

สมบัติการทนไฟของโฟมโพลีสไตรีนหลังเคลือบด้วยกาวหน่วงไฟที่มีอลูมิเนียม

FLAME RESISTANCE OF EXPANDABLE POLYSTYRENE FOAMS COATED
WITH CONTAINING ALUMINUM RETARDANT GLUE



ภาณุพงศ์ ปรีภักฑาภรณ์
PANUPHONG PARIPANTAPORN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2567

KMITL-2024-EN-M-227-293

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FLAME RESISTANCE OF EXPANDABLE POLYSTYRENE FOAMS COATED
WITH CONTAINING ALUMINUM RETARDANT GLUE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2024

KMITL-2024-EN-M-227-293

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2024

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติการทนไฟของโพลีโพลิสไตรีนหลังเคลือบด้วยกาวหน่วงไฟที่มีอลูมิเนียม
นักศึกษา	นายภาณุพงศ์ ปรีภักฑาภรณ์
รหัสประจำตัว	64601107
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2567
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ธีรพร สุธีวงศ์

บทคัดย่อ

โพลีโพลิสไตรีนเป็นวัสดุโพลีเมอร์ที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม เช่น บรรจุภัณฑ์ การก่อสร้างและการขนส่ง เนื่องจากสมบัติที่ดี เช่น น้ำหนักเบา ราคาถูกและเป็นฉนวนความร้อน อย่างไรก็ตามโพลีโพลิสไตรีนมีความไวไฟสูงโดยมีค่า Limiting oxygen index (LOI) เพียง 17.4% จึงจำกัดการใช้งานของผลิตภัณฑ์จากโพลีโพลิสไตรีน เพราะความไวไฟที่สูงนี้อาจก่อให้เกิดอัคคีภัยได้ง่าย การเสริมสมบัติความหน่วงไฟให้กับโพลีโพลิสไตรีนโดยเฉพาะเมื่อนำมาใช้ในงานโครงสร้างจึงเป็นเรื่องจำเป็น งานวิจัยนี้ได้พัฒนาสารเคลือบคอมโพสิตที่มีสมบัติหน่วงไฟสำหรับโพลีโพลิสไตรีนที่มีพินออลิเกรซินเป็นเมทริกซ์ (Matrix) และศึกษาผลของสารเติมแต่ง คือ ผงอลูมิเนียมและแอมโมเนียมโพลีฟอสเฟต (Ammonium polyphosphate: APP) ต่อประสิทธิภาพการหน่วงไฟ พบว่า เมื่อทดสอบด้วยการเผาโพลีโพลิสไตรีนที่เคลือบสารหน่วงไฟโดยตรงเพื่อศึกษาผลของสารเติมแต่งแต่ละชนิด พบว่าการใช้แอมโมเนียมโพลีฟอสเฟตหรือผงอลูมิเนียมอย่างใดอย่างหนึ่งในสารเคลือบไม่แสดงสมบัติหน่วงไฟที่ดีพอได้จึงต้องผสมทั้งสองอย่างในสัดส่วนที่เหมาะสม เมื่อวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM-EDS) เม็ดโพลีโพลิสไตรีนที่เคลือบสารหน่วงไฟ พบว่า การเคลือบเม็ดโพลีโพลิสไตรีนมีความสม่ำเสมอและสารอินทรีย์ที่ใช้ในสารหน่วงไฟมีความเข้ากันได้กับพินออลิเกรซิน ค่า LOI ของโพลีโพลิสไตรีนเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 40% เมื่อใช้สารหน่วงไฟที่มีผงอลูมิเนียมอยู่ 4% เมื่อวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของถ่านที่เกิดขึ้นหลังเผาไหม้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า ความหนาแน่นของถ่านมากขึ้นตามปริมาณของผงอลูมิเนียมในสารหน่วงไฟจนถึงปริมาณ 4% และการวิเคราะห์เสถียรภาพต่อความร้อนของโพลีโพลิสไตรีนที่เคลือบสารหน่วงไฟด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) พบว่า โพลีโพลิสไตรีนที่เคลือบด้วยสารหน่วงไฟมีเสถียรภาพต่อความร้อนมากขึ้นตามปริมาณผงอลูมิเนียมในสารหน่วงไฟซึ่งมีมวลคงเหลือหลังการเผา 700 °C เพิ่มขึ้นมากที่สุด 43% ผลการวิเคราะห์ Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) ยืนยันได้มีการสลายตัวของสารประกอบซิลิโคนและเกิดเป็นโซเดียมซิลิเกต รวมถึงสรุปกลไกของ

การหน่วงไฟของสารที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นซึ่งมีกลไกการหน่วงไฟทั้งในเฟสของแข็งและแก๊ส เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 |
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Flame resistance of expandable polystyrene foams coated with containing aluminum retardant glue
Student	Mr. Panuphong Paripantaporn
Student ID	64601107
Degree	Master of engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2024
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Teeraporn Suteewong

ABSTRACT

Polystyrene foam (EPS) has been widely used in many fields of work such as packaging, construction and transportation due to its outstanding physical properties. However, EPS is extremely flammable with LOI value of only 17.4% limiting further applications. EPS flammability may cause fire hazards as can be seen in many reports about fire accidents in many countries around the world. Therefore, improving fire performance of EPS is necessary. This thesis aims to synthesize a flame retardant coating with phenolic resin as a matrix and aluminum powder and ammonium polyphosphate (APP) as additives. Direct burning with butane spray torch was employed to investigate the effects of each component. It was found that solely using APP or aluminum powder cannot provide effective flame retardant protection. Thus, the combination of APP and aluminum powder yields a synergistic system. Scanning electron microscope (SEM-EDS) of coated EPS beads show that all samples are uniformly coated. Elemental mapping illustrates good distribution of silicon and aluminum all over EPS beads. The LOI value of EPS sample has been increased for maximum 40% by flame retardant that contains 4% of aluminum powder. Char density increases with increasing aluminum powder up to 4%. Thermal stability analyzed by the Thermogravimetric analyzer (TGA) also increases with increasing aluminum powder with 43% char remaining at 700 °C. Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis confirm the decomposition of silicone and the formation of aluminum silicate.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยคำแนะนำของอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. อีรพร สุธีวงศ์ ที่คอยให้คำปรึกษาที่ดีเสมอมา ช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงช่วยเหลือด้านอุปกรณ์และเครื่องมือในการทำงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากกองทุนวิจัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเลขที่ทุน KREF016423

ขอขอบคุณบริษัท ไทยโอโซวอลล์ จำกัดที่อนุเคราะห์สถานที่และอุปกรณ์ รวมทั้งให้คำแนะนำในการทำทดลอง

ขอบคุณพ่อ แม่และคนในครอบครัวที่คอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา



ภาณุพงศ์ ปรีภักขารณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 โฟมโพลีสไตรีน (Expandable Polystyrene Foam: EPS).....	4
2.2 การเผาไหม้ (Burning).....	5
2.2.1 Limiting Oxygen Index (LOI).....	6
2.2.2 ขอบเขตของการจุดติดไฟ (Flammable Limit).....	6
2.3 สารหน่วงไฟ (Flame Retardant).....	6
2.3.1 กลไกการหน่วงไฟ.....	7
2.3.2 การเติมสารหน่วงไฟสำหรับโฟมโพลีสไตรีน	8
2.4 การทดสอบการลามไฟ (UL-94).....	9
2.4.1 การทดสอบการเผาไหม้ในแนวนอน (Horizontal Burning Test).....	9
2.4.2 การทดสอบการลามไฟในแนวตั้ง (Vertical Burning Test)	9
บทที่ 3 ขั้นตอนการทดลอง	11
3.1 สารเคมี วัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 สารเคมีและวัสดุ.....	11
3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	11
3.2 การเตรียมแผ่นโพลีเมอร์.....	12
3.2.1 การเตรียมเม็ดโพลีเมอร์.....	12
3.2.2 การเตรียมสารเคลือบ.....	12
3.2.3 การเตรียมโพลีโพลีสไตรีนที่เคลือบสารหน่วงไฟในแลปสเกล.....	13
3.3 การศึกษาสมบัติการทนไฟของโพลีโพลีสไตรีนหลังเคลือบสารหน่วงไฟโดยการเผาไฟโดยตรงด้วยหัวพ่นไฟ.....	13
3.4 การศึกษาสมบัติการลุกติดไฟและการลามไฟของโพลีโพลีสไตรีนหลังเคลือบสารหน่วงไฟโดยวัดค่าออกซิเจนต่ำสุดก่อนลุกไหม้ (Limiting Oxygen Index: LOI) และการลามไฟในแนวตั้ง (Vertical Burning Test: UL-94).....	14
3.4.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบค่าออกซิเจนต่ำสุดก่อนลุกไหม้.....	15
3.4.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบการลามไฟในแนวตั้ง.....	15
3.5 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดโพลีเมอร์หลังเคลือบด้วยสารหน่วงไฟและความเข้ากันได้ของสารหน่วงไฟผ่านการกระจายตัวของธาตุบนผิวเม็ดโพลีเมอร์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวิเคราะห์ธาตุ (Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectrometer: SEM-EDS).....	15
3.6 การศึกษาสัณฐานวิทยาของถ่านหลังการเผาไหม้โดยใช้ SEM.....	16
3.7 การศึกษาเสถียรภาพต่อความร้อนและพฤติกรรมการสลายตัวของโพลีโพลีสไตรีนหลังเคลือบด้วยสารหน่วงไฟด้วย Thermogravimetric Analyzer (TGA).....	16
3.8 การศึกษาพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างเผาไหม้โดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR).....	17
3.9 องค์ประกอบสารเคลือบหน่วงไฟ.....	17
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	19
4.1 วิเคราะห์สมบัติการทนไฟของโพลีโพลีสไตรีนหลังเคลือบสารหน่วงไฟโดยการเผาไฟโดยตรงด้วยหัวพ่นไฟ.....	19
4.1.1 ประสิทธิภาพการหน่วงไฟของโพลีเมอร์ที่เคลือบด้วยฟีนอลิกเรซินชนิดกระจายตัวในน้ำ... ..	19
4.1.2 การทดสอบฟีนอลิกเรซินชนิดละลายในแอลกอฮอล์.....	20

4.1.3 การทดสอบประสิทธิภาพการหน่วงไฟของ APP	21
4.1.4 การทดสอบผลของผงอลูมิเนียมที่มีต่อประสิทธิภาพการหน่วงไฟ.....	22
4.2 วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดโพลีเมอร์ที่เคลือบด้วยสารหน่วงไฟและความเข้ากันได้ ของสารหน่วงไฟผ่านการกระจายตัวของธาตุบนผิวเม็ดโพลีเมอร์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราดและวิเคราะห์ธาตุ (SEM-EDS).....	24
4.3 วิเคราะห์สมบัติการลุกติดไฟและการลามไฟของโพลีโพลีสไตรีนหลังเคลือบสารหน่วงไฟโดย การวิเคราะห์ค่าออกซิเจนต่ำสุดก่อนลุกไหม้ (LOI) และการลามไฟในแนวตั้ง (UL-94).....	25
4.4 วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของถ่านหลังการเผาไหม้โดยใช้ SEM.....	26
4.5 เสถียรภาพต่อความร้อนและพฤติกรรมการสลายตัวของสารหน่วงไฟด้วย Thermogravimetric Analyzer (TGA).....	28
4.6 การศึกษาพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างเผาไหม้โดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)	32
4.7 วิเคราะห์กลไกของสารหน่วงไฟที่สังเคราะห์ขึ้น.....	34
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	35
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	35
5.2 ข้อเสนอแนะ	36
บรรณานุกรม	37
ภาคผนวก	43
ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดลอง	44
ภาคผนวก ข รูปภาพที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง	46
ภาคผนวก ค การคำนวณที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	50
ประวัติผู้เขียน	51

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 มาตรฐานการเผาไหม้ในแนวนอน UL-94	9
2.2 มาตรฐานการลามไฟในแนวตั้ง UL-94.....	10
3.1 องค์ประกอบและอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารเคลือบผนังไฟเปรียบเทียบชนิดพินอลิกเรซิน .	18
3.2 องค์ประกอบและอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารเคลือบผนังไฟ.....	18
4.1 ค่า LOI และระดับ UL-94 ของโพลีโพลิสไตรีนที่เคลือบสารผนังไฟที่สูตรต่างกัน	25
4.2 รายละเอียดค่าที่สำคัญจากการทดสอบ TGA ของตัวอย่างโพลีโพลิสไตรีน.....	29
ก.1 องค์ประกอบและอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารเคลือบผนังไฟเปรียบเทียบผลของ Diammonium phosphate (DAP)	44
ก.2 องค์ประกอบและอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารเคลือบผนังไฟเปรียบเทียบผลของ Ammonium polyphosphate (APP).....	44
ก.3 องค์ประกอบและอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารเคลือบผนังไฟเปรียบเทียบผลของชนิดของแหล่ง ซิลิกา.....	44
ก.4 องค์ประกอบและอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารเคลือบผนังไฟเปรียบเทียบผลของผงอลูมิเนียม (Al).....	45
ค.1 การประเมินราคาของสารผนังไฟ EPS-PF202/APP/Silicone/Al02.....	50
ค.2 การประเมินราคาของสารผนังไฟ EPS-PF202/APP/Silicone/Al04.....	50

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างโพลีสไตรีน	4
2.2 สามเหลี่ยมแห่งไฟ.....	5
2.3 โครงสร้างโมเลกุลของโพลีสไตรีนที่มีการเติมโบรมีน.....	8
3.1 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับทดสอบสมบัติการทนไฟของโพลีสไตรีนที่เคลือบสารหน่วงไฟด้วยการเผาไฟโดยตรงด้วยหัวพ่นไฟ.....	14
3.2 ตัวอย่างโพลีขนาด $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$ หลังจากออกมาจากเตาเผาสำหรับทดสอบ SEM	16
4.1 แผ่นโพลีที่เคลือบด้วยฟีนอลิกเรซินชนิดกระจายตัวในน้ำก่อนและหลังการเผาโดยตรง	19
4.2 โพลีที่เคลือบด้วย PF-202 (a) ก่อนเผา (b) หลังเผาด้านหน้า (c) ด้านหลัง และ (d) ด้านบน....	20
4.3 โพลีที่เคลือบด้วย PF-205 (a) ก่อนเผา (b) หลังเผาด้านหน้า (c) ด้านหลัง และ (d) ด้านบน....	21
4.4 โพลีที่เคลือบด้วยสารที่มี APP (a) ก่อนเผา (b) หลังเผาด้านหน้า (c) ด้านหลัง และ (d) ด้านบน	22
4.5 โพลีที่เคลือบด้วยสารที่มีผงอลูมิเนียม (a) ก่อนเผา (b) หลังเผาด้านหน้า (c) ด้านหลัง และ (d) ด้านบน.....	23
4.6 ภาพถ่าย SEM และ Elemental mapping ของธาตุซิลิกอน (Si) และอลูมิเนียม (Al) ของ (a) EPS-PF202/APP/Silicone/Al01, (b) EPS-PF202/APP/Silicone/Al02, (c) EPS-PF202/APP/Silicone/Al04 และ (d) EPS-PF202/APP/Silicone/Al08	24
4.7 ภาพถ่าย SEM ของถ่านที่เหลืออยู่หลังจากการเผาที่อุณหภูมิ $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 10 นาทีของ (a) EPS-PF202/APP/Silicone/Al0 1 (b) EPS-PF202/APP/Silicone/Al0 2 (c) EPS-PF202/APP/Silicone/Al04 และ (d) EPS-PF202/APP/Silicone/Al08 ที่กำลัง ขยาย 50(ซ้าย) 500(กลาง) และ 5000(ขวา) เท่า	27
4.8 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ (a) TGA และ (b) DTG ของตัวอย่างโพลีสไตรีนและสารหน่วงไฟ	30
4.9 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ FTIR ของ (a) EPS-PF202/APP/Silicone/Al04 และ (b) ถ่านหลังการเผาของ EPS-PF202/APP/Silicone/Al04	33
4.10 ภาพแสดงกลไกของสารหน่วงไฟ.....	34
ข.1 โพลีที่เคลือบด้วยสารหน่วงไฟที่มี Diammonium phosphate (DAP) 5%	46
ข.2 โพลีที่เคลือบด้วยสารหน่วงไฟที่มี Diammonium phosphate (DAP) 10%	46
ข.3 โพลีที่เคลือบด้วยสารหน่วงไฟที่มี Diammonium phosphate (DAP) 15%	46
ข.4 โพลีที่เคลือบด้วยสารหน่วงไฟที่มี Ammonium polyphosphate (APP) 10%	47
ข.5 โพลีที่เคลือบด้วยสารหน่วงไฟที่มี Ammonium polyphosphate (APP) 20%	47

ข.6 โฟมที่เคลือบด้วยสารหน่วงไฟที่มี Fly ash (FA) 5%	47
ข.7 โฟมที่เคลือบด้วยสารหน่วงไฟที่มี Fumed silica (FS) 2%.....	48
ข.8 โฟมที่เคลือบด้วยสารหน่วงไฟที่มี Micro silica (MS) 2%	48
ข.9 โฟมที่เคลือบด้วยสารหน่วงไฟที่มี Silicone 10%	48
ข.10 โฟมที่เคลือบด้วยสารหน่วงไฟที่มีผงอลูมิเนียม 2%.....	49
ข.11 โฟมที่เคลือบด้วยสารหน่วงไฟที่มีผงอลูมิเนียม 4%.....	49



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

โพลีโพลีสไตรีน (Expandable Polystyrene: EPS) เป็นวัสดุโพลีเมอร์ที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายในชีวิตประจำวันและอุตสาหกรรม เช่น เฟอร์นิเจอร์ บรรจุภัณฑ์ การก่อสร้าง และการขนส่ง เป็นต้น เนื่องจากโพลีโพลีสไตรีนมีสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ เช่น ลดแรงกระแทกได้ดี ทนต่อความชื้น น้ำหนักเบา เป็นฉนวนความร้อน และมีราคาถูก [1-3] อย่างไรก็ตามโพลีโพลีสไตรีนมีความไวไฟสูง หากถูกไหม้เปลวไฟจะลุกลามอย่างรวดเร็วและดับลงได้ยาก มีค่าออกซิเจนต่ำสุดก่อนลุกไหม้ (Limiting Oxygen Index: LOI) เพียง 17% และไม่ผ่านตรรกษินี้ได้ในการทดสอบการลามไฟในแนวตั้ง (Vertical Burning Test: UL-94) [2,4] เพราะโพลีโพลีสไตรีนประกอบด้วยโครงสร้างที่เป็นไฮโดรคาร์บอนจำนวนมากต่อกัน และมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่ใหญ่จากโพรงอากาศที่มีขนาดประมาณ 98% โดยปริมาตรภายในโครงสร้าง ทำให้การเผาไหม้ของโพลีโพลีสไตรีนปล่อยแก๊สอันตรายที่ทำลายสิ่งแวดล้อมและส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ [5,6] จากอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นในอดีต เช่น การเกิดไฟไหม้ที่โรงแรมเสียนหยางโรยัลที่ประเทศจีนในปี 2011 ทำให้เกิดความเสียหายประมาณ 300 ล้านหยวน [7] หรือในปี 2015 ที่เหอหนานประเทศจีนโพลีโพลีสไตรีนเกิดการลุกไหม้จากอุณหภูมิสูงของระบบไฟฟ้า ทำให้มีผู้เสียชีวิต 39 คนและอุบัติเหตุอีกหลายครั้งที่เกิดจากความไวไฟของโพลีโพลีสไตรีน [8,9] ดังนั้นการป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นจากอุบัติเหตุทางไฟของโพลีโพลีสไตรีนจึงเป็นสิ่งจำเป็น

การทำให้โพลีโพลีสไตรีนมีความทนไฟในยุคแรกนิยมใช้สารหน่วงไฟจำพวกฮาโลเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารประกอบของโบรมีน เช่น hexabromocyclododecane และ tetrabromoethane เป็นต้น เนื่องจากโบรมีนมีแรงยึดเหนี่ยวกับอะตอมของคาร์บอนที่ดำทำให้ระหว่างเผาไหม้อะตอมของโบรมีนที่หลุดออกมาเข้าไปจับกับอนุมูลอิสระที่จำเป็นในการเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ต่อเนื่องในอากาศทำให้ไฟดับลง [10-12] แต่ต่อมา พบว่า ผลกระทบที่เกิดจากสารหน่วงไฟจำพวกฮาโลเจนส่งผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์และสิ่งแวดล้อมและถูกห้ามใช้ในหลายประเทศทั่วโลก [13,14] ดังนั้นสารหน่วงไฟรูปแบบอื่นจึงจำเป็นต้องทดแทนสารหน่วงไฟที่ประกอบด้วยสารฮาโลเจนที่มีประสิทธิภาพและปลอดภัย

สารหน่วงไฟที่ไม่มีฮาโลเจนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมหลายชนิดถูกใช้เพื่อเป็นสารหน่วงไฟสำหรับโพลีโพลีสไตรีน สารอนินทรีย์จำพวกโลหะไฮดรอกไซด์ เช่น อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminum Hydroxide: ATH) หรือ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Magnesium Hydroxide: MH) เป็นกลุ่มสารที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในปัจจุบัน เพราะมีราคาถูกและประสิทธิภาพดี [15] สารจำพวกโลหะไฮดรอกไซด์ส่งผลต่อการดับไฟทั้งในเฟสของแข็งและเฟสแก๊ส โดยในเฟสของแข็งจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดปฏิกิริยาดูดความร้อนทำให้อุณหภูมิของวัสดุลดลง และปล่อยไอน้ำออกมาช่วยดับไฟในเฟสแก๊ส ด้วยการลดความเข้มข้นของไอเชื้อเพลิงในอากาศ ช่วยชะลอการเผาไหม้ [16,17] สารทั้งสองตัวออกฤทธิ์ในการหน่วงไฟในลักษณะเดียวกันแต่ MH ได้เปรียบในเรื่องช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่าแต่ในขณะเดียวกัน MH ต้องใช้ปริมาณมากกว่า ATH เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟ โดยต้องใช้ประมาณ 60% และ 50% โดยน้ำหนักตามลำดับ [16,18] เนื่องจากปริมาณที่ต้องใส่มากทำให้น้ำหนักนำไปใช้เป็นสารหน่วงไฟสำหรับโพลีเอสเตอร์อินทรีย์จึงลดทอนสมบัติทางกายภาพที่ดีของโพลีเอสเตอร์ผลให้โพลีเอสเตอร์และแตกหักง่ายเพื่อรักษาสมบัติทางกายภาพของโพลีเอสเตอร์เติมแต่งชนิดอื่นจึงควรเข้ามามีบทบาท

