

การตกแต่งผนังไฟและด้านการหลอมหยดผ้าพอลิเอสเตอร์โดยใช้  
ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต เบนโทไนต์ และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์

นางสาวปนิษฐา เลิศขจรสุข

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2553  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FLAME RETARDANT AND ANTIDRIPPING OF POLYESTER FABRIC USING  
DIAMMONIUM HYDROGEN PHOSPHATE, BENTONITE AND ALUMINIUM HYDROXIDE

Miss Panistha Lerdkajornsuk

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Applied Polymer Science and Textile Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การตกแต่งผนังไฟและด้านการหลอมหยดผ้าพอลิเอสเตอร์ โดยใช้ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต เบนโทไนต์ และ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์
โดย	นางสาวปนิษฐา เลิศขจรสุข
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิริรัตน์ จารุจินดา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริรัตน์ iewiczศิริเลิศ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิริรัตน์ จารุจินดา)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. กาวี ศรีกุลกิจ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. นันทยา ยานูเมศ)

ปริญญานิพนธ์ : การตกแต่งห่วงไฟและด้านการหลอมหยดผ้าพอลิเอสเตอร์ โดยใช้ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต เบนโทไนต์ และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์. (FLAME RETARDANT AND ANTIDRIPPING OF POLYESTER FABRIC USING DIAMMONIUM HYDROGEN PHOSPHATE, BENTONITE AND ALUMINIUM HYDROXIDE) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. สิริรัตน์ จารุจินดา, 159 หน้า.

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการปรับปรุงสมบัติห่วงไฟและการต้านหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์โดยใช้สารแขวนลอยที่ประกอบด้วยเบนโทไนต์ปริมาณร้อยละ 10, 15, 20 และ 25 โดยน้ำหนัก สารละลายไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคจุ่มอัด-อบด้วยความร้อน เนื่องจากสารแขวนลอยเบนโทไนต์ปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 10 ขึ้นไป มีความหนืดสูงมากทำให้ยากต่อกระบวนการตกแต่ง ดังนั้นจึงเติมโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 4 ลงไปในสารแขวนลอยเบนโทไนต์ตั้งแต่ร้อยละ 10 ถึง 25 ซึ่งทำให้ความหนืดลดลงและการตกแต่งห่วงไฟง่ายขึ้น จากนั้นนำผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ผ่านและไม่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟมาทดสอบพฤติกรรมการติดไฟ พบว่าภายหลังการซัก 5 รอบ ผ้าพอลิเอสเตอร์มีสมบัติห่วงไฟที่ดีกว่าก่อนนำไปซัก กล่าวคือสารตกแต่งห่วงไฟที่ประกอบด้วยไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตร้อยละ 3 หรืออะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ในปริมาณร้อยละ 5 และ 10 เพียงอย่างเดียวยังคงห่วงไฟได้ดีโดยไฟดับเองได้หลังนำแหล่งจุดไฟออกและด้านการหลอมหยดผ้าพอลิเอสเตอร์ได้ (ไม่มีการหลอมหยดเกิดขึ้น)เช่นเดิม และเช่นเดียวกันสารแขวนลอยเบนโทไนต์ร้อยละ 10 ขึ้นไปผสมกับโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 4 และที่นำไปผสมกับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตร้อยละ 3 หรือผสมกับอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 5 และ 10 สามารถห่วงไฟได้ดีโดยไฟดับเองได้หลังนำแหล่งจุดไฟออกและด้านการหลอมหยดผ้าพอลิเอสเตอร์ได้ทั้งที่ก่อนซักผ้าพอลิเอสเตอร์ยังคงติดไฟและลามไฟหลังจากนำแหล่งจุดไฟออกและมีการหลอมหยดเกิดขึ้น อาจเนื่องจากโซเดียมคลอไรด์ที่ทำให้ความหนืดของสารแขวนลอยเบนโทไนต์ลดลงและที่ติดไฟง่ายได้ถูกขจัดออกไปในขั้นตอนการซักนั่นเอง จากภาพถ่าย SEM ก็ได้บ่งชี้ว่าหลังการซัก 5 รอบ อนุภาคที่เกาะแทรกอยู่ระหว่างเส้นใยได้ถูกขจัดออกไปแต่ยังมีชั้นของสารห่วงไฟเคลือบอยู่บนผิวเส้นใย อีกทั้งผลของ EDX ได้ยืนยันว่ายังคงมีองค์ประกอบเคมีของสารห่วงไฟ (เบนโทไนต์ ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต หรืออะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์) บนผิวเส้นใยดังกล่าว นอกจากนี้สารห่วงไฟที่ตกแต่งบนผ้าพอลิเอสเตอร์ยังไม่มีผลต่อความขาวของผ้าอีกด้วย

ภาควิชา วัสดุศาสตร์..... ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา 2553

##5172349423: MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEYWORDS : ANTIDRIPPING / ALUMINIUM HYDROXIDE / BENTONITE / DIAMMONIUM HYDROGEN PHOSPHATE / FLAME RETARDANCY /POLYESTER FABRIC

PANISTHA LERDKAJORNSUK: FLAME RETARDANT AND ANTIDRIPPING OF POLYESTER FABRIC USING DIAMMONIUM HYDROGEN PHOSPHATE, BENTONITE AND ALUMINIUM HYDROXIDE. ADVISOR: ASST. PROF. SIREERAT CHARUCHINDA, Ph. D, 159 pp.

The purpose of this research was to improve flame retardancy and antidripping of polyester fabric by using 10, 15, 20 and 25%wt bentonite (BNT), 3%wt diammonium hydrogen phosphate (DA) and 5 and 10%wt aluminium hydroxide ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) via pad-dry technique. The slurry of BNT ( $\geq 10\%$ wt) exhibited high viscosity leading to the difficulty for finishing process. Thus, the addition of 4%wt of sodium chloride (NaCl) to the suspension of BNT (up to 25%wt) resulted in lower and suitable viscosity of the slurry for finishing process. After 5 cycles washing, the burning behavior of the treated polyester fabric showed better performance than that of before washing. That is, 3%wt DA or 5 and 10%wt  $\text{Al}(\text{OH})_3$  alone could remain flame extinguishment after removal of the ignition source and also impart antidripping (no melt drips) as before washing. Similarly, after washing, the slurry of 10%wt BNT alone and 10%wt BNT mixed with 4%wt NaCl and also mixed with 3%wt DA or 5 and 10%wt  $\text{Al}(\text{OH})_3$  could better promote flame extinguishment after removal of the ignition source and also better impart antidripping than before washing. This may be due to NaCl which lower the viscosity of the slurry of bentonite and also easy to ignite has been removed by washing. SEM images indicated the layer of flame retardants coated on the fiber surface whereas FR particles existed between fibers were removed. Furthermore, EDX results confirmed the presence of the composition of flame retardants (BNT, DA or  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) remaining on the fiber surface. In addition, these flame retardants treated on polyester fabrics had no effect on fabric whiteness.

Department : Materials Science ..... Student's Signature .....

Field of Study : Applied Polymer Science and Textile Technology ..... Advisor's Signature .....

Academic Year : 2010 .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้อย่างสมบูรณ์เป็นเพราะได้รับคำแนะนำทางวิชาการ ความเอื้อเฟื้อในด้านเครื่องมือ วัสดุดิบและสถานที่ทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังได้รับความช่วยเหลือและแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่างๆเป็นอย่างดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณบุคคล และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องดังรายนาม ต่อไปนี้

1. ผศ. ดร. สิริรัตน์ จารุจินดา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาที่ดีเยี่ยมในการแก้ไขปัญหา แนะนำแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ และการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์ รวมทั้งให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์เสมอมา

2. ผศ. ดร. ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ. ดร. กาวิศรีกุลกิจ และ รศ. ดร. นันทยา ยานุกเมศ กรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้คำปรึกษา แนวคิด แนะนำด้านวิชาการ และช่วยตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

3. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. Center for Petroleum, Petrochemicals and Advanced Materials, Chulalongkorn University ที่ให้ทุนการศึกษาและทุนสนับสนุนในการวิจัยบางส่วน

5. ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านสิ่งทอ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนสนับสนุนในการวิจัยบางส่วน

6. บริษัท Thainamsiri Intertek จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ผ้าพอลิเอสเตอร์ในการทำวิจัย บริษัท Thai Nippon Chemical Industry จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ เบนโทไนต์ในการทำวิจัย

7. นางสาวภาวณี เชื้อนพวงศ์ สำหรับข้อมูลวิทยานิพนธ์เรื่องการใช้เบนโทไนต์ ผงขาวไหม และสารประกอบฟอสฟอรัส เป็นสารหน่วงไฟและสารด้านการลดหยดสำหรับผ้าพอลิเอสเตอร์นอนวูฟเวน ซึ่งทำให้สามารถเกิดงานวิจัยต่อเนื่องเป็นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถสร้างสรรค์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 พอลิเอสเทอร์.....	4
2.1.1 สมบัติของเส้นใย.....	5
2.2 กระบวนการผลิตแบบดั้งเดิม.....	9
2.3 กลไกการแตกสลายด้วยความร้อนของพอลิเอสเทอร์.....	11
2.4 พฤติกรรมการติดไฟและหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเทอร์ และสารหน่วงไฟที่ ใช้ในเชิงการค้า.....	15
2.5 การเผาไหม้ และการหน่วงไฟ.....	18
2.5.1 กลไกการทำงานของสารหน่วงไฟ.....	22
2.6 ประเภทของสารหน่วงไฟ.....	23
2.6.1 จำแนกจากความคงทน.....	23
2.6.2 จำแนกจากวิธีการที่ใช้ร่วมกับวัสดุ.....	24
2.6.3 จำแนกจากกลไกการหน่วงไฟ.....	24
2.6.4 สารหน่วงไฟจำแนกจากองค์ประกอบทางเคมี.....	25

บทที่	หน้า
2.7 ตัวอย่างและวิธีการทำงานของสารหน่วงไฟ.....	27
2.8 ระบบการหน่วงไฟที่มีการเสริมกัน.....	34
2.9 แร่ดิน.....	36
2.9.1 ดินเบนโทไนต์.....	37
2.9.2 มอนต์มอริลไลไนต์.....	38
2.10 อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์.....	39
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	41
3. วิธีการทดลอง.....	44
3.1 วัสดุและสารเคมี.....	44
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	46
3.3 การดำเนินงานวิจัย.....	47
3.4 การศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารหน่วงไฟต่อการหน่วงไฟของผ้า พอลิเอสเตอร์.....	48
3.5 การหาความหนืดของสารหน่วงไฟที่ใช้ตกแต่งผ้าพอลิเอสเตอร์.....	50
3.6 การศึกษาพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยด.....	51
3.6.1 วิธีทดสอบการติดไฟ.....	
3.7 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ผ่านและผ่านการ ตกแต่งหน่วงไฟด้วยเทคนิค ATR-FTIR.....	53
3.8 การศึกษาสัณฐานวิทยาของผ้าพอลิเอสเตอร์ก่อนและหลังตกแต่งหน่วงไฟ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	54
3.9 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีของผ้าหลังทำการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเครื่องวัด สี.....	55
3.10 การทดสอบความคงทนของสารตกแต่งหน่วงไฟบนผ้าพอลิเอสเตอร์.....	57
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	58
4.1 ความหนืดของสารตกแต่งหน่วงไฟที่มีเบนโทไนต์เป็นองค์ประกอบ.....	58
4.2 พฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟแนว 45 องศาและการหลอมหยดของผ้าพอลิ- เอสเตอร์ก่อนและหลังการตกแต่งหน่วงไฟ.....	61



บทที่	หน้า
4.2.1 ผลของเบนโทไนด์กับโซเดียมคลอไรด์.....	61
4.2.2 ผลของเบนโทไนด์กับโซเดียมคลอไรด์ และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจน ฟอสเฟต.....	67
4.2.3 ผลของเบนโทไนด์กับโซเดียมคลอไรด์ และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์..	70
4.3 ความคงทนของสารตกแต่งห่วงไฟต่อการซัก.....	79
4.4 โครงสร้างทางเคมีของผ้าพอลิเอสเตอร์ก่อนและหลังผ่านการตกแต่งห่วงไฟ ด้วยเทคนิค ATR- FTIR.....	88
4.5 องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ผ่านและผ่านการตก แต่งห่วงไฟภายหลังการซักล้างด้วยเทคนิค EDX .....	96
4.6 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่ง ห่วงไฟด้วยเทคนิค SEM .....	98
4.6.1 ก่อนซัก.....	98
4.6.1.1 ผ้าพอลิเอสเตอร์ตกแต่งห่วงไฟด้วยเบนโทไนด์ร่วมกับ โซเดียมคลอไรด์.....	98
4.6.1.2 ผ้าพอลิเอสเตอร์ตกแต่งห่วงไฟด้วยเบนโทไนด์ร่วมกับ โซเดียมคลอไรด์ และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต	98
4.6.1.3 ผ้าพอลิเอสเตอร์ตกแต่งห่วงไฟด้วยเบนโทไนด์ร่วมกับ โซเดียมคลอไรด์ และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์.....	99
4.6.2 หลังซัก.....	99
4.6.2.1 ผ้าพอลิเอสเตอร์ตกแต่งห่วงไฟด้วยเบนโทไนด์ร่วมกับ โซเดียมคลอไรด์.....	99
4.6.2.2 ผ้าพอลิเอสเตอร์ตกแต่งห่วงไฟด้วยเบนโทไนด์ร่วมกับ โซเดียมคลอไรด์ และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต.....	100
4.6.2.3 ผ้าพอลิเอสเตอร์ตกแต่งห่วงไฟด้วยเบนโทไนด์ร่วมกับ โซเดียมคลอไรด์ และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์.....	100
4.7 การเปลี่ยนแปลงสีของผ้าพอลิเอสเตอร์ภายหลังการตกแต่งห่วงไฟ.....	116

บทที่	หน้า
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	118
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	119
รายการอ้างอิง.....	120
ภาคผนวก.....	124
ภาคผนวก ก.....	125
ภาคผนวก ข.....	138
ภาคผนวก ค.....	149
ภาคผนวก ง.....	151
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	159

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบสมบัติด้านความคงทนต่อความร้อนของเส้นใยชนิดต่าง ๆ.....	20
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของเบนโทไนต์.....	44
ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์.....	45
ตารางที่ 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบในงานวิจัย.....	46
ตารางที่ 3.4 สูตรการตกแต่งห่วงไฟฟ้าพอลิเอสเตอร์ที่ความเข้มข้นต่างๆกัน (ร้อยละน้ำหนักต่อน้ำหนัก) .....	48
ตารางที่ 4.1 ค่าความเหนียวของสารตกแต่งห่วงไฟฟ้าที่มีเบนโทไนต์เป็นองค์ประกอบ (ที่ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที) .....	59
ตารางที่ 4.2 สรุปพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟแนว 45 องศาของผ้าพอลิเอสเตอร์.....	76
ตารางที่ 4.3 พฤติกรรมการติดไฟการลามไฟและการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์ หลังซัก.....	84
ตารางที่ 4.4 หมู่ฟังก์ชันของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งห่วงไฟฟ้าด้วยสาร ต่างๆ.....	94
ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบทางเคมีของสารที่เคลือบอยู่บนผิวเส้นใยก่อนและหลังการซัก ล้าง.....	97
ตารางที่ 4.6 การเปลี่ยนสีของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งห่วงไฟฟ้าทั้ง ก่อนและหลังการซัก.....	117

## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอสเตอร์ (PET).....	5
รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาเคมีในการสังเคราะห์ PET.....	10
รูปที่ 2.3 Intramolecular back-biting หรือ Intramolecular transfer.....	11
รูปที่ 2.4 กลไกการเกิด Cyclic oligomers.....	12
รูปที่ 2.5 กลไกการเกิด Dioxine โดย Hovenkamp และ Munting.....	12
รูปที่ 2.6 $\beta$ -C-H hydrogen transfer.....	13
รูปที่ 2.7 การแตกสลายของ Ethylene glycol end-group.....	13
รูปที่ 2.8 กลไกการแตกสลายของพอลิเอสเตอร์.....	14
รูปที่ 2.9 สารผสมระหว่าง cyclic phosphate/phosphonates.....	16
รูปที่ 2.10 hexabromocyclododecane .....	16
รูปที่ 2.11 ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเผาไหม้.....	18
รูปที่ 2.12 วงจรการลุกไหม้ของเส้นใย.....	20
รูปที่ 2.13 การฟอสฟอริเลชันของเซลลูโลส.....	32
รูปที่ 2.14 การเกิดชาร์.....	33
รูปที่ 2.15 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์.....	38
รูปที่ 2.16 การยึดติดกันระหว่างชั้นของดินกับประจุบวกที่อยู่ระหว่างชั้นของดิน.....	39
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	47
รูปที่ 3.2 เครื่อง Brookfield Viscometer.....	50
รูปที่ 3.3 เครื่อง Atlas 45° Automatic Flammability Tester.....	51
รูปที่ 3.4 เครื่อง Fourier transform infrared spectrometer (FTIR) .....	53
รูปที่ 3.5 เครื่อง Scanning electron microscope (SEM) .....	54
รูปที่ 3.6 เครื่องวัดสี (Reflectance Spectrophotometer).....	56

	หน้า
รูปที่ 3.7 เครื่องซักผ้า (Gyrowash) .....	57
รูปที่ 4.1 ภาพพฤติกรรมกรรมการติดไฟ การลามาไฟแนว 45 องศาของผ้าพอลิเอสเตอร์ทั้งก่อน และหลังการตกแต่งห่วงไฟด้วยเบนโทไนต์และโซเดียมคลอไรด์.....	63
รูปที่ 4.2 ภาพของผ้าพอลิเอสเตอร์ก่อนและหลังผ่านการตกแต่งห่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ กับโซเดียมคลอไรด์ที่เหลืออยู่ภายหลังจากทดสอบพฤติกรรมกรรมการติดไฟ การลามาไฟ และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์แนว 45 องศา.....	66
รูปที่ 4.3 ภาพพฤติกรรมกรรมการติดไฟ การลามาไฟแนว 45 องศาของผ้าพอลิเอสเตอร์ทั้ง ก่อนและหลังการตกแต่งห่วงไฟด้วยเบนโทไนต์กับโซเดียมคลอไรด์ และ ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต.....	68
รูปที่ 4.4 ภาพของผ้าพอลิเอสเตอร์ทั้งก่อนและหลังผ่านการตกแต่งห่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ กับโซเดียมคลอไรด์ และ ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตที่เหลืออยู่ภายหลัง การทดสอบพฤติกรรมกรรมการติดไฟ การลามาไฟ และการหลอมหยดของผ้า พอลิเอสเตอร์แนว 45 องศา.....	69
รูปที่ 4.5 ภาพพฤติกรรมกรรมการติดไฟ การลามาไฟแนว 45 องศาของผ้าพอลิเอสเตอร์ทั้งก่อน และหลังการตกแต่งห่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ร่วมกับโซเดียมคลอไรด์ และอะลูมิ เนียมไฮดรอกไซด์ (ก่อนซัก).....	72
รูปที่ 4.6 ภาพของผ้าพอลิเอสเตอร์ก่อน และหลังผ่านการตกแต่งห่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ ร่วมกับโซเดียมคลอไรด์ และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ที่เหลืออยู่ภายหลังจาก ทดสอบพฤติกรรมกรรมการติดไฟ การลามาไฟ และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์ แนว 45 องศา (ก่อนซัก).....	75
รูปที่ 4.7 ภาพพฤติกรรมกรรมการติดไฟ การลามาไฟแนว 45 องศาของผ้าพอลิเอสเตอร์ (หลังซัก).....	79
รูปที่ 4.8 ภาพของผ้าพอลิเอสเตอร์ก่อนและหลังผ่านการตกแต่งห่วงไฟด้วยเบนโทไนต์กับ โซเดียมคลอไรด์ ที่เหลืออยู่ภายหลังจากซัก 5 รอบแล้วทดสอบพฤติกรรมกรรมการติดไฟ การลามาไฟ และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์แนว45 องศา (หลังซัก).....	86

	หน้า
รูปที่ 4.9 ภาพของผ้าพอลิเอสเตอร์ก่อนและหลังการตกแต่งห่วงไฟด้วยเบนโทไนด์กับโซเดียมคลอไรด์ และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่เหลืออยู่ภายหลังจากทดสอบพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์แนว 45 องศา (หลังซัก) .....	87
รูปที่ 4.10 ภาพของผ้าพอลิเอสเตอร์ก่อนและหลังผ่านการตกแต่งห่วงไฟด้วยเบนโทไนด์กับโซเดียมคลอไรด์ และ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 5 ที่เหลืออยู่ภายหลังจากทดสอบพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์แนว 45 องศา (หลังซัก).....	87
รูปที่ 4.11 ATR-FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเตอร์ก่อนการตกแต่งและหลังตกแต่งด้วยสูตร B10Na, B25Na.....	90
รูปที่ 4.12 ATR-FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเตอร์ก่อนการตกแต่งและหลังตกแต่งด้วยสูตร B10NaDA, B25NaDA และ DA.....	91
รูปที่ 4.13 ATR-FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเตอร์ก่อนการตกแต่งและหลังตกแต่งด้วยสูตร B10NaAl5, B25NaAl5 และ Al5.....	92
รูปที่ 4.14 ATR-FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเตอร์ก่อนการตกแต่งและหลังตกแต่งด้วยสูตร B10NaAl10, B25NaAl10และ Al10.....	93
รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผ้าพอลิเอสเตอร์ทั้งก่อนและหลังการตกแต่งห่วงไฟ.....	102
รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผ้าพอลิเอสเตอร์ทั้งก่อนและหลังการตกแต่งห่วงไฟหลังผ่านการซัก 5 รอบ.....	110

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เส้นใยพอลิเอสเตอร์ที่มีชื่อทางเคมีว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตหรือเพ็ต เป็นเส้นใยประดิษฐ์ที่มีปริมาณการผลิตและการนำไปใช้งานมากที่สุดเนื่องจากมีสมบัติที่ดีหลายประการคือไม่ยับ ไม่หด ดูแลรักษาง่าย อีกทั้งยังสามารถผสมกับเส้นใยอื่นๆได้อีกมากมาย พอลิเอสเตอร์ได้ถูกนำไปใช้งานต่างๆอย่างแพร่หลายทั้งในด้านเครื่องนุ่งห่ม เคหะสิ่งทอ และได้มีบทบาทสำคัญมากขึ้นในด้านอุตสาหกรรมยานยนต์ วิศวกรรมโยธา การแพทย์และสาธารณสุข และการกีฬา อย่างไรก็ตามการนำพอลิเอสเตอร์ไปใช้งานอาจไม่ปลอดภัยหากเกิดอัคคีภัยขึ้นมา เนื่องจากความร้อนที่ได้รับจากเปลวเพลิงจะทำให้พอลิเอสเตอร์เริ่มอ่อนตัวที่อุณหภูมิ 227-242 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิสูงขึ้นในช่วง 249-290 องศาเซลเซียส พอลิเอสเตอร์จะหลอม หดตัวไหม้ไฟ แต่หากติดไฟก็สามารถดับเองได้ ซึ่งดูเสมือนว่าไม่ก่อให้เกิดอันตราย แต่การหลอมที่เกิดขึ้นสามารถหลอมหยดติดผิวหนังจนอาจเป็นอันตรายถึงชีวิตได้ อีกทั้งความร้อนจากสารที่หลอมหยดลงมายังสามารถทำให้วัสดุเชื้อเพลิงที่อยู่บริเวณใกล้ๆ เกิดการลุกไหม้อย่างรวดเร็ว สร้างความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินของผู้บริโภคต่อไปได้ จากเหตุผลดังกล่าวจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องปรับปรุงพอลิเอสเตอร์ให้มีสมบัติหน่วงไฟรวมทั้งด้านการหลอมหยดเพื่อเพิ่มความปลอดภัยให้แก่ผู้บริโภค กระบวนการหลัก 3 กระบวนการที่นิยมใช้ในการเพิ่มความต้านไฟหรือหน่วงไฟให้กับเส้นใยคือการทำโคพอลิเมอร์เซชันระหว่างเส้นใยพอลิเอสเตอร์กับมอนอเมอร์ของสารหน่วงไฟ การเติมสารเติมแต่งประเภทสารหน่วงไฟลงในขั้นตอนการหลอมและขึ้นรูปเส้นใยพอลิเอสเตอร์ และการใช้สารหน่วงไฟตกแต่งบนผ้าพอลิเอสเตอร์ ซึ่งวิธีสุดท้ายนี้เป็นวิธีที่ถูกลำบากใช้อย่างกว้างขวางเพราะสะดวกและเสียค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด

เป็นที่ทราบกันดีว่าแต่เดิมนิยมตกแต่งหน่วงไฟพอลิเอสเตอร์ด้วยสารประกอบแฮโลเจน ได้แก่ สารประกอบโบรมีน และสารประกอบคลอรีนเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดีและมีความคงทนสูง โดยสารหน่วงไฟโบรมีนจะมีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟสูงกว่าสารหน่วงไฟคลอรีนเนื่องจากพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างโบรมีนกับคาร์บอนอ่อนกว่าพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างคลอรีนกับคาร์บอนจึงแตกตัวให้อนุมูลอิสระของโบรมีนได้ง่ายกว่า แต่มีข้อเสียคือสารดังกล่าวเป็นสารก่อมะเร็งและเมื่อเกิดการเผาไหม้จะเกิดแก๊สแฮโลเจนคือ HBr และ HCl ซึ่งเป็นแก๊สพิษมีอันตรายหากสูดดมเข้าไปจะมีฤทธิ์ในการทำลายปอดและระบบทางเดินหายใจและหากได้รับแก๊สนี้ใน

ปริมาณมากอาจถึงแก่ความตายได้ นอกจากนี้ยังมีรายงานวิจัยว่าสารหน่วงไฟประเภทแฮโลเจน โดยเฉพาะโบรมีนเมื่อถูกเผาทำลายจะก่อให้เกิดสารไดออกซิน (dioxine) ซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม และยังเป็นอันตรายต่อระบบสืบพันธุ์และเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สหภาพยุโรปได้ออกกฎหมายข้อบังคับห้ามใช้สารหน่วงไฟที่มีสารประกอบแฮโลเจนบางชนิดเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ เพนตะโบรมโอดีฟีนิลอีเทอร์ (penta bromodiphenyl ether, penta BDE) ออกตะโบรมโอดีฟีนิลอีเทอร์ (octa bromodiphenyl ether, octa BDE) สำหรับเดคะโบรมโอดีฟีนิลอีเทอร์ (deca bromodiphenyl ether, deca BDE) พบว่าไม่เป็นพิษต่อสุขภาพ มนุษย์และสิ่งแวดล้อม EU จึงยังไม่ได้มีการสั่งห้ามใช้ อย่างไรก็ตามตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม 2551 จะไม่มีผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ที่มีส่วนผสมของ Deca BDE วางขายในท้องตลาด

สำหรับสารหน่วงไฟที่ไม่มีธาตุแฮโลเจน เช่นสารประกอบฟอสฟอรัส ได้แก่ เกลือแอมโมเนียมฟอสเฟตหรือออร์แกนฟอสฟอรัส พบว่ามีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดีเช่นกัน เนื่องจากมีกลไกการหน่วงไฟทั้งในวัฏภาคแก๊สโดยอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะเข้าขัดขวางการลุกลาม โดยการจับกับอนุมูลอิสระที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้สิ้นสุดลงและวัฏภาคของแข็งโดยทำให้เกิดชั้นชาร์ที่มีความคงทนต่อความร้อนปกคลุมผิวหน้าของวัสดุไม่ให้พื้นผิววัสดุสัมผัสกับความร้อนและป้องกันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแก๊สออกซิเจนภายนอกกับแก๊สที่ติดไฟง่ายและยังมีการขจัดน้ำออกมาเป็นการลดความร้อนที่เกิดขึ้น อีกทั้งสารนี้ยังไม่ให้แก๊สพิษที่เป็นอันตรายออกมาอีกด้วย อย่างไรก็ตามมีรายงานว่าออร์แกนฟอสฟอรัสบางชนิดที่เป็นสารประกอบฟอสเฟตเอสเทอร์ ได้แก่ Tris (2-chloroethyl) phosphate (TCEP) มีพิษต่อระบบสืบพันธุ์แต่สหภาพยุโรปก็ยังไม่ได้มีการออกข้อบังคับห้ามใช้สารหน่วงไฟประเภทนี้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะทำการทดแทนหน่วงไฟและด้านการหลอมหยุดพอลิเอสเทอร์ด้วยการใช้สารหน่วงไฟที่ไม่มีธาตุแฮโลเจนมาทดแทน ได้แก่ ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตที่หาได้ง่าย ไม่เป็นพิษ มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดีเนื่องจากมีกลไกการหน่วงไฟทั้งในวัฏภาคแก๊ส ส่วนการใช้ดินเบนโทไนต์ที่มีชั้นของซิลิเกตเป็นองค์ประกอบทำให้พอลิเอสเทอร์มีความคงทนต่อความร้อนสูงขึ้นและสามารถด้านการหลอมหยุดได้ นอกจากนี้การใช้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่หาซื้อได้ง่ายราคาถูก และไม่เป็นพิษจะช่วยให้เกิดชั้นชาร์ของอะลูมิเนียมออกไซด์ปกคลุมพื้นผิวและมีการขจัดน้ำออกมาจึงช่วยในการหน่วงไฟ ซึ่งคาดว่า การใช้ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ดินเบนโทไนต์ และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จะทำให้ผ้าพอลิเอสเทอร์มีความสามารถหน่วงไฟและด้านการหลอมหยุดได้ดี



## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาผลของความเข้มข้นของไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต เบนโทไนด์ และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ต่อสมบัติการทอของผ้า และการต้านการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์
2. ศึกษาสมบัติทางกายภาพ เคมี ความร้อนและความสามารถในการติดไฟของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ผ่านการตกแต่งทอผ้าและการต้านการหลอมหยด

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้สารทอผ้าและสารต้านการหลอมหยดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมสำหรับผ้าพอลิเอสเตอร์จากไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ดินเบนโทไนด์ และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 พอลิเอสเตอร์ (Polyester) [1, 2, 3, 4]

พอลิเอสเตอร์ เป็นเส้นใยประดิษฐ์ที่มีผู้ใช้มากที่สุดในกลุ่มเส้นใยประดิษฐ์ทั้งหลาย สามารถนำไปใช้งานได้มากมาย อาทิเช่น เสื้อผ้าสวมใส่เพื่อความสวยงาม เสื้อผ้าทำงาน เสื้อสูท กระโปรง ผ้า màn ผ้า ตกแต่งเฟอร์นิเจอร์ เน็คไท พรม ทำเส้นด้ายเท็กซ์เจอร์ เนื่องจากมีสมบัติที่ดีหลายประการ ด้วยสมบัติที่โดดเด่นทั้งในขณะแห้งและขณะเปียก แม้ในขณะเปียกก็มีความสามารถคืนตัวได้สูง ไม่ยับ ไม่หด ดูแลรักษาง่าย อีกทั้งสามารถใช้ผสมกับเส้นใยชนิดอื่นได้มากมาย ที่ประสบความสำเร็จคือการผสมกับผ้าฝ้าย ในสัดส่วนพอลิเอสเตอร์: ฝ้าย ที่ 65:35 หรือที่เรียกว่า T/C และอีกชนิดหนึ่งคือ การผสมกับเส้นใยเรยอนเป็นผ้า T/R เป็นต้น

การเป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดี คุณค่าความชื้นต่ำ ทำให้สวมใส่ไม่สบายและสะสมประจุไฟฟ้าสถิตในขณะอากาศเย็นและแห้ง การผสมเส้นใยพอลิเอสเตอร์กับเส้นใยอื่นจึงเป็นการแก้ปัญหา เช่น การผลิตเส้นด้ายผสมระหว่างเส้นใยพอลิเอสเตอร์กับเส้นใยธรรมชาติโดยการผสมพอลิเอสเตอร์กับฝ้าย หรือที่เรียกว่า T/C นั้น ทำให้ได้ผ้าที่มีลักษณะผิวเหมือนผ้าใยธรรมชาติมากขึ้น มีความอ่อนนุ่ม คงทน ไม่ยับง่าย และดูดซับความชื้นได้ดี ถ้าเป็นผ้าที่มีน้ำหนัก เนื้อหนาเหมาะกับการใช้ตัดเป็นเสื้อผ้าชายหญิงสำหรับใช้เมื่ออากาศหนาว ถ้าเป็นผ้าบางเบา ก็จะใช้กับอากาศตลอดปีได้ การแก้ปัญหาอีกวิธีหนึ่งได้แก่ การดัดแปลงรูปร่างพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปเหลี่ยมต่าง ๆ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของเส้นใยให้มากขึ้น เมื่อทำเป็นเส้นด้ายก็จะมีสมบัติดูดซับความชื้นไว้ตามพื้นที่ผิวของเส้นใย และจะระเหยไปได้รวดเร็ว ทำให้มีการดูดซับความชื้นได้เรื่อย ๆ

อีกหนึ่งปัญหาคือการที่ผ้าพอลิเอสเตอร์ค่อนข้างกระด้าง ไม่อ่อนนุ่มเหมือนผ้าที่ทำจากเส้นใยธรรมชาติ อีกทั้งมีการทึงตัวไม่ดี แต่ปัจจุบันผู้ผลิตผ้าพอลิเอสเตอร์ได้ใช้วิธีลดน้ำหนักผ้าพอลิเอสเตอร์ โดยแช่ในสารละลายโซดาไฟที่มีความเข้มข้นพอดี ในเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสม ทำให้ลดน้ำหนักผ้าลงได้ร้อยละ 20-30 ส่งผลให้ผ้ามีคุณสมบัติเบา อ่อนนุ่ม ไม่แข็งกระด้าง ทึงตัวดี มีความเงางามเหมือนไหม [5]

นอกจากนี้อีกปัญหาหนึ่งคือ เมื่อผ้าพอลิเอสเตอร์ติดไฟแล้วจะเกิดการหลอมหยดซึ่งนับเป็นอันตรายต่อชีวิตหากเกิดการหลอมติดผิวหนัง อีกทั้งสารที่หลอมละลายหยดลงมานั้นมีความร้อนสูงสามารถเป็นแหล่งต้นเพลิงทำให้เชื้อเพลิงบริเวณใกล้เคียง ๆ เกิดการลุกไหม้ได้อย่าง

รวดเร็วสามารถสร้างความเสียหายต่อชีวิตทรัพย์สินของผู้บริโภค ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องพัฒนาผ้าพอลิเอสเตอร์ให้มีสมบัติหนังไฟรวมทั้งสามารถต้านการหลอมหยดได้เพื่อเพิ่มความปลอดภัยให้แก่ผู้บริโภค

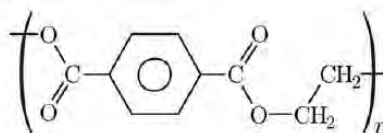
### 2.1.1 สมบัติของเส้นใย

#### 2.1.1.1 รูปร่างและโครงสร้างทางเคมี

พอลิเอสเตอร์ถูกผลิตทั้งในรูปแบบเส้นใยยาวและเส้นใยสั้น ลักษณะภายนอกของเส้นใย มีความเรียบตรง โปร่งแสง เส้นใยมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 12-25 ไมครอนขึ้นกับสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เมื่อตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ด้านภาคตามยาวพบว่า เส้นใยเป็นเส้นตรงไม่บิดตัว ภาคตัดขวางมีผิวเรียบอาจเห็นจุดเล็ก ๆ ของพิกเมนต์กระจายอยู่ทั่วไป ส่วนภาคตัดขวางเส้นใยจะมีลักษณะหลายแบบ เช่น กลม สามเหลี่ยมมุมมน ห้าเหลี่ยมมุมมน หรือมีรูปร่างอื่น ๆ ต่างกันไปแล้วแต่ความต้องการของผู้ผลิต โดยทั่วไปมีสีเป็นสีขาวและมีความเงามันหลายระดับตั้งแต่สว่าง กึ่งทึบ และทึบ

พอลิเอสเตอร์เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากการยึดเกาะระหว่างสารแอโรมาติกที่เป็นกรด(พทาสิกแอซิด) และสารแอลกอฮอล์(เอทิลีนไกลคอล) ด้วยพันธะของหมู่เอสเตอร์ และเนื่องจากในโมเลกุลมีโครงสร้างวงแหวนอยู่มาก ทำให้มีสมบัติไม่ชอบยึดจับน้ำ แต่ยึดจับสารไขมันได้ดี

เส้นใยพอลิเอสเตอร์ มีโครงสร้างผลึกประมาณร้อยละ 65-85 มีระดับการพอลิเมอร์ไรเซชันตั้งแต่ 115-140 พันธะส่วนใหญ่คือ แรง Van der Waals และมีพันธะไฮโดรเจนอ่อนๆระหว่างหมู่คาร์บอนิลและหมู่เมทิลีน ในสายโซ่ข้างเคียง



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอสเตอร์ (PET)[1]

#### 2.1.1.2 สมบัติทางกายภาพ

ความแข็งแรง (strength) เส้นใยพอลิเอสเตอร์เป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูง และทนทานต่อการขีดถูอยู่ในเกณฑ์ดีมาก ไม่ว่าจะอยู่ในสภาพแห้งหรือสภาพเปียกก็ตาม ด้วยความแข็งแรงและทนทานนี้จึงนิยมนำเส้นใยพอลิเอสเตอร์มาใช้เป็นด้ายเย็บผ้า พอลิเอส-

เทอร์ชนิด PET(พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต, poly(ethylene terephthalate)) โดยทั่วไปมีความแข็งแรงกว่าชนิด PCDT(พอลิ-1,4-ไซโคลเฮกซาลีน-ไดเมทิลีนเทเรฟทาเลต, poly-1,4-cyclohexylene-dimethylene terephthalate) การยืดดึงร้อนทำให้โครงสร้างภายในที่เป็นผลึกมีการเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากขึ้น ส่งผลโดยตรงให้สำหรับเส้นใยยาวประเภททั่วไปมีความทนแรงดึง ณ จุดขาดอยู่ในช่วง 4.0 – 5.5 กรัมต่อดีเนียร์ ในขณะที่เส้นใยยาวประเภทความแข็งแรงสูงมีความทนแรงดึง ณ จุดขาดอยู่ในช่วง 6.3 – 9.5 กรัมต่อดีเนียร์ ส่วนในกรณีของเส้นใยสั้นมีค่า 2.5 – 5.5 กรัมต่อดีเนียร์ เส้นใยยาวประเภทความแข็งแรงสูงมักใช้ในงานพิเศษเฉพาะด้าน เช่น ทำเป็นผ้าใบยางรถยนต์ และผ้าใบในงานอุตสาหกรรม สำหรับความถ่วงจำเพาะขึ้นกับชนิดของพอลิเอสเตอร์ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1.22 – 1.38

