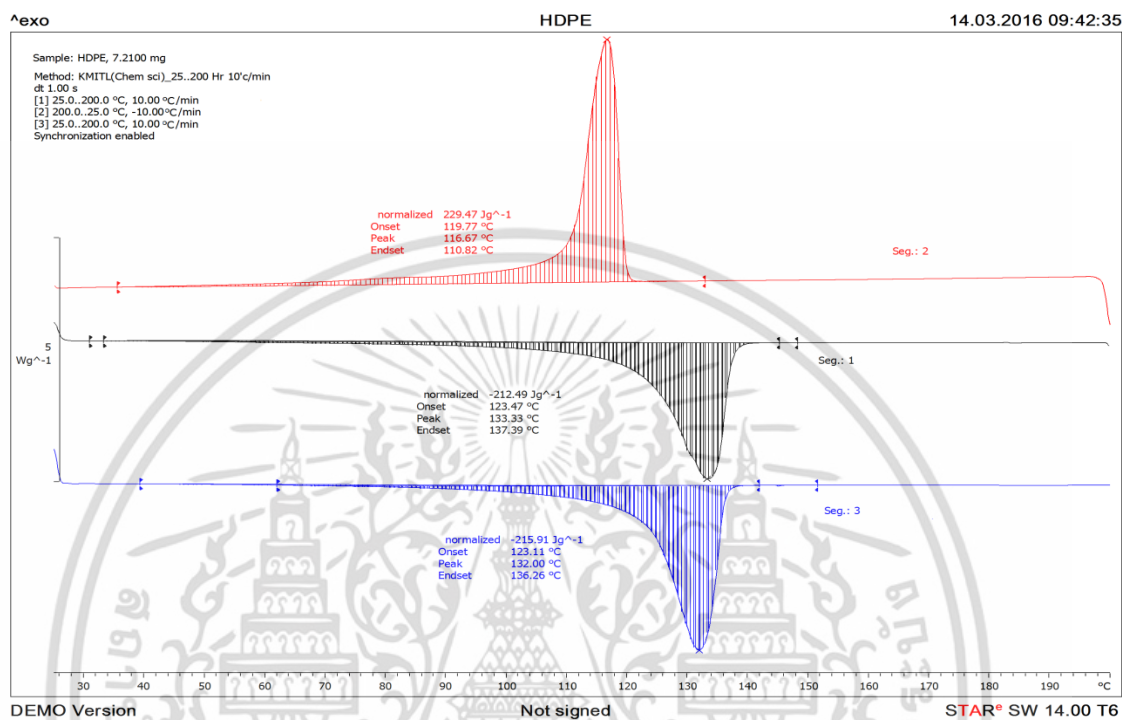


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

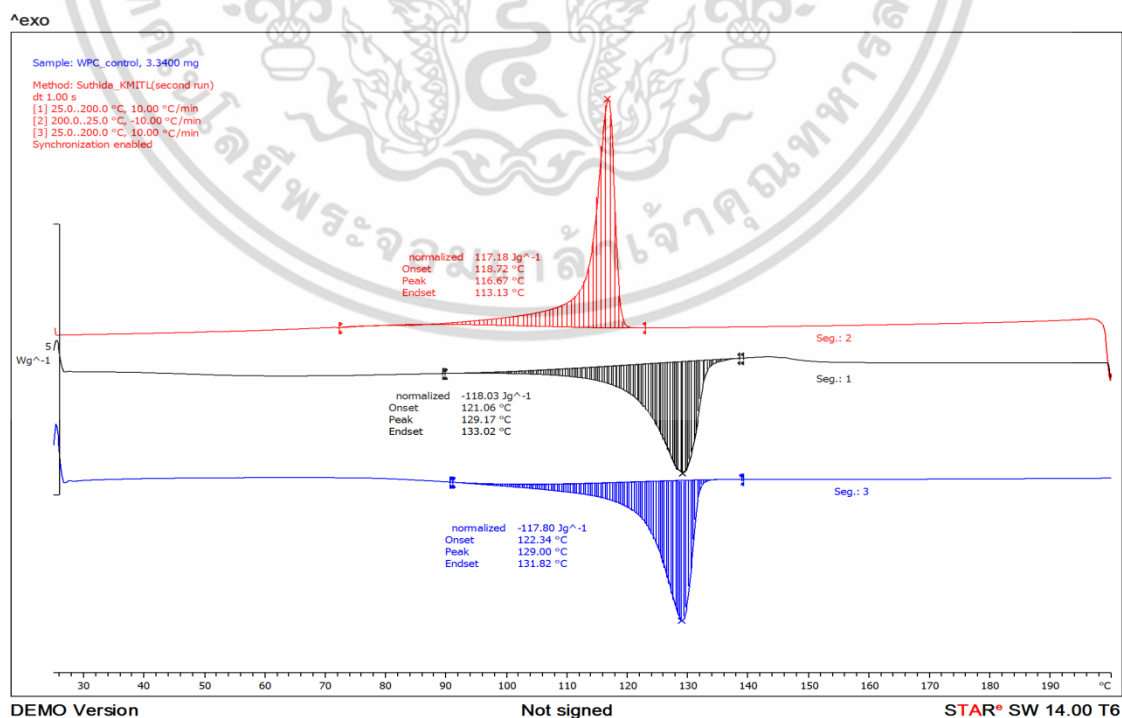
## ภาคผนวก จ

### การทดสอบสมบัติทางความร้อนจาก DSC

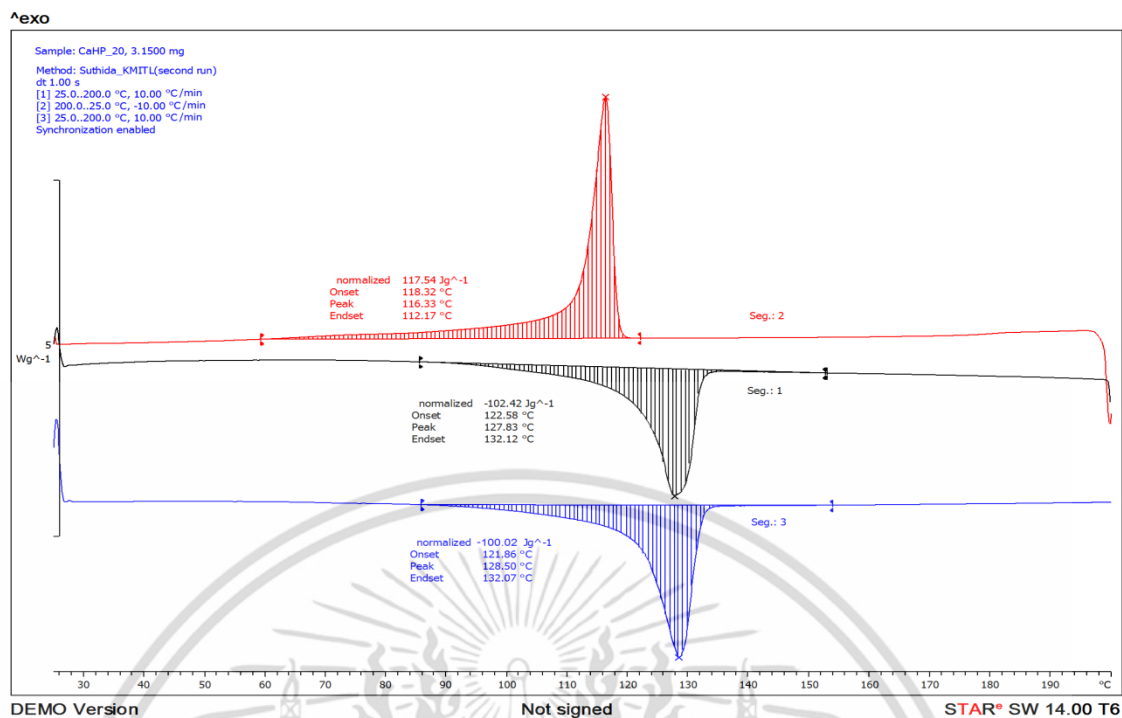
จ-1 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC



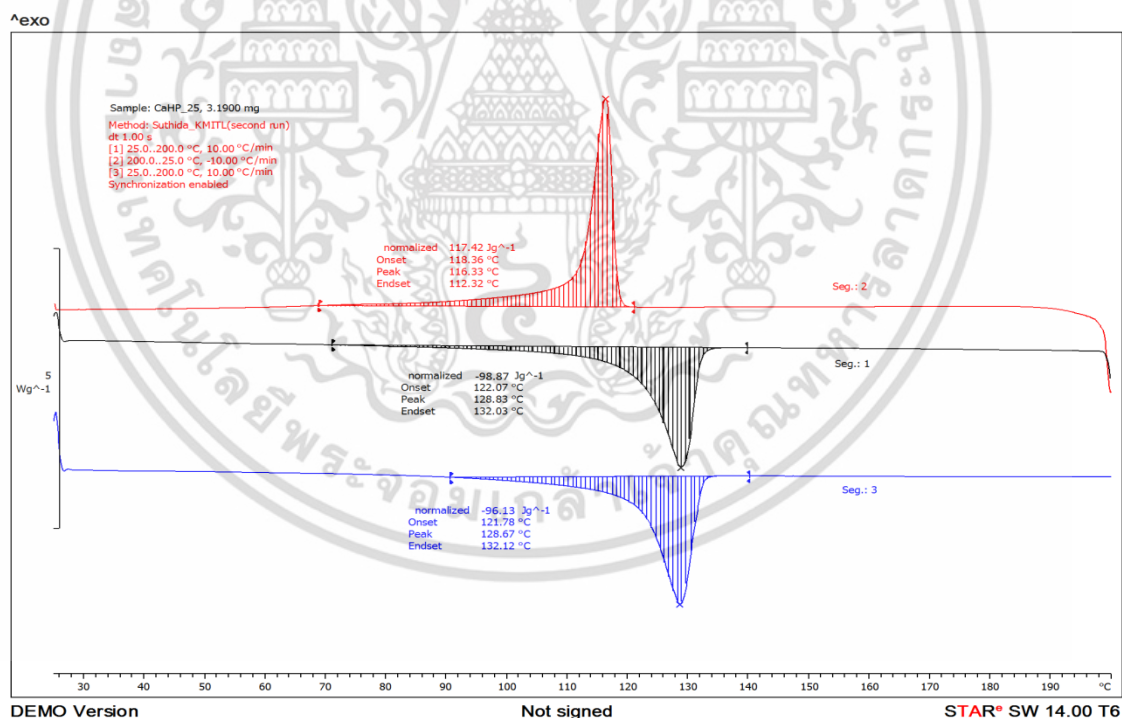
รูปที่ จ-1 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ HDPE



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ จ-2 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ WPC ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