สารหน่วงไฟชนิดขยายตัว (Intumescent Flame Retardant) เป็นสารหน่วงไฟอีกหนึ่งชนิดที่ได้รับความนิยม เพราะมีประสิทธิภาพดีและสามารถทำได้ง่าย โดยพื้นฐานสารหน่วงไฟชนิดขยายตัวจำเป็นต้องประกอบด้วยโมเลกุลฟอสเฟต (Phosphate) และสารจำพวกโพลีออล (Polyol) โดยคู่สารที่ได้รับความนิยมและมีประสิทธิภาพดี คือ Ammonium Polyphosphate (APP) กับ Pentaerythritol (PER) และอาจเติมสารพวก Primary Amine เช่น Melamine เสริมประสิทธิภาพด้วย [19,20] สารหน่วงไฟชนิดขยายตัวเมื่อถูกเผาไหม้จะสร้างชั้นถ่านที่ฟูและหนาขึ้นเพื่อป้องกันวัสดุในชั้นลึกลงไปไม่ให้ถูกเผา จึงทำให้ไฟดับลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ [21] อย่างไรก็ตามชั้นถ่านที่เกิดจากสารหน่วงไฟชนิดนี้มีความเปราะและไม่สามารถควบคุมความฟูของชั้นถ่านได้ทำให้ไม่เหมาะสมกับงานที่ต้องใช้โพลีเมอร์ขนาดใหญ่ เช่น การก่อสร้าง เพราะชั้นถ่านที่ไม่แข็งแรงอาจทำให้เกิดการพังของโครงสร้างได้

มีการศึกษาการใช้ผงอะลูมิเนียมเพื่อลดน้ำหนักของคอนกรีตความหนาแน่นต่ำโดยแทนที่ทรายซิลิกาบางส่วนซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่า พบว่า สมบัติทางกายภาพโดยรวมของคอนกรีตความหนาแน่นต่ำลดลงเพียงเล็กน้อยแต่ทำให้ได้คอนกรีตที่น้ำหนักเบาขึ้น [22] ซึ่งเหมาะสมอย่างมากกับการนำมาประยุกต์ใช้กับสารเคลือบสำหรับโพลีเอสเตอร์อินทรีย์ซึ่งสามารถเสริมความแข็งแรงให้โพลีเอสเตอร์อินทรีย์ รวมถึงต้องคงไว้ซึ่งสมบัติของโพลีเอสเตอร์อินทรีย์ให้น้ำหนักเบา

ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งจะศึกษาผลของผงอะลูมิเนียมและแอมโมเนียมโพลีฟอสเฟตที่มีต่อประสิทธิภาพการหน่วงไฟของโพลีเอสเตอร์อินทรีย์ที่มีฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin: PF) เป็นเมทริกซ์เพื่อที่จะสังเคราะห์สารเคลือบหน่วงไฟที่มีประสิทธิภาพดีโดยทำการวิเคราะห์ด้วย Limiting oxygen index (LOI) การลามไฟ (UL-94) สัญฐานวิทยา และเสถียรภาพต่อความร้อน รวมทั้งศึกษากลไกการทำงานของสารหน่วงไฟที่สังเคราะห์ขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อสังเคราะห์สารหน่วงไฟสำหรับโพลีเอสเตอร์อินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพดีและมีราคาถูกเหมาะสมกับการใช้ในเชิงอุตสาหกรรมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เพื่อศึกษากลไกการหน่วงไฟของสารเคลือบหน่วงไฟที่สังเคราะห์ขึ้น

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สารหน่วงไฟที่ต้องการสังเคราะห์มีพินอลิกเรซินเป็นพื้นฐานและมีการเติมสารออกฤทธิ์ในการหน่วงไฟ คือ APP และมีการเติมผงอลูมิเนียมในปริมาณที่แตกต่างกันทั้งหมด 4 ความเข้มข้น ได้แก่ 1% 2% 4% และ 8% โดยน้ำหนัก
2. วิเคราะห์กลไกการหน่วงไฟของสารเคลือบผ่านการทดสอบด้วยเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ ได้แก่ การเผาโดยตรงด้วยหัวพันไฟ การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและวิเคราะห์ธาตุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM-EDS) การวิเคราะห์การลุกติดไฟและการลามไฟด้วย Limiting oxygen index (LOI) และ Vertical burning test (UL-94) การวิเคราะห์เสถียรภาพต่ออุณหภูมิด้วย Thermogravimetric analyzer (TGA) และวิเคราะห์พันธะที่เกิดขึ้นระหว่างเผาไหม้ด้วย Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) โดยจะศึกษาจนถึงผลของผงอลูมิเนียมที่ปริมาณต่างกันซึ่งส่งผลต่อชั้นถ่านที่เกิดขึ้นและประสิทธิภาพการหน่วงไฟ

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. สูตรสารเคลือบหน่วงไฟที่ใช้กับโพลีโอสไตรีนได้ดีและมีราคาถูกเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ต่อยอดในเชิงอุตสาหกรรม
2. เข้าใจกลไกในการหน่วงไฟของสารหน่วงไฟที่สังเคราะห์ขึ้น รวมถึงเข้าใจผลของการเติมผงอลูมิเนียม

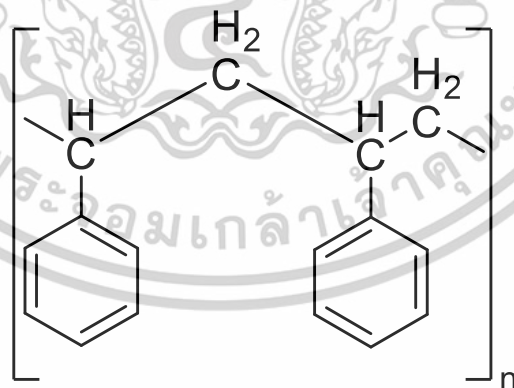
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

หัวข้อนี้มีเนื้อหาเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย โดยเน้นสร้างความเข้าใจเกี่ยวกับโพลีโพลิสไตรีน การหน่วงไฟ ความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับการติดไฟ รวมถึงมาตรฐานการทดสอบที่ควรรู้

2.1 โพลีโพลิสไตรีน (Expandable Polystyrene Foam: EPS)

โพลีโพลิสไตรีนเป็นวัสดุโพลีเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ที่สร้างจากการขยายตัวมาจากเม็ดโพลิสไตรีนดิบซึ่งกำหนดขนาดและรูปร่างด้วยแม่พิมพ์ โดยโครงสร้างโมเลกุลของโพลิสไตรีนถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 2.1 เม็ดโพลิสไตรีนดิบจะถูกอัดด้วยสารช่วยขยายตัว (Blowing Agent) ซึ่งโดยทั่วไป คือ เฮกเซน (Hexane) และเพนเทน (Pentane) ซึ่งจะถูกระเหยออกไปในตอนขึ้นรูปกระบวนการในการขึ้นรูป EPS แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ 1) Pre-expansion 2) การพักเม็ดโฟม 3) การขึ้นรูป เม็ดโพลิสไตรีนดิบถูกให้ความร้อนด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิมากกว่า 90°C เนื้อของวัสดุจะอ่อนตัวลงและสารช่วยขยายตัวจะเปลี่ยนสถานะเป็นแก๊สดันให้เม็ดโพลิสไตรีนขยายตัวขึ้น 20-50 เท่าจากขนาดเดิมเม็ดโฟมในขั้นตอนนี้จะเรียกว่า Pre-expanded จากนั้นจะถูกพักไว้เป็นระยะเวลาหนึ่งเพื่อให้เม็ดโฟมเซ็ทตัวเต็มที่ก่อนจะใช้งานต่อ เมื่อต้องการขึ้นรูปจะนำเม็ด Pre-expanded ที่พักไว้เรียบร้อยแล้วเข้าไปในแม่พิมพ์แล้วให้ความร้อนด้วยไอน้ำเม็ดโฟมจะขยายตัวอีกครั้งหนึ่งจนเต็มแม่พิมพ์และได้โฟม EPS ตามขนาดและรูปร่างที่กำหนดไว้ [21,23]



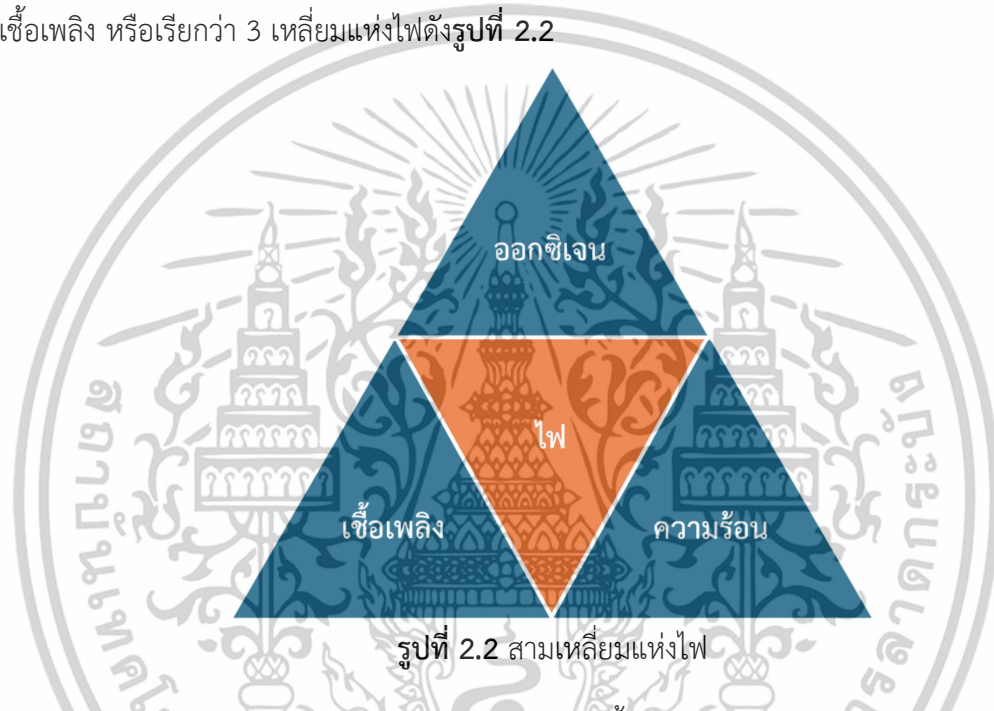
รูปที่ 2.1 โครงสร้างโพลิสไตรีน

โฟม EPS มีโครงสร้างที่โปร่งเบาประกอบด้วยอากาศประมาณ 95-98% โดยปริมาตรและมีองค์ประกอบที่เป็นไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) ทำให้โฟม EPS มีสมบัติทางกายภาพที่ดี คือ มีน้ำหนักเบา, มีความเหนียวไม่เปราะแตกง่าย, เป็นฉนวนความร้อน, ดูดซับเสียงและแรงกระแทก แต่ในขณะเดียวกันก็ทำให้โฟม EPS ไวไฟอย่างมาก จากผลการทดสอบสมบัติด้านไฟของโฟม EPS เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

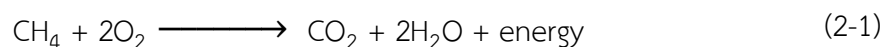
พบว่า มีค่าออกซิเจนต่ำสุดก่อนลุกไหม้ (Limiting Oxygen Index: LOI) เพียง 17% และผลการทดสอบการลามไฟในแนวตั้งที่ไม่ผ่านมาตรฐาน [2] โดยกระบวนการติดไฟและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะถูกอธิบายในหัวข้อถัดไป

2.2 การเผาไหม้ (Burning)

การเผาไหม้ คือ ปฏิกิริยาที่เกิดจากการสันดาบต่อเนื่อง (Chain Combustion Reaction) ระหว่างออกซิเจนกับเชื้อเพลิงและปลดปล่อยพลังงานความร้อนและแสง (Exothermic Reaction) ทำให้สิ่งที่เป็นในกระบวนการเผาไหม้ของวัสดุประกอบด้วย 3 สิ่ง คือ ออกซิเจน, ความร้อน และเชื้อเพลิง หรือเรียกว่า 3 เหลี่ยมแห่งไฟดังรูปที่ 2.2

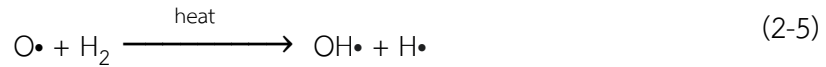
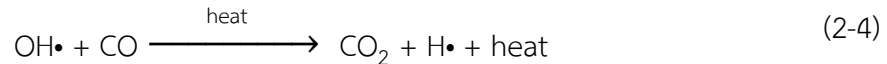


โดยกระบวนการเผาไหม้ของวัสดุโพลิเมอร์จะเกิดขึ้นใน 3 เฟส คือ condensed, mesophase และ gas โดย mesophase คือ ส่วนที่อยู่ระหว่าง condensed และ gas ในช่วงระหว่างการเผาไหม้ โดยในเฟสนี้จะเป็นส่วนที่เกิดการสลายตัวของโพลิเมอร์ (Degradation) หรือเกิดขึ้นถ่าน (Charring) ซึ่งการเผาไหม้จะเริ่มเมื่อวัสดุโพลิเมอร์ได้รับความร้อนที่มากพอจะเกิดการสลายตัวของโพลิเมอร์ทำให้เกิดไอระเหยและถ่ายเทพลังงานไปในอากาศ เชื้อเพลิงที่ระเหยจะผสมกับอากาศ ของผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศซึ่งจะเป็นส่วนที่เกิดการเผาไหม้ต่อเนื่อง [24] โดยปฏิกิริยาสุทธิของการเผาไหม้แสดงดังสมการที่ 2-1



ในขณะเดียวระหว่างการเผาไหม้จะเกิดปฏิกิริยาพร้อมๆกันนับร้อยปฏิกิริยาแต่ปฏิกิริยาที่สำคัญที่เกิดขึ้นในอากาศซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ทำให้การลุกไหม้ไม่สามารถหยุดลงได้เองหากยังมีเชื้อเพลิงเหลืออยู่ ในขณะเดียวกันก็เป็นปฏิกิริยาที่เราสามารถแทรกแซงได้เพื่อให้ไฟดับซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป โดยปฏิกิริยาถูกแสดงไว้ที่ สมการที่ 2-2 ถึงสมการที่ 2-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



โดย RH คือ เชื้อเพลิง เช่น มีเทน (CH_4) การเผาไหม้จะเริ่มจากการสลายตัวของเชื้อเพลิงซึ่งส่วนใหญ่เป็นไฮโดรคาร์บอนจะผลิตอนุมูลไฮโดรเจนดังสมการที่ 2-2 ซึ่งอนุมูลไฮโดรเจนจะเข้าจับตัวกับโมเลกุลออกซิเจนในอากาศเกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกไซด์และอนุมูลออกซิเจนดังสมการที่ 2-3 ซึ่งอนุมูลทั้งสองตัวจะทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อดังสมการที่ 2-4 และ 2-5 ซึ่งจะผลิตอนุมูลไฮโดรเจนซึ่งเป็นสารตั้งต้นของสมการที่ 2-3 รวมถึงผลิตความร้อนด้วย ทำให้การเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain reaction) ทำให้ไฟที่เกิดขึ้นจะเผาไหม้ไปเรื่อยๆ จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่าสิ่งที่จำเป็นต่อการเผาไหม้ประกอบด้วย เชื้อเพลิง ออกซิเจน และความร้อน ซึ่งเป็นที่มาของสามเหลี่ยมแห่งไฟนั่นเอง องค์ประกอบเหล่านี้จะเป็นส่วนที่จะถูกกำจัดหรือถูกแยกออกจากกันเพื่อให้ไฟดับลงด้วยกลไกการทำงานของสารหน่วงไฟแต่ละชนิด กลไกเหล่านี้จะถูกอธิบายในหัวข้อต่อไป

2.2.1 Limiting Oxygen Index (LOI)

Limiting Oxygen Index คือ ความเข้มข้นต่ำสุดของออกซิเจนในอากาศที่จะทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาสันดาปได้โดยจะมีค่ามากน้อยแตกต่างกันไปตามวัสดุหรือสารแต่ละตัว ซึ่งค่านี้เป็นหนึ่งในค่าที่สำคัญที่วัดเพื่อบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการหน่วงไฟของวัสดุนั้นโดยในภาวะปกติความเข้มข้นของออกซิเจนในอากาศอยู่ที่ประมาณ 21% วัสดุที่มีค่า LOI ที่ต่ำกว่า 21% จึงเป็นวัสดุที่มีความไวไฟ ในขณะที่เดียวกันหากสามารถเพิ่มค่า LOI ให้สูงกว่า 21% ได้มากวัสดุนั้นก็จะมีประสิทธิภาพการหน่วงไฟที่ดี

2.2.2 ขอบเขตของการจุดติดไฟ (Flammable Limit)

ขอบเขตของการจุดติดไฟ คือ ช่วงความเข้มข้นของแก๊สหรือไอในอากาศที่ทำให้สารนั้นสามารถจุดติดไฟได้ โดยสารแต่ละตัวจะประกอบด้วย Lower Flammable Limit (LFL) ซึ่งคือความเข้มข้นของแก๊สหรือไอในอากาศต่ำสุดที่ทำให้สารนั้นสามารถจุดติดไฟได้ และ Upper Flammable Limit (UFL) คือความเข้มข้นของแก๊สหรือไอในอากาศสูงสุดที่ทำให้สารนั้นสามารถจุดติดไฟได้ ความเข้มข้นของแก๊สหรือไอในอากาศที่สามารถจุดติดไฟได้จึงต้องอยู่ระหว่าง LFL และ UFL

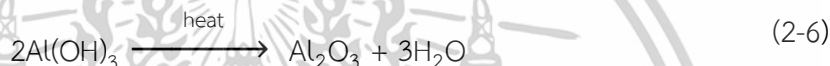
2.3 สารหน่วงไฟ (Flame Retardant)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารหน่วงการติดไฟ คือ สารที่เมื่อสัมผัสไฟหรือความร้อนจะเกิดกลไกบางอย่างในการกำจัดองค์ประกอบในการติดไฟ เช่น กำจัดเชื้อเพลิงไม่ให้สัมผัสกับออกซิเจน เจือจางออกซิเจนในอากาศจนไม่พอที่จะทำให้ไฟติด หรือป้องกันการไหลของเชื้อเพลิงจากเฟสของแข็งให้ออกไปสู่อากาศ เป็นต้น เพื่อไม่ให้ไฟเกิดการลุกลามและดับในที่สุดโดยกลไกหลักที่สำคัญของการหน่วงไฟมีดังนี้ [11]

2.3.1 กลไกการหน่วงไฟ

1. เกิดปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic Degradation) เมื่อสารหน่วงการติดไฟสัมผัสกับความร้อนจะเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อนโดยส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ของโลหะ ยกตัวอย่างเช่น Aluminum hydroxide, Magnesium hydroxide เป็นต้น ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของ Aluminum hydroxide แสดงดังสมการที่ 2-6



2. เจือจางเชื้อเพลิง (Dilution of Fuel) เมื่อสารหน่วงการติดไฟสัมผัสกับความร้อนจะปล่อยแก๊สเฉื่อยเพื่อเจือจางไอระเหยของเชื้อเพลิงให้ลดลงจนต่ำกว่าขอบเขตของการจุดติดไฟ คือ ลดลงให้ต่ำกว่า LEL ของสารนั้น เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ที่จะถูกปล่อยออกมาเมื่อแคลเซียมคาร์บอเนต ได้รับความร้อน หรือแอมโมเนียที่ถูกปล่อยออกมาจากการสลายตัวของ APP เป็นต้น



3. ป้องกันความร้อน (Thermal Shielding) เมื่อสารหน่วงการติดไฟสัมผัสกับความร้อนจะเกิดการขยายตัวเป็นชั้นถ่านกั้นระหว่างเชื้อเพลิงที่ไหม้และเชื้อเพลิงที่ยังไม่ไหม้ซึ่งส่วนใหญ่มีสมบัติเป็นฉนวนความร้อนเพื่อป้องกันการสัมผัสกับเปลวไฟของเชื้อเพลิงที่ยังไม่ไหม้ และ ลดการถ่ายเทความร้อนไปสู่เชื้อเพลิงที่ยังไม่ไหม้ รวมทั้งลดการกลายเป็นไอของเชื้อเพลิงทำให้ไฟไม่ลุกลามและขาดเชื้อเพลิงทำให้ไฟดับ
4. ลดการปล่อยไอระเหยของเชื้อเพลิง (Lesser Release of Flammable Volatiles) เมื่อสารหน่วงการติดไฟสัมผัสกับความร้อนจะเร่งให้เกิดปฏิกิริยา pyrolysis แทนการเกิดปฏิกิริยาสันดาป เพื่อลดการเกิดไอระเหยของเชื้อเพลิงและทำให้เกิดชั้นถ่านบนวัสดุได้ดีขึ้น
5. จับอนุมูลในสถานะแก๊ส (Gas Phase Radical Quenching) เมื่อสารหน่วงการติดไฟสัมผัสกับความร้อนจะปล่อย ไฮโดรเจนคลอไรด์ หรือ ไฮโดรเจนโบรไมด์ เพื่อไปทำปฏิกิริยากับอนุมูลไฮโดรเจน และ อนุมูลไฮดรอกไซด์ในเปลวไฟซึ่งเป็นอนุมูลที่ไวต่อปฏิกิริยาซึ่งคือการเข้าไปแทรกแซงปฏิกิริยาที่จะทำให้เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่องที่แสดงไว้ในสมการที่ 2-2 ถึง 2-5 ได้ผลิตภัณฑ์เป็นอนุมูลคลอไรด์หรืออนุมูลโบรไมด์ซึ่งเฉื่อยต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยามากกว่าและมีพลังงานน้อยกว่าอนุภาคไฮโดรเจนและอนุภาคไฮดรอกไซด์ ทำให้ไม่เกิดปฏิกิริยาสันดาปต่อเนื่อง กลไกนี้ได้รับความนิยมในยุคแรกของการคิดค้นสารหน่วงไฟเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงและราคาถูกแต่ในปัจจุบันได้ลดการใช้สารจำพวก halogen ลงเนื่องจากมันส่งผลเสียต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม [25]

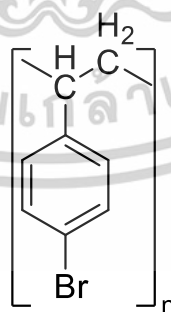


สารหน่วงไฟที่ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องในปัจจุบันแสดงให้เห็นว่าสารหน่วงไฟที่ดีนั้นไม่ควรมีเพียงกลไกเดียวในการทำงานแต่เป็นการใช้กลไกข้างต้นมาช่วยส่งเสริมกันเพื่อประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดีและเสถียร นอกจากนี้ประสิทธิภาพการหน่วงไฟไม่ใช่เพียงสมบัติเดียวที่ต้องการจากสารหน่วงไฟ แต่รวมไปถึงสมบัติเสริมอื่นๆ เช่น การลดการผลิตควันและการเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้าง [26–28] ซึ่งวิธีการเติมสารหน่วงไฟให้กับโพลีโพลีสไตรีนสามารถทำได้หลายวิธีซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