ความยืดหยุ่น (Elasticity) อยู่ระดับปานกลางไปจนถึงดี เส้นใยค่อนข้างแข็งแรง โดยทั่วไปพอลิเอสเตอร์เป็นเส้นใยที่ไม่มีสภาพยืดหยุ่น โดยเฉพาะที่เปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงจะคืนกลับสภาพไม่ดี ในขณะที่ถ้ามีการยืดตัวเพียงเล็กน้อยจะสามารถคืนตัวกลับได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับไนลอน การคืนตัวจากแรงอัด อยู่ในระดับดีถึงดีมาก ทนทานต่อการยับทั้งในสภาพแห้งและเปียก ผ้าจึงไม่ยับง่ายเหมาะสำหรับใช้ทำผ้าถักเพราะผ้าจะไม่เสียรูปง่าย อีกทั้งนับเป็นสมบัติเด่นที่เหมาะสมกับการนำเส้นใยพอลิเอสเตอร์ไปใช้บรรจุภายในผลิตภัณฑ์หมอนและผ้าห่มที่ต้องการรับน้ำหนักโดยไม่เสียรูปทรง หรือสามารถคืนตัวกลับให้อยู่ในสภาพเดิมได้ดีภายหลังการใช้งาน

ความสามารถในการคงรูป (Drapability) ผ้าพอลิเอสเตอร์มีความสามารถในการคงรูปดีมาก จัดเข้ารูปทรงง่าย โดยเฉพาะชนิดเส้นใยที่มีภาคตัดขวางเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมมน

สภาพนำความร้อน (Heat conductivity) ผ้าพอลิเอสเตอร์นำความร้อนได้ดีกว่าผ้าอะคริลิก เส้นใยส่วนใหญ่มีลักษณะกลมทำให้ได้เส้นด้ายในการทอที่เรียบ และผ้าจะระบายความร้อนได้ แต่ถ้าเส้นใยมีการทำให้มีลักษณะหยิกฟูจะทำให้ผ้าที่ทอได้มีช่องว่างน้อยและไม่ระบายความร้อน อย่างไรก็ตามผ้าจากเส้นใยพอลิเอสเตอร์จะไม่อุ่นเหมือนผ้าจากเส้นใยอะคริลิกหรือขนแกะ

ความดูดซึมน้ำ (Absorbency) พอลิเอสเตอร์ไม่ดูดซึมน้ำ ดังนั้นผ้าที่ทำจากพอลิเอสเตอร์จึงมีความสามารถในการดูดซึมน้ำขึ้นค่อนข้างต่ำมากอยู่ระหว่างร้อยละ 0.4-0.8 เท่านั้นเอง เส้นใยพอลิเอสเตอร์จึงแห้งเร็ว เหมาะสำหรับทำผลิตภัณฑ์เช่นอุปกรณ์กันฝน ผ้าพอลิเอสเตอร์ไม่เปื้อนน้ำง่าย และสามารถเช็ดออกได้รวดเร็วจึงเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่ในระหว่าง

การใช้งานไม่ต้องการให้น้ำดูดซึมได้มาก พอลิเอสเตอร์สามารถจับคราบต่าง ๆ ได้ยาก โดยเฉพาะคราบที่มากับน้ำจึงสามารถกำจัดออกได้ง่ายเพียงเช็ดออกเท่านั้นเอง แต่ถ้าผ้าพอลิเอสเตอร์เปื้อนน้ำมันหรือสิ่งที่มีไขมันเจือปน จะทำความสะอาดได้ยากมาก มีการจับเกาะคราบที่มากับน้ำมันได้ง่าย ปัญหาอีกประการหนึ่ง คือหากนำมาใช้งานทำเป็นเสื้อผ้าแล้วผู้สวมใส่จะรู้สึกไม่สบายตัวในประเทศที่มีอากาศร้อน เนื่องจากการไม่ดูดซึมน้ำของผ้าทำให้การระบายเหงื่อไม่ดี ผู้สวมใส่จึงอึดอัดเนื่องจากความชื้นจากเหงื่อไม่สามารถระเหยออกไปได้ ซึ่งปัญหานี้มักแก้ไขด้วยการผสมเส้นใยพอลิเอสเตอร์กับเส้นใยชนิดอื่น เช่น ฝ้าย เรียกว่าผ้า T/C

ผลจากความร้อน (Reaction to heat) ด้วยความที่พอลิเอสเตอร์เป็นวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกชนิดหนึ่ง ดังนั้นจึงสามารถทำให้อยู่ตัวด้วยความร้อนได้ ทำจีบถาวรในเสื้อผ้าได้รูปทรงที่สวยงามและทนทาน ผลจากความร้อนขึ้นกับชนิดของพอลิเอสเตอร์ ซึ่งเริ่มการอ่อนตัวที่อุณหภูมิ 227-242 องศาเซลเซียส ดังนั้น หากต้องการรีดจึงต้องใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าระดับนี้เสมอ ที่อุณหภูมิสูงขึ้นในช่วง 249-290 องศาเซลเซียส พอลิเอสเตอร์จะหลอมตัวและติดไฟได้ แต่ไฟจะดับเองเมื่อห่างจากเปลวไฟ หากผ้ามีสารเคมีอื่น ๆ ที่ช่วยในการลามของไฟ ไฟจะไม่ดับหรือดับช้าลง จึงเป็นข้อที่พึงระวังสำหรับเส้นใยพอลิเอสเตอร์

การติดไฟ เมื่อพอลิเอสเตอร์ติดไฟจะเกิดการลุกติดไฟช้า ๆ หดหนีเปลวไฟ หลอมตัวเป็นของเหลวหนืด และหยดจากเปลวไฟ เมื่อเย็นตัวจะเป็นก้อนแข็งสีดำ เมื่อเผาไหม้มีกลิ่นคล้ายน้ำมันเบนซิน และมีเขม่าดำ

การทำความสะอาด (Washability) เนื่องจากเป็นเส้นใยที่เรียบและไม่ดูดซึมน้ำ ผู้คนจึงติดอยู่ที่ผิวผ้าเท่านั้น ผ้าพอลิเอสเตอร์จึงทำความสะอาดง่าย ยกเว้นในกรณีที่สิ่งสกปรกที่เป็นน้ำมัน จะทำความสะอาดได้ยากมาก การใช้น้ำยาซักแห้งซึ่งมีตัวทำละลายอินทรีย์ผสมอยู่จะช่วยให้ทำความสะอาดได้ ผ้าพอลิเอสเตอร์แห้งเร็ว ไม่มีปัญหาเรื่องผ้าหดตัว ซักได้ด้วยเครื่องซัก และไม่ต้องรีดภายหลังการซัก ทั้งนี้ผ้าที่ทำจากเส้นใยสังเคราะห์อาจมีแนวโน้มการเกิด ขิ้นเม็ด (pilling) จึงควรซักเบาๆ และเมื่อแห้งแล้วควรใช้แปรงขนอ่อนๆปัดให้ปลายเส้นใยไม่ให้ขมวดพันเป็นก้อน ซึ่งจะช่วยลดปัญหานี้ได้

ผลของแสง (Effect of light) พอลิเอสเตอร์มีความทนทานต่อแสงหรือแสงแดดดีมาก แต่จะเสื่อมสภาพได้เล็กน้อยเมื่อถูกแสงหรือแสงแดดเป็นเวลานานภายใต้ภาวะปกติได้ ในกรณีที่รับแสงผ่านกระจก เช่น หน้าต่าง ประตู พอลิเอสเตอร์จะมีความสามารถในการทนต่อแสงได้ยืดออกไป ดังนั้นจึงนิยมนำพอลิเอสเตอร์ทำเป็นผ้าปูม่านภายในบ้านและผ้าที่ใช้กลางแจ้ง

ความทนทานต่อแมลงและเชื้อรา (Resistance to insects and mildew) พอลิเอสเตอร์ทนทานต่อมอดและแมลงได้ดี อีกทั้งไม่ขึ้นรา ในกรณีที่ผ้าพอลิเอสเตอร์ขึ้นรา อาจมาจากสารที่ใช้ทำการตกแต่งผ้า ซึ่งสามารถเช็ดหรือซักออกได้โดยไม่ทำลายเส้นใย แต่สีอาจเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

### 2.1.1.3 สมบัติทางเคมี

ผลของกรด (Effect of acids) ผ้าพอลิเอสเตอร์มีความคงทนต่อกรดค่อนข้างดี แต่จะถูกทำลายได้ด้วยกรดเข้มข้นสูง และในภาวะที่อุณหภูมิสูงขึ้น ความทนทานจะลดลง เช่น กรดซัลฟิวริกที่อุณหภูมิสูง

ผลของเบส (Effect of alkalis) ผ้าพอลิเอสเตอร์คงทนต่อเบสได้ดีที่อุณหภูมิห้อง แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความทนทานจะลดลง และสามารถถูกทำลายได้ด้วยเบสแก่ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

สารทำละลายอินทรีย์ (Effect of organic solvents) ผ้าพอลิเอสเตอร์ทนต่อสารอินทรีย์บางชนิด เช่น แอลกอฮอล์ คีโตน และสารทำละลายซักแห้ง แต่ละลายได้ในเมตครีซอลที่ร้อน กรดไตรฟลูออโรแอซิดิก ฟีนอล ออร์โทคลอโรฟีนอล

ผลของสารฟอกขาว (Effect of bleaches) ผ้าพอลิเอสเตอร์ทนทานต่อสารฟอกขาวทั่วไปได้ดี สามารถใช้สารซักฟอกทั้งชนิดออกซิไดส์และชนิดรีดิวส์ที่มีจำหน่ายในตลาดได้ทุกชนิดโดยไม่มีผลเสียแต่อย่างใด

การเกาะติดสีย้อม (Affinity to dyes) สีย้อมที่เหมาะสมสำหรับการย้อมพอลิเอสเตอร์ คือ สีดิสเพิร์ส สีอะโซอิก ที่อุณหภูมิสูง สีย้อมติดทนดี นอกจากนั้นผ้าพอลิเอสเตอร์บางชนิดได้มีการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันให้สามารถย้อมด้วยสีเบสิกได้

## 2.2 กระบวนการผลิตเส้นใยพอลิเอสเตอร์แบบดั้งเดิม (Conventional spinning polyester process) [1, 2, 3, 4]

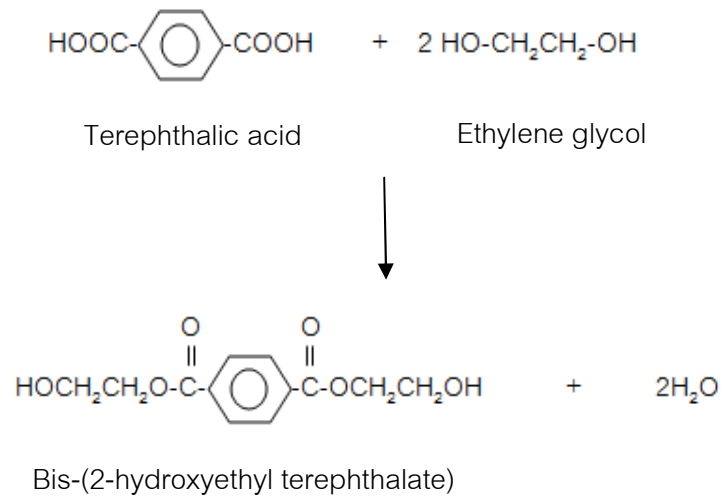
พอลิเอสเตอร์ที่ผลิตขายในท้องตลาดโดยส่วนมากมักผลิตจากกระบวนการขึ้นรูปแบบดั้งเดิม ซึ่งมีรูปแบบการผลิตที่ใกล้เคียงกับการผลิตไนลอน ต่างกันเพียงสารตั้งต้นเท่านั้น อาจกล่าวได้ว่าพอลิเอสเตอร์ที่ผลิตกันปัจจุบันมี 2 ชนิดใหญ่ๆเท่านั้น คือ PET หรือ Poly (ethylene terephthalate) และ PCDT หรือ Poly (1, 4-cyclohexene-dimethylene terephthalate) โดยชนิดแรกที่เป็น PET จะใช้ในการขึ้นรูปเส้นใยพอลิเอสเตอร์ที่มีชื่อในทางการค้าตัวอย่างเช่น Terylene จากบริษัท ICI ซึ่งเป็นเส้นใยสังเคราะห์ชนิดแรกที่ผลิตในประเทศอังกฤษและ Dacron ผลิตโดยบริษัทดูปองท์ ประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นต้น ส่วน Kodel ผลิตจากพอลิเอสเตอร์ชนิดที่สองคือ PCDT แต่ส่วนมากมักใช้ PET ในการขึ้นรูปเส้นใยพอลิเอสเตอร์ทั่วไป

กระบวนการพอลิเมอไรเซชันจะเกิดจากมอนอเมอร์ของเอทิลีนไกลคอล(EG) และกรดเทเรฟทาเลอิก(TPA) ซึ่งได้มาจากการนำเอทิลีนมาทำการออกซิเดชันให้ได้มอนอเมอร์ที่เป็นไกลคอลในลักษณะไดไฮดรอกซีแอลกอฮอล์ จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยากับกรดเทเรฟทาเลอิกในหม้ออบความดันสูงภายใต้สภาวะสูญญากาศ และมีการใช้พลวง (Sb) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พอลิเมอไรท์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นของเหลวใสไม่มีสี เมื่อแข็งตัวแล้วจะนำมาเป็นเม็ดชิป (chip) เม็ดชิปนี้จะถูกนำไปอบแห้งเพื่อขจัดความชื้นและเมื่อต้องการใช้งานจะถูกนำมาหลอมอีกครั้งแล้วขึ้นรูปเป็นเส้นใยหรือผลิตภัณฑ์ตามต้องการ

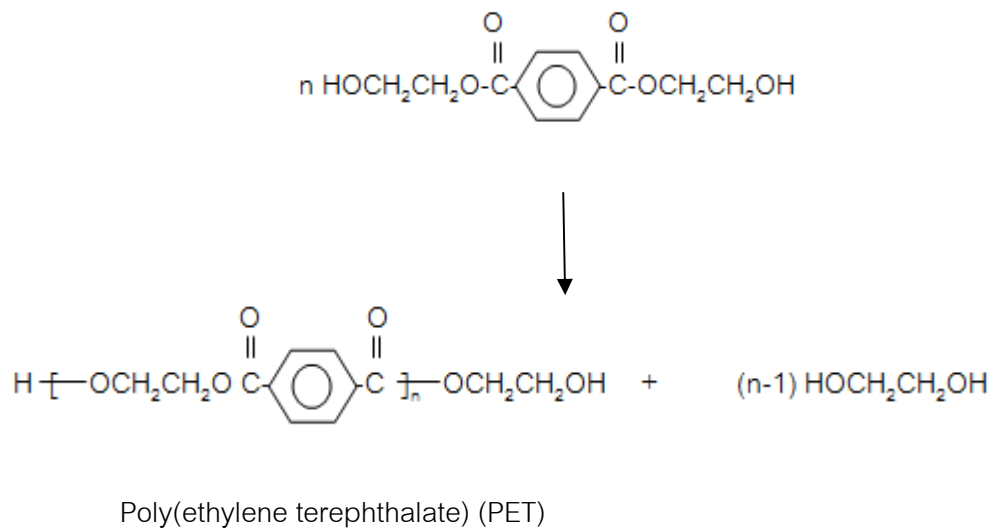
การขึ้นรูปเส้นใยพอลิเอสเตอร์เป็นการผลิตเส้นใยแบบ Melt spinning เม็ดชิปจะถูกหลอมและฉีดออกมาเป็นเส้น ผ่านหัวอัดรีดซึ่งสามารถกำหนดรูปแบบของรูในลักษณะต่างๆได้ตามต้องการ การเติมแต่งสารต่างๆเช่น สารลดความมัน สารต้านไฟฟ้าสถิต สารหน่วงไฟ สามารถทำได้ในขั้นตอนที่หลอมพอลิเมอไรท์ จากนั้นเส้นใยพอลิเอสเตอร์จะถูกดึงยืด (drawing) ที่อุณหภูมิสูง โดยทั่วไปจะดึงยืดประมาณ 5 เท่าของความยาวเดิม เพื่อเพิ่มการจัดเรียงตัวของโมเลกุล อัตราการดึงยืดขึ้นกับการนำไปใช้งานของเส้นใย และส่งผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยด้วย

การผลิตพอลิเอสเตอร์ชนิด PET นี้แต่เดิมโรงงานใช้วัตถุดิบตั้งต้นคือ ไดเมทิลเทเรฟทาเลอิก (DMT) ทำปฏิกิริยากับเอทิลีนไกลคอล (EG) ซึ่งมีข้อดีคือเป็นสารตั้งต้นที่ราคาค่อนข้างถูก แต่เมทานอลที่เป็นผลจากปฏิกิริยาจะไวต่อไฟและมีความเป็นพิษ ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการนำกรดเทเรฟทาเลอิก (TPA) แทนไดเมทิลเทเรฟทาเลอิก (DMT) โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 2.2

ขั้นที่ 1



ขั้นที่ 2



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาเคมีในการสังเคราะห์ PET [2]



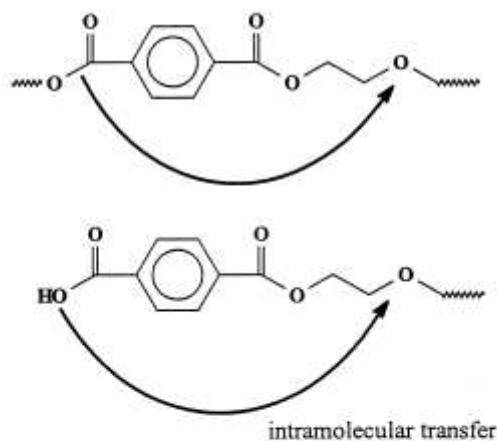
### 2.3 กลไกการแตกสลายด้วยความร้อนของพอลิเอสเทอร์ (Mechanism of thermal degradation of polymer) [3, 6, 7, 8]

ผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดจากการแตกสลายของพอลิเอสเทอร์ที่มีการรายงานไว้ได้แก่ CO<sub>2</sub>, acetaldehyde, vinyl benzoate, terephthalic acid, terephthaldehydic acid, linear dimers ส่วนผลิตภัณฑ์รองลงมาได้แก่ CO, methane, ethylene, ketene, 1,4-dioxane, toluene, benzaldehyde, divinyl terephthalate, benzoic acid, cyclic oligomers ที่มีมอนอเมอร์มากที่สุด 3 หน่วย

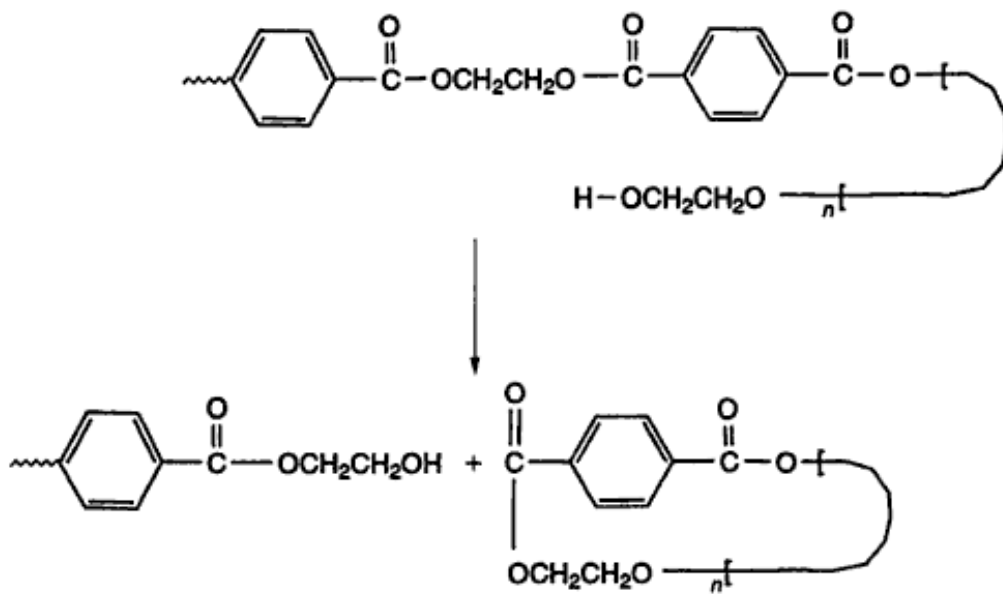
แต่เดิมเข้าใจว่าการแตกสลายทางความร้อนของพอลิเอสเทอร์เกิดจากเพียง 2 กรณีคือ Intramolecular back-biting และ Chain scission จาก ปฏิกิริยา  $\beta$ -C-H hydrogen transfer จนกระทั่งในปี ค.ศ.1994 ได้พบหลักฐานเพิ่มขึ้นว่า aliphatic ends-groups มีความไวต่อการแตกสลายด้วยความร้อนมากกว่า

กลไกการแตกสลายด้วยความร้อนของพอลิเอสเทอร์

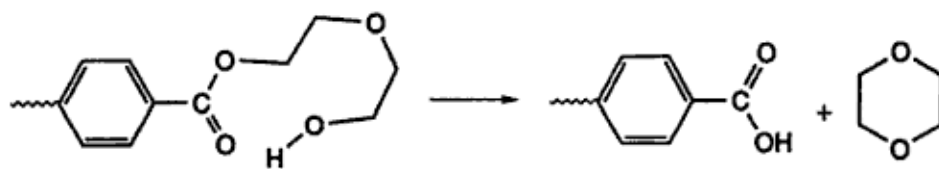
1) กลไก intramolecular back-biting ซึ่งทำให้เกิด cyclic oligomers และ dioxine แสดงดังรูปที่ 2.3, 2.4 และ 2.5



รูปที่ 2.3 Intramolecular back-biting หรือ Intramolecular transfer [6]

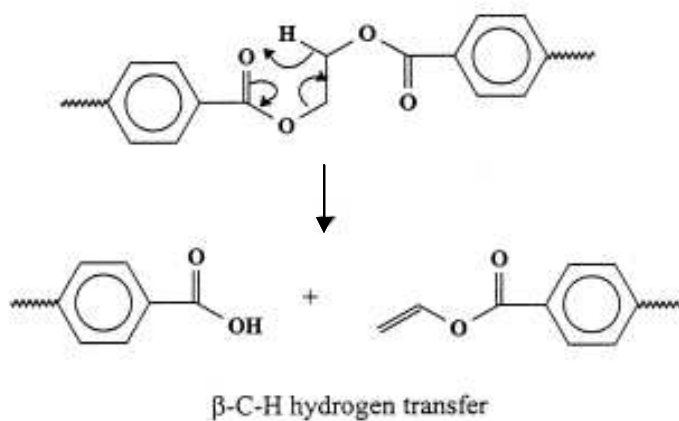


รูปที่ 2.4 การเกิด cyclic oligomers [7]



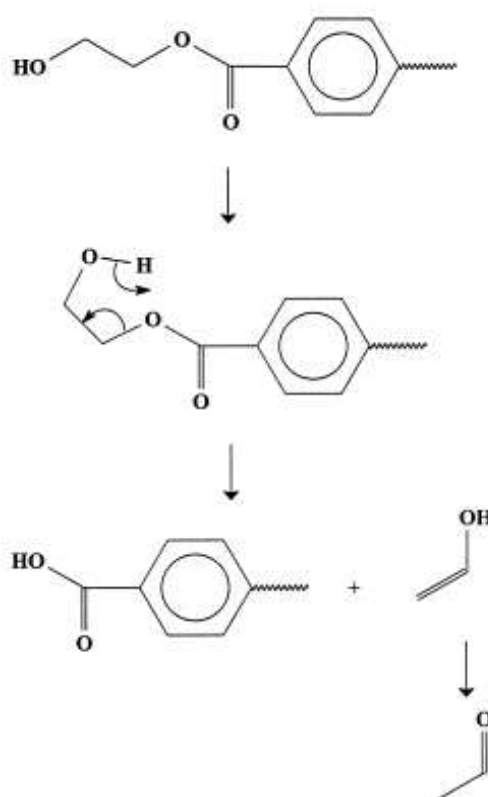
รูปที่ 2.5 การเกิด dioxine โดย Hovenkamp และ Munting [7]

2) กลไก chain scission จาก ปฏิกิริยา  $\beta$ -C-H hydrogen transfer ซึ่งทำให้เกิด vinyl ester แสดงดังรูปที่ 2.6 และ acid end-groups แสดงดังรูปที่ 2.7



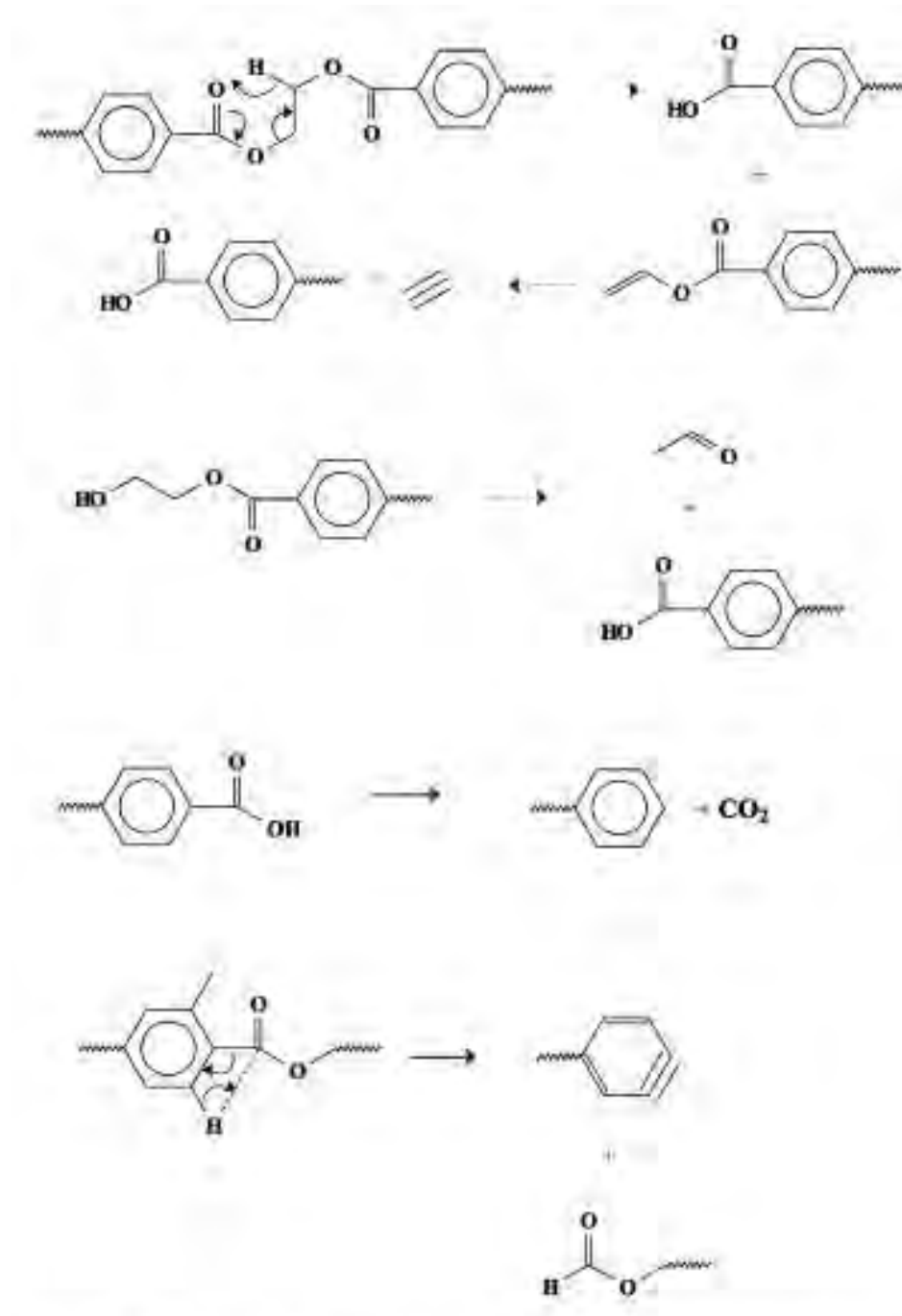
รูปที่ 2.6  $\beta$ -C-H hydrogen transfer [6]

การแตกสลายของ ethylene glycol end-group ซึ่งทำให้เกิด acetaldehyde และ acid end-group



รูปที่ 2.7 การแตกสลายของ ethylene glycol end-group [6]

3) กลไกการแตกสลายทางความร้อนแบบ Scission aliphatic side-chain ของพอลิเอสเตอร์ที่ถูกลำเลียง พอลิเอสเตอร์แตกสลายทั้งแบบ  $\beta$ -C-H hydrogen transfer และแบบของ Ethylene glycol end-group แล้วต่างก็เกิดผลิตภัณฑ์เป็น Acid end-groups



รูปที่ 2.8 กลไกการแตกสลายของพอลิเอสเตอร์ [6]

## 2.4 พฤติกรรมการติดไฟ การหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์และสารหน่วงไฟที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ [4, 6, 9]

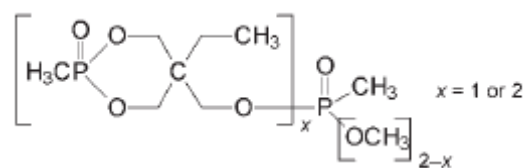
เมื่อผ้าพอลิเอสเตอร์ได้รับความร้อน จะเกิดการอ่อนตัวเนื่องจากความร้อนที่ได้รับจากเปลวเพลิง โดยจะเริ่มอ่อนตัวในช่วงอุณหภูมิ 227-242 องศาเซลเซียส จากนั้นที่อุณหภูมิสูงขึ้นในช่วง 249-290 องศาเซลเซียสพอลิเอสเตอร์จะหลอมแล้วหดตัวหนีเปลวไฟ แต่เมื่อติดไฟก็สามารถดับเองได้ ซึ่งดูเสมือนว่าไม่ก่อให้เกิดอันตรายและเกิดลักษณะคล้ายการหน่วงไฟ แต่ในความเป็นจริงหากพอลิเอสเตอร์ไม่เกิดการหดตัว พอลิเอสเตอร์จะเผาไหม้อย่างรุนแรงและเกิดการหลอมหยด สาเหตุที่ทำให้เกิดการไหลหยดขณะเกิดการเผาไหม้นั้นเป็นเพราะความหนืดของพอลิเอสเตอร์ลดลงอย่างฉับพลันของเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น [10] การหลอมหยดขณะเกิดการเผาไหม้นี้จะทำให้เปลวไฟแผ่ขยายออก จากกรณีที่พอลิเมอร์หลอมเหลวในแนวตั้งแล้วเกิดการหยดลงมาพร้อมกับเปลวไฟ (flaming drip) นำเอาความร้อนและเปลวไฟออกจากผ้าที่เหลืออยู่ทางด้านบน ทำให้สามารถผ่านการทดสอบ vertical flame test ได้ แต่ปัญหาก็คือเปลวไฟที่หยดลงมาพร้อมกับ พอลิเมอร์หลอมเหลวนั้นทำให้เกิดการติดไฟครั้งที่ 2 บนพื้นผิวที่อยู่ด้านล่างที่อาจเป็นวัสดุอย่างพรมหรือผิวหนังมนุษย์ก็ได้ หรือหากเป็นแนวราบการหลอมก็จะทำให้เปลวไฟเคลื่อนที่ได้เป็นบริเวณกว้างขึ้น แม้พอลิเมอร์ที่หยดไม่มีเปลวไฟก็ยังสามารถทำให้เกิดการลุกไหม้เพิ่มขึ้นได้เนื่องจากความร้อนจากสารที่หลอมหยดลงมาทำให้วัสดุเชื้อเพลิงที่อยู่บริเวณใกล้เคียงเกิดการลุกไหม้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้หากเป็นเครื่องนุ่งห่มการหลอมที่เกิดขึ้นสามารถหลอมหยดติดผิวหนังจนทำให้อาจเป็นอันตรายถึงชีวิตได้ อีกทั้งสร้างความเสียหายต่อทรัพย์สินอีกด้วย

จากพฤติกรรมข้างต้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องปรับปรุงสมบัติหน่วงไฟรวมทั้งด้านการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์ จะเห็นได้ว่ากระบวนการหลัก 3 กระบวนการที่นิยมใช้ในการเพิ่มความต้านไฟหรือหน่วงไฟให้กับเส้นใยคือ 1.การเติมสารเติมแต่งประเภทสารหน่วงไฟลงในขั้นตอนการหลอมและขึ้นรูปเส้นใยพอลิเอสเตอร์ 2.การทำโคพอลิเมอร์เซชันระหว่างเส้นใยพอลิเอสเตอร์กับมอนอเมอร์ของสารหน่วงไฟ 3.การใช้สารหน่วงไฟตกแต่งบนผ้าพอลิเอสเตอร์ ซึ่งวิธีสุดท้ายนี้เป็นวิธีที่ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางเพราะสะดวกและเสียค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด [10]

สำหรับการเติมสารเติมแต่งหน่วงไฟขณะพอลิเมอร์ยังหลอมเหลว ในขั้นกระบวนการผลิตหรือ เติมนำเป็นสารละลายก่อนการอัดขึ้นรูป (extrusion) หรือ การดัดแปลงให้อยู่ในรูปโคพอลิเมอร์ ( copolymeric modification) เส้นใยสังเคราะห์ที่ได้สามารถหน่วงไฟได้โดยกำเนิดมักถูกเรียกว่า inherently flame retardant แต่มักเกิดปัญหาด้านความเข้ากันได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิสูงๆ เช่นที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเส้นใยสำหรับพอลิเอไมด์ พอลิเอสเตอร์ และพอลิโพรไพลีน

ทำให้มีเพียงบางชนิดเท่านั้นที่สามารถนำมาใช้เชิงการค้าได้ สำหรับพอลิเอสเทอร์หนังไฟ (FR polyester) ที่นิยมทั่วไป ได้แก่ การดัดแปลงให้อยู่ในรูปโคพอลิเมอร์กับสารหนังไฟด้วย organophosphorus species โดยการทำให้เกิดโคพอลิเมอร์ร่วมกับ phosphinic acidic comonomer เช่น Trevira CS หรือ ใช้สารเติมแต่งที่มีฟอสฟอรัส เช่น Fidion FR (Montefibre)[11]

สารหนังไฟหนึ่งที่มีใช้ในเชิงการค้าสำหรับตกแต่งบนผ้า สิ่งทอพอลิเอสเทอร์ ได้แก่ สารผสมระหว่าง cyclic phosphate/phosphonates โดยกระบวนการ pad-dry-heat set



รูปที่ 2.9 สารผสมระหว่าง cyclic phosphate/phosphonates [12]

สภาวะการ heat set ที่อุณหภูมิ 190-210 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0.5- 2 นาที ก็เพียงพอแล้ว ผลิตภัณฑ์นี้เมื่อใช้ด้วยปริมาณ %add on 3-4 ก็สามารถทำให้เกิดการหนังไฟแบบถาวรบนสิ่งทอพอลิเอสเทอร์

สารอีกหนึ่งตัวที่ใช้ตกแต่งผ้าพอลิเอสเทอร์ ได้แก่ hexabromocyclododecane (HBCD) ผ้าจะมีการหนังไฟแบบถาวร เมื่อถูก pad ด้วยสารที่ไม่ละลายน้ำได้นี้ที่ความเข้มข้นประมาณร้อยละ 8 แล้วนำไป heat ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 190 องศาเซลเซียสเพื่อให้เกิดฟิล์มของสารหนังไฟบนพื้นผิวเส้นใย [12]



รูปที่ 2.10 hexabromocyclododecane (HBCD) [12]

ส่วนใหญ่สารหน่วงไฟที่ใช้กับเส้นใยสังเคราะห์ชนิดดั้งเดิม ไม่ว่าจะเป็นสารที่ใช้เติมในกระบวนการผลิตหรือใช้ตกแต่งสำเร็จก็ตาม มักทำหน้าที่เพิ่มการหลอมหยดเพื่อให้หยดเปลวไฟลงมาแล้วเกิดการดับไฟของด้านบน จนทุกวันนี้ก็ยังไม่มียาหน่วงไฟสำหรับเส้นใยพอลิเอสเตอร์ที่ลดความเป็นเทอร์โมพลาสติก และทำให้เกิดชาร์แบบในกรณีที่ใช้กับพวกเซลลูโลส หรือ เส้นใยวิสโคสเรยอน ตัวอย่างเช่น

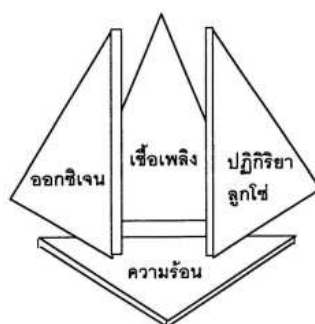
การใช้สารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสจะเพิ่มปริมาณของ residue และหน่วงการปลดปล่อยของสารระเหยที่เป็นเชื้อเพลิงสำหรับ PET และ PMMA ซึ่งเป็นผลจาก acid-catalyzed cross-linking ที่เกิดผ่าน anhydride linkages กล่าวคือภายใต้สภาวะเพลิงไหม้สารประกอบฟอสฟอรัสจะทำให้เกิดกรดซึ่งเร่งปฏิกิริยาการแตกสลายด้วยความร้อนของพอลิเอสเตอร์หลอมเหลว ลดความหนืดเมื่อหลอมเหลวและสนับสนุนการไหลหรือหยดของพอลิเมอร์ให้ หลอมเหลวออกจากส่วนที่เกิดไฟไหม้หรือหนีออกจากเปลวไฟ จึงทำให้ผ้าสามารถผ่านการทดสอบ vertical flame test ได้ซึ่งในผ้าพอลิเอสเตอร์การใช้เพียงฟอสฟอรัสร้อยละ 0.15 ก็สามารถทำให้ผ่านการทดสอบได้ ผลกระทบของการลดลงของความหนืดสามารถปรับปรุงได้ด้วยการใช้ฟอสฟอรัสร่วมกับเปอร์ออกไซด์ (synergists) ดังตัวอย่างของ งานวิจัยของ Gouinlock และคณะพบว่าสารหน่วงไฟโพลีฟอสไฟไตรีนด้วย tris (2,3 - dibromopropyl) ที่เป็นสารหน่วงไฟที่ปัจจุบันไม่ได้รับความนิยมแล้ว เมื่อเพิ่ม dicumyl peroxide จะสามารถผ่านการทดสอบที่อนุญาตให้เกิด drip extinguishment ผลจากเปอร์ออกไซด์ก็คือการเกิด melt degradation และการเพิ่มขึ้นของการไหล นอกจากนี้จากสิทธิบัตรของ Albermarle ซัลเฟอร์ในปริมาณเล็กน้อยร่วมกับฟอสฟอรัสใน styrenic polymers ก็ทำให้เกิดการหน่วงไฟได้ อย่างไรก็ตามการลดความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวสามารถถูกหักล้างลงหากมีการปรากฏของของแข็งที่ไม่หลอมเหลวซึ่งจะหน่วงการไหลของพอลิเมอร์เหลว หรือ ทำหน้าที่คล้ายได้เทียบ ดังเช่นด้วยฝ้ายในผ้า PET การเกิดการหักล้างกันแล้วทำให้การหน่วงไฟแย่งลง (antagonistic) ที่โดดเด่นก็คือผลของน้ำมันซิโคน ในผ้า PET ฝ้านั้นถูกทำให้ติดไฟง่ายเนื่องจาก ซิลิกาที่เกิดขึ้นเมื่อซิลิโคนถูกไฟโรไลซิสไปลดการไหลของของเหลว นอกจากนั้นการใช้สปีมพ์ พิกเมนต์ชนิดที่ไม่หลอมเหลวบนผ้าพอลิเอสเตอร์ สามารถทำให้การหน่วงไฟของสารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสอย่าง Trevira แย่งลง ซึ่งอาจเป็นผลจากการหน่วงการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว นอกจากนี้วัสดุพวกแร่ เส้นใย หรือ ผงเซลลูโลส ก็สามารถหักล้างการทำหน้าที่ของสารหน่วงไฟที่ใช้กับ flexible urethane foam ได้ แม้จะมีแค่เพียงบริเวณพื้นผิวเท่านั้น