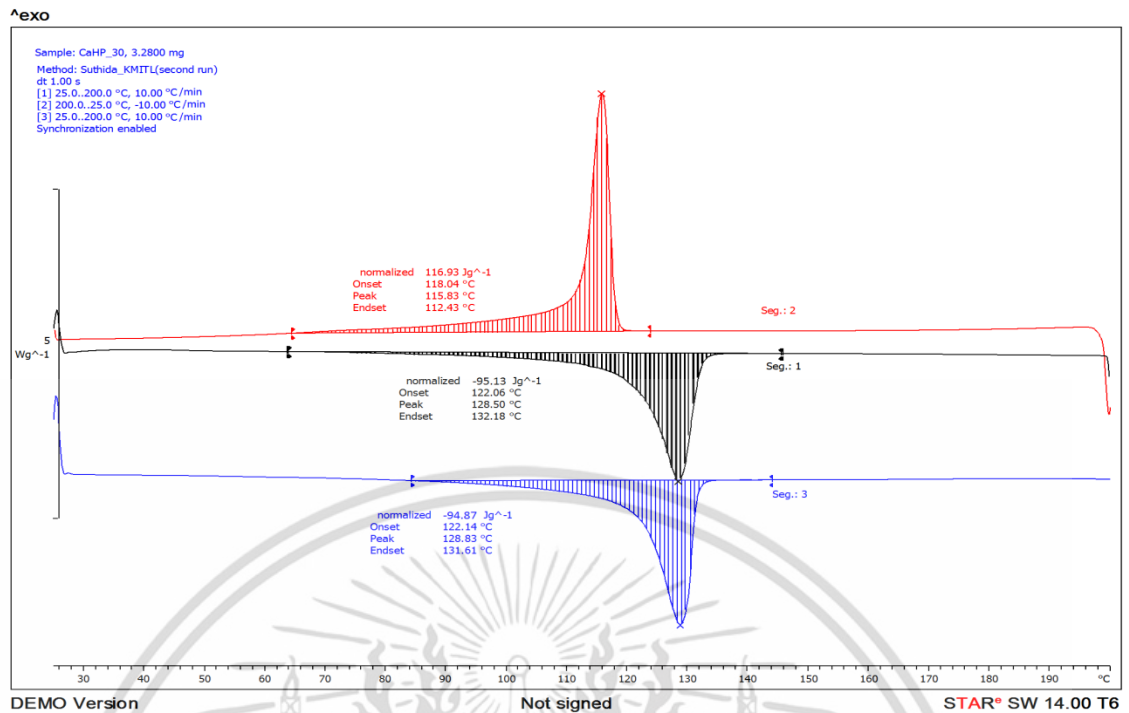


รูปที่ จ-3 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ WPCUS-CaHP20

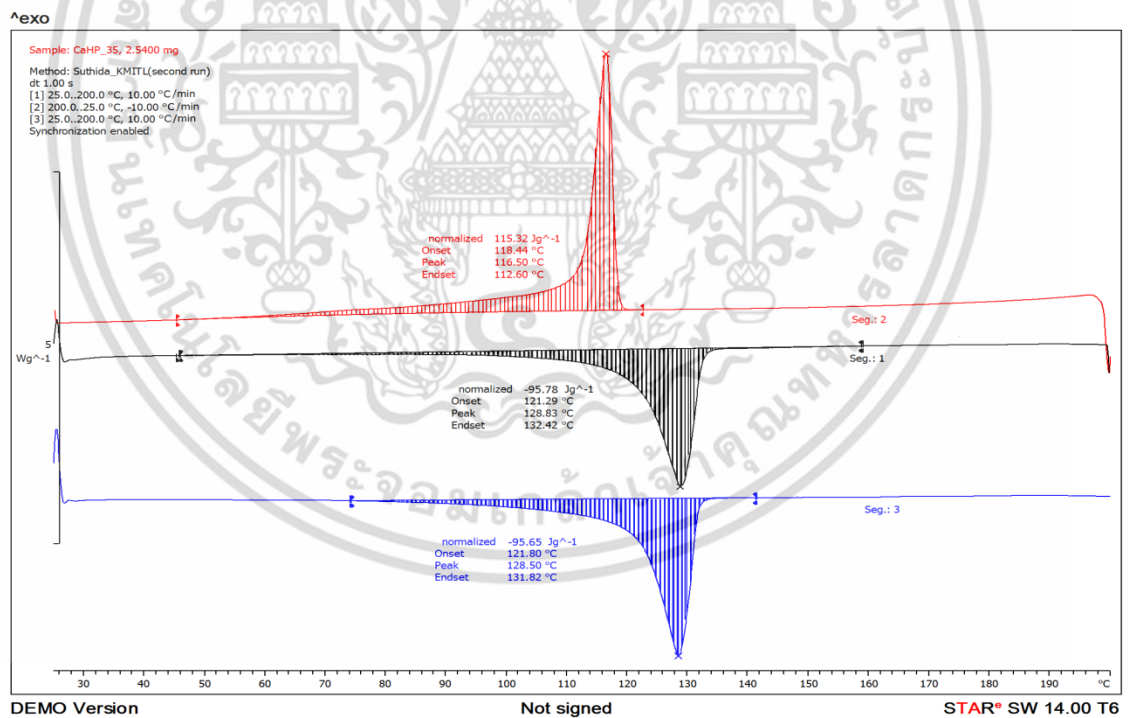


รูปที่ จ-4 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ WPCUS-CaHP25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

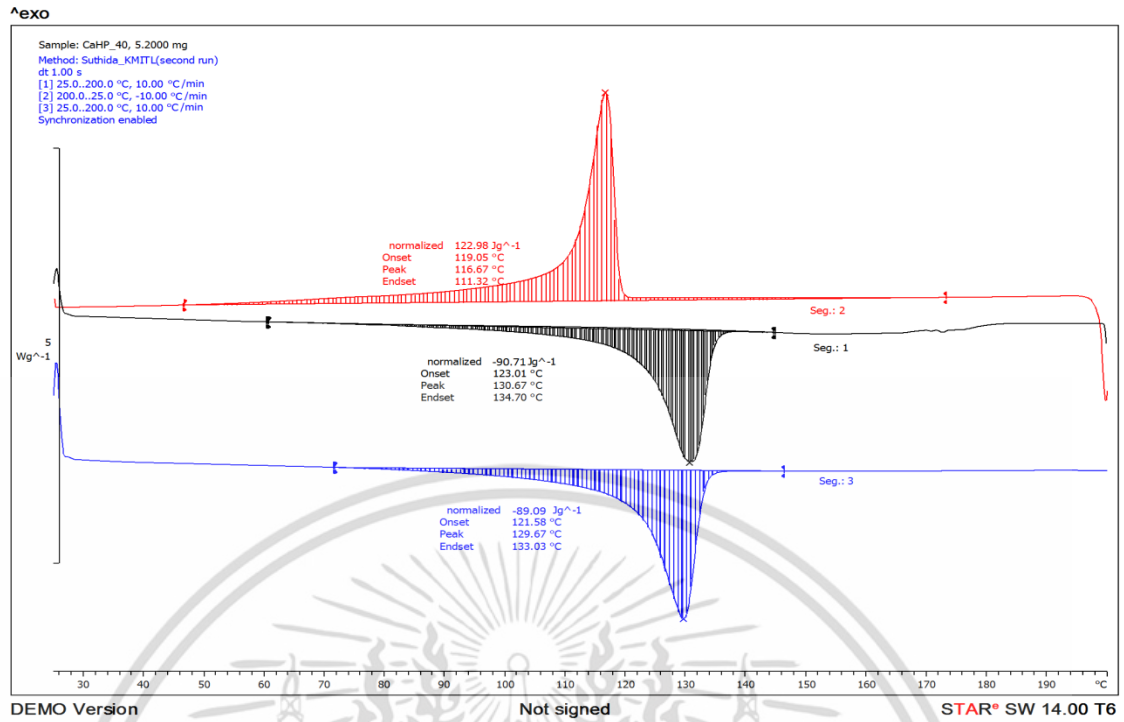


รูปที่ จ-5 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ WPCUS-CaHP30

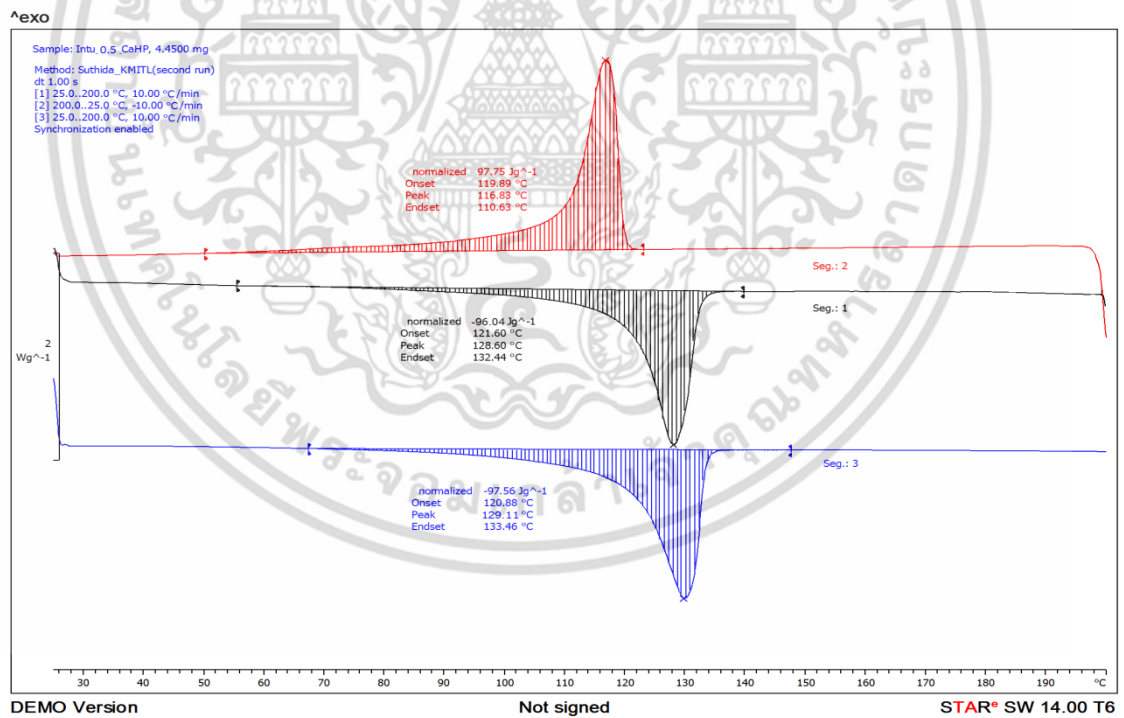


รูปที่ จ-6 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ WPCUS-CaHP35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