2.3.2 การเติมสารหน่วงไฟสำหรับโพลีโพลีสไตรีน

การเติมสารหน่วงไฟสำหรับโพลีโพลีสไตรีนสามารถทำได้ 3 วิธีแบ่งตามช่วงเวลาที่เติมสารหน่วงไฟให้กับโพลีโพลีสไตรีนซึ่งแต่ละวิธีอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการหน่วงไฟรวมถึงความซับซ้อนของกระบวนการผลิตด้วย

1. เติมสารหน่วงไฟในขั้นตอนโพลิเมอไรเซชัน (Polymerization) วิธีนี้จะเติมสารหน่วงไฟหรือโมเลกุลที่มีฤทธิ์หน่วงไฟเข้าไปแทรกอยู่ในโมเลกุลของโพลีสไตรีนตั้งแต่ขั้นตอนการสังเคราะห์โพลีสไตรีน ซึ่งอาจจะเข้าไปในโครงสร้างของโพลีสไตรีนโดยตรง เช่น การเติมโบรมีน (Bromine: Br) เข้าไปอยู่เป็นแขนในโครงสร้าง [29] หรือไม่ได้เข้าไปยุ่งกับโครงสร้างโดยตรง เช่น การเติมอนุภาคนาโนที่มีผลหน่วงไฟเข้าไปก่อนจะเกิด polymerization แล้วทำให้อนุภาคนั้นถูกขังอยู่ในโครงสร้างด้วย เช่น silica nanoparticle เป็นต้น [30,31]



รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของโพลีสไตรีนที่มีการเติมโบรมีน

2. เติมสารหน่วงไฟในขั้นตอนขึ้นรูป (Foaming) วิธีนี้จะเติมสารหน่วงไฟเข้าไปในขั้นตอนก่อนจะขึ้นรูปโฟมด้วยการเคลือบสารหน่วงไฟนี้ลงบนเม็ดโฟมแต่ละเม็ดด้วยสารที่มีฤทธิ์หน่วงไฟ เช่น สารจำพวกโลหะไฮดรอกไซด์อย่าง อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์และแมกนีเซียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮดรอกไซด์ เป็นต้น และถูกเคลือบไว้กับเม็ดโฟมด้วยสารยึดติด (Adhesive) โดยทั่วไปจะเป็นเรซิน เช่น ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin) และเมลามีนเรซิน (Melamine resin) เป็นต้น [32,33]

3. เติมสารห่วงไฟหลังจากขึ้นรูป (Post-process) วิธีนี้จะเติมสารห่วงไฟให้กับโฟมโพลิสไตรีนในตอนหลังจากขึ้นโฟมเป็นชิ้นงานเสร็จแล้ว เช่น การทาสารห่วงไฟลงบนแผ่นโฟม หรือการจุ่มแผ่นโฟมลงในสารห่วงไฟ เป็นต้น [14]

2.4 การทดสอบการลามไฟ (UL-94)

UL-94 คือ มาตรฐานที่ใช้วัดความสามารถในการลุกไหม้ การลามของไฟ และการดับของไฟ ทั้งในแนวตั้งและแนวนอนของวัสดุขึ้นตัวอย่าง โดยขนาดมาตรฐานตาม ASTM D3801 ของตัวอย่างจะอยู่ที่ความยาว 125 ± 5 มิลลิเมตร ความกว้าง 13 ± 0.5 มิลลิเมตรและหนาไม่เกิน 13 มิลลิเมตร [34]

2.4.1 การทดสอบการเผาไหม้ในแนวนอน (Horizontal Burning Test)

การทดสอบการเผาไหม้ในแนวนอนทำได้โดยเตรียมตัวมาตรฐานและขีดเส้น 2 เส้นที่ขนานกันโดยเส้นแรกห่างจากปลายด้านเปิด 25 ± 1 มิลลิเมตร และเส้นที่ 2 ห่างจากปลายด้านเปิด 100 ± 1 มิลลิเมตร วางบนตะแกรงลวด เตรียมไฟจากแก๊สมีเทนที่อัตราการไหล 105 มิลลิเมตรต่อนาที ความสูงเปลวไฟสีน้ำเงินประมาณ 20 ± 1 มิลลิเมตรโดยโคนของเปลวไฟมีระยะห่างจากตัวอย่าง 10 ± 1 มิลลิเมตรและทำมุม $45 \pm 2^\circ$ กับตัวอย่าง เริ่มทดสอบโดยให้ความร้อนด้วยไฟเป็นระยะเวลา 30 ± 1 วินาทีหรือเมื่อไฟลามถึงเส้น 25 มิลลิเมตร (กรณีใช้เวลาน้อยกว่า 30 วินาที) ให้ทำการหยุดให้ความร้อน เริ่มจับเวลาเมื่อไฟลามไปถึง 25 มิลลิเมตรและวัดระยะเวลาการเผาไหม้หลังไฟดับ แล้วคำนวณความเร็วของการลามทำการทดสอบด้วยตัวอย่างทั้งหมด 3 ชิ้นโดยตัวอย่างจะได้มาตรฐานในกรณี ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานการเผาไหม้ในแนวนอน UL-94

ความหนาของตัวอย่าง (มิลลิเมตร)	ความเร็วของการลาม (มิลลิเมตรต่อนาที)	ระยะการลาม (มิลลิเมตร)	มาตรฐาน
น้อยกว่า 3	น้อยกว่า 40	มากกว่า 75	HB
3 ถึง 13	น้อยกว่า 75	มากกว่า 75	HB
-	-	น้อยกว่า 75	HB

2.4.2 การทดสอบการลามไฟในแนวตั้ง (Vertical Burning Test)

ทดสอบการลามไฟในแนวตั้งทำได้โดยเตรียมฝ้ายบริสุทธิ์ขนาด 50×50 มิลลิเมตรและหนาไม่เกิน 6 มิลลิเมตรวางบนฐานของชุดทดลอง หนีบตัวอย่างในแนวตั้งให้ปลายส่วนล่างอยู่เหนือเอกสารถือเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฝ้าย 300±10 มิลลิเมตร เตรียมไฟจากแก๊สมีเทนที่อัตราการไหล 105 มิลลิเมตรต่อนาทีความสูงเปลวไฟสีน้ำเงินประมาณ 20±1 มิลลิเมตรโดยโคนของเปลวไฟมีระยะห่างจากตัวอย่าง 10±1 มิลลิเมตร เริ่มทดสอบโดยให้ความร้อนด้วยไฟเป็นระยะเวลา 10±0.5 วินาที นำไฟออกจากตัวอย่างบันทึกเวลาที่เปลวไฟดับด้วยตัวเองในหน่วยวินาที (t_1) แล้วให้ความร้อนอีกครั้งที่ตำแหน่งเดิมเป็นระยะเวลาเท่าเดิมบันทึกเวลาที่เปลวไฟดับด้วยตัวเอง (t_2) และเวลาที่ตัวอย่างไม่เรืองแสง (t_3) ในหน่วยวินาทีทำการทดสอบด้วยตัวอย่างทั้งหมด 5 ชิ้น โดยตัวอย่างจะได้มาตรฐานดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานการลามไฟในแนวตั้ง UL-94

ตัวชี้วัด	V-0	V-1	V-2
t_1	น้อยกว่า 10 วินาที	น้อยกว่า 30 วินาที	น้อยกว่า 30 วินาที
t_1+t_2 รวมกันทั้ง 5 ชิ้น	น้อยกว่า 50 วินาที	น้อยกว่า 250 วินาที	น้อยกว่า 250 วินาที
t_2+t_3	น้อยกว่า 30 วินาที	น้อยกว่า 60 วินาที	น้อยกว่า 60 วินาที
เปลวไฟขึ้นไปถึงที่หนีบ	ไม่	ไม่	ไม่
ฝ้ายติดไฟจากหยดของตัวอย่าง	ใช่	ไม่	ไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาและพัฒนาสารเคลือบสำหรับโพลีเอสเตอร์เพื่อเสริมสมบัติการทนไฟให้กับโพลีเอสเตอร์ รวมถึงเสริมสมบัติทางกายภาพให้กับถ่านที่เกิดจากการเผาไหม้โดยใช้ผงอลูมิเนียมเป็นตัวช่วยเสริมความแข็งแรงและลดการยุบตัวของชั้นถ่าน โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. การศึกษาสมบัติการทนไฟของโพลีเอสเตอร์ที่เคลือบสารหน่วงไฟด้วยการเผาไฟ (Burning test) โดยตรงด้วยหัวพันไฟ
2. การศึกษาสมบัติการลุกติดไฟและการลามไฟของโพลีเอสเตอร์ที่เคลือบสารหน่วงไฟ
3. การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดโพลีเอสเตอร์ที่เคลือบด้วยสารหน่วงไฟและความเข้ากันได้ของสารหน่วงไฟ
4. การศึกษาสัณฐานวิทยาของถ่านหลังการเผาไหม้
5. การศึกษาเสถียรภาพต่อความร้อนและพฤติกรรมการสลายตัวของโพลีเอสเตอร์

3.1 สารเคมี วัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.1.1 สารเคมีและวัสดุ

1. เม็ดโพลีเอสเตอร์
2. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)
3. ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin) เกรด Commercial
4. เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) เกรด Laboratory
5. อะซิโตน (Acetone) เกรด Laboratory
6. โทลูอีน (Toluene) เกรด Laboratory
7. แอมโมเนียมโพลิฟอสเฟต (Ammonium polyphosphate: APP) เกรด Commercial ขนาดอนุภาค 10 ไมครอน
8. ไดเมทิลโคน (Dimethicone: DM-350) เกรด Cosmetic
9. ผงอลูมิเนียม (Aluminum powder) เกรด Commercial
10. กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) เกรด Laboratory

3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องชั่งน้ำหนัก
2. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)
3. เตาเผา (Muffle furnace)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เครื่องเป่าลม (Dryer)
5. ซ้อนพลาสติกหลายขนาด
6. เครื่องแก้ว เช่น ปีกเกอร์ งานเพาะเชื้อ และขวดเก็บสารเคมี
7. หม้อนึ่งความดันไอน้ำ (Autoclave)
8. ปิเปตและปิเปตปั๊ม (Pipette and Pipette pump)
9. กะละมังสแตนเลส
10. ปีกเกอร์พลาสติกหลายขนาด
11. ไม้ตีไซสแตนเลส
12. ซ้อนตักสารสแตนเลส (Spatula)
13. แก้วพลาสติกแบบ PETE
14. ถังร้อนใสโพลีโพรพิลีน

3.2 การเตรียมแผ่นโคม

3.2.1 การเตรียมเม็ดโคม

1. ชั่งน้ำหนักเม็ดโคมดิบตามปริมาณที่ต้องการ
2. นำเม็ดโคมใส่ภาชนะที่อากาศถ่ายเทได้สะดวกเพื่อไอน้ำจะสามารถผ่านเข้าและออก ภาชนะได้สะดวกในงานวิจัยนี้ใช้ปีกเกอร์พลาสติกที่เจาะรูรอบๆ
3. เติมน้ำกลั่นในปริมาณที่เหมาะสมในหม้อนึ่งความดันไอน้ำ (Autoclave)
4. เปิดใช้งานหม้อนึ่งความดันไอน้ำที่อุณหภูมิ 110 °C และระยะเวลา 2 นาทีเพื่ออุ่นหม้อนึ่ง ความดันไอน้ำให้มีอุณหภูมิเท่ากันทุกครั้งก่อนการใช้งาน
5. เมื่อครบเวลาให้เปิดฝาทหม้อนึ่งความดันไอน้ำออก
6. นำเม็ดโคมดิบในข้อ 2 ใส่เข้าไปในหม้อนึ่งความดันไอน้ำ
7. เปิดใช้งานหม้อนึ่งความดันไอน้ำที่อุณหภูมิ 110 °C และระยะเวลา 8 นาที
8. นำเม็ดโคมออกจากหม้อนึ่งความดันไอน้ำแล้วนำไปใส่ภาชนะที่มีความกว้างและกระจาย ตัวเม็ดโคมเพื่อให้ความชื้นที่เกาะติดอยู่กับเม็ดโคมระเหยออกไปได้ง่าย
9. พักเม็ดโคมไว้อย่างน้อย 1 ชั่วโมงเพื่อให้เม็ดโคมเซ็ทตัวเต็มที่และความชื้นหมดไป

3.2.2 การเตรียมสารเคลือบ

1. ชั่งฟีนอลิกเรซินปริมาณตามสูตร (ภาคผนวก ก.) ลงในแก้วพลาสติกแบบ PETE
2. เติมนีออน แอลกอฮอล์ความบริสุทธิ์ 95% ที่แช่เย็นลงไปผสมกับฟีนอลิกเรซินเพื่อให้ฟีนอลิกเรซินละลายได้ดี
3. คนผสมด้วยซ้อนตักสารสแตนเลสจนกว่าฟีนอลิกเรซินจะละลายหมดและเป็นเนื้อเดียวกัน
4. เติมน้ำและกวนให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เติม APP ปริมาณตามสูตรและคนให้เป็นเนื้อเดียวกัน
6. เติม Silicone ปริมาณตามสูตรและคนให้เป็นเนื้อเดียวกัน
7. เติมผงอลูมิเนียมปริมาณตามสูตรและคนให้เป็นเนื้อเดียวกัน พร้อมใช้สำหรับขั้นตอนต่อไป

3.2.3 การเตรียมโพลีโพลิสไตรีนที่เคลือบสารหน่วงไฟในแลปสเกล

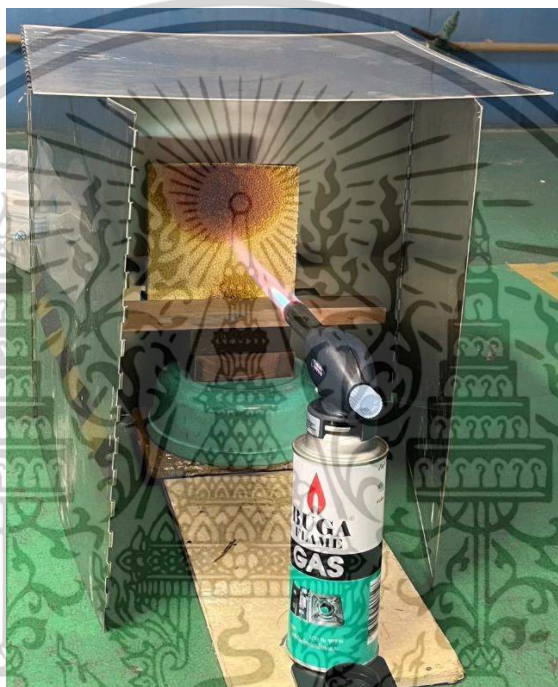
1. ชั่งเม็ดโพลีที่พักมาแล้วจนแห้ง (ข้อ 9 ในหัวข้อที่ 3.2.1) ตามปริมาณที่ต้องการ
2. เทเม็ดโพลีที่ชั่งลงในภาชนะปากกว้างที่สามารถคนได้สะดวก
3. นำสารเคลือบที่เติมไว้ผสมลงไปกับโพลีในอัตราส่วนโดยน้ำหนักที่คำนวณไว้แล้ว
4. คลุกเม็ดโพลีจนสารหน่วงไฟเคลือบจนทั่วเม็ดโพลี
5. เติมสารช่วยเร่งแข็ง (hardener) และคลุกให้ทั่วสารเคลือบจะมีลักษณะแห้งและแข็งขึ้น
6. นำเม็ดโพลีที่เคลือบแล้วเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้เม็ดโพลีแห้งสนิทและสารเคลือบแข็ง
7. นำเม็ดโพลีที่แห้งแล้ว 30 กรัมใส่แม่พิมพ์สเตนเลสขนาดกว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตร หนา 2 เซนติเมตร
8. เปิดใช้งานหม้อนึ่งความดันไอน้ำที่อุณหภูมิ 110 °C และระยะเวลา 2 นาที
9. เมื่อครบเวลาให้เปิดฝาท่อนึ่งความดันไอน้ำออก นำแม่พิมพ์ที่บรรจุเม็ดโพลีแล้วใส่ในหม้อนึ่งความดันน้ำ
10. เปิดใช้งานหม้อนึ่งความดันไอน้ำที่อุณหภูมิ 112 °C และระยะเวลา 40 นาที
11. เมื่อครบเวลานำแม่พิมพ์ออกมาและลดอุณหภูมิของแม่พิมพ์ลงทันทีด้วยการเปิดน้ำผ่านจนอุณหภูมิแม่พิมพ์ประมาณอุณหภูมิห้อง เพื่อป้องกันอุณหภูมิสูงของแม่พิมพ์ทำให้โพลีภายในเกิดการขยายตัวต่อจนมากเกินไปซึ่งอาจทำให้เกิดการยุบตัวได้
12. เปิดแม่พิมพ์ออกจะได้โพลีโพลิสไตรีนที่เคลือบสารหน่วงไฟเพื่อใช้ในการทดสอบต่อไป

3.3 การศึกษาสมบัติการทนไฟของโพลีโพลิสไตรีนหลังเคลือบสารหน่วงไฟโดยการเผาไฟโดยตรงด้วยหัวพ่นไฟ

การทดสอบด้วยการเผาไฟโดยตรงด้วยหัวพ่นไฟเป็นเทคนิคการทดสอบสมบัติการทนไฟเบื้องต้นสำหรับโพลีโพลิสไตรีนเพื่อคัดตัวอย่างจำนวนมากได้อย่างรวดเร็ว โดยให้โพลีโพลิสไตรีนสัมผัสไฟโดยตรงจากหัวพ่นไฟโดยควบคุมระยะห่างระหว่างโพลีโพลิสไตรีนกับเปลวไฟให้คงที่ และในระหว่างทดสอบมีการวัดอุณหภูมิพื้นผิวของโพลีโพลิสไตรีนด้วยกล้องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด (Infrared Thermal Camera) และบันทึกวิดีโอตลอดระยะเวลาการทดสอบ ทำให้สามารถสังเกตและเปรียบเทียบพฤติกรรมการเผาไหม้หรือการหน่วงไฟของโพลีโพลิสไตรีนได้ซึ่งเทคนิคนี้มีการใช้ทั้งในผลงานทางวิชาการและทางอุตสาหกรรมขั้นตอนการทดสอบเป็นดังนี้ [4,35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ติดตั้งฉากสแตนเลสทั้ง 4 ด้านคือ ด้านซ้าย ด้านขวา ด้านหลัง และด้านบน รอบจุดที่วางตัวอย่าง เพื่อป้องกันลมพัดจากภายนอกซึ่งอาจรบกวนระบบและทำให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อน
2. จัดจุดวางตัวอย่างให้มีความสูงพอดีกับเปลวไฟจากหัวพ่นไฟ
3. ติดตั้งกล่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรดโดยเล็งไปยังจุดกึ่งกลางที่โดนไฟของโพรพิลีนไตรีน
4. ติดตั้งหัวพ่นไฟโดยให้ปลายของหัวพ่นไฟมีระยะห่างจากตัวอย่างคงที่ที่ 25 เซนติเมตร
5. เริ่มจุดไฟที่ความแรงเท่ากันทุกครั้ง
6. เริ่มบันทึกวิดีโอทันทีและจับเวลาจนครบ 5 นาที



รูปที่ 3.1 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับทดสอบสมบัติการทนไฟของโพรพิลีนไตรีนที่เคลือบสารหน่วงไฟ ด้วยการเผาไฟโดยตรงด้วยหัวพ่นไฟ

3.4 การศึกษาสมบัติการลุกติดไฟและการลามไฟของโพรพิลีนไตรีนหลังเคลือบสารหน่วงไฟโดยวัดค่าออกซิเจนต่ำสุดก่อนลุกไหม้ (Limiting Oxygen Index: LOI) และการลามไฟในแนวตั้ง (Vertical Burning Test: UL-94)

LOI และ UL-94 เป็นเครื่องมือที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการทดสอบสมบัติเกี่ยวกับไฟสำหรับวัสดุโพลีเมอร์ เช่น โพลีโพรพิลีน (Polypropylene) โพลียูรีเทน (Polyurethane) และโพลีสไตรีน [36,37] เป็นต้น โดยหลักการ LOI คือ ทดสอบโดยจุดไฟที่ตัวอย่างในตู้ที่มีการควบคุมปริมาณออกซิเจนและสามารถปรับปริมาณออกซิเจนได้ซึ่งในการทดสอบจะปรับปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นเป็นขั้นๆ ในแต่ละขั้นจะลองจุดไฟที่ตัวอย่าง ถ้าหากจุดไม่ติดหรือไฟดับทันทีจะเพิ่มความเข้มข้นออกซิเจน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วจุดไฟอีกครั้ง ทำซ้ำจนกว่าจะจุดไฟติดความเข้มข้นออกซิเจนนั้นคือค่า LOI ส่วน UL-94 จะแขวนตัวอย่างในแนวตั้งแล้วจุดไฟที่ด้านล่างของตัวอย่างโดยควบคุมระยะห่างของเปลวไฟ องศาของเปลวไฟ และอัตราไหลของแก๊สตามมาตรฐานที่ทดสอบ ผลการทดสอบที่สำคัญ คือ อัตราการลามไฟและระยะเวลาในการลุกไหม้ที่เป็นดรชนีแบ่งระดับของ UL-94

3.4.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบค่าออกซิเจนต่ำสุดก่อนลุกไหม้

การเตรียมตัวอย่างโพลีโพรพิลีนสำหรับทดสอบค่าออกซิเจนต่ำสุดก่อนลุกไหม้เป็นไปตามมาตรฐาน ISO4589 โดยจะต้องตัดโพลีโพรพิลีนตัวอย่างให้มีขนาด $100 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$

3.4.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบการลามไฟในแนวตั้ง

การเตรียมตัวอย่างโพลีโพรพิลีนสำหรับทดสอบการลามไฟในแนวตั้งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D-3801 ซึ่งต้องเตรียมโพลีโพรพิลีนตัวอย่างขนาด $125 \times 12.5 \times 10 \text{ mm}^3$ จำนวน 2 ชุด ชุดละ 5 ชิ้นสำหรับการทำซ้ำการทดสอบ

3.5 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดโพลีเมอร์หลังเคลือบด้วยสารหน่วงไฟและความเข้ากันได้ของสารหน่วงไฟผ่านการกระจายตัวของธาตุบนผิวเม็ดโพลีเมอร์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวิเคราะห์ธาตุ (Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectrometer: SEM-EDS)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวิเคราะห์ธาตุ (SEM-EDS) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่มีความละเอียดสูงและให้ภาพเป็น 3 มิติ นิยมใช้ในหลากหลายด้านโดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านวัสดุและอนุภาค [38,39] โดยเครื่องมือจะปล่อยลำแสงอิเล็กตรอนไปกระทบกับผิวของวัสดุและวิเคราะห์ออกมาเป็นภาพ ในขณะที่เดียวกันอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยไปกระทบผิวของวัสดุจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งอิเล็กตรอนภายในอนุภาคส่งผลให้คายพลังงานออกมาในรูปแบบรังสีเอ็กซ์ (X-ray) ซึ่งเป็นค่าที่มีความจำเพาะเจาะจงในแต่ละธาตุ กรณีที่เครื่องมือที่ใช้สามารถตรวจจับพลังงานรูปแบบนี้ได้จะสามารถส่งสัญญาณต่อให้คอมพิวเตอร์วิเคราะห์และระบุธาตุได้ งานวิจัยนี้นำ SEM-EDS มาวิเคราะห์ลักษณะการเคลือบของสารเคลือบบนเม็ดโพลีเมอร์และความเข้ากันได้ของสารเคลือบโดยเตรียมตัวอย่างเม็ดโพลีเมอร์ก่อนทดสอบ SEM-EDS ดังนี้