## 2.5 การเผาไหม้ และการหน่วงไฟ [1, 4, 12]

ลักษณะประการหนึ่งของสิ่งทอส่วนใหญ่เมื่อเจอเปลวไฟคือ มันจะถูกเผาไหม้ ก่อให้เกิดความร้อนและอาจเป็นตัวเชื้อไฟได้ ได้มีการประมาณการจากหน่วยงานดับเพลิงว่าประมาณร้อยละ 60 ของเพลิงไหม้ในบ้านเรือน เกิดจากวัสดุสิ่งทอดังนั้นการแก้ไขปัญหาด้วยการยับยั้งการติดไฟหรือหน่วงการติดไฟบนสิ่งทอ จึงเป็นเรื่องที่มีการศึกษาวิจัยมาตลอดหลายสิบปีที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบัน

การเกิดเพลิงไหม้โดยทั่วไปเกิดจากปัจจัย 4 ปัจจัยดังต่อไปนี้

- 1) เชื้อเพลิง คือ สิ่งที่สามารถทำให้เกิดการลุกติดไฟได้ มีทั้งของแข็ง ได้แก่ เสื้อผ้า กระดาษ พลาสติก ของเหลว ได้แก่ แอลกอฮอล์ และแก๊ส ได้แก่ มีเทน อะเซทิลีน
- 2) ความร้อน หรือก็คือ สิ่งที่จะทำให้เชื้อเพลิงมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงจุดติดไฟ (ignition point) ซึ่งเชื้อเพลิงแต่ละชนิดก็จะมีจุดติดไฟแตกต่างกัน เช่น เชื้อเพลิงที่อยู่ในรูปแก๊สมักมีจุดติดไฟที่ต่ำกว่าเชื้อเพลิงที่อยู่ในรูปของแข็ง
- 3) แก๊สออกซิเจน ซึ่งเป็นช่วยทำให้การเผาไหม้เกิดง่ายขึ้น
- 4) ปฏิกิริยาลูกโซ่ เป็นปฏิกิริยาที่ช่วยขยายผลของการลุกไหม้ให้มีขนาดใหญ่และต่อเนื่อง



รูปที่ 2.11 ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ [1]

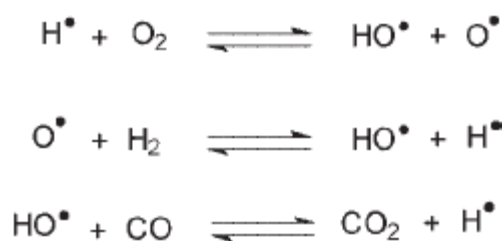
ขั้นตอนการลุกไหม้ (burning process) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 เป็นขั้นตอนที่มีความสัมพันธ์กัน คือการเผาไหม้จะเริ่มจากมีแหล่งกำเนิดไฟ (ignite source) ให้ความร้อนกับเส้นใย จนเส้นใยมีอุณหภูมิถึง  $T_p$  และเมื่อมีปริมาณออกซิเจนเพียงพอ วัสดุจะติดไฟเกิดเป็นความร้อน



เผาไหม้ตัวเอง และเกิดการสลายตัวด้วยความร้อน (pyrolysis) ภายในโครงสร้างของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีแบบไม่ย้อนกลับ และจะสลายตัวปล่อยสารหรือแก๊สที่ติดไฟได้ง่าย (flammable volatiles or flammable gases), แก๊สที่ไม่ติดไฟง่าย (non-flammable gases), carbonaceous char และ tars (liquid condensates) ซึ่งกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนนี้เป็นกระบวนการดูดความร้อน (endothermic reaction)

เมื่ออุณหภูมิยังคงเพิ่มขึ้นต่อไป tars จะถูกสลายตัวด้วยความร้อน (pyrolyse) เกิดเป็นแก๊สที่ไม่ติดไฟง่าย, carbonaceous char และแก๊สที่ติดไฟได้ง่าย เพิ่มขึ้น

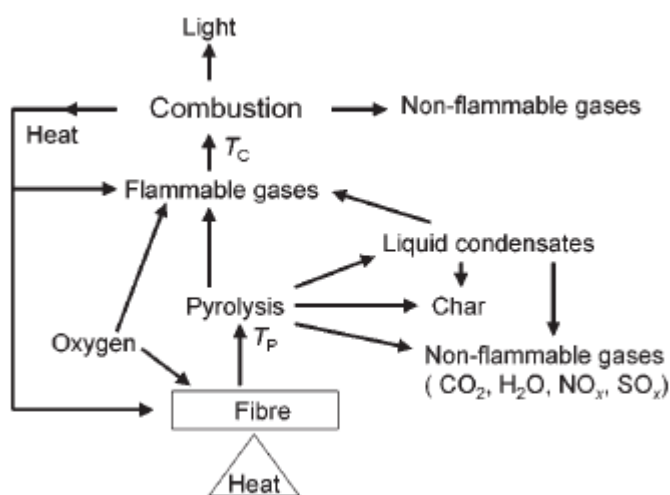
ในที่สุดเมื่ออุณหภูมิเพิ่มถึง  $T_c$  แก๊สที่ติดไฟได้ง่ายจะรวมตัวกับแก๊สออกซิเจนจากอากาศ ภายในระบบด้วยสัดส่วนที่เหมาะสม เกิดการเผาไหม้ (combustion) เกิดแบบปฏิกิริยา free radical ในเฟสแก๊ส



เปลวไฟจะดำเนินต่อไป ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการคายความร้อน (exothermic reaction) จึงเกิดความร้อนขึ้นอย่างมาก และเห็นแสงไฟสว่างมาก

และความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะย้อนกลับไปทำให้วัสดุสิ่งทอร้อน และมีพลังงานความร้อนเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จะเกิดการสลายตัวด้วยความร้อน จึงเกิดการสลายตัวให้แก๊สที่ติดไฟง่ายอีกเรื่อยๆ เกิดเป็นวงจรให้เปลวไฟลามและการเผาไหม้ดำเนินต่อไป

พฤติกรรมที่เกิดเพลิงไหม้ของสิ่งทอจะขึ้นกับอัตราการปลดปล่อยของความร้อนนี้มากกว่าปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยออกมา [12]



รูปที่ 2.12 วงจรการลุกไหม้ของเส้นใย [12]

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบสมบัติด้านความคงทนต่อความร้อนของเส้นใยชนิดต่าง ๆ [1]

ชนิดของเส้นใย	อุณหภูมิสลายตัว $T_p$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	อุณหภูมิเผาไหม้ $T_c$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	LOI (%)
ฝ้าย	350	350	18.4
ไตรอะซีเตต	305	540	18.4
วิสโคสเรยอน	350	420	18.9
พอลิเอสเตอร์	420 – 447	480	20 – 21
ไนลอน 6	431	450	20 – 21.5
ไนลอน 6,6	403	530	20 – 21.5
ขนสัตว์	245	600	25
นอเมกซ์	410	>500	28.5 – 30
เคฟลาร์	>590	>550	29

หมายเหตุ  $T_p$  = อุณหภูมิที่เส้นใยเริ่มสลายตัวด้วยความร้อน

$T_c$  = อุณหภูมิที่เส้นใยลุกไหม้ได้ถ้ามีออกซิเจนเพียงพอ

LOI (limiting oxygen index) คือ ปริมาณของออกซิเจนที่น้อยที่สุดที่ทำให้วัสดุลุกไหม้ได้อย่างต่อเนื่องในบรรยากาศที่มีออกซิเจนและไนโตรเจนผสมกัน โดยปกติบรรยากาศมีออกซิเจน 21 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นวัสดุที่มีค่า LOI ต่ำกว่า 21 จะลุกไหม้ได้ง่ายในบรรยากาศ แต่ถ้าวัสดุมีค่า LOI สูงกว่า 26 วัสดุนั้นจะลุกไหม้ได้ยากในบรรยากาศปกติ

จากตารางที่ 2.1 เห็นได้ว่าฝ้ายมีค่า LOI ต่ำเพียง 18.4 เท่านั้นจึงสามารถติดไฟได้ง่ายกว่าเส้นใยชนิดอื่น ดังนั้นฝ้ายจึงเป็นเส้นใยที่มีการนำมาตกแต่งห่วงโซ่ไฟมากที่สุด เช่นเดียวกับเส้นใยพอลิเอสเตอร์ เห็นได้ว่าอุณหภูมิสลายตัว ( $T_p$ ) และอุณหภูมิเผาไหม้ ( $T_c$ ) มีค่า 420 – 447 องศาเซลเซียสและ 480 องศาเซลเซียสตามลำดับโดยต้องมีออกซิเจนในระบบอย่างน้อยที่สุดร้อยละ 20 – 21 เพื่อให้พอลิเอสเตอร์ลุกไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง

นอกจากค่า LOI แล้วพฤติกรรมของการเผาไหม้ของฝ้ายยังสามารถพิจารณาจากลักษณะหลายประการเช่น

- ความง่ายในการติดไฟ (flammability) คือ ลักษณะเฉพาะตัวของวัสดุเกี่ยวกับความง่ายต่อการลุกติดไฟและสามารถเกิดการเผาไหม้ต่อไปของวัสดุนั้น

- เวลาการลามไฟ (afterflame time) คือ ระยะเวลาที่วัสดุยังคงเกิดเปลวไฟต่อไป หลังจากแหล่งกำเนิดไฟถูกนำออก

- Flame application time คือ เวลาระหว่างที่เปลวไฟจากแหล่งกำเนิดสัมผัสกับวัสดุ

- Flame spread time คือ เวลาที่ผู้ใช้ในการแพร่ของเปลวไฟออกจากแหล่งต้นกำเนิดเผาไหม้วัสดุภายใต้สภาวะและระยะทางจำเพาะ

- Residue คือ สิ่งที่เหลืออยู่หลังการลุกไหม้แล้ว

- ชาร์ (carbonaceous residue, carbonaceous char, char) คือ สิ่งที่เหลืออยู่หลังการลุกไหม้ที่ถูกเผาจนเป็นสารที่มีแต่คาร์บอนเป็นองค์ประกอบ

การดับเพลิง ทำได้โดยการขัดขวางหรือป้องกันการเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้อย่างต่อเนื่องโดยมีหลักการพื้นฐานคือ การกำจัดปัจจัยเพลิงไหม้ปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งออกไปจากระบบให้ได้ เพื่อตัดวงจรการลุกไหม้

เมื่อมีการใช้สารหน่วงไฟ สารหน่วงไฟจึงมีหน้าที่ไปขัดขวางวงจรของการเผาไหม้ไม่ให้เกิดดำเนินต่อไปได้อย่างต่อเนื่อง เพื่อให้เปลวไฟถูกลามช้าลงแล้วดับในที่สุด

ประเภทของผ้าที่มีสมบัติการทนไฟแบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ ผ้าที่ทนไฟแบบกันไฟ (fire proof fabric) จะไม่เกิดลุกไหม้และไม่เสียหาย ซึ่งได้แก่ผ้าใยหิน ผ้าที่มีสมบัติทนไฟแบบต้านไฟ

(flame resistant fabric) จะสามารถทนหรือไม่เกิดการลุกไหม้เมื่อได้รับความร้อนสูงถึง 600 องศาเซลเซียส โดยจะยังคงรูปร่างอยู่ เช่น ผ้าที่ทำจากเส้นใยนอเมกซ์ และเคฟลาร์ ส่วนผ้าที่มีสมบัติต้านการลุกไหม้แบบห่วงไฟ (flame retardant fabric) จะมีการลุกติดไฟที่อุณหภูมิต่ำกว่าปกติ และเกิดในระยะสั้น ๆ หรือคุ้แคงโดยไม่มีเปลวไฟ เมื่อไม่มีการลุกไหม้ที่อุณหภูมิสูงก็จะไม่เกิดความร้อนที่จะทำให้เกิดการสลายตัวแล้วลุกไหม้ต่อไป ซึ่งผ้าที่มีสมบัติต้านการลุกไหม้แบบห่วงไฟนี้ทำได้โดยการตกแต่งผ้าด้วยสารเคมีชนิดต่าง ๆ

### 2.5.1 กลไกการทำงานของสารห่วงไฟ (Flame Retardant Mechanisms) [13]

กลไกการทำงานของสารห่วงไฟคือการไปรบกวนวงจรการลุกไหม้ของวัสดุสิ่งทอไม่ให้ดำเนินไปได้ตามปกติ ซึ่งจะถูควบคุมด้วยทฤษฎีที่แตกต่างกัน ได้แก่ ทฤษฎีการดูดความร้อนหรือทฤษฎีลดอุณหภูมิ (endothermic theory หรือ thermal theory), ทฤษฎีแก๊ส (gas theory), ทฤษฎีการหลอมเหลว (melt theory), ทฤษฎีการจับอนุมูลอิสระ (radical capture theory) และทฤษฎีการขจัดน้ำ (dehydration theory)

1) ทฤษฎีการดูดความร้อนหรือทฤษฎีลดอุณหภูมิ (endothermic theory หรือ thermal theory) ทฤษฎีนี้ใช้อธิบายการทำงานของสารห่วงไฟที่จะดูดความร้อนบางส่วนจากระบบไป สารห่วงไฟเกิดการสลายตัวในรูปของการหลอมเหลวหรือการระเหิด ซึ่งจะทำให้เส้นใยได้รับความร้อนน้อยลงจนไม่สามารถร้อนถึงอุณหภูมิที่เกิดการเผาไหม้ได้

2) ทฤษฎีแก๊ส (gas theory) ทฤษฎีนี้ใช้อธิบายการทำงานของสารห่วงไฟที่เมื่อติดไฟแล้วจะสลายให้แก๊สที่ติดไฟยากหรือแก๊สที่ไม่ติดไฟ เช่น แก๊สไนโตรเจน ( $N_2$ ) แก๊สแอมโมเนีย ( $NH_3$ ) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $SO_2$ ) และไอน้ำ ทำให้เส้นใยไม่สามารถเกิดการเผาไหม้ได้

3) ทฤษฎีการหลอมเหลว (melt theory) ทฤษฎีนี้ใช้อธิบายการทำงานของสารห่วงไฟที่เมื่อโดนความร้อนแล้วจะหลอมละลายปกคลุมพื้นผิวเส้นใย ทำให้แก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ถูกปล่อยออกมายาก และยังทำให้อากาศหรือออกซิเจนไม่สามารถแทรกเข้าไปในเส้นใยได้อีกด้วย เส้นใยจึงไม่เกิดการเผาไหม้

4) ทฤษฎีการจับอนุมูลอิสระ (radical capture theory) ทฤษฎีนี้ใช้อธิบายการทำงานของสารห่วงไฟที่เมื่อโดนความร้อนแล้วจะเกิดอนุมูลอิสระที่สามารถจับกับอนุมูลอิสระที่เกิดจากการเผาไหม้ของเส้นใยเซลลูโลส เช่น  $H\cdot$ ,  $OH\cdot$  กลายเป็นแก๊ส ซึ่งทำให้อปฏิกิริยา Free-radical chain propagation สิ้นสุด การลุกไหม้ก็จะสิ้นสุดลง

5) ทฤษฎีการขจัดน้ำ (dehydration theory) ทฤษฎีนี้ใช้อธิบายการทำงานของสารหน่วงไฟที่ใช้สำหรับเส้นใยเซลลูโลส โดยสารเหล่านี้จะไปทำให้เส้นทางการสลายตัว (Decomposition path) ของเส้นใยเซลลูโลสเปลี่ยนแปลง จากเดิมที่เคยสลายตัวให้ไอและแก๊สที่ติดไฟได้ง่าย ส่งผลให้การลุกไหม้ดำเนินต่อไปนั้นเปลี่ยนเป็นการสลายตัวที่เกิดแต่ถ่านคาร์บอนและน้ำ

## 2.6 ประเภทของสารหน่วงไฟ [1, 14, 15]

การจำแนกประเภทของสารหน่วงไฟสามารถแบ่งได้ตาม ความคงทน วิธีการที่ใช้ร่วมกับวัสดุ จากกลไกการหน่วงไฟ และจากองค์ประกอบทางเคมี

### 2.6.1. จำแนกจากความคงทน

ซึ่งความคงทนนี้จะวัดได้จากความคงทนต่อการชก้าลง สามารถแบ่งเป็น 3 ประเภท คือ 1. สารหน่วงไฟประเภทไม่คงทน (nondurable flame retardants), 2. สารหน่วงไฟประเภทกึ่งคงทน (Semidurable flame retardants) และ 3. สารหน่วงไฟประเภทมีความคงทนสูง (Durable flame retardants)

1) สารหน่วงไฟประเภทไม่คงทน (nondurable flame retardants) คือไม่คงทนต่อการชก้าลง หรือ เหนือ สารหน่วงไฟประเภทนี้เหมาะที่จะใช้ตกแต่งผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องผ่านการชก้าลง เช่น ผ้าหรือบรรจุภัณฑ์ประเภทใช้แล้วทิ้ง เป็นต้น

2) สารหน่วงไฟประเภทกึ่งคงทน (Semidurable flame retardants) สารหน่วงไฟประเภทนี้มีความคงทนต่อการชก้าลง 20 ครั้ง มักใช้ตกแต่งผลิตภัณฑ์ที่ไม่จำเป็นต้องผ่านการชก้าลงบ่อย เช่น ผ้าปูก, เบาะหุ้มเฟอร์นิเจอร์ และพรม เป็นต้น

3) สารหน่วงไฟประเภทมีความคงทนสูง (Durable flame retardants) สารหน่วงไฟประเภทนี้มีความคงทนต่อการชก้าลง 50 ครั้งหรือมากกว่า สารหน่วงไฟชนิดนี้นิยมใช้ตกแต่งผลิตภัณฑ์ที่จำเป็นต้องผ่านการชก้าลงบ่อย เช่น ผลิตภัณฑ์เสื่อผ้า

## 2.6.2 จำแนกจากวิธีการที่ใช้ร่วมกับวัสดุ

แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ สารหน่วงไฟเชิงเติม (additive flame retardants) และ สารหน่วงไฟเชิงปฏิกิริยา (reactive flame retardants) ซึ่งแตกต่างกันที่สารหน่วงไฟเชิงเติมนั้นอยู่บนพื้นผิวของวัสดุและไม่ได้เกิดปฏิกิริยากับวัสดุ ส่วนสารหน่วงไฟเชิงปฏิกิริยานั้นเกิดปฏิกิริยากับวัสดุ

1) สารหน่วงไฟเชิงเติม (additive flame retardants) สารหน่วงไฟชนิดนี้เป็นลักษณะของสารเติมแต่ง (additives) โดยสารหน่วงไฟจะเคลือบอยู่บนบริเวณผิวหน้าวัสดุเท่านั้น โดยที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีต่อกัน เมื่อเวลาผ่านไปสมมติการหน่วงไฟจึงลดลงเรื่อย ๆ เพราะเกิดการระเหยหรือแยกตัวออกจากวัสดุได้ง่าย อาจแก้ปัญหาได้โดยการใช้สารหน่วงไฟที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ขึ้น

2) สารหน่วงไฟเชิงปฏิกิริยา (reactive flame retardants) สารหน่วงไฟชนิดนี้จะทำปฏิกิริยากับวัสดุที่ต้องการตกแต่งหน่วงไฟ เพื่อให้มีหมู่ฟังก์ชันที่ทำหน้าที่หน่วงการติดไฟบนสายโซ่โมเลกุลโดยตรง ดังนั้นจึงเกิดการระเหย หรือแยกตัวออกจากวัสดุได้ยาก แต่จะมีต้นทุนสูง ในส่วนของราคาสารหน่วงไฟ และเครื่องมือเพิ่มเติมที่ต้องใช้ในกระบวนการเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา

## 2.6.3 จำแนกจากกลไกการหน่วงไฟ

แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ การขัดขวางทางกายภาพ และการขัดขวางทางเคมี

1) การขัดขวางทางกายภาพ ประกอบด้วย การทำให้ระบบเย็นตัวลง การทำให้เกิดชั้นเคลือบบนพื้นผิววัสดุ และการปลดปล่อยแก๊สที่ไม่ติดไฟ

- การทำให้ระบบเย็นตัวลง เป็นการลดพลังงานของระบบให้มีไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้แบบสายโซ่

- การทำให้เกิดชั้นเคลือบบนพื้นผิววัสดุ ชั้นเคลือบนี้แยกเชื้อเพลิงและแก๊สออกซิเจนออกจากกัน อีกทั้งลดการถ่ายเทความร้อนจากจุดที่เกิดการติดไฟไปยังจุดอื่น ๆ ทำให้เปลวไฟไม่เกิดการลุกลามต่อ

- การปลดปล่อยแก๊สที่ไม่ติดไฟ การสลายตัวแล้วเกิดแก๊ส ที่ติดไฟยากหรือไม่ติดไฟ ซึ่งเจือจางปริมาณแก๊สออกซิเจนและแก๊สติดไฟภายในระบบ เส้นใยไม่สามารถเกิดการเผาไหม้ต่อไปได้

2) การขัดขวางทางเคมี ประกอบด้วย วัฏภาคแก๊ส และ วัฏภาคของแข็ง

- วัฏภาคแก๊ส (gas phase หรือ vapor phase) ขัดขวางการเกิดปฏิกิริยา  
ลูกโซ่ เมื่อเกิดการเผาไหม้อนุมูลอิสระของสารห่วงไฟที่เกิดขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาการขยายตัวของ  
สายโซ่อนุมูลอิสระ (free radical chain propagation) สิ้นสุดด้วยการเข้าไปจับกับอนุมูลอิสระของ  
เส้นใยการลุกไหม้แทน การลุกไหม้จึงสิ้นสุดลง

- วัฏภาคของแข็ง (solid phase หรือ condensed phase) สารห่วงไฟใน  
กลุ่มนี้ทำหน้าที่เร่งให้เส้นใยเกิดการสลายตัวเร็วขึ้นแล้วเกิดเป็นแก๊สที่ไม่ติดไฟ และซาร์

#### 2.6.4 สารห่วงไฟจำแนกจากองค์ประกอบทางเคมี

เนื่องจากสารห่วงไฟแต่ละชนิดมีสมบัติเฉพาะตัว เพราะมีความแตกต่างกันของ  
หมู่ฟังก์ชันทางเคมีภายในโครงสร้าง สามารถจำแนกสารห่วงไฟตามองค์ประกอบทางเคมี  
แบ่งเป็น 5 ประเภท ได้แก่ สารห่วงไฟประเภทโลหะไฮดรอกไซด์ สารห่วงไฟประเภทที่มีโบรอน  
เป็นองค์ประกอบ สารห่วงไฟประเภทที่มีแฮโลเจนเป็นองค์ประกอบ สารห่วงไฟประเภทที่มี  
ฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ และสารห่วงไฟประเภทที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ

1) สารห่วงไฟประเภทโลหะไฮดรอกไซด์ สารห่วงไฟประเภทนี้ที่นิยมใช้ ได้แก่  
อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ จะสลายตัวด้วยปฏิกิริยาคูดความร้อนเกิดเป็นเกิดขึ้นซาร์และไอน้ำ  
อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ เป็นสารห่วงไฟที่สามารถหาซื้อได้ง่าย ราคาถูก และไม่เป็นพิษ ซึ่งส่วน  
ใหญ่จะใช้ตกแต่งห่วงไฟในการเคลือบสิ่งทอหรือผสมลงไปพลาสติก

2) สารห่วงไฟประเภทที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบ สารประกอบโบรอน เช่น กรด  
บอริก จะสลายตัวด้วยปฏิกิริยาคูดความร้อนเกิดเป็นเกิดขึ้นชั้นเคลือบผิวหน้าเส้นใย และไอน้ำ

3) สารห่วงไฟประเภทที่มีแฮโลเจนเป็นองค์ประกอบ แฮโลเจนนั้นประกอบด้วย  
ธาตุ 4 ตัวด้วยกัน ได้แก่ ฟลูออรีน คลอรีน โบรมีน และไอโอดีน แต่ที่นิยมใช้เป็นสารห่วงไฟคือ  
คลอรีนและโบรมีน เนื่องจากในกรณีของฟลูออรีนนั่น พันธะที่เกิดขึ้นกับคาร์บอนนั้นแข็งแรงเกินไป  
จึงไม่สามารถแตกตัวแล้วทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระได้ ส่วนในกรณีของไอโอดีน พันธะที่เกิดขึ้นกับ  
คาร์บอนนั้นอ่อนแอเกินไปทำให้แตกตัวอย่างรวดเร็วด้วยพลังงานเพียงเล็กน้อย เช่น การโดนแสง  
และยังส่งผลให้สมบัติในการห่วงไฟสูญเสียไป สารห่วงไฟฮาโลเจนจะปลดปล่อยอนุมูลอิสระ  
ของธาตุแฮโลเจนเข้าจับกับอนุมูลอิสระที่เกิดจากเส้นใย ทำให้ปฏิกิริยาลูกโซ่สิ้นสุดลง

ถ้าเปรียบเทียบสารหน่วงไฟที่มีโบรมีนและคลอรีนเป็นองค์ประกอบสารหน่วงไฟที่มีโบรมีนเป็นองค์ประกอบจะมีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟสูงที่สุด สูงกว่าสารหน่วงไฟคลอรีน เนื่องจากพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างโบรมีนกับคาร์บอนอ่อนแอกว่าพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างคลอรีนกับคาร์บอนจึงแตกตัวให้อนุมูลอิสระของโบรมีนได้ง่ายกว่า ทำให้เมื่อถึงอุณหภูมิที่เกิดการแตกตัว สารหน่วงไฟที่มีโบรมีนเป็นองค์ประกอบจะสลายตัวเกิดเป็นไฮโดรเจนโบรมด์ (HBr) ในปริมาณความเข้มข้นที่สูง

เป็นที่ทราบกันดีว่าแต่เดิมนิยมตกแต่งหน่วงไฟพอลิเอสเตอร์ด้วยสารประกอบแฮโลเจนได้แก่ สารประกอบโบรมีน และสารประกอบคลอรีนเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดีและมีความคงทนสูง อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ที่ตกแต่งด้วยสารหน่วงไฟประเภทนี้เมื่อเกิดการลุกไหม้ จะเกิดแก๊สแฮโลเจนคือ HBr และ HCl ซึ่งเป็นแก๊สพิษมีอันตราย หากสูดดมเข้าไปจะมีฤทธิ์ในการทำลายปอด และระบบทางเดินหายใจ หากได้รับแก๊สนี้ในปริมาณมากอาจถึงแก่ความตายได้ อีกแก๊สแฮโลเจนทั้งยังเป็นสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งอีกด้วย

นอกจากนี้ยังมีรายงานวิจัยว่าสารหน่วงไฟประเภทแฮโลเจนโดยเฉพาะที่ประกอบด้วยโบรมีนเมื่อถูกเผาทำลายจะก่อให้เกิดสารไดออกซิน (dioxine) ซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม และยังเป็นอันตรายต่อระบบสืบพันธุ์และเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สหภาพยุโรปได้ออกกฎหมายข้อบังคับห้ามใช้สารหน่วงไฟที่มีสารประกอบแฮโลเจนบางชนิดเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ เพนตะโบรมโอดีฟีนีลอีเทอร์ (penta bromodiphenyl ether, penta BDE) ออกตะโบรมโอดีฟีนีลอีเทอร์ (octa bromodiphenyl ether, octa BDE) สำหรับเดคะโบรมโอดีฟีนีลอีเทอร์ (deca bromodiphenyl ether, deca BDE) พบว่าไม่เป็นพิษต่อสุขภาพ มนุษย์และสิ่งแวดล้อม EU จึงยังไม่ได้มีการสั่งห้ามใช้ อย่างไรก็ตามตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม 2551 จะไม่มีผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ มีส่วนผสมของ Deca BDE วางขายในท้องตลาด[14,15, 16]

#### 4) สารหน่วงไฟประเภทที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ

สารหน่วงไฟประเภทนี้มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟกับวัสดุที่มีปริมาณออกซิเจนสูง เช่น เซลลูโลส อนุพันธ์ของเซลลูโลส และพลาสติกที่มีองค์ประกอบของออกซิเจน สารหน่วงไฟประเภทนี้มีทั้งในรูปสารประกอบอินทรีย์ อนินทรีย์ และธาตุ (ฟอสฟอรัสแดง) เช่น ฟอสฟีน ฟอสฟีนออกไซด์ สารประกอบฟอสฟอเนียม ฟอสฟอเนต ฟอสไฟต์ และฟอสเฟต สามารถหน่วงไฟได้ทั้งในวัฏภาคแก๊ส (vapor phase) และวัฏภาคของแข็ง (condensed phase) อย่างไรก็ตามมีรายงานว่าออร์กาโนฟอสฟอรัสบางชนิดที่เป็นสารประกอบฟอสเฟตเอสเทอร์ ได้แก่ Tris (2-



chloroethyl) phosphate (TCEP) มีพิษต่อระบบสืบพันธุ์แต่สหภาพยุโรปก็ยังไม่ได้มีการออกข้อบังคับห้ามใช้สารหน่วงไฟประเภทนี้ [16]

#### 5) สารหน่วงไฟประเภทที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ

โดยสารหน่วงไฟประเภทนี้ทำหน้าที่ในรูปของการเกิดอินทุมสเซนส์ (intumescent) สารประกอบไนโตรเจนหากนำมาใช้เพียงชนิดเดียว จะไม่มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดี หรืออาจจะต้องใช้มากถึง 17% จึงจะช่วยให้เซลลูโลสมีความสามารถในการหน่วงไฟได้ปานกลาง

## 2.7 ตัวอย่างและวิธีการทำงานของสารหน่วงไฟ[1]

สารหน่วงไฟชนิดไม่คงทน นิยมใช้ในรูปแบบที่เป็นเกลือมากกว่า เช่น แอมโมเนียมฟอสเฟต ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต ยูเรียฟอสเฟต และแอมโมเนียมซัลฟาเมต สารที่มีการใช้งานในเชิงการค้า เช่น แอมโมเนียมฟอสเฟต และแอมโมเนียมโบรไมด์ (Amgard CD) และแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (Amgard TR) ซึ่งเกลือเหล่านี้เมื่อได้รับความร้อนจะสลายตัวเป็นแก๊สแอมโมเนีย กรดฟอสฟอริก หรือกรดพอลิฟอสฟอริก เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกรดฟอสฟอริกจะขจัดน้ำออกกลายเป็นกรดเมตะไฟโรฟอสฟอริกที่มีลักษณะเป็นของเหลวหนืด ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อากาศหรือออกซิเจนสัมผัสกับเส้นใยทำให้เส้นใยไม่เกิดการเผาไหม้ รวมทั้งยังทำหน้าที่เป็นกรดลิวอิส (Lewis acid) ที่ทำให้เส้นใยสลายตัวเกิดชาร์เพิ่มขึ้น

สารหน่วงไฟชนิดกึ่งคงทน ได้แก่ เกลือของกรดอนินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ เช่น เกลือฟอสเฟต หรือเกลือบอเรตของโลหะดีบุก สังกะสี อะลูมิเนียม หรือแอสแตนเนต ทังสเตต อะลูมิเนต รวมทั้งเกลือไฮดรอกไซด์ของพอลิฟอสเฟตน้ำหนักโมเลกุลสูง เมื่อทำการยึดติดสารเหล่านี้ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดการฟอสฟอริเลชันของเซลลูโลส ซึ่งในกระบวนการตกแต่งจะแช่ผ้าให้อิ่มตัวในสารละลายอย่างแรกที่เป็นเกลือของสารหน่วงไฟ และนำไปทำให้ตกตะกอนในสารละลายอย่างที่สอง

สารหน่วงไฟประเภทมีความคงทนสูง มักมีฟอสฟอรัสหรือฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ หรือเป็นสารประกอบประเภทออร์แกนโนฟอสฟอรัส (Organophosphorus compounds) ซึ่งรู้จักกันดีคือ เอ็นไฮดรอกซีเมทิล (ไดเมทิลฟอสฟอโน) โพรพิโนเอไมด์ เช่น Pyrovatex CP และเททราคิส (ไฮดรอกซีเมทิล) ฟอสฟอเนียมคลอไรด์ (THPC) เช่น Proban CC

สารหน่วงไฟเชิงเติม เกลืออินทรีรี่ เช่น โซเดียมคลอไรด์ แคลเซียมคลอไรด์ แอนติ-โมนีคลอไรด์ โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ซิงค์คลอไรด์ แอมโมเนียมคลอไรด์ แอมโมเนียม คาร์บอเนต และแอมโมเนียมฟอสเฟต เกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำ และช่วยเพิ่มซาร์จากการเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการดีไฮเดรชัน

สารหน่วงไฟเชิงปฏิกิริยาประเภทมีความคงทนสูงได้แก่ Pyrovatex, Proban (THPC และ ยูเรีย) ใช้กับเซลลูโลสเพื่อให้เกิดหมู่ฟังก์ชันที่หน่วงไฟได้บนสายโซ่โมเลกุลโดยตรง ซึ่งโดยทั่วไปเมื่อเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน หมู่ไฮดรอกซิลที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 3 และ 6 ของหน่วยซ้ำของกลูโคไพราโนส จะสามารถเกิดการแตกของพันธะไฮโดรเจนแล้วเกิดปฏิกิริยากับอะลิฟาติกไฮดรอกซิล ตัวอย่างการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน เช่น การไนเตรชัน อะซิทิเลชัน ฟอสฟอริเลชัน และซัลเฟชัน

สารหน่วงไฟที่ขัดขวางทางกายภาพด้วยการทำให้ระบบเย็นตัวลง ตัวอย่างของสารหน่วงไฟในกลุ่มนี้ เช่น อะลูมินาไตรไฮเดรต แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นสารหน่วงไฟที่สลายตัวด้วยปฏิกิริยาดูดความร้อน จึงทำให้ความร้อนที่ถูกปล่อยออกมาจากปฏิกิริยาการเผาไหม้มีค่าลดลง เส้นใยก็ได้รับความร้อนน้อยลง อุณหภูมิลดลงระบบเย็นตัวลง หรือสารหน่วงไฟที่เกิดการสลายตัวนี้สลายด้วยปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ได้น้ำระเหยออกมาเป็นผลิตภัณฑ์อีกด้วย น้ำจะถ่ายเทความร้อนแล้วลดอุณหภูมิพื้นผิวเส้นใย ทำให้พื้นผิวเส้นใยเย็นลง ระบบเย็นตัวลงเช่นกัน จึงลดพลังงานของระบบอีกทางทำให้มีไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้แบบสายโซ่ได้

สารหน่วงไฟที่ขัดขวางทางกายภาพด้วยการเกิดชั้นเคลือบบนผิวเส้นใย สารหน่วงไฟในกลุ่มนี้รวมถึงเกลืออินทรีรี่ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ ตัวอย่างของสารหน่วงไฟในกลุ่มนี้ เช่น บอริกบอแรกซ์ ซิลิเกต ฟอสเฟต และพอลิฟอสเฟต ชั้นเคลือบนี้เกิดจากการหลอมละลายของสารหน่วงไฟเมื่อเส้นใยได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิการเผาไหม้ ซึ่งชั้นเคลือบของสารหน่วงไฟบนผิวหน้าเส้นใยนี้จะต้องเสถียรจนถึงอุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส การที่มีชั้นเคลือบจะขัดขวางไม่ให้แก๊สออกซิเจนเข้ามาสัมผัสกับเส้นใย ในขณะที่เดียวกันก็กักขังไอระเหยที่สามารถถูกติดไฟที่เกิดจากการสลายตัวของเส้นใยไปสู่ผิวหน้าของเส้นใย เป็นการแยกเชื้อเพลิงออกจากออกซิเจน ทำให้เส้นใยไม่เกิดการเผาไหม้ นอกจากนี้ยังช่วยลดการถ่ายเทความร้อนจากจุดที่เกิดการติดไฟไปยังจุดอื่น ๆ ทำให้เปลวไฟไม่เกิดการลุกลามต่อ

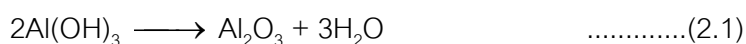
สารหน่วงไฟที่ขัดขวางทางกายภาพด้วยการปลดปล่อยแก๊สที่ไม่ติดไฟ ได้แก่โซเดียมคาร์บอเนตโซเดียมโบคาร์บอเนต แอมโมเนียมเฮไลด์ ซิงค์คลอไรด์ แคลเซียมซัลเฟต แมกนีเซียม

ซัลเฟต อะลูมิเนียมซัลเฟต แอมโมเนียมซัลเฟต และฟอสเฟต เส้นใยเกิดการสลายตัวได้แก๊สไฮโดรคาร์บอนที่เป็นแก๊สที่ติดไฟได้ง่าย แต่สารหน่วงไฟในกลุ่มนี้เมื่อติดไฟแล้วจะสลายตัวให้แก๊สที่ติดไฟยากหรือไม่ติดไฟ เช่น แก๊สไนโตรเจน แก๊สแอมโมเนียม แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แก๊สไฮโดรเจนคลอไรด์ และไอน้ำ เป็นต้น เมื่อมีปริมาณแก๊สเหล่านี้เพิ่มขึ้นจึงเจือจางแก๊สที่ติดไฟง่ายให้มีความเข้มข้นต่ำกว่าจุดที่ติดไฟได้ และทำให้ปริมาณออกซิเจนภายในเส้นใยลดลง เส้นใยไม่สามารถเกิดการเผาไหม้ต่อไปได้

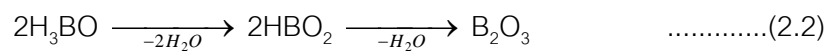
สารหน่วงไฟที่ขัดขวางทางเคมี ในวัฏภาคแก๊ส เช่น สารประกอบฮาโลเจน และการทำงานของสารหน่วงไฟที่เป็นสารประกอบฮาโลเจนและแอนติโมนีออกไซด์ เมื่อโดนความร้อนจะเกิดอนุมูลอิสระที่สามารถไปจับกับอนุมูลอิสระที่เกิดจากการเผาไหม้ของเส้นใยได้ เช่น H<sup>•</sup> และ HO<sup>•</sup> กลายเป็นแก๊สซึ่งทำให้ปฏิกิริยาการขยายตัวของสายโซ่อนุมูลอิสระสิ้นสุด การลุกไหม้ก็จะสิ้นสุดลง

สารหน่วงไฟที่ขัดขวางทางเคมี ในวัฏภาคของแข็ง เช่น สารประกอบประกอบฟอสฟอรัส และสารประกอบฟอสฟอรัสและไนโตรเจน จะทำหน้าที่แยกส่วนที่มีการลุกติดไฟกับส่วนที่ยังไม่ลุกติดไฟ เพื่อให้ไฟไม่สามารถลุกลามไปถึงส่วนนั้นได้ ด้วยการเร่งให้เส้นใยเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำลง แล้วเกิดชาร์ โดยเร่งให้วัสดุทำปฏิกิริยากับกรดลิวอิสผ่านคาร์บอนเนียมไอออน เกิดการดีไฮเดรชันของเส้นใยแล้วเกิดการเชื่อมโยงกันเป็นร่างแห หรือก็คือเกิดชาร์ ชาร์ที่ปกคลุมผิวเส้นใยนี้ ทำให้ผิวหน้าเส้นใยไม่สัมผัสกับความร้อน และแก๊สติดไฟง่าย[17]