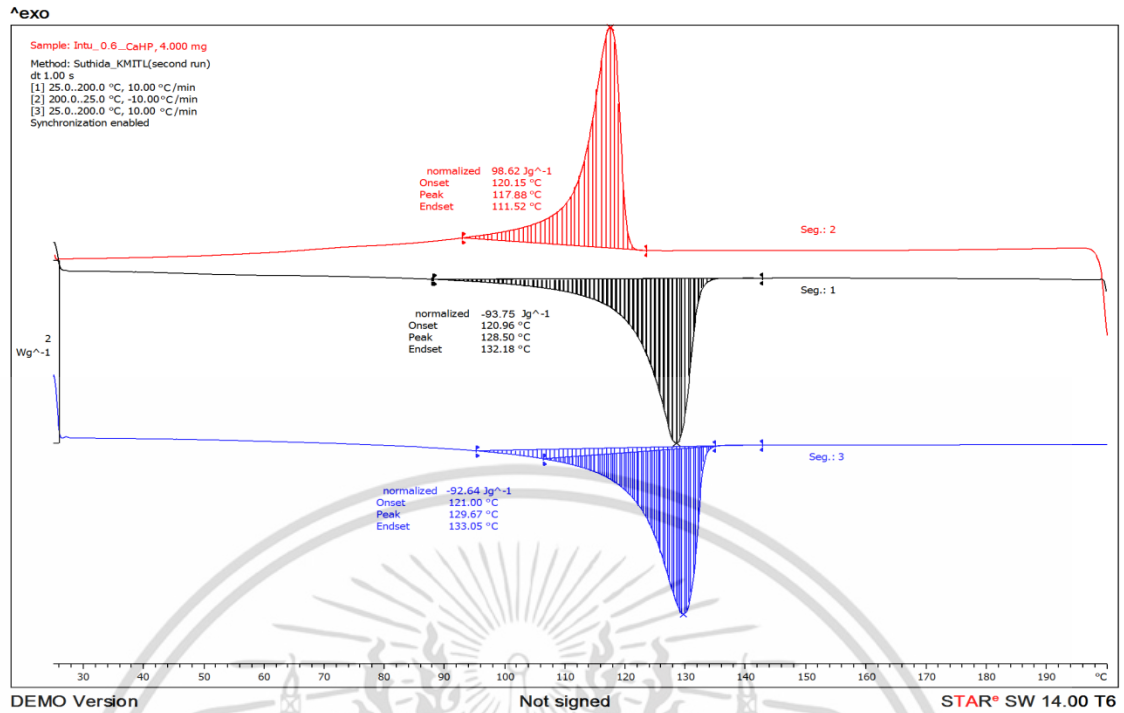


รูปที่ จ-7 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ WPCUS-CaHP40

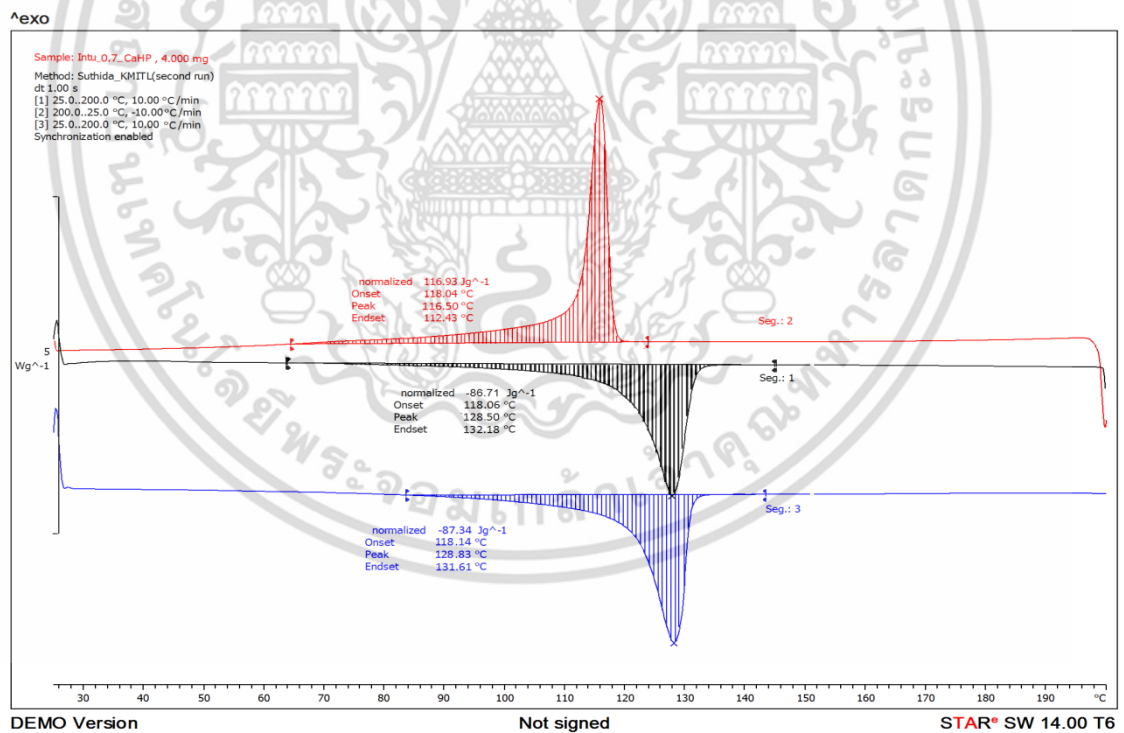


รูปที่ จ-8 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ Intu-CaHP0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

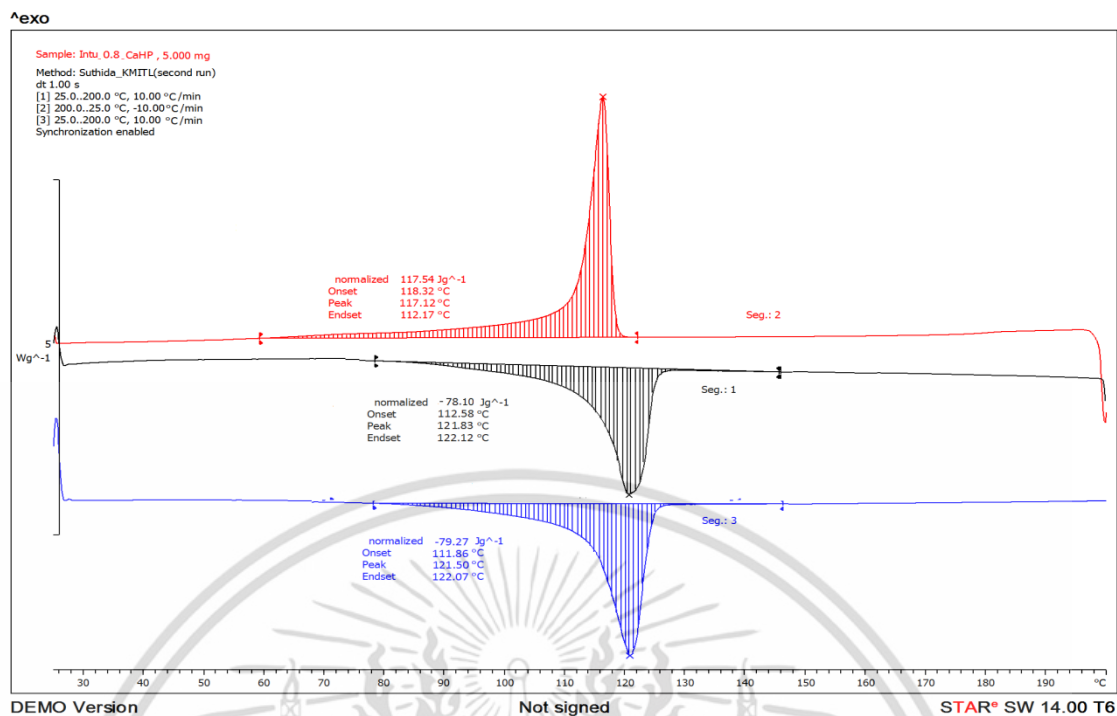


รูปที่ จ-9 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ Intu-CaHP0.6



รูปที่ จ-10 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ Intu-CaHP0.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ-11 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ Intu-CaHP0.8