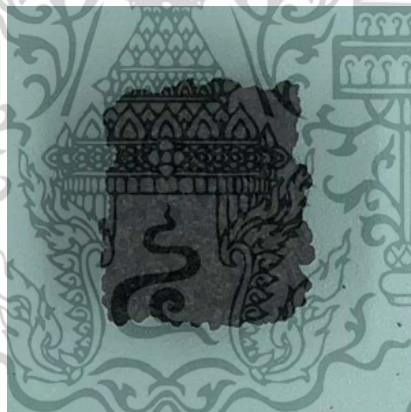
1. เตรียมเม็ดโพลีเมอร์ขึ้นตอนตามหัวข้อที่ 3.2.1
2. เตรียมสารเคลือบที่ต้องการใช้ในการทดสอบโดยมีขึ้นตอนตามหัวข้อที่ 3.2.2
3. คลุกผสมเม็ดโพลีเมอร์กับสารเคลือบจนกว่าสารเคลือบจะสม่ำเสมอและทั่วเม็ดโพลีเมอร์
4. นำเม็ดโพลีเมอร์ที่เคลือบแล้วไปอบให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$
5. เมื่อเม็ดโพลีเมอร์แห้งสนิททิ้งเม็ดโพลีเมอร์ให้อยู่ในอุณหภูมิห้องอีก 8 – 12 ชั่วโมง
6. เคลือบเม็ดโพลีเมอร์ด้วยทองคำก่อนทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การศึกษาสัณฐานวิทยาของถ่านหลังการเผาไหม้โดยใช้ SEM

ถ่านที่เกิดขึ้นหลังการเผาไหม้สามารถบอกได้ถึงความสามารถในการเสริมประสิทธิภาพการเกิดถ่านของสารเคลือบ รวมถึงลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านสามารถสื่อไปถึงประสิทธิภาพการหน่วงไฟของโพลีไธมได้เนื่องจากชั้นถ่านสามารถทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกันความร้อนจากภายนอกได้โดยขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างถ่านก่อนทดสอบ SEM เป็นดังนี้

1. ตัดโพลีไธมเป็นลักษณะลูกบาศก์ขนาด $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$
2. นำชิ้นโพลีไธมที่ตัดแล้วใส่ในเบ้าเคลือบ (Crucible)
3. นำไปใส่เตาเผา (Muffle furnace)
4. ตั้งค่าเตาเผาให้เพิ่มอุณหภูมิจาก $35 \text{ }^\circ\text{C}$ จนถึง $500 \text{ }^\circ\text{C}$ โดยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ต่อนาที และรักษาอุณหภูมิไว้ที่ $500 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 10 นาที
5. เมื่อครบเวลาเปิดฝาเตาเผาออกเล็กน้อยเพื่อให้อุณหภูมิลดลงอย่างช้าๆ เพื่อป้องกันการร้าวจากการลดลงอย่างรวดเร็วของอุณหภูมิ
6. เมื่ออุณหภูมิลดลงถึง $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ให้นำตัวอย่างออกมาจากเตาเผาแล้วทิ้งไว้จนถึงอุณหภูมิห้องก่อนนำไปทดสอบ



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างโพลีไธมขนาด $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$ หลังจากออกมาจากเตาเผาสำหรับทดสอบ SEM

3.7 การศึกษาเสถียรภาพต่อความร้อนและพฤติกรรมการสลายตัวของโพลีโพลิสไตรีนหลังเคลือบด้วยสารหน่วงไฟด้วย Thermogravimetric Analyzer (TGA)

TGA เป็นเครื่องมือสำหรับวัดเสถียรภาพต่ออุณหภูมิของวัสดุโดยเครื่องจะทำการชั่งน้ำหนักของวัสดุอยู่ตลอดเวลาในขณะที่อุณหภูมิก็ค่อยๆสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยจะสามารถบ่งบอกถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นระหว่างการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ เช่น การสลายตัว การเปลี่ยนสถานะ การดูดซับ (Adsorption) หรือปฏิกิริยาอื่นๆที่ส่งผลต่อน้ำหนัก เป็นต้น โดยเตรียมตัวอย่างสำหรับ TGA ดังนี้

1. ตัดโพลีไธมตัวอย่างออกมาเป็นชิ้นเล็กพอประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. นำตัวอย่างใส่ในงานเพาะเชื้อ (Petri dish)
3. ค่อยๆหยดโทลูอิน (Toluene) เพื่อละลายส่วนที่เป็นโพลีสไตรีนออกจนเหลือเพียงสารเคลือบ ลักษณะเป็นโครง
4. คีบโครงสารเคลือบออกมาเบาๆโดยใช้ที่คีบสแตนเลสเพื่อไม่ให้สารเคลือบแตก ใส่ในงานเพาะเชื้อ อีกใบ
5. นำโครงสารเคลือบไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 30 นาทีเพื่อให้โทลูอินระเหยจนหมด
6. บดสารเคลือบในโกร่งบดยาจนเป็นผงละเอียด

3.8 การศึกษาพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างเฝ้าใหม่โดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)

FTIR เป็นเทคนิคการทดสอบที่ใช้วิเคราะห์สารและพันธะเคมี หรือหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลของวัสดุ โดยวิเคราะห์จากการดูดซับคลื่นในช่วง $400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$ โดยเครื่องจะปล่อยคลื่นอินฟราเรดในช่วงดังกล่าว โมเลกุลที่ได้รับพลังงานจะดูดซับพลังงานในช่วงเลขคลื่นที่จำเพาะเจาะจงตามพันธะหรือหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุล ทำให้สามารถประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์หาชนิดของโพลีเมอร์ หรือสารที่ไม่รู้โครงสร้างได้ ในงานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์พันธะที่เกิดขึ้นในโครงสร้างถ่านเปรียบเทียบกับพันธะที่มีบนโพนก่อนการเฝ้าเพื่อสามารถคาดการณ์ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการเฝ้าใหม่โดยขั้นตอนเตรียมตัวอย่างก่อนทดสอบดังนี้

1. ตัดตัวอย่างในขนาดพอประมาณ
2. นำไปใส่ในงานเพาะเชื้อ
3. ค่อยๆหยดโทลูอินจนโพนโพลีสไตรีนละลายหมด
4. คีบสารเคลือบที่เหลืออยู่ใส่ในงานเพาะเชื้ออีกใบ
5. นำสารเคลือบไปตุ๋นที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้โทลูอินระเหยหมด
6. บดสารเคลือบให้ละเอียดในโกร่งบดยา

3.9 องค์ประกอบสารเคลือบหน่วงไฟ

ในงานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาสารเคลือบโดยมีพื้นฐานสารเคลือบ คือ ฟีนอลิกเรซินซึ่งทำหน้าที่เป็นสารยึดติดที่จะยึดระหว่างสารเคลือบหน่วงไฟกับเม็ดโพนและเป็นเนื้อสารหลักที่จะเติมสารเติมแต่งอื่นเข้าไป โดยจะศึกษาผลของสารเติมแต่งแต่ละประเภทด้วยการเฝ้าไฟโดยตรงด้วยหัวพ่นไฟแล้วสังเกตพฤติกรรมของแผ่นโพนซึ่งตัวแปรแรกที่ทำการศึกษาคือ ชนิดของฟีนอลิกเรซินซึ่งประกอบด้วย ฟีนอลิกเรซินชนิดที่กระจายตัวในน้ำ (PF) และฟีนอลิกเรซินชนิดที่ละลายในแอลกอฮอล์ 2 ชนิด (PF-202 และ PF-205) โดยอัตราส่วนโดยน้ำหนักแสดงดังตารางที่ 3.1 โดยจะแสดงในหน่วย Part per hundred of rubber (phr)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบและอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารเคลือบผงไฟเปรียบเทียบชนิดฟีนอลิกเรซิน

ตัวอย่าง	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก (phr)					
	โพลีโพลีสไตรีน	PF	PF-202	PF-205	น้ำ	เอทานอล
EPS*	50	0	0	0	0	0
EPS-PF	50	45	0	0	55	0
EPS-PF202	50	0	67	0	0	33
EPS-PF205	50	0	0	67	0	33

*EPS คือ โพลีโพลีสไตรีน

เมื่อได้ฟีนอลิกเรซินชนิดที่ต้องการแล้วจึงทำการศึกษาผลของสารเติมแต่งตัวอื่นต่อประกอบด้วย Diammonium phosphate (DAP) Ammonium polyphosphate (APP) ชนิดของซิลิกา และผงอลูมิเนียม ซึ่งรายละเอียดการทดลองแสดงไว้ใน ภาคผนวก ก และ ภาคผนวก ข

เมื่อทดสอบจนได้องค์ประกอบหลักของสารเคลือบจะนำไปขึ้นรูปใน pilot scale ด้วยเครื่องมือของโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์เพื่อสามารถเปรียบเทียบได้ ซึ่งประกอบด้วย ฟีนอลิกเรซินชนิด PF-202 ตัวทำละลาย คือ เอทานอล 95% แอมโมเนียมโพลีฟอสเฟต (APP) ซิลิโคนและผงอลูมิเนียม ในงานวิจัยนี้ใช้ผงอลูมิเนียมในปริมาณโดยน้ำหนักที่ต่างกันในแต่ละสูตรเพื่อศึกษาผลของผงอลูมิเนียมต่อสมบัติการแห้งไฟของโพลีโพลีสไตรีนด้วยการทดสอบด้วยเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ โดยอัตราส่วนโดยน้ำหนักแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบและอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารเคลือบผงไฟ

ตัวอย่าง	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก (phr)		
	โพลีโพลีสไตรีน	ฟีนอลิกเรซิน	ผงอลูมิเนียม
EPS-PF202/APP/Silicone/Al01	50	43	1
EPS-PF202/APP/Silicone/Al02	50	43	2
EPS-PF202/APP/Silicone/Al04	50	43	4
EPS-PF202/APP/Silicone/Al08	50	43	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

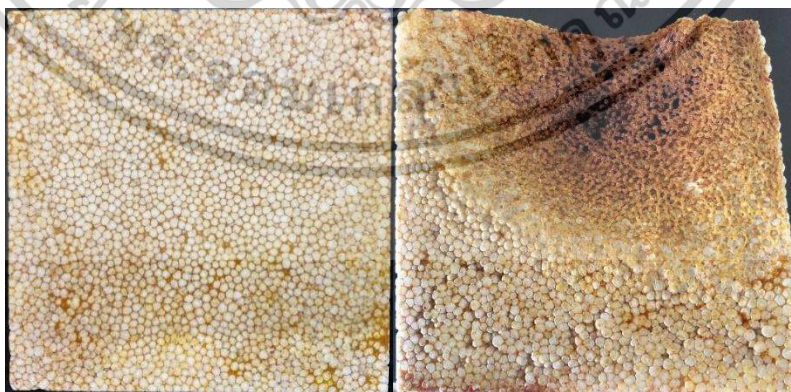
งานวิจัยนี้ทดสอบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการหน่วงไฟของโพลีเอสเตอร์รีนเปล่าและหลังเคลือบด้วยสารหน่วงไฟ 4 สูตรที่มีปริมาณผงอลูมิเนียมไดไฮดรอกไซด์ต่างกัน คือ 1% 2% 4% และ 8% การทดสอบและวิเคราะห์แบ่งเป็น 2 ขั้นตอนหลัก คือ การคัดเลือกสูตรโดยใช้การเผาโดยตรงเพื่อสามารถสรุปผลของตัวแปรต่างๆ ได้อย่างกว้างและรวดเร็ว และการตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์เพื่อวิเคราะห์กลไกและสมบัติของสารโดยละเอียด

4.1 วิเคราะห์สมบัติการทนไฟของโพลีเอสเตอร์รีนหลังเคลือบสารหน่วงไฟโดยการเผาไฟโดยตรงด้วยหัวพ่นไฟ

การศึกษาสมบัติการทนไฟของโพลีเอสเตอร์รีนหลังเคลือบสารหน่วงไฟโดยใช้วิธีการเผาโดยตรงเป็นวิธีที่สามารถคัดสูตรและตัวแปรต่างๆ ได้อย่างรวดเร็วก่อนจะนำตัวแปรและสูตรที่น่าสนใจไปศึกษาเชิงลึกต่อไปในหัวข้ออื่นๆ ในขั้นตอนนี้จึงเป็นขั้นตอนที่ใช้เวลานานที่สุดในงานวิจัยนี้เพราะจำเป็นต้องศึกษาหลากหลายตัวแปรที่อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการหน่วงไฟของโพลีเอสเตอร์รีน

4.1.1 ประสิทธิภาพการหน่วงไฟของโพลีเอสเตอร์รีนที่เคลือบด้วยฟอสฟอริสเรซินชนิดกระจายตัวในน้ำ

ในช่วงแรกของการทำงานวิจัยการทดสอบประสิทธิภาพการหน่วงไฟของโพลีเอสเตอร์รีนเริ่มจากการใช้ฟอสฟอริสเรซินชนิดที่กระจายตัวในน้ำ (PF) เพื่อตั้งใจให้สะดวกต่อการสังเคราะห์ในทางอุตสาหกรรมและมีราคาถูกเนื่องจากไม่มีค่าใช้จ่ายในส่วนที่เป็นตัวทำละลายอินทรีย์อื่น เช่น แอลกอฮอล์ **รูปที่ 4.1** แสดงตัวอย่างแผ่นโพลีเอสเตอร์รีนที่เคลือบด้วยฟอสฟอริสเรซินชนิดกระจายตัวในน้ำก่อนและหลังการเผาโดยตรง



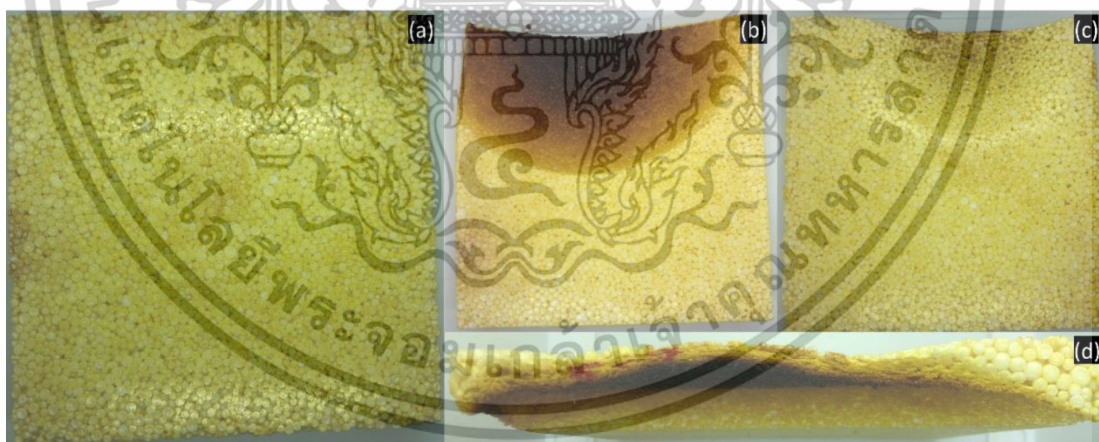
รูปที่ 4.1 แผ่นโพลีเอสเตอร์รีนที่เคลือบด้วยฟอสฟอริสเรซินชนิดกระจายตัวในน้ำก่อนและหลังการเผาโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

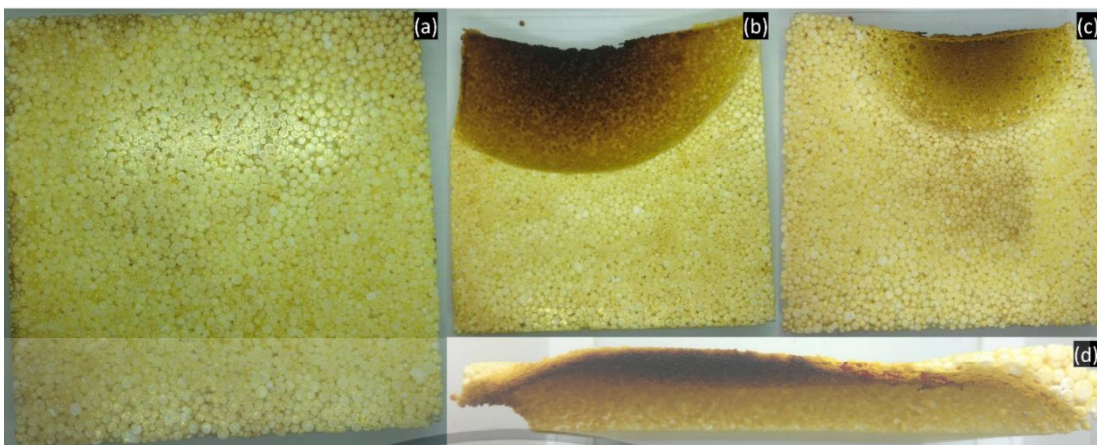
จากการทดลองใช้พินอลิกชนิดกระจายตัวในน้ำพบว่ามีปัญหาอยู่หลายอย่าง คือ เนื่องจากเป็นพินอลิกเรซินที่เพียงแค่วางตัวในน้ำไม่ได้เกิดการละลายอย่างสมบูรณ์ ทำให้ในการผสมสารเคลือบสูตรนี้บางครั้งจะมีการตกตะกอนและเกาะกันเป็นก้อนอย่างรวดเร็ว จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ชัดเจนว่าการกระจายตัวของเนื้อสารเคลือบไม่มีความสม่ำเสมอเพราะพินอลิกเรซินเมื่อกระจายตัวในน้ำซึ่งมีขี้ทำให้สารหน่วงไฟโดยรวมมีขี้เมื่อนำไปใช้เคลือบโคมโพลีสไตรีนซึ่งไม่มีขี้จึงเกิดการยึดเกาะที่ไม่ดี ส่งผลให้สารเคลือบเกาะกันเป็นก้อน เคลือบไม่ทั่ว ทำให้ในระหว่างการทดสอบเผาโดยตรงเปลวไฟสามารถจะเจาะเข้าไปในส่วนที่ไม่มีสารเคลือบได้อย่างง่ายดายส่งผลให้ประสิทธิภาพการหน่วงไฟของโคมต่ำ จากการทดสอบครั้งนี้พบว่าโพนั้นทะเลที่เวลาประมาณ 3 นาทีซึ่งทะเลก่อนครบเวลาการทดสอบ 5 นาที ทำให้จำเป็นต้องหาพินอลิกแบบใหม่มาเพื่อทำการวิจัย

4.1.2 การทดสอบพินอลิกเรซินชนิดละลายในแอลกอฮอล์

เนื่องจากในหัวข้อที่ 4.1.1 พบว่าพินอลิกชนิดกระจายตัวในน้ำนั้นมีประสิทธิภาพที่ไม่ดี เพราะการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ จึงได้ทดลองใช้พินอลิกเรซินชนิดใหม่ อีก 2 ชนิด ได้แก่ PF-202 และ PF-205 ซึ่งเป็นพินอลิกชนิดที่ละลายได้ในแอลกอฮอล์ ซึ่งทั้ง 2 ตัวแตกต่างกันที่มวลโมเลกุลและอัตราเร็วการโพลีเมอไรเซชัน (Polymerization speed) โดย PF-205 จะมีมวลโมเลกุลที่มากกว่าและอัตราเร็วการโพลีเมอไรเซชัน ที่น้อยกว่า โดยรูปที่ 4.2 แสดงตัวอย่างโคมที่ถูกเคลือบด้วย PF-202 ก่อนและหลังการเผาโดยตรง และรูปที่ 4.3 แสดงตัวอย่างโคมที่ถูกเคลือบด้วย PF-205 ก่อนและหลังเผา



รูปที่ 4.2 โคมที่เคลือบด้วย PF-202 (a) ก่อนเผา (b) หลังเผาด้านหน้า (c) ด้านหลัง และ (d) ด้านบน

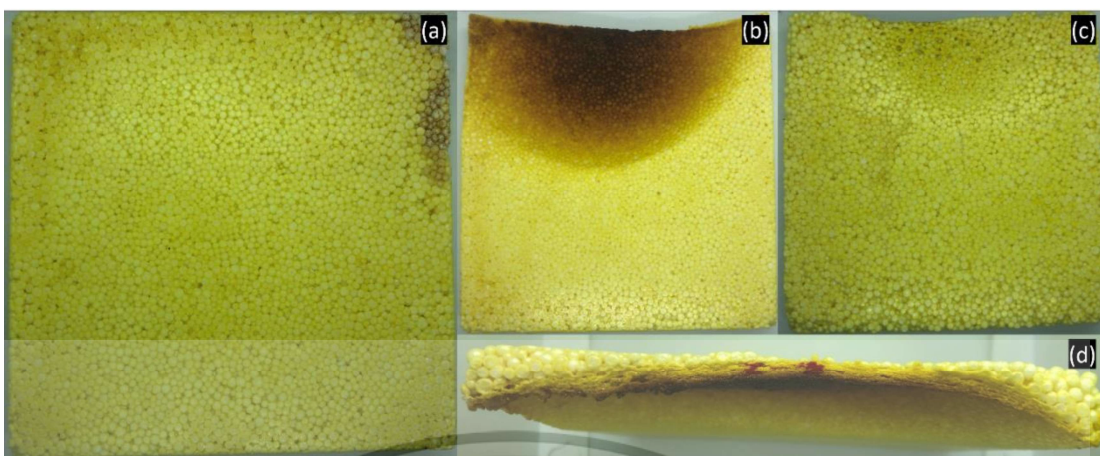


รูปที่ 4.3 โฟมที่เคลือบด้วย PF-205 (a) ก่อนเผา (b) หลังเผาด้านหน้า (c) ด้านหลัง และ (d) ด้านบน

จากรูปที่ 4.2 และ รูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าการเคลือบมีความสม่ำเสมอมากขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับฟีนอลิกเรซินชนิดกระจายตัวในน้ำ (PF) และมีการสร้างชั้นถ่านขึ้นบนผิวหน้าของโฟม แสดงให้เห็นถึงการเคลือบมีความทั่วทุกเม็ดและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ประสิทธิภาพการหน่วงไฟของทั้ง PF-202 และ PF-205 ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับฟีนอลิกเรซินชนิดที่กระจายตัวในน้ำ (PF) และสามารถทนการทดสอบเผาโดยตรงได้จนครบ 5 นาทีแบบไม่ทะลุ เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง PF-202 และ PF205 พบว่า PF-202 จะให้ประสิทธิภาพการกั้นไฟที่ดีกว่าเล็กน้อย โดยพิจารณาจากลักษณะแผ่นโฟมที่ผ่านการทดสอบจะเห็นว่าทางด้านหลังของโฟมที่เคลือบด้วย PF-202 จะมีรอยจากความร้อนที่ทะลุผ่านมาได้น้อยกว่า สีอ่อนกว่า และสามารถเห็นได้ชัดเจนจากมุมมองด้านบนว่าเนื้อตัวอย่างที่เหลืออยู่มีมากกว่าและหนากว่า เนื่องจาก PF-202 มี polymerization speed ที่มากกว่า PF-205 ทำให้ในขั้นตอนการเผาไหม้ PF-202 เกิดการสร้างชั้นถ่านที่เร็วกว่าและคายน้ำได้เร็วกว่าทำให้ป้องกันความร้อนที่จะผ่านเข้าสู่ชั้นเนื้อโฟมได้ดีกว่า ดังนั้นการทดลองต่อจากนี้จึงเลือกใช้ PF-202 เป็นตัวหลักในการทำวิจัยต่อไป

