

# การเพิ่มประสิทธิภาพสารกันไฟบนโพลีเอสเตอร์รีน



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# **Increasing Flame Retardant Efficiency on Polystyrene Foam**

The seal of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang is a circular emblem. It features a central sunburst with rays emanating from a central point. Below the sunburst are three tiered, pagoda-like structures. The entire emblem is surrounded by a decorative border. The Thai text around the border reads "สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง" (King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang).

**Pannathorn Disarapong**

**A Report Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Bachelor of Engineering (Chemical Engineering)  
Department of Chemical Engineering, School of Engineering,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Academic Year 2023**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาบัตรเรื่อง การเพิ่มประสิทธิภาพสารกันไฟบนโพลีเอสเตอร์  
โดย นายปณณธร ดิสรพงษ์  
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร. ชีรพร สุธีวงศ์  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาบัตรนี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรม  
ศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาบัตร

TEERAPORN

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. ชีรพร สุธีวงศ์)

Dh

กรรมการ

(ผศ. ดร. อภินันท์ นัมคณิสสรณ์)

Pr

กรรมการ

(รศ. ดร. พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                     |  |
|---------------------|--|
| ปริญญาานิพนธ์เรื่อง | การเพิ่มประสิทธิภาพสารกันไฟบนโคมพอลิस्टาเร็น |
| โดย                 | นายปณณธร ดิสรระพงค์                          |
| ปริญญา              | วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต                          |
| สาขา                | วิศวกรรมเคมี                                 |
| ปีการศึกษา          | 2566   |
| อาจารย์ที่ปรึกษา    | รศ. ดร. อธิพร สุธีวงศ์                       |

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาและพัฒนาสารกันไฟสำหรับโคมพอลิस्टาเร็น จากสารเคลือบผสมที่ประกอบด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ โซเดียม ซิลิเกต ไทเทเนียมไดออกไซด์ หรือซิงค์ออกไซด์ โดยใช้ฟีนอลิกเรซินเป็นตัวช่วยในการยึดเกาะ ก่อนนำสารผสมที่ได้ไปรวมเข้ากับเม็ดโคมพอลิस्टาเร็น และขึ้นรูปเป็นแผ่นโคมพอลิस्टาเร็น แล้วนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปทดสอบประสิทธิภาพการกันไฟด้วยวิธีการเผาเพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหม้ วิเคราะห์โครงสร้างชั้นถ่าน และโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติการเปลี่ยนแปลงเชิงน้ำหนักด้วยความร้อน พบว่าสารเคลือบช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกันไฟ ลดการแพร่กระจายของไฟ และเพิ่มระยะเวลาการไหม้ให้โคมพอลิस्टาเร็น ทั้งยังสามารถรักษาโครงสร้างของโคมพอลิस्टาเร็น ซึ่งความสามารถในการกันไฟนี้มาจากกลไกการกันไฟต่างๆของสารที่ผสมอยู่ในสารเคลือบ

**คำสำคัญ:** สารเคลือบกันไฟ, อะลูมิเนียมออกไซด์, ไทเทเนียมไดออกไซด์, ซิงค์ออกไซด์, โคมพอลิस्टาเร็น

**Title** Increasing Flame Retardant Efficiency of Polystyrene Foam  
**By** Mr. Pannathorn Disarapong  
**Degree** Bachelor of Engineering  
**Program** Chemical Engineering  
**Year** 2023  
**Advisor** Assoc. Prof. Dr. Teeraporn Suteewong

### Abstract

This research studies and develops a flame retardant coating for polystyrene foam. The composite coating consists of aluminum hydroxide, sodium silicate, titanium dioxide, or zinc oxide and phenolic resin is used as the matrix. After mixing with polystyrene beads, the coated polystyrene beads were molded into polystyrene foam sheets. Fire protection performance of resulting product was characterized using a burning method to study its fire resistance behavior. The char layer structure and microstructure were analyzed using scanning electron microscopy. Thermal stability analysis was performed using the thermogravimetric analyzer. It was found that, after coating, flame resistance of coated polystyrene foam was improved. Reduction of the spread of fire was observed. The burned structure can maintain the structure of polystyrene foam. This fire protection ability comes from various fire protection mechanisms of the substances mixed in the coating.

**Keywords:** Flame retardant coating, Aluminum oxide, Titanium dioxide, Zinc oxide, Polystyrene foam

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ธีรพร สุธีวงศ์ รุ่งพินายภาณุพงศ์ ปรีภักฑาภรณ์ และรุ่นพี่คนอื่นๆทุกคนที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และการสนับสนุนจนทำให้โครงการมีผลสำเร็จได้ด้วยดี ขอขอบคุณที่อบรมสั่งสอนเกี่ยวกับการค้นคว้าข้อมูล ระเบียบการทำการทดลอง การเตรียมตัวอย่าง การใช้เครื่องมือ และวิธีการวิเคราะห์ผลการทดลองตลอดจนแนวทางในการประกอบอาชีพในอนาคต

ขอขอบคุณทุกท่านในครอบครัวของผู้จัดทำที่ให้การสนับสนุนและกำลังใจมาโดยตลอด

ท้ายนี้ผู้จัดทำขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ช่วยเหลือทั้งทางตรงและทางอ้อม ผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่า รายงานฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อวงการอุตสาหกรรม ผู้นำไปศึกษาค้นคว้า และเป็นแนวทางสำหรับผู้สนใจต่อไป

ปณณธร ดิสระพงศ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

หน้า

|   |          |
|---|----------|
| บทคัดย่อ.....   | ก        |
| Abstract .....  | ข        |
| กิตติกรรมประกาศ .....   | ค        |
| สารบัญ .....  | ง        |
| สารบัญรูปภาพ.....   | ช        |
| สารบัญตาราง .....   | ฉ        |
| <b>บทที่ 1 .....</b>  | <b>1</b> |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ .....   | 1        |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....   | 2        |
| 1.3 ขอบเขตของศึกษา.....   | 2        |
| 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ .....   | 3        |
| <b>บทที่ 2 .....</b>  | <b>4</b> |
| 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....  | 4        |
| 2.1.1 โฟมพอลิสไตรีน (Expanded Polystyrene: EPS) .....                                     | 4        |
| 2.1.2 ตัวอย่างการใช้งาน EPS ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง .....                                    | 5        |
| 2.1.3 สมบัติและลักษณะต่างๆของ EPS .....   | 6        |
| 2.1.4 สารกันไฟ (Flame retardant) .....  | 7        |
| 2.1.5 กลไกการทำงานของสารกันไฟ .....   | 8        |
| 2.1.6 ประเภทของสารกันไฟตามหมู่ทางเคมี .....   | 9        |
| 2.1.7 กลไกการทำงานของสารกันไฟที่ศึกษาในงานวิจัยนี้.....                                   | 10       |
| 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....  | 14       |
| 2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผสมอนุภาคอะลูมิเนียมด้วยซิลิกา .....                     | 14       |
| 2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเติมอนุภาคสารเคลือบผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ และซิลิกา ..... | 16       |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า      |
|---|-----------|
| 2.2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเติมสารเคลือบผสมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ และซิลิกา .....   | 17        |
| <b>บทที่ 3 .....</b>  | <b>18</b> |
| 3.1 สารเคมี .....   | 18        |
| 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ .....  | 19        |
| 3.3 การเตรียมสารเคลือบกันไฟ .....   | 19        |
| 3.4 การเคลือบและการขึ้นรูปโฟมพอลิस्टไทริน .....   | 20        |
| 3.5 การทดสอบและวิเคราะห์สมบัติของพอลิस्टไทรินหลังการเคลือบ .....  | 21        |
| <b>บทที่ 4 .....</b>  | <b>22</b> |
| 4.1 พฤติกรรมการทนไฟของโฟมพอลิस्टไทรินหลังเคลือบ โดยการเผาด้วยสเปรย์บิวเทน .....   | 22        |
| 4.1.1 กลุ่มทดสอบผลของปริมาณ Hardener และผลของการเติม $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ต่อการทนไฟของโฟมพอลิस्टไทรินที่เคลือบด้วย $\text{Al}(\text{OH})_3$ ..... | 23        |
| 4.1.2 กลุ่มทดสอบผลของปริมาณ Hardener ต่อการทนไฟของโฟมพอลิस्टไทรินที่เคลือบด้วย $\text{TiO}_2$ หรือ $\text{ZnO}$ .....                                   | 26        |
| 4.1.3 กลุ่มทดสอบผลของปริมาณ $\text{TiO}_2$ ต่อการทนไฟของโฟมพอลิस्टไทริน .....   | 29        |
| 4.1.4 กลุ่มทดสอบผลของปริมาณ $\text{ZnO}$ ต่อการทนไฟของโฟมพอลิस्टไทริน .....   | 31        |
| 4.1.5 กลุ่มทดสอบผลของการไม่ใส่ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ลงไปในสารเคลือบต่อการทนไฟของโฟมพอลิस्टไทริน ...   | 33        |
| 4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของโฟมพอลิस्टไทรินหลังการเผาที่อุณหภูมิสูง .....  | 34        |
| 4.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วย Thermogravimetric analysis (TGA) .....   | 37        |
| 4.4 การวิเคราะห์กลไกการกันไฟของโฟมพอลิस्टไทรินหลังการเคลือบ .....   | 39        |
| <b>บทที่ 5 .....</b>  | <b>42</b> |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง .....  | 42        |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ .....  | 43        |
| <b>เอกสารอ้างอิง .....</b>  | <b>44</b> |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

|   |    |
|---|----|
| ภาคผนวก .....   | 49 |
| ภาคผนวก ก. กราฟ Thermogravimetric analysis (TGA) และ Derivative thermogravimetry (DTG).....   | 50 |
| ก.1 กราฟ Thermogravimetric analysis (TGA) และ Derivative thermogravimetry (DTG) ของตัวอย่างที่ดีที่สุดจากทั้ง 5 กลุ่มการทดสอบ ..... | 51 |



## สารบัญรูปร่างภาพ

หน้า

|   |    |
|---|----|
| รูปที่ 1 แสดง EPS สามรูปแบบหลัก .....   | 4  |
| รูปที่ 2 คอนกรีตมวลเบาที่ทำจาก EPS .....  | 5  |
| รูปที่ 3 แผงฉนวนที่ทำจาก EPS .....  | 6  |
| รูปที่ 4 ระดับขั้นของการเกิดไฟ .....  | 8  |
| รูปที่ 5 กราฟ TGA ของ Al(OH) <sub>3</sub> ภายใต้บรรยากาศ N <sub>2</sub> .....   | 10 |
| รูปที่ 6 กราฟ TGA ของ Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ภายใต้บรรยากาศ CO <sub>2</sub> .....   | 11 |
| รูปที่ 7 กลไกการทำงานของซิลิเกต .....   | 11 |
| รูปที่ 8 กราฟ TGA ของ Phenolic resin ภายใต้บรรยากาศ N <sub>2</sub> .....  | 12 |
| รูปที่ 9 กลไกการทำงานของ Phenolic resin .....   | 12 |
| รูปที่ 10 วัสดุสีขาวที่ปรากฏขึ้นที่ผิวของวัสดุหลังจากการเผาไหม้ในช่วงอุณหภูมิ 20 ถึง 800 °C ภายใต้<br>บรรยากาศ N <sub>2</sub> .....   | 13 |
| รูปที่ 11 กราฟ TGA ของ TiO <sub>2</sub> (สีแดง) ชนิด Rutile (สีน้ำเงิน) ชนิด Anatase ภายใต้บรรยากาศ N <sub>2</sub> .....  | 13 |
| รูปที่ 12 กราฟ TGA ของ ZnO (สีแดง) ภายใต้บรรยากาศ N <sub>2</sub> .....  | 14 |
| รูปที่ 13 กลไกการทำงานของ ZnO .....   | 14 |
| รูปที่ 14 แผนภูมิกระบวนการสังเคราะห์ SiO <sub>2</sub> -ALOOH กับ SiO <sub>2</sub> -ALOOH-PANI .....   | 15 |
| รูปที่ 15 สารเคลือบอะลูมิเนียมที่ผ่านการเคลือบด้วยซิลิกามาแล้ว 3 ครั้ง .....  | 16 |
| รูปที่ 16 กราฟแสดงผล TGA ของ Polyester แบบเคลือบ และไม่เคลือบสาร SiO <sub>2</sub> -TiO <sub>2</sub> .....   | 16 |
| รูปที่ 17 กราฟแสดงผล TGA ของ Polyester แบบเคลือบ และไม่เคลือบสาร SiO <sub>2</sub> -TiO <sub>2</sub> .....   | 17 |
| รูปที่ 18 ภาพเปรียบเทียบลักษณะการเกิดควันของตัวอย่าง 100ATH-1H-SiO <sub>2</sub> (ซ้าย) และ 100ATH-10H-<br>SiO <sub>2</sub> (ขวา) หลังจากการเผาไปแล้ว 1 นาที 30 วินาที .....                   | 23 |
| รูปที่ 19 พฤติกรรมการเผาไหม้ของโพรพอลิสไตรีน (100ATH-1H-SiO <sub>2</sub> ) (a) ด้านข้างหลังเผา (b) ด้านหน้า<br>ก่อนเผา (c) ด้านหน้าหลังเผา (d) ด้านหลังก่อนเผา และ (e) ด้านหลังหลังเผา .....  | 24 |
| รูปที่ 20 พฤติกรรมการเผาไหม้ของโพรพอลิสไตรีน (100ATH-5H-SiO <sub>2</sub> ) (a) ด้านข้างหลังเผา (b) ด้านหน้า<br>ก่อนเผา (c) ด้านหน้าหลังเผา (d) ด้านหลังก่อนเผา และ (e) ด้านหลังหลังเผา .....  | 24 |
| รูปที่ 21 พฤติกรรมการเผาไหม้ของโพรพอลิสไตรีน (100ATH-10H-SiO <sub>2</sub> ) (a) ด้านข้างหลังเผา (b) ด้านหน้า<br>ก่อนเผา (c) ด้านหน้าหลังเผา (d) ด้านหลังก่อนเผา และ (e) ด้านหลังหลังเผา ..... | 25 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

|  |    |
|--|----|
| รูปที่ 35 รูปภาพ SEM ของ (a-b) 10ZnO-1H-Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ที่กำลังขยาย 2000x และ 5000x ตามลำดับ และ (c) อนุภาค Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> .....   | 35 |
| รูปที่ 36 รูปภาพ SEM ของ (a-b) 15TiO <sub>2</sub> -1H-Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ที่กำลังขยาย 5000x และ 8000x ตามลำดับ.....  | 35 |
| รูปที่ 37 รูปภาพ SEM ของ (a-b) 100TiO <sub>2</sub> -1H-Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (20 μm) ที่กำลังขยาย 5000x และ 10,000x ตามลำดับ และ (c) TiO <sub>2</sub> หลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 400 °C (2 μm)..... | 36 |
| รูปที่ 38 รูปภาพ SEM ของ (a-b) 100ATH-10H-SiO <sub>2</sub> ที่กำลังขยาย 2000x และ 5,000x ตามลำดับ และ (c) Hardener.....  | 36 |
| รูปที่ 39 รูปภาพ SEM ของ (a-b) 10TiO <sub>2</sub> -5H-SiO <sub>2</sub> (20 μm) กำลังขยาย 2000x และ 8,000x ตามลำดับ และ (c) Phenolic resin.....   | 36 |
| รูปที่ 40 กราฟ TGA ของสารเคลือบกันไฟที่ผ่านการสกัดโพลีเมอริสไตรีนออก ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน.....   | 38 |
| รูปที่ ก.1.1 กราฟ TGA-DTG ของตัวอย่าง 10ZnO -1H-Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> .....   | 51 |
| รูปที่ ก.1.2 กราฟ TGA-DTG ของตัวอย่าง 15TiO <sub>2</sub> -1H-Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> .....  | 51 |
| รูปที่ ก.1.3 กราฟ TGA-DTG ของตัวอย่าง 100TiO <sub>2</sub> -1H-Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> .....   | 52 |
| รูปที่ ก.1.4 กราฟ TGA-DTG ของตัวอย่าง 10TiO <sub>2</sub> -5H-SiO <sub>2</sub> .....  | 52 |
| รูปที่ ก.1.5 กราฟ TGA-DTG ของตัวอย่าง 100ATH-10H-SiO <sub>2</sub> .....  | 53 |

## สารบัญตาราง

|  | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 1 ประเภทของสารกัมมันตภาพรังสีตามหมู่ทางเคมี ..... | 9    |
| ตารางที่ 2 อัตราส่วนในการผสมสารเคลือบ .....                | 20   |
| ตารางที่ 3 ตารางแบ่งกลุ่มทดสอบสำหรับการวิเคราะห์ผล .....   | 22   |
| ตารางที่ 4 %Weight ที่หายไปในแต่ละช่วงอุณหภูมิ .....       | 38   |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

โฟมพอลิสไตรีน (Expanded polystyrene: EPS) เป็นวัสดุที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง เพราะมีน้ำหนักเบาแต่แข็งแรง เป็นฉนวนความร้อนที่ดี ทนต่อแรงกระแทกสูง สามารถกันน้ำและไอ และอายุการใช้งานยาวนาน โฟมพอลิสไตรีนเป็น Cellular plastic น้ำหนักเบาประกอบด้วยอนุภาคทรงกลมขนาดเล็กที่มีอากาศประมาณ 98% เรียกโครงสร้างแบบนี้ว่า “โครงสร้างเซลล์ปิดแบบไมโครเซลล์” เป็นโครงสร้างที่ปิดล้อมด้วยผนังพลาสติกอย่างสมบูรณ์ ทำให้มีพื้นที่ผิวน้อย ซึ่งส่งผลให้การแพร่ของไอน้ำ นอกจากนี้ยังกันความชื้นไม่ให้เข้าไปในเซลล์ ทำให้เมื่อถูกเผาไหม้จะเกิดก๊าซที่ติดไฟได้น้อยกว่าโครงสร้างโฟมแบบเปิด อย่างไรก็ตาม โครงสร้างที่ปิดสนิทอย่างสมบูรณ์นี้ก็ทำให้เกิดการกักเก็บแก๊สออกซิเจนอยู่ภายในเป็นจำนวนมาก อีกทั้งพอลิสไตรีนเป็นเชื้อเพลิงที่ดี ทำให้ไฟลุกลามมากขึ้นขณะเกิดการเผาไหม้ โครงสร้างโฟมพอลิสไตรีนจะเสียหายอย่างรวดเร็วขณะเกิดการเผาไหม้เมื่อเทียบกับอิฐ ปูน หรือเหล็ก นอกจากนี้ยังปล่อยควันดำที่เป็นพิษปริมาณมาก ทำให้จำเป็นต้องใช้โฟมพอลิสไตรีนที่มีสมบัติกันไฟในงานก่อสร้างเพื่อลดและป้องกันความเสียหายจากการติดไฟและการแพร่กระจายของเปลวไฟ [1] โดยแต่เดิมนั้นสารที่นิยมนำมาใช้ในการเพิ่มคุณสมบัติกันไฟคือ Halogen อย่าง Br กับ Cl โดยนำไปผสมในการผลิตโฟมพอลิสไตรีนโดยตรง ซึ่งมีข้อดีคือมีต้นทุนต่ำ ประสิทธิภาพสูง และกระจายตัวได้ง่าย แต่มีข้อเสีย คือ เมื่อเกิดการเผาไหม้จะปล่อยควันที่มี Br<sub>2</sub> และ Cl<sub>2</sub> ซึ่งเป็นพิษออกมาปริมาณมาก ทำให้ผู้สูดดมหมดสติและเสียชีวิตได้ จึงมีกฎหมายที่ใช้ในหลายประเทศนำไปสู่การพัฒนาสารกันไฟประสิทธิภาพสูงแบบอื่นที่ไม่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม [2] หนึ่งในวิธีที่ได้รับความนิยมคือวิธีการเคลือบเม็ดโฟมพอลิสไตรีน เพราะไม่ซับซ้อนและมีคุณสมบัติการกันไฟที่หลากหลาย มีงานวิจัยใช้ Thermosetting polymer จำพวก Phenolic resin หรือ Epoxy resin เป็นตัวช่วยในการยึดเกาะ (Binder) เพราะทนไฟ ปล่อยควันน้อย มีความสามารถในการดับไฟได้ด้วยตนเอง และมีความเข้ากันได้ที่ดีกับโฟมพอลิสไตรีนและ Inorganic filler อื่นๆ [3] โดย Inorganic filler ที่นิยมนำมาผสมได้แก่ Hydrated mineral fillers อย่างอนุภาคอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminum hydroxide: ATH) ที่จะเกิดปฏิกิริยาการคายน้ำและไปเจือจางกับก๊าซที่ติดไฟได้ และการใส่อนุภาคซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) อนุภาคเหล็ก (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และดินเหนียว (Clay) เพื่อเพิ่มการกันไฟและการสร้างชั้นกันไฟขึ้นมา เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการนำเถ้าลอย (Fly ash) ที่มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกากับอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) มาผสมกับโฟมพอลิสไตรีนเพื่อทำให้เกิดการสร้างชั้น Char ขึ้นมา ซึ่งส่งผลให้สามารถป้องกันโฟมพอลิสไตรีนที่อยู่ภายใต้ชั้น Char นั้นได้และนำไปสู่การเพิ่มความทนไฟของโฟมพอลิสไตรีน [4,5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากงานวิจัยของ Cheng Zhi-peng และคณะ [6] ได้ระบุว่า การเคลือบอนุภาคอะลูมิเนียม (Al) ด้วยซิลิกาจะสามารถลดการออกซิไดซ์ของอนุภาคอะลูมิเนียมเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $850^{\circ}\text{C}$  ในขณะที่เพิ่มการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงกว่า  $850^{\circ}\text{C}$  ซึ่งอาจจะส่งผลให้ลดการปล่อยความร้อนในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำเพราะปฏิกิริยาคายความร้อนลดลง และเพิ่มการปล่อยความร้อนในช่วงอุณหภูมิที่สูงเพราะปฏิกิริยาคายความร้อนเพิ่มขึ้น ทำให้มีโอกาสที่จะเกิดการชะลอตัวของกระบวนการเผาไหม้ในช่วงต้น และเป็นที่ยืดระยะเวลาการทำงานของอนุภาคอะลูมิเนียมให้นานขึ้น นำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพในการกักไฟ

นอกจากนี้งานวิจัยของ Pham Thi Thu Trang และคณะ [7] กับ Sidra Saleemi และคณะ [8] ได้ระบุว่า การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) หรือสังกะสีออกไซด์ ( $\text{ZnO}$ ) ร่วมกับซิลิกาตามลำดับจะสามารถเพิ่มความต้านทานความร้อนและเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุจำพวกพลาสติกได้ โดยจะเพิ่มอุณหภูมิของจุดที่จะเกิดการย่อยสลายทางความร้อน (Thermal degradation) ส่งผลทำให้วัสดุมีสรรพคุณในการกักไฟที่ดีขึ้น

จากเหตุผลข้างต้น ผู้วิจัยจึงได้มีความสนใจที่จะศึกษาและพัฒนาสารกักไฟสำหรับโพลีเอทิลีน จากสารเคลือบผสมที่ประกอบด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ โซเดียม ซิลิเกต ไทเทเนียมไดออกไซด์ และสังกะสีออกไซด์ โดยใช้ Phenolic resin เป็นตัวช่วยในการยึดเกาะ ก่อนนำสารผสมที่ได้ไปรวมเข้ากับเม็ดโพลีเอทิลีน และไปขึ้นรูปกลายเป็นโพลีเอทิลีน แล้วนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปทดสอบประสิทธิภาพการกักไฟด้วยวิธีการเผาเพื่อดูพฤติกรรมการทนไฟ วิธีการวิเคราะห์โครงสร้างชั้น Char และโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) และวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติการเปลี่ยนแปลงเชิงน้ำหนักด้วยความร้อน (Thermogravimetric analysis: TGA)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพิ่มประสิทธิภาพสารเคลือบกักไฟสำหรับโพลีเอทิลีน ด้วยการนำสารเคลือบผสมที่ประกอบด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ โซเดียม ซิลิเกต ไทเทเนียมไดออกไซด์ และสังกะสีออกไซด์เป็นส่วนประกอบ
- 1.2.2 ศึกษาผลกระทบหรือผลของการใช้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่ผสมด้วยโซเดียม ซิลิเกต ไทเทเนียมไดออกไซด์ หรือสังกะสีออกไซด์ในสารเคลือบกักไฟ

## 1.3 ขอบเขตของศึกษา

- 1.3.1 ศึกษาการใช้สารเคลือบผสมที่ประกอบด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ โซเดียม ซิลิเกต ไทเทเนียมไดออกไซด์ หรือสังกะสีออกไซด์เป็นส่วนประกอบ
- 1.3.2 พัฒนาสารเคลือบกักไฟโดยใช้สารเคลือบผสมที่เตรียมได้จากข้อ 1.3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.3.3 ศึกษาสมบัติของสารเคลือบผสม เช่น ทดสอบความทนทานต่อการเผาไหม้ ความทนทานต่อสภาพแวดล้อมอุณหภูมิที่สูง และการเกิดควัน เป็นต้น

#### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1 ได้องค์ความรู้จากการศึกษาและทำการทดลองเกี่ยวกับการทำสารกันไฟด้วยสารเคลือบผสมที่ประกอบด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ โซเดียม ซิลิเกต ไทเทเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์เป็นส่วนประกอบ
- 1.4.2 ได้ต้นแบบผลิตภัณฑ์โฟมพอลิस्टรีนที่ผ่านการผสมด้วยสารกันไฟที่ประกอบด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ โซเดียม ซิลิเกต ไทเทเนียมไดออกไซด์ หรือซิงค์ออกไซด์เป็นส่วนประกอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

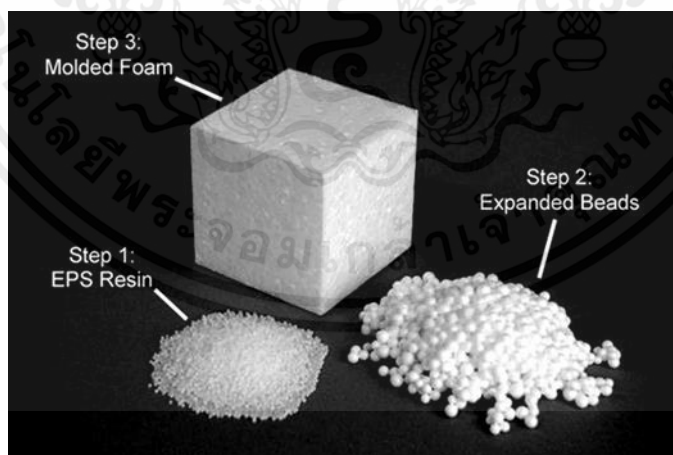
### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 โฟมพอลิสไตรีน (Expanded Polystyrene: EPS) [1,9]

EPS เป็นหนึ่งในวัสดุก่อสร้างที่สามารถเสริมสร้างความมั่นคงของโครงสร้างอาคาร ที่ใช้มาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2493 จนถึงปัจจุบัน EPS ถูกนำมาใช้ในโครงสร้างอาคารจำนวนมาก เนื่องจากมีความทนทาน มีประโยชน์ด้านความยั่งยืน และมีความสามารถในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานภายในอาคาร EPS ประกอบด้วยเม็ดโพลีสไตรีนขนาดเล็กที่ได้มาจากระบวนการโพลีเมอไรเซชันสารสไตรีน คุณภาพของ EPS จะขึ้นอยู่กับกระบวนการกระจายตัวของเม็ดโพลีสไตรีน

กระบวนการทำ EPS จะเริ่มจากการนำวัตถุดิบที่เป็น EPS resin ไปขยายขนาดประมาณ 30 ถึง 50 เท่า ด้วยการให้ความร้อนในเครื่องขยายด้วยไอน้ำ (Prefoamer) ที่มีอุณหภูมิระหว่าง 80 ถึง 100 °C เพื่อสร้างโครงสร้างเซลล์ปิดขนาดเล็กที่กักอากาศไว้ภายใน เม็ดโพลีสไตรีนที่ขยายตัวในขั้นแรกจะถูกนำไปขึ้นรูป และนำกลับมาสัมผัสกับไอน้ำอีกครั้งเพื่อให้เม็ดโพลีสไตรีนยึดติดกันจนได้เป็นบล็อกขึ้นรูป ดังรูปที่ 1 อายุการใช้งานของ EPS จะถูกคำนวณจากอุณหภูมิของอากาศ ขนาด และความหนาแน่นของเม็ดโพลีสไตรีน



รูปที่ 1 แสดง EPS สามรูปแบบหลัก [1]

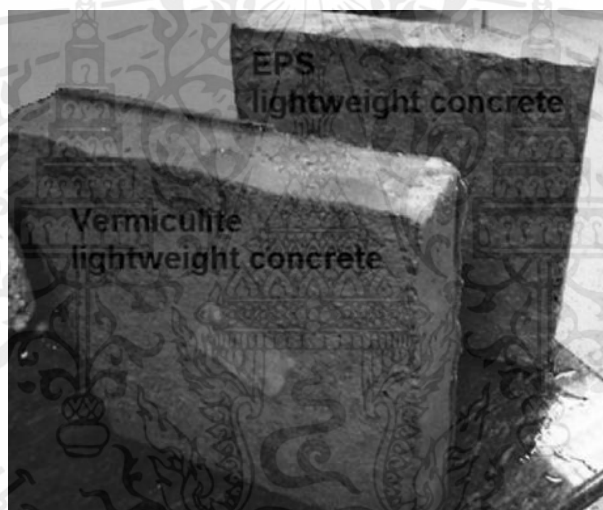
EPS เริ่มหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 160°C และจะหลุดติดไฟได้เองที่อุณหภูมิประมาณ 490 °C การจุดติดของก๊าซไวไฟที่เกิดมาจากการสลายตัวของ EPS จะเกิดขึ้นเมื่อก๊าซไปสัมผัสกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศหรือเนื่องจากคุณสมบัติทางความร้อนของ EPS เอง อากาศที่อยู่ในโครงสร้างที่มีรูพรุนทำให้ไฟลุกลามรุนแรงระหว่างเกิดการเผาไหม้ EPS จึงมีข้อจำกัดในการทำงานในแง่ของการป้องกันอัคคีภัย ดังนั้น EPS จะถูกนำไปใช้ในงานการก่อสร้างก็ต่อเมื่อมีการใช้ควบคู่กับวัสดุที่เหมาะสมอื่น ๆ ที่สามารถกันไฟได้

### 2.1.2 ตัวอย่างการใช้งาน EPS ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง [1]

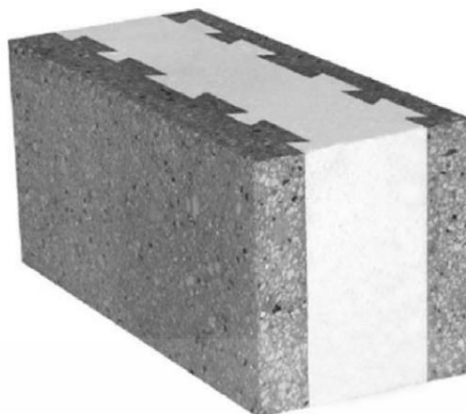
การใช้ EPS เป็นคอนกรีตมวลเบา (Lightweight Concrete: LWC) เนื่องด้วย EPS เป็นวัสดุที่ไม่สามารถซึมผ่านได้ ไม่ชอบน้ำ และมีโครงสร้างเซลล์ปิด ซึ่งส่งผลให้มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ นอกจากนี้ยังมีความสามารถดูดซับพลังงานและการมีสมบัติกันกระแทก ทำให้มีการนำ EPS ไปใช้สร้างคอนกรีตฉนวน และชั้นป้องกันสำหรับงานก่อสร้างต่างๆ โดย LWC ที่ทำจาก EPS จะช่วยเป็นชั้นบัฟเฟอร์ที่ด้านบนของโครงสร้างเพื่อลดแรงกระแทกได้



รูปที่ 2 คอนกรีตมวลเบาที่ทำจาก EPS [1]

การใช้ EPS เป็นแผงฉนวน (Structural Insulated Panel: SIP) ลักษณะเป็นแผงประกบมี EPS ตรงกลาง ใช้เป็นองค์ประกอบของโครงสร้างในอาคารคอนกรีต เช่น ผนัง หลังคา และพื้น มีค่าการนำความร้อนและเสียงที่ต่ำ และมีความสามารถในการรับน้ำหนักสูง จึงสามารถนำมาใช้ทดแทนอิฐหรือคอนกรีตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 แผงฉนวนที่ทำจาก EPS [1]

### 2.1.3 สมบัติและลักษณะต่างๆของ EPS [1]

สมบัติทางความร้อนของ EPS มีพฤติกรรมคล้ายกับวัสดุอินทรีย์ส่วนใหญ่ คือ ติดไฟได้ง่าย ดังนั้นสารกันไฟจึงถูกเติมลงใน EPS เพื่อเพิ่มความสามารถในการกันไฟของ EPS เช่น  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ดินเหนียว (Clay) และเถ้าลอย (Fly Ash) เป็นต้น EPS ที่ผ่านการเคลือบจะมีโอกาสในการติดไฟลดลง และประกายไฟจากการเชื่อมหรือจากบุหรี่จะไม่สามารถทำให้ติดไฟได้ ในอุตสาหกรรมก่อสร้างใช้ EPS ชนิดไม่ลามไฟ เพื่อลดการติดไฟและการแพร่กระจายของเปลวไฟบนพื้นผิว EPS

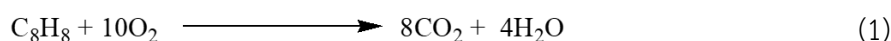
การเกิดควันเป็นผลมาจากการเผาไหม้ของ EPS โดยตัวโพลิมเมอร์จะเริ่มอ่อนตัวลงที่อุณหภูมิสูงกว่า  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  เริ่มหลอมเหลวที่อุณหภูมิ  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$  และเกิดก๊าซไวไฟเมื่ออุณหภูมิถึง  $275\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเป็นก๊าซที่สามารถติดไฟได้ด้วยประกายไฟหรือเปลวไฟในสถานะและอุณหภูมิที่เหมาะสม สามารถลดควันได้โดยการจำกัดความสามารถในการติดไฟ ของวัสดุ และลดการแพร่กระจายของเปลวไฟและความร้อนที่ปล่อยออกมา รวมทั้งเคลือบผิว EPS ด้วยวัสดุที่ไม่ติดไฟ เพื่อลดการเกิดควันและการลามไฟในระหว่างการเพลิงไหม้

EPS ดูดซับน้ำและความชื้นต่ำมาก ซึ่งการดูดน้ำจะลดลงถ้าความหนาแน่นโพลิมเมอร์เพิ่มขึ้น โครงสร้างเซลล์ปิดของ EPS กันน้ำ ทำให้น้ำซึมผ่านได้ต่ำ แต่อาจดูดซับความชื้นได้เมื่อนำ EPS ไปแช่ในน้ำ เนื่องจากมีช่องว่างระหว่างเม็ดโพลีสไตรีนที่ผ่านการขึ้นรูปมาแล้วเหลืออยู่ ทำให้สมบัติทางความร้อนเสื่อมลง

ความทนทานต่อสารเคมีของ EPS ใกล้เคียงกับโพลีสไตรีนทั่วไป ขึ้นกับเวลาในการเกิดปฏิกิริยา และอุณหภูมิที่ใช้ ซึ่งถ้าตัวทำละลายไหนมีความไวต่อ EPS จะทำให้น้ำ EPS อ่อนตัวลง และแตกร้างได้ เนื่องจากผนังเซลล์ที่มีพื้นผิวสัมผัสขนาดใหญ่บางตัวลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเป็นพิษและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของ EPS มาจากการที่ EPS เป็นโพลีเมอร์ที่ได้มาจากสไตรีน ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ( $C_8H_8$ ) ที่มีสมการการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์กับออกซิเจน ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) และน้ำออกมา ดังสมการที่ (1)



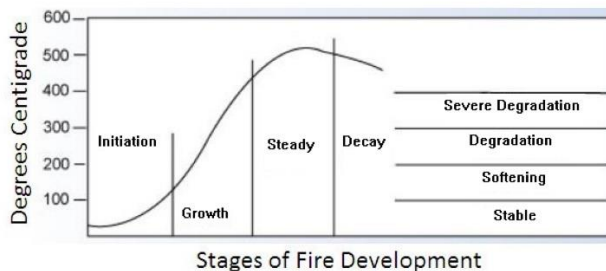
งานวิจัยที่จัดทำโดย Doroudiani และ Omidian [10] ได้ระบุว่าปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ระหว่างการเผาไหม้จะส่งผลต่อปริมาณของเขม่าและคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดขึ้น ตามทฤษฎีแล้วการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของโพลีสไตรีน 1 กรัมจะต้องใช้ออกซิเจนประมาณ 2,150 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยปกติมีปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอ โพลีสไตรีนจึงถูกเผาไหม้แค่บางส่วนทำให้เกิดเขม่าและก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ขึ้นดังสมการที่ (2)



ปริมาณควันและก๊าซพิษที่ปล่อยออกมาถูกกำหนดโดยปริมาณและความหนาแน่นของ EPS ส่วนใหญ่จะผลิตควันพิษออกมาน้อยกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุธรรมชาติอย่าง ไม้ ขนสัตว์ หรือไม้ก๊อก

#### 2.1.4 สารกันไฟ (Flame retardant) [2]

สารกันหรือสารหน่วงการติดไฟคือสารเคมีที่เติมลงไปในตัววัสดุอย่างพลาสติกหรือสิ่งทอเพื่อยับยั้งหรือชะลอการแพร่กระจายของไฟ โดยขัดขวางปฏิกิริยาทางเคมีในเปลวไฟหรือสร้างชั้นป้องกันบนผิววัสดุ ช่วยเพิ่มระยะเวลาในการอพยพหนีไฟ และเพิ่มโอกาสในการปกป้องมนุษย์ ทรัพย์สิน และสิ่งแวดล้อม ในการออกแบบสารกันไฟนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงการทำให้สารมีความทนทานต่ออุณหภูมิตรงกับระดับไฟ (Fire stages) ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน โดยที่ระดับไฟนั้นจะแบ่งออกเป็น 4 ชั้นด้วยกัน คือ ชั้นจุดติด ชั้นเติบโต ชั้นคงสภาพ และชั้นเสื่อมสลาย ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ระดับขั้นของการเกิดไฟ [11]

### 2.1.5 กลไกการทำงานของสารกันไฟ [2]

กลไกการทำงานของสารกันไฟจะมีจุดมุ่งหมายเพื่อลดการติดไฟของวัสดุและชะลอการแพร่กระจายของเปลวไฟ เมื่อเปลวไฟถูกกำจัดออก ไฟบนผิววัสดุก็จะดับไปเองอย่างรวดเร็ว เป็นการหยุดกระบวนการเผาไหม้ เพราะฉะนั้นการตัดเชื้อเพลิง ความร้อน และออกซิเจนออกจากระบบจึงเป็นเป้าหมายของสารกันไฟ กลไกการกันหรือการชะลอการเกิดไฟเป็นกลไกทางกายภาพ ทางเคมี หรือทั้งสองอย่างรวมกัน สารกันไฟจะแบ่งกลไกการทำงานออกเป็น 4 รูปแบบ คือ

#### 1. การดูดซับความร้อน (Heat absorbers)

เป็นการนำความร้อนออกจากโครงสร้างสารกันไฟด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การเกิดปฏิกิริยาคายน้ำ เป็นต้น วัสดุกันไฟจะสามารถดูดซับความร้อนส่วนหนึ่งที่ปล่อยออกมาจากวัสดุที่กำลังลุกไหม้ได้ ทำให้สามารถลดอุณหภูมิบนผิวของวัสดุ และสามารถป้องกันการแพร่กระจายของเปลวไฟได้

#### 2. การสร้างชั้น Char (Char formers)

เป็นการนำคาร์บอนที่เกิดจากการเผาไหม้มาสร้างชั้น Char ที่เป็นฉนวนกันไฟ ซึ่งจะแยกพื้นผิวของวัสดุที่เผาไหม้ออกจากอากาศและป้องกันไม่ให้ก๊าซไวไฟออกไปได้ ส่งผลให้สามารถป้องกันการลุกลามของไฟได้

#### 3. การเป็นตัวช่วยในการดับไฟ (Flame quenchers)

ความสามารถในการดับไฟมาจากการที่สารกันไฟไปรบกวนปฏิกิริยาทางเคมีที่ก่อให้เกิดการติดไฟ และส่งผลให้ไฟดับลง สารกันไฟที่มีความสามารถในการดับไฟเมื่อถูกเผา จะปล่อยก๊าซไม่ไวไฟของมา ส่งผลให้ความหนาแน่นของก๊าซไวไฟในอากาศน้อยลง และนำไปสู่การลดลงของปฏิกิริยาการเกิดไฟ

#### 4. การเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสารอื่น (Synergists)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นการสร้างสารกันไฟที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นด้วยการผสมสารกันไฟมากกว่า 1 ชนิดเข้าด้วยกัน ซึ่งจะส่งผลต่อการลดอุณหภูมิของวัสดุ การลดการลามไฟ หรือการเพิ่มการก่อตัวของชั้น Char ของสารเหล่านั้น

### 2.1.6 ประเภทของสารกันไฟตามหมู่ทางเคมี

ประเภทของสารกันไฟจะสามารถแบ่งได้ตามหมู่ทางเคมีเป็น 4 ประเภท ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ประเภทของสารกันไฟตามหมู่ทางเคมี

| หมู่ทางเคมี      | ลักษณะ   |
|------------------|--|
| Inorganic        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• สารกันไฟที่เป็น Inorganic ได้แก่ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ แอมโมเนียมโพลีฟอสเฟต และฟอสฟอรัสแดง</li> <li>• กลุ่มนี้คิดเป็นประมาณ 50% โดยปริมาตรของการผลิตสารกันไฟทั่วโลก</li> <li>• สารเคมีเหล่านี้บางชนิดใช้เป็นตัว Synergists ได้แก่ สารแอนติโมนีไตรออกไซด์ เป็นต้น</li> </ul>  |
| Halogenated      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• ผลิตภัณฑ์ Halogen มีส่วนประกอบหลักคือ Cl และ Br</li> <li>• กลุ่มนี้คิดเป็นประมาณ 25% โดยปริมาณการผลิตทั่วโลก</li> <li>• มักนำไปช่วยเป็น Synergists กับสารอย่างแอนติโมนีไตรออกไซด์</li> </ul>  |
| Organophosphorus | <ul style="list-style-type: none"> <li>• ผลิตภัณฑ์ Organophosphorus ส่วนใหญ่เป็นฟอสเฟตเอสเทอร์และมีสัดส่วนประมาณ 20% โดยปริมาตรของการผลิตทั่วโลก</li> <li>• ฟอสเฟตเอสเทอร์ ไม่ว่าจะหรือไม่มีฮาโลเจน เป็นสารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสเป็นส่วนประกอบหลัก</li> <li>• เอสเทอร์ของกรดฟอสฟอริกช่วยให้เกิด Plasticization ที่ช่วยในการกันไฟ</li> </ul> |

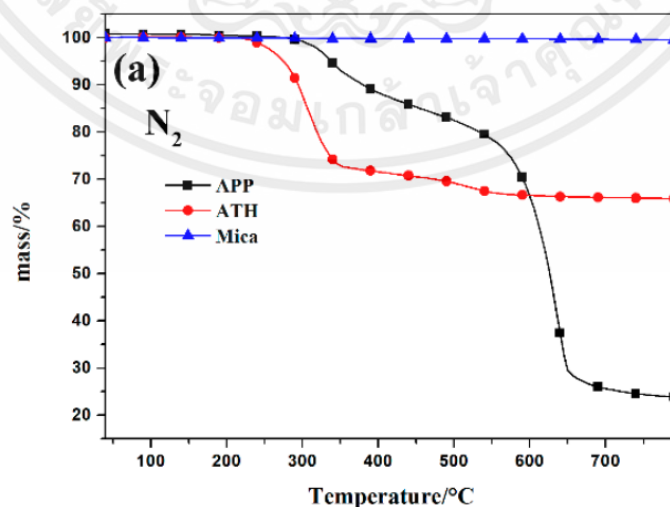
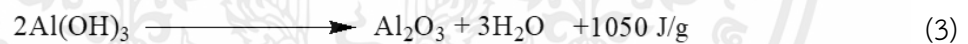
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|          |  |
|----------|--|
| Nitrogen | <ul style="list-style-type: none"> <li>● สารกันไฟที่ใช้กันในวงแคบ</li> <li>● เมลามีน เมลามีนไฮยาซูเรต เกลือเมลามีนอื่นๆ และสารประกอบกัวนิติน เป็นกลุ่มสารกันไฟที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบที่ใช้มากสุดในปัจจุบัน</li> </ul> |
|----------|--|

## 2.1.7 กลไกการทำงานของสารกันไฟที่ศึกษาในงานวิจัยนี้

### 2.1.7.1 อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ [5]

ความสามารถในการกันไฟมาจากการปล่อยไอน้ำไปดูดซับพลังงานความร้อน ซึ่งเป็นการจำกัดการไหลของความร้อน (Heat flux) ในระหว่างการสัมผัสเปลวไฟโดยตรง (ความร้อนเกิดการสูญเสียออกนอกระบบ) โดยไอน้ำจะมาจากกระบวนการคายน้ำที่เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ทำให้เกิดการกระจายความร้อนได้มากในระหว่างการปะทะเปลวไฟโดยตรง ส่งผลต่อการลดลงของอุณหภูมิบนโพลีเมอร์ นอกจากนี้ไอน้ำที่เกิดขึ้นในระหว่างปฏิกิริยาคายน้ำสามารถเจือจางก๊าซที่ติดไฟได้ (ขีดขวางการเติบโตของการเผาไหม้) ดูดซับอนุภาคควัน (จำกัดการก่อตัวของควัน) ทำให้พื้นผิวเย็นลง และสร้างชั้นป้องกันของอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เสถียรขึ้นมา ดังสมการที่ (3)

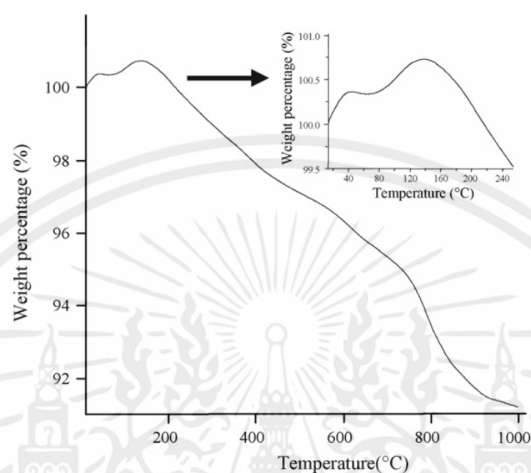


รูปที่ 5 กราฟ TGA ของ  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ภายใต้บรรยากาศ  $\text{N}_2$  [12]

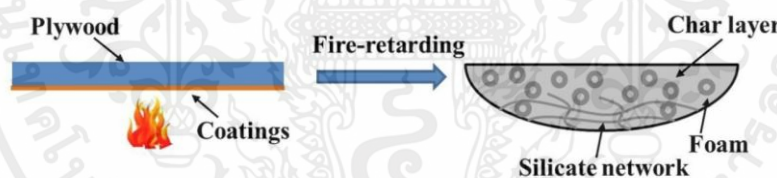
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.7.2 โซเดียม ซิลิเกต [13]

ซิลิเกตเมื่อถูกเผาจะก่อตัวเป็นชั้นซิลิเกตที่ป้องกันผิวโฟม โดยชั้นซิลิเกตนี้สามารถลดการแลกเปลี่ยนความร้อนและก๊าซที่ติดไฟได้ดี ช่วยปกป้องโฟมจากความร้อนและออกซิเจน ทำให้การเกิดก๊าซที่ติดไฟได้ระหว่างการย่อยสลายของตัวโฟมชะลอตัวลงหรือหยุดไป และทำให้วงจรการเผาไหม้ของโพลีเมอร์สลายไปในท้ายที่สุด ส่งผลทำให้โฟมกันไฟได้ดียิ่งขึ้น



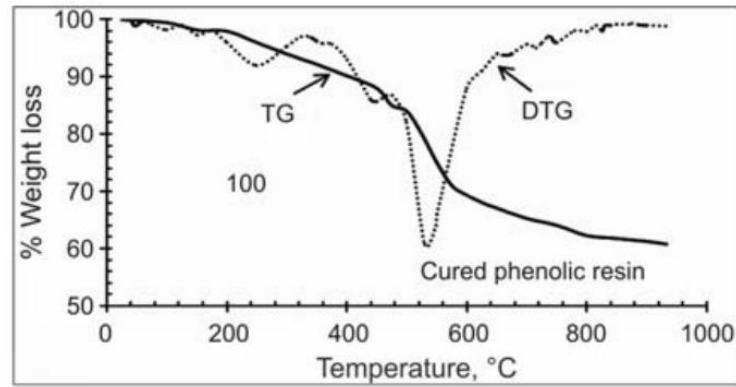
รูปที่ 6 กราฟ TGA ของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ภายใต้บรรยากาศ  $\text{CO}_2$  [14]