ตารางที่ จ-1  $T_m$   $T_c$  และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ HDPE ในชิ้นงานคอมโพสิต

สูตร	$T_m$ (°C)	$T_c$ (°C)	$\Delta H$ (J/g)	ความเป็นผลึก (%)
HDPE	133.3	116.7	212.49	73
WPC	129.2	116.7	118.03	64
WPCUS-CaHP20	127.8	116.3	102.42	63
WPCUS-CaHP25	128.8	116.3	98.87	62
WPCUS-CaHP30	128.5	115.8	95.12	61
WPCUS-CaHP35	128.8	116.5	95.78	63
WPCUS-CaHP40	130.7	116.7	90.71	62
Intu-CaHP0.5	128.6	116.8	96.04	63
Intu-CaHP0.6	128.5	117.9	93.75	63
Intu-CaHP0.7	128.5	116.5	86.71	60
Intu-CaHP0.8	121.8	117.1	78.10	56

จ-2 การคำนวณเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ HDPE ในชิ้นงานคอมโพสิต  
คำนวณเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกได้ดังสมการ

$$\text{ความเป็นผลึกของ HDPE (\%)} = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} \times \frac{100}{\% \text{ HDPE}} \times 100 \quad (\text{จ-1})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\Delta H_f$  = พลังงานความร้อนในการหลอมเหลวผลึก  
 $\Delta H_f^0$  = พลังงานความร้อนในการหลอมผลึกของ PE ที่มีความเป็นผลึก 100% มีค่า เท่ากับ 293 J/g

### ตัวอย่างการคำนวณ

$$\text{ความเป็นผลึกของ HDPE (\%)} = \frac{118.03 \text{ J/g}}{293 \text{ J/g}} \times \frac{100}{62.85} \times 100$$

$$\text{สูตร WPC HDPE มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก} = 64.09 \%$$

ดังนั้นสูตร WPC HDPE มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกประมาณ 64 %



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ฉ

### การวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค US-CaHP

ฉ-1 ผลการทดสอบการกระจายขนาดของอนุภาค US-CaHP ด้วยเครื่อง Mastersizer X

ตารางที่ ฉ-1 ตารางผลการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค (Histogram result table)

Size low ( $\mu\text{m}$ )	Result in (%)	Size high ( $\mu\text{m}$ )	Result below (%)
0.50	0.14	1.32	0.14
1.32	0.39	1.60	0.53
1.60	0.56	1.95	1.09
1.95	0.64	2.38	1.73
2.38	0.69	2.90	2.42
2.90	0.81	3.53	3.23
3.53	1.08	4.30	4.31
4.30	1.50	5.24	5.81
5.24	2.05	6.39	7.86
6.39	2.62	7.78	10.48
7.78	3.08	9.48	13.56
9.48	3.51	11.55	17.07
11.55	4.07	14.08	21.14
14.08	5.05	17.15	26.19
17.15	6.67	20.90	32.80
20.90	13.56	25.46	46.36
25.46	17.35	31.01	63.71
31.01	18.99	37.79	82.70
37.79	12.70	46.03	95.40
46.03	4.60	56.09	100.00

เมื่อ

Size low คือ ขนาดเล็กสุดของช่วงขนาดอนุภาคนั้น ๆ ( $\mu\text{m}$ )

Size high คือ ขนาดใหญ่สุดของช่วงขนาดอนุภาคนั้น ๆ ( $\mu\text{m}$ )

Result in คือ เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของปริมาณอนุภาคที่มีอยู่ในช่วงขนาดอนุภาคนั้น (%)

Result below คือ เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของปริมาณอนุภาคที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าช่วงขนาดของอนุภาคที่กล่าวถึง (%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### การคำนวณหาจำนวนโมเลกุลของน้ำใน US-CaHP

การคำนวณหาจำนวนโมเลกุลของน้ำที่สลายตัวออกมาจาก US-CaHP ซึ่งการสลายตัวทั้งสามช่วง ได้รับการยืนยันจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA-FTIR ว่าเป็นโมเลกุลของน้ำ ใช้การเทียบ บัญญัติไตรยางค์ โดยเทียบกับน้ำหนักโมเลกุลของ US-CaHP ซึ่งเท่ากับ 252.07 g/mol ได้เป็น น้ำหนักโมเลกุลของน้ำที่สลายตัวออกมาในช่วงอุณหภูมินั้น จากนั้นเมื่อได้น้ำหนักโมเลกุลน้ำที่ สลายตัวออกมาแล้วเทียบกับน้ำหนักโมเลกุลของน้ำตามทฤษฎีเท่ากับ 18.01 g/mol สามารถ คำนวณหาจำนวนโมเลกุลของน้ำสลายตัวจาก US-CaHP ได้

ตารางที่ ข-1 อุณหภูมิการสลายตัวของ US-CaHP

อุณหภูมิ (°C)	น้ำสารหนักที่หายไป (%)
100-160	6.1
160-280	3.5
280-450	10.5

#### ตัวอย่างการคำนวณ

ช่วงการสลายตัวที่อุณหภูมิ 100-160°C

$$\begin{aligned}
 \text{น้ำหนักโมเลกุลของสารที่สลายตัว} &= \frac{252.07 \text{ g/mol} \times 6.1\%}{100\%} \\
 &= 15.38 \text{ g/mol} \\
 \text{จำนวนโมเลกุลของน้ำ} &= \frac{15.38 \text{ g/mol}}{18.01 \text{ g/mol}} \\
 &= 0.85
 \end{aligned}$$

ช่วงการสลายตัวที่อุณหภูมิ 160-280°C

$$\begin{aligned}
 \text{น้ำหนักโมเลกุลของสารที่สลายตัว} &= \frac{252.07 \text{ g/mol} \times 3.5\%}{100\%} \\
 &= 8.82 \text{ g/mol} \\
 \text{จำนวนโมเลกุลของน้ำ} &= \frac{8.82 \text{ g/mol}}{18.01 \text{ g/mol}} \\
 &= 0.50
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงการสลายตัวที่อุณหภูมิ 280-450°C

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักโมเลกุลของสารที่สลายตัว} &= \frac{252.07 \text{ g/mol} \times 10.5 \%}{100 \%} \\ &= 26.47 \text{ g/mol} \\ \text{จำนวนโมเลกุลของน้ำ} &= \frac{26.47 \text{ g/mol}}{18.01 \text{ g/mol}} \\ &= 1.47 \end{aligned}$$

ดังนั้นการสลายตัวของ US-CaHP สลายตัวให้โมเลกุลของน้ำ  $0.85 + 0.5 + 1.47 = 2.82$  หรือประมาณ 3 โมเลกุล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ซ