สารหน่วงไฟประเภทโลหะไฮดรอกไซด์ เช่น อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ เมื่อสารหน่วงไฟชนิดนี้ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 180-200 องศาเซลเซียส อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จะเกิดการแตกตัว ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะดูดความร้อนบางส่วนไปใช้ในการขจัดน้ำออกเกิดเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ แสดงดังสมการที่ 2.1 ซึ่งไอน้ำที่เกิดขึ้นนี้จะไปเจือจางแก๊สที่ติดไฟได้ง่าย และช่วยป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าไปใกล้พื้นผิวของวัสดุส่วนการเกิดอะลูมิเนียมออกไซด์จะช่วยทำให้เกิดชาร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันความร้อนให้แก่พื้นผิวของวัสดุ และมีสมบัติในการลดควันที่เกิดจากการเผาไหม้



สารหน่วงไฟประเภทที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ กรดบอริก เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อนที่อุณหภูมิสองช่วงคือประมาณ 130-200 องศาเซลเซียส และ 260-270 องศาเซลเซียส เกิดการสลายน้ำออกเกิดเป็นบอริกออกไซด์ ดังแสดงในสมการที่ 2.2 ที่อุณหภูมิประมาณ 325 องศาเซลเซียสบอริกออกไซด์จะหลอมเหลวและไหลปกคลุมทั่วพื้นผิววัสดุที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส เคลือบผิวเส้นใย ชัดขวางการสัมผัสของเชื้อเพลิงกับเปลวไฟและแก๊สออกซิเจน



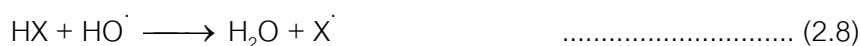
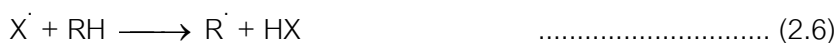
สารหน่วงไฟประเภทฮาโลเจน ที่นิยมใช้คือโบรมิเนตเต็ดอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (brominated aromatic hydrocarbon) ซึ่งจะมีประสิทธิภาพดีเมื่อวงแหวนอะโรมาติกถูกแทนที่ทุกตำแหน่ง เช่น เดคาโบรมิไดฟีนิลออกไซด์ (decabromodiphenyloxide) แต่เนื่องจากส่วนหน่วงไฟที่มีโบรมินเป็นองค์ประกอบสามารถสลายตัวได้เมื่อถูกแสงหากต้องการความคงทนต่อแสง สารหน่วงไฟที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบจะให้ประสิทธิภาพมากกว่า สารหน่วงไฟประเภทนี้ที่นิยมใช้คือ คลอรีเนตเต็ดพาราฟิน (chlorinated paraffin) ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ถูกนำมาทำปฏิกิริยากับคลอรีนเพื่อให้มีธาตุคลอรีนเป็นองค์ประกอบในโมเลกุล โดยมีส่วนประกอบของคลอรีนอยู่ประมาณ 30-70% โดยน้ำหนัก สารหน่วงไฟชนิดนี้ยังช่วยปรับปรุงสมบัติของเรซินที่ถูกนำไปผสมให้พลาสติกใสต์มากขึ้น

สารหน่วงไฟประเภทฮาโลเจน เมื่อถูกเผาไหม้จะปลดปล่อยอนุมูลอิสระของธาตุฮาโลเจน ไอออนเข้าสู่บริเวณที่เกิดการลุกไหม้ มีอนุมูลอิสระของแก๊สที่ติดไฟง่ายอื่นๆที่เป็นผลมาจากปฏิกิริยาการเผาไหม้เส้นใย ดังแสดงในสมการที่ 2.3 และ 2.4



เมื่ออนุมูลอิสระของธาตุไฮโดรเจนนี้มาจับกับอนุมูลอิสระของธาตุฮาโลเจน จะทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนเฮไลด์ (HCl) หรือ ไฮโดรเจนโบรไมด์ (HBr) ซึ่งมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้

ลดลง ดังนั้นสารประกอบฮาโลเจนสามารถเรียกได้ว่าเป็นตัวดักจับอนุมูลอิสระ (free radical scavengers) ทำให้สามารถลดอัตราการลุกลามของการเผาไหม้ได้ แสดงดังสมการที่ 2.5 ถึง 2.8



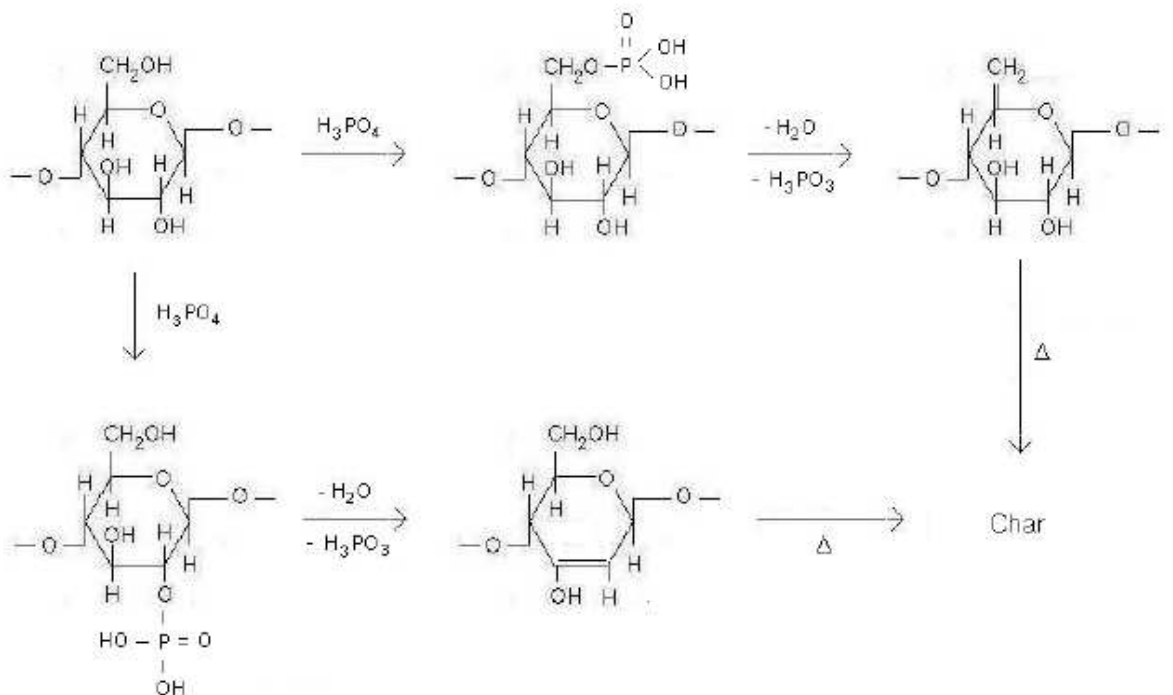
โดยที่ RX คือ สารหน่วงไฟที่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ X (คือ Cl หรือ Br) จากนั้นอนุมูลอิสระ X ทำปฏิกิริยากับสารพอลิเมอร์ RH เช่น เซลลูโลสเกิดเป็นแก๊สไฮโดรเจนเฮไลด์ (HCl) หรือ ไฮโดรเจนโบรไมด์ (HBr) ซึ่งสามารถจับกับอนุมูลอิสระ  $H\cdot$  และ  $HO\cdot$

สำหรับสารหน่วงไฟที่เป็นสารประกอบฟอสฟอรัส ตัวอย่างของสารประกอบของสารหน่วงไฟประเภทนี้ ได้แก่ ออร์กาโนฟอสฟอรัสบางชนิดซึ่งเป็นสารประกอบฟอสเฟต ฟอสเฟตเอสเทอร์ ได้แก่ Tris (2-chloroethyl) phosphate (TCEP) นอกจากนี้สารหน่วงไฟที่มีฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบที่ใช้กันโดยทั่วไป คือ ไอโซโพรพิลไตรฟีนิลฟอสเฟต (isopropyltriphenylphosphate) อัลคิลไดเอริลฟอสเฟต (alkyldiarylphosphate) และกรดฟอสฟอริก โดยไอโซโพรพิลไตรฟีนิลฟอสเฟต และอัลคิลไดเอริลฟอสเฟตมีสมบัติเป็นพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) จึงนิยมใช้ในการตกแต่งหน่วงไฟพอลิไวนิลคลอไรด์ ในขณะที่กรดฟอสฟอริกนิยมใช้ตกแต่งหน่วงไฟในวัสดุจำพวกเซลลูโลส แต่เนื่องจากกรดฟอสฟอริกมีการกัดกร่อนสูง จึงนิยมใช้ในรูปที่เป็นเกลือ เช่น แอมโมเนียมฟอสเฟต ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต อย่างไรก็ตามกรดฟอสฟอริกและสารที่เป็นเกลือสามารถละลายน้ำได้ง่าย จึงไม่คงทนต่อการใช้งานที่ต้องผ่านการซักล้าง

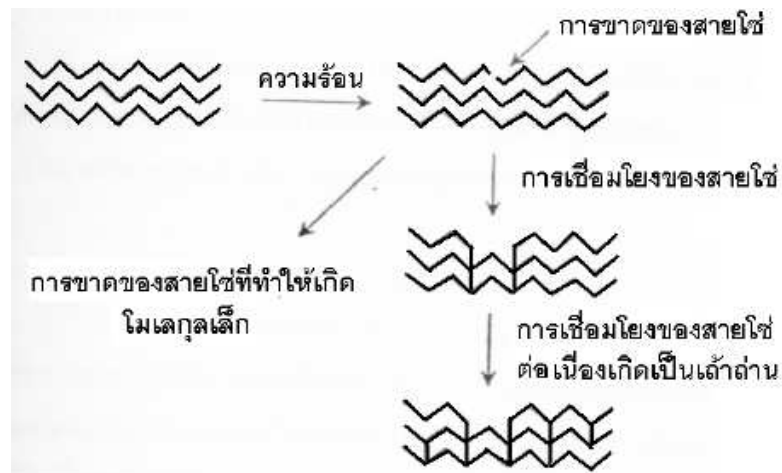
สารหน่วงไฟที่ประกอบด้วยฟอสฟอรัสมักเกิดการหน่วงไฟทั้งในวัฏภาคของแข็งและวัฏภาคแก๊สโดยในวัฏภาคแก๊สสารหน่วงไฟจะระเหยกลายเป็นไอ เกิดในรูปอนุมูลอิสระ  $PO\cdot$  แล้วเข้าขัดขวางการลุกลามไหม้โดยการจับอนุมูลอิสระที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา ( $H\cdot$  และ  $HO\cdot$ ) ดังสมการที่ 2.9 ถึง 2.12



ส่วนในวัฏภาคของแข็ง สารหน่วงไฟเมื่อได้รับความร้อนแล้วจะสลายตัวไปเป็นกรดฟอสฟอริก หรือ กรดพอลิฟอสฟอริก ซึ่งกรดที่เกิดขึ้นนี้จะเข้าไป เอสเทอร์ฟายหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลส เกิดชั้นของเหลวหนืดปกคลุมผิวของวัสดุเพื่อป้องกันไม่ให้เปลวไฟและแก๊สออกซิเจนสัมผัสกับเซลลูโลส และ กรดที่เกิดขึ้นยังเป็นตัวทำให้เกิดการขจัดน้ำ (dehydrating agent) โดยการทำปฏิกิริยากับ ไฮดรอกซิลคาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของแอนไฮโดรกลูโคส เพื่อสร้างชั้นของชาร์และไอน้ำที่เกิดขึ้นจะช่วยเจือจางแก๊สที่ติดไฟได้ง่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.11 และ 2.12

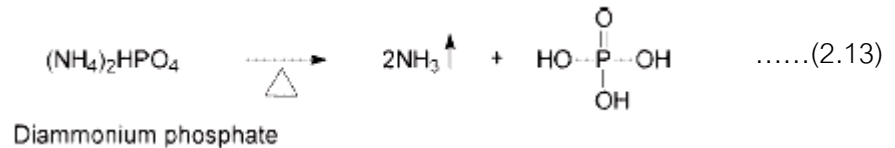


รูปที่ 2.13 การฟอสฟอริเลชันของเซลลูโลส [1]



รูปที่ 2.14 การเกิดชาร์ [1]

การสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนของ Diammonium hydrogen phosphate [12] เป็นไปดังสมการที่ 2.13



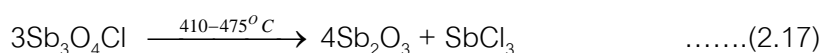
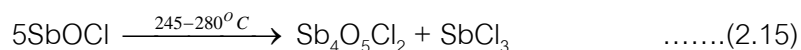
สารหน่วงไฟประเภทไนโตรเจนนี้ได้แก่ เมลามีน เมลามีนไซยานูเรตเมทิลอลดเมลา-มีน สารประกอบกัวนิติน ยูเรีย ไซยานาไดเอไมด์ โดยสารหน่วงไฟประเภทนี้ทำหน้าที่ในรูปของการเกิดอินทูเมสเซนส์ (intumescent) ซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดการพองตัวเป็นชั้นของชาร์ที่มีลักษณะคล้ายโฟมที่ทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันความร้อนและการสัมผัสกับออกซิเจนให้แก่วัสดุ

## 2.8 ระบบการหน่วงไฟที่มีการเสริมกัน (Synergisms) [1]

ระบบการหน่วงไฟที่มีการเสริมกัน คือ การนำสารที่มีองค์ประกอบ 2 ชนิดที่แตกต่างกันมาใช้ร่วมกัน แล้วส่งผลให้มีสมบัติในการหน่วงไฟที่เสริมกัน มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟมากกว่าการใช้สารตัวใดตัวหนึ่งเพียงตัวเดียว โดยส่วนใหญ่สารหน่วงไฟที่นำมาใช้ร่วมกันในปัจจุบันแบ่งเป็น 3 ประเภทได้แก่ ฮาโลเจนและแอนติโมนี ฟอสฟอรัสและฮาโลเจน และประเภทฟอสฟอรัสและไนโตรเจน

### 1) แฮโลเจนและแอนติโมนี

ระบบการหน่วงไฟที่มีการเสริมกันระหว่างเกลือของโลหะ เช่น แอนติโมนีไตรออกไซด์ ( $Sb_2O_3$ ) กับสารหน่วงไฟที่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ ตัวอย่างดังสมการที่ 2.14 ถึง 2.17 ที่แอนติโมนีไตรออกไซด์เกิดปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเฮไลด์ เกิดเป็นแอนติโมนีไตรเฮไลด์ ( $SbX_3$ ) และน้ำ แอนติโมนีไตรเฮไลด์ เกิดผ่านแอนติโมนีออกซีเฮไลด์ แอนติโมนีไตรเฮไลด์นี้จะดับจับอนุมูลอิสระที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ เช่นเดียวกับ  $HCl$  หรือ  $HBr$  ดังสมการที่ 2.18 ถึง 2.20





## 2) ฟอสฟอรัสและฮาโลเจน

ระบบการหน่วงไฟที่มีการเสริมกันระหว่างสารสองชนิดนี้จะอยู่ในรูปของ ฟอสฟอรัสเฮไลด์ และฟอสฟอรัสออกซีเฮไลด์ ซึ่งจะทำหน้าที่ดักจับอนุมูลอิสระเพื่อหยุดการขยายสายโซ่ของกระบวนการเผาไหม้ เช่น สารประกอบไวนิลโบรโมฟอสเฟต นิยมใช้ในเทอร์โมพลาสติก ถึงแม้ว่าสารฟอสฟอรัสและฮาโลเจนนี้มีการทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพ แต่ก็พบปัญหาความเป็นพิษของสารประกอบฮาโลเจน เช่น ทริส-2,3-ไดโบรโมโพรพิลฟอสเฟต ทริส (ไดคลอโรโพรพิล) ฟอสเฟต ทริส (2-ไดคลอโรเอทิล) ฟอสเฟต [16]

## 3) ฟอสฟอรัสและไนโตรเจน

สารประกอบไนโตรเจนหากนำมาใช้เพียงชนิดเดียว จะไม่มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดี ดังนั้นจึงมีการนำสารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสและไนโตรเจนมาใช้ร่วมกัน เนื่องจากสารประกอบไนโตรเจนทำหน้าที่เป็นนิวคลีโอไฟล์ ซึ่งทำให้เกิดการสร้างพันธะของสารประกอบฟอสฟอรัสกับสารประกอบไนโตรเจน และเมื่อเกิดการสลายตัวของสารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบไปเป็นกรดฟอสฟอริกแล้ว จะช่วยให้กรดฟอสฟอริกทำปฏิกิริยาฟอสฟอริเลชันกับเซลลูโลสได้ง่ายขึ้น เนื่องจากช่วยเพิ่มสภาพความเป็นบวก (electrophilicity) ของฟอสฟอรัส ซึ่งจะสามารถดีไฮเดรตเซลลูโลสสร้างชั้นซาร์ และสามารถปลดปล่อยแก๊สไนโตรเจนและแอมโมเนียมาเจือจางแก๊สที่ติดไฟ

## 2.9 แร่ดิน (clay minerals) [1]

แร่ดินเป็นสารประกอบจำพวกไฮดรอกไซด์อะลูมิเนียมซิลิเกต (hydrous aluminous silicate) มีสมบัติ plasticity เมื่อผสมกับน้ำและเมื่อนำไปอบแห้งจะเปราะโดย plasticity ของแร่ดินขึ้นกับธรรมชาติ และความละเอียดของแร่ดิน ถ้าละเอียดมากแร่ดินจะมี plasticity สูง แร่ดินส่วนใหญ่มีโครงสร้างแบบแผ่น (sheet silicate) จัดอยู่ในพวก phyllosilicates ประกอบด้วยชั้นของอะลูมิเนียมออกเตดราฮีดรอน (Al-octahedral) และซิลิกอนเตตระฮีดรอน (Si-tetrahedral) และในระหว่างชั้นรอยต่อของชุด (interlayer) อาจมีไอออนของโลหะ เช่น เหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม โพแทสเซียม หรือโมเลกุลของน้ำแทรกอยู่ ทำให้ดินแต่ละชนิดมีสมบัติแตกต่างกัน กลุ่มแร่ดินที่สำคัญได้แก่ illite, kaolinite, smectite และ vermiculite ยกเว้นแอตตาปุลไกต์ (attapulgite) หรือรู้จักในนาม ปาลิโกร์สไกต์ (palygorskite) มีโครงสร้างต่อเนื่องกันเป็นลูกโซ่ (chain silicate) แร่ดินในธรรมชาติสามารถแบ่งแยกตามโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีได้ 4 กลุ่ม ดังนี้

- 1) Kaolinite มีสูตรเคมีทั่วไป คือ  $2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  มีโครงสร้างแบบแผ่นชนิด 1:1 ประกอบด้วยชั้นซิลิกาเรียงสลับกับชั้นอะลูมินา
- 2) Illite มีสูตรเคมีทั่วไปดังนี้ คือ  $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$  เป็นแร่ดินชนิด 2:1 ในหน่วยโครงสร้างจะมีชั้นซิลิกา 2 ชั้น ประกบชั้นอะลูมินาอยู่และในแต่ละหน่วยมีประจุบวกของโพแทสเซียมแทรกอยู่ ทำให้ดินกลุ่มนี้ไม่สามารถพองตัวในน้ำได้
- 3) Smectite มีสูตรเคมีทั่วไปดังนี้ คือ  $\text{M}_x(\text{Al}_{4-x}\text{Mg}_x)\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4$  โดย M คือ cation โครงสร้างเป็นชนิด 2:1 เหมือนกลุ่มอิลไลต์ แต่ในชั้นโครงสร้างมีโมเลกุลของน้ำแทรกอยู่ และประจุบวกส่วนใหญ่ที่พบเป็น แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็กและโซเดียม แร่กลุ่มนี้มีความสามารถในการพองตัวในน้ำได้ดี
- 4) Vermiculite มีสูตรเคมีทั่วไปดังนี้ คือ  $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  มีโครงสร้างเหมือน smectite แต่มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุสูงกว่า

แร่ดินที่นิยมนำมาใช้งานส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่ม kaolinite และ smectite โดยกลุ่ม kaolinite นิยมนำมาเป็นส่วนผสมในการทำผลิตภัณฑ์เซรามิกเช่น กระจก เบื้อง ถ้วยชาม และสุขภัณฑ์ เป็นต้น สำหรับกลุ่ม smectite ที่รู้จักกันดีได้แก่ มอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite) ซึ่งนิยมนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมสี หมึกพิมพ์ กระดาษ หรือใช้เป็นโคลนขุดเจาะ (drilling mud) และเป็นสารหล่อลื่น ปัจจุบันนี้นักวิทยาศาสตร์ได้พยายามอาศัยสมบัติของแร่ดินกลุ่มนี้เพื่อเป็น

ประโยชน์ในการใช้งานให้หลากหลายและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยใช้เทคนิคการปรับเปลี่ยนสภาพพื้นผิวให้ได้ดินที่ชอบสารอินทรีย์หรือที่รู้จักกันทั่วไปว่า ออร์กาโนฟิลิกเคลย์ (organophilic clay) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในระบบที่ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ได้ เช่น ใช้เป็นสารปรับความหนืดในสี หมึก พิมพ์และจาระบี

แร่ดินมีจุดเด่น คือ มีโครงสร้างผลึกที่เป็นแผ่นหรือชั้นเรียงซ้อนกัน ทำให้มีความยืดหยุ่น และมีความเป็นขั้ว พบความร้อนสูงได้ดี เพราะซิลิเกตเป็นฉนวนที่ดี การเผาไหม้จะให้ชาร์ ปกคลุมที่ผิวหน้า จึงไม่ลามไฟ และไฟดับอย่างรวดเร็ว

### 2.9.1 ดินเบนโทไนต์ (bentonite) [18, 19]

ดินชนิดนี้ประกอบด้วยแร่ดินเหนียวชนิดมอนต์มอริลโลไนต์เป็นองค์ประกอบหลัก รองลงมา ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ เหล็กออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ มอนต์มอริลโลไนต์ทำให้ดินเบนโทไนต์มีสมบัติในการดูดซับที่ดี และสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้ อย่างไรก็ตาม สมบัติของดินยังต่างกันไปในด้านความสามารถในการดูดซับ และในการแลกเปลี่ยนไอออนซึ่งขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมีของมอนต์มอริลโลไนต์ ตัวอย่างเช่น มอนต์มอริลโลไนต์ที่มีไอออนโซเดียมแทนที่อยู่ในโครงสร้างเป็นปริมาณมาก จะมีสมบัติในการดูดซับน้ำและเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับสิ่งแวดล้อมได้ดีกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ที่มีไอออนแคลเซียมหรือโพแทสเซียมแทนที่ดินเบนโทไนต์ ดินเบนโทไนต์ที่ใช้งานมากในอุตสาหกรรม สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

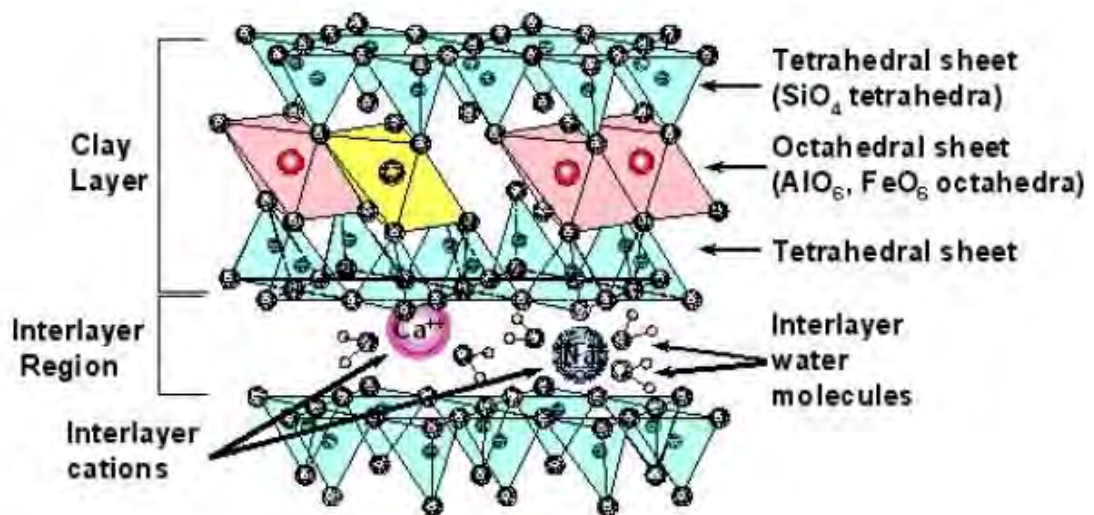
- Natural sodium bentonite หรือ sodium montmorillonite เป็นการแลกเปลี่ยน  $\text{Na}^+$
- Natural calcium bentonite หรือ calcium montmorillonite เป็นการแลกเปลี่ยน  $\text{Ca}^{++}$
- Sodium activated bentonite หรือ sodium activated montmorillonite เป็นการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้า  $\text{Ca}^{++}$  เป็น  $\text{Na}^+$

แหล่งดินเบนโทไนต์ที่สำคัญของโลกอยู่ที่เมืองไวโอมิง (Wyoming) ประเทศสหรัฐอเมริกา รองลงมาได้แก่ กลุ่มประเทศอิสระที่แยกตัวจากรัสเซียเดิม (CIS) ประเทศกรีซ เยอรมัน ญี่ปุ่น และตุรกี โดยคิดเป็นร้อยละ 84 ของกำลังการผลิตโลกในปี 1995 และจากการสำรวจแหล่งดินเบนโทไนต์พบว่าปริมาณสำรองอยู่ 1452 ล้านตัน ในขณะที่ มีปริมาณการใช้เฉลี่ยอยู่ที่ 9.8 ล้านตันต่อปี ในปี 1997-1998 พบว่าราคาเฉลี่ยของดินชนิดนี้อยู่ที่ 98 เหรียญ

สหรัฐต่อต้าน และเมื่อผ่านกระบวนการต่าง ๆ แล้ว ราคาจะอยู่ในช่วงกว้างตั้งแต่ 50 ถึง 250 เหรียญสหรัฐต่อต้าน ขึ้นอยู่กับสมบัติ ปริมาณและความต้องการ สำหรับประเทศไทย ดินเบนโทไนต์นี้จะพบมากในอำเภอชัยบาดาล จังหวัดลพบุรี เป็นชนิดแคลเซียมเบนโทไนต์ ดินเบนโทไนต์ ซึ่งเป็นดินชนิดหนึ่ง ที่มีการนำมาใช้งานในหลาย ๆ ด้าน อาทิเช่น การใช้เป็นสารหล่อเย็นในการขุดเจาะสำหรับงานโยธา การใช้เป็นสารฟอกสี หรือสารดูดซึม เพื่อทำความสะอาดในอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมัน การใช้เป็นสารตัวเติม (filler) เพื่อเพิ่มปริมาณเนื้อสาร หรือใช้ในการปรับความหนืดสำหรับอุตสาหกรรมสีและหมึกพิมพ์ และจากสมบัติของดินเบนโทไนต์ในการดูดซับที่ดี ทำให้มีการนำมาใช้เป็นสารดูดซับกลิ่นของเสีย ที่เกิดจากการขับถ่ายของสัตว์เลี้ยง วางขายตามร้านค้าทั่วไป ซึ่งจะเห็นได้ว่าดินเบนโทไนต์มีประโยชน์มาก ควรที่เราจะได้รู้จักเกี่ยวกับดินเบนโทไนต์ให้มากขึ้น

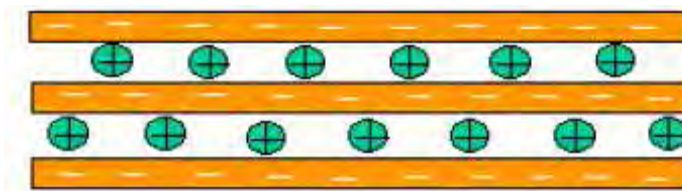
### 2.9.2 มอนต์มอริลโลไนต์(Montmorillonite) [1]

สูตรเคมี คือ  $Al_4Si_8O_{20}(OH)_4 \cdot nH_2O$  มอนต์มอริลโลไนต์เป็นแร่ดินเหนียวที่มีโครงสร้างซ้อนทับกัน ซึ่งประกอบด้วยชั้นของแผ่นอะลูมิเนียม โดยชั้นตรงกลางเป็นชั้นของอะลูมินาที่ถูกประกบบนและล่างด้วยชั้นซิลิกา แต่แต่ละชั้นมีความหนาน้อยกว่า 1 นาโนเมตร และมีความยาวมากกว่าความหนา 200 เท่า ระหว่างชั้นจะมีช่องว่างขนาดเล็กเรียกว่า gallery ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ [1]

ในช่องว่างจะมี cation ได้แก่ โซเดียมไอออน หรือแคลเซียมไอออน จะทำหน้าที่ยึดชั้นของดินที่มีประจุลบเอาไว้ด้วยกัน จึงทำให้ชั้นของดินยึดติดแน่นดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.16 การยึดติดกันระหว่างชั้นของดินกับประจุบวกที่อยู่ระหว่างชั้นของดิน [1]

มอนต์มอริลโลไนต์มีสมบัติชอบน้ำ จึงทำให้ผสมและเกิดอันตรกิริยา (interaction) กับพอลิเมอร์ไดยาก จำเป็นต้องทำการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ (modified montmorillonite) เพื่อให้สามารถเข้ารวมเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ได้ดียิ่งขึ้น โดยมอนต์มอริลโลไนต์ช่วยเสริมแรงให้กับพลาสติก ทำให้สมบัติบางอย่างของพลาสติกดีขึ้น เช่น ความต้านแรงดึง ความต้านการดัดโค้ง (flexural strength) และความทนความร้อน (heat resistance) ซึ่งได้มีการเปิดเผยครั้งแรกโดยทีมงานวิจัยที่ห้องปฏิบัติการบริษัทผู้ผลิตรถยนต์รายใหญ่ในประเทศญี่ปุ่น คือ บริษัทโตโยต้า โดยนำมอนต์มอริลโลไนต์มาเสริมแรงให้กับไนลอน 6 เพื่อผลิตชิ้นส่วนรถยนต์

## 2.10 อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminium hydroxide) [20, 21]

ในธรรมชาติรู้จักกันในชื่อ กิบบไซต์ (gibbsite) มีลักษณะเป็นผงผลึกสีขาว ผลิตจากหินบอกไซต์ หินบอกไซต์นี้เป็นหินมีต้นกำเนิดแบบ supergene ในลักษณะภูมิอากาศกึ่งเขตร้อนถึงเขตร้อน โดยมีการผุสลายและซึมชะซิลิกาจากหินที่มีอะลูมิเนียมหรือพวก alkali เช่น Na, K, Mg, Ca ประกอบอยู่ออกไป นอกจากนี้ยังอาจมาจากการ ผุสลายของดินที่มีหินปูน เกิดในลักษณะตกตะกอนเป็นเม็ดๆ อาจเกิดในที่โดยมาจากหินต้นกำเนิดโดยตรงหรือถูกพัดพามาสะสมในชั้นหินตะกอน ในแหล่งเขตร้อนจะเป็นศิลาแลง Laterites ซึ่งประกอบด้วยไฮดรอกไซด์อะลูมิเนียม และเหล็กออกไซด์ ทั้งนี้โดยมีส่วนประกอบผันแปรต่างๆ กันแต่ละแห่ง แต่หลายแห่งที่เข้าใจว่าเป็นศิลาแลงอาจเป็นต้นกำเนิดของแร่อะลูมิเนียม หรือแร่เหล็กที่สำคัญ ปัจจุบันยังไม่พบในประเทศไทย

ในทางการค้าผลิตด้วยกระบวนการ Bayer เกรดที่ใช้ห่อวงไฟอาจมีธาตุอื่นเจือปนบ้างเล็กน้อยในหน่วย ppm ได้แก่ Ca, Mg, Zn, Ti, V, Mn, Fe, and Si

การใช้งานอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ถูกใช้เป็นสารห่อวงไฟทั้งใน พลาสติก สี ยาง และ กาว อุตสาหกรรม อีกทั้งยังถูกใช้เป็นฟลักเมนต์ใน กระดาษ การเคลือบกระดาษ การเคลือบในเชิง

อุตสาหกรรม และสีชนิดวอเตอร์เบส อีกเช่นกันอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ถูกใส่ลงในยาสีพื้นเพื่อเป็นสารขัด เป็นวัตถุดิบสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้ผลิตเป็นสารประกอบอะลูมิเนียมอื่น ๆ ด้วยการทำ calcination

ในด้านสุขอนามัยสิ่งแวดล้อมการใช้งานอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ไม่จำเป็นต้องมีการป้องกันเป็นพิเศษ ยกเว้นเมื่อใช้ในลักษณะที่อนุภาคเป็นผงละเอียดควรใช้ผ้าคลุม แว่นตาและหน้ากากอนามัยตามปกติเพื่อป้องกันฝุ่นผง

ความจริงแล้วอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์แทบไม่ละลายในน้ำ ในช่วง pH 3.5-10.5 มีค่าการละลายเพียง 1.5 กรัมของไอออนของโลหะ  $Al^{3+}$  ต่อลิตรเท่านั้นที่ pH 7 อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เนื่องจากสามารถละลายได้น้ำน้อยจึงไม่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำ ซึ่งจะเป็นพิษเมื่อมีค่าการละลายมากกว่า 10 กรัมต่อลิตร ส่วนอะลูมิเนียมไอออนที่มีอยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติ เกิดจากอะลูมิเนียมในธรรมชาติ หรือการละลายของสารประกอบอะลูมิเนียมเช่น อะลูมิเนียมซัลเฟต ซึ่งใช้ในการบำบัดน้ำเสีย

เนื่องจากการผลิตในรูปแบบอุตสาหกรรมจึงมีปริมาณมาก ราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ใช้เป็นสารหน่วงไฟชนิดสารเติมแต่งใช้ใน organic/polymeric matrix ที่เผาไหม้ได้ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์หน่วงไฟได้เนื่องจากการสลายตัวแบบดูดความร้อน แล้วเกิดเป็น อะลูมิเนียมออกไซด์กับน้ำ กระบวนการนี้จึงลดพลังงาน เจ็อบางแก๊สที่ไวต่อการเผาไหม้และทำให้เกิดชั้นปกคลุมของออกไซด์ขัดขวางการเข้าของออกซิเจนและทำให้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เป็นสารหน่วงไฟ

## 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chen และคณะ [22] ได้ตกแต่งผ้าพอลิเอสเตอร์ด้วยสารหน่วงไฟคือ poly(2-hydroxy propylene spirocyclic pentaerythritol bisphosphonate) หรือ PPPBP จากการศึกษาหุ้ม ฟังก์ชันและส่วนประกอบของซาร์ที่เกิดบนผ้าพอลิเอสเตอร์ด้วยเทคนิค FTIR ร่วมกับเทคนิค XPS และวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของผ้าหลังการเผาไหม้ด้วยภาพถ่าย SEM พบว่ามีหุ้มฟังก์ชันและ ส่วนประกอบของซาร์คือกรดฟอสฟอริกหรือกรดพอลิฟอสฟอริก ซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการหน่วงไฟ และด้านการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์

จากทั้งงานวิจัยของ Tian และคณะ [23] และงานวิจัยของ Kandola และคณะ [24]สรุป ได้ว่าสารประกอบฟอสฟอรัส เช่นเกลือแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต หรือออร์กาโนฟอสฟอรัส พบว่ามีประสิทธิภาพการหน่วงไฟที่ดี เนื่องจากมีกลไกการหน่วงไฟทั้งในวัฏภาคแก๊สและของแข็ง โดยในวัฏภาคแก๊ส อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นเข้าขัดขวางการลุกลามไหม้ด้วยการจับกับอนุมูลอิสระที่ว่องไว ในการเกิดปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้สิ้นสุดลง ส่วนในวัฏภาคของแข็งสารประกอบ ฟอสฟอรัส ทำให้เกิดชั้นซาร์ที่มีความคงทนต่อความร้อนปกคลุมผิวหน้าของวัสดุไม่ให้พื้นผิววัสดุ สัมผัสกับความร้อนและป้องกันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแก๊สออกซิเจนภายนอกกับแก๊สที่ติดไฟ ง่ายและยังมีการขจัดน้ำออกมาเป็นการลดความร้อนที่เกิดขึ้น อีกทั้งสารนี้ยังไม่ให้แก๊สพิษที่เป็น อันตรายออกมาอีกด้วย อย่างไรก็ตามมีรายงานว่าออร์กาโนฟอสฟอรัสบางชนิดที่เป็นสารประกอบ ฟอสเฟตเอสเทอร์ ได้แก่ Tris (2-chloroethyl) phosphate (TCEP) มีพิษต่อระบบสืบพันธุ์แต่ สหภาพยุโรปก็ยังไม่ได้มีการออกข้อบังคับห้ามใช้สารหน่วงไฟประเภทนี้

นอกจากนี้ม้งานวิจัยจำนวนมากที่ใช้สารจากธรรมชาติที่ทนความร้อนได้ดีมาทดแทนสาร หน่วงไฟที่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Song และคณะ [25] ได้ศึกษา เกี่ยวกับการเตรียมนาโนคอมพอสิตจากพอลิเอสเตอร์ ออร์กาโนเคลย์ (OMT) ฟีนิลมีเทนไดไอโซไซยา เนตไดโกลคอล กลีเซอรินและสารหน่วงไฟ (MPP) โดยเตรียมนาโนคอมพอสิตแบบ PU/OMT PU/MPP PU/OMT/MPP และ PU พบว่านาโนคอมพอสิตที่มีออร์กาโนเคลย์และสารหน่วงไฟอยู่ใน ส่วนประกอบจะมีความคงทนต่อความร้อนและสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด อีกทั้งให้สมบัติด้านการหน่วง ไฟที่ดีโดยจะมีปริมาณซาร์เพิ่มขึ้น

Daimatsu และคณะ [26] ได้ศึกษาวิธีการเตรียม PMMA ให้มีความสามารถในการหน่วง ไฟโดยเติมอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่มีอนุภาคนาโนที่ดัดแปรพื้นผิวแล้ว ในปริมาณร้อยละ 3.4 โดยน้ำหนัก พบว่าการเติมอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นสารอนินทรีย์จะเพิ่มความสามารถใน การต้านไฟ เนื่องจากเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 180-200 องศาเซลเซียส

อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จะเกิดการแตกตัว ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะดูดความร้อนบางส่วนไปใช้ในการสลายน้ำออก เกิดเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ แสดงดังสมการที่ 1 ซึ่งไอน้ำที่เกิดขึ้นนี้จะไปเจือจางแก๊สที่ติดไฟได้ง่าย และยังช่วยป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าไปใกล้พื้นผิวของวัสดุ ส่วนการเกิดอะลูมิเนียมออกไซด์ ช่วยทำให้เกิดซาร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันความร้อนให้แก่พื้นผิวของวัสดุ และมีสมบัติในการลดควันที่เกิดจากการเผาไหม้ [27]