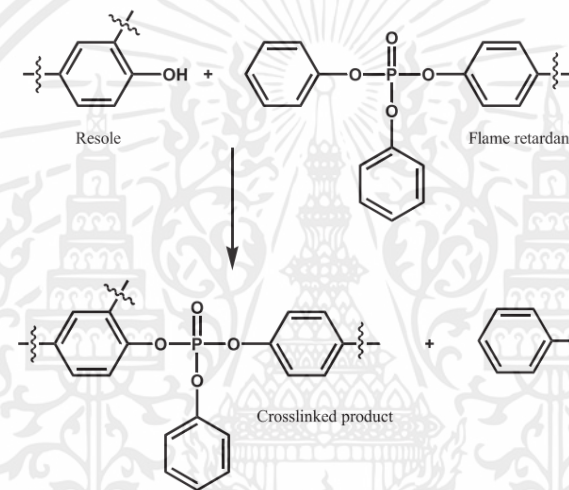
รูปที่ 7 กลไกการทำงานของซิลิเกต [15]

### 2.1.7.3 Phenolic resin [16]

Phenolic resin เป็นสารที่สามารถใช้ได้ที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากมีความสามารถในการคงสภาพได้ดี และเป็นตัวช่วยในการยึดเกาะ (Binders) เพราะมีคุณสมบัติทนไฟ ปล่อยควันน้อย มีความสามารถในการดับไฟได้ด้วยตนเอง และมีความเข้ากันได้ที่ดีกับโฟมพอลิสไตรีนและ Inorganic filler อื่นๆ เป็นผลจากการที่ Phenolic resin สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ได้ดีเกิดโครงสร้างโมเลกุลที่มีสมบัติกันไฟได้ สมบัติส่วนนี้เป็นส่วนสำคัญในการเพิ่มความเข้ากันได้ของ Phenolic resin โฟมพอลิสไตรีน และ Inorganic filler อื่นๆ



รูปที่ 8 กราฟ TGA ของ Phenolic resin ภายใต้บรรยากาศ N<sub>2</sub> [17]



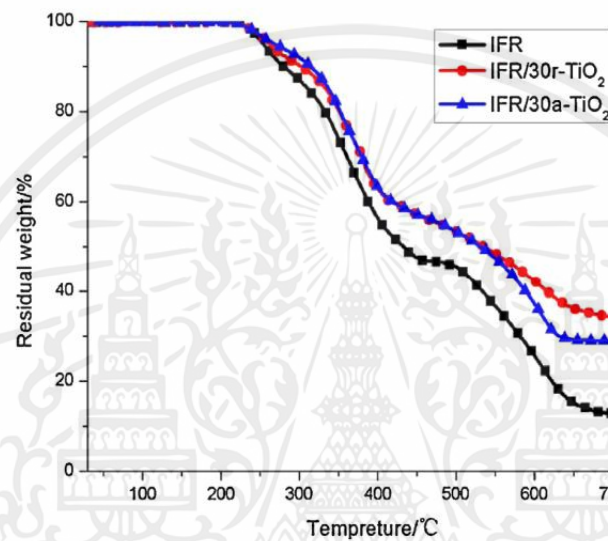
รูปที่ 9 กลไกการทำงานของ Phenolic resin [16]

#### 2.1.7.4 ไทเทเนียมไดออกไซด์ [18]

ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารที่มักใช้เติมลงไปในสารเคลือบเพื่อเป็นตัวหน่วงไฟ (Intumescent flame retardants: IFR) ซึ่งเมื่อถูกเผาไหม้จะทำให้เกิดวัสดุสีขาวที่เป็นอินทรีย์ที่ปรากฏขึ้นที่พื้นผิวของวัตถุ ชั้นของสารสีขาวจะหนาขึ้นเรื่อยๆตามระยะเวลาที่เกิดการเผาไหม้ ซึ่งจะสามารถป้องกันชั้น Char จากการเผาไหม้ได้อีกทีหนึ่ง ทำให้มีระยะเวลาการทนไฟที่เพิ่มขึ้น



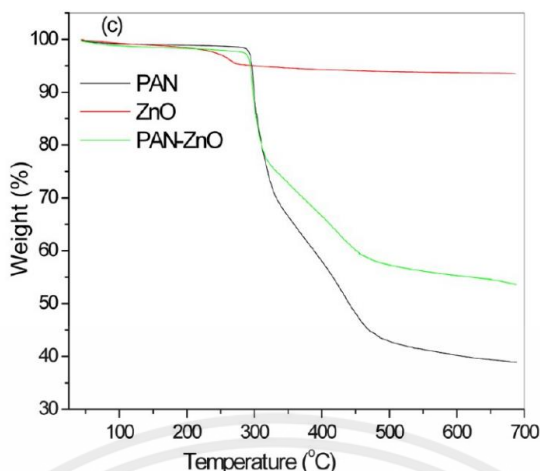
รูปที่ 10 วัสดุสีขาวที่ปรากฏขึ้นที่ผิวของวัสดุหลังจากการเผาไหม้ในช่วงอุณหภูมิ 20 ถึง 800 °C ภายใต้บรรยากาศ N<sub>2</sub> [18]



รูปที่ 11 กราฟ TGA ของ TiO<sub>2</sub> (สีแดง) ชนิด Rutile (สีน้ำเงิน) ชนิด Anatase ภายใต้บรรยากาศ N<sub>2</sub> [18]

#### 2.1.7.5 ซิงค์ออกไซด์ [19]

ซิงค์ออกไซด์เป็นสารที่สามารถป้องกันรังสีความร้อนได้ เนื่องจากความสามารถในการสะท้อนรังสีอินฟราเรด และยังมีเสถียรภาพทางความร้อนที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ 1,800 °C) ทำให้ช่วยลดการถ่ายเทความร้อน และปกป้องพื้นผิวของวัสดุจากความร้อนได้ ทำให้ระยะเวลาในการทนความร้อนของวัสดุเพิ่มขึ้น



รูปที่ 12 กราฟ TGA ของ ZnO (สีแดง) ภายใต้บรรยากาศ N<sub>2</sub> [20]



รูปที่ 13 กลไกการทำงานของ ZnO [19]

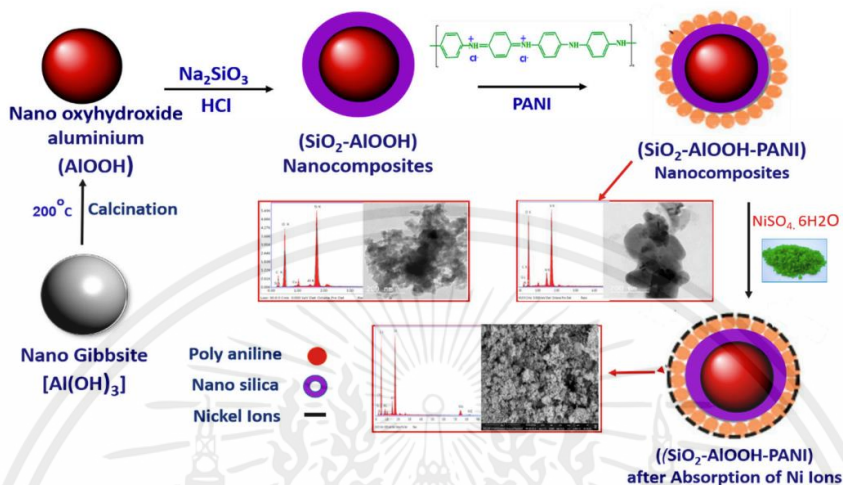
## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผสมอนุภาคอะลูมิเนียมด้วยซิลิกา

งานวิจัยต่อไปนี้เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผสมอนุภาคอะลูมิเนียมด้วยซิลิกา โดยจะมีดังต่อไปนี้

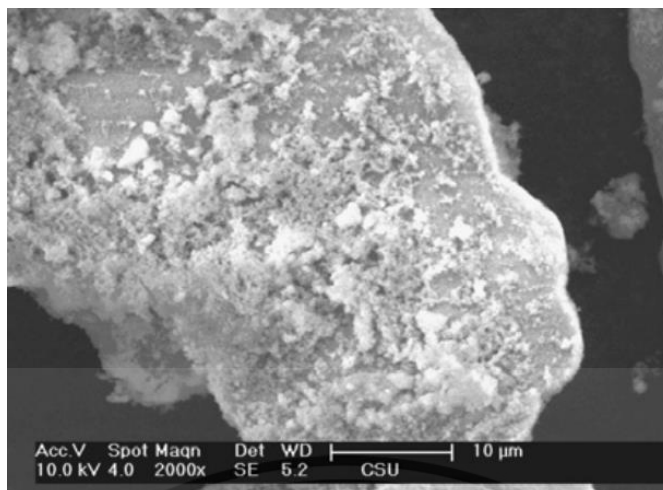
Inas A. Ahmed และคณะ [21] ทำการวิจัยเพื่อหาแนวทางจำกัดนิกเกิล (Ni) ออกจากแหล่งน้ำด้วยวิธีการดูดซับ โดยได้ทำการเตรียม Nanocomposites 2 แบบ คือ อนุภาค Oxyhydroxide aluminum เคลือบซิลิกา (SiO<sub>2</sub>-ALOOH;SCB) ซึ่งเป็นตัวดูดซับที่นิยมใช้งานในการบำบัดน้ำเสีย กับ Oxyhydroxide aluminum เคลือบซิลิกา และเติม Polyaniline ลงไป (SiO<sub>2</sub>-ALOOH-PANI; SBDP) ซึ่งจะส่งผลทำให้เพิ่มความเป็นรูพรุนในตัวดูดซับ ทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น และนำชิ้นงานทั้งสองมาเปรียบเทียบการดูดซับด้วยการใช้ Langmuir adsorption isotherm model ได้ผลออกมาว่าการ SBDP สามารถดูดซับนิกเกิลได้มากกว่า SCB และทั้งสองเป็นปฏิกิริยาที่สามารถแยกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดูดซับนิกเกิลได้ด้วยตัวเอง โดยที่ SCB เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนในขณะที่ SBD เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน และเป็นการดูดซับทางกายภาพทั้งคู่



รูปที่ 14 แผนภูมิกระบวนการสังเคราะห์ SiO<sub>2</sub>-AIOOH กับ SiO<sub>2</sub>-AIOOH-PANI [21]

Hui Wang และคณะ [22] ทำการศึกษาสมบัติการทนการกัดกร่อนของผงอะลูมิเนียมเคลือบด้วยซิลิกาที่ใช้วิธีการเคลือบ Sol gel โดยได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการก่อตัวของชั้นเคลือบ อันได้แก่ตัวทำละลาย อันตบในการใส่ Catalyst และจำนวนชั้นที่เคลือบ และทำการวัดเสถียรภาพทางความร้อนของสารด้วยการคำนวณหาจำนวน H<sub>2</sub> ที่เกิดขึ้น ที่ได้ผลมาจากการวิเคราะห์ Thermogravimetric analysis / Differential thermal calorimetry (TGA-DSC analysis) โดยได้ผลว่าตัวทำละลาย อันตบในการใส่ Catalyst และจำนวนชั้นที่เคลือบมีผลอย่างยิ่งต่อคุณสมบัติการทนการกัดกร่อนและเสถียรภาพทางความร้อนของสารเคลือบ โดย 1-Butanol การใส่ Catalyst ไฮโดรคลอไรด์ก่อนแอมโมเนีย และการเคลือบ 3 ชั้น (ดังรูปที่ 10) ทำให้ได้สารเคลือบที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อนดีที่สุด โดยภาพ SEM ได้บ่งบอกว่ามี 3D-crosslinked layer ของซิลิกาอยู่บนพื้นผิวของผงอะลูมิเนียม และ ผลของ TG-DSC ได้บ่งบอกว่าเสถียรภาพทางความร้อนของสารเคลือบเพิ่มขึ้น

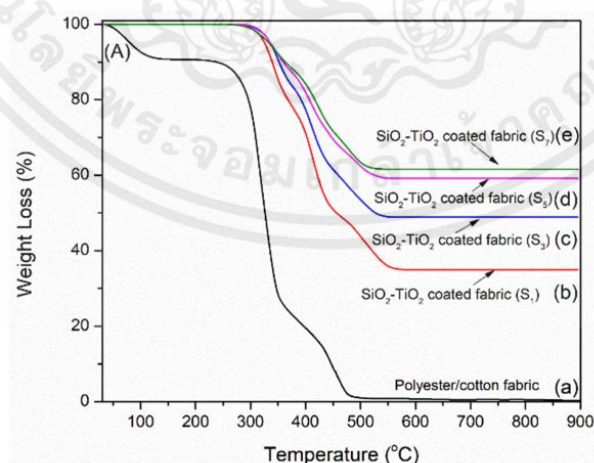


รูปที่ 15 สารเคลือบอะลูมิเนียมที่ผ่านการเคลือบด้วยซิลิกามาแล้ว 3 ครั้ง [22]

## 2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเติมอนุภาคสารเคลือบผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ และซิลิกา

งานวิจัยต่อไปนี้เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผสมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยซิลิกา โดยจะมีดังต่อไปนี้

Pham Thi Thu Trang และคณะ [7] ได้ทำการเตรียมอนุภาคสารเคลือบ  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$  บน polyester ด้วยวิธีการ Sol gel โดยใช้โซเดียม ซิลิเกต และไทเทเนียม คลอไรด์เป็นสารตั้งต้นในการทำ ก่อนจะใช้ TGA เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุ โดยได้ผลออกมาว่าสามารถเพิ่มความต้านทานความร้อนและเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุจำพวกพลาสติกได้



รูปที่ 16 กราฟแสดงผล TGA ของ Polyester แบบเคลือบ และไม่เคลือบสาร  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$  [7]

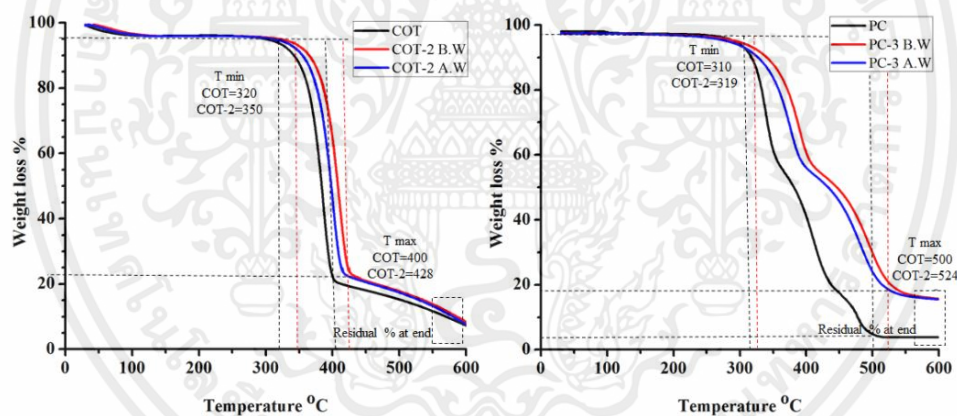
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Haizhou Fan และคณะ [23] ต้องการที่จะเพิ่มความสามารถในการกันไฟให้วัสดุจำพวก Epoxy resin โดยการนำดินขาวมาเคลือบด้วยสารผสม  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{TiO}_2$  ด้วยการทำปฏิกิริยากับ  $\gamma$ -aminopropyl triethoxysilane (APTES) ก่อนจะนำไปผสมกับ Epoxy resin โดยสามารถลดการเกิดควัน มีเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น และค่าการปล่อยความร้อนที่ลดลง

### 2.2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเติมสารเคลือบผสมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ และซิลิกา

งานวิจัยต่อไปนี้เป็น งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผสมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ด้วยซิลิกา โดยจะมีดังต่อไปนี้

Sidra Saleemi และคณะ [8] ได้ทำการเตรียมสารเคลือบที่ผสม  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{ZnO}$  เข้าด้วยกัน และนำไปเคลือบบนเส้นใย Polyester ด้วยวิธีการ Sol gel ก่อนจะใช้ TGA เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุ โดยได้ผลออกมาว่าสามารถเพิ่มความต้านทานความร้อนและเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุได้ และยังสามารเพิ่มอุณหภูมิของจุดที่จะเกิดการย่อยสลายทางความร้อน (Thermal degradation) ส่งผลทำให้วัสดุมีสรรพคุณในการกันไฟที่ดีขึ้น



รูปที่ 17 กราฟแสดงผล TGA ของ Polyester แบบเคลือบ และไม่เคลือบสาร  $\text{SiO}_2$ - $\text{TiO}_2$  [8]

Bahare Nozari และคณะ [24] ได้ทำการเตรียมสารเคลือบกันไฟสำหรับเส้นใย Polyester โดยใช้  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{ZnO}$  มาผสมกัน ก่อนนำไปใส่ในสารละลายแอมโมเนียที่อุณหภูมิ  $90^\circ\text{C}$  แล้วจึงนำไปเคลือบบน Polyester โดยจะใช้วิธีการวัดค่าด้วย Yellowness index หลังจากทีวัสดุผ่านการเผาที่อุณหภูมิ  $200^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อเป็นตัวบ่งบอกสรรพคุณในการกันไฟของวัสดุ ซึ่งได้ผลออกมาว่าวัสดุมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้น มีการแพร่ของไฟที่ลดลงที่ลดลง และป้องกันการหดตัวของวัสดุได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการทดลอง

รายละเอียดในบทนี้จะประกอบไปด้วยสารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ขั้นตอนในการเคลือบอนุภาคอะลูมิเนียมด้วยซิลิกา ขั้นตอนในการผสมสารเคลือบกันไฟเข้ากับโพลีเมทรีน และวิธีที่ใช้ในการประเมินสารเคลือบกันไฟ โดยมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

#### 3.1 สารเคมี

- 1) อนุภาคอะลูมิเนียม ไฮดรอกไซด์ ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), เกรดทางการค้า (Commercial), Prostar Chemicals Co., Ltd.
- 2) น้ำกลั่น (Deionized water)
- 3) เอทิลแอลกอฮอล์ ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ), เกรดวิเคราะห์ (Analytical reagent (AR)/reagent grade), RCI Labscan Limited
- 4) โซเดียม ซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), เกรดทางการค้า (Commercial), Apex Chemicals Co., Ltd
- 5) อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ), เกรดวิเคราะห์ (Analytical reagent (AR)/reagent grade), Namsiang Co.,Ltd.
- 6) อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ชนิด Rutile, เกรดทางการค้า (Commercial), Civic Chemical LP.
- 7) อนุภาคซิงค์ออกไซด์ ( $\text{ZnO}$ ), เกรดทางการค้า (Commercial), Civic Chemical LP.
- 8) Phenolic resin, เกรดวิเคราะห์ (Analytical reagent (AR)/reagent grade)
- 9) ไอเอิร์น(III) ออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), เกรดวิเคราะห์ (Analytical reagent (AR)/reagent grade), HiMedia Laboratories Private Limited
- 10) Acid hardener, เกรดทางการค้า (Commercial)
- 11) เม็ดโพลีเมทรีน, เกรด NF (โพลีเมทรีนแบบไม่ใส่สารกันไฟ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 1) ปีกเกอร์
- 2) แก้วพลาสติก
- 3) หยอดหยดพลาสติก (Plastic dropper)
- 4) ปิเปตต์ (Pipette)
- 5) กะละมังสแตนเลส
- 6) เตาอบ (Oven)
- 7) ถุงมือยาง (Rubber gloves)
- 8) ถุงมือกันความร้อน
- 9) หม้อนึ่งความดันไอน้ำ (Autoclave), Jiangyin Binjang Medical Equipment Co., Ltd.
- 10) เครื่องซั่งดิจิตอล
- 11) แม่พิมพ์ (Molding device)
- 12) ตะกร้อมือ (Whisk)
- 13) ช้อนตักสารเคมี (Spatula)
- 14) เขี่ยก้น้ำพลาสติก

### 3.3 การเตรียมสารเคลือบกันไฟ

- 1) ทำการซั่งตวง Phenolic resin มาใส่ในแก้วพลาสติก
- 2) เติมเอทิลแอลกอฮอล์ลงไป และใช้ช้อนตักสารเคมีคนให้เข้ากันจน Phenolic resin ละลายจนหมด
- 3) เติมน้ำกลั่น (Deionized water) ลงไปเพื่อลดความหนืด
- 4) ทำการซั่งตวงอะลูมิเนียม ไฮดรอกไซด์ ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) หรือซิงค์ออกไซด์ ( $\text{ZnO}$ ) ตามอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 2 แล้วคนให้เข้ากัน
- 5) เติมโซเดียม ซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) หรือ ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ตามตารางที่ 2 และคนให้เข้ากัน
- 6) จากนั้นเติมไอเอิร์น(III) ออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ลงไป และคนให้เข้ากัน
- 7) สุดท้ายเติม Hardener ลงไปตามอัตราร้อยละในตารางที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 อัตราส่วนในการผสมสารเคลือบ

| รหัสตัวอย่าง<br>(Sample codes)                           | องค์ประกอบ (wt%)    |                  |     |          |
|--|---------------------|------------------|-----|----------|
|  | Al(OH) <sub>3</sub> | TiO <sub>2</sub> | ZnO | Hardener |
| 100ATH-1H-SiO <sub>2</sub>                               | 40                  | 0                | 0   | 1        |
| 100ATH-5H-SiO <sub>2</sub>                               | 40                  | 0                | 0   | 5        |
| 100ATH-10H-SiO <sub>2</sub>                              | 40                  | 0                | 0   | 10       |
| 10ZnO-1H-SiO <sub>2</sub>                                | 30                  | 0                | 10  | 1        |
| 10ZnO-5H-SiO <sub>2</sub>                                | 30                  | 0                | 10  | 5        |
| 10TiO <sub>2</sub> -1H-SiO <sub>2</sub>                  | 30                  | 10               | 0   | 1        |
| 10TiO <sub>2</sub> -5H-SiO <sub>2</sub>                  | 30                  | 10               | 0   | 5        |
| 100ATH-1H-Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>               | 40                  | 0                | 0   | 1        |
| 5TiO <sub>2</sub> -1H-Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>   | 35                  | 5                | 0   | 1        |
| 10TiO <sub>2</sub> -1H-Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>  | 30                  | 10               | 0   | 1        |
| 15TiO <sub>2</sub> -1H-Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>  | 25                  | 15               | 0   | 1        |
| 100TiO <sub>2</sub> -1H-Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> | 0                   | 40               | 0   | 1        |
| 5ZnO-1H-Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>                 | 35                  | 0                | 5   | 1        |
| 10ZnO-1H-Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>                | 30                  | 0                | 10  | 1        |
| 15ZnO-1H-Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>                | 25                  | 0                | 15  | 1        |
| 100ZnO-1H-Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>               | 0                   | 0                | 40  | 1        |

### 3.4 การเคลือบและการขึ้นรูปโฟมพอลิस्टไทริน

- 1) ทำการ Pre heat เครื่อง Autoclave เป็นเวลา 3 นาที ที่อุณหภูมิ 110 °C
- 2) จากนั้นนำเม็ดโฟมพอลิस्टไทรินจำนวน 33 กรัมไปใส่ในเครื่อง Autoclave เป็นเวลา 12 นาที ที่อุณหภูมิ 112 °C เพื่อให้เม็ดเกิดการขยายตัว
- 3) นำเม็ดโฟมพอลิस्टไทรินที่ผ่านการขยายตัวมาแล้ว มาใส่ในกะละมังสแตนเลส แล้วทำการเทสารเคลือบผสมที่ได้มาจากหัวข้อที่ 3.3 ลงไป
- 4) ทำการคลุกให้เข้ากันจนเม็ดโฟมพอลิस्टไทรินทั้งหมดถูกเคลือบกันอย่างสม่ำเสมอ
- 5) นำเม็ดโฟมพอลิस्टไทรินที่ผ่านการเคลือบแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 6) เมื่อครบ 1 ชั่วโมงแล้วให้นำเม็ดโฟมพอลิस्टไทรินที่ผ่านการเคลือบไปใส่ในแม่พิมพ์
- 7) ทำการ Pre heat เครื่อง Autoclave เป็นเวลา 1 นาที ที่อุณหภูมิ 110 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 8) นำแม่พิมพ์เข้าเครื่อง Autoclave ที่อุณหภูมิ 116 °C เป็นเวลา 40 นาที เพื่อให้เม็ดโพลีโพรพิลีนขึ้นรูปเป็นแผ่นโพลีโพรพิลีนออกมา

### 3.5 การทดสอบและวิเคราะห์สมบัติของพอลิโพรพิลีนหลังการเคลือบ

1) ทดสอบพฤติกรรมการกันไฟด้วยการเผา โดยทำการตั้งแผ่นโพลีโพรพิลีนให้อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดไฟ (ในที่นี้ใช้กระป๋องสเปรย์แก๊สชีวเทนเป็นแหล่งเชื้อเพลิง) เป็นระยะห่าง 25 ซม. ใช้แผ่นเหล็กล้อมแผ่นโพลีโพรพิลีนเอาไว้ทุกด้าน ยกเว้นด้านที่ทำการพ่นไฟ จากนั้นทำการตั้งกล้องถ่ายภาพความร้อนแบบอินฟราเรด และกล้องถ่ายภาพวิดีโอ เพื่อบันทึกผลการทดลอง โดยให้กล้องทั้งสองเล็งไปที่บริเวณส่วนบนของแผ่นโพลีโพรพิลีน ทำการจับเวลาเป็นเวลา 5 นาที โดยให้เริ่มจับเวลาเมื่อไฟกระทบกับแผ่นโพลีโพรพิลีน เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดให้ปิดไฟทันที และทำการถ่ายรูปแผ่นโพลีโพรพิลีนทางด้านหน้า ด้านหลัง และขอบของแผ่นโพลีโพรพิลีนเพื่อบันทึกผลการทดลอง