### การคำนวณอัตราการไหลของก๊าซสำหรับการทดสอบ LOI

ตามมาตรฐาน ASTM D2863 กำหนดอัตราเร็วของก๊าซผสม (ก๊าซออกซิเจนและไนโตรเจน) ที่ไหลในท่อแก้วทดสอบมีค่าอยู่ในช่วง  $4 \pm 1$  cm/s ที่สภาวะมาตรฐาน (อุณหภูมิ  $0^{\circ}\text{C}$  และความดัน  $101.3$  kPa) โดยการคำนวณอัตราเร็วของก๊าซใช้สมการดังนี้

$$v = \frac{V}{A} \quad (\text{ซ-1})$$

เมื่อ

$v$  = อัตราเร็วของก๊าซ หน่วยเป็น mm/s

$V$  = อัตราการไหลทั้งหมดของก๊าซ หน่วยเป็น  $\text{mm}^3/\text{s}$

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของท่อทดสอบ หน่วยเป็น  $\text{mm}^2$

### การคำนวณอัตราการไหลทั้งหมดของก๊าซที่สภาวะทดสอบ

#### คำนวณอัตราการไหลทั้งหมดของก๊าซที่สภาวะมาตรฐาน

จากสมการ ซ-1  $V = vA$

โดยใช้  $v = 50$  mm/s

$A = \pi r^2$

$= \pi(41.14)^2 \text{ mm}^2$

$= 5,317.15 \text{ mm}^2$

ดังนั้น  $V = 50 \text{ mm/s} \times 5,317.15 \text{ mm}^2$

$= 265,857.22 \text{ mm}^3/\text{s}$

#### คำนวณอัตราการไหลทั้งหมดของก๊าซที่สภาวะทดสอบ

สภาวะที่ใช้ในการทดสอบคือ อุณหภูมิ  $32^{\circ}\text{C}$  และความดัน  $1.0$  atm คำนวณอัตราการไหลจากสมการดังนี้

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (\text{ซ-2})$$

เมื่อ

$P_1$  = ความดันในสภาวะมาตรฐาน หน่วยเป็น atm

$V_1$  = อัตราการไหลทั้งหมดของก๊าซในสภาวะมาตรฐาน หน่วยเป็น  $\text{mm}^3/\text{s}$

$P_2$  = ความดันในสภาวะทดสอบ หน่วยเป็น atm

$V_2$  = อัตราการไหลทั้งหมดของก๊าซในสภาวะทดสอบ หน่วยเป็น  $\text{mm}^3/\text{s}$

$T_1$  = อุณหภูมิในสภาวะมาตรฐาน หน่วยเป็น K

$T_2$  = อุณหภูมิในสภาวะทดสอบ หน่วยเป็น K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ ซ-2} \quad V_2 &= \frac{(1 \text{ atm}) \times (265,857.22 \text{ mm}^3/\text{s}) \times (305.0 \text{ K})}{(273.0 \text{ K}) \times (1 \text{ atm})} \\ &= 297,019.97 \text{ mm}^3/\text{s} \\ \text{เปลี่ยนหน่วยอัตราการไหลเป็น l/min เนื่องจากเป็นหน่วยมาตรฐานของอัตราการไหล} \\ V_2 &= 17.8 \text{ l/min} \end{aligned}$$

#### คำนวณอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนและไนโตรเจน

ก๊าซออกซิเจนที่ใช้มากที่สุดคือ 100% เนื่องจากค่า LOI ของ Beta fiberglass (สารมาตรฐานจาก ASTM D2863) มีค่าเท่ากับ 100.0 แสดงว่าอัตราการไหลของก๊าซทั้งหมดได้จากก๊าซออกซิเจนเพียงอย่างเดียว ดังนั้นอัตราการไหลมากที่สุดของออกซิเจนเท่ากับ 17.8 l/min

#### ตัวอย่างการคำนวณ

คำนวณที่ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 14% (ค่า LOI เท่ากับ 14)

$$\begin{aligned} 100\% \text{ ของก๊าซออกซิเจน คิดเป็นอัตราการไหลทั้งหมด} & 17.8 \text{ l/min} \\ 14\% \text{ ของก๊าซออกซิเจน คิดเป็นอัตราการไหลทั้งหมด} & = \frac{(17.8 \text{ l/min} \times 14\%)}{100\%} \\ & = 2.5 \text{ l/min} \end{aligned}$$

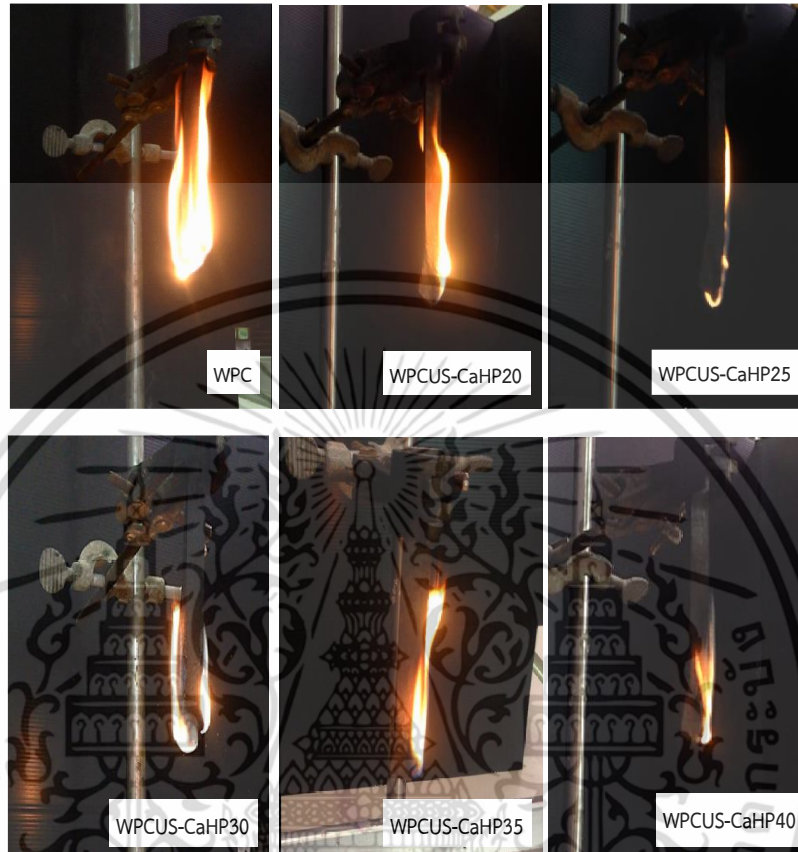
อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 14% หาได้จากสมการดังนี้

$$\begin{aligned} \text{อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน} &= \text{อัตราการไหลทั้งหมด} - \text{อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน (ซ-3)} \\ &= 17.82 - 2.5 \text{ (l/min)} \\ &= 15.3 \text{ l/min} \end{aligned}$$