นอกจากนี้ จากงานวิจัยของภารุณี เชื้อนพวงศ์ [1] ที่ได้ศึกษาการใช้เบนโทไนต์ ผงขาวไหม และสารประกอบฟอสฟอรัสได้แก่แอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และได้แอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตเป็นสารหน่วงไฟและสารต้านการหลอมหยดสำหรับตกแต่งบนผ้าพอลิเอสเตอร์นอนวูฟเวนด้วยเทคนิคจุ่มอัด - อบให้แห้งโดยทำการตกแต่งด้วย

เบนโทไนต์และผงขาวไหมในปริมาณต่างๆที่ร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10 และเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟตร้อยละ 1 และ 3 จากการทดสอบการติดไฟแนว 45 องศา พบว่าเกลือไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตที่ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ สามารถทำให้ผ้าพอลิเอสเตอร์นอนวูฟเวนที่เมื่อติดไฟแล้วเปลวไฟดับเองได้หลังจากนำแหล่งต้นไฟออก นอกจากนี้ผ้ายังไม่เกิดการหลอมหยดอีกด้วย ส่วนผ้าที่ผ่านการตกแต่งด้วยเบนโทไนต์เพียงอย่างเดียวในปริมาณที่น้อยกว่าร้อยละ 10 ผ้ายังคงมีการลุกไหม้และเกิดการหลอมหยด แต่เมื่อปริมาณเบนโทไนต์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 10 พบว่าผ้าไม่เกิดการหลอมหยดแต่ผ้าก็ยังคงลุกไหม้ และหากเพิ่มปริมาณของเบนโทไนต์มากกว่านี้ก็จะทำให้เตรียมสารแขวนลอยยากและสารแขวนลอยที่เตรียมได้มีความหนืดมากเกินไปจนกระทั่งไม่สามารถทำการตกแต่งบนผ้าพอลิเอสเตอร์ได้อย่างสม่ำเสมอ ในขณะที่ผงขาวไหมเพียงอย่างเดียวไม่สามารถหน่วงไฟและต้านการหลอมหยดผ้าพอลิเอสเตอร์นอนวูฟเวนได้เลยและสิ่งที่หลอมหยดยังทำให้แผ่นสำลีสองรับเกิดการลุกไหม้อย่างรุนแรงอีกด้วย แต่เมื่อนำผงขาวไหมผสมกับเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟตทั้ง 2 พบว่าผ้ายังคงลุกไหม้เช่นเดิมแต่ไม่มีการหลอมหยด ที่น่าสนใจคือเมื่อผสมผงขาวไหมกับเบนโทไนต์ในอัตราส่วนของเบนโทไนต์ที่สูงกว่าได้ทำให้ผ้าต้านการหลอมหยดได้แต่เปลวไฟลุกไหม้รุนแรงและมีซาร์เหลืออยู่ จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA พบว่าผ้าที่ผ่านการตกแต่งมีอุณหภูมิการสลายตัวต่ำกว่าผ้าพอลิเอสเตอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านการตกแต่ง และมีปริมาณซาร์เหลืออยู่มากกว่าผ้าที่ไม่ผ่านการตกแต่ง

Carroll [28] ได้เติมโซเดียมเบนโทไนต์อย่างน้อยร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ลงในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 3-15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วกวนด้วยความเร็วรอบต่ำ สารแขวนลอยที่ได้จะมีความหนืดต่ำแต่ยังมีสมบัติต่างๆคงที่แม้เวลาผ่านไป

จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าการใช้ดินเบนโทไนต์ที่มีชั้นของซิลิเกตเป็นองค์ประกอบ เช่นเดียวกับเคลย์ที่มีความเข้มข้นสูงมากกว่าร้อยละ 10 ทำให้พอลิเอสเตอร์มีความคงทนต่อความ



ร้อนสูงเมื่อได้รับความร้อนจากอค์คีย์จึงสามารถด้านการหลอมหยดของผ้าได้ แต่สิ่งที่ยังเป็นปัญหาคือผ้ายังสามารถติดไฟและลุกไหม้ได้ ดังนั้นหากเราเติมสารที่ทำให้เกิดการสร้างชั้นชาร์เพิ่มขึ้น มีการขจัดน้ำออกมาเพื่อเจือจางแก๊สที่ติดไฟได้ง่ายหรือเพื่อลดอุณหภูมิในระบบลง หรือทำให้เกิดอนุมูลอิสระที่จะเข้าขัดขวางการลุกไหม้โดยการจับกับอนุมูลอิสระที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้สิ้นสุดลง เช่นการใช้ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ก็มีความเป็นไปได้ที่ผ้าพอลิเอสเตอร์อาจไม่ติดไฟหรือหากติดไฟเปลวไฟก็อาจดับเองได้

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะปรับปรุงสมบัติห่วงไฟและด้านการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์ด้วยการใช้สารที่หาได้ง่าย ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ได้แก่เกลือไดแอมโมเนียมฟอสเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เบนโทไนต์ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 10 ถึง 25 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีการปรับปรุงการเตรียมสารแขวนลอยเบนโทไนต์ให้มีความหนืดต่ำลงโดยการเติมโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก เพื่อให้ง่ายต่อการตกแต่งสำเร็จบนผ้าด้วยเทคนิคจุ่ม-อัดอบด้วยความร้อน นอกจากนี้มีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสูตรสารห่วงไฟที่เติมอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ลงไปร้อยละ 5 กับ 10 โดยน้ำหนัก คาดว่าหลังการตกแต่งด้วยสารห่วงไฟพอลิเอสเตอร์จะมีความสามารถทั้งห่วงไฟและด้านการหลอมหยดได้ดีขึ้น โดยสูตรสารห่วงไฟที่มีสารที่มีสมบัติห่วงไฟอื่นร่วมกับเบนโทไนต์เพื่อให้เกิดระบบการห่วงไฟที่มีการเสริมกัน (Synergisms) หรือใช้สารห่วงไฟใดสารหนึ่งเพียงสารเดียว

## บทที่ 3

### วิธีการทดลอง

#### 3.1 วัสดุและสารเคมี

- 1) ฝ้ายพอลิเอสเตอร์ ทอลายขัด ผลิตจากพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตหรือ เพ็ทผ่านการฟอกขาวแล้ว น้ำหนักผ้าต่อพื้นที่ 140 กรัมต่อตารางเมตร หนา 0.125 มิลลิเมตร (ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท Thainamsiri Intertek จำกัด)
- 2) เบนโทไนต์ แมคเจล sac เกรด ขนาดอนุภาคสามารถผ่านตะแกรงขนาด 200 mesh ได้มากกว่า 80 % โดยมีองค์ประกอบต่างๆดังแสดงในตารางที่ 3.1 (ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทไทยนิปลอนเคมีภัณฑ์ จำกัด)

#### ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของเบนโทไนต์

องค์ประกอบของเบนโทไนต์	ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก
SiO <sub>2</sub>	65-67
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15-17
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1-2
MgO	2-3
Na <sub>2</sub> O	1.5-2.5
CaO	1.5-2.6
K <sub>2</sub> O	0.4-0.8
TiO <sub>2</sub>	0.2-0.3

- 3) สารประกอบฟอสฟอรัสคือเกลือไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>) เกรดวิเคราะห์มวลโมเลกุล 132.06 กรัมต่อโมล ความบริสุทธิ์ 99.0% pH ของสารละลายเข้มข้น 50 กรัมต่อลิตร ที่ 25 องศาเซลเซียส ประมาณ 7.8-8.3 (จากบริษัท Wako Pure Chemical Industries จำกัด)
- 4) เกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) มวลโมเลกุล 58.44 กรัมต่อโมล ความบริสุทธิ์ 99.9% pH ของสารละลายเข้มข้น 50 g/l ที่ 25 องศาเซลเซียส ประมาณ 5-9 (จากบริษัท Asia Pacific Specialty Chemicals จำกัด)

- 5) อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) ลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว เกรดวิเคราะห์มวล  
โมเลกุล 78.00 กรัมต่อโมล มีองค์ประกอบดังแสดงในตารางที่ 3.2  
(จากบริษัท Riedel-de Haën จำกัด)

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์

องค์ประกอบของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์	ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก
Al ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	63-67
Alkali (Na)	max 0.3
Fe	max 0.01
Sulfate ( $\text{SO}_4$ )	max 0.02

- 6) ผงซักฟอกมาตรฐาน (standard soap without optical brightening agent)  
(จากบริษัท SDC ENTERPRISES จำกัด)

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

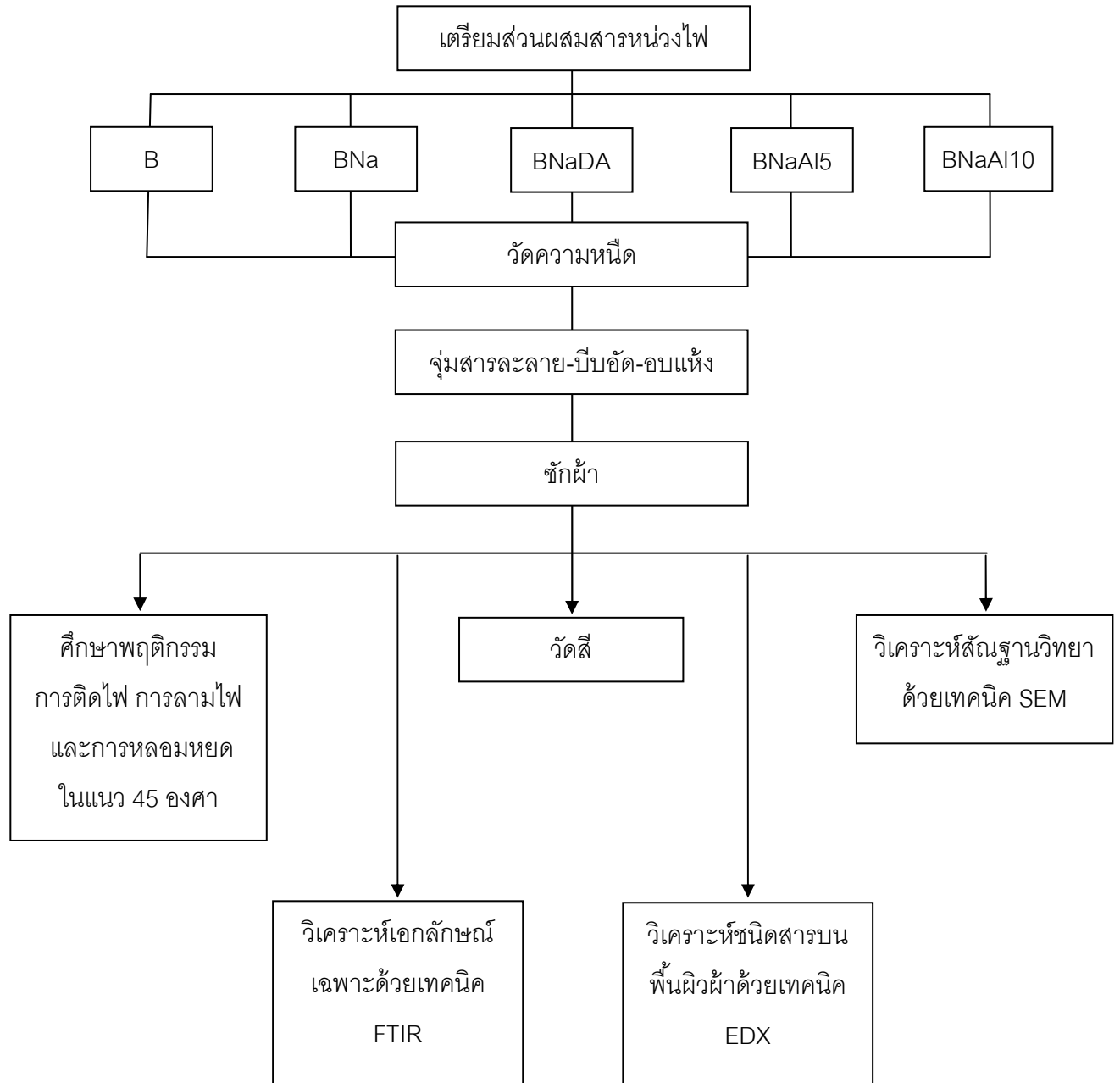
เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย แสดงในตารางที่ 3.3

#### ตารางที่ 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ชื่อเครื่องมือ	รุ่น/บริษัทผู้ผลิต
1. เครื่องจุ่มอัด (Padder)	Labtec. NewAve Lab equipment Co.,Ltd.
2. ตู้อบ (Isotemperature oven)	Fisher Scientific
3. เครื่องทดสอบหาอัตราเร็วและพฤติกรรมในการ ลุกไหม้ไฟของเปลวไฟแนว 45 องศา	Atlas 45° Automatic Flammability Tester / Atlas Chicago Illinois, USA
4. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตร มิเตอร์ (Fourier transform infrared spectro photometer, FTIR)	NICOLET 6700 FT-IR Spectrometer / Thermo Fisher Scientific Inc.
5. กล้องบันทึกภาพเคลื่อนไหว	Exilim EX-S770/ Casio
6. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM/EDX)	XL 30 CP, XL SERIES/ PHILIPS
7. เครื่องวัดสี (Reflectance Spectrophotometer)	COLOR-EYE 7000/ Macbeth
8. เครื่องวัดความหนืด (Viscometer)	Brookfield
9. เครื่องซักผ้า (Gyrowash)	James H. Heal & Co.Ltd, England

### 3.3 การดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยนี้แสดงด้วยแผนภาพดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.4 การศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารหน่วงไฟต่อการหน่วงไฟและการต้านการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์

1) การเตรียมสารตกแต่งหน่วงไฟดังสูตรที่แสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 สูตรสารตกแต่งหน่วงไฟผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ความเข้มข้นต่างๆ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

สูตร	NaCl (%)	Bentonite (%)	Diammonium hydrogen phosphate (%)	Aluminium hydroxide (%)
Untreated	-	-	-	-
B3	-	3	-	-
B5	-	5	-	-
B7	-	7	-	-
B10	-	10	-	-
B10Na	4	10	-	-
B15Na	4	15	-	-
B20Na	4	20	-	-
B25Na	4	25	-	-
B10NaDA	4	10	3	-
B15NaDA	4	15	3	-
B20NaDA	4	20	3	-
B25NaDA	4	25	3	-
B10NaAl5	4	10	-	5
B15NaAl5	4	15	-	5
B20NaAl5	4	20	-	5
B25NaAl5	4	25	-	5
B10NaAl10	4	10	-	10
B15NaAl10	4	15	-	10

### ตารางที่ 3.4 (ต่อ)

สูตร	NaCl (%)	Bentonite (%)	Diammonium hydrogen phosphate (%)	Aluminium hydroxide (%)
B20NaAl10	4	20	-	10
B25NaAl10	4	25	-	10
Na	4	-	-	-
DA	-	-	3	-
Al5	-	-	-	5
Al10	-	-	-	10

#### 2) การจุ่มอัดและอบแห้งผ้า

นำผ้าพอลิเอสเตอร์ขนาดประมาณ 20 เซนติเมตร x 20 เซนติเมตร มาขจัดความชื้นในตู้ดูดความชื้นเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง จากนั้นนำผ้าออกมาซึ่งน้ำหนักก่อนการจุ่มอัด หลังจากนั้นทำการจุ่มอัดด้วยสารแขวนลอยเบนโทไนต์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ให้มี % pick up 70 โดยใช้สูตรในการคำนวณดังสมการที่ 3.1

$$\% \text{ pick up} = [(W_1 - W_0) \times 100] / W_0 \quad \dots\dots\dots(3.1)$$

โดยที่  $W_0$  = น้ำหนักผ้าก่อนการตกแต่งห่วงไฟ

$W_1$  = น้ำหนักผ้าหลังการจุ่มอัด

จากนั้นนำผ้าที่ผ่านการจุ่มอัดไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที นำผ้าเข้าตู้ดูดความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำผ้ามาซึ่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหา % add on โดยใช้สูตรในการคำนวณดังสมการที่ 3.2

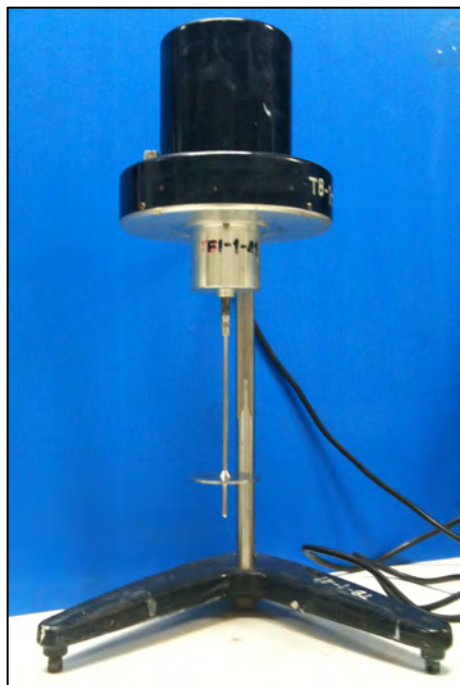
$$\% \text{ add on} = [(W_2 - W_0) \times 100] / W_0 \quad \dots\dots\dots(3.2)$$

โดยที่  $W_0$  = น้ำหนักผ้าก่อนการตกแต่งห่วงไฟ

$$W_2 = \text{น้ำหนักผ้าหลังการตกแต่งทรงไฟ}$$

### 3.5 การหาความหนืดของสารตกแต่งทรงไฟ

ในงานวิจัยนี้ได้วัดความหนืดของสารตกแต่งทรงไฟได้จาก เครื่องวัดความหนืดแบบ Rotational viscometer (Brookfield Viscometer) โดยหลักการทำงานของเครื่องวัดความหนืดแบบนี้คือการวัดหาความต้านทานต่อการไหลของของเหลว ทำการวัดความหนืดที่อุณหภูมิ  $30 \pm 2$  องศาเซลเซียส ใช้ความเร็วรอบในการทดสอบ 50 รอบต่อนาที



รูปที่ 3.2 เครื่อง Brookfield Viscometer



### 3.6 การศึกษาพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์

วัตถุประสงค์ของการทดสอบนี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟแนว 45 องศา และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟด้วยชนิดและปริมาณของสารห่วงไฟต่างๆ โดยสังเกตพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดจากกล้องบันทึกภาพเคลื่อนไหว

#### 3.6.1 วิธีทดสอบการติดไฟ

การทดสอบการติดไฟในงานวิจัยนี้มีแนวทางการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1230 โดยตัดผ้าพอลิเอสเตอร์ขนาด 5 เซนติเมตร x 16.5 เซนติเมตร ด้วยเครื่องทดสอบ Atlas 45° Automatic Flammability Tester แสดงดังรูปที่ 3.2 งานวิจัยนี้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ  $30 \pm 2$  องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ  $60 \pm 2$  โดยกำหนดเวลาที่ใช้ในการจ่อไฟนาน 5 วินาทีและได้ปูพื้นด้านล่างของเครื่องทดสอบด้วยแผ่นสำลีทางการแพทย์หนัก 694.6 มิลลิกรัมมีขนาดพื้นที่ 64 ตารางเซนติเมตร หน้า 0.5 เซนติเมตร เพื่อสังเกตการติดไฟของแผ่นสำลีหากเกิดการหลอมหยด



รูปที่ 3.3 เครื่อง Atlas 45° Automatic Flammability Tester

นำผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ยึดบน Rack มาทำการทดสอบ โดยวาง Rack บนเครื่องทดสอบด้วยมุมเอียง 45 องศา หลังจากนั้นจุดไฟให้ได้ความยาว 5/8 นิ้ว บนบริเวณพื้นผิวเหนือปลายผ้าด้านล่าง 19 มิลลิเมตร เป็นเวลา 5 วินาที และบันทึกเวลาที่เปลวไฟเคลื่อนที่ โดยบันทึกเวลาตั้งแต่ให้นำแหล่งต้นไฟออกจนเปลวไฟดับ ทำการทดสอบอย่างน้อย 3 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยสังเกตการคุ้แดงหลังเปลวไฟดับ และสังเกตการลามไฟและการหลอมหยดบนสำลีทางการแพทย์ที่รองด้านล่างของเครื่องทดสอบ

เวลาที่ใช้ในการจ่อไฟ(flame application time) คือ ระยะเวลาที่เปลวไฟจากแหล่งจุดไฟสัมผัสกับวัสดุ ก่อนถูกนำออก

เวลาการลามไฟ (afterflame time) คือ ระยะเวลาที่เปลวไฟยังคงลุกไหม้วัสดุต่อหลังจากที่แหล่งจุดไฟถูกนำออก ดังนั้นวัสดุที่มีสมบัติหน่วงไฟที่ดีไม่ควรใช้เวลาการลามไฟที่นาน

เวลาเริ่มหลอมหยด (time delay before melt dripping) คือ เวลาที่วัสดุหลอมเหลวหยดลงสู่สำลีรองรับเป็นครั้งแรก โดยเริ่มจับเวลาหลังจากนำแหล่งจุดไฟออก

### 3.7 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่ง หน่วงไฟด้วยเทคนิค ATR-FTIR

เพื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ผ่าน และผ่านการตกแต่ง  
หน่วงไฟโดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier transform infrared  
spectrometer, FTIR) แสดงดังรูปที่ 3.3 โดยนำผ้าที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟมาทำการ  
หาแถบการดูดกลืนที่เกิดจากหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ด้วยเทคนิค ATR ซึ่งสามารถบอกถึงโครงสร้างทาง  
เคมีของสารได้



รูปที่ 3.4 เครื่อง Fourier transform infrared spectrometer (FTIR)

### 3.8 การศึกษาสัณฐานวิทยาของผ้าพอลิเอสเตอร์ก่อนและหลังตกแต่งหน่วงไฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX (Scanning electron microscope, SEM/EDX)

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาเพื่อแสดงให้เห็นพื้นผิวและลักษณะของเส้นใยที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ ขั้นตอนการทดสอบทำได้โดยนำผ้าที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟขนาดความกว้างประมาณ 1 เซนติเมตร และความยาว 1 เซนติเมตร มาเคลือบทองด้วย sputter-coater โดยจะทำให้ทองแตกตัวเพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าขณะตรวจสอบในภาวะที่เป็นสุญญากาศ โดยใช้เครื่อง Scanning electron microscope (SEM) รุ่น XL 30 CP แสดงดังรูปที่ 3.5

นอกจากนี้ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX หรือ Energy Dispersive X-ray Analysis ซึ่งใช้สำหรับวิเคราะห์ คราบหรือรอยต่างๆ ว่ามีส่วนผสมทางเคมีเหมือนหรือแตกต่างกับเนื้อชิ้นงาน รวมทั้งองค์ประกอบทางเคมีของสารปนเปื้อน บนผิวชิ้นงานโดยเครื่องมือชนิดนี้สามารถวิเคราะห์ได้ตั้งแต่ธาตุ Boron ถึง Uranium และความสามารถในการตรวจวัดที่ 0.1%wt ซึ่งการเตรียมตัวอย่างจะแตกต่างจากเดิมคือจะเคลือบตัวอย่างด้วยคาร์บอน



รูปที่ 3.5 เครื่อง Scanning electron microscope (SEM)

### 3.9 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีหรือความขาวของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังทำการตกแต่ง ห่วงไฟด้วยเครื่องวัดสี (Reflectance Spectrophotometer)

เนื่องจากชนิดของสารตกแต่งห่วงไฟและภาวะที่ใช้ในการตกแต่งห่วงไฟอาจทำให้เฉดสีของผ้ามีการเปลี่ยนแปลงได้ จึงได้ทำการวัดสีหรือวัดความขาวของผ้าที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งห่วงไฟด้วยสูตรต่างๆ ทั้งก่อนซัก และ หลังซัก โดยใช้เครื่องวัดสี (Reflectance Spectrophotometer) Macbeth รุ่น COLOR-EYE 7000

ภาวะที่ใช้ในการวัดสีเป็นการวัดในโหมดที่ไม่รวมความมันเงา (specular exclude, SPE) แต่รวมแสง UV (UV include) เลือกใช้ Illuminant Daylight 6500K (D65) และ 10° Standard observer ขึ้นทดสอบแต่ละชิ้นจะวัดสี 3 ตำแหน่งแล้วนำมาเฉลี่ย และเครื่องวัดสีจะคำนวณค่าดัชนีความขาว (CIE whiteness index) จากสมการที่ 3.3 โดยอัตโนมัติ

$$WI = Y + 800(0.3138 - x) + 1700(0.3310 - y) \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

โดย

WI	=	ดัชนีความขาว (CIE whiteness index)
Y	=	CIE Tristimulus value
x, y	=	Chromaticity coordinate

ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีหรือความขาวของผ้าพอลิเอสเตอร์สำหรับงานวิจัยนี้มีเกณฑ์ดังนี้

1) ค่า WI (Whiteness index)

WI ยิ่งมีค่าสูงยิ่งมีความขาวมากขึ้น

2) ค่า YI (Yellowness index)

YI ยิ่งมีค่าสูงยิ่งเหลืองขึ้น

3) ค่า Db\*

Db\* เป็นค่า + และ ยิ่งมีค่าสูงแสดงว่าขึ้นตัวอย่างเหลืองกว่าขึ้นมาตรฐานมาก

4) ค่า DE<sub>CMC (2:1)</sub>

DE<sub>CMC (2:1)</sub> ที่มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าสีของผ้าตัวอย่างแตกต่างจากสีมาตรฐาน อย่างไรก็ตามสีบางเฉดสีเช่นสีสว่างหรือสีอ่อนๆที่มีค่า DE<sub>CMC (2:1)</sub> ประมาณ 1-2 อาจยังไม่เห็นความแตกต่างสีหรือความแตกต่างสีนั้นยังมีไม่มากซึ่งยังสามารถยอมรับได้ แต่บางเฉดสี เช่นสีเทา

สีทากี้ สีน้ำตาล ที่มีค่า  $DE_{CMC(2:1)}$  ประมาณ 0.8 -1 ก็มองเห็นความแตกต่างแล้วและไม่สามารถยอมรับได้

อย่างไรก็ตาม ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความขาวได้กำหนดให้เครื่องวัดสีแสดงการประเมินผลของ  $DE_{CMC(2:1)}$  ที่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 เป็น PASSED แต่ถ้ามากกว่า 1 เป็น FAILED



รูปที่ 3.7 เครื่องวัดสี (Reflectance Spectrophotometer) ของ Macbeth (รุ่น COLOR-EYE 7000)

### 3.10 การทดสอบความคงทนของสารตกแต่งขนงไฟบนผ้าพอลิเอสเตอร์

วัตถุประสงค์ของการทดสอบนี้เพื่อศึกษาความคงทนของสารตกแต่งขนงไฟ โดย นำผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งขนงไฟ มาซักตามมาตรฐาน ISO 105-C01 ด้วยเครื่อง Gyrowash แสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งทำได้โดยนำผงซักฟอกมาตรฐาน( standard soap) หนัก 5 กรัม ละลายในน้ำ 1 ลิตร แล้วใส่ในกระบอกซัก จากนั้นตั้งอุณหภูมิเครื่องโดยซักที่ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบกำหนดเวลานำผ้าออกมา ชะล้างด้วยน้ำเย็นที่ไหลผ่านตลอด เป็นเวลา 10 นาทีแล้วบีบน้ำออก ตากให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ทำการซัก 5 รอบ



รูปที่ 3.7 เครื่องซักผ้า (Gyrowash)

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 ความหนืดของสารตกแต่งหน่วงไฟที่มีเบนโทไนด์เป็นองค์ประกอบ

จากงานวิจัยของภารุณี [1] พบว่า การตกแต่งหน่วงไฟผ้าพอลิเอสเตอร์ด้วยเบนโทไนด์ทำให้ผ้ามีแนวโน้มที่จะเกิดการหลอมหยดข้างหรือไม่เกิดการหลอมหยดเลยเมื่อปริมาณเบนโทไนด์เพิ่มขึ้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักขึ้นไป อย่างไรก็ตามสารหน่วงไฟที่มีเบนโทไนด์เป็นองค์ประกอบในปริมาณสูงเช่นนี้จะเปลี่ยนสภาพกลายเป็นของเหลวหนืดหรือเจลที่มีความหนืดสูงเกินกว่าที่จะตกแต่งบนผ้าพอลิเอสเตอร์ให้สม่ำเสมอได้ งานวิจัยนี้จึงแก้ปัญหาโดยการเติมสารละลายไซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น ร้อยละ 4 ลงไป เพื่อลดความหนืดของสารตกแต่งหน่วงไฟลง ผลของเบนโทไนด์และไซเดียมคลอไรด์ต่อความหนืดของสารตกแต่งหน่วงไฟที่มีเบนโทไนด์เป็นองค์ประกอบในปริมาณต่างๆแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อปริมาณเบนโทไนด์ต่ำร้อยละ 3 ถึง 5 สารตกแต่งหน่วงไฟจะมีความหนืดต่ำ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเบนโทไนด์เป็นร้อยละ 7 ความหนืดได้เพิ่มสูงขึ้นถึงประมาณ 7 เท่า และเมื่อเพิ่มปริมาณเบนโทไนด์ขึ้นอีกเป็น ร้อยละ 10 ความหนืดได้เพิ่มสูงขึ้นจากเดิมเป็นประมาณ 10 เท่า คือ 2965 เซ็นติพอยส์ ซึ่งเป็นค่าความหนืดที่สูงมาก แต่เมื่อเติมไซเดียมคลอไรด์ปริมาณร้อยละ 4 ลงไปพบว่าทำให้ความหนืดลดลงมากเหลือเพียง 19 เซ็นติพอยส์ และถึงแม้จะเพิ่มปริมาณเบนโทไนด์เป็นร้อยละ 15, 20 และ 25 การเติมไซเดียมคลอไรด์ก็ช่วยลดความหนืดของสารตกแต่งหน่วงไฟลงได้เป็นอย่างดี สามารถนำไปตกแต่งบนผ้าพอลิเอสเตอร์ได้อย่างสม่ำเสมอ

การที่ความหนืดของสารแขวนลอยเบนโทไนด์เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเบนโทไนด์เพิ่มขึ้น แต่ความหนืดได้ลดลงจากเดิมเมื่อเติมไซเดียมคลอไรด์ลงไปอาจเนื่องจากเมื่อเบนโทไนด์มีปริมาณมากอนุภาคของดินเบนโทไนด์หรือเคลย์จะเชื่อมโยงกันเกิดเป็นเจลหรือเป็นโครงข่ายร่างแหสามมิติแต่ไอออนของไซเดียมคลอไรด์จากไซเดียมคลอไรด์ที่เติมลงไปจะทำให้โครงข่ายร่างแหหรืออนุภาคเคลย์ที่เชื่อมโยงกันแตกออกแล้วมารวมตัวกัน (aggregate) เปลี่ยนสภาพจากโครงข่ายร่างแหสามมิติมาเป็นอนุภาคเคลย์ที่เกาะกันเดี่ยวๆทำให้ค่ามอดุลัสยืดหยุ่น (elastic modulus) ลดลงความหนืดจึงลดลง [Carroll และคณะ [28], Benna-Zayani และคณะ [29]]



ตารางที่ 4.1 ค่าความหนืดของสูตรสารตกแต่งหนังไฟที่มีเบนโทไนด์เป็นองค์ประกอบ (ที่ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที)

สูตร	ความหนืด (cps)
B3	20
B5	40
B7	284
B10	2965
B10Na	19
B15Na	75
B20Na	80
B25Na	300
B10NaDA	88
B15NaDA	232
B20NaDA	560
B25NaDA	1700
B10NaAl5	17
B15NaAl5	39
B20NaAl5	112
B25NaAl5	350
B10NaAl10	21
B15NaAl10	57
B20NaAl10	152
B25NaAl10	610

ดังนั้นในการศึกษาเกี่ยวกับผลของเบนโทไนด์ร่วมกับสารหน่วงไฟชนิดอื่น เช่น ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ต่อการหน่วงไฟและการต้านการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์ งานวิจัยนี้จึงเลือกสูตรสารตกแต่งหน่วงไฟที่มีปริมาณเบนโทไนด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักขึ้นไปและมีการเติมโซเดียมคลอไรด์ลงไปร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบสูตรของสารตกแต่งหน่วงไฟที่มีปริมาณเบนโทไนด์เท่ากันนั้นการเติมไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตจะทำให้สารตกแต่งหน่วงไฟมีความหนืดสูงมากกว่าที่ไม่ได้เติมไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตลงไปประมาณ 3-4 เท่า และจะเพิ่มขึ้นถึง 7 เท่า เมื่อปริมาณเบนโทไนด์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 20 (B20NaDA) และยิ่งเพิ่มสูงขึ้นอีกอย่างเห็นได้ชัดเจนถึงประมาณ 50-60 เท่า เมื่อปริมาณเบนโทไนด์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 25 (B25NaDA) ซึ่งเป็นความหนืดที่ 1700 เซ็นติพอยส์ ซึ่งสูงมากไม่เหมาะที่จะนำมาตกแต่งหน่วงไฟผ้าได้อย่างสม่ำเสมอ

ในทำนองเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบสูตรของสารตกแต่งหน่วงไฟที่มีปริมาณเบนโทไนด์เท่ากันนั้นการเติมอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จะทำให้สารตกแต่งหน่วงไฟมีความหนืดใกล้เคียงหรือเพิ่มขึ้นหรือลดลงจากก่อนเติมเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามเห็นได้ว่าทุกสูตรมีความหนืดที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ตกแต่งหน่วงไฟผ้าพอลิเอสเตอร์

## 4.2 พฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟแนว 45 องศาและการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์ก่อนและหลังการตกแต่งห่วงไฟ

พฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟแนว 45 องศาของผ้าพอลิเอสเตอร์ทั้งก่อนและหลังการตกแต่งห่วงไฟด้วย สารละลายของไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เบนโทไนด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 15 20 และ 25 โดยน้ำหนัก อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนักและโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก โดยแบ่งเป็นสามประเภทคือ 1) ใช้เบนโทไนด์ร่วมกับโซเดียมคลอไรด์ 2) เบนโทไนด์ร่วมกับโซเดียมคลอไรด์ และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต และ 3) เบนโทไนด์ร่วมกับโซเดียมคลอไรด์และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์โดยที่จากการทดสอบพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟแนว 45 องศาและการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์ทั้งก่อนการตกแต่ง (untreated) และหลังการตกแต่งห่วงไฟมีผลการทดลองดังนี้

### 4.2.1 ผลของเบนโทไนด์ร่วมกับโซเดียมคลอไรด์

ผลของเบนโทไนด์ร่วมกับโซเดียมคลอไรด์ต่อพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟแนว 45 องศา และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์ทั้งก่อนและหลังการตกแต่งห่วงไฟ แสดงในรูปที่ 4.1, 4.2 และตารางที่ 4.2 ซึ่งจะเห็นว่าผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟ (Untreated) จะหดตัวหนีไฟเมื่อสัมผัสกับความร้อนจากเปลวไฟจึงทำให้ไม่ลุกติดไฟ แต่หากลุกติดไฟแล้วจะลามไฟอย่างรวดเร็วลักษณะของเปลวไฟมีขนาดใหญ่และสูง เปลวไฟลามอยู่นานประมาณ 12 วินาที ในขณะที่เดียวกันก็สังเกตเห็นการหลอมหยดลงบนสำลีสองรับเกือบหลังจากนำแหล่งจุดไฟออกไปประมาณ 5 วินาที นอกจากนี้สำลีสองรับยังได้ลูกไหม้รุนแรงจนหมด ไม่เกิดชาร์

สำหรับผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งห่วงไฟด้วยสูตร B3, B5, B7 พบว่าเมื่อปริมาณเบนโทไนด์เพิ่มขึ้น ผ้าติดไฟและลามไฟนานกว่าผ้าที่ไม่ได้ผ่านการตกแต่ง นอกจากนี้ยังมีการหลอมหยดเกิดขึ้นและทำให้แผ่นสำลีสองรับลูกไหม้ค่อนข้างรุนแรงแต่เวลาที่เริ่มหลอมหยดมีแนวโน้มช้าลง อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณเบนโทไนด์เป็นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (B10) พบว่าผ้าติดไฟแล้วลูกไหม้อย่างรุนแรงและผ้าถูกเผาไหม้จนเกือบหมดผืน มีชาร์เกิดเล็กน้อย แต่ไม่เกิดการหลอมหยดเลย เนื่องจากเมื่อผ้าพอลิเอสเตอร์ติดไฟแล้วเบนโทไนด์ที่ตกแต่งบนผ้าในปริมาณที่สูงขึ้นซึ่งประกอบด้วยชั้นซิลิเกตอาจไม่ได้ห่วงการติดไฟและการลามไฟของผ้าพอลิเอสเตอร์แต่จะไปทำให้พอลิเอสเตอร์เกิดชั้นชาร์ (carbonaceous silicate chars) บนพื้นผิวผ้าขณะถูกเผาไหม้แทนที่จะหลอมเหลวเหมือนผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ผ่านการตกแต่ง ซึ่งชั้นชาร์นี้จะทนความร้อนและ

ทำหน้าที่เป็นฉนวนและชะลออัตราการลดลงของน้ำหนักผ้าจากการสลายตัว[31, 32] แต่เมื่อตกแต่งห่วงไฟฟ้าพอลิเอสเตอร์ด้วยการเติมโซเดียมคลอไรด์ลงไปพร้อมกับเบนโทไนต์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (B10Na) เพื่อปรับความหนืดลงให้สามารถตกแต่งผ้าได้ง่ายและสม่ำเสมอพบว่าผ้าก็ยังคงติดไฟเช่นเดิมแต่ความรุนแรงของเปลวไฟที่ไหม้ผ้านั้นรุนแรงน้อยกว่าและเวลาการลามไฟเฉลี่ยนานกว่า มีผ้าเหลือจากการเผาไหม้มากกว่า แต่กลับพบพฤติกรรมที่เปลี่ยนแปลงไปคือมีการหลอมหยดเกิดขึ้นอย่างไรก็ตามเวลาที่ผ้าเริ่มหลอมหยดถูกห่วงวงให้ชี้กว่าผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ผ่านการตกแต่ง และถึงแม้จะทำให้แผ่นสำลีส่องรับด้านล่างลูกไหม้ได้แต่เปลวไฟที่ลุกไหม้ก็ไม่รุนแรงเท่าผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ได้ผ่านการตกแต่ง แต่ก็ยังพบชั้นชาร์เกิดขึ้น ในขณะที่ได้ทดลองตกแต่งผ้าพอลิเอสเตอร์ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์เพียงอย่างเดียวพบว่าผ้าติดไฟแล้วมีการหลอมหยดแต่เวลาที่ผ้าเริ่มหลอมหยดถูกห่วงวงให้ชี้กว่าผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ผ่านการตกแต่งเช่นกัน

อาจกล่าวสรุปได้ว่าสูตร B10Na ที่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์ลงไปในการตกแต่งห่วงไฟฟ้าที่มีปริมาณเบนโทไนต์ร้อยละ 10 ถึงแม้จะไม่สามารถต้านการหลอมหยดได้เท่ากับสูตร B10 และยังทำให้แผ่นสำลีส่องรับด้านล่างลูกไหม้ปานกลาง แต่ก็ทำให้ความหนืดของสารตกแต่งห่วงไฟลดลงส่งผลให้ตกแต่งผ้าพอลิเอสเตอร์ได้ง่ายและสม่ำเสมอ นอกจากนี้ผ้าที่ติดไฟมีการลุกไหม้รุนแรงน้อยกว่าการลุกไหม้ของผ้าในสูตร B10 อนุภาคเบนโทไนต์กระจายบนเส้นใยสม่ำเสมอกว่าเดิม ไฟจึงหยุดลามไม่ขยายวงกว้างต่างจากสูตร B10 ที่ไฟยังคงลามต่อไปไม่หยุดเผาไหม้ผืนผ้าจนหมด