2) วิธีการวิเคราะห์โครงสร้างชั้น Char และโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้อง SEM เป็นการส่องตัวอย่างด้วยลำแสงอิเล็กตรอนเพื่อสร้างภาพขยายสำหรับใช้ในการวิเคราะห์ โดยสามารถใช้ในการสแกนพื้นผิวที่กำลังขยายตั้งแต่ 1  $\mu\text{m}$  ถึง 1 nm ขึ้นอยู่กับฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการผลิตลำแสงอิเล็กตรอน เลนส์ และระบบสุญญากาศ [25]

3) การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วย TGA (Thermogravimetric analysis) เป็นวิธีที่ทำการบันทึกน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นงานเทียบกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้สามารถวัดปริมาณความชื้นและสารระเหยของตัวอย่างได้ อุปกรณ์ TGA จะประกอบไปด้วยเตาหลอมที่มีตัวทำความร้อนที่ทำจากแพลตตินัม และภายนอกเตาเผาที่มีตัวทำความร้อนที่ทำจากโลหะผสมแพลตตินัมผสมโรเดียม 30% ทำให้สามารถขยายช่วงอุณหภูมิได้สูงถึง 1,500 °C โดยในงานวิจัยนี้จะทำ TGA ที่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 800 °C อัตราการให้ความร้อนอยู่ที่ 10 K/นาที และทำภายใต้บรรยากาศ  $\text{N}_2$  ที่มีอัตราการป้อนอยู่ที่ 20 มิลลิลิตร/นาที [26]

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 พฤติกรรมการทนไฟของโคมพอลิस्टไทรินหลังเคลือบ โดยการเผาด้วยสเปร์ยบิวเทน

แผ่นโคมที่ขึ้นรูปจากเม็ดโคมพอลิस्टไทรินที่ผ่านการเคลือบถูกนำมาทดสอบการทนไฟผ่านการเผาที่อุณหภูมิมากกว่า 275 °C เป็นเวลา 5 นาที (ถ้าตลอดระยะเวลาทดสอบยังคงโครงสร้างไว้ได้ และไม่แตกหักไปก่อน) โดยมีทั้งหมด 16 ตัวอย่างและแบ่งเป็น 5 กลุ่มดังตารางที่ 3 จากนั้นทำการคัดเลือกตัวอย่างที่มีพฤติกรรมการทนไฟที่มีลักษณะดีที่สุดในแต่ละกลุ่มตัวอย่าง มาอย่างละ 1 ตัวอย่าง โดยอ้างอิงตามหลักมาตรฐาน ASTM E84 [27] ซึ่งเป็นมาตรฐาน สำหรับการดูคุณลักษณะการเผาไหม้ที่พื้นผิวของวัสดุก่อสร้าง ได้แก่ ความสามารถในการกันไฟไหม้บนตัวโคม ความสามารถในการป้องกันการแพร่ของไฟได้ (Flame spread index – FSI) โคมมีความแน่น และแข็งแรงพอที่จะป้องกันไม่ให้โคมทะลุได้ โครงสร้างสามารถคงรูปไว้ได้ หลังจากการเผา คือ ไม่โค้งตัว หรือบิดงอจนเกินไป และสุดท้ายความสามารถในการลดการเกิดควัน (Smoke Developed Index - SDI) เป็นต้น

ตารางที่ 3 ตารางแบ่งกลุ่มทดสอบสำหรับการวิเคราะห์ผล

| กลุ่มทดสอบ   | ตัวอย่างภายในกลุ่ม  |
|--|---|
| 1. กลุ่มทดสอบผลของปริมาณ Hardener และผลของการเติม $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ต่อการทนไฟของโคมพอลิस्टไทรินที่เคลือบด้วย $\text{Al}(\text{OH})_3$ | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 100ATH-1H-SiO<sub>2</sub></li> <li>• 100ATH-5H-SiO<sub>2</sub></li> <li>• 100ATH-10H-SiO<sub>2</sub></li> <li>• 100ATH-1H-Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub></li> </ul>                       |
| 2. กลุ่มทดสอบผลของปริมาณ Hardener ต่อการทนไฟของโคมพอลิस्टไทรินที่เคลือบด้วย TiO <sub>2</sub> หรือ ZnO  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 10TiO<sub>2</sub>-1H-SiO<sub>2</sub></li> <li>• 10TiO<sub>2</sub>-5H-SiO<sub>2</sub></li> <li>• 10ZnO-1H-SiO<sub>2</sub></li> <li>• 10ZnO-5H-SiO<sub>2</sub></li> </ul>                  |
| 3. กลุ่มทดสอบผลของปริมาณ TiO <sub>2</sub> ต่อการทนไฟของโคมพอลิस्टไทริน   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 5TiO<sub>2</sub>-1H-Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub></li> <li>• 10TiO<sub>2</sub>-1H-Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub></li> <li>• 15TiO<sub>2</sub>-1H-Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub></li> </ul> |
| 4. กลุ่มทดสอบผลของปริมาณ ZnO ต่อการทนไฟของโคมพอลิस्टไทริน  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 5ZnO -1H-Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub></li> <li>• 10ZnO -1H-Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub></li> <li>• 15ZnO -1H-Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub></li> </ul>                                  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|  |   |
|--|---|
| 5. กลุ่มทดสอบผลของการไม่ใส่ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ลงไปในสารเคลือบ ต่อการทนไฟของโคมพอลิस्टาโรน | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>100\text{TiO}_2\text{-1H-Na}_2\text{SiO}_3</math></li> <li>• <math>100\text{ZnO-1H-Na}_2\text{SiO}_3</math></li> </ul> |
|--|---|

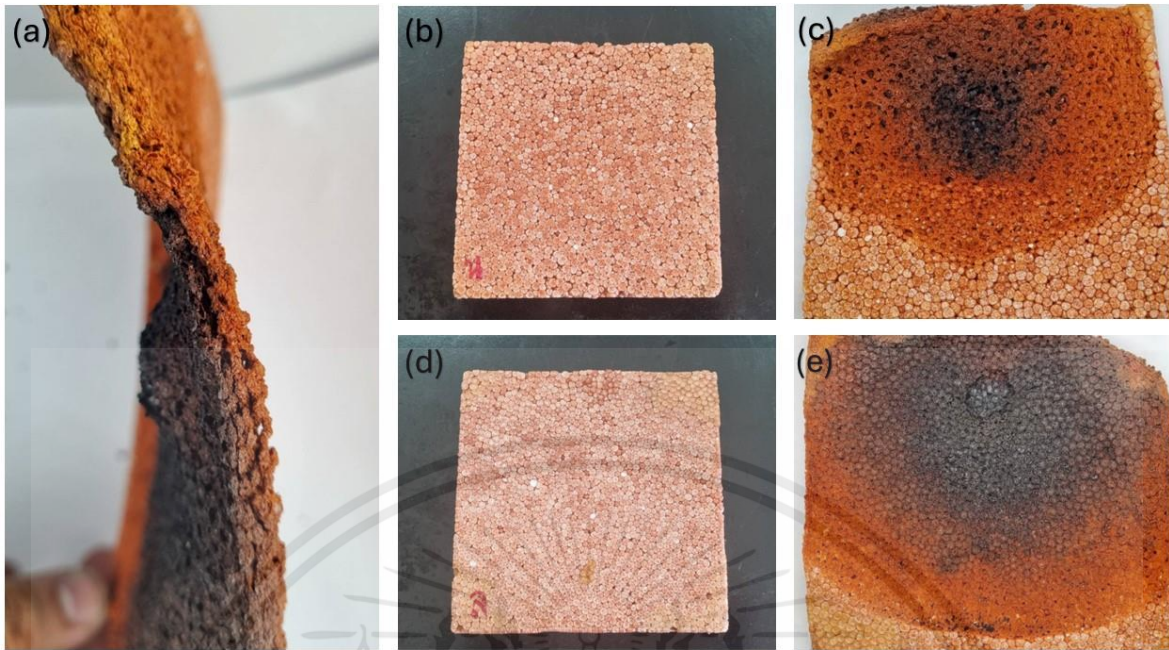
#### 4.1.1 กลุ่มทดสอบผลของปริมาณ Hardener และผลของการเติม $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ต่อการทนไฟของโคมพอลิस्टาโรนที่เคลือบด้วย $\text{Al}(\text{OH})_3$

ในกลุ่มทดสอบนี้ทางผู้ทดลองได้ทำการเติมสาร Hardener ลงไปในสารเคลือบที่มีส่วนประกอบของ  $\text{Al}(\text{OH})_3$  เป็นหลัก และไม่มี  $\text{TiO}_2$  หรือ  $\text{ZnO}$  (รูปที่ 19 ถึง 21) และมีการเติมสาร  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  เพื่อเปรียบเทียบกับ (รูปที่ 22) พบว่าแนวโน้มของตัวอย่างส่วนใหญ่ไปในทิศทางเดียว (ยกเว้นตัวอย่าง  $100\text{ATH-5H-SiO}_2$  (รูปที่ 20) ที่แม้ว่าจะสามารถทนการเผาไหม้ได้ครบ 5 นาที แต่เกิดการแตกหักหลังจากนั้น) คือ สามารถป้องกันการเผาไหม้ และการแพร่กระจายของเปลวไฟได้ และยังสามารถรักษาโครงสร้างไว้ได้ระดับหนึ่ง โดยเฉพาะตัวอย่าง  $100\text{ATH-10H-SiO}_2$  (รูปที่ 21) ที่โครงสร้างมีการบิดงอที่ต่ำที่สุดในกลุ่มนี้ ในส่วนของการเกิดควันนั้น ตัวอย่าง  $100\text{ATH-10H-SiO}_2$  มีลักษณะที่โดดเด่นที่สุดในกลุ่ม เนื่องจากเป็นตัวอย่างเดียวในกลุ่มที่สามารถลดการเกิดควันอย่างเห็นได้ชัด โดยภาพจากการบันทึกวิดีโอ และการสังเกตด้วยตาเปล่าได้แสดงให้เห็นว่ามีปริมาณควันที่น้อยมากเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่นที่อยู่ในกลุ่มเดียวกัน ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณ Hardener ที่มีอยู่มากทำให้สารเคลือบแข็งตัว และจับตัวกันเป็นแผ่นที่มีความหนาหนาเคลือบผิวของวัสดุไว้ดังรูปที่ 38 (c) และ 39 (c) แผ่นนี้มีสรรพคุณในการลดควันเนื่องจากช่วยลดทั้งขนาด และปริมาณของรูพรุนลง [27] ทำให้มีปริมาณควันที่ต่ำกว่าสารเคลือบอื่นๆทั้งจากภายในกลุ่มตัวอย่าง และจากกลุ่มตัวอย่างอื่นๆด้วย ทำให้ตัวอย่าง  $100\text{ATH-10H-SiO}_2$  เป็นตัวอย่างที่ดีที่สุดจากกลุ่มนี้

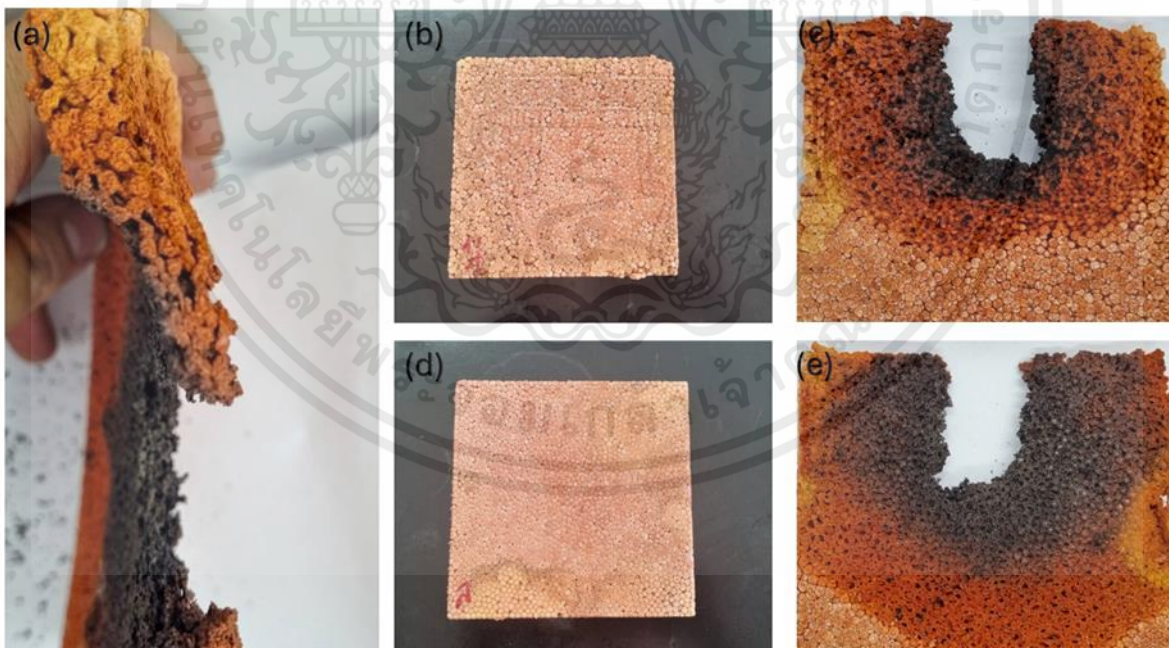


รูปที่ 18 ภาพเปรียบเทียบลักษณะการเกิดควันของตัวอย่าง  $100\text{ATH-1H-SiO}_2$  (ซ้าย) และ  $100\text{ATH-10H-SiO}_2$  (ขวา) หลังจากการเผาไปแล้ว 1 นาที 30 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

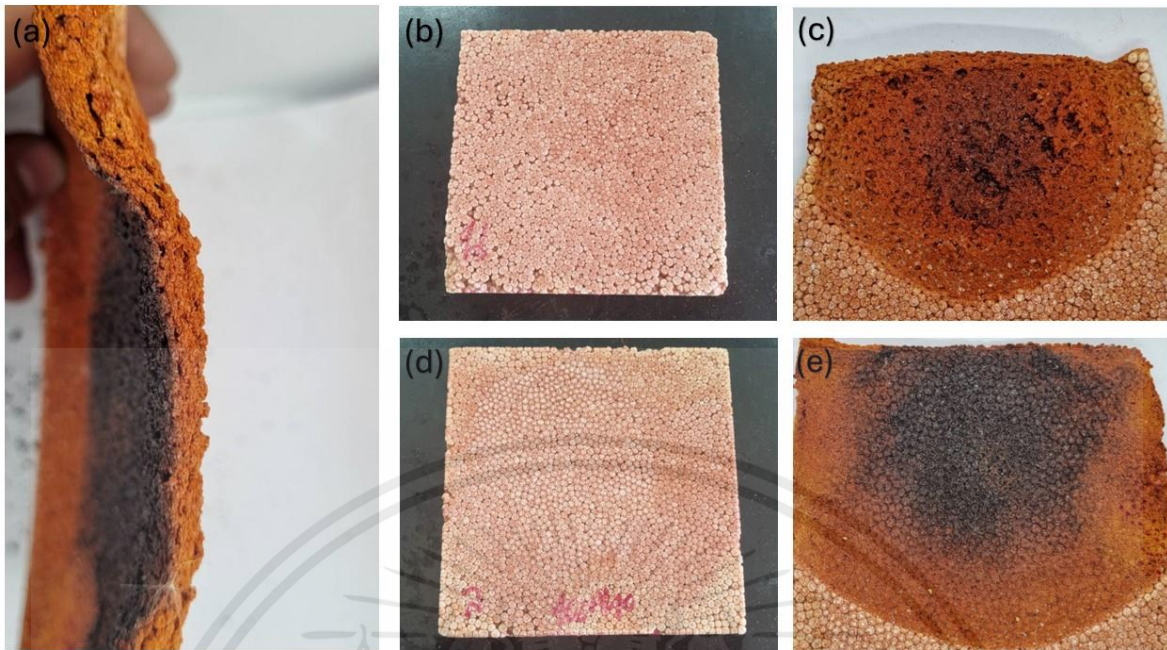


รูปที่ 19 พฤติกรรมการเผาไหม้ของโพลีอิมิดเรซิน (100ATH-1H-SiO<sub>2</sub>) (a) ด้านข้างหลังเผา (b) ด้านหน้าก่อนเผา (c) ด้านหน้าหลังเผา (d) ด้านหลังก่อนเผา และ (e) ด้านหลังหลังเผา

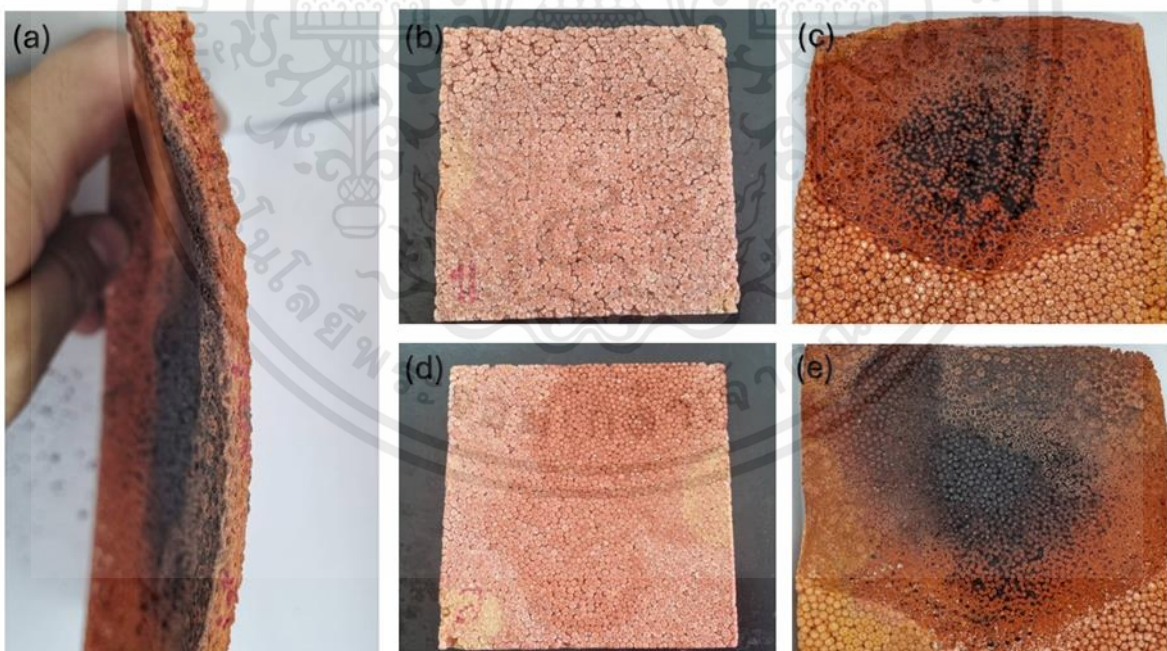


รูปที่ 20 พฤติกรรมการเผาไหม้ของโพลีอิมิดเรซิน (100ATH-5H-SiO<sub>2</sub>) (a) ด้านข้างหลังเผา (b) ด้านหน้าก่อนเผา (c) ด้านหน้าหลังเผา (d) ด้านหลังก่อนเผา และ (e) ด้านหลังหลังเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 21 พฤติกรรมการเผาไหม้ของโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) ที่เคลือบด้วยโพลีอิมิด (100ATH-10H-SiO<sub>2</sub>) (a) ด้านข้างหลังเผา (b) ด้านหน้าก่อนเผา (c) ด้านหน้าหลังเผา (d) ด้านหลังก่อนเผา และ (e) ด้านหลังหลังเผา



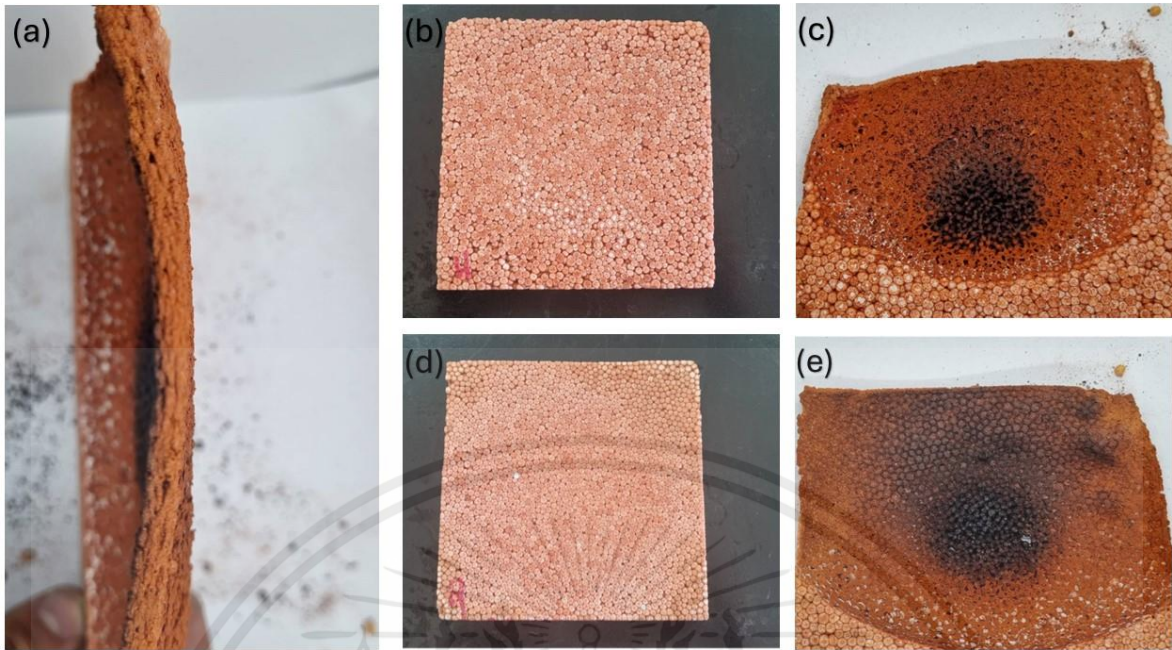
รูปที่ 22 พฤติกรรมการเผาไหม้ของโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) ที่เคลือบด้วยโพลีอิมิด (100ATH-1H-Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) (a) ด้านข้างหลังเผา (b) ด้านหน้าก่อนเผา (c) ด้านหน้าหลังเผา (d) ด้านหลังก่อนเผา และ (e) ด้านหลังหลังเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

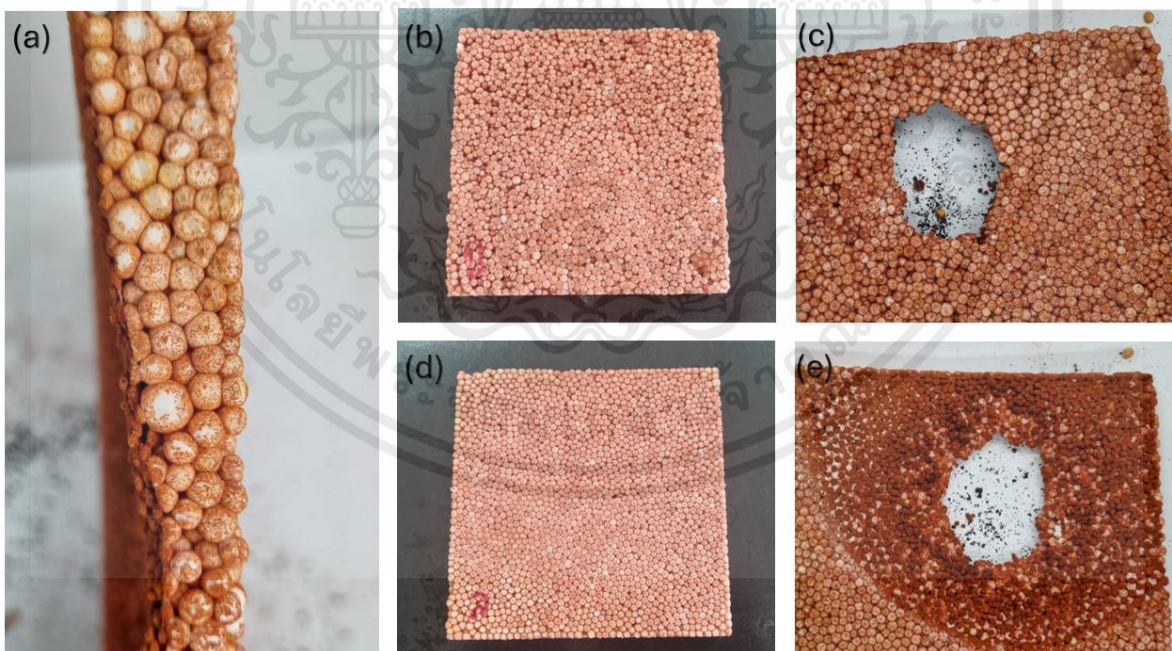
#### 4.1.2 กลุ่มทดสอบผลของปริมาณ Hardener ต่อการทนไฟของโพลีเอสเตอร์ที่เคลือบด้วย $\text{TiO}_2$ หรือ $\text{ZnO}$