4.1.3 การทดสอบประสิทธิภาพการหน่วงไฟของ APP

หลังจากได้ฟีนอลิกเรซินชนิดที่เหมาะสมกับงานวิจัยแล้วจึงนำฟีนอลิกนั้นมาใช้ร่วมกับสารอื่นเพื่อเสริมประสิทธิภาพการหน่วงไฟ คือ APP เนื่องจากเป็นสารที่มีประสิทธิภาพดีและสามารถหาได้ง่าย เพื่อศึกษาพฤติกรรมและกลไกการหน่วงไฟของ APP รูปที่ 4.4 แสดงโฟมที่ถูกเคลือบด้วยสารหน่วงไฟที่มีส่วนผสมของ APP ก่อนและหลังการทดสอบเผาโดยตรง

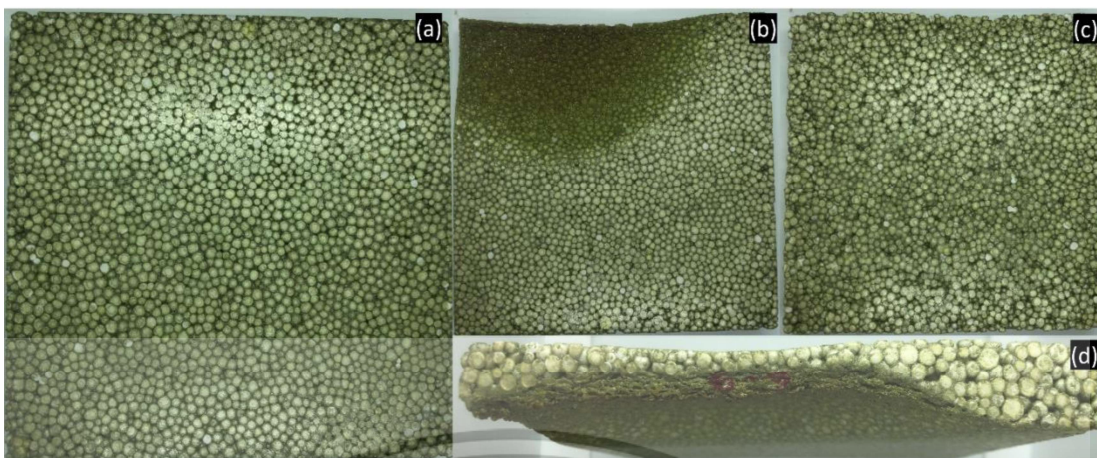


รูปที่ 4.4 โฟมที่เคลือบด้วยสารที่มี APP (a) ก่อนเผา (b) หลังเผาด้านหน้า (c) ด้านหลัง และ (d) ด้านบน

จากผลการทดสอบ พบว่า ชั้นถ่านที่เกิดขึ้นมีความหนาขึ้นกว่าการเคลือบที่ไม่มีการเติม APP ถ่านมีลักษณะโครงสร้างชัดเจนลักษณะคล้ายรังผึ้งซึ่งเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง [4] หากมองจากด้านหลังของตัวอย่างจะเห็นได้ว่ามีร่องรอยจากจากความร้อนที่ผ่านไปถึงเพียงเล็กน้อย บ่งบอกถึงชั้นถ่านที่เกิดขึ้นสามารถป้องกันความร้อนได้ดี แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าแผ่นโฟมมีการยุบตัวค่อนข้างสูงแสดงให้เห็นว่า APP เพียงตัวเดียวยังประสิทธิภาพไม่ดีพอต่อการใช้ในการก่อสร้างเนื่องจากยังมีการยุบตัวที่สูง

4.1.4 การทดสอบผลของผงอลูมิเนียมที่มีต่อประสิทธิภาพการหน่วงไฟ

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการหน่วงไฟให้กับโฟมโพลิสไตรีนให้ดีขึ้นและ APP เพียงตัวเดียวไม่สามารถทำให้โฟมมีประสิทธิภาพการหน่วงไฟที่ดีพอได้ จึงต้องใช้สารอนินทรีย์เข้าไปเพื่อช่วยเสริมกลไกการหน่วงไฟ [40] ผงอลูมิเนียมเป็นตัวเลือกที่ดีเนื่องจากนอกจากสามารถเสริมประสิทธิภาพการหน่วงไฟได้ยังสามารถทำให้โครงสร้างแข็งแรงมากขึ้น [22] รูปที่ 4.5 แสดงโฟมตัวอย่างที่เคลือบด้วยสารหน่วงไฟที่มีส่วนผสมของผงอลูมิเนียม



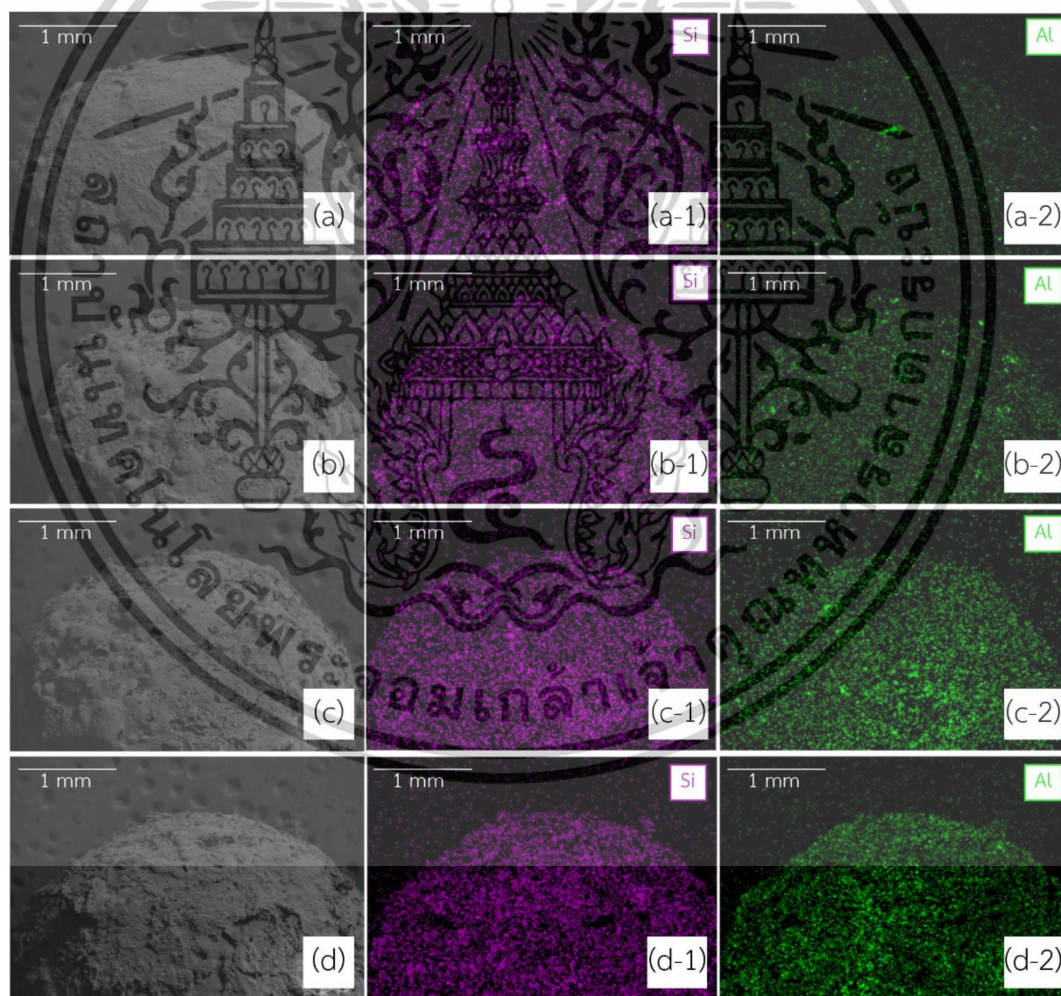
รูปที่ 4.5 โฟมที่เคลือบด้วยสารที่มีผงอลูมิเนียม (a) ก่อนเผา (b) หลังเผาด้านหน้า (c) ด้านหลัง และ (d) ด้านบน

จากผลการทดสอบเผาไฟโดยตรง พบว่า โฟมมีการยุบตัวน้อยลงจากการเผาอาจจะเป็นเพราะผงอลูมิเนียมช่วยให้สารเคลือบมีความแข็งแรงลดการยุบตัวของแผ่นโฟม สอดคล้องกับการศึกษาของคุณ Adewale George Adeniyi และคณะ เกี่ยวกับการเสริมความแข็งแรงของโฟมโพลิสไตรีนโดยใช้ผงอลูมิเนียมและ Clay พบว่า สามารถเสริมความแข็งแรงให้กับโฟมได้อย่างมีนัยยะสำคัญ [41] เมื่อพิจารณาด้านหลังแผ่นโฟมแทบไม่มีร่องรอยจากการถูกความร้อน และด้านบนมีเนื้อสารเหลืออยู่ค่อนข้างหนาซึ่งสามารถชี้ให้เห็นถึงความแข็งแรงของโครงสร้างโฟมที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อมองที่ทางด้านหน้าซึ่งสัมผัสเปลวไฟโดยตรงจะเห็นได้ว่าแทบไม่มีสีดำเกิดขึ้นหมายความว่าแทบไม่มีถ่านเกิดขึ้นซึ่งอาจส่งผลให้ในการทนไฟในระยะยาวจะทำได้ไม่ดี [42] เนื่องจากหากไม่มีชั้นถ่านเนื้อสารก็จะสลายไปเรื่อยๆ สรุปได้ว่าการใช้เพียงผงอลูมิเนียมอย่างเดียวก็ไม่เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ของงานนี้เช่นกัน

เมื่อทราบกลไกและหน้าที่ของสารแต่ละตัวที่ควรจะต้องลงไปเพื่อสังเคราะห์สารหน่วงไฟแล้วจึงจัดการทดลองอย่างเป็นระบบเพื่อทดสอบผลของปริมาณผงอลูมิเนียมที่ใช้ในการทำสารหน่วงไฟโดยแบ่งออกเป็น 4 ตัวอย่าง ได้แก่ EPS-PF202/APP/Silicone/Al01 EPS-PF202/APP/Silicone/Al02 EPS-PF202/APP/Silicone/Al04 และ EPS-PF202/APP/Silicone/Al08 โดยองค์ประกอบของทั้ง 4 ตัวอย่างแสดงไว้ที่ตารางที่ 3.1 เมื่อได้ตัวอย่างที่ต้องการจะทดสอบจึงทำการสังเคราะห์ตัวอย่างใน pilot scale เพื่อให้ตัวอย่างที่ได้มีใกล้เคียงกับงานอุตสาหกรรมจริงให้มากที่สุด โดยได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท ไทยไอโซวอลล์ จำกัด ให้ใช้เครื่องมือจริงที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมเพื่อทำแผ่นโฟมนี้ขึ้นมาซึ่งจะใช้ในการทดสอบที่ละเอียดขึ้นในหัวข้อต่อไป

4.2 วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดโพลีเมอร์ที่เคลือบด้วยสารหน่วงไฟและความเข้ากันได้ของสารหน่วงไฟผ่านการกระจายตัวของธาตุบนผิวเม็ดโพลีเมอร์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวิเคราะห์ธาตุ (SEM-EDS)

จากหัวข้อที่ 3.2 ที่อธิบายขั้นตอนการเตรียมแผ่นโพลีโพลีไสตรีนที่เคลือบสารหน่วงไฟ หลังจากขั้นตอนการคลุกสารเคลือบหน่วงไฟกับเม็ดโพลีเมอร์ เม็ดโพลีเมอร์แต่ละเม็ดควรมีชั้นเคลือบเป็นของตัวเอง อยู่ทั่วเม็ดโพลีเมอร์เพื่อจะเป็นเกราะป้องกันไฟสำหรับเม็ดโพลีเมอร์ ในรูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของสัณฐานวิทยาภายนอกและ elemental mapping ธาตุซิลิกอนและอลูมิเนียมของเม็ดโพลีเมอร์ที่เคลือบสารหน่วงไฟทั้งหมด 4 ตัวอย่างได้แก่ EPS-PF202/APP/Silicone/Al01 EPS-PF202/APP/Silicone/Al02 EPS-PF202/APP/Silicone/Al04 และ EPS-PF202/APP/Silicone/Al08



รูปที่ 4.6 ภาพถ่าย SEM และ Elemental mapping ของธาตุซิลิกอน (Si) และอลูมิเนียม (Al) ของ (a) EPS-PF202/APP/Silicone/Al01, (b) EPS-PF202/APP/Silicone/Al02, (c) EPS-PF202/APP/Silicone/Al04 และ (d) EPS-PF202/APP/Silicone/Al08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากหลักฐานวิทยาของเม็ดโพลีเมอร์แสดงให้เห็นว่ามีสารเคลือบหน่วงไฟเคลือบอยู่โดยรอบเม็ดโพลีเมอร์อย่างค่อนข้างสม่ำเสมอทั้ง 4 ตัวอย่างโดย EPS-PF202/APP/Silicone/Al01 ในรูปที่ 4.6(a) ภูมิลักษณะการเคลือบที่เรียบเนียนสม่ำเสมอ ในขณะที่ EPS-PF202/APP/Silicone/Al02, EPS-PF202/APP/Silicone/Al04 และ EPS-PF202/APP/Silicone/Al08 ในรูปที่ 4.6(b-d) สารเคลือบมีความไม่สม่ำเสมอโดยพิจารณาจากผิวที่ขรุขระและมีสารเคลือบที่เกาะตัวกันเป็นก้อนอยู่เล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากสมบัติทางกายภาพของผงอลูมิเนียมที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) สูงทำให้เมื่อเติมผงอลูมิเนียมลงไปผสมกับสารเคลือบส่งผลให้ความหนืดโดยรวมของสารเคลือบสูงขึ้น เมื่อกลึงเม็ดโพลีเมอร์จึงมีโอกาสที่สารเคลือบจะเกาะกันเป็นก้อนมากขึ้น อย่างไรก็ตามเม็ดโพลีเมอร์ทั้ง 4 ตัวอย่างไม่มีจุดใดบนเม็ดโพลีเมอร์ที่สารเคลือบไม่สม่ำเสมอจนเห็นเนื้อโพลีเมอร์ซึ่งอาจเป็นจุดที่ไฟเจาะเข้าได้ไปได้ง่าย

ส่วน Elemental mapping ในรูปที่ 4.6(a-1,b-1,c-1,d-1,a-2,b-2,c-2,d-2) ของสารอินทรีย์ซึ่งประกอบด้วยธาตุซิลิกอนและอลูมิเนียมแสดงถึงการกระจายตัวของธาตุนั้นบนชั้นสารเคลือบโดยธาตุซิลิกาเป็นตัวแทนของการกระจายตัวของซิลิกอน พบว่า มีการกระจายตัวของธาตุทั้ง 2 ชนิดอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งเม็ดโพลีเมอร์โดยลักษณะการกระจายตัวเหมือนกันทั้ง 4 ตัวอย่างโดยการกระจายตัวของธาตุอลูมิเนียมมีแนวโน้มที่ชัดเจน คือ มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามการเติมผงอลูมิเนียม แสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้ของสารอินทรีย์ที่ใช้ในสารเคลือบหน่วงไฟ จึงสามารถคาดหวังสมบัติการหน่วงไฟจากการเคลือบนี้ได้

4.3 วิเคราะห์สมบัติการลุกติดไฟและการลามไฟของโพลีโพลีสไตรีนหลังเคลือบสารหน่วงไฟโดยการวิเคราะห์ค่าออกซิเจนต่ำสุดก่อนลุกไหม้ (LOI) และการลามไฟในแนวตั้ง (UL-94)

ผลการทดสอบสมบัติการลุกติดไฟและการลามไฟของโพลีโพลีสไตรีนหลังเคลือบสารหน่วงไฟแสดงดังตารางที่ 4.1 โดยมีการเปรียบเทียบสารเคลือบหน่วงไฟทั้งหมด 4 สูตรที่มีปริมาณโดยน้ำหนักต่างกัน ได้แก่ 1% 2% 4% และ 8% และเปรียบเทียบกับโพลีโพลีสไตรีนที่ไม่ได้เคลือบสารหน่วงไฟรวมเป็นทั้งหมด 5 ตัวอย่าง

ตารางที่ 4.1 ค่า LOI และระดับ UL-94 ของโพลีโพลีสไตรีนที่เคลือบสารหน่วงไฟที่สูตรต่างกัน

ตัวอย่าง	LOI (%)	ระดับ UL-94
EPS	17.4	ไม่ผ่าน
EPS-PF202/APP/Silicone/Al01	22.9	V-1
EPS-PF202/APP/Silicone/Al02	24.1	V-0
EPS-PF202/APP/Silicone/Al04	24.2	V-0
EPS-PF202/APP/Silicone/Al08	22.3	V-1

จากผลการทดสอบ พบว่าโพลีโพลีสไตรีนที่ไม่ได้เคลือบสารหน่วงไฟมีความไวไฟเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีค่า LOI เพียง 17.4% และไม่ผ่านเกณฑ์ระดับใดเลยของ UL-94 และในขณะที่ทดสอบการลามไฟในแนวตั้งเกิดควันดำจำนวนมากซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ของไฮโดรคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบหลักในโพลีโพลีสไตรีน อีกทั้งในขณะที่ทดสอบเมื่อโพลีโพลีสไตรีนลุกไหม้พบว่าเนื้อสารที่ละลายจากความร้อนมีการหยดลงมาแบบมีเปลวไฟทำให้อุณหภูมิที่วางอยู่ข้างใต้ตัวอย่างติดไฟซึ่งอาจเป็นต้นเหตุของอัคคีภัยในชีวิตประจำวันได้ เมื่อมีการใช้สารเคลือบหน่วงไฟกับโพลีโพลีสไตรีนเห็นได้ชัดว่าค่า LOI เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนโดยค่า LOI ของ EPS-PF202/APP/Silicone/Al01 เพิ่มขึ้นเป็น 22.9% และระดับ UL-94 อยู่ที่ V-1 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการหน่วงไฟของฟีนอลิกเรซินที่จะทำให้เกิดชั้นถ่านบนผิวของโพลีซึ่งทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกันความร้อนเข้าไปในเนื้อวัสดุภายใน [43] ในขณะเดียวกัน APP จะสลายตัวปล่อยแก๊สแอมโมเนีย (Ammonia) และไอน้ำส่งผลให้ความเข้มข้นของไอเชื้อเพลิงในอากาศและอุณหภูมิโดยรวมลดลง [44]

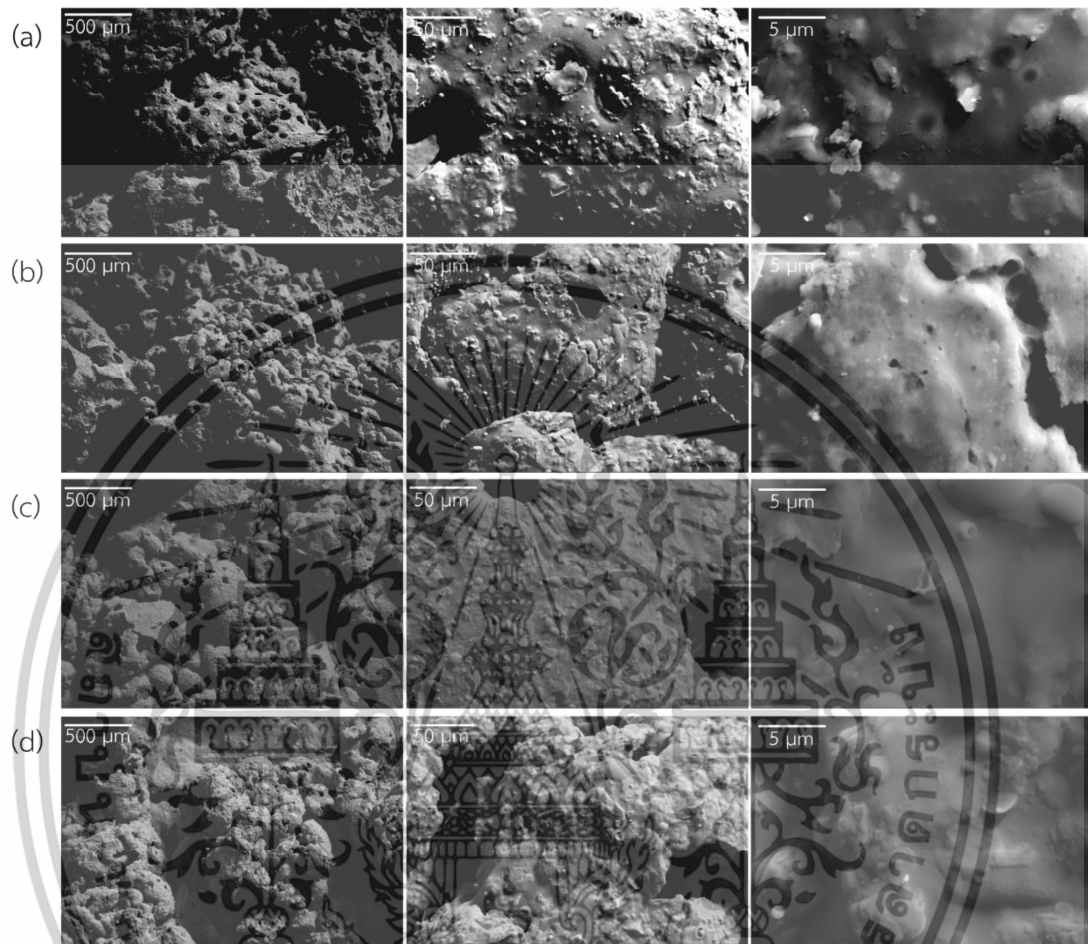
เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนโดยมวลของผงอลูมิเนียมใน EPS-PF202/APP/Silicone/Al02 และ EPS-PF202/APP/Silicone/Al04 ทำให้ค่า LOI เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 24.1% และ 24.2% ตามลำดับ ในส่วนของระดับ UL-94 สามารถทำได้ถึง V-0 ตั้งแต่ EPS-PF202/APP/Silicone/Al02 จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณผงอลูมิเนียมส่งผลให้ประสิทธิภาพการหน่วงไฟดีขึ้นซึ่งอาจเป็นผลมาจากชั้นถ่านที่หนาแน่นขึ้นที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้ช่วยให้เนื้อโพลีขึ้นในเกิดการสลายตัวน้อยลง