งานวิจัยนี้จึงได้ทดลองเพิ่มปริมาณเบนโทไนต์ให้มากกว่า ร้อยละ 10 เป็น 15, 20 และ 25 (B15Na, B20Na และ B25Na) ซึ่งคาดว่า การเพิ่มปริมาณเบนโทไนต์อาจสามารถต้านการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์ได้ พบว่าเมื่อปริมาณเบนโทไนต์เพิ่มขึ้นผ้าก็ยังคงติดไฟแต่ลูกไหม้รุนแรงน้อยลง เวลาการลามไฟลดลง มีการเกิดขึ้นชาร์ขณะเผาไหม้ แต่ไม่สามารถต้านการหลอมหยดลงได้ ผ้าเริ่มหลอมหยดเร็วขึ้นทั้งสามสูตรแต่ก็ยังเริ่มหลอมหยดชี้กว่าผ้าที่ไม่ผ่านการตกแต่งเล็กน้อย และยังทำให้แผ่นสำลีส่องรับด้านล่างลูกไหม้แต่รุนแรงน้อยกว่าผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ผ่านการตกแต่ง ยกเว้นสูตร B25Na เท่านั้นที่กลับมีการลุกไหม้ที่รุนแรง









จึงอาจสรุปได้ว่าสูตรสารตกแต่งห่วงไฟฟ้าที่มีปริมาณเบนโทไนต์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ขึ้นไปและมีการเติมโซเดียมคลอไรด์ลงไปถึงแม้ไม่ได้เพิ่มความสามารถในการห่วงไฟและไม่สามารถต้านการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์ได้ อย่างไรก็ตามหากเปรียบกับผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ผ่านการตกแต่งแล้วสูตร BNa นี้จะสามารถชะลอเวลาที่ผ้าเริ่มเกิดการหลอมหยดให้ช้าลงจากเดิมได้ แผ่นสำลีส่องรับก็ลุกไหม้ไม่รุนแรงเท่า

สูตร	3 วินาที	5 วินาที	7 วินาที	10 วินาที
Untreated				
	<p>ผ้าลุกติดไฟ และหดหนีเปลวไฟ มีควันสีดำเล็กน้อย เกิดการหลอมหยดเป็นของแข็งเปราะสีดำติดไฟบนสำลีรองรับ ไม่เกิดชาร์</p>			
B3				
	<p>ผ้าลุกติดไฟและหดหนีเปลวไฟ เกิดการลุกไหม้รุนแรง มีควันสีดำเล็กน้อย หลอมหยดเป็นของแข็งเปราะสีดำทำให้ติดไฟบนสำลีรองรับ เกิดชาร์</p>			
B5				
	<p>ผ้าลุกติดไฟและหดหนีเปลวไฟ เกิดการลุกไหม้รุนแรง มีควันสีดำเล็กน้อย หลอมหยดเป็นของแข็งเปราะสีดำทำให้ติดไฟบนสำลีรองรับ เกิดชาร์</p>			
B7				
	<p>ผ้าลุกติดไฟและหดหนีเปลวไฟ เกิดการลุกไหม้รุนแรง มีควันสีดำเล็กน้อย หลอมหยดเป็นของแข็งเปราะสีดำทำให้ติดไฟบนสำลีรองรับ เกิดชาร์</p>			

รูปที่ 4.1 ภาพพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟแนว 45 องศาของผ้าพอลิเอสเตอร์ทั้งก่อนและหลังการตกแต่งห่วงไฟด้วยเบนโทไนต์และไซเดียมคลอไรด์

สูตร	3 วินาที	5 วินาที	7 วินาที	10 วินาที
B10				
	<p>ผ้าลุกติดไฟและเกิดการลุกไหม้อย่างรุนแรง ผ้าถูกเผาไหม้จนหมด มีควันสีดำเล็กน้อย และไม่เกิดการหลอมหยดผ้าที่เหลือ มีการเกิดชาร์</p>			
B10Na				
	<p>ผ้าลุกติดไฟและหดหนีเปลวไฟ เกิดการลุกไหม้ไม่รุนแรง มีควันสีดำเล็กน้อย หลอมหยดเป็นของแข็งเปราะสีดำทำให้ติดไฟบนสำลีรองรับ เกิดชาร์</p>			
B15Na				
	<p>ผ้าลุกติดไฟและหดหนีเปลวไฟ เกิดการลุกไหม้ไม่รุนแรง มีควันสีดำเล็กน้อย หลอมหยดเป็นของแข็งเปราะสีดำทำให้ติดไฟบนสำลีรองรับและเกิดชาร์</p>			
B20Na				
	<p>ผ้าลุกติดไฟและหดหนีเปลวไฟ เกิดการลุกไหม้ค่อนข้างรุนแรง มีควันสีดำเล็กน้อย หลอมหยดเป็นของแข็งเปราะสีดำทำให้ติดไฟบนวัสดุรองรับ เกิดชาร์</p>			

รูปที่ 4.1 (ต่อ)

สูตร	3 วินาที	5 วินาที	7 วินาที	10 วินาที
B25Na				
	<p>ผ้าถูกติดไฟและหดหนีเปลวไฟ เกิดการลุกไหม้รุนแรง มีควันสีดำเล็กน้อย หลอมหยดเป็นของแข็งเพราะสีดำทำให้ติดไฟบนลำสี่รองรับและเกิดชาร์</p>			
Na				
	<p>ผ้าถูกติดไฟและหดหนีเปลวไฟ เกิดการลุกไหม้ไม่รุนแรง มีควันสีดำเล็กน้อย หลอมหยดเป็นของแข็งเพราะสีดำทำให้ติดไฟบนลำสี่รองรับไม่เกิดชาร์</p>			

รูปที่ 4.1 (ต่อ)



**รูปที่ 4.2** ภาพของผ้าพอลิเอสเตอร์ก่อน และหลังผ่านการตกแต่งหนังไฟด้วยเบนโทไรด์ ร่วมกับโซเดียมคลอไรด์ที่เหลืออยู่ภายหลังการทดสอบพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์แนว 45 องศา



#### 4.2.2 ผลของเบนโทไนด์ร่วมกับไซเตียมคลอไรด์ และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต

ผลของเบนโทไนด์ร่วมกับไซเตียมคลอไรด์และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ต่อพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟแนว 45 องศา และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์ทั้งก่อนและหลังการตกแต่งห่วงไฟ แสดงในรูปที่ 4.3, 4.4 และตารางที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นว่า การใช้ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (DA,  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ) ในปริมาณ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักตกแต่งลงบนผ้าเพียงอย่างเดียว ไม่ทำให้ผ้าติดไฟแต่จะหลอมเป็นบริเวณแคบๆแล้วหยุดหลอมเองหลังจากนำแหล่งต้นกำเนิดไฟออก ผ้าจึงไม่มีการลามไฟรวมถึงการหลอมหยด และไม่เกิดชาร์เนื่องจากเมื่อไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตได้รับความร้อนจะสลายตัวเกิดเป็นกรดฟอสฟอริกหรือกรดพอลิฟอสฟอริกที่สามารถเร่งปฏิกิริยาการสร้างชั้นที่หลอมเหลวและเหนียวซึ่งทำหน้าที่เสมือนเป็นชั้นฉนวนป้องกันผ้าจากเปลวไฟและออกซิเจน อีกทั้งขัดขวางการสลายตัวต่อไปของผ้า [33] ดังนั้นหากนำไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตปริมาณ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักมาใช้ร่วมกับสูตร BNa อาจช่วยเพิ่มความสามารถห่วงไฟและต้านการหลอมหยดได้

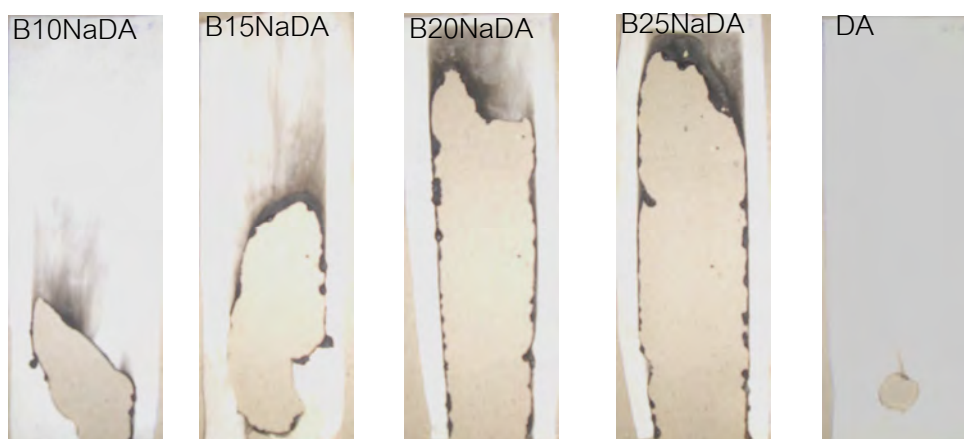
สำหรับผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งห่วงไฟด้วยสูตรที่มีไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตเป็นปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักร่วมกับเบนโทไนด์และไซเตียมคลอไรด์ทุกสูตร (BNaDA) เมื่อเปรียบเทียบกับ untreated พบว่าจะทำให้ผ้าที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟเผาไหม้แล้วเกิดชาร์เล็กน้อย มีการหลอมหยดเกิดขึ้นโดยเวลาที่เริ่มเกิดการหลอมหยดช้าลงจากเดิม ถึงแม้จะทำให้แผ่นสำลีส่องรับด้านล่างลุกลามแต่ก็รุนแรงน้อยกว่า untreated ที่น่าสังเกตคือเปลวไฟที่ลามบนผืนผ้าไม่ลุกโชติช่วงเหมือน untreated และสูตร BNa อีกทั้งเวลาการลามไฟหลังนำแหล่งจุดไฟออกไปยังสั้นกว่าสูตร B10Na อีกด้วย ผ้าที่เหลืออยู่ภายหลังจากการเผาไหม้ก็มีมากกว่า (ดูรูปที่ 4.4) จึงอาจสรุปได้ว่าสูตรที่เหมาะสมที่สุดได้แก่สูตร B10NaDA โดยการเพิ่มไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตลงไปในสูตร B10Na ได้เพิ่มความสามารถในการห่วงไฟโดยมีเวลาการลามไฟที่สั้นกว่า แต่ก็ยังไม่สามารถต้านการหลอมหยด อย่างไรก็ตามเวลาเริ่มการหลอมหยดก็ใกล้เคียงกัน และหากเปรียบกับ untreated แล้วการเพิ่มไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตลงไปในสูตร B10Na นี้สามารถชะลอเวลาที่ผ้าเริ่มเกิดการหลอมหยดให้ช้าลงจากเดิมได้ แผ่นสำลีส่องรับก็ลุกลามไม่รุนแรงเท่า

สูตร	3 วินาที	5 วินาที	7 วินาที	10 วินาที
B10NaDA				
	<p>ผ้าลูกติดไฟและหดหนีเปลวไฟ เกิดการลุกไหม้ไม่รุนแรง มีควันสีดำเล็กน้อย และเกิดการหลอมหยดเป็นของแข็งเปราะสีดำทำให้ติดไฟบนลำลีดรองรับ</p>			
B15NaDA				
	<p>ผ้าลูกติดไฟและหดหนีเปลวไฟ เกิดการลุกไหม้รุนแรง มีควันสีดำเล็กน้อย และเกิดการหลอมหยดเป็นของแข็งเปราะสีดำทำให้ติดไฟบนลำลีดรองรับ</p>			
B20NaDA				
	<p>ผ้าลูกติดไฟและหดหนีเปลวไฟ เกิดการลุกไหม้ไม่รุนแรง มีควันสีดำเล็กน้อย และเกิดการหลอมหยดเป็นของแข็งเปราะสีดำทำให้ติดไฟบนลำลีดรองรับ</p>			
B25NaDA				
	<p>ผ้าลูกติดไฟและหดหนีเปลวไฟ เกิดการลุกไหม้รุนแรง มีควันสีดำเล็กน้อย และเกิดการหลอมหยดเป็นของแข็งเปราะสีดำทำให้ติดไฟบนลำลีดรองรับ</p>			

**รูปที่ 4.3** ภาพพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟแนว 45 องศาของผ้าพอลิเอสเตอร์ทั้งก่อนและหลังการตกแต่งห่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ร่วมกับไซเดียมคลอไรด์ และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต

สูตร	3 วินาที	5 วินาที	7 วินาที	10 วินาที
DA				
<p>ผ้าไม่ติดไฟ</p> <p>ไม่เกิดการหลอมหยด ไม่มีควันสีดำ ไม่เกิดชาร์</p>				

รูปที่ 4.3 (ต่อ)



รูปที่ 4.4 ภาพของผ้าพอลิเอสเตอร์ทั้งก่อน และหลังผ่านการตกแต่งห่วงไฟด้วยเบนโทไนด์ ร่วมกับโซเดียมคลอไรด์ และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตที่เหลืออยู่ภายหลังจากทดสอบพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์แนว 45 องศา

#### 4.2.3 ผลของเบนโทไนด์ร่วมกับโซเดียมคลอไรด์ และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์

ผลของเบนโทไนด์ร่วมกับโซเดียมคลอไรด์และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ต่อพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟแนว 45 องศา และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์ทั้งก่อนและหลังการตกแต่งหน่วงไฟ แสดงในรูปที่ 4.5, 4.6 และตารางที่ 4.4 ซึ่งจะเห็นว่าการใช้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก หลังนำแหล่งจุดไฟออกผ้าจะไม่ติดไฟ จึงไม่เกิดการลามไฟ ไม่เกิดชาร์และไม่เกิดการหลอมหยด ในขณะที่ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักไม่มีการหลอมหยดเกิดขึ้นเช่นกันแต่ผ้ายังคงติดไฟและลามไฟต่อไปอีกเป็นเวลาสั้นๆคือ 5 วินาที ดังนั้นหากนำอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์มาเพิ่มในสูตร BNa อาจช่วยเพิ่มความสามารถในการหน่วงไฟและต้านการหลอมหยดได้

สำหรับผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วยสูตรที่มีอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เป็นปริมาณร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนักร่วมกับเบนโทไนด์และโซเดียมคลอไรด์ (BNaAl) ทุกสูตรพบว่าจะทำให้ผ้าที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟมีการติดไฟแล้วเกิดชาร์เล็กน้อย นอกจากนี้ยังคงมีการหลอมหยดเกิดขึ้นและทำให้แผ่นสำลีส่องรับด้านล่างลุกไหม้ แต่สูตรที่มีปริมาณเบนโทไนด์ ร้อยละ 10 และปริมาณอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 5 (B10NaAl5) เป็นสูตรที่เหมาะสมที่สุดเพราะโดยการเพิ่มอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ลงไปสูตร B10Na นั้นเมื่อเปรียบเทียบกับสูตร B10Na แล้วได้เพิ่มความสามารถในการหน่วงไฟโดยมีเวลาการลามไฟที่สั้นกว่าอีกทั้งเปลวไฟที่ลุกไหม้ยังไม่รุนแรง (ดูรูปที่ 4.5) แต่ก็ยังไม่สามารถต้านการหลอมหยด อย่างไรก็ตามเวลาเริ่มการหลอมหยดช้ามากและพอลิเอสเตอร์ที่หลอมหยดได้ทำให้แผ่นสำลีส่องรับด้านล่างลุกไหม้แต่ไม่รุนแรง และแน่นอนหากเปรียบเทียบกับ untreated แล้วการเพิ่มอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ลงไปนี้สามารถชะลอเวลาที่ผ้าเริ่มเกิดการหลอมหยดให้ช้าลงจากเดิมได้มาก แผ่นสำลีส่องรับด้านล่างลุกไหม้ไม่รุนแรงเท่า

การที่เมื่อเติมอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณที่เหมาะสมลงไปสูตรที่มีเบนโทไนด์แล้วทำให้ผ้ามีเวลาการลามไฟที่สั้นลง และเปลวไฟที่ลุกไหม้ไม่รุนแรง อีกทั้งยังหน่วงเวลาการเริ่มการหลอมหยดให้ช้าลงได้นั้น อาจเนื่องจากเมื่อผ้าพอลิเอสเตอร์ติดไฟแล้วเบนโทไนด์ที่ตกแต่งบนผ้าในปริมาณที่สูงขึ้นซึ่งประกอบด้วยชั้นซิลิเกตอาจไม่ได้หน่วงการติดไฟและการลามไฟของผ้าพอลิเอสเตอร์แต่จะไปทำให้เกิดชั้นชาร์ (carbonaceous silicate chars) บนพื้นผิวผ้าขณะถูกเผาไหม้แทนที่จะหลอมเหลวเหมือนผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ผ่านการตกแต่ง ซึ่งชั้นชาร์นี้จะทนความร้อนและทำหน้าที่เป็นชั้นเคลือบผิววัสดุซึ่งป้องกันการผ่านของความร้อนและออกซิเจนเข้าสู่วัสดุและชะลออัตราการลดลงของน้ำหนักผ้าจากการสลายตัว [31, 32] ส่วนอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ หรือ  $Al(OH)_3$  ที่ตกแต่งบนผ้าเมื่อได้รับความร้อนที่ 180- 200 องศาเซลเซียสจะเกิดการแตกตัวด้วยปฏิกิริยาดูดความร้อน แล้วนำความร้อนบางส่วนไปใช้ในการขจัด

น้ำออกเกิดเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์หรือ  $Al_2O_3$  กับไอน้ำ ไอน้ำที่เกิดขึ้นนี้จะไปเจือจางแก๊สที่ติดไฟได้ง่าย อีกทั้งลดอุณหภูมิในระบบลง และส่วนอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะช่วยให้เกิดชั้นซาร์เพิ่มขึ้นช่วยป้องกันไม่ให้เกิดออกซิเจนเข้าใกล้พื้นผิวของวัสดุ [8]

จากการศึกษาผลของเบนโทไนต์ เบนโทไนต์ร่วมกับโซเดียมคลอไรด์ เบนโทไนต์ร่วมกับโซเดียมคลอไรด์และไดไฮโดรเจนแอมโมเนียมฟอสเฟต และเบนโทไนต์ร่วมกับโซเดียมคลอไรด์และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ต่อพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟแนว 45 องศา และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสูตร B10, B10Na, B10NaDA และ B10NaAl5 โดยพิจารณาจาก

- 1) ความง่ายและสม่ำเสมอในการเตรียมสารตกแต่งหน่วงไฟโดยพิจารณาจากความหนืดของสารตกแต่งหน่วงไฟ
- 2) ความสามารถในการหน่วงไฟ เช่น การติดไฟ ความรุนแรงของเปลวไฟที่ลามไปบนผืนผ้า เวลาในการลามไฟหลังจากนำแหล่งจุดไฟออกจากขนาดหรือปริมาณผ้าที่ถูกทำลายภายหลังการเผาไหม้
- 3) ความสามารถในการต้านการหลอมหยด การหน่วงเวลาในการหลอมหยดหรือไหลหยด การติดไฟหรือการลุกไหม้ของแผ่นสำลีที่รองรับด้านล่าง ความรุนแรงของการลุกไหม้ของแผ่นสำลีที่รองรับ

อาจสรุปได้ว่าสูตรที่มีความเหมาะสมที่จะนำมาตกแต่งหน่วงไฟและต้านการหลอมหยดผ้าพอลิเอสเตอร์ คือสูตร B10Na สูตร B10NaDA และสูตร B10NaAl5 และเมื่อพิจารณาทุกๆด้านที่ได้กล่าวมาแล้วเห็นว่า สูตร B10NaAl5 มีความเหมาะสมที่สุด สำหรับสูตร B10 นั้นถึงแม้จะเป็นสูตรเดียวที่สามารถต้านการหลอมหยดได้ดี ผ้าพอลิเอสเตอร์ไม่เกิดการหลอมหยด แต่เปลวไฟที่ลามอยู่บนผืนผ้าก็ค่อนข้างลุกไหม้อย่างรุนแรง อีกทั้งสารตกแต่งหน่วงไฟยังมีความหนืดสูงมากทำให้การตกแต่งทำได้ยากและไม่สม่ำเสมอ สูตรนี้จึงยังไม่เหมาะที่จะนำมาตกแต่งหน่วงไฟและต้านการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์

สูตร	3 วินาที	5 วินาที	7 วินาที	10 วินาที
B10NaA5				
	<p>ผ้าลูกติดไฟและหดหนีเปลวไฟ เกิดการลุกไหม้ไม่รุนแรง มีควันสีดำเล็กน้อย และเกิดการหลอมหยดเป็นของแข็งเปราะสีดำทำให้ติดไฟบนลำลีรองรับ</p>			
B15NaA5				
	<p>ผ้าลูกติดไฟและหดหนีเปลวไฟ เกิดการลุกไหม้รุนแรง มีควันสีดำปริมาณมาก และเกิดการหลอมหยดเป็นของแข็งเปราะสีดำทำให้ติดไฟบนลำลีรองรับ</p>			
B20NaA5				
	<p>ผ้าลูกติดไฟและหดหนีเปลวไฟ เกิดการลุกไหม้รุนแรง มีควันสีดำปริมาณมาก และเกิดการหลอมหยดเป็นของแข็งเปราะสีดำทำให้ติดไฟบนลำลีรองรับ</p>			
B25NaA5				
	<p>ผ้าลูกติดไฟและหดหนีเปลวไฟ เกิดการลุกไหม้รุนแรง มีควันสีดำปริมาณมาก และเกิดการหลอมหยดเป็นของแข็งเปราะสีดำทำให้ติดไฟบนลำลีรองรับ</p>			

**รูปที่ 4.5** ภาพพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟแนว 45 องศาของผ้าพอลิเอสเตอร์ทั้งก่อนและหลัง การตกแต่งห่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ร่วมกับไซเดียมคลอไรด์ และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (ก่อนซัก)

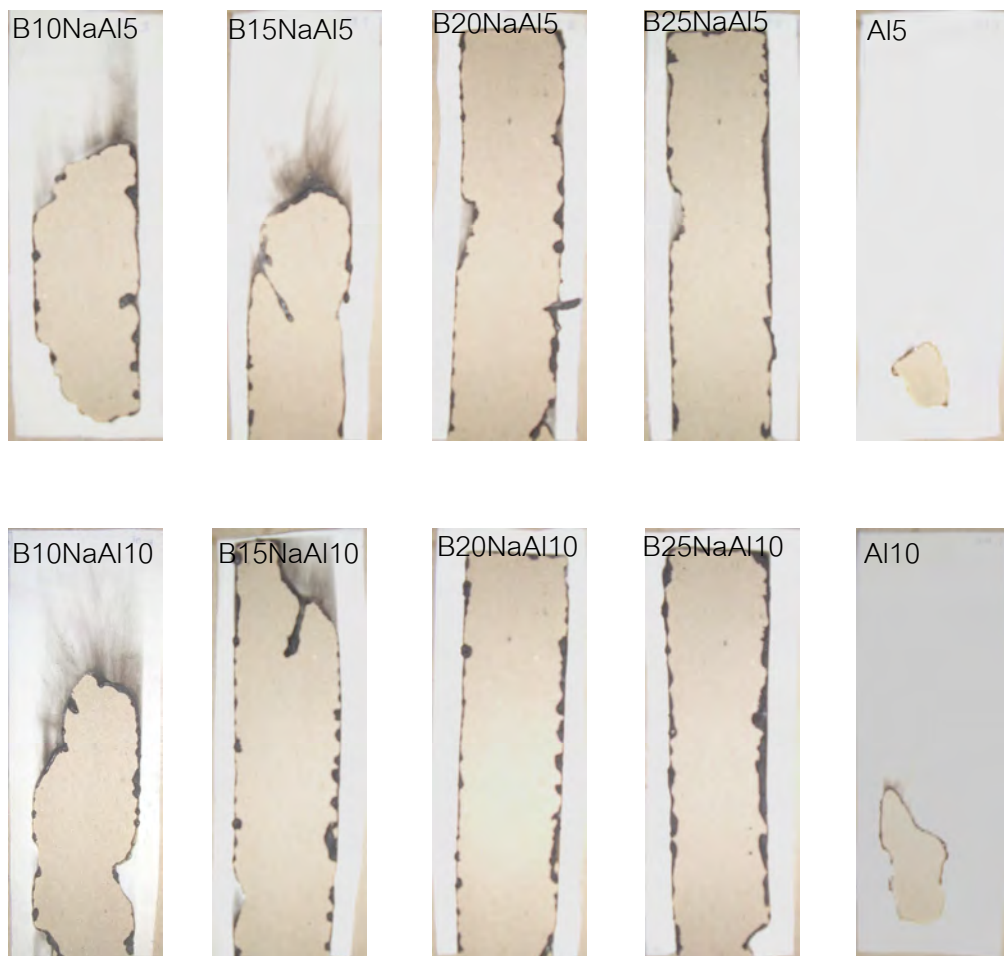
สูตร	3 วินาที	5 วินาที	7 วินาที	10 วินาที
B10NaAl10				
	<p>ผ้าลูกติดไฟและหดหนีเปลวไฟ เกิดการลุกไหม้ค่อนข้างรุนแรง มีควันสีดำเล็กน้อย และเกิดการหลอมหยดข้างล่างแต่ยังคงหลอมหยดติดไฟบนลำลีรองรับ</p>			
B15NaAl10				
	<p>ผ้าลูกติดไฟและหดหนีเปลวไฟ เกิดการลุกไหม้ค่อนข้างรุนแรง มีควันสีดำเล็กน้อย และเกิดการหลอมหยดเป็นของแข็งเปราะสีดำทำให้ติดไฟบนลำลีรองรับ</p>			
B20NaAl10				
	<p>ผ้าลูกติดไฟและหดหนีเปลวไฟ เกิดการลุกไหม้รุนแรง มีควันสีดำเล็กน้อย และเกิดการหลอมหยดเป็นของแข็งเปราะสีดำทำให้ติดไฟบนลำลีรองรับ</p>			
B25NaAl10				
	<p>ผ้าลูกติดไฟและหดหนีเปลวไฟ เกิดการลุกไหม้รุนแรง มีควันสีดำเล็กน้อย และเกิดการหลอมหยดเป็นของแข็งเปราะสีดำทำให้ติดไฟบนลำลีรองรับ</p>			

รูปที่ 4.5 (ต่อ)

สูตร	3 วินาที	5 วินาที	7 วินาที	10 วินาที
A5				
	<p>ผ้า ไม่ติดไฟ</p> <p>ไม่เกิดการหลอมหยด ไม่มีควันสีดำ ไม่เกิดชาร์</p>			
A10				
	<p>เกิดการลามไฟแต่ผ้าสามารถดับไฟได้เอง</p> <p>ไม่เกิดการหลอมหยด ไม่มีควันสีดำ ไม่เกิดชาร์</p>			















รูปที่ 4.5 (ต่อ)













**รูปที่ 4.6** ภาพของผ้าพอลิเอสเตอร์ก่อน และหลังผ่านการตกแต่งห่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ร่วมกับ โซเดียมคลอไรด์ และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ที่เหลืออยู่ภายหลังจากทดสอบพฤติกรรม การติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์แนว 45 องศา (ก่อนซัก)

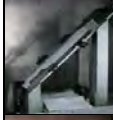




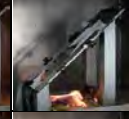



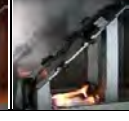
ตารางที่ 4.2 สรุปพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟแนว 45 องศาของผ้าพอลิเอสเตอร์ (ก่อนซัก)

สูตร	Add-on (%)	เวลาการลามไฟ (วินาที)	ระยะทางการลามไฟ (ระยะที่ผ้าหลอม) (ซม.)	หลอมหยด	เวลาที่เริ่มหลอมหยด (วินาที)	การดูกลิ่นของวัสดุ	ชาร์	หลังนำต้นกำเนิดไฟออก 10 วินาที	หลังเกิดการหยด 15 วินาที
Untreated	-	11	3.3	หลอมหยด	3	รุนแรง	ไม่มี		
B3	1.79	31	11.2	หลอมหยด	7	รุนแรง	มี		
B5	3.05	32	15.2	หลอมหยด	12	รุนแรง	มี		
B7	4.35	28	15.2	หลอมหยด	6	รุนแรง	มี		
B10	5.42	26	14.4	ไม่หยด	-	-	มี		
Na	2.84	16	3.5	หลอมหยด	9	ปานกลาง	ไม่มี		
B10Na	8.6	24	9.5	หลอมหยด	6	ปานกลาง	มี		
B15Na	12.01	25	11.8	หลอมหยด	7	ปานกลาง	มี		
B20Na	15.5	20	10.7	หลอมหยด	8	ปานกลาง	มี		
B25Na	17.56	22	10.3	หลอมหยด	8	รุนแรง	มี		

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

สูตร	Add-on (%)	เวลาการลามไฟ (วินาที)	ระยะทางการลามไฟ (ระยะที่ผ้าหดอม) (ซม.)	หลอมหยด	เวลาที่เริ่มหลอมหยด (วินาที)	การดูไหมของลำดี	ชาร์	หลังนำต้นกำเนิดไฟออก 10 วินาที	หลังเกิดการหยด 15 วินาที
DA	2.27	-	1.4	ไม่หยด	-	-	ไม่มี		
B10NaDA	10.75	20	6.8	หลอมหยด	14	ปานกลาง	มี		
B15NaDA	14.01	15	7.0	หลอมหยด	4	ปานกลาง	มี		
B20NaDA	16.84	24	13.9	หลอมหยด	17	ปานกลาง	มี		
B25NaDA	20.15	22	10.1	หลอมหยด	5	รุนแรง	มี		
A5	0.59	-	1.8	ไม่หยด	-	-	ไม่มี		
B10NaA5	9.01	26	9.1	หลอมหยด	17	ปานกลาง	มี		
B15NaA5	15.44	25	7.8	หลอมหยด	6	รุนแรง	มี		
B20NaA5	16.41	22	11.9	หลอมหยด	6	รุนแรง	มี		
B25NaA5	20.99	22	13.3	หลอมหยด	4	รุนแรง	มี		

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)





สูตร	Add-on (%)	เวลาการลามไฟ (วินาที)	ระยะทางการลามไฟ (ระยะที่ผ้าหลอม) (ซม.)	หลอมหยด	เวลาที่เริ่มหลอมหยด (วินาที)	การลุกลามของลำดี	ชาร์	หลังนำต้นกำเนิดไฟออก 10 วินาที	หลังเกิดการหยด 15 วินาที
A10	1.18	5	3.1	ไม่หยด	-	-	ไม่มี		
B10NaA10	10.81	20	11.8	หลอมหยด	10	ปานกลาง	มี		
B15NaA10	12.82	35	11.4	หลอมหยด	8	ปานกลาง	มี		
B20NaA10	16.31	29	12.4	หลอมหยด	7	ปานกลาง	มี		
B25NaA10	20.3	29	15.2	หลอมหยด	10	ปานกลาง	มี		

#### 4.3 ความคงทนของสารตกแต่งหน่วงไฟต่อการซัก

ภายหลังจากซักเป็นจำนวน 5 รอบ ตามมาตรฐาน ISO 105-C01 พบว่าพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟและการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์ทั้งก่อนและหลังการตกแต่งหน่วงไฟ ภายหลังจากทดสอบการติดไฟแนว 45 องศาสามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 4.18 และตารางที่ 4.6

เป็นที่น่าสังเกตว่าหลังการนำไปซักล้างสูตรที่เราสนใจได้แก่ สูตร B10, B10Na, B10NaDA และ B10NaAl5 กลับมีผลการหน่วงไฟและต้านการหลอมหยดที่ดีขึ้นกว่าก่อนการซักผ้า โดยสำหรับสูตร B10 พบว่าผ้าไม่เพียงแต่ไม่เกิดการหลอมหยดเท่านั้น ยังไม่เกิดการติดไฟหรือลามไฟอีกด้วย เช่นเดียวกันกับสูตร B10Na และ B10NaDA มีเพียงสูตร B10NaAl5 เท่านั้นที่ผ้าเกิดการลามไฟ แต่ก็สามารถดับไฟได้เองโดยไม่เกิดการหลอมหยด

สาเหตุที่ทำให้เป็นเช่นนั้น อาจเกิดจากปริมาณของเบนโทไนต์ที่เหมาะสมเนื่องจากส่วนเกินได้หลุดออกไปด้วยการซักล้างดังจะสังเกตได้จากพฤติกรรมก่อนการซักของผ้า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเบนโทไนต์ตั้งแต่ร้อยละสิบห้าถึงยี่สิบห้า ผ้าที่ผ่านการตกแต่งมีแนวโน้มของความสามารถในการหน่วงไฟหรือต้านการหลอมหยดที่ดีกว่าการใช้ในปริมาณน้อย

สูตร	3 วินาที	5 วินาที	7 วินาที	10 วินาที
Untreated				
<p>ผ้าหดไหมเปลวไฟและลุกติดไฟ ลามไฟ มีควันสีดำเล็กน้อย และเกิดการหลอมหยดเป็นของแข็งเปราะสีดำติดไฟบนสำลีรองรับ ไม่เกิดชาร์</p>				

รูปที่ 4.7 ภาพพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟแนว 45 องศาของผ้าพอลิเอสเตอร์ (หลังซัก)

สูตร	3 วินาที	5 วินาที	7 วินาที	10 วินาที
B10				
<p>ผ้าหัดหนีเปลวไฟ ไม่ลุกลิงติดไฟ ไม่เกิดการหลอมหยด ไม่เกิดชาร์</p>				
B10Na				
<p>ผ้าหัดหนีเปลวไฟ ไม่ลุกลิงติดไฟ ไม่เกิดการหลอมหยด ไม่เกิดชาร์</p>				
B15Na				
<p>ผ้าหัดหนีเปลวไฟและลุกลิงติดไฟ ลามไฟ มีควันสีดำเล็กน้อย และเกิดการหลอมหยดเป็นของแข็งเพราะสีดำติดไฟบนลำลิรองรับ ไม่เกิดชาร์</p>				
B20Na				
<p>ผ้าหัดหนีเปลวไฟ ไม่ลุกลิงติดไฟ ไม่เกิดการหลอมหยด ไม่เกิดชาร์</p>				

รูปที่ 4.7 (ต่อ)


สูตร	3 วินาที	5 วินาที	7 วินาที	10 วินาที
B25Na				
	<p>ผ้าหัดหนีเปลวไฟ ไม่ลู่กติดไฟ ไม่เกิดการหลอมหยด ไม่เกิดชาร์</p>			
DA				
	<p>ผ้าหัดหนีเปลวไฟ ไม่ลู่กติดไฟ ไม่เกิดการหลอมหยด ไม่เกิดชาร์</p>			
B10NaDA				
	<p>ผ้าหัดหนีเปลวไฟ ไม่ลู่กติดไฟ ไม่เกิดการหลอมหยด ไม่เกิดชาร์</p>			
B15NaDA				
	<p>ผ้าลู่กติดไฟและหัดหนีเปลวไฟ ลามไฟเล็กน้อยแต่สามารถดับไฟได้เอง ไม่เกิดการหลอมหยด ไม่เกิดชาร์</p>			

รูปที่ 4.7 (ต่อ)

สูตร	3 วินาที	5 วินาที	7 วินาที	10 วินาที
B20NaDA				
<p>ผ้าหดหนีเปลวไฟ ไม่ลุกติดไฟ ไม่เกิดการหลอมหยด ไม่เกิดชาร์</p>				
B25NaDA				
<p>ผ้าหดหนีเปลวไฟและลุกติดไฟ ลามไฟ มีควันสีดำเล็กน้อย แต่ไม่เกิดการหลอมหยด ไม่เกิดชาร์</p>				
A5				
<p>ผ้าหดหนีเปลวไฟ ไม่ลุกติดไฟ ไม่เกิดการหลอมหยด ไม่เกิดชาร์</p>				
B10NaA5				
<p>ผ้าหดหนีเปลวไฟ ไม่ลุกติดไฟ ไม่เกิดการหลอมหยด ไม่เกิดชาร์</p>				






















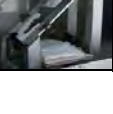
รูปที่ 4.7 (ต่อ)















สูตร	3 วินาที	5 วินาที	7 วินาที	10 วินาที
B15NaAl5				
	<p>ผ้าหัดหนีเปลวไฟ ไม่ลู่กติดไฟ ไม่เกิดการหลอมหยด ไม่เกิดชาร์</p>			
B20NaAl5				
	<p>ผ้าหัดหนีเปลวไฟ ไม่ลู่กติดไฟ ไม่เกิดการหลอมหยด ไม่เกิดชาร์</p>			
B25NaAl5				
	<p>ผ้าหัดหนีเปลวไฟ ไม่ลู่กติดไฟ ไม่เกิดการหลอมหยด ไม่เกิดชาร์</p>			
Al10				
	<p>ผ้าหัดหนีเปลวไฟ ไม่ลู่กติดไฟ ไม่เกิดการหลอมหยด ไม่เกิดชาร์</p>			

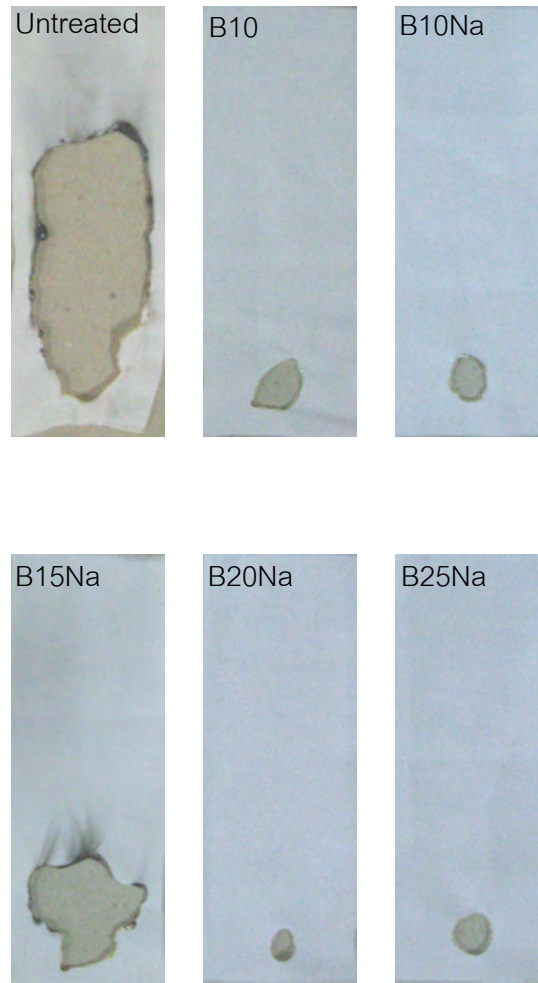
รูปที่ 4.7 (ต่อ)

ตารางที่ 4.3 สรุปพฤติกรรมกรรมการติดไฟการลามไฟและการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์  
(หลังซัก)