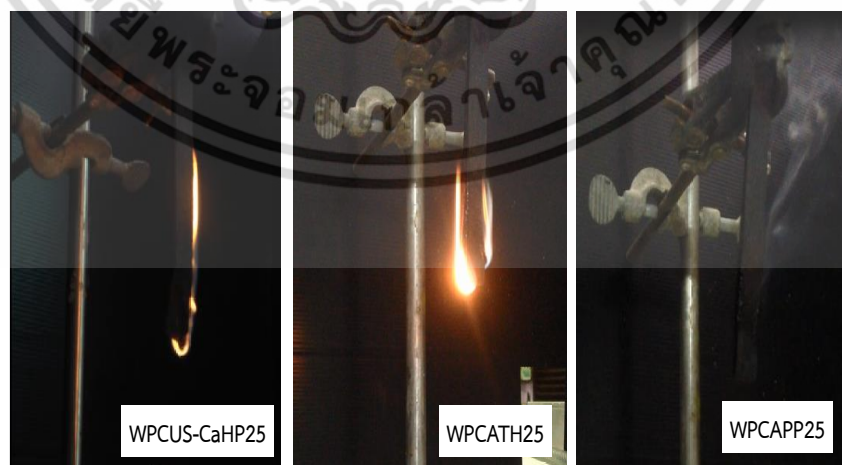
ดังนั้นถ้าต้องการให้ก๊าซผสมมีปริมาณของออกซิเจน 14% โดยปริมาตร ต้องปรับอัตราการไหลของออกซิเจนให้เท่ากับ 2.5 l/min และปรับอัตราการไหลของไนโตรเจนให้เท่ากับ 15.3 l/min

## ภาคผนวก ฅ

### การทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL94 V



รูปที่ ฅ-1 การทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL94 V ของ WPC เมื่อทำการจุดไฟ 30 วินาที

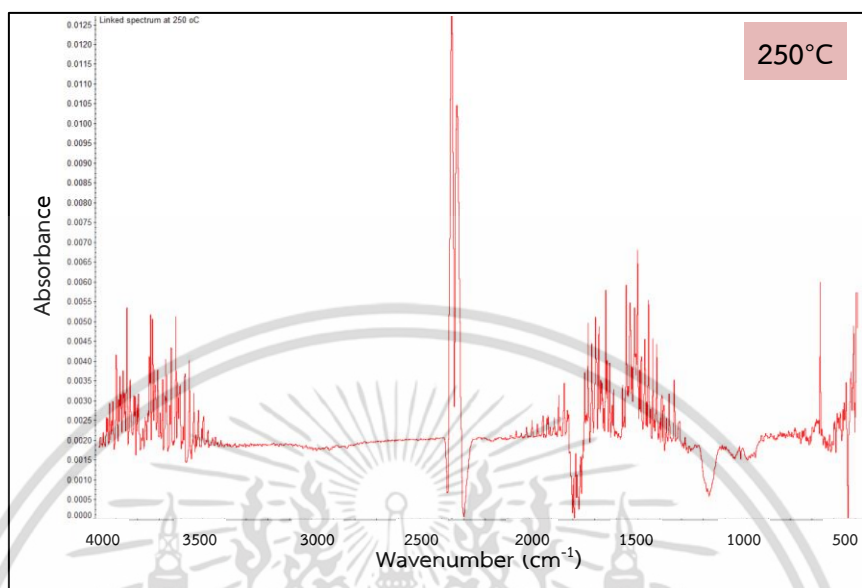


รูปที่ ฅ-2 การเปรียบเทียบการทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL94 V ของ WPC ที่เติม US-CaHP กับสารหน่วงไฟเชิงพาณิชย์

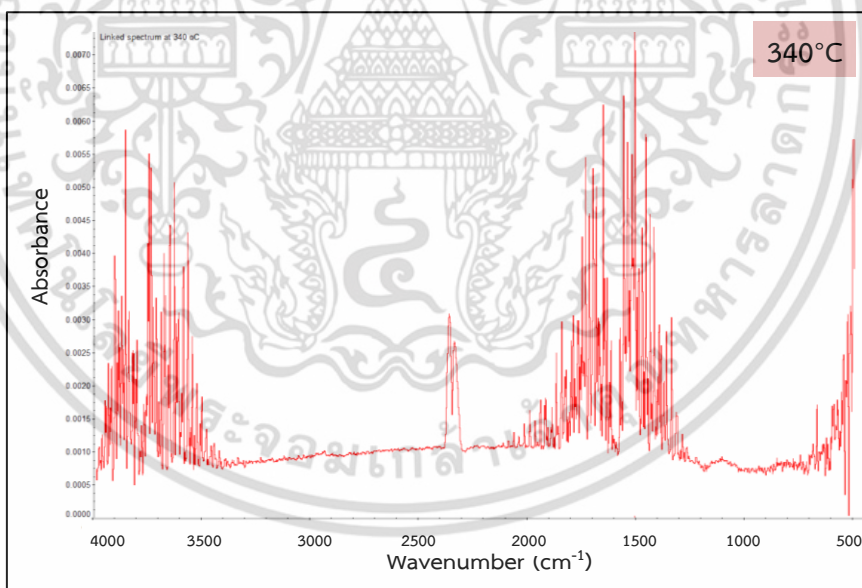
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ญ

### TGA-FTIR ของ Intu-CaHP0.7

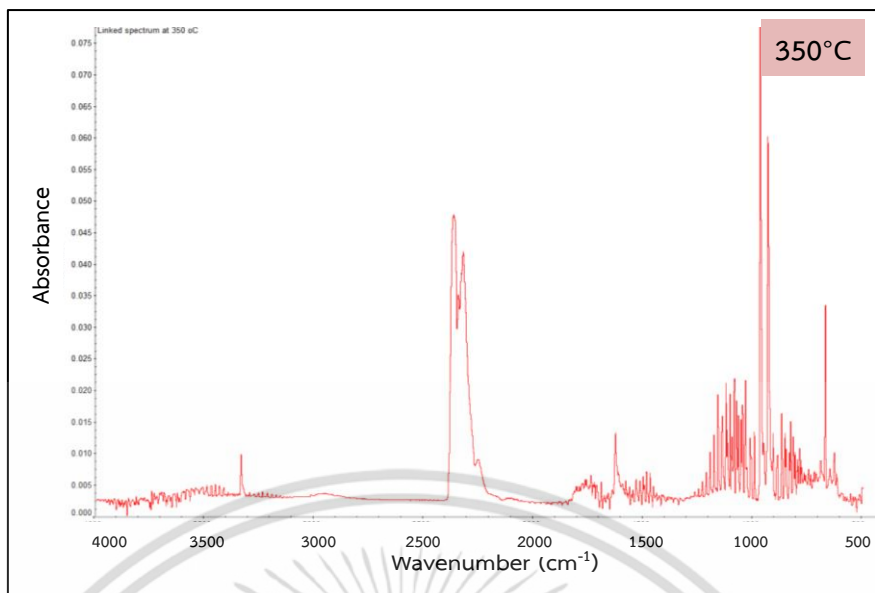


รูปที่ ญ-1 TGA-FTIR ที่อุณหภูมิ 250°C

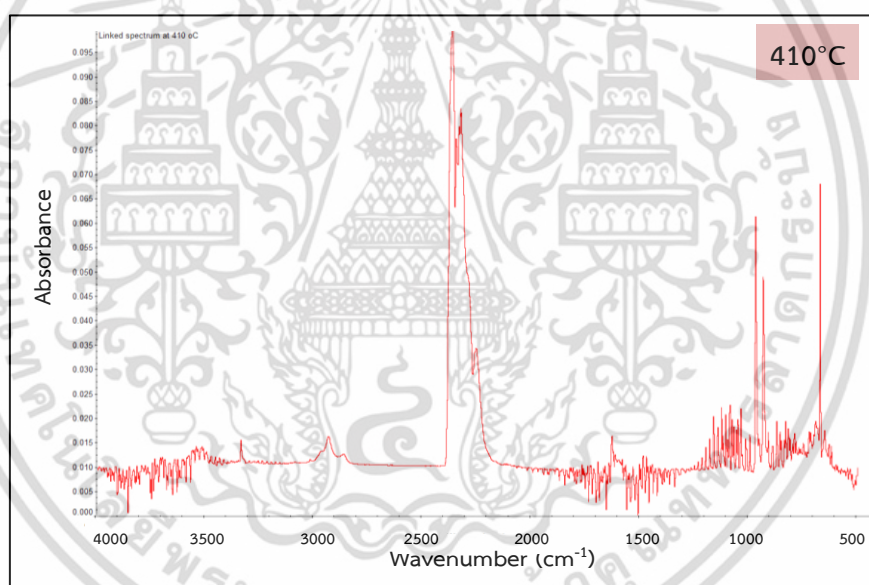


รูปที่ ญ-2 TGA-FTIR ที่อุณหภูมิ 340°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