ในกลุ่มทดสอบนี้ศึกษาผลการเติมสาร Hardener ลงไปในสารเคลือบที่มีส่วนผสมของ  $\text{TiO}_2$  หรือ  $\text{ZnO}$  เป็นหลัก (รูปที่ 23 ถึง 26) พบว่าแนวโน้มของตัวอย่างที่เป็น  $\text{TiO}_2$  ทั้งสองตัวนั้นมีลักษณะไปในทิศทางเดียว คือ สามารถป้องกันเผาไหม้ และการแพร่กระจายของเปลวไฟได้ และยังสามารถรักษาโครงสร้างไว้ได้ดีระดับหนึ่ง โดยปริมาณ Hardener ที่เพิ่มลงไปนั้นทำให้สารเคลือบแข็งตัว และจับตัวกันเป็นแผ่นที่มีความหนาเคลือบผิวของวัสดุไว้ดังรูปที่ 39 (c) ทำให้มีปริมาณควันที่ต่ำ แต่ไม่ต่ำเท่ากับตัวอย่าง  $100\text{ATH-10H-SiO}_2$  ส่วนตัวอย่าง  $10\text{ZnO-5H-SiO}_2$  (รูปที่ 24) ที่ไม่สามารถทนต่อเผาไหม้ได้ เพราะเกิดจากการที่ในขั้นตอนของการขึ้นรูปโพลีเอสเตอร์ไม่ถึงจุดที่ต้องการทำให้โพลีเอสเตอร์มีความแน่นไม่เพียงพอที่จะทนต่อการเผาไหม้ได้ ส่วนตัวอย่าง  $10\text{ZnO-1H-SiO}_2$  (รูปที่ 23) มีลักษณะที่คล้ายกับตัวอย่างที่เป็น  $\text{TiO}_2$  ในกลุ่มเดียวกัน แต่มีความโค้งงอที่น้อยกว่าเล็กน้อย ในส่วนของการเกิดควันนั้นทุกตัวปล่อยควันออกมาในปริมาณที่ดูพอกๆกันเมื่อเทียบในกลุ่มเดียวกัน และดูมีปริมาณมากกว่าเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ 1

จากการทดสอบการเผากลุ่มตัวอย่างที่ 2 ทางผู้ทดลองได้เลือกตัวอย่าง  $10\text{TiO}_2-5\text{H-SiO}_2$  (รูปที่ 26) เนื่องจากพบว่าตัวอย่างนี้มีวัสดุสีขาวเกิดขึ้นบนพื้นผิวหลังจากการเผาแม้มีอยู่เล็กน้อย พื้นผิวของตัวอย่างมีความดำน้อยกว่าตัวอื่น ซึ่งตามงานวิจัยของ Hongfei Li และคณะ [18] ได้บ่งบอกว่าวัสดุสีขาวนั้นสามารถป้องกันชั้น Char จากการเผาไหม้ได้อีกทีหนึ่ง ทำให้ป้องกันพื้นผิวของวัสดุได้ดีขึ้น ซึ่งจะส่งผลทำให้มีระยะเวลาการทนไฟที่เพิ่มขึ้น และเนื่องจากการมีอยู่ของวัสดุสีขาวนี้เองจึงทำให้โครงสร้างของตัวอย่างที่มี  $\text{TiO}_2$  ผสมสามารถคงความหนาไว้ได้มากกว่าตัวอย่างที่มี  $\text{ZnO}$  ผสมอยู่ ทางผู้ทดลองจึงได้เลือกตัวอย่างนี้

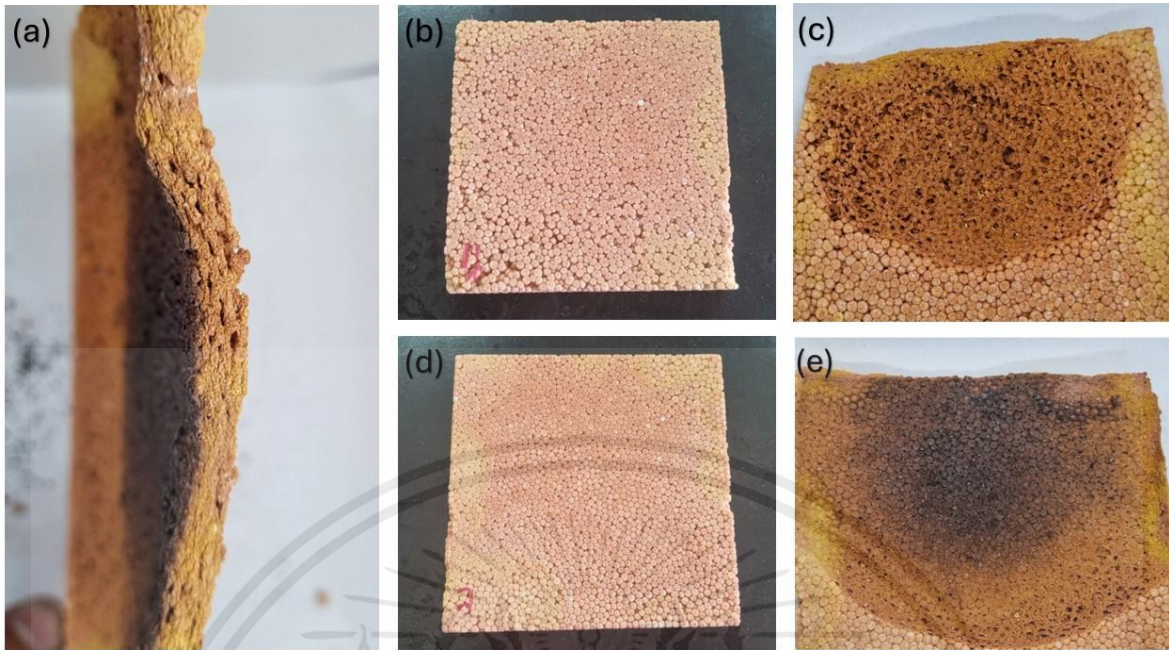


รูปที่ 23 พฤติกรรมการเผาไหม้ของโพลีเมอสไตรีน ( $10\text{ZnO-1H-SiO}_2$ ) (a) ด้านข้างหลังเผา (b) ด้านหน้าก่อนเผา (c) ด้านหน้าหลังเผา (d) ด้านหลังก่อนเผา และ (e) ด้านหลังหลังเผา

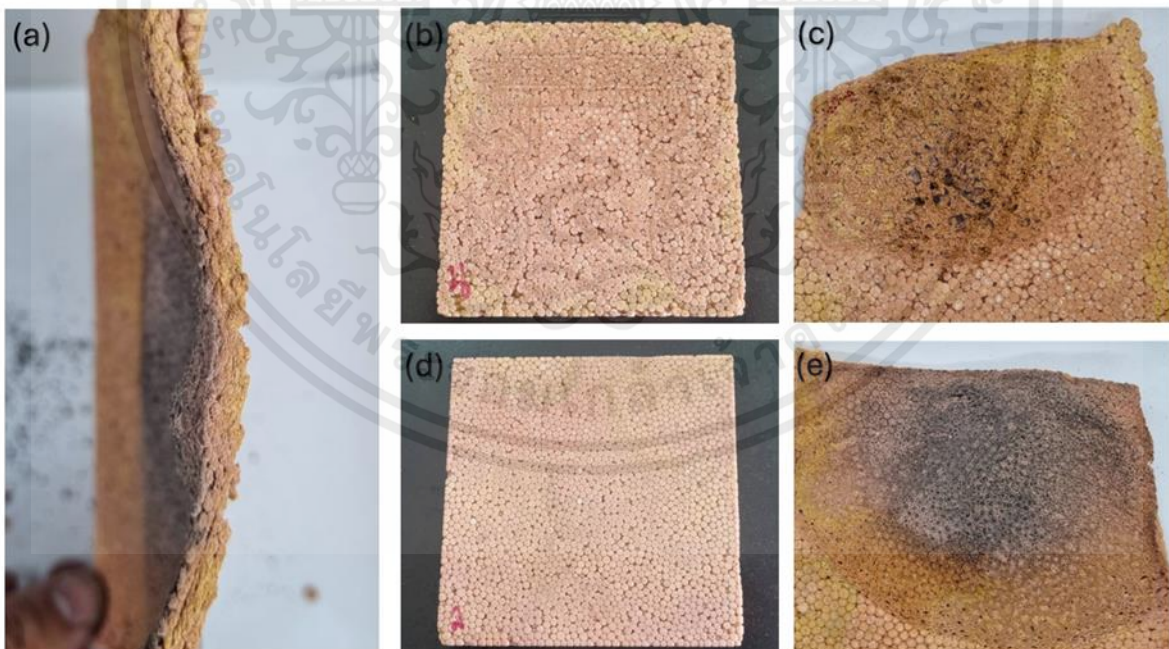


รูปที่ 24 พฤติกรรมการเผาไหม้ของโพลีเมอสไตรีน ( $10\text{ZnO-5H-SiO}_2$ ) (a) ด้านข้างหลังเผา (b) ด้านหน้าก่อนเผา (c) ด้านหน้าหลังเผา (d) ด้านหลังก่อนเผา และ (e) ด้านหลังหลังเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 25 พฤติกรรมการเผาไหม้ของโพลีอิมิดีสไตรีน ( $10\text{TiO}_2\text{-1H-SiO}_2$ ) (a) ด้านข้างหลังเผา (b) ด้านหน้าก่อนเผา (c) ด้านหน้าหลังเผา (d) ด้านหลังก่อนเผา และ (e) ด้านหลังหลังเผา

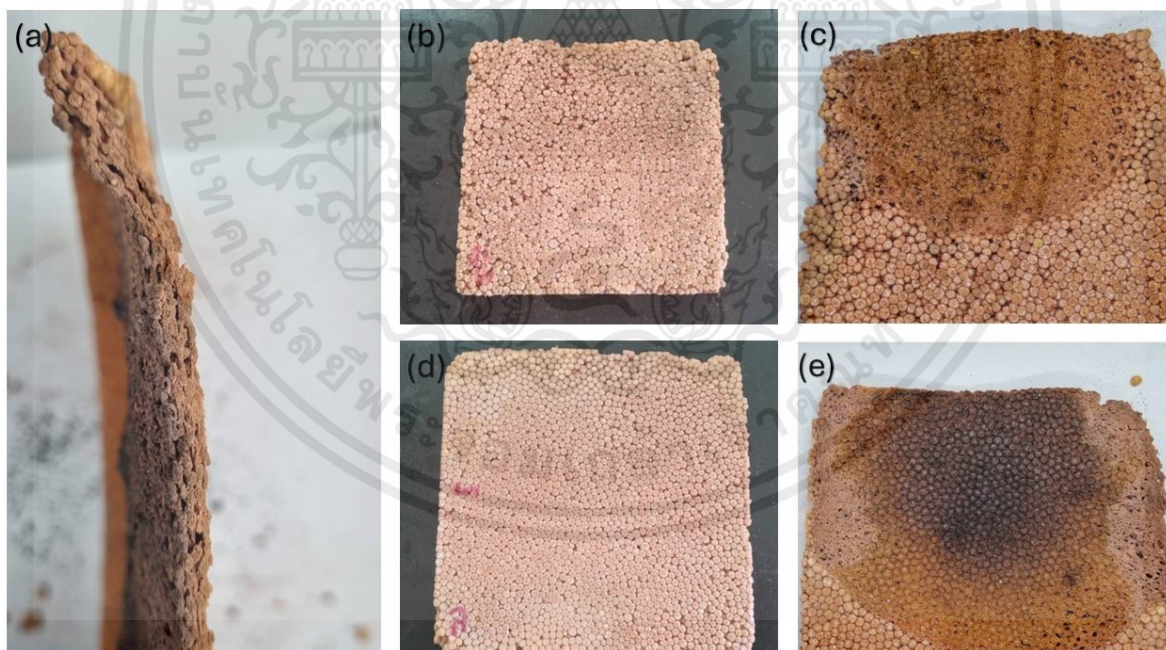


รูปที่ 26 พฤติกรรมการเผาไหม้ของโพลีอิมิดีสไตรีน ( $10\text{TiO}_2\text{-5H-SiO}_2$ ) (a) ด้านข้างหลังเผา (b) ด้านหน้าก่อนเผา (c) ด้านหน้าหลังเผา (d) ด้านหลังก่อนเผา และ (e) ด้านหลังหลังเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

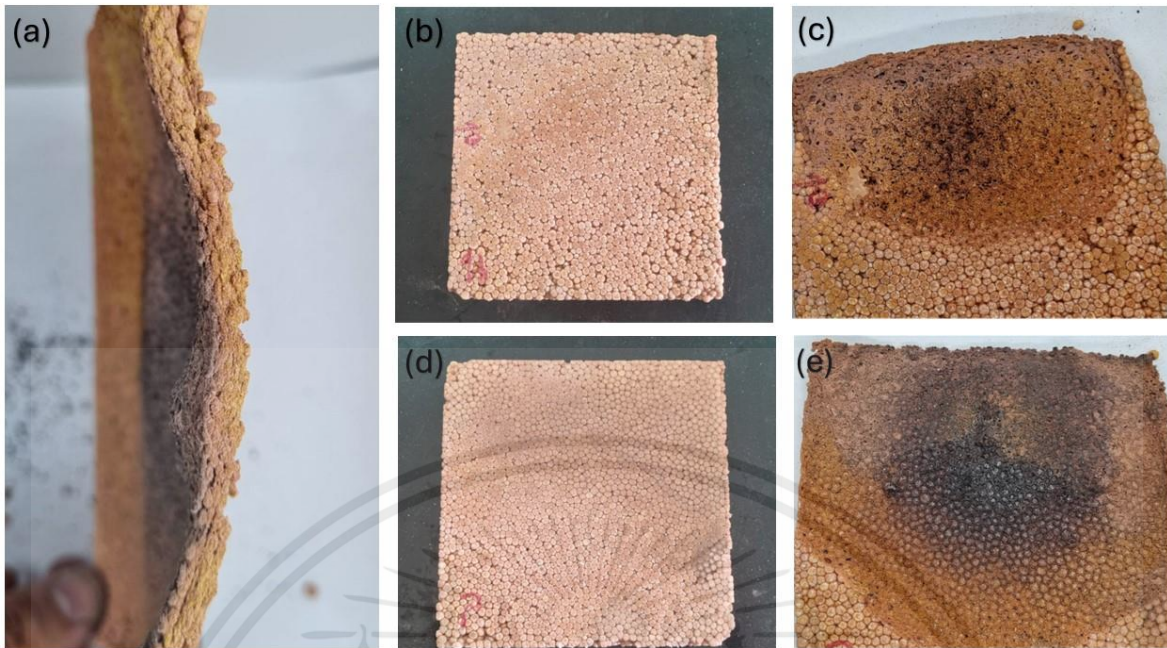
#### 4.1.3 กลุ่มทดสอบผลของปริมาณ $TiO_2$ ต่อการทนไฟของโฟมพอลิस्टรีน

ในกลุ่มทดสอบนี้เป็นการศึกษาผลของปริมาณ  $TiO_2$  ในสารเคลือบที่ Hardener 1% (เหตุผลที่ใช้ 1% ก็เพราะการใช้ Hardener ที่ 10% ทำให้สารเคลือบมีความหนืดเกินไป ส่งผลทำให้เม็ดโฟมเคลือบได้ไม่สม่ำเสมอ ส่วนที่ไม่ใช้ที่ 5% ก็เพราะในตอนที่ทำตัวอย่าง  $15TiO_2-1H-Na_2SiO_3$   $TiO_2$  นั้นสารเคลือบมีความหนืดเกินไปเช่นเดียวกับแบบ 10% จึงจำเป็นต้องใช้ 1% เพื่อให้เกิดการเปรียบเทียบกันได้) และมีการเติม  $Na_2SiO_3$  เพื่อดูการทำงานร่วมกันของสารทั้งสอง (รูปที่ 27 ถึง 29) โดยทางผู้ทดลองได้สังเกตเห็นว่าแนวโน้มของตัวอย่างทั้งหมดมีลักษณะไปในทิศทางเดียว คือ สามารถป้องกันเผาไหม้ และการแพร่กระจายของเปลวไฟได้ และยังสามารถรักษาโครงสร้างไว้ได้ดี โดยเฉพาะตัวอย่าง  $15TiO_2-1H-Na_2SiO_3$  (รูปที่ 29) ที่โครงสร้างมีความโค้งงอต่ำที่สุดในกลุ่ม มีการยุบตัวที่พื้นผิวน้อยที่สุด และยังคงความหนาไว้ได้ดี ประกอบกับยังมีการเกิดของวัสดุสีขาวมากที่สุดในกลุ่มอีก ซึ่งเป็นผลมาจากวัสดุสีขาวที่เกิดมาจาก  $TiO_2$  ได้ช่วยทำให้พื้นผิวของตัวอย่างทนความร้อนได้มากขึ้น ทำให้สามารถคงโครงสร้างของตัวอย่างเอาไว้ได้ ด้วยเหตุผลที่กล่าวมานี้จึงทำให้ตัวอย่าง  $15TiO_2-1H-Na_2SiO_3$  เป็นตัวอย่างที่ทางผู้ทดลองคิดว่าดีที่สุดจากกลุ่มนี้

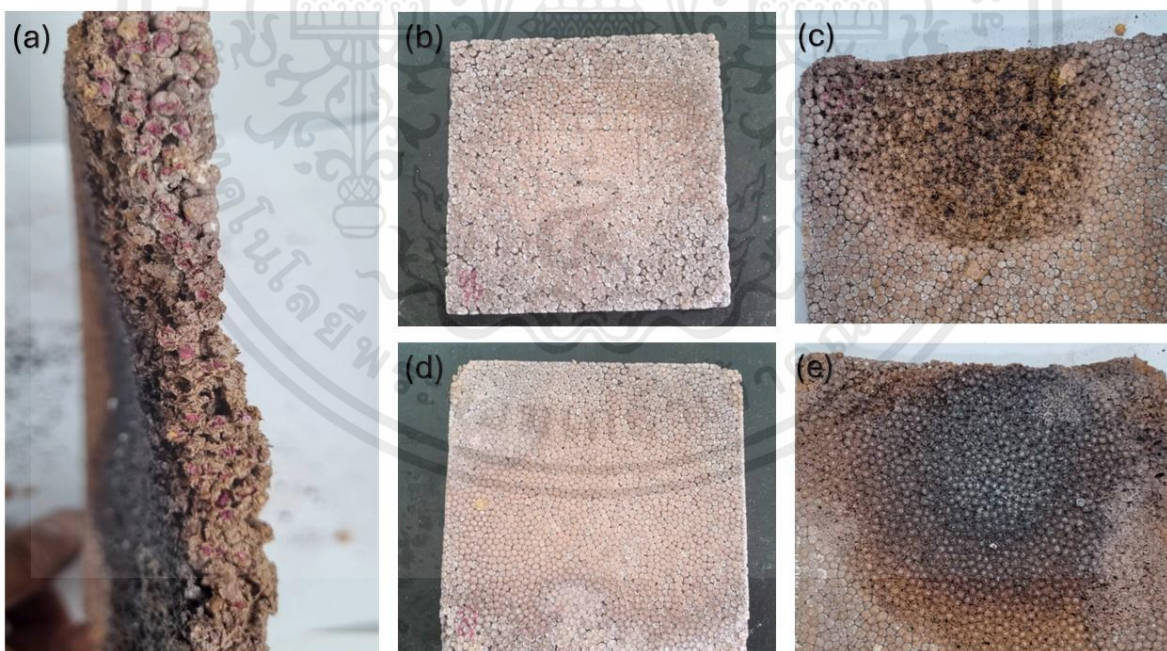


รูปที่ 27 พฤติกรรมการเผาไหม้ของโฟมพอลิस्टรีน ( $5TiO_2-1H-Na_2SiO_3$ ) (a) ด้านข้างหลังเผา (b) ด้านหน้าก่อนเผา (c) ด้านหน้าหลังเผา (d) ด้านหลังก่อนเผา และ (e) ด้านหลังหลังเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 28 พฤติกรรมการเผาไหม้ของโพลีเมอริสไตรีน ( $10\text{TiO}_2\text{-1H-Na}_2\text{SiO}_3$ ) (a) ด้านข้างหลังเผา (b) ด้านหน้าก่อนเผา (c) ด้านหน้าหลังเผา (d) ด้านหลังก่อนเผา และ (e) ด้านหลังหลังเผา

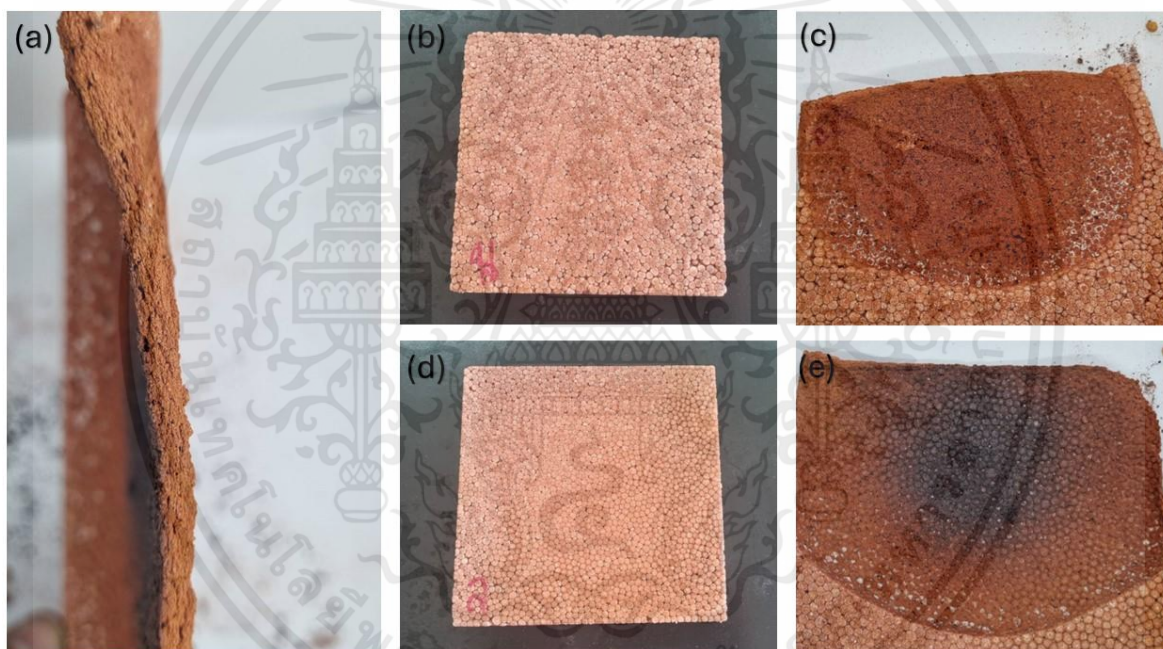


รูปที่ 29 พฤติกรรมการเผาไหม้ของโพลีเมอริสไตรีน ( $15\text{TiO}_2\text{-1H-Na}_2\text{SiO}_3$ ) (a) ด้านข้างหลังเผา (b) ด้านหน้าก่อนเผา (c) ด้านหน้าหลังเผา (d) ด้านหลังก่อนเผา และ (e) ด้านหลังหลังเผา