ในทางตรงกันข้ามเมื่อเพิ่มผงอลูมิเนียมมากขึ้นใน EPS-PF202/APP/Silicone/Al08 ส่งผลที่ไม่เป็นไปตามความคาดหวัง คือ ค่า LOI ลดลงเป็น 22.3% และระดับ UL-94 ที่ V-1 ซึ่งต่ำกว่า EPS-PF202/APP/Silicone/Al01 เล็กน้อยอาจเป็นเพราะการเสริมความสามารถในการเกิดชั้นถ่านที่ลดลงเนื่องจากระดับผงอลูมิเนียมที่ถูกเติมมากเกินไปซึ่งจะถูกอธิบายกลไกอย่างละเอียดในหัวข้อต่อไป

4.4 วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของถ่านหลังการเผาไหม้โดยใช้ SEM

จากหัวข้อที่ 4.3 การวิเคราะห์สมบัติการลุกติดไฟและการลามไฟของโพลีโพลีสไตรีนที่เคลือบสารหน่วงไฟ พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนเชิงมวลของผงอลูมิเนียมในสารหน่วงไฟส่งผลให้ประสิทธิภาพการหน่วงไฟดีขึ้นจนถึง EPS-PF202/APP/Silicone/Al04 และประสิทธิภาพการหน่วงไฟลดลงเมื่อเติมผงอลูมิเนียมที่ 8% เพื่อศึกษาผลของการเติมผงอลูมิเนียมต่อสัณฐานวิทยาของโครงสร้างถ่านที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้และอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภาพถ่าย SEM ของถ่านจึงถูกใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่าย SEM ของถ่านที่เหลืออยู่หลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 10 นาทีของ 4 ตัวอย่าง ได้แก่ EPS-PF202/APP/Silicone/Al01 EPS-

PF202/APP/Silicone/AlO₂ EPS-PF202/APP/Silicone/AlO₄ และ EPS-PF202/APP/Silicone/AlO₈ โดยแต่ละตัวอย่างถูกถ่ายด้วย SEM ที่ 3 กำลังขยาย คือ 50, 500 และ 5000 เท่า



รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM ของถ่านที่เหลืออยู่หลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 10 นาที ของ (a) EPS-PF202/APP/Silicone/AlO₁ (b) EPS-PF202/APP/Silicone/AlO₂ (c) EPS-PF202/APP/Silicone/AlO₄ และ (d) EPS-PF202/APP/Silicone/AlO₈ ที่กำลังขยาย 50(ซ้าย) 500(กลาง) และ 5000(ขวา) เท่า

จากรูปเห็นได้อย่างชัดเจนว่ามีชั้นถ่านเกิดขึ้นจากการเผาทั้ง 4 ตัวอย่างที่กำลังขยาย 50 เท่า EPS-PF202/APP/Silicone/AlO₁ มีรูที่เกิดขึ้นบนผิวของชั้นถ่านจำนวนมาก และมีรอยแตกที่มีความลึกซึ่งแสดงถึงว่าชั้นถ่านนั้นมีความหนาแน่นต่ำ [45] ซึ่งทำให้ไม่สามารถทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกันความร้อนจากภายนอกได้ดี รูและรอยแตกเล็กเหล่านี้ อาจทำให้ความร้อนภายนอกจะเข้าไปสู่ชั้นเนื้อโฟมได้ง่ายและยังเป็นช่องที่ทำให้ไอระเหยของโฟมที่เกิดจากการสลายตัวจากเฟสของแข็งไหลออกไปสู่อากาศทำให้ความเข้มข้นของเชื้อเพลิงที่ผสมอยู่กับอากาศเข้มข้นมากขึ้นทำให้ไฟลุกไหม้อย่างต่อเนื่อง ขณะที่ EPS-PF202/APP/Silicone/AlO₂ รูและรอยแตกเล็กมีน้อยลง เนื้อถ่านมีลักษณะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คล้ายว่ามีความพองมากขึ้นซึ่งอาจส่งผลให้เนื้อถ่านโดยรวมมีความแน่นมากขึ้นและเติมเต็มในส่วนที่เป็นรูและทำให้รอยแตกเล็กมีความตื้นขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการหน่วงไฟดีขึ้น ส่วน EPS-PF202/APP/Silicone/AlO4 นั้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่นจะเห็นว่าถ่านมีรูและรอยแตกค่อนข้างน้อยและเนื้อถ่านมีความฟูขึ้นอีกเมื่อเทียบกับ EPS-PF202/APP/Silicone/AlO2 ในขณะที่ EPS-PF202/APP/Silicone/AlO8 มีรูที่น้อยที่สุดแต่กลับมีรอยแตกเล็กที่มากขึ้นอย่างชัดเจน

เมื่อเพิ่มกำลังขยายมากขึ้นเป็น 500 เท่าและ 5000 เท่าจะเห็นได้ว่า EPS-PF202/APP/Silicone/AlO1 เนื้อถ่านมีความแน่นและไม่ฟูทำให้รูและรอยแตกมีความลึกและกว้าง ในขณะที่ EPS-PF202/APP/Silicone/AlO2 เนื้อถ่านมีลักษณะฟูมากขึ้นทำให้รูพรุนที่เกิดขึ้นเล็กและรอยแตกตื้นซึ่งมีลักษณะคล้ายกับ EPS-PF202/APP/Silicone/AlO4 ที่มีรูพรุนน้อยและรอยแตกตื้นเช่นกันซึ่งสอดคล้องกับค่า LOI ของ EPS-PF202/APP/Silicone/AlO2 กับ EPS-PF202/APP/Silicone/AlO4 ที่ต่างกันเพียง 0.5% จากผลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงอลูมิเนียมในสารเคลือบหน่วงไฟทำให้ถ่านที่เกิดขึ้นมีความฟูขึ้นทำให้เติมเต็มส่วนที่เกิดรอยแตกได้ส่งผลให้ประสิทธิภาพการหน่วงไฟดีขึ้น เนื่องจากชั้นถ่านที่มีความหนาเสมอและมีรูน้อยจะสามารถทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกันความร้อนจากภายนอกทำให้ EPS-PF202/APP/Silicone/AlO4 มีค่า LOI เพิ่มขึ้นถึง 40% เมื่อเทียบกับโพลีเอสเตอร์ที่ไม่ได้เคลือบสารหน่วงไฟ แต่ในทางตรงกันข้าม EPS-PF202/APP/Silicone/AlO8 ที่เติมผงอลูมิเนียมมากที่สุดและเห็นได้ชัดว่าชั้นถ่านมีความฟูมากที่สุดแต่มีรอยร้าวขนาดใหญ่และลึกอาจจะเกิดจากการขยายตัวของชั้นถ่านที่มากเกินไปทำให้ถ่านมีความเปราะและแตกง่ายทำให้ค่า LOI มีค่าต่ำลง [46]

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าความสม่ำเสมอและมีรอยแตกลittleส่งผลต่อประสิทธิภาพการหน่วงไฟซึ่งสอดคล้องกับหลายงานวิจัย [10,47,48] และผงอลูมิเนียมส่งผลต่อความฟูและลดรอยร้าวของชั้นถ่านซึ่งอาจเป็นผลที่เกิดจากการสลายตัวของซิลิกาที่อยู่ในซิลิโคนและเกิดพันธะกับอลูมิเนียมเป็นอลูมิเนียมซิลิเกตซึ่งอาจช่วยเติมเต็มช่องว่างและรอยแตกที่เกิดขึ้นจากการเผา

4.5 เสถียรภาพต่อความร้อนและพฤติกรรมการสลายตัวของสารหน่วงไฟด้วย Thermogravimetric Analyzer (TGA)

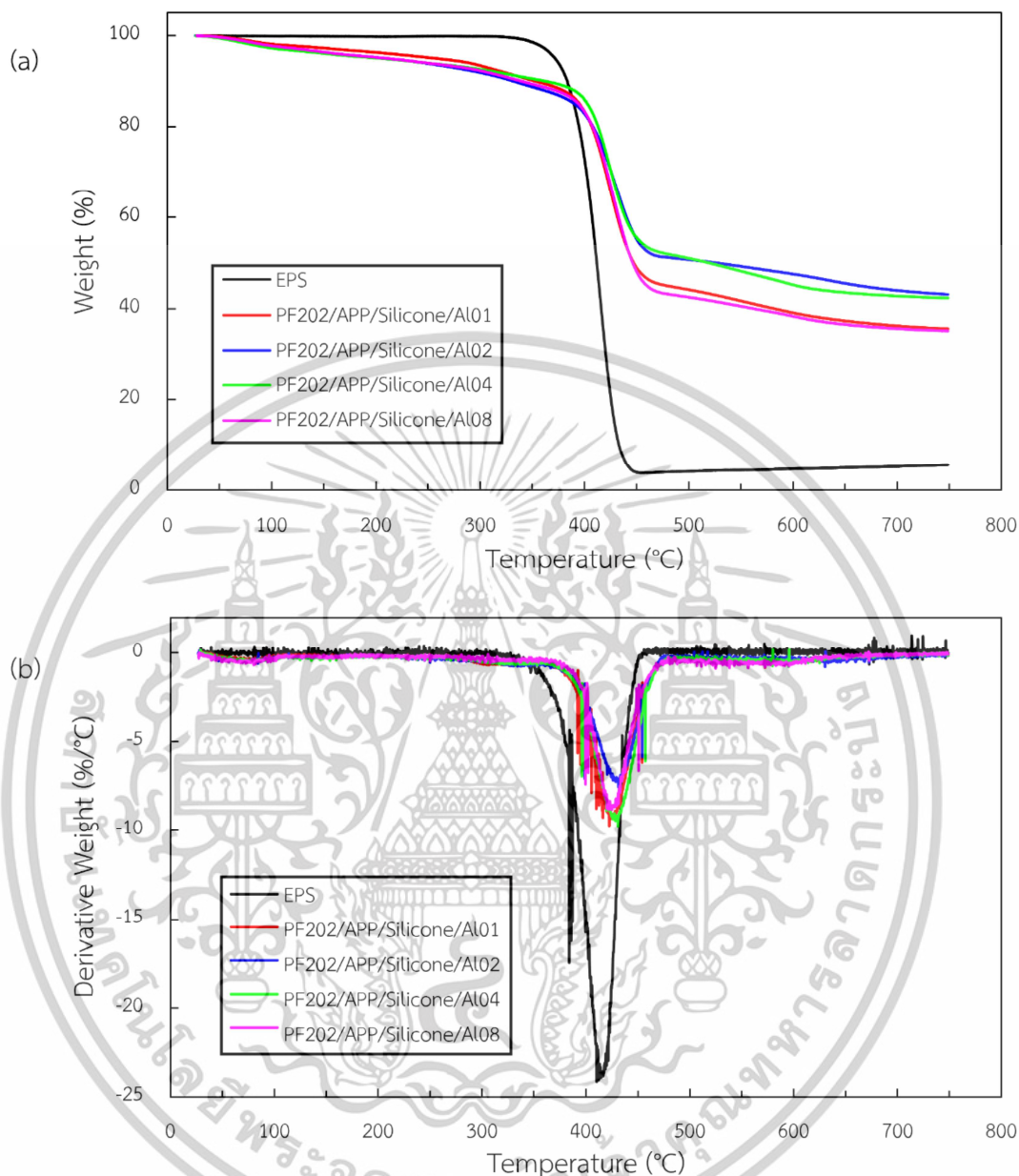
เสถียรภาพต่อความร้อนของโพลีเอสเตอร์ที่เคลือบสารหน่วงไฟเป็นหนึ่งในตัวแปรที่สำคัญที่สุดสำหรับประสิทธิภาพการหน่วงไฟ เนื่องจากเป็นตัวแปรที่สามารถบ่งบอกได้ถึงเหตุการณ์ที่อาจเกิดขึ้นเมื่อวัสดุได้รับความร้อนซึ่งส่งผลต่อความปลอดภัยต่อชีวิตและทรัพย์สินเพื่อจะประยุกต์ใช้วัสดุได้อย่างเหมาะสมกับลักษณะงาน Thermogravimetric analyzer (TGA) เป็นเครื่องมือในการทดสอบเพื่อดูพฤติกรรมการสลายตัวในความร้อน รูปที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบ TGA ของ EPS-PF202/APP/Silicone/AlO1 EPS-PF202/APP/Silicone/AlO2 EPS-PF202/APP/Silicone/

Al04 และ EPS-PF202/APP/Silicone/Al08 ที่ถูกทดสอบภายใต้แก๊สไนโตรเจน (Nitrogen) และรายละเอียดค่าที่สำคัญถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 รายละเอียดค่าที่สำคัญจากการทดสอบ TGA ของตัวอย่างโพนโพลีสไตรีน

ตัวอย่าง	T _{5%} (°C)	T _{max} (°C)	ถ่านคงเหลือที่ 750 °C (%)
EPS	371.8	410.4	5.5
PF202/APP/Silicone/Al01	256.5	422.5	35.6
PF202/APP/Silicone/Al02	208.9	431.3	43.1
PF202/APP/Silicone/Al04	203.6	430.8	42.3
PF202/APP/Silicone/Al08	209.6	424.8	35.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ (a) TGA และ (b) DTG ของตัวอย่างโพลีโอสไตรีนและสารหน่วงไฟ

โพลีโอสไตรีนที่ไม่ได้เคลือบสารหน่วงไฟมีการสลายตัวเพียงขั้นเดียวในอย่างเฉียบพลันในช่วงประมาณ 380 – 420 °C และในตอนสุดท้ายแทบจะไม่มีถ่านเหลืออยู่เลย ดูได้จากมวลที่เหลืออยู่ของโพลีโอสไตรีนที่อุณหภูมิเกิน 450 °C ขึ้นไปมีเหลืออยู่แค่ 5% บ่งบอกถึงการสลายตัวของไฮโดรคาร์บอนในโครงสร้างโพลีโอสไตรีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการสลายตัวของสารหน่วงไฟต่างจากโพลีโพลีสไตรีน ที่น้ำหนักจะไม่ลดลงอย่างฉับพลันเพียงครั้งเดียว จากค่า $T_{5\%}$ (อุณหภูมิที่ทำให้น้ำหนักหายไป 5%) ของ EPS และ EPS-PF202/APP/Silicone/Al01 ที่อยู่ที่ 371.8 °C และ 256.5 °C ตามลำดับ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยา cross link ของฟีนอลิกเรซินที่จะทำให้โครงสร้างแข็งและมีการคายน้ำออกจากโมเลกุลทำให้น้ำหนักลดลง น้ำที่ถูกปล่อยออกมาจากโมเลกุลจะช่วยลดอุณหภูมิรอบเปลวไฟได้และช่วยเจือจางเชื้อเพลิงในอากาศด้วย [49]

เมื่อผ่านการสลายตัวในขั้นแรกซึ่งเป็นผลมาจากฟีนอลิกเรซินจะเข้าสู่การสลายตัวในครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิประมาณ 300 – 410 °C ซึ่งเป็นผลมาจากการเริ่มสลายตัวของ APP ที่จะปล่อยโมเลกุลแก๊สขนาดเล็ก คือ แอมโมเนียและน้ำซึ่งสามารถช่วยลดอุณหภูมิได้ การสลายตัวครั้งที่ 3 เกิดขึ้นที่อุณหภูมิเกิน 410 °C ที่เกิดการสลายตัวของโมเลกุลใหญ่ใน APP และสารอินทรีย์ คือ ฟีนอลิกเรซินทำให้น้ำหนักลดลงอย่างชัดเจน

สารหน่วงไฟทั้ง 4 ตัวมีการสลายตัวในลักษณะที่คล้ายกัน ในส่วนของถ่านคงเหลือที่อุณหภูมิ 750 °C พบว่า EPS-PF202/APP/Silicone/Al01 มีถ่านคงเหลือมากกว่าโพลีเมลาถึง 30% และมีถ่านคงเหลือใกล้เคียงกับ EPS-PF202/APP/Silicone/Al08 ซึ่งเหลือน้อยกว่า 5% ในขณะเดียวกันก็เห็นได้อย่างชัดเจนว่า EPS-PF202/APP/Silicone/Al02 และ EPS-PF202/APP/Silicone/Al04 มีถ่านคงเหลือที่อุณหภูมิ 750 °C มากกว่าตัวอย่างอื่นอย่างมีนัยสำคัญ โดย EPS-PF202/APP/Silicone/Al02 จะมีถ่านคงเหลือมากที่สุด คือ 43.1% ซึ่ง EPS-PF202/APP/Silicone/Al04 จะมีถ่านคงเหลือที่ใกล้เคียงกันซึ่งน้อยกว่าอยู่ที่ 0.8% ซึ่งสอดคล้องกับค่า LOI ที่มีค่าใกล้เคียงกันและลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านที่มีลักษณะคล้ายกัน

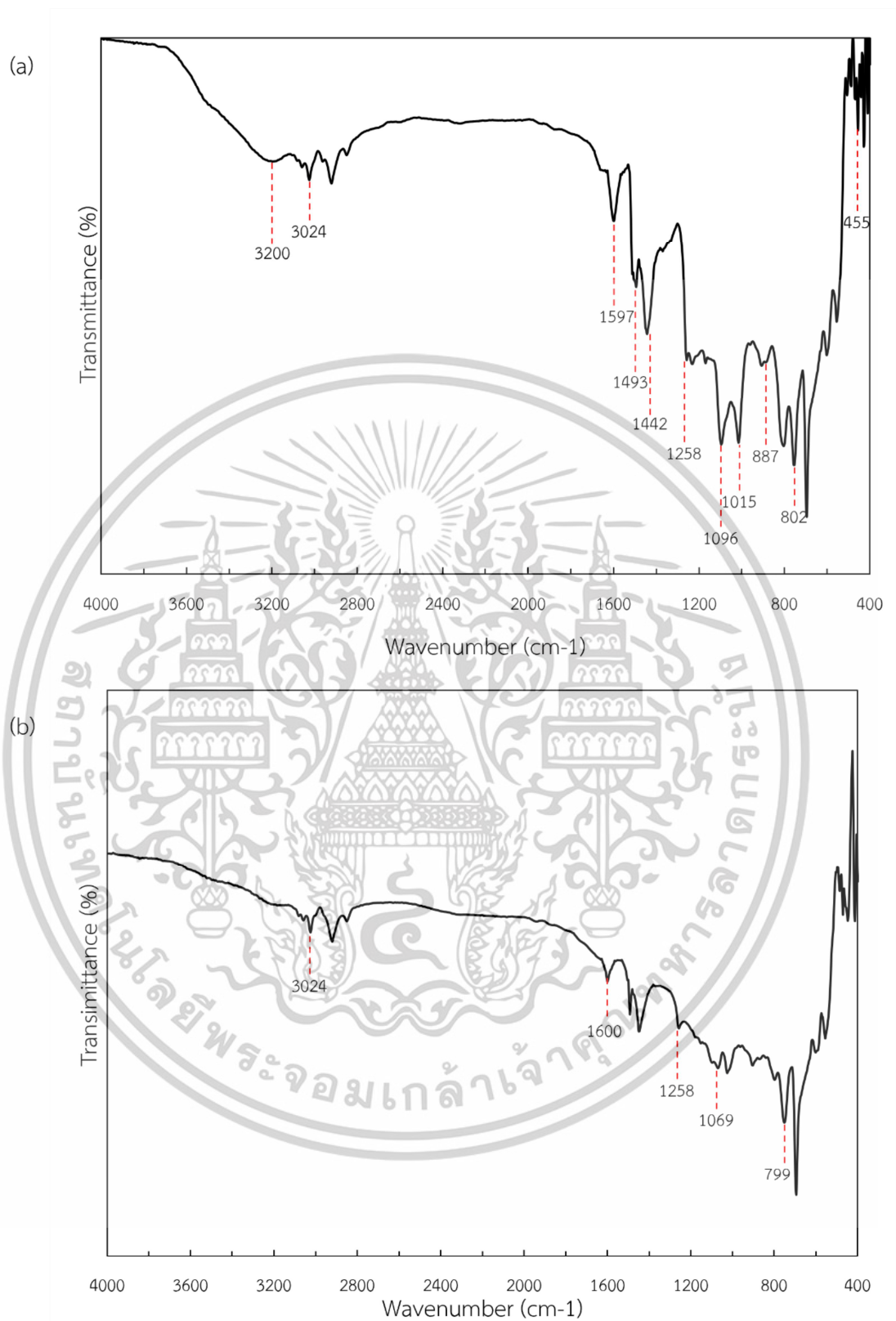
ในเชิงของอุณหภูมิที่สารอัตราการสลายตัวสูงที่สุด (T_{max}) พบว่า EPS-PF202/APP/Silicone/Al01 EPS-PF202/APP/Silicone/Al02 EPS-PF202/APP/Silicone/Al04 และ EPS-PF202/APP/Silicone/Al08 ทำให้ T_{max} สูงขึ้นประมาณ 12.1 20.9 20.4 และ 14.4 °C ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบ EPS-PF202/APP/Silicone/Al02 กับ EPS-PF202/APP/Silicone/Al04 ค่า T_{max} ของ EPS-PF202/APP/Silicone/Al02 จะมากกว่าเล็กน้อยซึ่งบ่งบอกถึงชั้นถ่านที่หนาแน่นมากกว่า แต่เมื่อดูที่ Initial degradation temperature ซึ่งคืออุณหภูมิก่อนที่จะเกิดการสลายตัวอย่างมากในขั้นการสลายตัวที่ 3 จากรูปที่ 4.8 เห็นได้ว่า EPS-PF202/APP/Silicone/Al04 มีการชะลออุณหภูมิจุดนี้ออกไปจากสารหน่วงไฟตัวอื่นไปอีกเล็กน้อยประมาณ 2 - 5 °C ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการหน่วงไฟที่ดี และดีในเชิงความปลอดภัยเพราะการชะลอจุด Initial degradation temperature นี้ในกรณีที่เกิดอัคคีภัยจะทำให้มีเวลามากขึ้นที่จะอพยพหรือขนย้าย จากผลการทดสอบนี้เห็นได้ชัดเจนว่าปริมาณโดยน้ำหนักของผงอลูมิเนียมส่งผลต่อประสิทธิภาพการหน่วงไฟซึ่งจะช่วยเสริมให้ชั้นถ่านมีความหนาแน่นมากขึ้น

4.6 การศึกษาพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างเผาไหม้โดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)

การเข้าใจพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้ของวัสดุโพลีเมอร์จะช่วยให้เข้าใจและคาดการณ์สิ่ง ที่อาจเกิดขึ้นภายใต้ความร้อน ซึ่งอาจบ่งบอกถึงการเสริมประสิทธิภาพการหน่วงไฟและทำให้เข้าใจ กลไกการหน่วงไฟที่สำคัญได้ FTIR เป็นเครื่องมือที่ใช้หลักการทางคลื่นจำพวกอินฟราเรดเพื่อวิเคราะห์ โครงสร้าง พันธะหรือหมู่ฟังก์ชันของวัสดุ รูปที่ 4.9 แสดงสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ FTIR ของ EPS-PF202/APP/Silicone/AlO4 และถ่านหลังการเผาของ EPS-PF202/APP/Silicone/AlO4