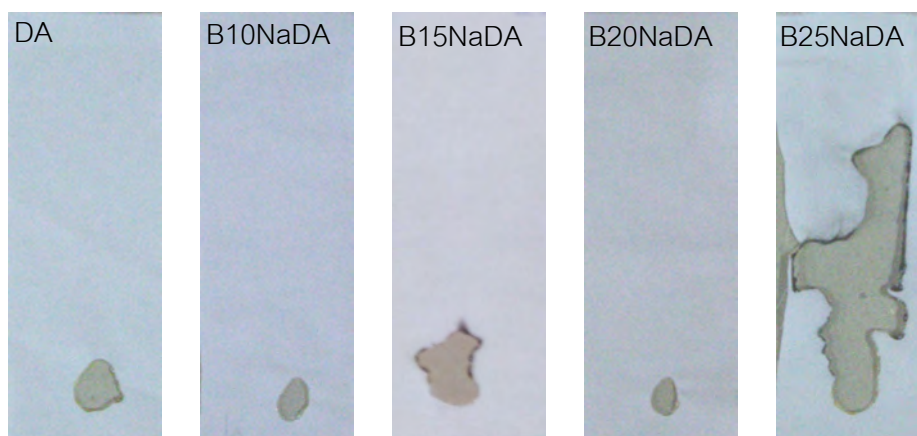
สูตร	Add-on (%)	เวลาการลามไฟ (วินาที)	ระยะทางการลามไฟ (ระยะทางที่ผ้าหลอม) (ซม.)	หลอมหยด	เวลาที่เริ่มหลอมหยด (วินาที)	การดงไหมของไส้ดี	ชาร์	หลังนำต้นกำเนิดไฟออก 10 วินาที	หลังเกิดการหยุด 15 วินาที
Untreated	-	12	3.0	หลอมหยด	4	รุนแรง	ไม่มี		
B10	5.36	-	1.5	ไม่หยด	-	-	ไม่มี		
B10Na	9.15	-	1.8	ไม่หยด	-	-	ไม่มี		
B15Na	10.43	11	3.4	หลอมหยด	5	ปานกลาง	ไม่มี		
B20Na	13.04	-	1.2	ไม่หยด	-	-	ไม่มี		
B25Na	16.37	-	1.7	ไม่หยด	-	-	ไม่มี		
DA	2.13	-	1.5	ไม่หยด	-	-	ไม่มี		
B10NaDA	10.89	-	1.6	ไม่หยด	-	-	ไม่มี		
B15NaDA	13.77	3	2.1	ไม่หยด	-	-	ไม่มี		
B20NaDA	10.69	-	1.3	ไม่หยด	-	-	ไม่มี		
B25NaDA	22.00	16	3.1	ไม่หยด	-	-	ไม่มี		

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

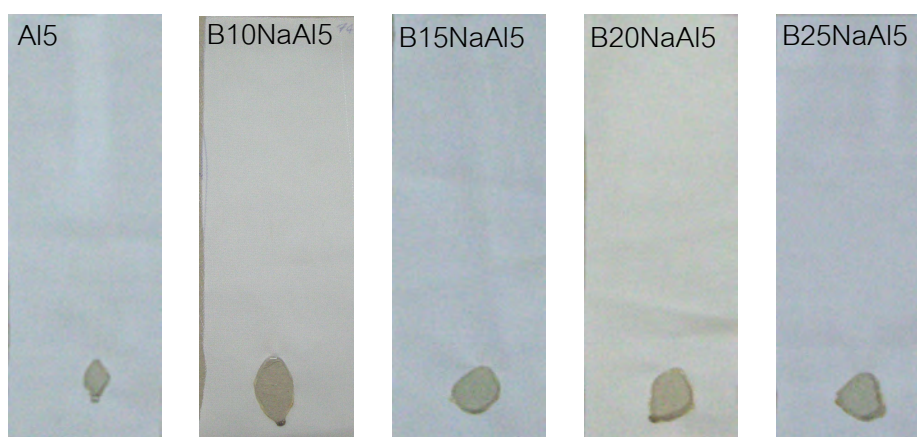
สูตร	Add-on (%)	เวลาการลมนไฟ (วินาที)	ระยะทางการลมนไฟ (ระยะทางที่ผ่านหลอดลม) (ซม.)	หลอดลมหยุด	เวลาที่เริ่มหลอดลมหยุด (วินาที)	การดูใกล้หลอดลม	ชาร์	หลังนำต้นกำเนิดไฟออก 10 วินาที	หลังเกิดการหยุด 15 วินาที
A15	0.49	-	1.4	ไม่หยุด	-	-	ไม่มี		
B10NaA15	11.26	7	1.9	ไม่หยุด	-	-	ไม่มี		
B15NaA15	12.23	-	1.5	ไม่หยุด	-	-	ไม่มี		
B20NaA15	14.80	-	1.6	ไม่หยุด	-	-	ไม่มี		
B25NaA15	15.40	-	1.7	ไม่หยุด	-	-	ไม่มี		
A10	1.73	-	1.1	ไม่หยุด	-	-	ไม่มี		



**รูปที่ 4.8** ภาพของผ้าพอลิเอสเตอร์ก่อนและหลังผ่านการตกแต่งหน้าวงไฟด้วยเบนโทไรด์กับโซเดียมคลอไรด์ ที่เหลืออยู่ภายหลังการซัก 5 รอบแล้วทดสอบพฤติกรรมกราดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์แนว 45 องศา (หลังซัก)



**รูปที่ 4.9** ภาพของผ้าพอลิเอสเตอร์ก่อนและหลังการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไตรazole กับไซเดียมคลอไรด์ และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่เหลืออยู่ภายหลังจากทดสอบพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์แนว 45 องศา (หลังซัก)



**รูปที่ 4.10** ภาพของผ้าพอลิเอสเตอร์ก่อนและหลังผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไตรazole กับไซเดียมคลอไรด์ และ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 5 ที่เหลืออยู่ภายหลังจากทดสอบพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์แนว 45 องศา (หลังซัก)

#### 4.4 โครงสร้างทางเคมีของผ้าพอลิเอสเทอร์ก่อนและหลังผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเทคนิค ATR- FTIR

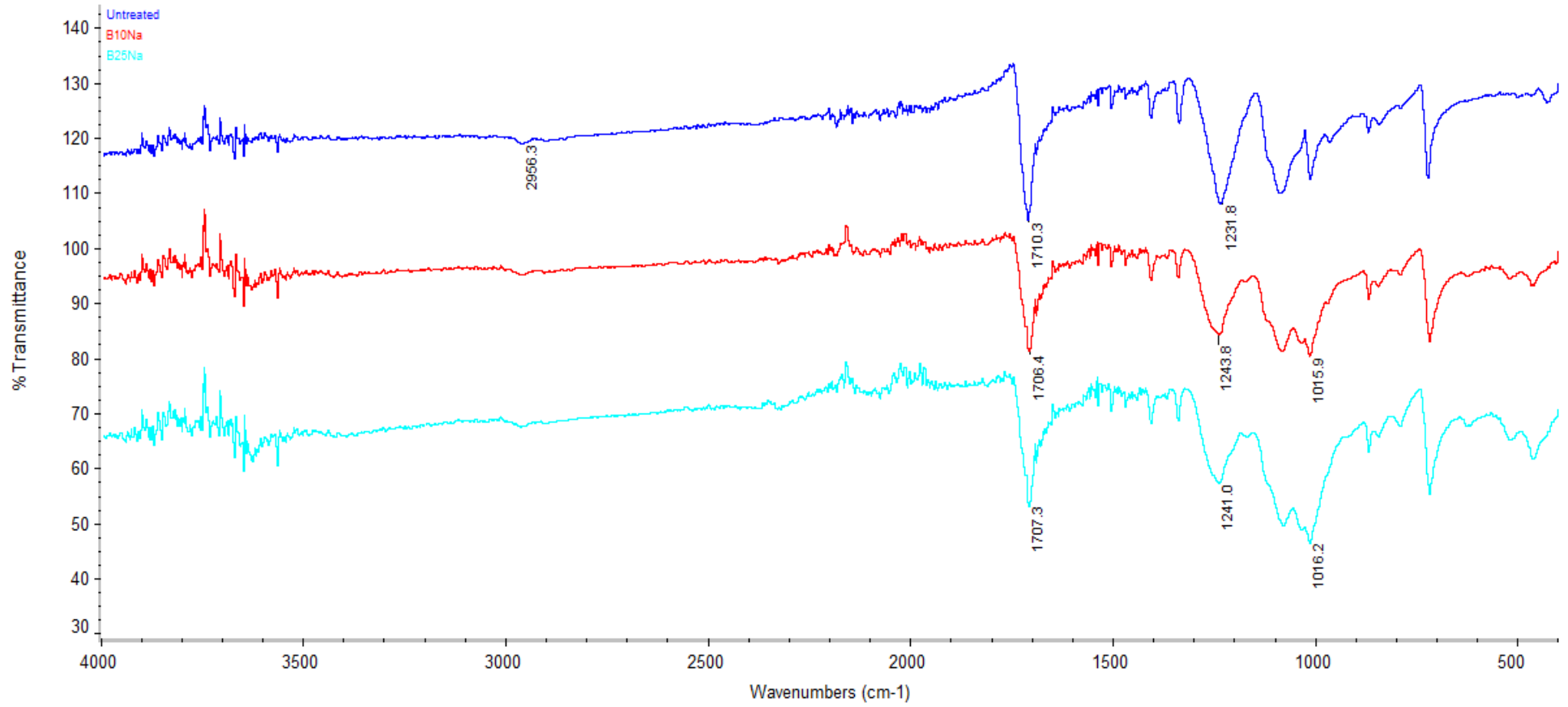
ATR-FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเทอร์ทั้งก่อนและหลังผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยสูตรต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.11 - 4.14 และตารางที่ 4.4

สำหรับผ้าพอลิเอสเทอร์ก่อนการตกแต่งหน่วงไฟพบว่า มีพีกการดูดกลืนรังสีที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งเป็นการยืนยันว่าผ้าที่นำมาใช้ตกแต่งเป็นผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ผลิตจากพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต หรือ เพ็ต ดังนี้ คือ ที่ตำแหน่ง  $1710\text{ cm}^{-1}$  ปรากฏพีกที่ชัดเจนของหมู่ คาร์บอนิล (C=O) และ ปรากฏพีกที่  $1232\text{ cm}^{-1}$  การดูดกลืนรังสีของ C-O และสุดท้าย  $2935\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีกการดูดกลืนของ C-H stretching พีกที่ปรากฏทั้งหมดเป็นไปตามค่าที่ถูกรายงานของผ้าพอลิเอสเทอร์ [35]

เมื่อมีการตกแต่งผ้าด้วยสูตรที่ประกอบด้วยเบนโทไนต์ เมื่อพิจารณาบริเวณตำแหน่งการดูดกลืนรังสีซึ่งเป็นของ Si-O stretching ควรทำให้พีกที่  $1090 - 1020\text{ cm}^{-1}$  ยาวและชัดเจนขึ้น อย่างไรก็ตามเนื่องจากผ้าพอลิเอสเทอร์จะมีพีกของ C-O บริเวณ  $1300-1090\text{ cm}^{-1}$  จึงทำให้สังเกตได้ยากเนื่องจากอาจเกิดการซ้อนทับกันของพีก สูตรที่เห็นพีกชัดเจนมีความยาวเพิ่มขึ้น เช่นสูตรที่ใช้เบนโทไนต์ร้อยละ 25 ร่วมกับโซเดียมคลอไรด์ปรากฏพีกที่  $1016\text{ cm}^{-1}$  ส่วนเกลือโซเดียมคลอไรด์ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมบริเวณนี้ นอกจากนี้ตามที่มีการรายงานเบนโทไนต์จะมีพีกของ O-H in-plane vibration ( $\text{Al}_2\text{OH}$ ) และพีกของ O-H stretching vibration บริเวณ  $3633\text{ cm}^{-1}$  นอกเหนือจากนั้นยังมีพีกของ O-H ( $\text{MgAlOH}$ )  $794-805\text{ cm}^{-1}$  [36] ซึ่งแม้สเปกตรัมที่ได้นำมาวิเคราะห์อาจไม่เห็นพีกเหล่านี้เด่นชัดในทุกๆสเปกตรัม แต่หากสังเกตให้ดีจะพบพีกดังกล่าวนี้บ้างในบางสเปกตรัม

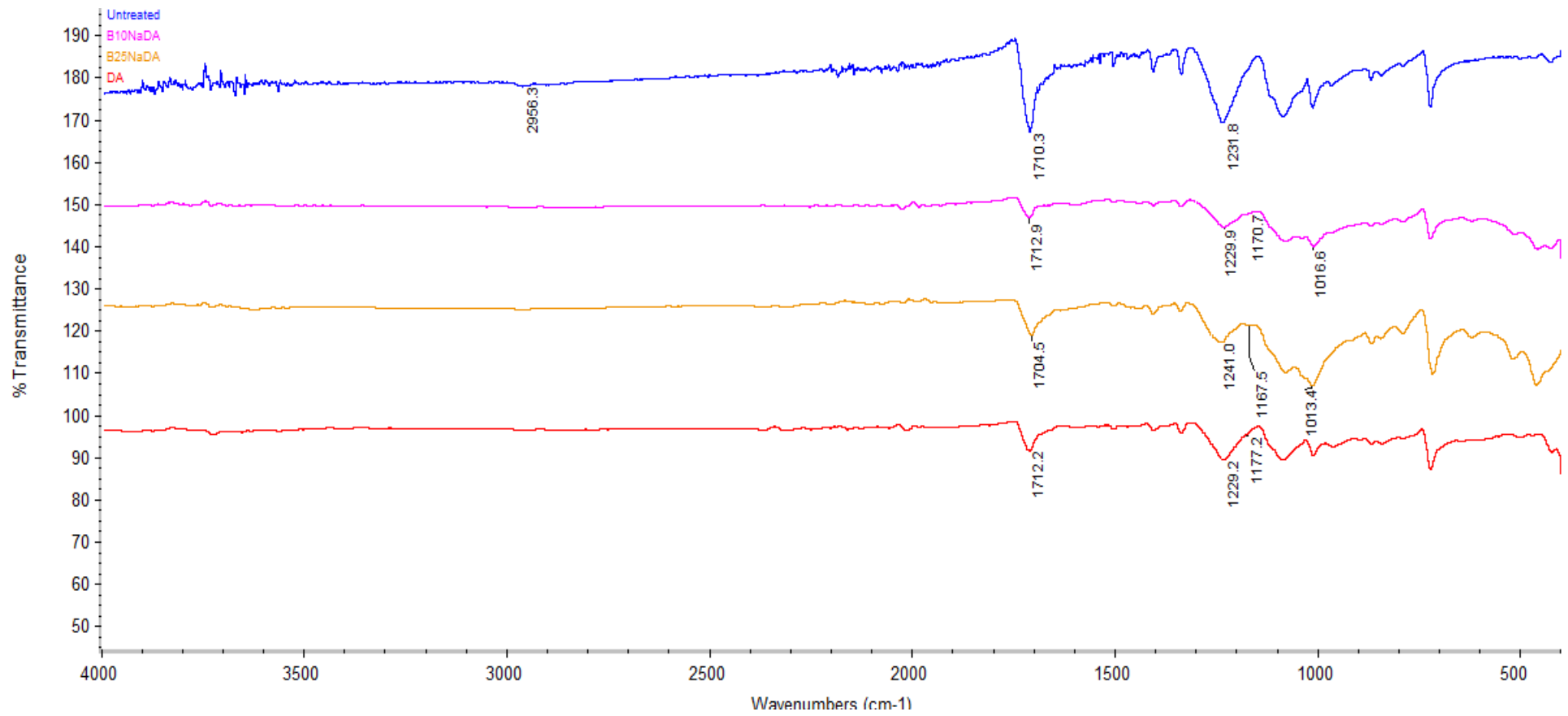
หลังผ่านการตกแต่งสูตรที่ประกอบด้วยไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตผ้าควรมีการปรากฏพีกเพิ่มขึ้นที่บริเวณ  $1300 - 1140\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นตำแหน่งของ P=O แต่เนื่องจากพีกดังกล่าวอาจเกิดการซ้อนทับกับพีกของ C-O บริเวณ  $1300-1090\text{ cm}^{-1}$  ทำให้เห็นเป็นพีก C-O ที่กว้างมากขึ้น หรืออาจเกิดพีกซ้อนทับกับพีกเล็กๆบริเวณถัดจากพีก C-O เห็นได้จากสเปกตรัมบางสูตร ในขณะเดียวกันพบว่าการใช้ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ร่วมกับเบนโทไนต์และโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก จะทำให้เกิดการลดลงของค่าการดูดกลืนรังสีในช่วง  $1090 - 1020\text{ cm}^{-1}$  จากเดิมปรากฏที่  $1016\text{ cm}^{-1}$  เป็น  $1010 - 1013\text{ cm}^{-1}$  อีกทั้งเมื่อมีไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตในสูตรร่วมกับเบนโทไนต์และโซเดียมคลอไรด์ ส่งผลทำให้บริเวณซึ่งควรเป็นตำแหน่งของ P=O มีค่าการดูดกลืนรังสีที่ต่ำลงจากเดิม  $1177$  มาอยู่ในช่วง  $1164 - 1171\text{ cm}^{-1}$

สเปกตรัมของผ้าที่สูตรสารหน่วงไฟมีอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ซึ่งควรปรากฏพีคเพิ่มเติมที่บริเวณ  $922\text{ cm}^{-1}$  อันเป็นค่าการดูดกลืนรังสีของ O-H in-plane vibration ( $\text{Al}_2\text{OH}$ ) พีคของพันธะ Al-O ที่บริเวณ  $1072\text{ cm}^{-1}$  และพีคของ Al-O stretching ( $\text{AlO}_6$ ) ที่บริเวณ  $570\text{ cm}^{-1}$  [37] แต่เนื่องจากเดิมผ้าพอลิเอสเตอร์มีพีคที่ใกล้เคียงกับบริเวณนี้อยู่ก่อนแล้วทำให้จึงเห็นได้ไม่ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เพียงสารเดียวพบว่าการมีเบนโทไนด์และโซเดียมคลอไรด์จะส่งผลให้ค่าของพีคบริเวณ  $570\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นค่าการดูดกลืนรังสีของ Al-O stretching ( $\text{AlO}_6$ ) มีค่าการดูดกลืนรังสีเพิ่มขึ้นจากเดิมซึ่งมีค่า  $557, 580\text{ cm}^{-1}$  สำหรับอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนักตามลำดับ เป็น  $618 - 625$  และ  $622 - 631\text{ cm}^{-1}$

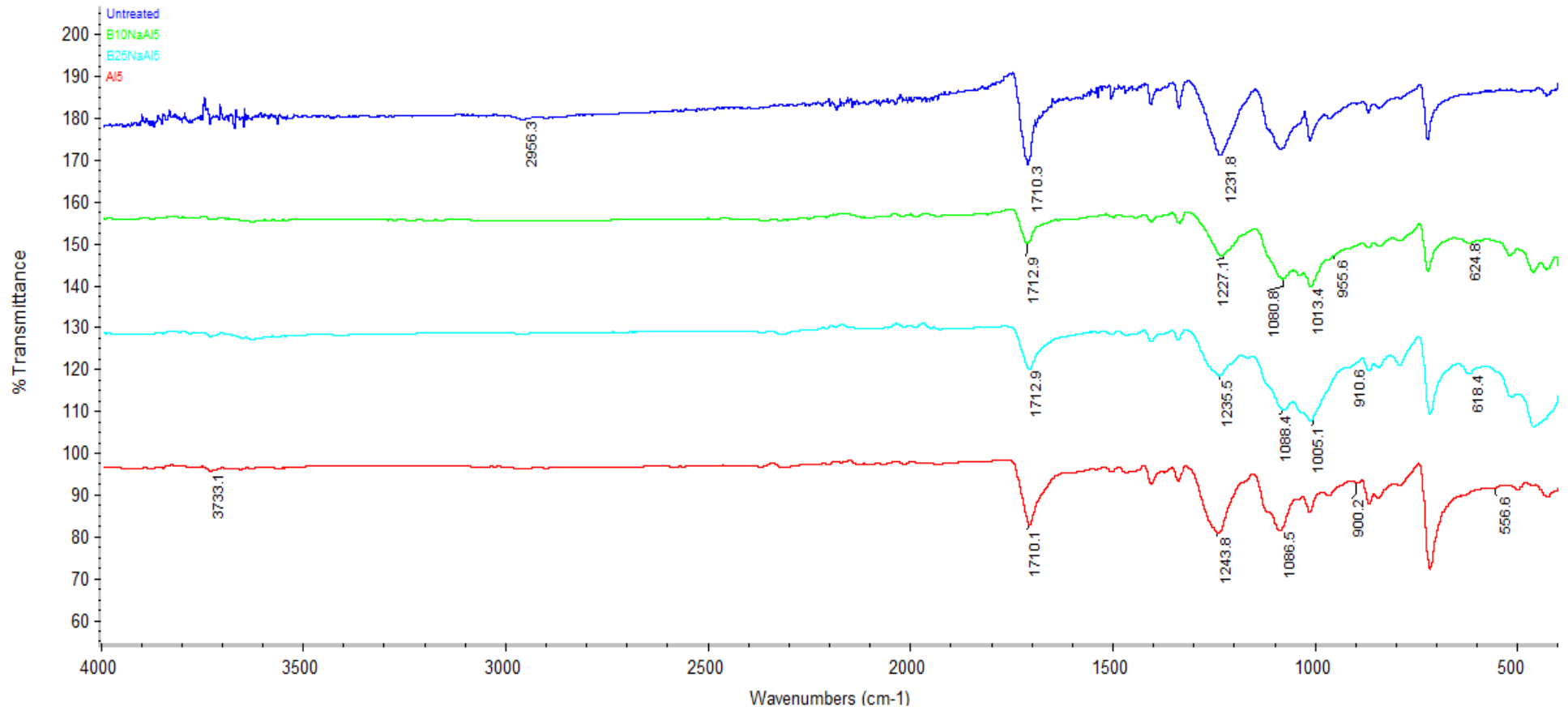


รูปที่ 4.11 ATR-FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเตอร์ก่อนการตกแต่งและหลังตกแต่งด้วยสูตร B10Na, B25Na

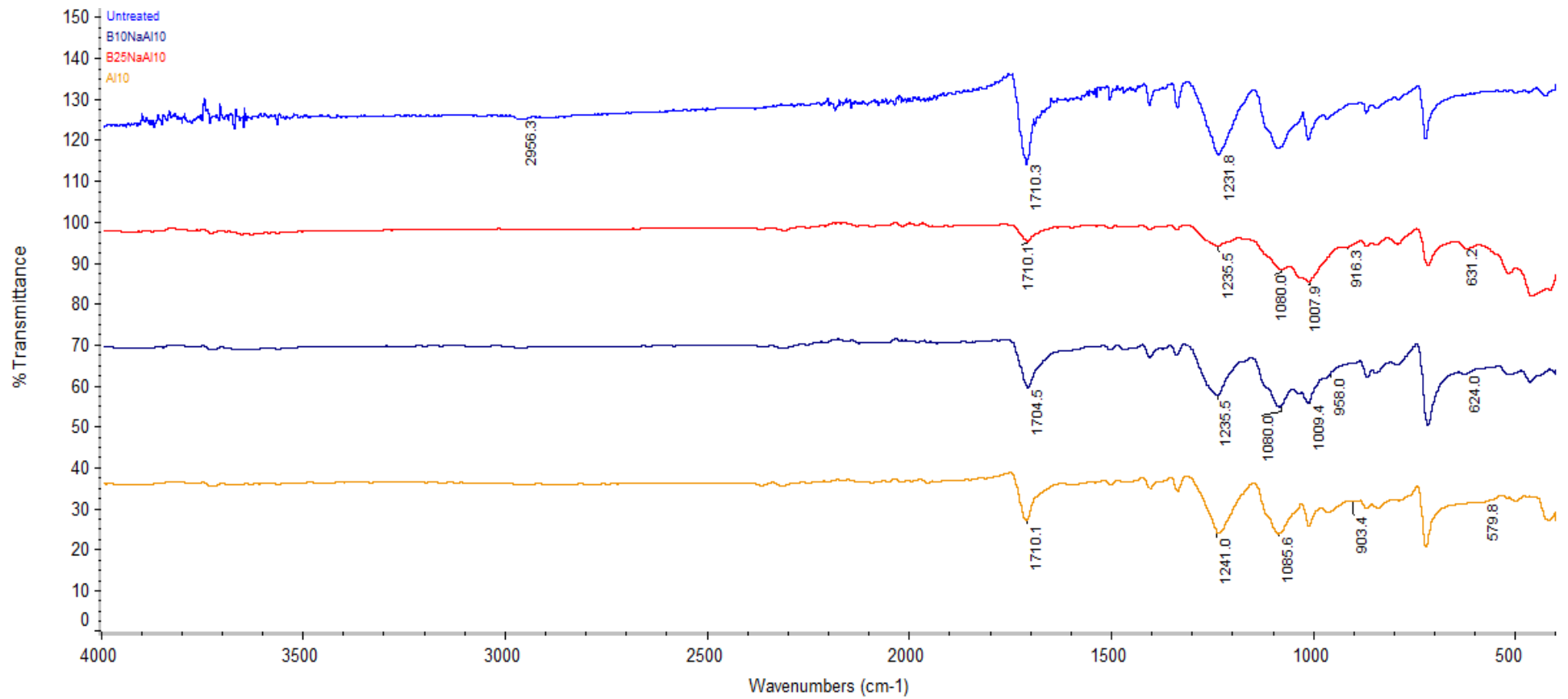




รูปที่ 4.12 ATR-FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเทอร์ก่อนการตกแต่งและหลังตกแต่งด้วยสูตร B10NaDA, B25NaDA และ DA



รูปที่ 4.13 ATR-FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเตอร์ก่อนการตกแต่งและหลังตกแต่งด้วยสูตร B10NaAl<sub>5</sub>, B25NaAl<sub>5</sub> และ Al<sub>5</sub>



รูปที่ 4.14 ATR-FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเตอร์ก่อนการตกแต่งและหลังตกแต่งด้วยสูตร B10NaAl10, B25NaAl10 และ Al10

ตารางที่ 4.4 หมู่ฟังก์ชันของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งห่วงไฟด้วยสารต่างๆ

Functional group	Wavenumber (cm <sup>-1</sup> )											
	Reported*	untreated	B10Na	B15Na	B20Na	B25Na	B10NaDA	B15NaDA	B20NaDA	B25NaDA	Na	DA
C=O	1730-1700	1710	1706	1713	1710	1707	1713	1707	1712	1705	1705	1712
C-O	1300-1050	1232	1244	1233	1241	1241	1230	1249	1235	1241	1236	1229
Si-O	1090-1020		1016	1016	1016	1016	1017	1011	1010	1013		
P=O	1300-1140						1171	1164	1171	1168		1177
O-H (Al <sub>2</sub> OH)	922											
Al-O	1072											
Al-O (AlO <sub>6</sub> )	570											

Reported\* จากหนังสือ การประยุกต์สเปกโตรสโคปีในเคมีอินทรีย์ [38]

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

Functional group	Wavenumber (cm <sup>-1</sup> )										
	Reported*	B10NaAl5	B15NaAl5	B20NaAl5	B25NaAl5	Al5	B10NaAl10	B15NaAl10	B20NaAl10	B25NaAl10	Al10
C=O	1730-1700	1713	1707	1710	1713	1710	1705	1705	1713	1710	1710
C-O	1300-1050	1227	1244	1244	1236	1244	1236	1238	1241	1236	1241
Si-O	1090-1020	1013	1017	1019	1005		1009	1016	1011	1008	
P=O	1300-1140										
O-H (Al <sub>2</sub> OH)	922	956	911	968	911	965	958	959	968	916	903
Al-O	1072	1081	1083	1080	1088	1088	1080	1088	1088	1080	1086
Al-O (AlO <sub>6</sub> )	570	625	625	618	618	557	624	622	628	631	580

Reported\* จากหนังสือ การประยุกต์สเปกโตรสโคปีในเคมีอินทรีย์ [38]

#### 4.5 องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่ง ห่วงไฟภายหลังการซักล้างด้วยเทคนิค EDX

เนื่องจากผลที่ได้จากพฤติกรรมมวลใหม่ในแนว 45 องศาของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟก่อนและหลังการซัก มีแนวโน้มที่ดีขึ้นกว่าก่อนการซักล้าง เพื่อทราบถึงชนิดของสารห่วงไฟที่เหลืออยู่ดังกล่าวจึงทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของสารที่เคลือบอยู่บนผิวเส้นใยด้วยเทคนิค EDX หรือ Energy Dispersive X-ray Analysis ในสูตรที่ก่อนการซักให้ผลการห่วงไฟเหมาะสมที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.6

จากตารางที่ 4.7 พบว่าก่อนและหลังการซักล้าง ผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ได้ผ่านการตกแต่งมีองค์ประกอบหลักเหมือนกัน แต่หลังการซักล้างจะมี Cl เป็นองค์ประกอบหลักด้วยซึ่งเป็นสารที่มีอยู่ในน้ำประปา

เบนโทไนต์จะมีองค์ประกอบได้แก่ Al, K, Fe, Si, K และมีแคตไอออน  $Na^+$ ,  $Ca^{++}$  ผ้าที่ตกแต่งห่วงไฟด้วยสูตร B10 หลังการซักล้าง ยังคงมีเบนโทไนต์เกาะอยู่บนพื้นผิวเส้นใย สังเกตได้จากการที่มีองค์ประกอบหลักเป็น Si และ Al ซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบของเบนโทไนต์

ผ้าที่ตกแต่งห่วงไฟด้วยสูตร B10Na หลังการซักล้างมีองค์ประกอบหลักเป็น Si, Al และ Na, Cl

ในส่วนของผ้าที่ตกแต่งห่วงไฟด้วยสูตร B10NaDA หลังการซักล้างมีองค์ประกอบหลักเป็น P ซึ่งมาจากไดอะมอเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตและ Mg, Si, Al ของเบนโทไนต์ และ Na, Cl จากโซเดียมคลอไรด์

สำหรับสูตรการตกแต่ง B10NaAl5 นั้นกลับพบว่าบริเวณของชิ้นงานที่ทำการทดสอบไม่มีองค์ประกอบของเบนโทไนต์เหลืออยู่ แต่ยังคงมีอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เหลืออยู่ แสดงว่าเบนโทไนต์ถูกซักล้างไปแทบทั้งหมด สอดคล้องกับผลการทดสอบพฤติกรรมในแนว 45 องศาที่เกิดการลามไฟแล้วดับได้เองไม่หลอมหยด ซึ่งเป็นผลของอะลูมิเนียมที่หลงเหลืออยู่บนผ้า

ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบทางเคมีของสารที่เคลือบอยู่บนผิวเส้นใยก่อนและหลังการซักล้าง

สูตร	องค์ประกอบทางเคมีที่พบ		
	บนพื้นผิวผ้า		บนอนุภาค
	ก่อนซัก	หลังซัก	
Untreated	C, O	C, O, Na, Cl, K, S, Al	-
B10	C, O, Si, Al, Mg, Ca, Na	C, O, Na, Si, Al	Si, O, Al Mg, Na
B10Na	Cl, Na, O Si, Al, C, Ca	C, O, Na, Si, Al, Cl, K	-
DA	C, O, P	C, O, P	N, O, P
B10NaDA	C, O, Na, Mg, Al, Si, P, Cl, Ca	C, O, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Fe	-
AI5	C, O, Al	C, O, Al	O, Al
B10NaAI5	C, O, Mg, Si, Al, Cl, K, Ca	C, O, Al	-
Standard soap	-	-	C, O, Na

## 4.6 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่ง หนองไฟด้วยเทคนิค SEM

### 4.6.1 ก้อนชัก

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหนองไฟแสดงผลในรูปที่ 4.17 จะเห็นว่าเส้นใยพอลิเอสเตอร์ก่อนการตกแต่งหนองไฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง ไม่บิดตัว มีพื้นผิวเรียบ และค่อนข้างสะอาด ดังรูปที่ 4.15 และเมื่อผ้าพอลิเอสเตอร์ตกแต่งด้วยเบนโทไนด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่า มีอนุภาคเบนโทไนด์เกาะอยู่บนเส้นใยเป็นกลุ่มก้อน แผ่นหนาๆกระจายอยู่ทั่วไปบนพื้นผิว

#### 4.6.1.1 ผ้าพอลิเอสเตอร์ตกแต่งหนองไฟด้วยเบนโทไนด์ร่วมกับโซเดียมคลอไรด์

สำหรับสูตรที่มีโซเดียมคลอไรด์ร่วมด้วยที่ความเข้มข้นเบนโทไนด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักพบว่าเบนโทไนด์เกาะบนเส้นใยในปริมาณที่เพิ่มขึ้นและมองเห็นพื้นผิวเส้นใยขรุขระ มีกลุ่มก้อนของเบนโทไนด์บ้างเล็กน้อย สำหรับสูตรที่ความเข้มข้นเบนโทไนด์ร้อยละ 15 ที่พื้นผิวมีเบนโทไนด์เกาะบนเส้นใยในปริมาณมากค่อนข้างสม่ำเสมอ หากแต่ส่วนมากไม่พบเบนโทไนด์แทรกอยู่ตามช่องว่างของเส้นใยเนื่องจากอนุภาคเบนโทไนด์รวมตัวกันเป็นแผ่นใหญ่ เสมือนว่าชั้นของเบนโทไนด์เคลือบบนผิวผ้า ในขณะที่สูตรที่ความเข้มข้นเบนโทไนด์สูงขึ้น เช่นสูตร B20Na กลับพบว่ามีปริมาณของเบนโทไนด์บนผิวเส้นใยน้อยกว่าสูตรที่ความเข้มข้นต่ำ เบนโทไนด์ชอบที่จะจับกลุ่มกันเป็นก้อนขนาดเล็ก มากกว่าที่จะเกาะผิวเส้นใย ในทำนองเดียวกัน เมื่อมีความเข้มข้นของเบนโทไนด์เพิ่มขึ้นดังสูตร B25Na นั้น เบนโทไนด์ มีการจับกลุ่มกันเป็นก้อนแต่ก็มีอยู่ทั่วถึงแม้ในช่องว่างระหว่างเส้นใย

สำหรับผ้าที่จุ่มอัดด้วยโซเดียมคลอไรด์เพียงอย่างเดียวพบว่ามีอนุภาคสามารถเกาะผิวเส้นใยได้สม่ำเสมอ

#### 4.6.1.2 ผ้าพอลิเอสเตอร์ตกแต่งหนองไฟด้วยเบนโทไนด์ร่วมกับโซเดียมคลอไรด์ และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต

สำหรับผ้าที่ตกแต่งด้วยไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตเพียงอย่างเดียวพบว่าเส้นใยถูกเคลือบอย่างสม่ำเสมอและทั่วถึงมาก พื้นผิวเส้นใยยังคงความเรียบอย่างเห็นได้ชัดซึ่งแตกต่างจากการใช้เบนโทไนด์ตกแต่ง

อย่างไรก็ตามสำหรับผ้าพอลิเอสเตอร์ที่มีการนำไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตมาตกแต่งร่วมกับเบนโทไนด์และโซเดียมคลอไรด์พบว่าพื้นผิวเส้นใยมีสารเคลือบค่อนข้าง



หนารวมทั้งมีอนุภาคของเบนโทไนต์แทรกอยู่ตามช่องว่างระหว่างเส้นใย และมีการจับตัวเป็นก้อนด้วย

#### 4.6.1.3 ผ้าพอลิเอสเตอร์ตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ร่วมกับโซเดียมคลอไรด์ และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์

ผ้าพอลิเอสเตอร์หลังผ่านการตกแต่งด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักพบว่าปริมาณของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เกาะบนผิวเส้นใยไม่มากนักสอดคล้องกับค่า % add on ที่คำนวณได้ แต่ก็มีคุณสมบัติ มีอนุภาคขนาดเล็กๆ เกาะทั้งที่พื้นผิวและช่องว่างระหว่าง เส้นใย ส่วนที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักบนพื้นผิวเส้นใยมีอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จับกันเป็นก้อนเล็กๆบางส่วน แต่พื้นผิวเส้นใยก็ค่อนข้างเรียบ

สำหรับผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ร่วมกับโซเดียมคลอไรด์และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์สูตร B10NaAl5 นั้นมีเบนโทไนต์และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เกาะเคลือบบนผิวเส้นใยอย่างสม่ำเสมอมากที่สุด แต่เมื่อปริมาณเบนโทไนต์เพิ่มขึ้นก็ยังคงเห็นมีสารเคลือบหนาบนผิวเส้นใยแต่ไม่ค่อยสม่ำเสมอ สารจับกันเป็นก้อนติดอยู่กระจายอย่างไม่สม่ำเสมอบนผิวเส้นใย และแทรกอยู่ตามช่องว่างระหว่างเส้นใย

และเช่นเดียวกันเมื่อปริมาณอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 10 ผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยสูตร B10NaAl10 มีความสม่ำเสมอของสารที่เกาะบนผิวเส้นใยมากที่สุด แต่เมื่อปริมาณเบนโทไนต์เพิ่มขึ้นก็ยังคงเห็นมีสารเคลือบหนาบนผิวเส้นใยแต่ไม่ค่อยสม่ำเสมอ สารจับกันเป็นก้อนติดอยู่กระจายอย่างไม่สม่ำเสมอบนผิวเส้นใย และแทรกอยู่ตามช่องว่างระหว่างเส้นใย

#### 4.6.2 หลังซัก

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟภายหลังการซักแสดงผลในรูปที่ 4.16 จะเห็นว่าอนุภาคของสารตกแต่งหน่วงไฟที่เคยเกาะเป็นก้อนๆหรือเป็นแผ่นๆติดบนเส้นใยหรือแทรกอยู่ระหว่างเส้นใยจะหลุดออกไปหมด เหลือเป็นสารที่เคลือบติดบางๆที่ผิวเส้นใยเท่านั้น

เส้นใยพอลิเอสเตอร์ก่อนการตกแต่งหน่วงไฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง ไม่บิดตัว มีพื้นผิวเรียบและค่อนข้างสะอาด มีการฉีกขาดของเส้นใยบางบริเวณซึ่งเป็นผลจากการซักล้าง

#### 4.6.2.1 ผ้าพอลิเอสเตอร์ตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ร่วมกับโซเดียมคลอไรด์

ผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยเบนโทไนต์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักเพียงอย่างเดียวพบว่า หลังการซักมีอนุภาคเบนโทไนต์เหลืออยู่บ้างโดยมีลักษณะเป็นอนุภาคขนาดเล็กกระจายติดบนผิวเส้นใย และบางบริเวณสังเกตเห็นเป็นลักษณะแผ่นเคลือบเส้นใย

โดยรอบ ต่างจากภาพก่อนการชักล้างที่มีอนุภาคเบนโทไนด์เกาะอยู่บนเส้นใยเป็นกลุ่มก้อนหนาๆ แสดงว่าการชักทำให้อนุภาคที่เกาะอยู่โดยรอบเส้นใยหลุดออกเหลือเพียงเบนโทไนด์บางส่วนที่เกาะเคลือบอยู่บางๆ เท่านั้น