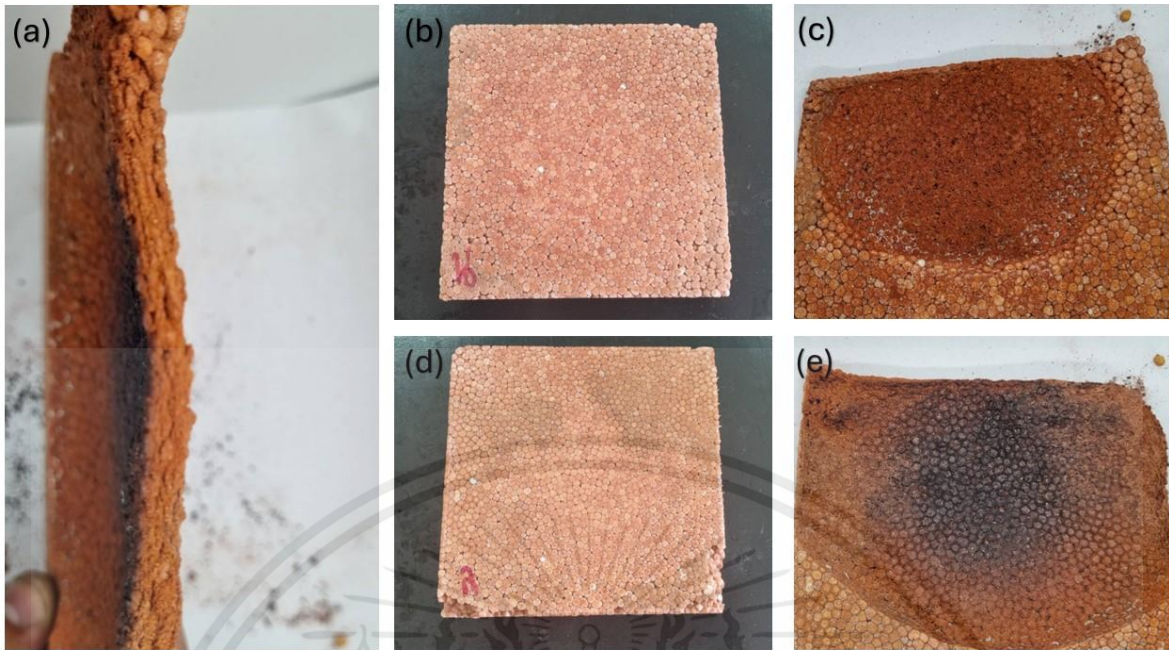
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.4 กลุ่มทดสอบผลของปริมาณ ZnO ต่อการทนไฟของโฟมพอลิस्टไร์น

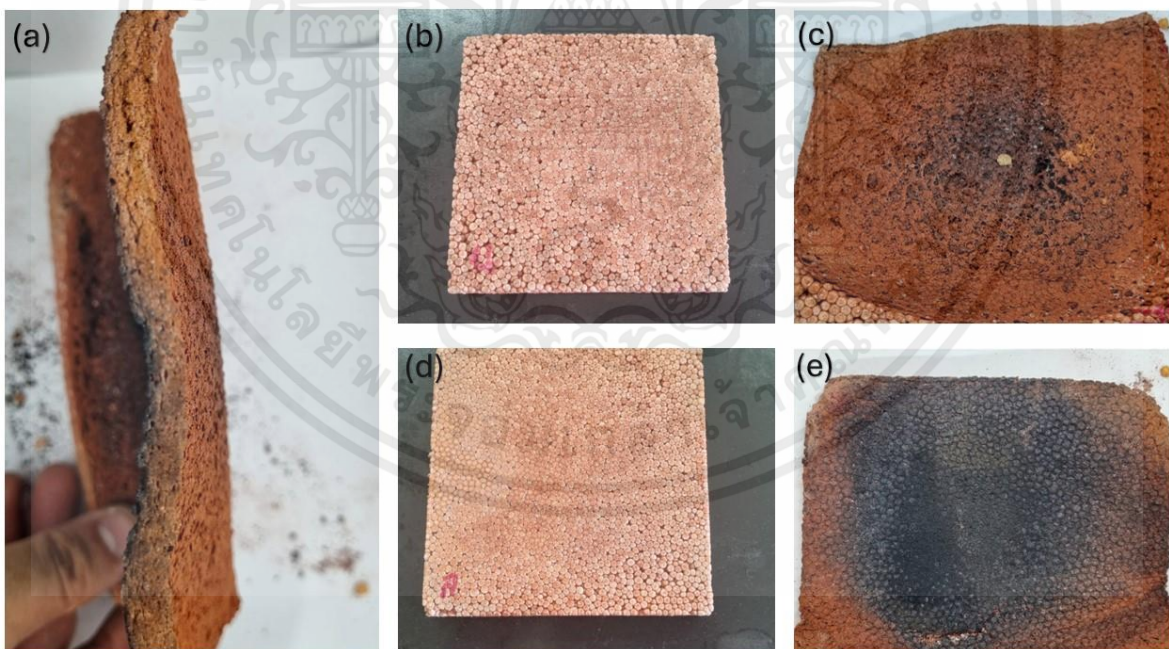
ในกลุ่มทดสอบนี้เป็นการศึกษาผลของปริมาณ ZnO ในสารเคลือบที่ Hardener 1% (เหตุผลเช่นเดียวกันกับกลุ่มที่ 3 แต่เกิดขึ้นกับตัวอย่าง 15ZnO-1H-Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> แทน) และมีการเติม Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> เพื่อการทำงานร่วมกันของสารทั้งสอง (รูปที่ 30 ถึง 32) โดยทางผู้ทดลองได้สังเกตพบว่าแนวโน้มของตัวอย่างทั้งหมดมีลักษณะไปในทิศทางเดียว คือ สามารถป้องกันเผาไหม้ และการแพร่กระจายของเปลวไฟได้ แต่โครงสร้างยังรักษาไว้ได้ไม่ดีนก โดยเฉพาะตัวอย่าง 15ZnO-1H-Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (รูปที่ 32) ที่โครงสร้างมีความโค้งงอมากที่สุดในกลุ่มตัวอย่าง โดยตัวอย่างที่ผู้ทดลองเลือกจากกลุ่มที่ 4 ก็คือตัวอย่าง 10ZnO-1H-Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (รูปที่ 30) เพราะตัวอย่างมีลักษณะโฟมที่แข็ง และแน่นที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่นในกลุ่ม และยังคงโครงสร้างไว้ได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่นในกลุ่มเช่นกัน



รูปที่ 30 พฤติกรรมการเผาไหม้ของโฟมพอลิस्टไร์น (5ZnO-1H-Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) (a) ด้านข้างหลังเผา (b) ด้านหน้าก่อนเผา (c) ด้านหน้าหลังเผา (d) ด้านหลังก่อนเผา และ (e) ด้านหลังหลังเผา



รูปที่ 31 พฤติกรรมการเผาไหม้ของโพลิเมอร์ไฮบริด (10ZnO-1H-Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) (a) ด้านข้างหลังเผา (b) ด้านหน้าก่อนเผา (c) ด้านหน้าหลังเผา (d) ด้านหลังก่อนเผา และ (e) ด้านหลังหลังเผา

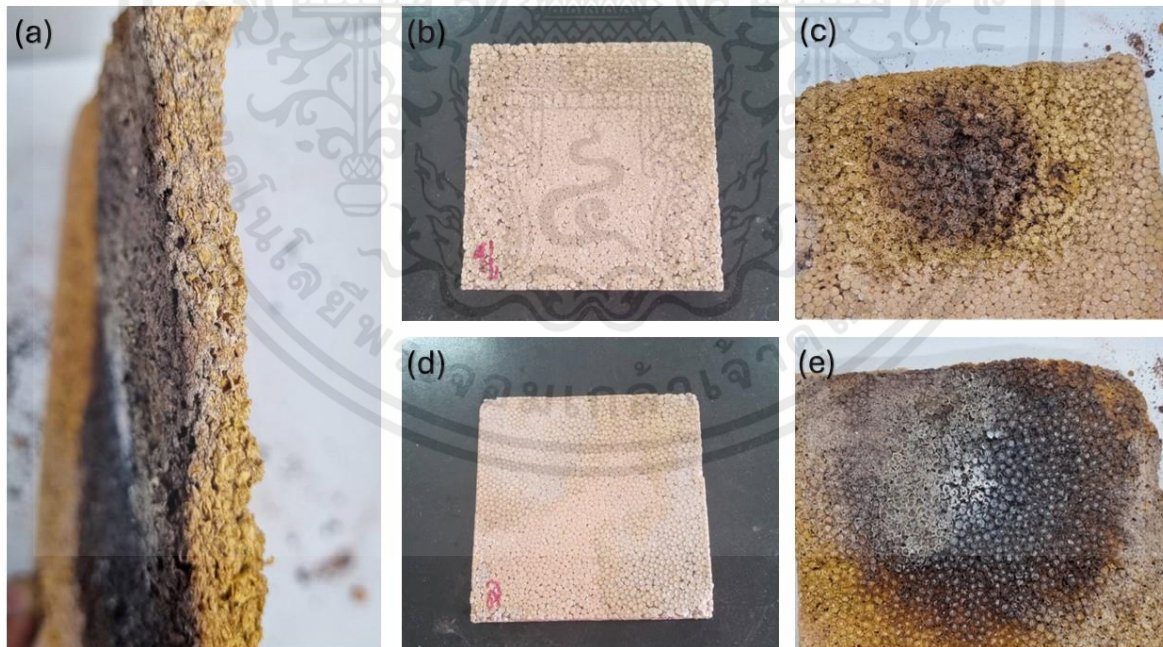


รูปที่ 32 พฤติกรรมการเผาไหม้ของโพลิเมอร์ไฮบริด (15ZnO-1H-Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) (a) ด้านข้างหลังเผา (b) ด้านหน้าก่อนเผา (c) ด้านหน้าหลังเผา (d) ด้านหลังก่อนเผา และ (e) ด้านหลังหลังเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

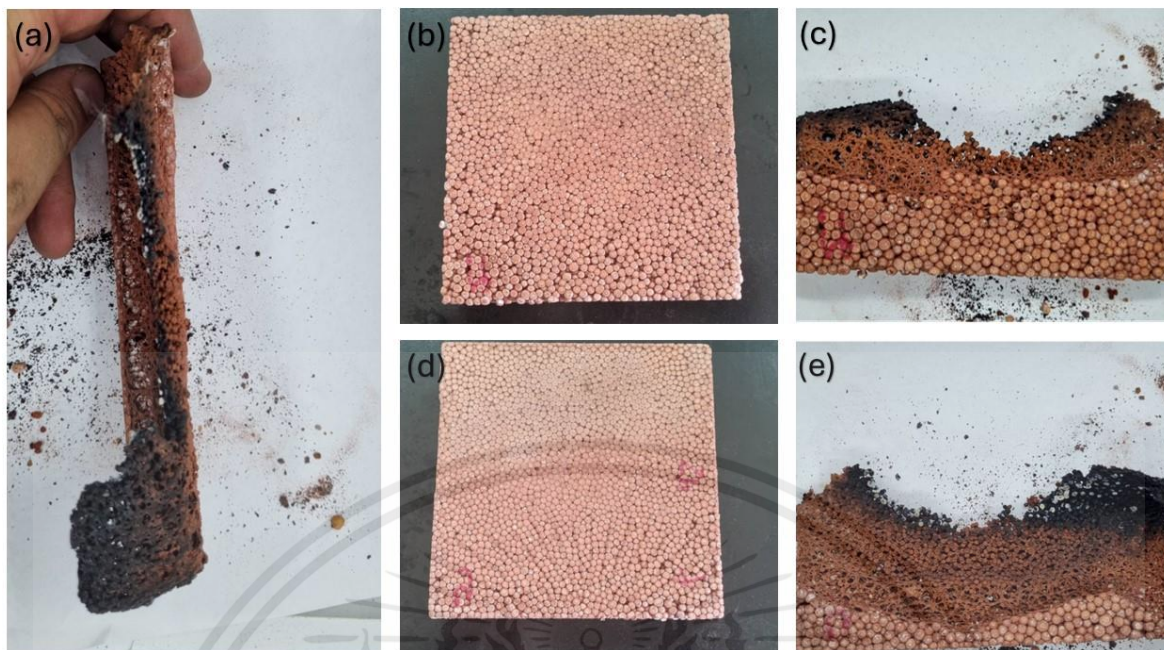
#### 4.1.5 กลุ่มทดสอบผลของการไม่ใส่ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ลงไปในสารเคลือบต่อการทนไฟของโพนพอลิस्टรีน

ในกลุ่มทดสอบนี้ศึกษาผลการใช้  $\text{TiO}_2$  หรือ  $\text{ZnO}$  เพียงอย่างเดียว 100% (ไม่ใส่  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ลงไปในสารเคลือบ) (รูปที่ 33 ถึง 34) ต่อการทนไฟของโพนพอลิस्टรีน โดยตัวอย่าง 100ZnO-1H- $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (รูปที่ 34) ในช่วงแรกนั้นสามารถป้องกันเผาไหม้ และการแพร่กระจายของเปลวไฟได้ แต่เพราะโครงสร้างที่ไม่สามารถรักษาไว้ได้นั้นทำให้เกิดการโค้งงอที่มากที่สุดในทุกกลุ่มตัวอย่าง ทำให้ตัวอย่างเกิดการแตกหัก และพังทลายลง ซึ่งจะตรงกันข้ามกับตัวอย่าง 100 $\text{TiO}_2$ -1H- $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (รูปที่ 33) เพราะตัวอย่างนี้สามารถป้องกันเผาไหม้ และการแพร่กระจายของเปลวไฟได้ตลอดการทดสอบ สามารถรักษาโครงสร้างไว้ได้ดีมาก มีการโค้งงอที่ต่ำ และยังคงความหนาหลังจากการเผาไว้ได้มาก นอกจากนี้ยังมีวัสดุสีขาวปรากฏขึ้นหลังจากการเผาอีก เพราะฉะนั้นการใส่  $\text{TiO}_2$  100% จะสามารถเสริมการกันไฟของโพนพอลิस्टรีนได้มากกว่าการใส่  $\text{ZnO}$  100% และเมื่อเทียบกับตัวอย่าง 100ATH-1H- $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  จากกลุ่มที่ 1 ที่มีการเติม  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ลงไปใน  $\text{Al}(\text{OH})_3$  100% พบว่าตัวอย่าง 100 $\text{TiO}_2$ -1H- $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  มีการโค้งงอที่ต่ำ และยังคงความหนาหลังจากการเผาไว้ได้มากกว่าอย่างเห็นได้ชัด จากเหตุผลที่กล่าวมาทำให้ตัวอย่าง 100 $\text{TiO}_2$ -1H- $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  เป็นตัวอย่างที่ผู้ทำการทดลองเลือกจากกลุ่มนี้



รูปที่ 33 พฤติกรรมการเผาไหม้ของโพนพอลิस्टรีน (100 $\text{TiO}_2$ -1H- $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) (a) ด้านข้างหลังเผา (b) ด้านหน้าก่อนเผา (c) ด้านหน้าหลังเผา (d) ด้านหลังก่อนเผา และ (e) ด้านหลังหลังเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 34 พฤติกรรมการเผาไหม้ของโพลีอิมิดีสไตรีน ( $100\text{ZnO}-1\text{H}-\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) (a) ด้านข้างหลังเผา (b) ด้านหน้าก่อนเผา (c) ด้านหน้าหลังเผา (d) ด้านหลังก่อนเผา และ (e) ด้านหลังหลังเผา

ตัวอย่างที่มีพฤติกรรมการทนไฟที่ดีที่สุดในแต่ละกลุ่มตัวอย่างจะถูกนำไปวิเคราะห์โครงสร้างด้วย SEM และทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนด้วย TGA ต่อไป

#### 4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของโพลีอิมิดีสไตรีนหลังการเผาที่อุณหภูมิสูง

การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของโพลีอิมิดีสไตรีน และดูว่ามีสารอะไรบ้างที่เหลือ หรือเกิดขึ้น (อย่างเช่นวัสดุสีขาว) หลังจากการเผาไหม้ ทำโดยการเตรียมตัวอย่างด้วยการตัดตัวอย่างให้มีขนาด  $1.5 \text{ ซม.} \times 1.5 \text{ ซม.} \times 1.5 \text{ ซม.}$  ก่อนนำไปอบที่อุณหภูมิห้องจนถึง  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และให้ค้างไว้ที่  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 10 นาที ทำการปล่อยให้เย็นตัวลงแล้ววิเคราะห์ด้วยกล้อง SEM เพื่อศึกษากลไกในการป้องกันเผาไหม้ และส่วนประกอบในโครงสร้างดังกล่าว

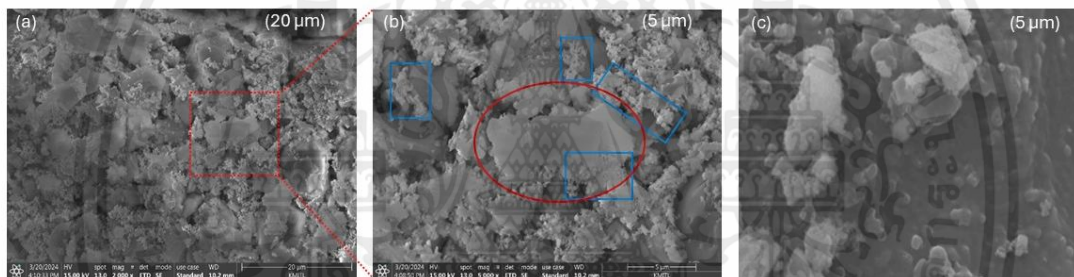
และจากรูปที่ 35 (b) และ 36 (b) จะสามารถมองเห็นอนุภาคที่มีลักษณะเป็นก้อนที่ดูแข็งกระจายตัวอยู่ตามพื้นผิวของวัสดุ ก้อนเหล่านี้คาดว่าคืออนุภาค  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (วงกลมสีแดง) [28] ที่แทรกตัวอยู่ตามพื้นผิวของวัสดุ และจะมีอนุภาค  $\text{ZnO}$  [29] ที่จะมีลักษณะเป็นเม็ดกลมๆเรียวยาวขนาดเล็กไปเกาะติดอยู่ (สีเหลี่ยมสีน้ำเงิน) ซึ่งทั้งหมดจะมีส่วนช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพในการกันไฟด้วยการทำหน้าที่คล้ายกับชั้น Char ที่ทำหน้าที่ลดการแลกเปลี่ยนความร้อนของวัสดุ ทำให้วัสดุมีการทนไฟที่ดีขึ้น

จากรูปที่ 36 (b) 37 (b) และ 39 (c) จะสามารถสังเกตเห็นโครงสร้างที่เป็นเหมือนเส้นใยต่อกัน กลายเป็นโครงขึ้นมา (ลูกศรสีแดง) โครงสร้างเหล่านี้คือโครงของโพลีอิมิดีสไตรีนที่เหลืออยู่หลังจากการเผาไหม้ [30] โดยจะเห็นได้ว่ามีปริมาณ และความหนาที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถสื่อถึงความสามารถในการทนไฟหลัง

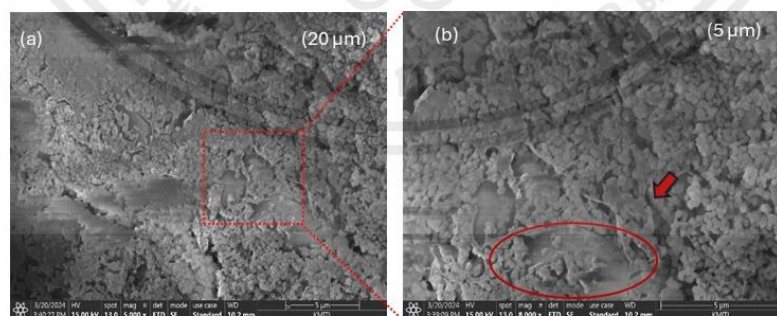
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลือบ และของสารเคลือบว่ามีประสิทธิภาพดีแค่ไหนในการป้องกันโพลีเอทิลีนจากการเผาไหม้ได้นอกจากนี้รูปทั้งสามยังปรากฏอนุภาคที่มีลักษณะเป็นก้อนกลมๆขนาดเล็ก กระจุกตัวอยู่ตามช่องคล้ายรังผึ้งหรือบนผิวของวัสดุ ซึ่งเมื่อดูจากปริมาณการเกิดของวัสดุสีขาวเทียบความหนาแน่นของอนุภาคเหล่านี้บนพื้นผิวของวัสดุแล้วนั้นพบว่ามีความโน้มไปทางทิศทางเดียวกัน คือ ยังมีวัสดุสีขาวปรากฏบนพื้นผิววัสดุหลังจากการเผาไหม้มากเท่าไรก็ยังมีหนาแน่นของอนุภาคเหล่านี้มากขึ้นเท่านั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าอนุภาคก้อนกลมๆขนาดเล็กที่กระจุกตัวอยู่ตามรู หรือบนผิวของวัสดุก็คือวัสดุสีขาวของ  $\text{TiO}_2$  [31] นั่นเอง

และสุดท้ายจากรูปที่ 38 (c) และ 39 (c) จะเห็นได้ว่าเหมือนมีชั้นสารที่มีความหนาเคลือบผิวของวัสดุไว้ โดยชั้นที่วางนี้เกิดมาจากการเติม Hardener มากกว่า 1% ลงไปในสารเคลือบทำให้สารเคลือบเกิดการแข็งตัว และจับตัวกันเป็นแผ่นที่มีความหนาเคลือบผิวของวัสดุไว้ แผ่นนี้มีสรรพคุณในการลดควันเนื่องจากช่วยลดทั้งขนาด และปริมาณของรูพรุนลง [27,32] ทำให้มีปริมาณควันที่ต่ำลง

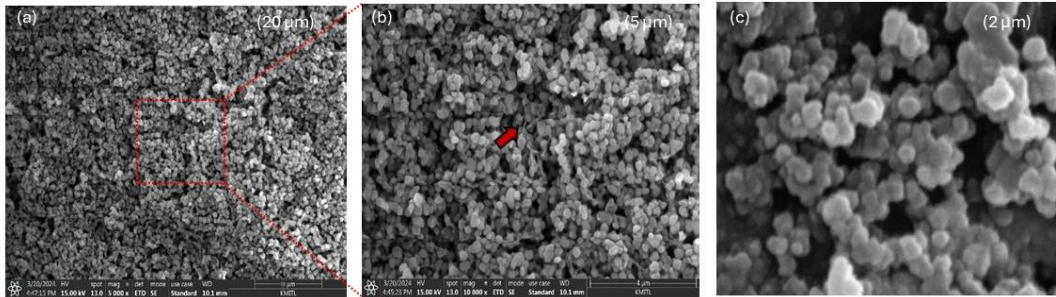


รูปที่ 35 รูปภาพ SEM ของ (a-b)  $10\text{ZnO}-1\text{H}-\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ที่กำลังขยาย 2000x และ 5000x ตามลำดับ และ (c) อนุภาค  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  หลังจากการเผาที่  $600^\circ\text{C}$  อ้างอิงจาก [28]

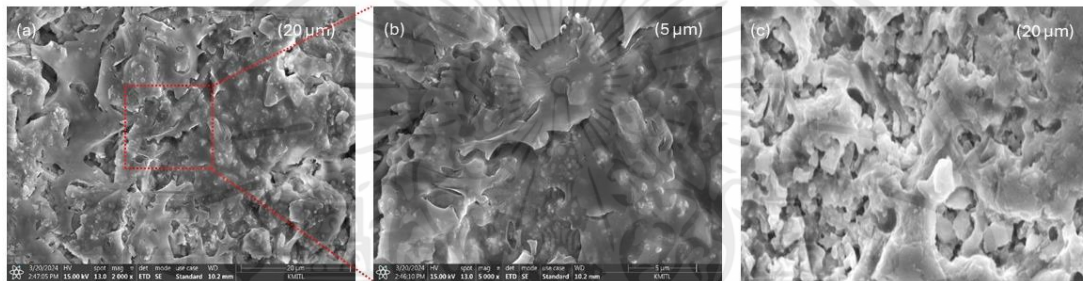


รูปที่ 36 รูปภาพ SEM ของ (a-b)  $15\text{TiO}_2-1\text{H}-\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ที่กำลังขยาย 5000x และ 8000x ตามลำดับ

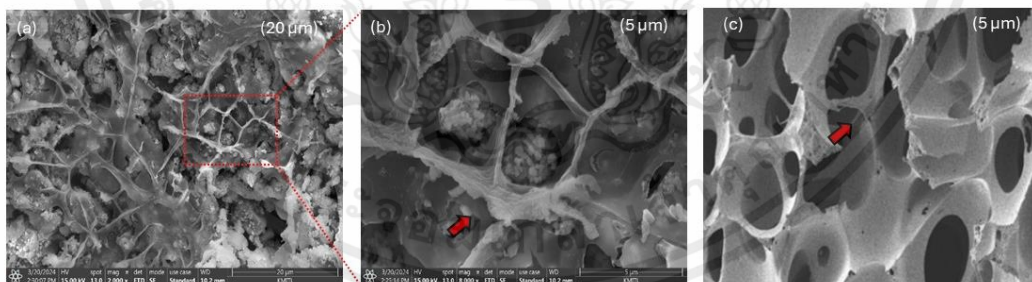
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 37 รูปภาพ SEM ของ (a-b)  $100\text{TiO}_2\text{-1H-Na}_2\text{SiO}_3$  ที่กำลังขยาย 5000x และ 10,000x ตามลำดับ และ (c)  $\text{TiO}_2$  หลังจากการเผาที่อุณหภูมิ  $400^\circ\text{C}$  อ้างอิงจาก [31]



รูปที่ 38 รูปภาพ SEM ของ (a-b)  $100\text{ATH-10H-SiO}_2$  ที่กำลังขยาย 2000x และ 5,000x ตามลำดับ และ (c) Hardener อ้างอิงจาก [32]