จากรูปที่ 4.9(a) ที่ตำแหน่งพีก 3024 cm^{-1} คือความถี่การสั่นในแบบการยืด (Stretching Vibration) ของ $=\text{C-H}$ [10] พีก 1597 cm^{-1} 1493 cm^{-1} และ 1442 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบยืด ของ $-\text{C}=\text{C}-$ วงเบนซีน (Benzene) จากโพลีโพลีสไตรีนและฟีนอลิกเรซิน [50] นอกจากนี้ในส่วนที่แสดง ถึง APP นั้นประกอบด้วยพีก 3200 cm^{-1} บอถึงการสั่นแบบยืดของ N-H ที่ตำแหน่ง 1258 , 887 และ 802 cm^{-1} คือการสั่นแบบยืดของ $\text{P}=\text{O}$, $\text{P}-\text{O}$ และ $\text{P}-\text{O}-\text{P}$ ตามลำดับ [51] พีก 1096 และ 1015 cm^{-1} คือความถี่การสั่นแบบยืดของ $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ [52] และพีก 455 cm^{-1} จากการสั่นแบบงอ (Bending Vibration) ของ $\text{O}-\text{Si}-\text{O}$ ซึ่งมาจากซิลิโคนที่เป็นส่วนผสมในการทำสารเคลือบ [53]

สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ FTIR ของถ่านหลังการเผาของ EPS-PF202/APP/Silicone/AlO4 จากรูปที่ 4.9(b) แสดงให้เห็นว่าพีก 3200 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการสั่นในแบบยืดของ N-H ที่เป็น ส่วนประกอบใน APP หายไปหลังจากการเผาไหม้ แสดงให้เห็นว่าในระหว่างการเผาไหม้ APP ได้ สลายตัวและปล่อยแก๊สแอมโมเนียออกมากซึ่งช่วยลดความเข้มข้นของเชื้อเพลิงในอากาศ นอกจากนั้นพีก 1096 และ 1015 cm^{-1} หายไปแสดงถึงการสลายตัวของพันธะ $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ ในซิลิโคน และพีก 1069 cm^{-1} คือความถี่การสั่นแบบยืดของแรงระหว่าง $\text{Si}-\text{O}(\text{Si})$ กับ $\text{Si}-\text{O}(\text{Al})$ [54] ซึ่ง หมายความว่าผงอลูมิเนียมเข้าไปมีบทบาทในระหว่างการเผาไหม้โดยการเข้าไปแทนที่ $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ ที่ สลายตัวซึ่งอลูมิเนียมจะเข้าไปอยู่ในลักษณะที่ทำให้โครงสร้างเป็นทรงสี่หน้า (Tetrahedral) [55] และช่วยให้โครงสร้างยังยึดติดกันทำให้ชั้นถ่านที่เกิดขึ้นมีความแน่นมากขึ้นทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกัน ความร้อนให้กับโพลี

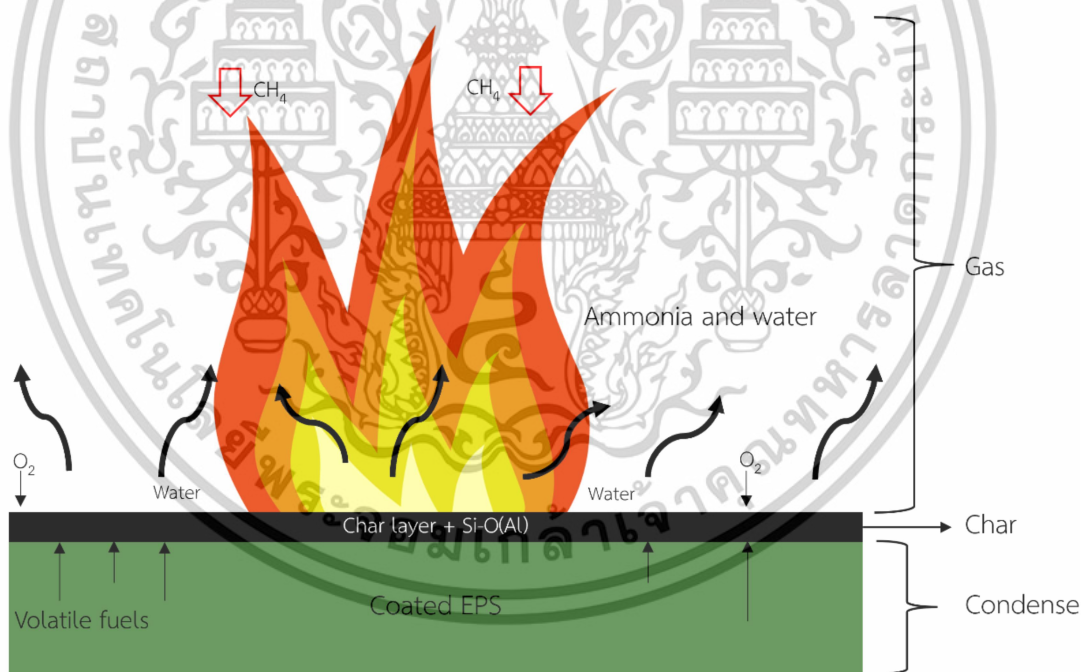


รูปที่ 4.9 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ FTIR ของ (a) EPS-PF202/APP/Silicone/AlO4 และ (b) ถ่านหลังการเผาของ EPS-PF202/APP/Silicone/AlO4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 วิเคราะห์กลไกของสารหน่วงไฟที่สังเคราะห์ขึ้น

จากผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองที่ผ่านมาอาจสรุปกลไกการทำงานของสารหน่วงไฟได้ที่สังเคราะห์ขึ้นได้ต่อไปนี้ โฟมที่เคลือบด้วยสารหน่วงไฟจะมีการสลายตัวเป็น 3 ช่วง ช่วงแรกเกิดขึ้นตั้งแต่อุณหภูมิทำการสลายตัวเกิดขึ้นอย่างช้าๆเป็นผลมาจากการเกิด cross link ของพีนอลิกเรซินที่คายน้ำออกมาและส่งเสริมให้เกิดขึ้นถ่านซึ่งนับเป็นกลไกการหน่วงไฟอันดับแรกที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 300 °C ซึ่งเป็นกลไกที่ทำให้เริ่มเกิดเฟสถ่านขึ้น ช่วงที่ 2 เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 300-410 °C APP เริ่มสลายตัวปล่อยโมเลกุลเล็กในโครงสร้าง คือ แก๊สแอมโมเนียและน้ำซึ่งทำให้ความเข้มข้นของเชื้อเพลิงในอากาศและอุณหภูมิรอบเปลวไฟซึ่งเป็นกลไกที่เกิดในเฟสแก๊ส ช่วงที่ 3 เกิดขึ้นที่อุณหภูมิตั้งแต่ประมาณ 410 °C ขึ้นไปซึ่งเกิดการลดลงของน้ำหนักอย่างชัดเจนเนื่องจากการสลายตัวของโมเลกุลใหญ่ใน APP และพีนอลิกเรซินที่เห็นได้จากผลของ TGA และยืนยันโดยผล FTIR ในขณะเดียวกันซิลิโคนเกิดการสลายตัวพร้อมกับผงอลูมิเนียมเข้าไปมีบทบาทในโครงสร้างเกิดเป็นโครงสร้างอลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminum silicate) และทำให้ชั้นถ่านมีความหนาแน่นมากขึ้นเป็นเกราะป้องกันความร้อนจากเปลวไฟถ่ายเทไปสู่เนื้อโฟมชั้นลึกเข้าไปและชะลอการลอยออกมาของไอโพลิสไตรีนที่เกิดการสลายตัวซึ่งเป็นกลไกการหน่วงไฟหลักที่เกิดขึ้นในเฟสถ่านและเฟสของแข็ง



รูปที่ 4.10 ภาพแสดงกลไกของสารหน่วงไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการเผาโดยตรงด้วยหัวพ่นไฟ พบว่าฟีนอลิกเรซินชนิดที่ละลายในแอลกอฮอล์เหมาะกับงานวิจัยนี้มากกว่าฟีนอลิกเรซินที่กระจายตัวในน้ำ และฟีนอลิกเรซินชนิด PF-202 ให้ผลการหน่วงไฟที่ดีกว่า PF-205 เล็กน้อย และ APP ช่วยเสริมการหน่วงไฟอย่างเห็นชัดเจน แต่โฟมที่ทำการทดสอบยังมีการยุบตัวจึงมีการเติมผงอลูมิเนียมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้าง จึงใช้ APP ร่วมกับผงอลูมิเนียมในการทำสารหน่วงไฟและสังเคราะห์แผ่นโฟมโดยใช้อุปกรณ์จริงในอุตสาหกรรม

ผลการทดสอบความสม่ำเสมอในการเคลือบ SEM-EDS พบว่า เม็ดโฟมมีการเคลือบทั่วทั้งเม็ดและหนาพอจนไม่เห็นเนื้อโฟม ส่วนการกระจายตัวของธาตุซิลิกอน และอลูมิเนียม พบว่า มีการกระจายตัวที่ดีแสดงถึงความเข้ากันได้ของสารอินทรีย์ที่เป็นส่วนประกอบภายในสารหน่วงไฟ

ผลการวิเคราะห์ LOI และ UL-94 พบว่า EPS-PF202/APP/Silicone/AlO4 ให้ผลที่ดีที่สุดซึ่งมีค่า LOI สูงกว่าโฟมเปล่าถึง 40% ซึ่งมีความใกล้เคียงกับ EPS-PF202/APP/Silicone/AlO2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณของผงอลูมิเนียมช่วยให้ประสิทธิภาพการหน่วงไฟดีขึ้น

ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของถ่านหลังจากการเผาไหม้พบว่าลักษณะเด่นที่ควรสังเกต คือ รูและรอยแตกบนชั้นถ่านโดย EPS-PF202/APP/Silicone/AlO1 มีรูและรอยแตกมากที่สุดและค่อยๆ ลดลงตามปริมาณผงอลูมิเนียมที่มากขึ้น

จากผลการทดสอบเสถียรภาพต่ออุณหภูมิของสารหน่วงไฟ พบว่า สารหน่วงไฟจะมีการสลายตัวเป็น 3 ช่วง ช่วงแรกเกิดจากผลของฟีนอลิกเรซินที่เกิดการ cross link และคายน้ำ ในช่วงที่สองเกิดจากการสลายตัวของ APP และปล่อยแอมโมเนียและน้ำ และช่วงที่สามเกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ทำให้น้ำหนักลดลงมาก EPS-PF202/APP/Silicone/AlO4 ให้ผล Initial degradation temperature ที่ดีกว่าตัวอื่น 2-5 °C ซึ่งทำให้การใช้งานปลอดภัยมากขึ้นในกรณีเกิดอัคคีภัย

สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ FTIR ของ EPS-PF202/APP/Silicone/AlO4 และถ่านหลังการเผาไหม้ EPS-PF202/APP/Silicone/AlO4 พบว่า หลังการเผาไหม้มีที่พีค 3200 cm^{-1} หายไปซึ่งเกิดจากการสลายตัวของ APP รวมถึงยืนยันการสลายตัวของซิลิโคนและเกิดเป็นโครงสร้างคล้ายอลูมิเนียมซิลิเกตซึ่งทำให้ชั้นถ่านหนาแน่นขึ้น

จากผลการทดลองทั้งหมดก่อนมีแนวโน้มที่ชัดเจนว่า EPS-PF202/APP/Silicone/AlO4 เป็นตัวอย่างที่มีประสิทธิภาพการหน่วงไฟที่ดีที่สุด ซึ่งมีความใกล้เคียงกับ EPS-PF202/APP/Silicone/AlO2 ซึ่งมีประสิทธิภาพต่ำกว่าเพียงเล็กน้อยอย่างไรก็ตามในเชิงของอุตสาหกรรมต้นทุนก็เป็นเรื่องสำคัญซึ่งจากการประมาณราคา EPS-PF202/APP/Silicone/AlO4 มีราคาที่แพงกว่า EPS-PF202/APP/Silicone/AlO2 เล็กน้อยโดยการคำนวณราคาสารหน่วงไฟสามารถเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดูได้จากภาคผนวก ค ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า EPS-PF202/APP/Silicone/AlO4 เป็นสูตรที่ดีที่สุดแต่หากมองในมุมมองอุตสาหกรรม EPS-PF202/APP/Silicone/AlO2 ก็มีแนวโน้มที่น่าสนใจเพราะสามารถลดต้นทุนราคาลงได้อีกเล็กน้อยและได้ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การทดสอบสมบัติการหน่วงไฟควรมีตัวอย่างที่ไม่มีการเติมผงอลูมิเนียมลงไปเพื่อเป็นการเปรียบเทียบระหว่างการเติมผงอลูมิเนียมกับไม่เติมผงอลูมิเนียม
2. ควรมีการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ เช่น การทนแรงอัด (Compression strength) ของถ่านที่เกิดขึ้นหลังการเผาไหม้ของโพลีที่ทำขึ้นเองและนำไปเปรียบเทียบกับโพลีที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ขายอยู่ในตลาดตอนนี้ เพื่อพิสูจน์ว่าผงอลูมิเนียมส่งผลต่อความแข็งของถ่านที่เกิดขึ้น



บรรณานุกรม

- [1] M. Zhang, F. Gou, Y. Wang, J. Sun, Melt-flowing of expanded polystyrene in large-scale discrete flame spread, *Fire Saf J.* 142 (2024).
- [2] M. Qin, X. Hu, J. Guo, Preparation of a New Type of Expansion Flame Retardant and Application in Polystyrene, *Coatings* 13 (2023).
- [3] Q. Chen, J. Zhang, J. Li, J. Sun, B. Xu, H. Li, X. Gu, S. Zhang, Synthesis of a novel triazine-based intumescent flame retardant and its effects on the fire performance of expanded polystyrene foams, 2022.
- [4] L. Wang, C. Wang, P. Liu, Z. Jing, X. Ge, Y. Jiang, The flame resistance properties of expandable polystyrene foams coated with a cheap and effective barrier layer, *Constr Build Mater* 176 (2018) 403–414.
- [5] X. Huang, G. Chen, Z. Zhou, J. Hu, C. Wang, D. Chen, Experimental and numerical study of upward flame spread and heat transfer over expanded polystyrene at different altitudes, *Case Studies in Thermal Engineering* 28 (2021).
- [6] M. E. Li, H. B. Zhao, J. B. Cheng, T. Wang, T. Fu, A. N. Zhang, Y. Z. Wang, An effective green porous structural adhesive for thermal insulating, flame-retardant, and smoke-suppressant expandable polystyrene foam, *Engineering* 17 (2022) 151–160.
- [7] Z. Wang, W. Liang, M. Cai, Y. Tang, S. Li, W. An, G. Zhu, Experimental study on flame spread over discrete extruded polystyrene foam with different fuel coverage rates, *Case Studies in Thermal Engineering* 17 (2020).
- [8] H. Sun, Y. Pan, J.H. Wang, J.H. Gong, A.P. Ding, J.C. Jiang, Flame Spread Characteristics of Inclined Extruded Polystyrene Thermal Insulation Material, in: *Procedia Eng*, Elsevier Ltd, 2018: pp. 651–658.
- [9] J. Wang, B. Yuan, W. Cai, S. Qiu, Q. Tai, H. Yang, Y. Hu, Facile design of transition metal based organophosphorus hybrids towards the flame retardancy reinforcement and toxic effluent elimination of polystyrene, *Mater Chem Phys* 214 (2018) 209–220.
- [10] M. E. Li, Y. W. Yan, H.B. Zhao, R.K. Jian, Y.Z. Wang, A facile and efficient flame-retardant and smoke-suppressant resin coating for expanded polystyrene foams, *Compos B Eng* 185 (2020).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] A. K. Roy Choudhury, Flame- and fire-retardant finishes, 2017.
- [12] E. D. Weil, S. V. Levchik, Flame retardants in commercial use or development for polystyrenes, thermoplastic styrene copolymers, and blends, in flame retardants for plastics and textiles, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2015: pp. 49–81.
- [13] W. Xing, X. Wang, L. Song, Y. Hu, Enhanced thermal stability and flame retardancy of polystyrene by incorporating titanium dioxide nanotubes via radical adsorption effect, *Compos Sci Technol* 133 (2016) 15–22.
- [14] S. Hamdani-Devarenes, R. El Hage, L. Dumazert, R. Sonnier, L. Ferry, J.M. Lopez-Cuesta, C. Bert, Water-based flame retardant coating using nano-boehmite for expanded polystyrene (EPS) foam, *Prog Org Coat* 99 (2016) 32–46.
- [15] Y. W. Yan, J. Q. Huang, Y. H. Guan, K. Shang, R. K. Jian, Y. Z. Wang, Flame retardance and thermal degradation mechanism of polystyrene modified with aluminum hypophosphite, *Polym Degrad Stab* 99 (2014) 35–42.
- [16] J. Liu, Z. Yu, H. Chang, Y. Zhang, Y. Shi, J. Luo, B. Pan, C. Lu, Thermal degradation behavior and fire performance of halogen-free flame-retardant high impact polystyrene containing magnesium hydroxide and microencapsulated red phosphorus, *Polym Degrad Stab* 103 (2014) 83–95.
- [17] J. Liu, Z. Yu, Y. Shi, H. Chang, Y. Zhang, J. Luo, C. Lu, A preliminary study on the thermal degradation behavior and flame retardancy of high impact polystyrene/magnesium hydroxide/microencapsulated red phosphorus composite with a gradient structure, *Polym Degrad Stab* 105 (2014) 21–30.
- [18] J. Liu, S. Peng, Y. Zhang, H. Chang, Z. Yu, B. Pan, C. Lu, J. Ma, Q. Niu, Influence of microencapsulated red phosphorus on the flame retardancy of high impact polystyrene/magnesium hydroxide composite and its mode of action, *Polym Degrad Stab* 121 (2015) 208–221.
- [19] Y. Xia, Z. Mao, F. Jin, Y. Guan, A. Zheng, Synthesis of 1-hydroxy ethylidene-1,1-diphosphonic ammonium and the promise of this ammonium salt as

- an intumescent flame retardant in polystyrene, *Polym Degrad Stab* 102 (2014) 186–194.
- [20] G. Li, J. Yang, T. He, Y. Wu, G. Liang, An Investigation of the thermal degradation of the intumescent coating containing MoO_3 and Fe_2O_3 , *Surf Coat Technol* 202 (2008) 3121–3128.
- [21] S. Fu, P. Song, X. Liu, Thermal and flame retardancy properties of thermoplastics/natural fiber biocomposites, *Adv hig str nat fibre comp in cons*, 2017: pp. 479–508.
- [22] R. K. Paikara, T. R. Gyawali, Influence of aluminum powder content and powder-to-sand ratio on the physical and mechanical properties of aerated lightweight mortar, *Cleaner Materials* 10 (2023).
- [23] S. Goyal, J. C. Bose, Properties of expanded polystyrene (EPS) and its environmental effects, 2021.
- [24] I. H. Processes, *Combustion of hydrocarbons*, 1932.
- [25] C. Zhang, Y. Jiang, S. Li, Z. Huang, X. Q. Zhan, N. Ma, F. C. Tsai, Recent trends of phosphorus-containing flame retardants modified polypropylene composites processing, *Heliyon* 8 (2022).
- [26] I. Eceiza, R. Aguirresarobe, A. Barrio, M.J. Fernández-Berridi, L. Irusta, Ammonium polyphosphate-melamine synergies in thermal degradation and smoke toxicity of flexible polyurethane foams, *Thermochim Acta* 726 (2023).
- [27] J. Wagner, P. Deglmann, S. Fuchs, M. Ciesielski, C.A. Fleckenstein, M. Döring, A flame retardant synergism of organic disulfides and phosphorous compounds, *Polym Degrad Stab* 129 (2016) 63–76.
- [28] C. Dewaghe, C. Y. Lew, M. Claes, S. A. Belgium, P. Dubois, Fire-retardant applications of polymer-carbon nanotubes composites: Improved barrier effect and synergism, Woodhead Publishing Limited, 2011.
- [29] I. C. Mcneill, *Structure and stability of halogenated polymers: part 4-chain brominated polystyrene*, 1989.
- [30] B. Yuan, G. Wang, S. Bai, P. Liu, Preparation of halogen-free flame-retardant expandable polystyrene foam by suspension polymerization, *J Appl Polym Sci* 136 (2019).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [31] L. Ahmed, B. Zhang, S. Hawkins, M. S. Mannan, Z. Cheng, Study of thermal and mechanical behaviors of flame retardant polystyrene-based nanocomposites prepared via in-situ polymerization method, *J Loss Prev Process Ind* 49 (2017) 228–239.
- [32] S. Zhang, W. Ji, Y. Han, X. Gu, H. Li, J. Sun, Flame-retardant expandable polystyrene foams coated with ethanediol-modified melamine-formaldehyde resin and microencapsulated ammonium polyphosphate, *J Appl Polym Sci* 135 (2018) 1–8.
- [33] B. Cao, X. Gu, X. Song, X. Jin, X. Liu, X. Liu, J. Sun, S. Zhang, The flammability of expandable polystyrene foams coated with melamine modified urea formaldehyde resin, *J Appl Polym Sci* 134 (2017) 1–8.
- [34] UL 94, Tests for Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances, 2013. https://standardscatalog.ul.com/standards/en/standard_94_6.
- [35] Thai Isowall, Polystyrene Foam, (2023). <https://www.thaisowall.com/th/> (accessed May 13, 2024).
- [36] J. Cong, G. Yang, L. Zhao, Q. Zhang, The synergistic smoke suppression effect of ferric oxide on flame retardant wood-polyurethane composite, 2018.
- [37] B. Pani, S. Sirohi, D. Singh, Studies on the Effects of Various Flame Retardants on Polypropylene, *American Journal of Polymer Science* 2013 (2013) 63–69.
- [38] S. Guru, D. Mishra, S. S. Amritphale, S. Joshi, Influence of glycols in microwave assisted synthesis of ironoxide nanoparticles, *Colloid Polym Sci* 294 (2016) 207–213.
- [39] X. Shi, Y. Song, Z. Cai, X. Wang, D. Cao, Q. Cheng, J. Zou, Z. Shi, Z. Cui, The influence of microcapsules with a partially filled structure on the damping properties of an epoxy resin, *New J Chem* 42 (2018) 12119–12125.
- [40] H. Li, Z. Wang, X. Chen, M. Sun, X. Zhang, L. Tang, Synergistic flame retardancy of 4A-zeolite/MF-THEIC/ammonium polyphosphate in PP, *Polym Test* 129 (2023).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [41] A. G. Adeniyi, S. A. Abdulkareem, K. P. Odimayomi, E. C. Emenike, K. O. Iwuozor, Production of thermally cured polystyrene composite reinforced with aluminium powder and clay, *Environmental Challenges* 9 (2022) 100608.
- [42] X. Wang, L. Li, Y. Tong, Y. Dai, W. Chen, Synthesis of Core/Shell Structured Zinc Borate/Silica and Its Surface Charring for Enhanced Flame Retardant Properties, *Polym Degrad Stab* 183 (2021).
- [43] S. Amirabadi, M. Kheradmandkeysomi, A. Zandieh, P. Serles, N. Tanguy, T. Filleter, M. Sain, C.B. Park, Highly tough and flame retardant polystyrene composites by elastomeric nanofibers and hexagonal boron nitride, *J Mater Sci Technol* 198 (2024) 208–220.
- [44] J. Reuter, L. Greiner, P. Kukla, M. Döring, Efficient flame retardant interplay of unsaturated polyester resin formulations based on ammonium polyphosphate, *Polym Degrad Stab* 178 (2020).
- [45] X. Sun, C. Huang, Z. Chen, R. Zhou, J. Jiang, Multi-element synergistic effects to improve the flame retardancy of high impact polystyrene, *Polym Test* 115 (2022).
- [46] Y. Shi, W. Xing, B. Wang, N. Hong, Y. Zhu, C. Wang, Z. Gui, R.K.K. Yuen, Y. Hu, Synergistic effect of graphitic carbon nitride and ammonium polyphosphate for enhanced thermal and flame retardant properties of polystyrene, *Mater Chem Phys* 177 (2016) 283–292.
- [47] H. Li, Z. Hu, S. Zhang, X. Gu, H. Wang, P. Jiang, Q. Zhao, Effects of titanium dioxide on the flammability and char formation of water-based coatings containing intumescent flame retardants, *Prog Org Coat* 78 (2015) 318–324.
- [48] Y. Ma, J. Wang, Y. Xu, C. Wang, F. Chu, Preparation and characterization of phenolic foams with eco-friendly halogen-free flame retardant, *J Therm Anal Calorim* 114 (2013) 1143–1151.
- [49] J. P. Patel, Z. G. Xiang, S. L. Hsu, A. B. Schoch, S. A. Carleen, D. Matsumoto, Characterization of the crosslinking reaction in high performance adhesives, *Int J Adhes Adhes* 78 (2017) 256–262.