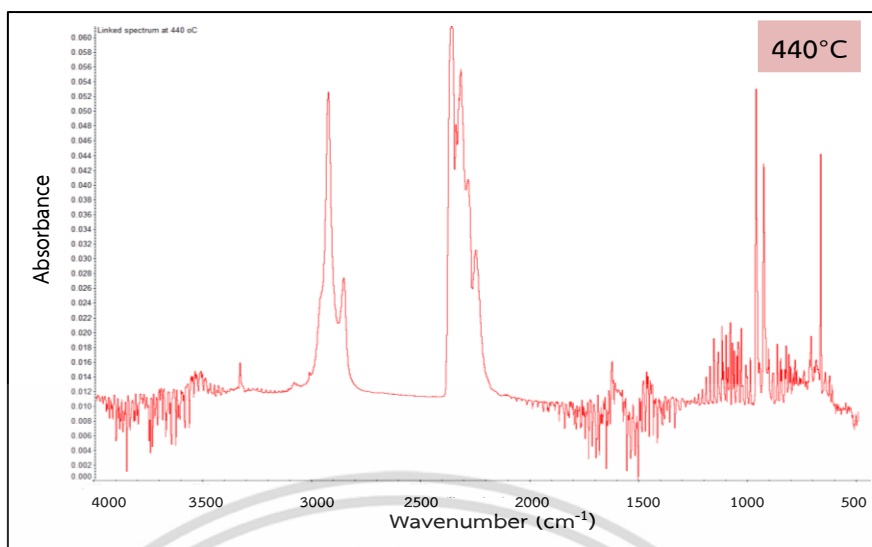


รูปที่ ๓-3 TGA-FTIR ที่อุณหภูมิ 350°C

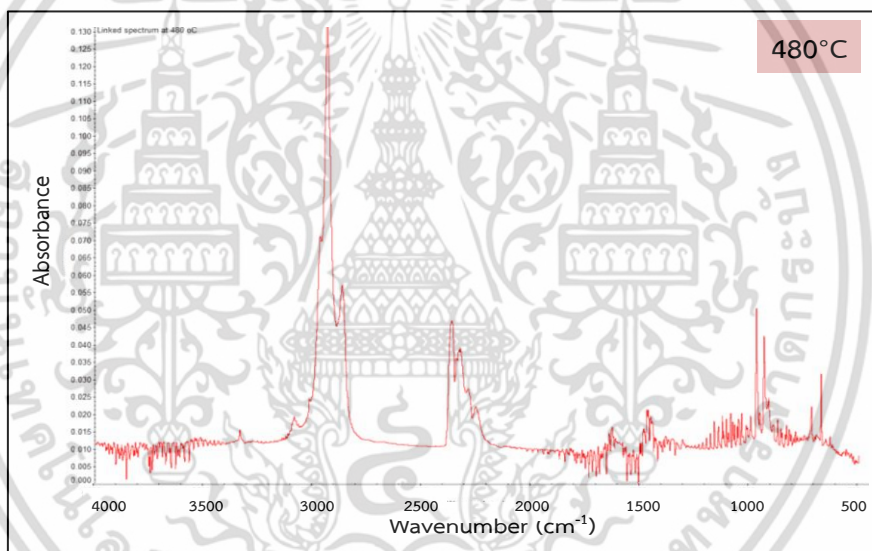


รูปที่ ๓-4 TGA-FTIR ที่อุณหภูมิ 410°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

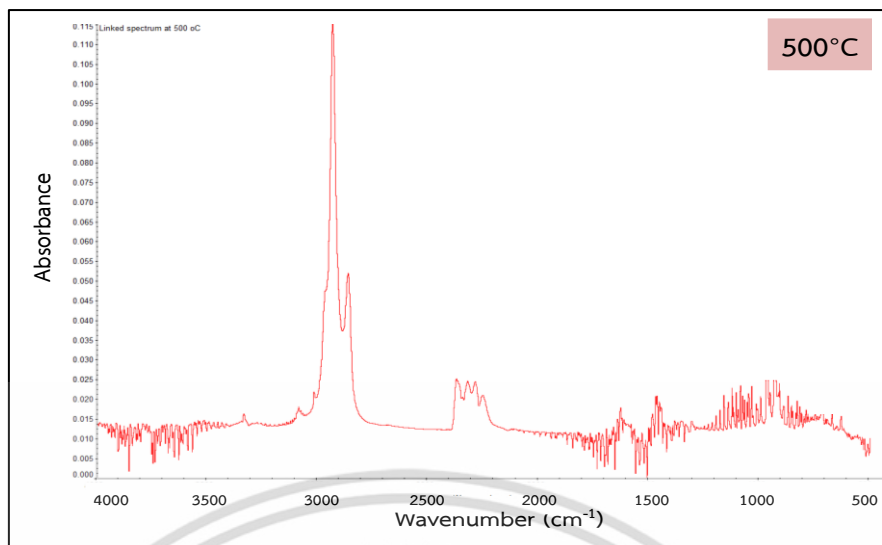


รูปที่ ๕-5 TGA-FTIR ที่อุณหภูมิ 440°C



รูปที่ ๕-6 TGA-FTIR ที่อุณหภูมิ 480°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๗-7 TGA-FTIR ที่อุณหภูมิ 500°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวสุธิดา แซ่มชื่น
วัน เดือน ปีเกิด	18 กันยายน พ.ศ. 2534
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 8/15 หมู่ที่ 7 ต.ฉมัน อ.มะขาม จ.จันทบุรี 22150
ประวัติการศึกษา	2556 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม เกรดเฉลี่ย 3.18 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	1. ทุนอุดหนุนการศึกษาในระดับปริญญาโทของคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2. ทุนนำเสนอผลงานวิชาการแบบโปสเตอร์ ในงานประชุมวิชาการโพลิ- เมอร์แห่งประเทศไทยครั้งที่ 6 (PCT-6)
ผลงานทางวิชาการ	Chamcheun S., Boonchom B. and Jangchud I. 2016. "Study of Novel Flame Retardant from Mussel Shell Waste for Wood Plastic Composites (WPCs)." <i>The Proceedings of In International Polymer Conference of Thailand (PCT-6)</i> , Pathumwan Princess Hotel, June 30-July 1, Bangkok, Thailand, pp. 288-293.
รางวัลที่ได้รับ	Best poster presentation award ในงานประชุมวิชาการ PCT-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้