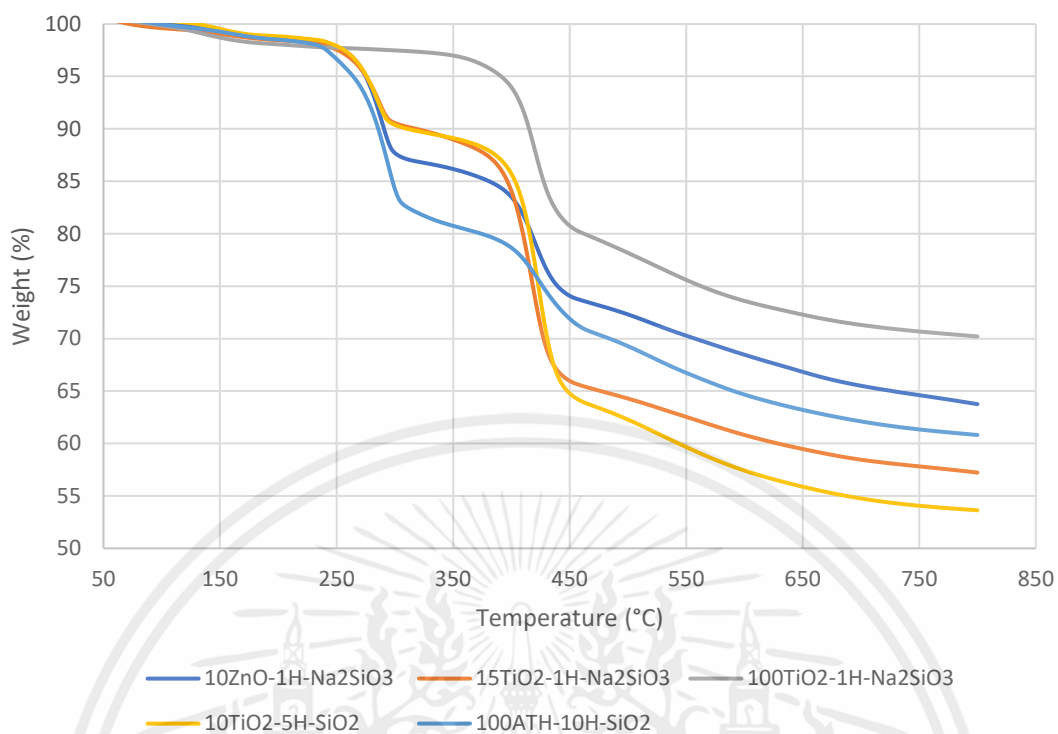
รูปที่ 39 รูปภาพ SEM ของ (a-b)  $10\text{TiO}_2\text{-5H-SiO}_2$  (20 μm) กำลังขยาย 2000x และ 8,000x ตามลำดับ และ (c) Phenolic resin หลังจากการเผาที่อุณหภูมิ  $450^\circ\text{C}$  อ้างอิงจาก [33]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วย Thermogravimetric analysis (TGA)

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วย TGA ทำโดยการเตรียมตัวอย่างด้วยการตัดตัวอย่างให้มีขนาด 1.5 ซม. × 1.5 ซม. × 1.5 ซม. ก่อนจะนำไปแช่ไว้ในอะซิโตนเพื่อสกัดโพลีเมอร์ออกให้เหลือแต่สารเคลือบ จากนั้นเอาไปอบที่อุณหภูมิ 45 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อระเหยอะซิโตน และนำไปบดให้เป็นผงละเอียด แล้วจึงจะสามารถนำไปวิเคราะห์ด้วย TGA ในบรรยากาศของไนโตรเจนต่อไป โดยจะสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

จากรูปที่ 40 ตัวอย่างทุกตัว ยกเว้นตัว 100TiO<sub>2</sub>-1H-Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> เกิดการสลายตัวครั้งแรกในช่วงอุณหภูมิ 250 ถึง 300 °C ซึ่งน่าจะมาจากโพลีโพลิสไตรีนที่ยังสกัดไม่หมด ทำให้ยังตกค้างอยู่ในสารเคลือบ ประกอบกับในช่วงอุณหภูมิเดียวกันได้เกิดปฏิกิริยาการคายน้ำเนื่องจากการสลายตัวของ Al(OH)<sub>3</sub> โดยปฏิกิริยานี้จะมีส่วนช่วยในการเจือจางของก๊าซไอน้ำในอากาศ และการลดอุณหภูมิบริเวณเปลวไฟ [12] แต่ 100TiO<sub>2</sub>-1H-Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> เป็นตัวอย่างเดียวที่ไม่มีการสลายตัวเหมือนกับตัวอย่างอื่นในช่วงแรก ซึ่งน่าจะเกิดจากการที่ตัวอย่าง 100TiO<sub>2</sub>-1H-Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> สามารถสกัดโพลีโพลิสไตรีนได้จนหมด และไม่มีส่วนผสมของ Al(OH)<sub>3</sub> จึงไม่เกิดปฏิกิริยาการคายน้ำขึ้นในช่วงแรก ตัวอย่าง 100TiO<sub>2</sub>-1H-Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> จึงสามารถรักษาร้อยละน้ำหนักเอาไว้ได้จนถึงการสลายตัวครั้งที่สองที่จะเกิดในช่วงอุณหภูมิ 350 ถึง 450 °C เพราะ Phenolic resin [17] ได้เกิดการย่อยสลายในช่วงอุณหภูมินี้ ทำให้ทุกตัวอย่างได้รับผลกระทบหมด นอกจากนี้ในช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 450 °C ยังได้เกิดการสลายตัวของ TiO<sub>2</sub> ทำให้ตัวอย่างที่มีสาร TiO<sub>2</sub> ผสมอยู่ได้รับผลกระทบมากกว่าตัวอย่างอื่น ดังจะเห็นได้จากลักษณะกราฟของรูปที่ 40 เหมือนกับงานวิจัยของ Hongfei Li และคณะที่ TiO<sub>2</sub> เกิดการสลายที่อุณหภูมิมากกว่า 420 °C และเกิดเป็นชั้น Char ที่มีส่วนประกอบของ TiO<sub>2</sub> ขึ้นมา [18] ซึ่งวัสดุสีขาวนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวลดการนำความร้อน ทำให้สามารถป้องกันการแพร่กระจายของไฟ และลดการถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวได้อย่างมีประสิทธิภาพ สิ่งนี้ชี้ให้เห็นว่าสาร TiO<sub>2</sub> สามารถสร้างวัสดุสีขาวที่ทำหน้าที่เป็นชั้นกันที่มีประสิทธิภาพในการลดความร้อนในระหว่างขั้นตอนการเผาไหม้ได้ ทำให้ระยะเวลาการทนไฟของตัวอย่างเพิ่มขึ้น และสุดท้ายในช่วงอุณหภูมิ 500 ถึง 800 °C เกิดการสลายตัวครั้งที่สาม ซึ่งน่าจะเกิดมาจาก SiO<sub>2</sub> และ Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> เกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิที่สูงที่สุด ก่อนที่ร้อยละน้ำหนักคงเหลือของตัวอย่างทุกตัวจะคงที่จนถึงจุดสิ้นสุดของการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิ 800 °C



รูปที่ 40 กราฟ TGA ของสารเคลือบกันไฟที่ผ่านการสกัดโพลีเมอไรนออก ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

ตารางที่ 4 %Weight ที่หายไปในแต่ละช่วงอุณหภูมิ

| รหัสตัวอย่าง<br>(Sample codes)                           | ช่วงอุณหภูมิ<br>250 ถึง 300 °C | ช่วงอุณหภูมิ<br>350 ถึง 450 °C | ช่วงอุณหภูมิ<br>450 ถึง 800 °C | %Weight<br>คงเหลือสุทธิ |
|--|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| 100ATH-10H-SiO <sub>2</sub>                              | 17.3852                        | 10.7778                        | 9.0503                         | 61.3524                 |
| 10TiO <sub>2</sub> -5H-SiO <sub>2</sub>                  | 9.4875                         | 26.0805                        | 9.2344                         | 54.0642                 |
| 15TiO <sub>2</sub> -1H-Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>  | 8.3062                         | 25.1190                        | 7.1190                         | 57.8317                 |
| 10ZnO -1H-Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>               | 12.1628                        | 13.3597                        | 8.5372                         | 64.6410                 |
| 100TiO <sub>2</sub> -1H-Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> | 1.9428                         | 18.0345                        | 9.3422                         | 70.6805                 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การวิเคราะห์กลไกการกันไฟของโพลีเอสเตอร์อินทรีย์หลังการเคลือบ

กลุ่มที่ 1 ตัวอย่าง 100ATH-10H-SiO<sub>2</sub> เกิดปฏิกิริยาการคายน้ำที่อุณหภูมิ 250 ถึง 300 °C จากการมีอยู่ของ Al(OH)<sub>3</sub> ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ทำให้เกิดการกระจายความร้อนได้มากในระหว่างการปะทะเปลวไฟโดยตรง ส่งผลต่อการลดลงของอุณหภูมิบนพื้นผิวของตัวอย่าง นอกจากนี้ไอน้ำที่เกิดขึ้นในระหว่างปฏิกิริยาคายน้ำสามารถเจือจางก๊าซที่ติดไฟได้ ทำให้ช่วงของการเติบโตของการเผาไหม้ ส่งผลทำให้การแพร่กระจายของไฟลดลง ปริมาณ Hardener ที่มีอยู่มากทำให้สารเคลือบแข็งตัว และจับตัวกันเป็นแผ่นที่มีความหนาเคลือบผิวของวัสดุไว้ ที่สรรพคุณในการลดควันเนื่องจากช่วยลดทั้งขนาด และปริมาณของรูพรุนลง ทำให้มีปริมาณควันที่ต่ำกว่าสารเคลือบอื่นๆ [27] ซิลิกามีส่วนช่วยในการก่อตัวเป็นชั้นซิลิกาที่ป้องกันผิวโพลี โดยชั้นซิลิกานี้สามารถลดการแลกเปลี่ยนความร้อน และก๊าซที่ติดไฟได้ ทำให้ปกป้องโพลีจากความร้อน และออกซิเจนที่เป็นปัจจัยของการเกิดไฟ ในส่วนของโครงสร้างของโพลีเอสเตอร์อินทรีย์หลังจากการเผาไหม้นั้นมี Al(OH)<sub>3</sub> และ SiO<sub>2</sub> ช่วยในการคงโครงสร้างของตัวอย่าง แต่ไม่ได้ดีเท่ากับตัวอย่างที่มี TiO<sub>2</sub> ผสมอยู่ จึงยังมีโค้งงออยู่บ้างเล็กน้อย และมีความหนาที่น้อยกว่าตัวอย่างอื่น และสุดท้าย Phenolic resin เมื่อถูกเผาไหม้จะทิ้งคาร์บอนไว้จำนวนมาก คาร์บอนเหล่านี้จะคุณสมบัติทนความร้อนสูง และจะทำการสร้างชั้นป้องกันบนผิววัสดุเพื่อชะลอการลามไฟได้ นอกจากนี้ Phenolic resin ยังมีส่วนช่วยทำให้ Al(OH)<sub>3</sub> ยึดติดกับโพลีเอสเตอร์อินทรีย์ได้ดียิ่งขึ้น ผ่านการทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ของ Al(OH)<sub>3</sub>

กลุ่มที่ 2 ตัวอย่าง 10TiO<sub>2</sub>-5H-SiO<sub>2</sub> เกิดปฏิกิริยาการคายน้ำที่อุณหภูมิ 250 ถึง 300 °C ส่งผลต่อการลดลงของอุณหภูมิบนพื้นผิวของตัวอย่าง และช่วยเจือจางก๊าซที่ติดไฟได้ ทำให้การแพร่กระจายของไฟลดลง ปริมาณ Hardener ที่มีอยู่มากทำให้สารเคลือบแข็งตัว และจับตัวกันเป็นแผ่นที่มีความหนาเคลือบผิวของวัสดุไว้ ทำให้มีปริมาณควันที่ต่ำ แต่ไม่ต่ำเท่ากับตัวอย่าง 100ATH-10H-SiO<sub>2</sub> เพราะยังคงมีขนาด และจำนวนรูพรุนที่มากกว่า การมีอยู่ของชั้นซิลิกาจะลดการแลกเปลี่ยนความร้อน และก๊าซที่ติดไฟได้ ทำให้ความร้อน และออกซิเจนลดลง ที่ช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 450 °C ได้เกิดการสลายตัวของ TiO<sub>2</sub> [34] ทำให้เกิดวัสดุสีขาว (เป็นชั้น Char ที่มีส่วนประกอบของ TiO<sub>2</sub>) ซึ่งจะมาทำหน้าที่เป็นตัวช่วยในการป้องกันตัวอย่างจากความร้อนอีกชั้นหนึ่ง ทำให้ระยะเวลาการทนไฟของตัวอย่างเพิ่มขึ้น ในส่วนของโครงสร้างนั้นแม้ว่าจะมีวัสดุสีขาวมาช่วยในการรักษาโครงสร้างไว้แล้ว โครงสร้างของตัวอย่างก็ยังคงโค้งงออยู่บ้างเล็กน้อย และมีความหนาที่น้อยกว่าตัวอย่างอื่นๆ ที่ใช้สารเดียวกันอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งให้เห็นว่าปริมาณ TiO<sub>2</sub> มีน้อยเกินกว่าที่จะมีนัยสำคัญต่อการรักษาโครงสร้าง และสุดท้าย Phenolic resin ก็จะมีกลไกการกันความร้อนเหมือนกับกลุ่มที่ 1 และทำให้อุณหภูมิ TiO<sub>2</sub> มีการกระจายตัวที่ความสม่ำเสมอมากขึ้นในสารเคลือบ

กลุ่มที่ 3 ตัวอย่าง 15TiO<sub>2</sub>-1H-Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> เกิดปฏิกิริยาการคายน้ำเช่นเดียวกับตัวอย่างก่อนหน้า ทำให้การแพร่กระจายของไฟลดลง ปริมาณ Hardener ที่มีอยู่น้อยลงทำให้สารเคลือบที่จับตัวกันเป็นแผ่นมีความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนาน้อยลง ทำให้มีปริมาณควันที่มากกว่าตัวอย่างก่อนหน้าทั้งสอง  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  เมื่อถูกเผาจะแปรเปลี่ยนเป็นชั้นผิวที่มีสรรพคุณในการลดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ [13] และนอกจากนี้  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  จะมีส่วนช่วย  $\text{TiO}_2$  ในการทำให้วัสดุสีขาวบนพื้นผิวของตัวอย่างมีความแข็งแรงยิ่งขึ้น ทนความร้อนได้มากขึ้น ทำให้ตัวอย่างยังคงรักษาโครงสร้างเอาไว้ได้อย่างดีเยี่ยม และยังคงความหนาไว้ได้อีกด้วย ซึ่งจะช่วยให้สามารถป้องกันตัวอย่างจากความร้อนได้ดียิ่งขึ้น ระยะเวลาการทนไฟของตัวอย่างก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย [35] และสุดท้าย Phenolic resin ก็จะมีกลไกการกันความร้อน และความสามารถในการทำให้อนุภาค  $\text{TiO}_2$  มีการกระจายตัวที่ความสม่ำเสมอมากขึ้นในสารเคลือบเหมือนกับตัวอย่าง  $10\text{TiO}_2\text{-5H-SiO}_2$  ที่ผ่านมา

กลุ่มที่ 4 ตัวอย่าง  $10\text{ZnO-1H-Na}_2\text{SiO}_3$  การแพร่กระจายของไฟลดลงจากการเกิดปฏิกิริยาการคายน้ำ ปริมาณ Hardener ที่มีอยู่น้อยลงทำให้สารเคลือบที่จับตัวกันเป็นแผ่นมีความหนาน้อยลง ทำให้มีปริมาณควันที่มากเหมือนกับตัวอย่าง  $15\text{TiO}_2\text{-1H-Na}_2\text{SiO}_3$  โดย  $\text{ZnO}$  สามารถทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกันเปลวไฟและตัวดูดซับรังสีความร้อนได้ และเมื่อทำงานร่วมกับ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  สารทั้งสองจะกลายเป็นชั้นกันความร้อนที่สรรพคุณในการดูดซับรังสีความร้อนที่ปล่อยออกมาจากเปลวไฟป้องกันความร้อนไม่ให้เข้าถึงวัสดุที่อยู่ด้านล่าง และทำให้กระบวนการทำความร้อนช้าลง ส่งผลทำให้การแพร่กระจายของไฟลดลง [36] แต่เนื่องจากหลังการเผาไหม้  $\text{ZnO}$  ไม่ได้มีการสร้างวัสดุสีขาวบนพื้นผิวของตัวอย่างเหมือนกับ  $\text{TiO}_2$  ทำให้มีชั้นป้องกันตัวอย่างจากความร้อนน้อยกว่า จึงรักษาโครงสร้างไว้ได้ไม่ดีเท่า  $\text{TiO}_2$  และสุดท้าย Phenolic resin ก็จะมีกลไกการกันความร้อน และความสามารถในการทำให้อนุภาค  $\text{ZnO}$  มีการกระจายตัวที่ความสม่ำเสมอมากขึ้นในสารเคลือบ

กลุ่มที่ 5 ตัวอย่าง  $100\text{TiO}_2\text{-1H-Na}_2\text{SiO}_3$  ปริมาณ Hardener ที่มีอยู่น้อยลงทำให้สารเคลือบที่จับตัวกันเป็นแผ่นมีความหนาน้อยลง ทำให้มีปริมาณควันที่มากเหมือนกันกับหลายๆตัวอย่างที่ผ่านมา  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  และ  $\text{TiO}_2$  จะทำงานร่วมกันในการทำให้วัสดุสีขาวบนพื้นผิวของตัวอย่างมีความแข็งแรงยิ่งขึ้น ทนความร้อนได้มากยิ่งขึ้น [35] ทำให้ตัวอย่างรักษาโครงสร้างไว้ได้อย่างดีเยี่ยม มีการยุบตัวที่ต่ำ จึงยังคงความหนาไว้ได้มาก ซึ่งจะทำให้สามารถป้องกันตัวอย่างจากความร้อนได้ดี และระยะเวลาการทนไฟของตัวอย่างได้ และสุดท้าย Phenolic resin ก็จะมีส่วนช่วยทำให้สารเคลือบสามารถยึดติดกับโพลีเอทิลีนไดร์ได้เหมือนกับตัวอย่าง  $10\text{TiO}_2\text{-5H-SiO}_2$  และตัวอย่าง  $15\text{TiO}_2\text{-1H-Na}_2\text{SiO}_3$  ที่ผ่านมา

โดยหลังจากการวิเคราะห์กลไกการกันไฟของตัวอย่างโพลีเอทิลีนไดร์ที่ผ่านการเคลือบทั้ง 5 ตัวอย่างแล้วนั้น ทางผู้ทดลองคิดว่าตัวอย่างที่มีกลไกการกันไฟที่ดีที่สุดจากทั้ง 5 ตัวเลยก็คือตัวอย่าง  $15\text{TiO}_2\text{-1H-Na}_2\text{SiO}_3$  เพราะตัวแบบนี้มีกลไกการกันไฟที่หลากหลายมากกว่าตัวอย่างอื่นๆ ไม่ว่าจะเป็นการเกิดปฏิกิริยาการคายน้ำในช่วงอุณหภูมิ 250 ถึง 300 °C ซึ่งช่วยให้ทำให้อุณหภูมิบนพื้นผิวของตัวอย่างลดลง และช่วยให้การแพร่กระจายของไฟช้าลงได้ หรือการมีสารอย่าง  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ที่เมื่อถูกเผาจะแปรเปลี่ยนเป็นชั้นผิวที่มีสรรพคุณในการลดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ทำให้อุณหภูมิทำให้อุณหภูมิลดลงไปได้อีก และสารหลักอย่าง  $\text{TiO}_2$  เองก็

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 450 °C ทำให้เกิดวัสดุสีขาวขึ้น ซึ่งจะมาทำหน้าที่เป็นตัวช่วยในการป้องกันตัวอย่างจากความร้อนอีกชั้นหนึ่ง ทำให้ระยะเวลาการทนไฟของตัวอย่างเพิ่มขึ้น และสุดท้าย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ยังมีส่วนช่วยทำให้  $\text{TiO}_2$  สร้างวัสดุสีขาวที่มีความแข็งแรงยิ่งขึ้น ทนความร้อนได้มากขึ้น ทำให้ตัวอย่างยังคงรักษาโครงสร้างเอาไว้ได้อย่างดีเยี่ยม และยังคงความหนาไว้ได้อีกด้วย ซึ่งจะช่วยให้สามารถป้องกันตัวอย่างจากความร้อนมากยิ่งขึ้น ระยะเวลาการทนไฟของตัวอย่างก็จะมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจากเหตุผลที่กล่าวมานั้นทำให้ทางผู้ทดลองคิดว่าตัวอย่าง  $15\text{TiO}_2\text{-1H-Na}_2\text{SiO}_3$  คือตัวอย่างที่ดีที่สุดจากที่ได้ทำการทดลองมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษา และพัฒนาสารกักไฟสำหรับโพลีฟอสฟอไรต์ จากสารเคลือบผสมที่ประกอบด้วย อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ โซเดียม ซิลิเกต ไทเทเนียมไดออกไซด์ หรือซิงค์ออกไซด์ โดยใช้ Phenolic resin เป็นตัวช่วยในการยึดเกาะ ก่อนนำสารผสมที่ได้ไปรวมเข้ากับเม็ดโพลีฟอสฟอไรต์ และไปขึ้นรูปกลายเป็นโพลีฟอสฟอไรต์ แล้วนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปทดสอบประสิทธิภาพการกักไฟด้วยวิธีการเผาเพื่อดูพฤติกรรมการณ์ไฟ วิธีการวิเคราะห์โครงสร้างชั้น Char และโครงสร้างทางจุลภาคด้วยการส่องกล้อง SEM และวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์ TGA ซึ่งสามารถสรุปตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยดังนี้

1. การเพิ่มประสิทธิภาพสารเคลือบกักไฟสำหรับโพลีฟอสฟอไรต์ ด้วยการใส่สารเคลือบผสมที่ประกอบด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ โซเดียม ซิลิเกต ไทเทเนียมไดออกไซด์ หรือซิงค์ออกไซด์เป็นส่วนประกอบ โดยทางผู้ทดลองสามารถสร้างโพลีฟอสฟอไรต์ที่มีประสิทธิภาพในการกักไฟผ่านการเคลือบด้วยสารเคลือบผสมที่ประกอบด้วยสารที่กล่าวต้นได้สำเร็จ ทำให้สามารถป้องกันโพลีฟอสฟอไรต์จากความร้อนและเพิ่มระยะเวลาการทนไฟโพลีฟอสฟอไรต์ได้ อีกทั้งยังสามารถรักษาโครงสร้างของโพลีฟอสฟอไรต์ และยังคงความหนาไว้ได้อีกด้วย

2. ศึกษากลไกหรือผลของการใช้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่ผสมด้วยโซเดียม ซิลิเกต ไทเทเนียมไดออกไซด์ หรือซิงค์ออกไซด์ในสารเคลือบกักไฟ โดยทางผู้ทดลองพบว่าโพลีฟอสฟอไรต์ที่ผ่านการเคลือบมีกลไกการกักไฟที่หลากหลาย โดยตัวอย่างที่ดีที่สุดอย่างตัวอย่าง  $15\text{TiO}_2\text{-1H-Na}_2\text{SiO}_3$  จะมีกลไกการกักไฟดังนี้ ช่วงอุณหภูมิ 250 ถึง 300 °C เกิดปฏิกิริยาการคายน้ำจากการมีอยู่ของ  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ส่งผลต่อการลดลงของอุณหภูมิบนพื้นผิวของตัวอย่าง ไอน้ำที่เกิดขึ้นในระหว่างปฏิกิริยาก็สามารถเจือจางก๊าซที่ติดไฟได้ ทำให้ขัดขวางการเติบโตของการเผาไหม้ ส่งผลทำให้การแพร่กระจายของไฟลดลง ที่ช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 450 °C ได้เกิดการสลายตัวของ  $\text{TiO}_2$  ทำให้เกิดวัสดุสีขาว ซึ่งจะมาทำหน้าที่ป้องกันตัวอย่างจากความร้อน ทำให้ระยะเวลาการทนไฟของตัวอย่างเพิ่มขึ้น  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  เองเมื่อถูกเผาก็จะแปรเปลี่ยนเป็นชั้นผิวที่มีสรรพคุณในการลดการแลกเปลี่ยนความร้อนกลายเป็นชั้นกันความร้อนอีกชั้นหนึ่ง และเมื่อทั้ง  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  และ  $\text{TiO}_2$  ทำงานรวมกันจะทำให้วัสดุสีขาวมีความแข็งแรงยิ่งขึ้น ทำให้ตัวอย่างยังคงรักษาโครงสร้าง และคงความหนาไว้ได้ ซึ่งจะทำให้สามารถป้องกันตัวอย่างจากความร้อนได้ดียิ่งขึ้น ระยะเวลาการทนไฟของตัวอย่างก็จะเพิ่มขึ้น ทางด้านของ Phenolic resin ก็จะมีส่วนช่วยทำให้สารเคลือบสามารถยึดติดกับโพลีฟอสฟอไรต์ได้ ผ่านการทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ของ  $\text{Al}(\text{OH})_3$  รวมถึงการทำให้อนุภาค  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{ZnO}$  มีการกระจายตัวที่ความสม่ำเสมอมากขึ้นในสารเคลือบ ส่วนสารอย่าง  $\text{ZnO}$  นั้นจะมีกลไกการกักไฟดังตัวอย่าง  $10\text{ZnO-1H-Na}_2\text{SiO}_3$  ที่จะทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าที่เป็นเกราะป้องกันเปลวไฟ และเป็นตัวดูดซับรังสีความร้อนได้ และเมื่อทำงานร่วมกับ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  สารทั้งสองจะกลายเป็นชั้นกันความร้อนที่สรรพคุณในการดูดซับรังสีความร้อนที่ปล่อยออกมาจากเปลวไฟป้องกันความร้อนไม่ให้เข้าถึงวัสดุที่อยู่ด้านล่างส่งผลทำให้การแพร่กระจายของไฟลดลง และสุดท้าย Hardener ในปริมาณที่มากพอ (5 ถึง 10%) จะช่วยลดทั้งขนาด และปริมาณของรูพรุนลง ทำให้มีปริมาณควันที่ต่ำลง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในส่วนของการเตรียมสารเคลือบในขั้นตอนการเติมสาร Hardener ถ้าเติม 10% สารจะมีแข็งตัวมากจนเกินไปจนสารมีความหนืดที่สูงทำให้การผสมมีความลำบาก และนานมากขึ้น จึงควรหาวิธีที่จะมาช่วยในจุดนี้
2. ในการเตรียมตัวเพื่อนำไปทำการส่อง SEM นั้นเมื่อนำออกมาจากเตาเผาแล้วควรเอาตัวไปใส่ในหม้อดูดความชื้น เพื่อให้การส่องทำได้ง่าย และราบรื่นมากขึ้น
3. ในการเตรียมตัวเพื่อนำไปทำการวิเคราะห์ TGA ควรแช่ตัวอย่างในอะซิโตนให้นาน และหลายรอบกว่านี้ เพื่อให้แน่ใจว่าจะไม่มีโพลีเมอร์หลงเหลืออยู่