- [50] D. Liu, H. Wang, H. Jiang, D. Zhou, Improving the heat-resistance and toughness performance of phenolic resins by adding a rigid aromatic hyperbranched polyester, *J Appl Polym Sci* 133 (2016).
- [51] J. Ni, L. Chen, K. Zhao, Y. Hu, L. Song, Preparation of gel-silica/ammonium polyphosphate core-shell flame retardant and properties of polyurethane composites, *Polym Adv Technol* 22 (2011) 1824–1831.
- [52] G. Torrado, A. García-Arieta, F. De Los Ríos, J.C. Menéndez, S. Torrado, Quantitative determination of dimethicone in commercial tablets and capsules by Fourier transform infrared spectroscopy and antifoaming activity test, 1999.
- [53] H.S. Jo, H. Kim, S.Y. Yoon, Synthesis and Characterization of Mesoporous Aluminum Silicate and Its Adsorption for Pb (II) Ions and Methylene Blue in Aqueous Solution, *Materials* 15 (2022).
- [54] A. Adamczyk, E. Długon, The FTIR studies of gels and thin films of Al₂O₃-TiO₂ and Al₂O₃-TiO₂-SiO₂ systems, *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc* 89 (2012) 11–17.
- [55] W. Mozgawa, T. Bajda, Application of vibrational spectra in the studies of cation sorption on zeolites, *J Mol Struct* 792–793 (2006) 170–175.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 องค์ประกอบและอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารเคลือบผนังไฟเปรียบเทียบผลของ Diammonium phosphate (DAP)

ตัวอย่าง	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก (phr)		
	โพลีฟอสเฟตไตรอิน	PF	DAP
EPS-PF/DAP5	50	45	5
EPS-PF/DAP10	50	45	10
EPS-PF/DAP15	50	45	15

ตารางที่ ก.2 องค์ประกอบและอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารเคลือบผนังไฟเปรียบเทียบผลของ Ammonium polyphosphate (APP)

ตัวอย่าง	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก (phr)		
	โพลีฟอสเฟตไตรอิน	PF-202	APP
EPS-PF202/APP10	50	60	10
EPS-PF202/APP20	50	53	20

ตารางที่ ก.3 องค์ประกอบและอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารเคลือบผนังไฟเปรียบเทียบผลของชนิดของแหล่งซิลิกา

ตัวอย่าง	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก (phr)						
	โพลีฟอสเฟตไตรอิน	PF	PF-202	Fly ash	Fumed silica	Micro silica	Silicone
EPS-PF/FA	50	45	0	5	0	0	0
EPS-PF/FS	50	45	0	0	2	0	0
EPS-PF202/MS	50	0	64	0	0	2	0
EPS-PF202/Silicone	50	0	64	0	0	0	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

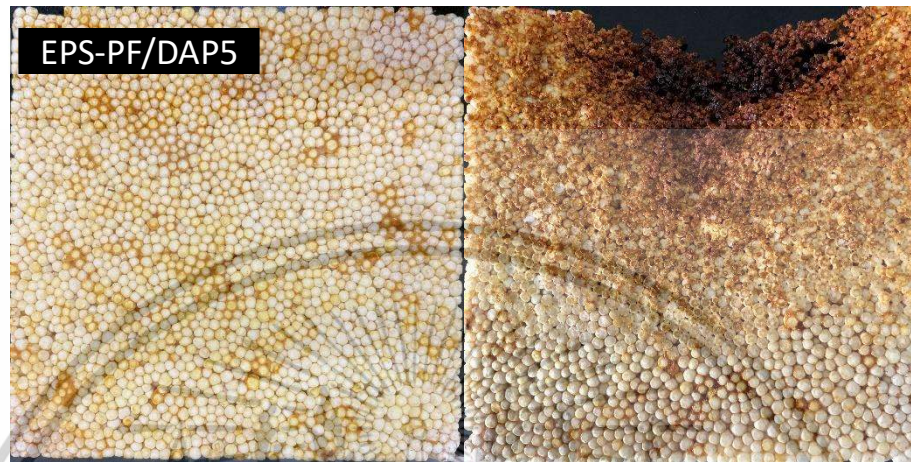
ตารางที่ ก.4 องค์ประกอบและอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารเคลือบผนังไฟเปรียบเทียบผลของผง
อลูมิเนียม (Al)

ตัวอย่าง	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก (phr)		
	โพลีโพลีสไตรีน	PF-202	Aluminum powder
EPS-PF202/Al2	50	64	2
EPS-PF202/Al4	50	64	4

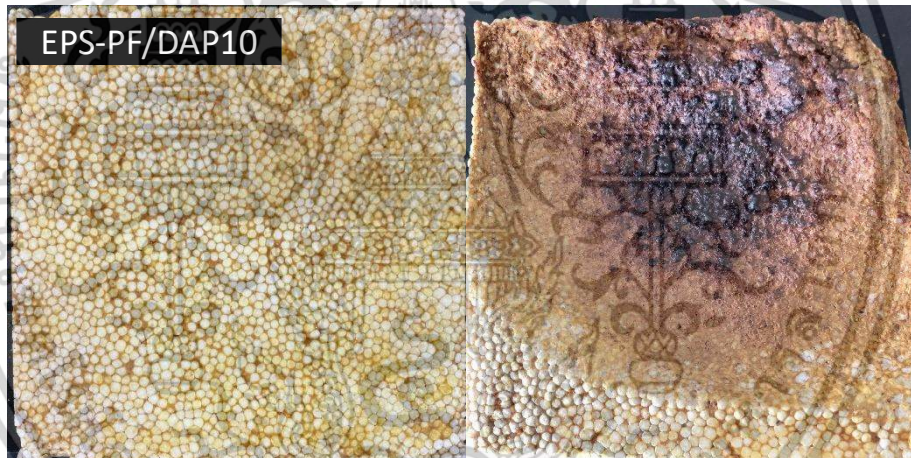


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
 รูปภาพที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง



รูปที่ ข.1 โฟมที่เคลือบด้วยสารหน่วงไฟที่มี Diammonium phosphate (DAP) 5%

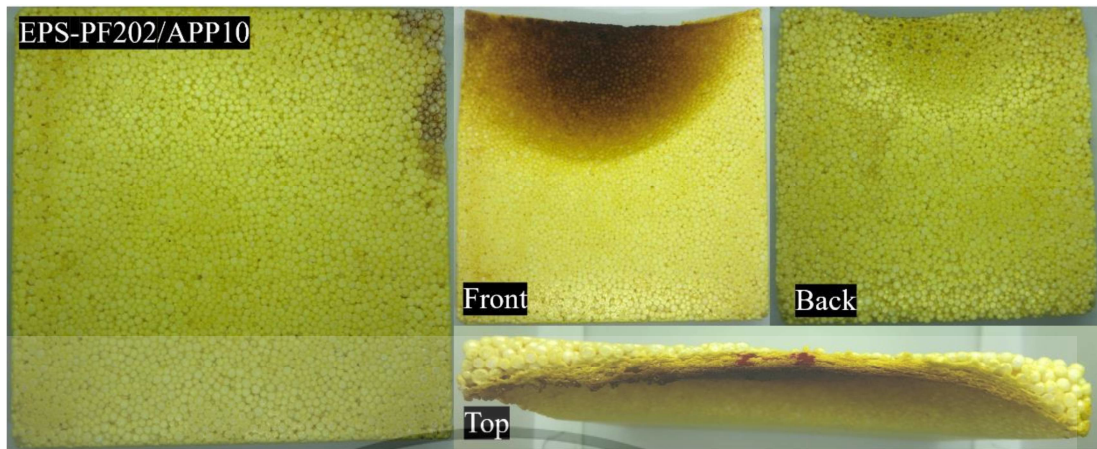


รูปที่ ข.2 โฟมที่เคลือบด้วยสารหน่วงไฟที่มี Diammonium phosphate (DAP) 10%

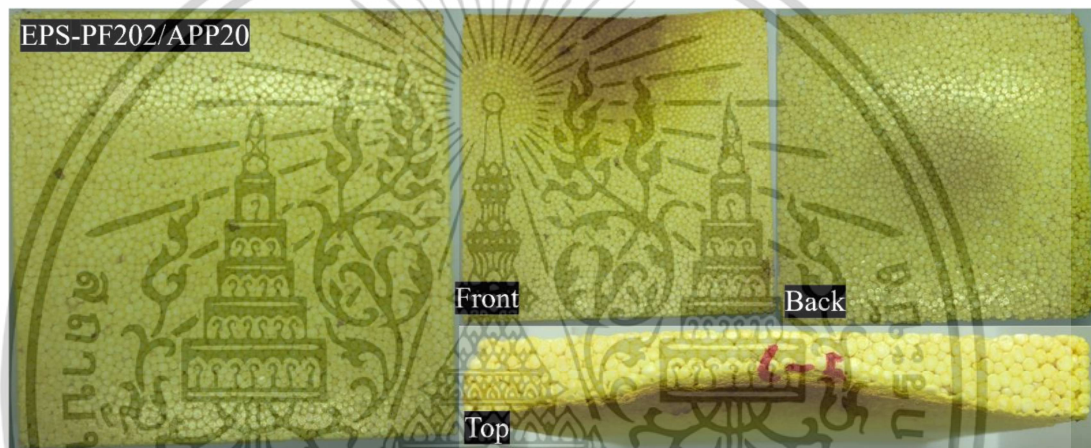


รูปที่ ข.3 โฟมที่เคลือบด้วยสารหน่วงไฟที่มี Diammonium phosphate (DAP) 15%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

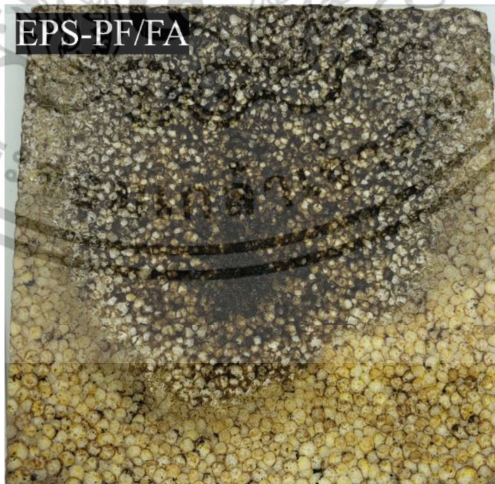


รูปที่ ข.4 โฟมที่เคลือบด้วยสารหน่วงไฟที่มี Ammonium polyphosphate (APP) 10%



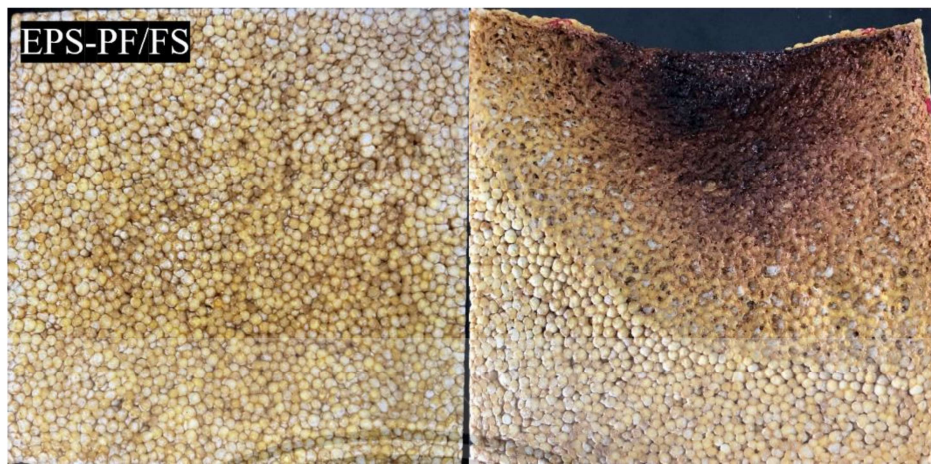
รูปที่ ข.5 โฟมที่เคลือบด้วยสารหน่วงไฟที่มี Ammonium polyphosphate (APP) 20%

โฟมที่เคลือบด้วยสารหน่วงไฟที่มี Ammonium polyphosphate (APP) 20%

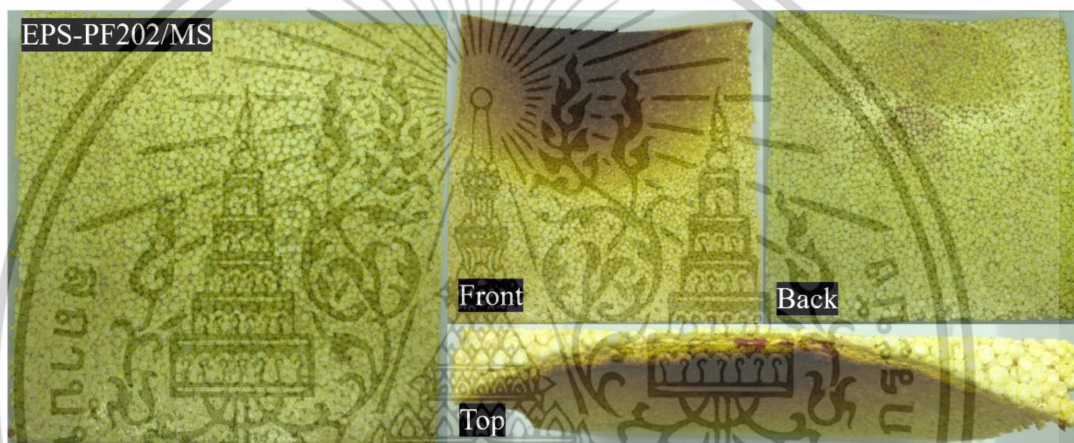


รูปที่ ข.6 โฟมที่เคลือบด้วยสารหน่วงไฟที่มี Fly ash (FA) 5%

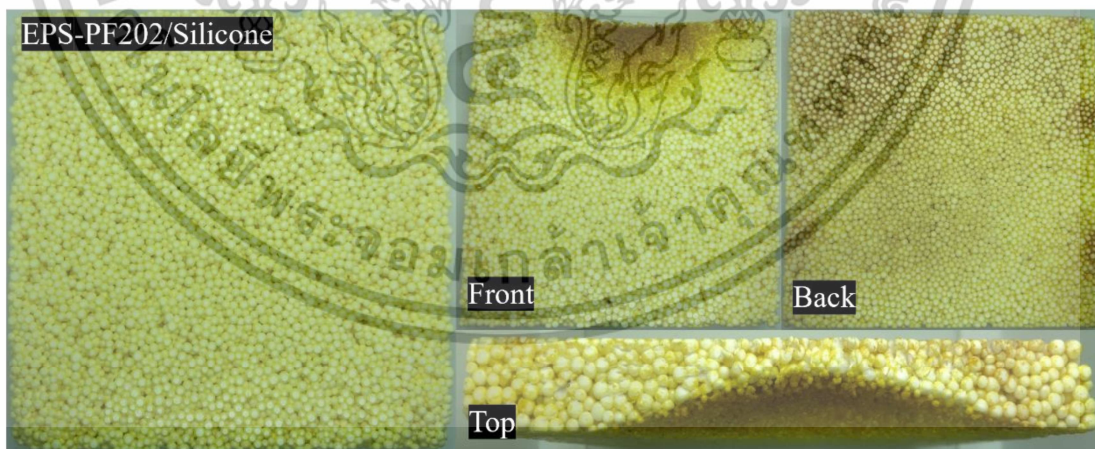
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.7 โฟมที่เคลือบด้วยสารหน่วงไฟที่มี Fumed silica (FS) 2%

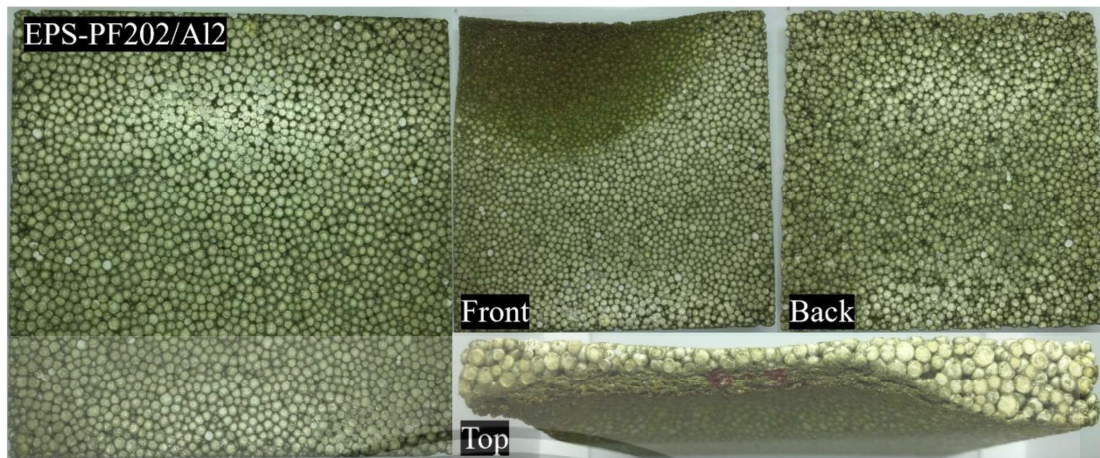


รูปที่ ข.8 โฟมที่เคลือบด้วยสารหน่วงไฟที่มี Micro silica (MS) 2%

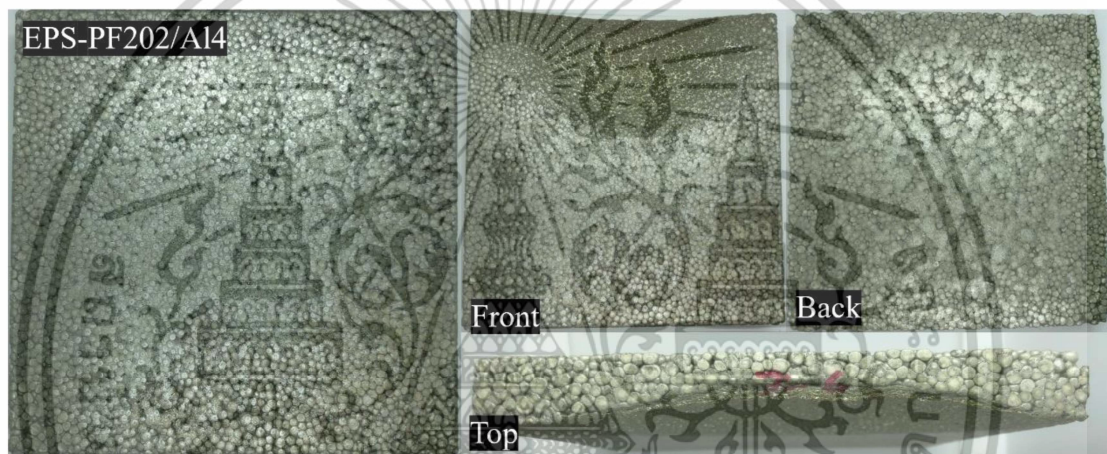


รูปที่ ข.9 โฟมที่เคลือบด้วยสารหน่วงไฟที่มี Silicone 10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.10 โฟมที่เคลือบด้วยสารหน่วงไฟที่มีผงอลูมิเนียม 2%



รูปที่ ข.11 โฟมที่เคลือบด้วยสารหน่วงไฟที่มีผงอลูมิเนียม 4%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค
การคำนวณที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ตารางที่ ค.1 การประเมินราคาของสารหน่วงไฟ EPS-PF202/APP/Silicone/Al02

สารเคมี	ราคา (บาทต่อกิโลกรัม)	อัตราส่วนโดย มวล (%)	ราคาต่อกิโลกรัมสาร หน่วงไฟ (บาท)
ฟีนอลิกเรซิน (PF-202)	40.45	0.45	18.20
เอทานอล 95%	45.96	0.17	7.81
Ammonium polyphosphate (APP)	55.16	0.30	16.55
Silicone	214.00	0.02	4.28
ผงอลูมิเนียม (Al)	110.29	0.02	2.21
สารหน่วงไฟ			49.05

ตารางที่ ค.2 การประเมินราคาของสารหน่วงไฟ EPS-PF202/APP/Silicone/Al04

สารเคมี	ราคา (บาทต่อกิโลกรัม)	อัตราส่วนโดย มวล (%)	ราคาต่อกิโลกรัมสาร หน่วงไฟ (บาท)
ฟีนอลิกเรซิน (PF-202)	40.45	0.45	18.20
เอทานอล 95%	45.96	0.17	7.81
Ammonium polyphosphate (APP)	55.16	0.30	15.44
Silicone	214.00	0.02	4.28
ผงอลูมิเนียม (Al)	110.29	0.02	4.41
สารหน่วงไฟ			50.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายภาณุพงศ์ ปริภัณฑาทรรณ
วัน เดือน ปีเกิด	24 กันยายน 2541
ที่อยู่	86/28 ซอยรามคำแหง 186 แขวง/เขตมีนบุรี กรุงเทพฯ 10510
ประวัติการศึกษา	2564 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้