## เอกสารอ้างอิง

- [1] N.H. Ramli Sulong, S.A.S. Mustapa, M.K. Abdul Rashid, Application of expanded polystyrene (EPS) in buildings and constructions: A review, *J Appl Polym Sci* 136 (2019). <https://doi.org/10.1002/app.47529>.
- [2] J. Shen, J. Liang, X. Lin, H. Lin, J. Yu, S. Wang, The flame-retardant mechanisms and preparation of polymer composites and their potential application in construction engineering, *Polymers (Basel)* 14 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14010082>.
- [3] R. Zhou, X. Sun, J. Xie, G. Ma, W.J. Li, J.C. Jiang, C.M. Shu, A Series of Novel Flame Retardants Produced with Nanosilica, Melamine, and Aluminum Diethylphosphinate to Improve the Flame Retardancy of Phenolic Resin, *ACS Omega* (2021). <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c07246>.
- [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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.023>.
- [5] G. Scionti, E. Piperopoulos, M. Atria, L. Calabrese, E. Proverbio, Effect of Magnesium Hydroxide and Aluminum Hydroxide as Thermal Barriers on the Flame retardant Behavior of Acrylic-Based Coating, *Coatings* 13 (2023) 1517. <https://doi.org/10.3390/coatings13091517>.
- [6] Z. peng CHENG, Y. YANG, F. sheng LI, Z. hua PAN, Synthesis and characterization of aluminum particles coated with uniform silica shell, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 18 (2008) 378–382. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(08\)60066-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(08)60066-7).
- [7] P.T.T. Trang, L.H. Giang, N.B. Manh, T.D. Cong, N.T. Tung, V.T. Anh, High Flame Retardant Performance of SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> Sol Coated on Polyester/Cotton Fabrics, *VNU Journal of Science: Natural Sciences and Technology* 37 (2021). <https://doi.org/10.25073/2588-1140/vnunst.5167>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [8] S. Saleemi, T. Naveed, T. Riaz, H. Memon, J.A. Awan, M.I. Siyal, F. Xu, J. Bae, Surface functionalization of cotton and pc fabrics using SiO<sub>2</sub> and ZnO nanoparticles for durable flame retardant properties, *Coatings* 10 (2020). <https://doi.org/10.3390/coatings10020124>.
- [9] A.M. Gonzalez-Aguilar, V.P. Cabrera-Madera, J.R. Vera-Rozo, J.M. Riesco-Ávila, Effects of Heating Rate and Temperature on the Thermal Pyrolysis of Expanded Polystyrene Post-Industrial Waste, *Polymers (Basel)* 14 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14224957>.
- [10] S. Doroudiani, H. Omidian, Environmental, health and safety concerns of decorative mouldings made of expanded polystyrene in buildings, *Build Environ* 45 (2010) 647–654. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2009.08.004>.
- [11] Edward M. Petrie, Selecting Flame Retardants for Adhesives and Sealants, (n.d.). <https://adhesives.specialchem.com/selection-guide/flame-retardant-for-adhesives-and-sealants> (accessed November 7, 2023).
- [12] F. Lou, K. Wu, Q. Wang, Z. Qian, S. Li, W. Guo, Improved flame-retardant and ceramifiable properties of EVA composites by combination of ammonium polyphosphate and aluminum hydroxide, *Polymers (Basel)* 11 (2019). <https://doi.org/10.3390/polym11010125>.
- [13] P. Kiliaris, C.D. Papaspyrides, Polymer/layered silicate (clay) nanocomposites: An overview of flame retardancy, *Progress in Polymer Science (Oxford)* 35 (2010) 902–958. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2010.03.001>.
- [14] M.T. Rodríguez, H. Pfeiffer, Sodium metasilicate (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>): A thermo-kinetic analysis of its CO<sub>2</sub> chemical sorption, *Thermochimica Acta* 473 (2008) 92–95. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2008.04.022>.
- [15] F.C. Sun, J.H. Fu, Y.X. Peng, X.M. Jiao, H. Liu, F.P. Du, Y.F. Zhang, Dual-functional intumescent fire-retardant/self-healing water-based plywood coatings, *Prog Org Coat* 154 (2021) 106187. <https://doi.org/10.1016/J.PORGCOAT.2021.106187>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] B.K. Kandola, L. Krishnan, J.R. Ebdon, Blends of unsaturated polyester and phenolic resins for application as fire-resistant matrices in fibre-reinforced composites: Effects of added flame retardants, *Polym Degrad Stab* 106 (2014) 129–137. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMDEGRADSTAB.2013.12.021>.
- [17] S.M. Manocha, K. Patel, L.M. Manocha, G.G. Singh, Development of carbon foam from phenolic resin via template route Satish Manocha, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences* 17 (2010). <https://www.researchgate.net/publication/267611040>.
- [18] 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. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2014.08.003>.
- [19] O. Öhrn, K. Sykam, S. Gawusu, R.A. Mensah, M. Försth, V. Shanmugam, N.B. Karthik Babu, G. Sas, L. Jiang, Q. Xu, Á. Restás, O. Das, Surface coated ZnO powder as flame retardant for wood: A short communication, *Science of the Total Environment* 897 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165290>.
- [20] T.W. Quadri, L.O. Olasunkanmi, O.E. Fayemi, M.M. Solomon, E.E. Ebenso, Zinc Oxide Nanocomposites of Selected Polymers: Synthesis, Characterization, and Corrosion Inhibition Studies on Mild Steel in HCl Solution, *ACS Omega* 2 (2017) 8421–8437. <https://doi.org/10.1021/acsomega.7b01385>.
- [21] I.A. Ahmed, H.S. Hussein, A.H. Ragab, N.S. Al-Radadi, Synthesis and characterization of silica-coated oxyhydroxide aluminum/doped polymer nanocomposites: A comparative study and its application as a sorbent, *Molecules* 25 (2020). <https://doi.org/10.3390/molecules25071520>.
- [22] H. Wang, S.L. Huang, Y.J. Zuo, T. Zhou, L.R. Zhang, Corrosion resistance of lamellar aluminium pigments coated by SiO<sub>2</sub> by sol-gel method, *Corros Sci* 53 (2011) 161–167. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.09.012>.
- [23] H. Fan, J. Zhao, J. Zhang, H. Li, S. Zhang, J. Sun, F. Xin, F. Liu, Z. Qin, W. Tang, TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>/kaolinite hybrid filler to improve the flame retardancy, smoke suppression

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- and anti-aging characteristics of epoxy resin, *Mater Chem Phys* 277 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.125576>
- [24] B. Nozari, M. Montazer, M. Mahmoudi Rad, Stable ZnO/SiO<sub>2</sub> nano coating on polyester for anti-bacterial, self-cleaning and flame retardant applications, *Mater Chem Phys* 267 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124674>.
- [25] M.K. Singh, A. Singh, Scanning electron microscope, *Characterization of Polymers and Fibres* (2022) 387–419. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823986-5.00008-7>.
- [26] S. Ebnesajjad, *Surface and Material Characterization Techniques, Surface Treatment of Materials for Adhesion Bonding* (2006) 43–75. <https://doi.org/10.1016/B978-081551523-4.50006-7>.
- [27] P. Boruszewski, P. Borysiuk, A. Jankowska, J. Pazik, Low-Density Particleboards Modified with Expanded and Unexpanded Fillers—Characteristics and Properties, *Materials* 15 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15134430>.
- [28] Supiyani, H. Agusnar, P. Sugita, I. Nainggolan, Preparation sodium silicate from rice husk to synthesize silica nanoparticles by sol-gel method for adsorption water in analysis of methamphetamine, *South African Journal of Chemical Engineering* 40 (2022) 80–86. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.02.001>.
- [29] N. Jayaprakash, R. Suresh, S. Rajalakshmi, S. Raja, E. Sundaravadivel, M. Gayathri, M. Sridharan, One-step synthesis, characterisation, photocatalytic and bio-medical applications of ZnO nanoplates, *Materials Technology* 35 (2020) 112–124. <https://doi.org/10.1080/10667857.2019.1659533>.
- [30] N. Zhang, Z. Li, Y. Xiao, Z. Pan, P. Jia, G. Feng, C. Bao, Y. Zhou, L. Hua, Lignin-based phenolic resin modified with whisker silicon and its application, *Journal of Bioresources and Bioproducts* 5 (2020) 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2020.03.008>.
- [31] M.M. Kamrannejad, A. Hasanzadeh, N. Nosoudi, L. Mai, A.A. Babaluo, Photocatalytic degradation of polypropylene/TiO<sub>2</sub> nano-composites, *Materials Research* 17 (2014) 1039–1046. <https://doi.org/10.1590/1516-1439.267214>.

- [32] S. Khan Durrani, J.I. Akhter, S.K. Durrani, M.A. Hussain, S.Z. Hussain, J. Akhtar, A. Saeed, N. Hussain, N. Ahmed, Fabrication of magnesium aluminum silicate glass ceramics by sintering route, *MATERIALS SCIENCE-POLAND* 28 (2010) 459-466. <https://www.researchgate.net/publication/230686957>.
- [33] Q. Xu, R. Gong, M.Y. Cui, C. Liu, R.H. Li, Preparation of high-strength microporous phenolic open-cell foams with physical foaming method, *High Perform Polym* 27 (2015) 852–867. <https://doi.org/10.1177/0954008314564197>.
- [34] Y. Mizuno, F.K. King, Y. Yamauchi, T. Homma, A. Tanaka, Y. Takakuwa, T. Momose, Temperature dependence of oxide decomposition on titanium surfaces in ultrahigh vacuum, *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* 20 (2002) 1716–1721. <https://doi.org/10.1116/1.1500746>.
- [35] E. Garskaite, O. Karlsson, Z. Stankeviciute, A. Kareiva, D. Jones, D. Sandberg, Surface hardness and flammability of  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  and nano- $\text{TiO}_2$  reinforced wood composites, *RSC Adv* 9 (2019) 27973–27986. <https://doi.org/10.1039/c9ra05200c>.
- [36] Q.F. Sun, Y. Lu, Y.Z. Xia, D.J. Yang, J. Li, Y.X. Liu, Flame retardancy of wood treated by  $\text{TiO}_2/\text{ZnO}$  coating, *Surface Engineering* 28 (2012) 555–559. <https://doi.org/10.1179/1743294412Y.0000000027>.



ภาคผนวก

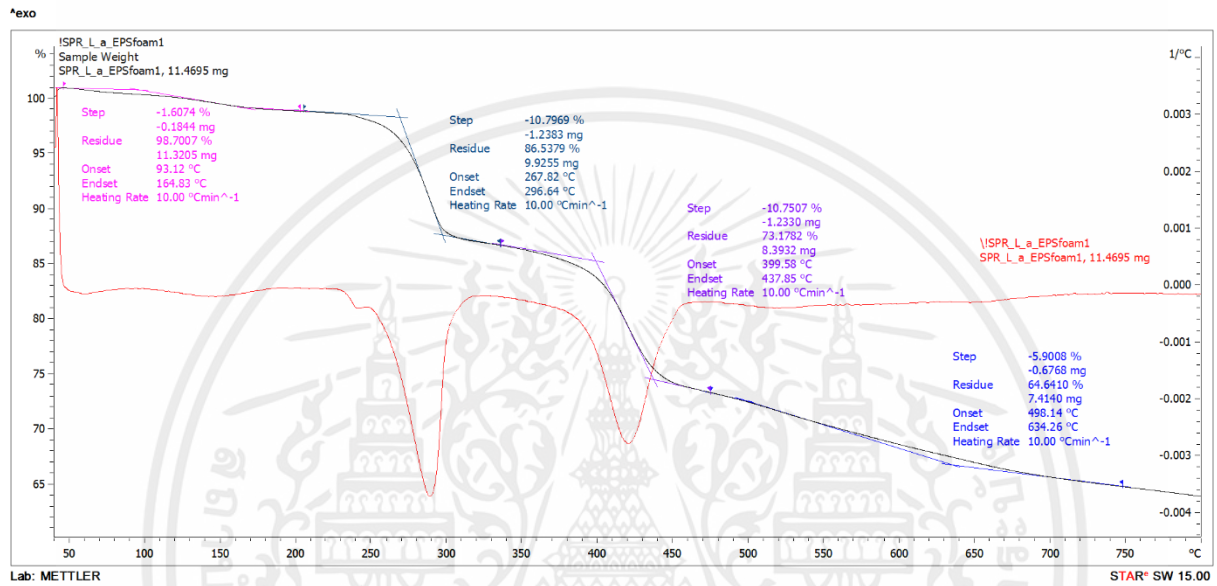
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



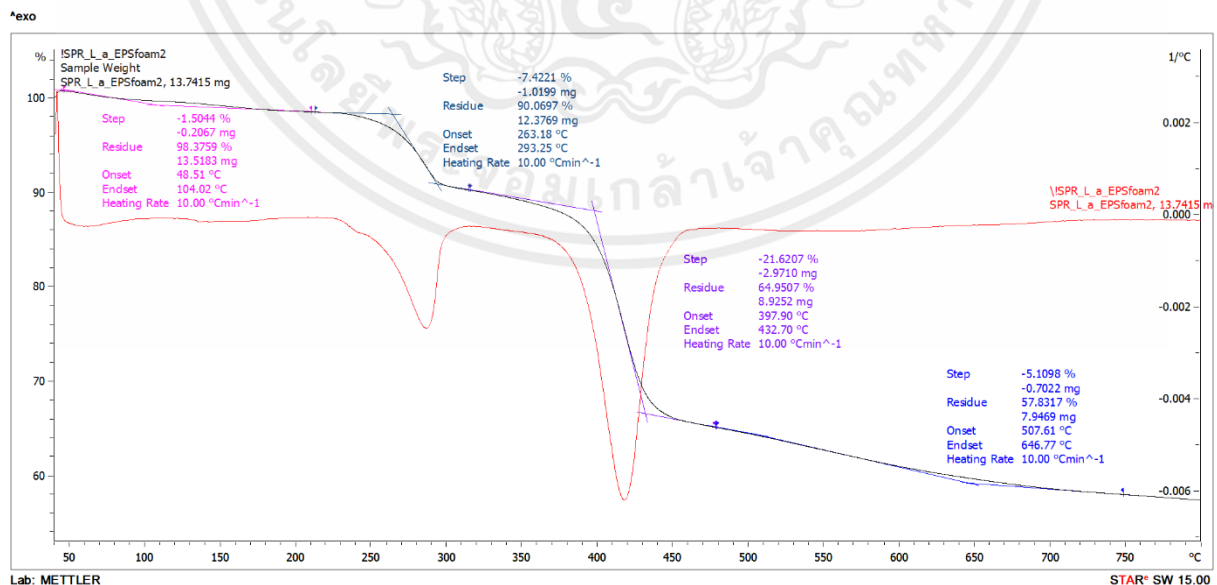
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ก.1 กราฟ Thermogravimetric analysis (TGA) และ Derivative thermogravimetry (DTG) ของตัวอย่างที่ดีที่สุดจากทั้ง 5 กลุ่มการทดสอบ

การวิเคราะห์ TGA-DTG ของตัวอย่างที่ดีที่สุดจากทั้ง 5 กลุ่มการทดสอบ โดยทำที่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 800 °C อัตราการให้ความร้อนอยู่ที่ 10 K/นาที่ และทำภายใต้บรรยากาศ N<sub>2</sub> ที่มีอัตราการป้อนอยู่ที่ 20 มิลลิลิตร/นาที่

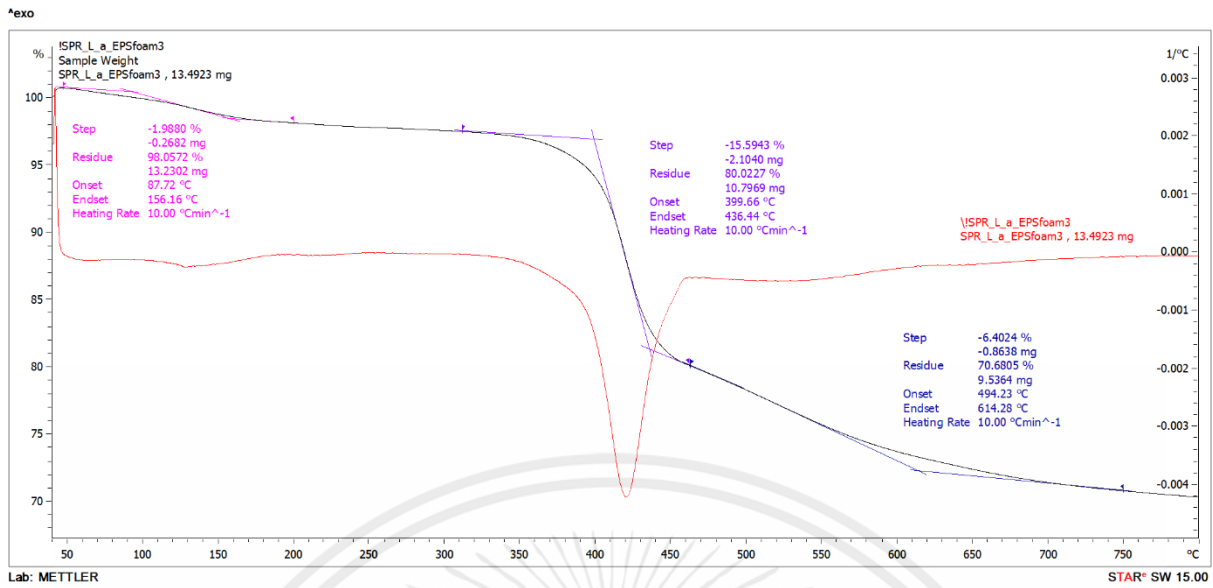


รูปที่ ก.1.1 กราฟ TGA-DTG ของตัวอย่าง 10ZnO -1H-Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>

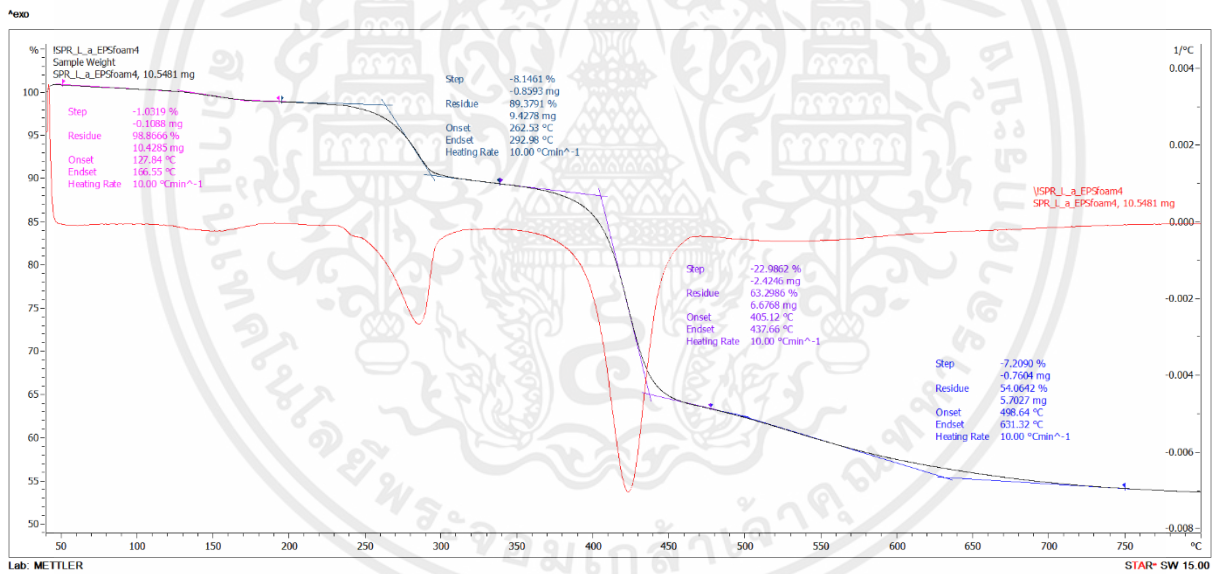


รูปที่ ก.1.2 กราฟ TGA-DTG ของตัวอย่าง 15TiO<sub>2</sub>-1H-Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

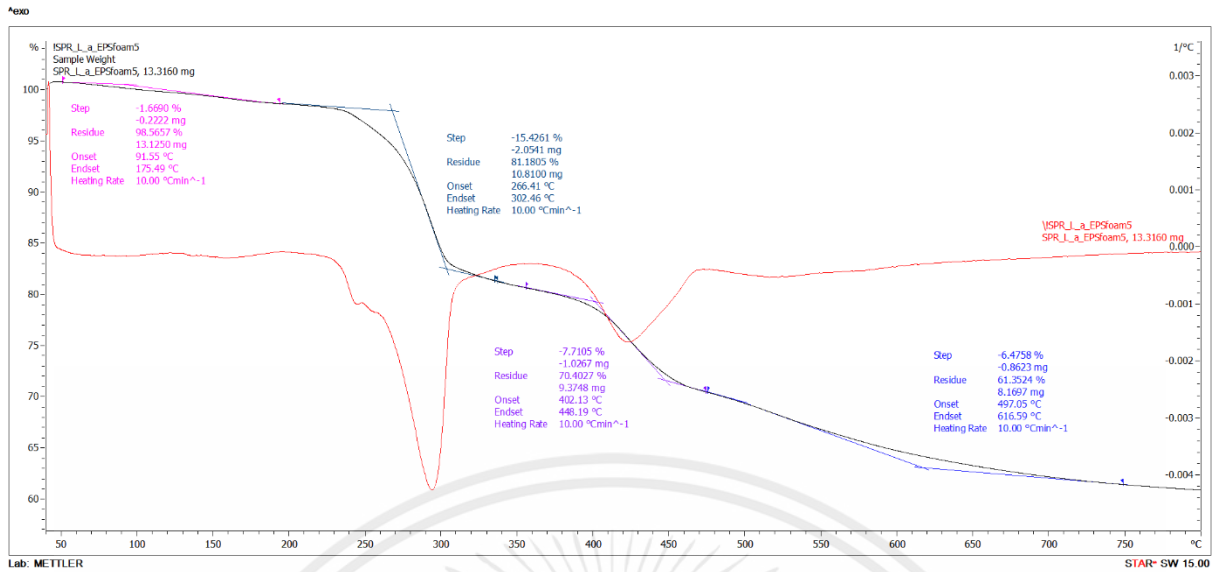


รูปที่ ก.1.3 กราฟ TGA-DTG ของตัวอย่าง  $100\text{TiO}_2\cdot 1\text{H}\cdot \text{Na}_2\text{SiO}_3$



รูปที่ ก.1.4 กราฟ TGA-DTG ของตัวอย่าง  $10\text{TiO}_2\cdot 5\text{H}\cdot \text{SiO}_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.1.5 กราฟ TGA-DTG ของตัวอย่าง 100ATH-10H-SiO<sub>2</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้