สำหรับสูตรที่มีโซเดียมคลอไรด์ร่วมด้วยที่ความเข้มข้นเบนโทไนด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่าเบนโทไนด์ได้หลุดออกไปเป็นจำนวนมาก แต่เบนโทไนด์ที่เหลืออยู่ก็ได้เคลือบติดเส้นใยอย่างสม่ำเสมอถึงแม้ว่าจะยังคงพบอนุภาคขนาดใหญ่เหลือบ้างเล็กน้อย และเช่นเดียวกันสูตรที่มีโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 หลังชักพบว่าเบนโทไนด์ได้หลุดออกไปเป็นจำนวนมาก เหลือเพียงอนุภาคขนาดเล็กเกาะกระจายตัวอยู่บนผิวเส้นใย แทบไม่มีส่วนที่เป็นชั้นเคลือบบนเส้นใย มีเพียงบางบริเวณเท่านั้น สำหรับสูตรที่มีปริมาณเบนโทไนด์สูงขึ้น ดังสูตร B20Na และ B25Na พบว่ายังคงมีส่วนที่เคลือบบนเส้นใย และมีอนุภาคขนาดเล็กกระจายอยู่ตามเส้นใยบ้าง

#### 4.6.2.2 ผ้าพอลิเอสเตอร์ตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนด์ร่วมกับโซเดียมคลอไรด์ และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต

ผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตเพียงอย่างเดียว พบว่าภายหลังการชักมีเส้นใยบางส่วนที่อาจถูกทำลายลงบ้างแต่ก็มีสารเคลือบบางๆ ที่ผิวเส้นใยอย่างสม่ำเสมอ พื้นผิวเส้นใยยังคงความเรียบอย่างเห็นได้ชัด

สำหรับผ้าที่ตกแต่งด้วยไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตร่วมกับเบนโทไนด์และโซเดียมคลอไรด์ จะเห็นว่าช่องว่างระหว่างเส้นใยหรือพื้นผิวเส้นใยที่เคยมีสารเป็นก้อนๆ หรือเป็นแผ่นๆ เกาะอยู่นั้นได้หลุดออกไปหมด เหลือเป็นชั้นของสารตกแต่งหน่วงไฟเคลือบติดอยู่บางๆ แต่เมื่อปริมาณเบนโทไนด์เพิ่มสูงขึ้นเป็นร้อยละ 25 จะสังเกตเห็นมีอนุภาคสารตกแต่งเล็กๆ เกาะติดที่ผิวเส้นใยโดยรอบ

#### 4.6.2.3 ผ้าพอลิเอสเตอร์ตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนด์ร่วมกับโซเดียมคลอไรด์ และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์

ผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 พบว่าภายหลังการชักเหลืออะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เคลือบติดบนผิวเส้นใย แต่ไม่ค่อยเรียบ

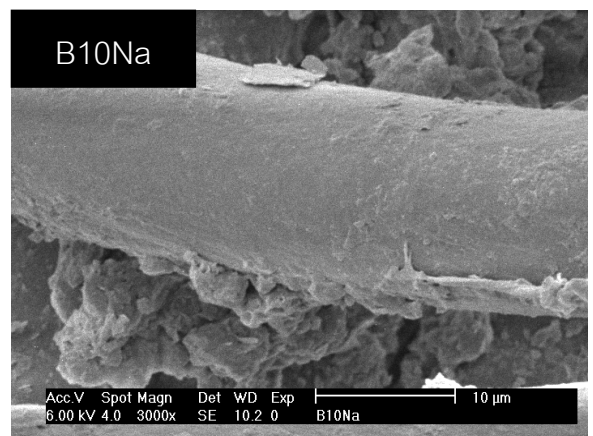
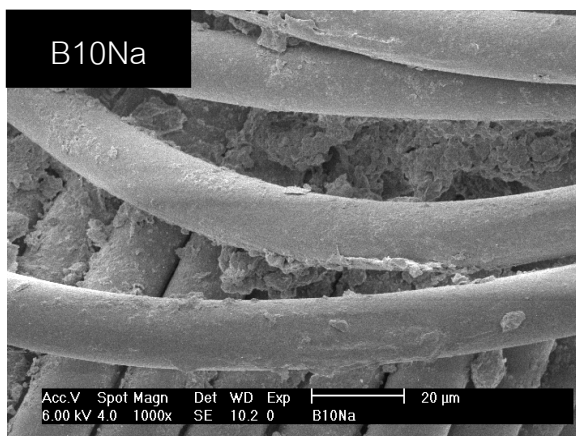
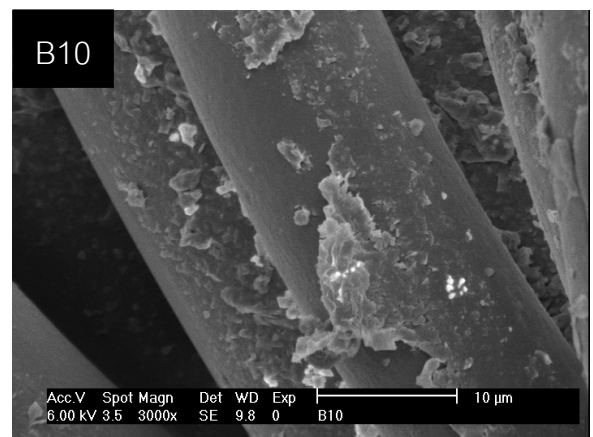
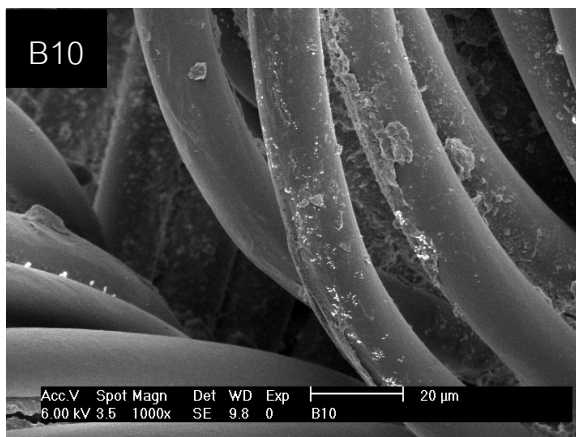
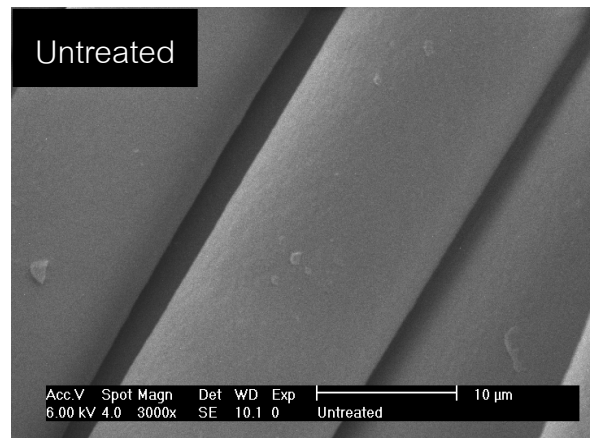
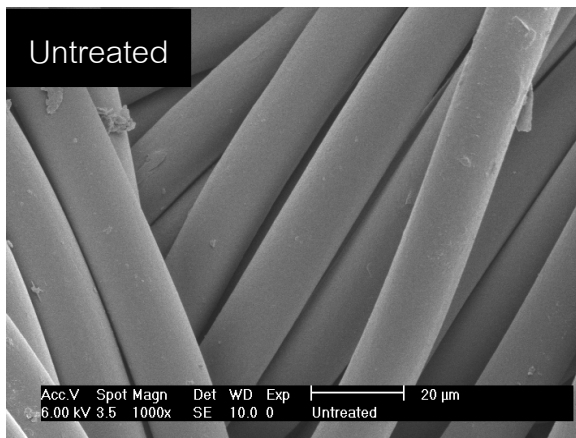
สำหรับผ้าที่ตกแต่งด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับเบนโทไนด์และโซเดียมคลอไรด์ จะเห็นว่าช่องว่างระหว่างเส้นใยหรือพื้นผิวเส้นใยที่เคยมีสารเป็นก้อนๆ หรือเป็นแผ่นๆ เกาะอยู่นั้นได้หลุดออกไปหมด เหลือเป็นชั้นของสารตกแต่งหน่วงไฟเคลือบติดอยู่ แต่เมื่อปริมาณเบนโทไนด์เพิ่มสูงขึ้นชั้นเคลือบรอบเส้นใยค่อนข้างหนาเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ การหลอมหยด ของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ผ่านการตกแต่งและตกแต่งด้วยสารตกแต่งหน่วงไฟชนิดต่างๆ ทั้งก่อนชักและหลังชักที่

แตกต่างกัน ( 4.2 และ 4.3) ร่วมกับภาพถ่าย SEM ของผ้าดังกล่าวทั้งก่อนซักและหลังซักที่ได้กล่าวข้างต้น (4.6.1 และ 4.6.2) พบว่าภายหลังการซัก 5 รอบ ผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟสามารถห่วงไฟได้ดีมาก ไม่ติดไฟ ไม่มีการลามไฟ หรือหากติดไฟก็มีเวลาลามไฟสั้นมาก หลังจากนำแหล่งจุดไฟออกไปแล้วเปลวไฟก็ดับเองได้ ในขณะที่ผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟยังคงหตุตัวหนีไฟแล้วติดไฟภายหลัง เปลวไฟมีความรุนแรงจากนั้นก็มีการลามไฟต่อไปเรื่อยๆ และที่สำคัญคือเริ่มมีการหลอมหยดลงมาบนแผ่นสำลีสองรับด้านล่างในเวลาที่รวดเร็วเพียง 4 วินาทีหลังจากนำแหล่งจุดไฟออก และยังทำให้แผ่นสำลีสองรับด้านล่างลุกไหม้อย่างรุนแรงด้วย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการซักได้ขจัดอนุภาคของสารตกแต่งห่วงไฟเช่นเบนโทไนต์ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ เกาะเป็นก้อนๆหรือเป็นแผ่นหนาๆเกาะหลวมๆอยู่ที่พื้นผิวเส้นใยหรือแทรกอยู่ระหว่างช่องว่างของเส้นใยออกไปหมดหรือเกือบหมดเหลือเพียงสารตกแต่งห่วงไฟที่ได้ผสมกันอย่างดีเกาะหรือเคลือบอยู่ที่เส้นใยโดยรอบ

1000x

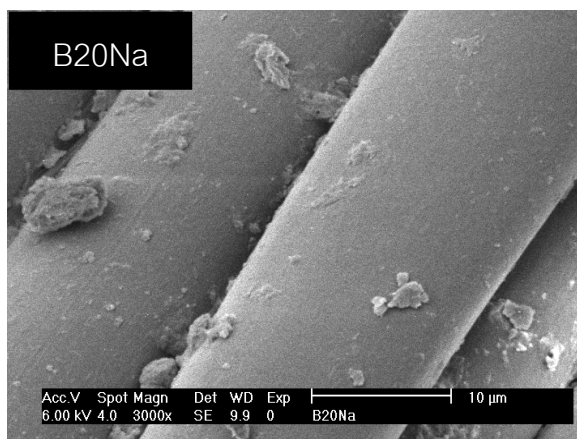
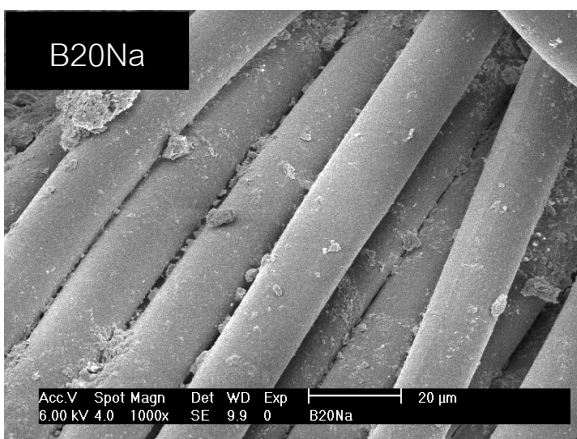
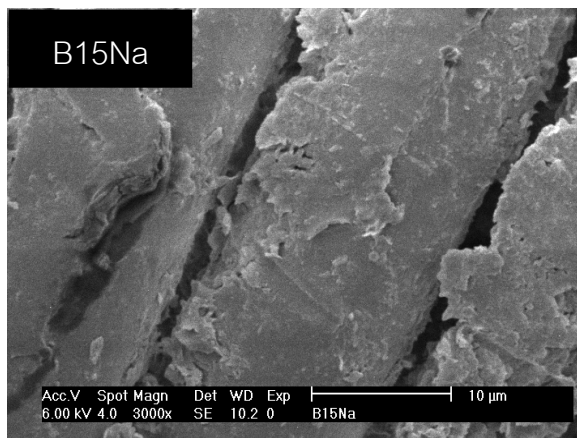
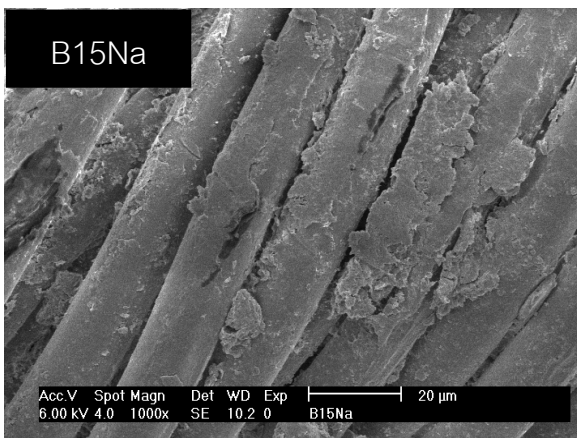
3000x



รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผ้าพอลิเอสเตอร์ทั้งก่อน  
และหลังการตกแต่งห่วงไฟ

1000x

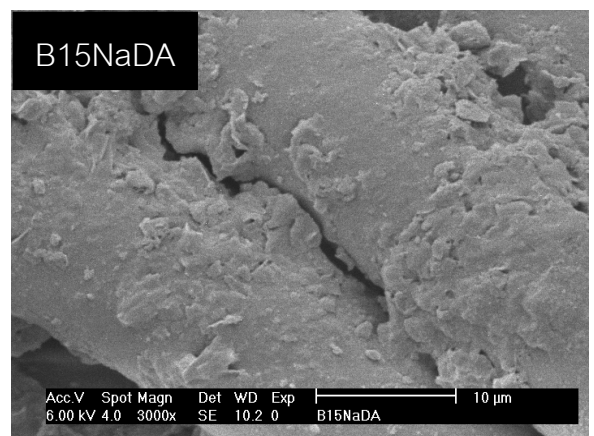
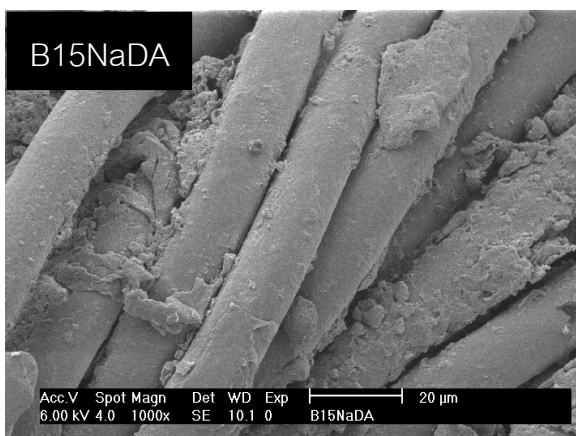
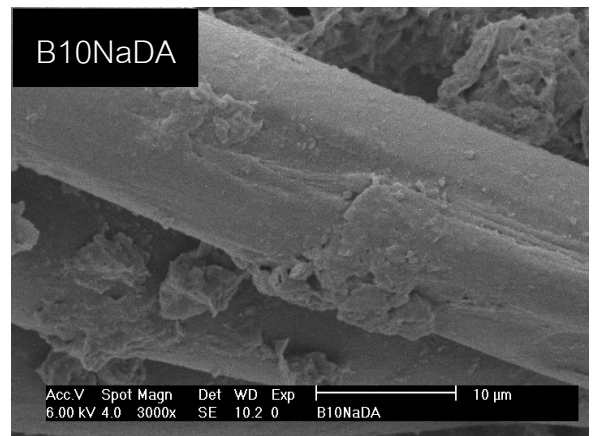
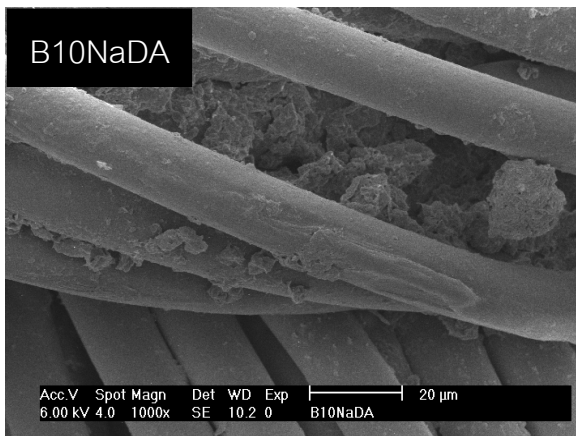
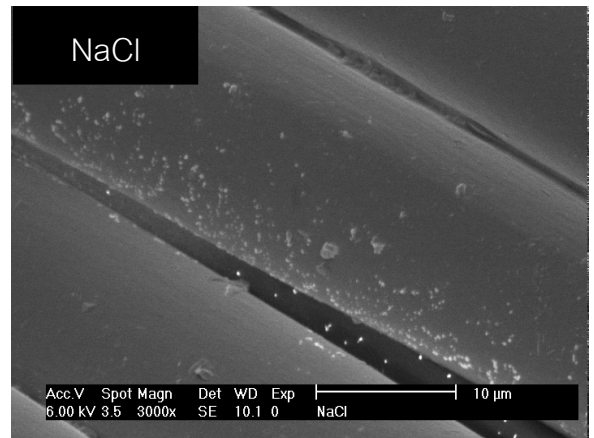
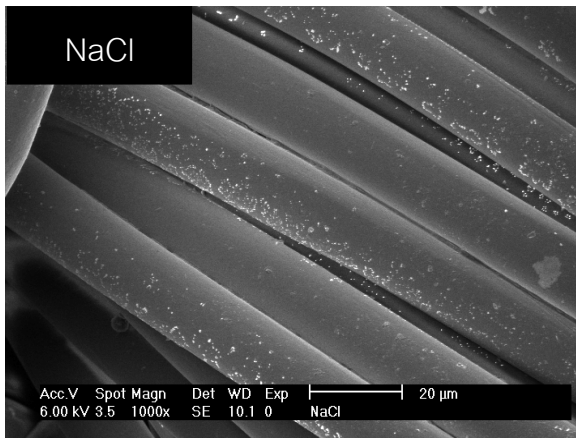
3000x



รูปที่ 4.15 (ต่อ)

1000x

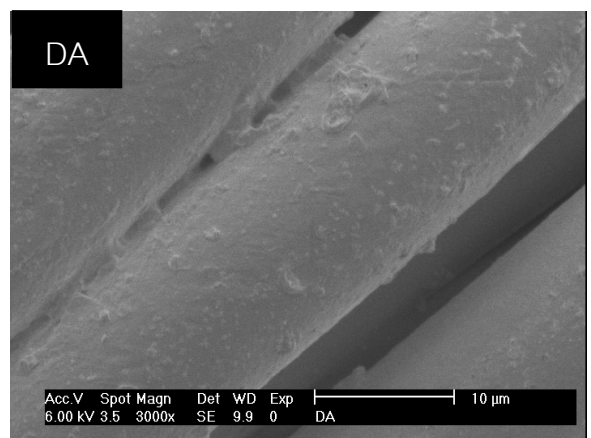
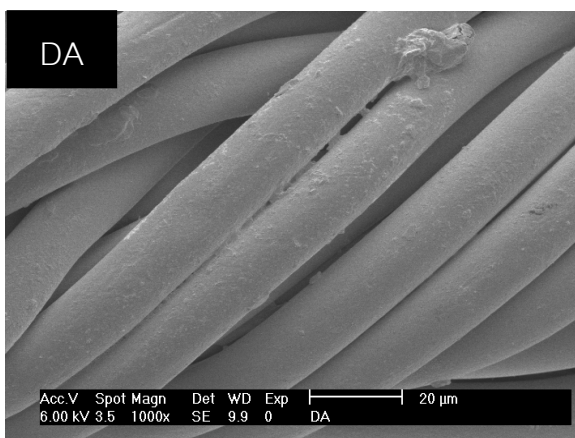
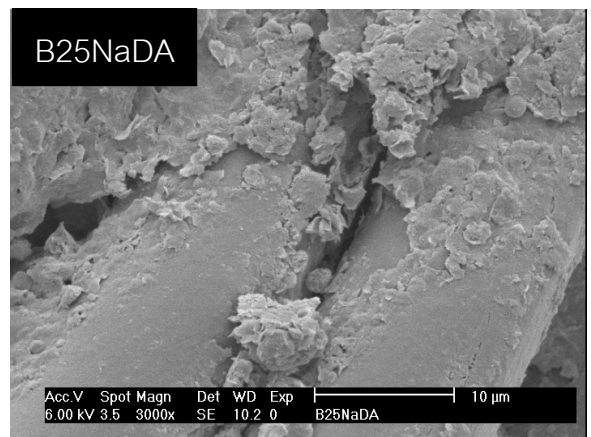
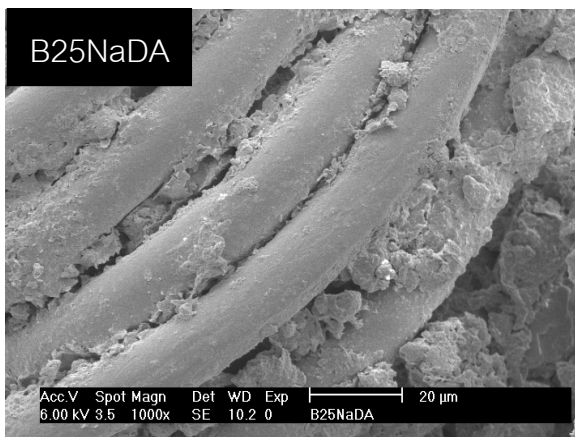
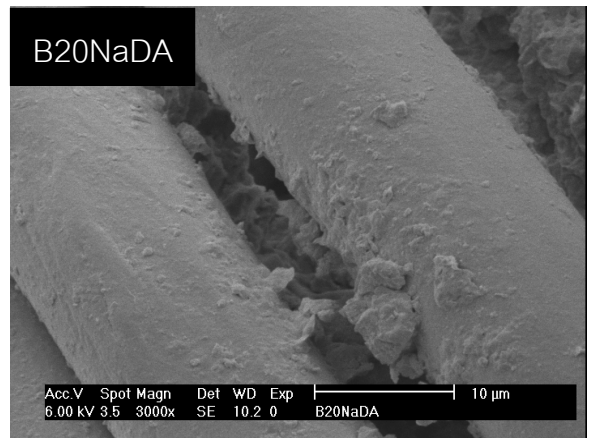
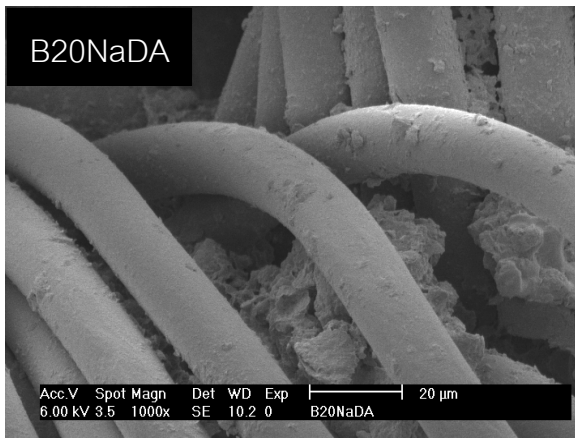
3000x



รูปที่ 4.15 (ต่อ)

1000x

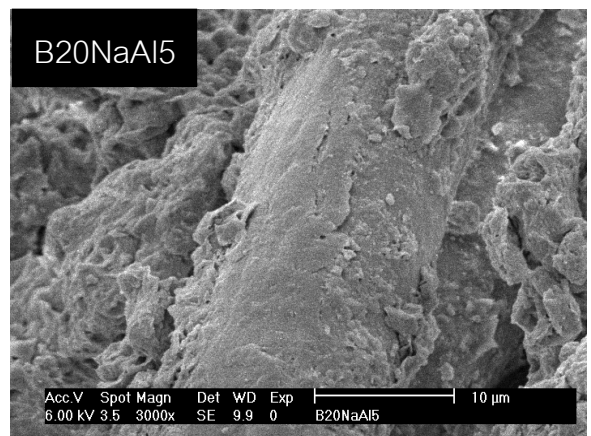
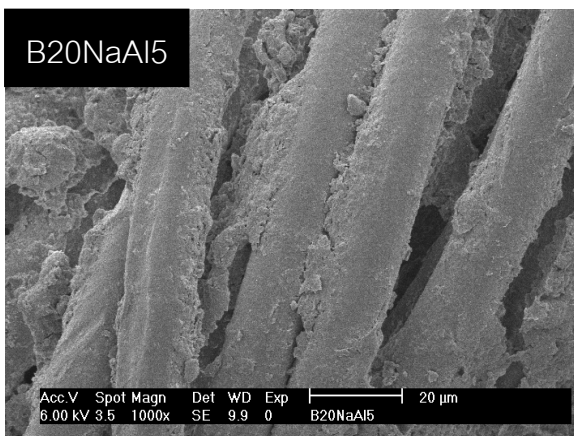
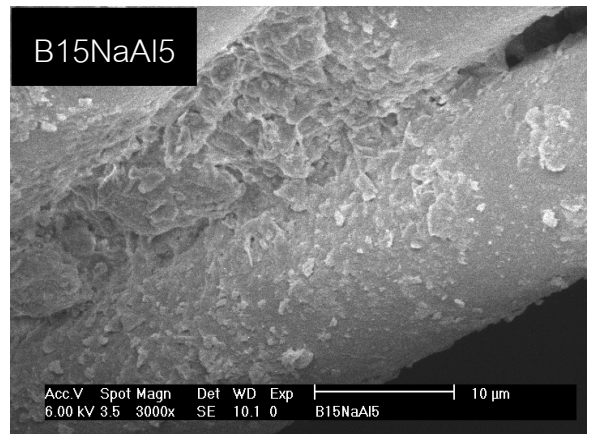
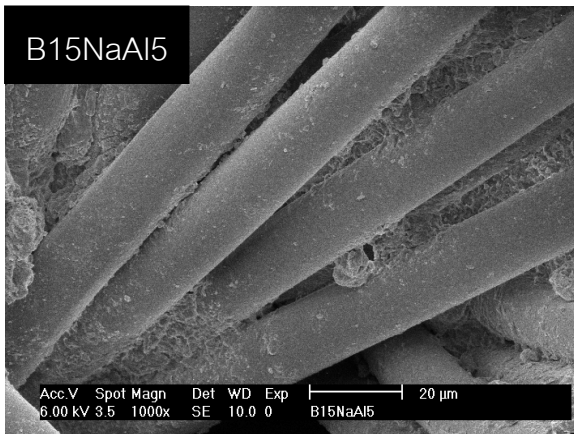
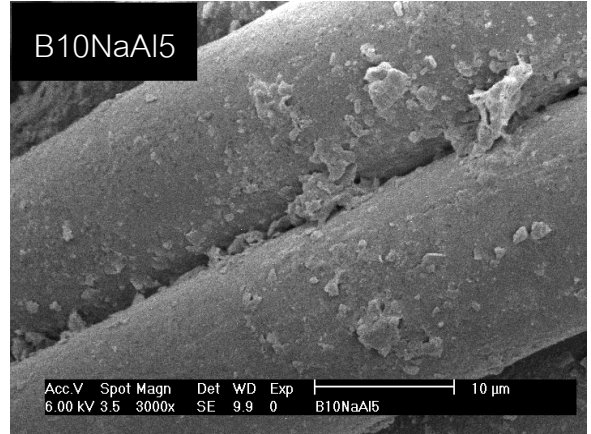
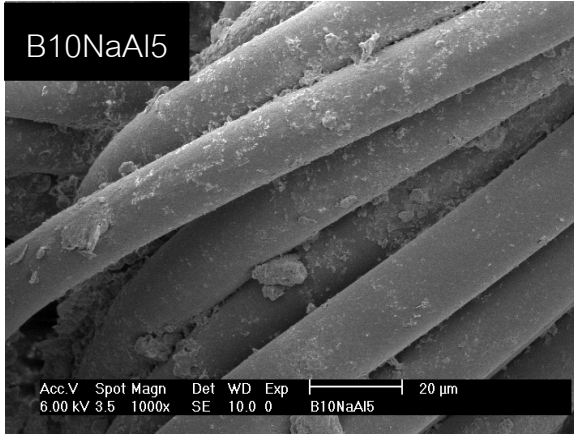
3000x



รูปที่ 4.15 (ต่อ)

1000x

3000x

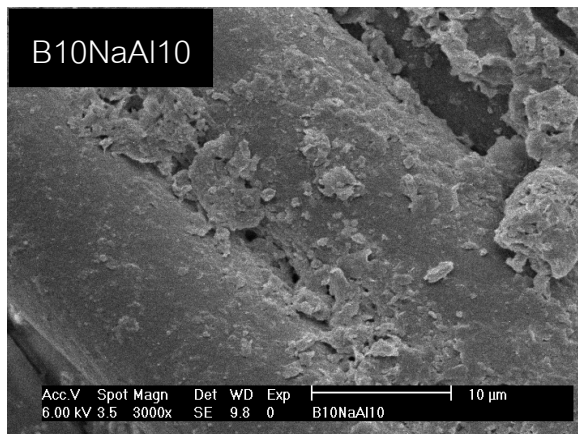
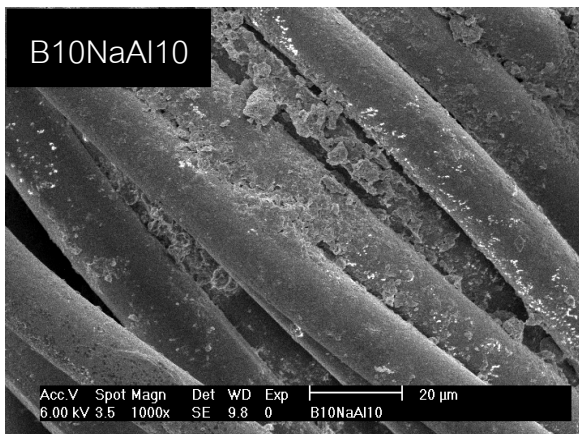
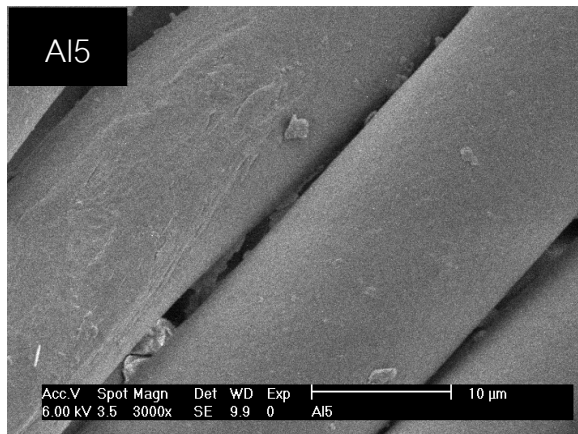
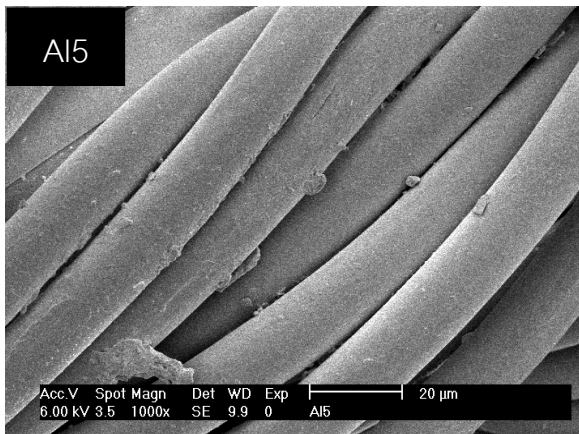
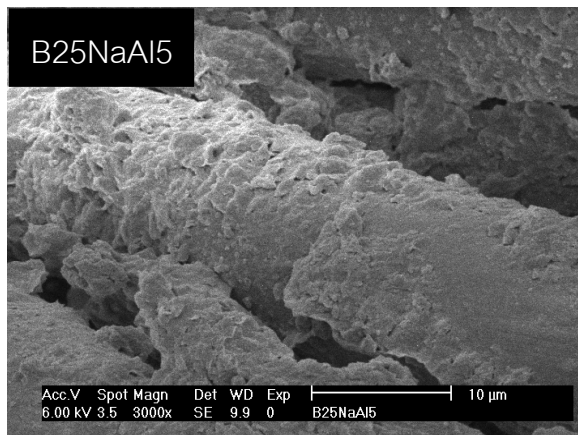
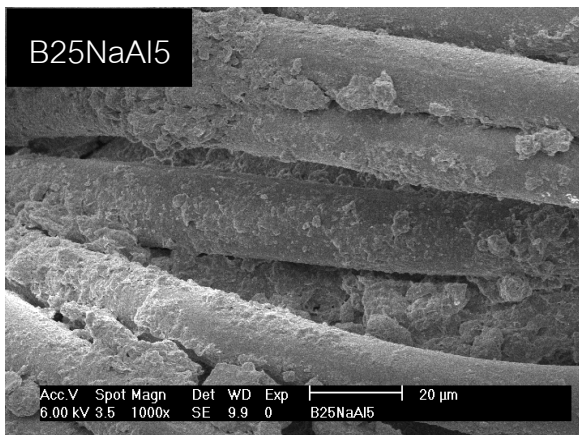


รูปที่ 4.15 (ต่อ)



1000x

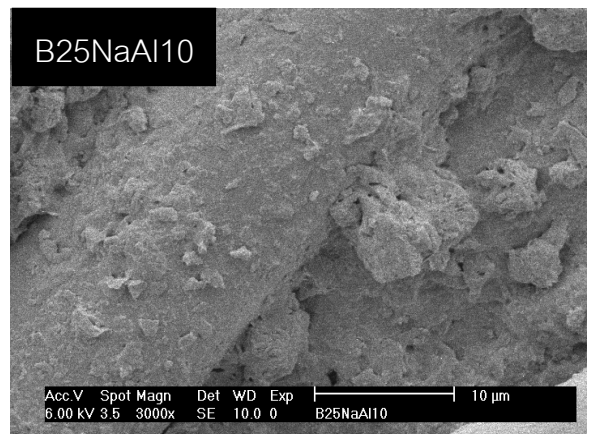
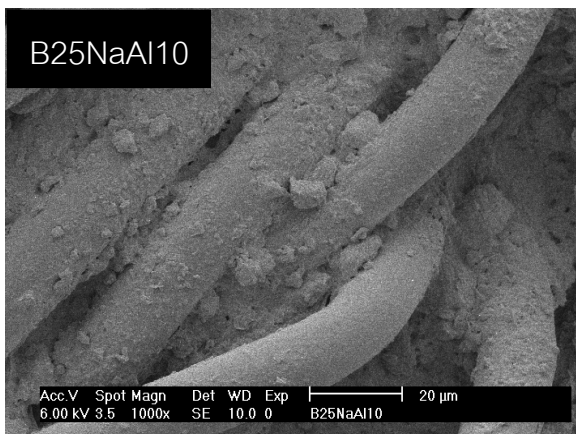
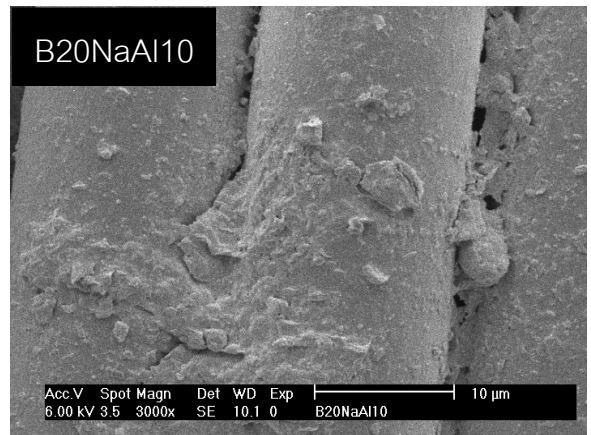
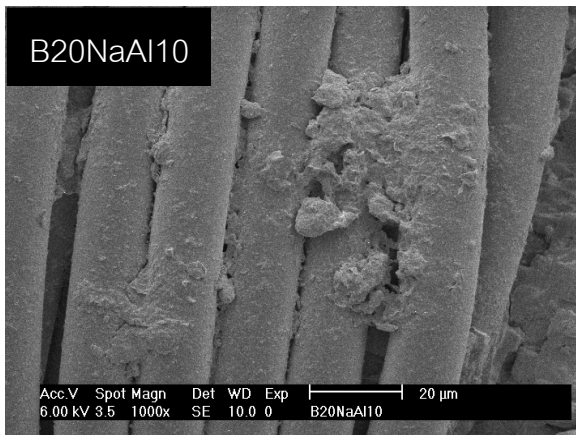
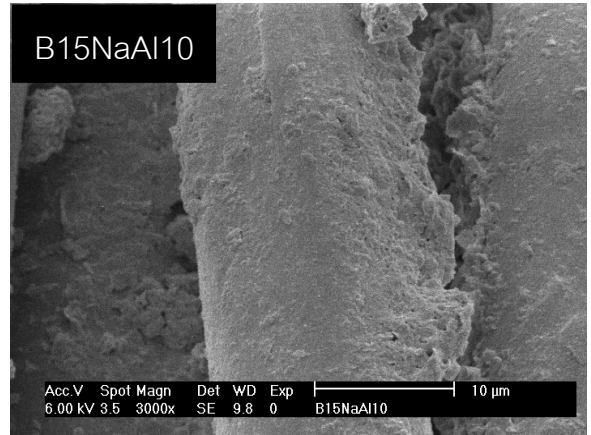
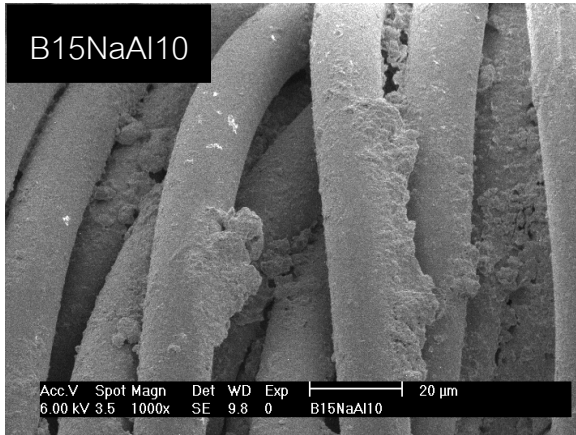
3000x



รูปที่ 4.15 (ต่อ)

1000x

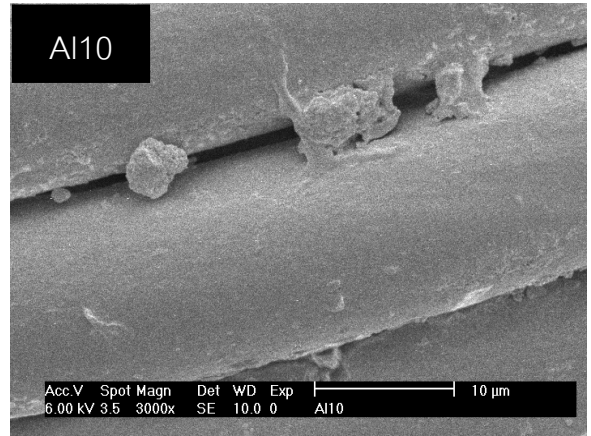
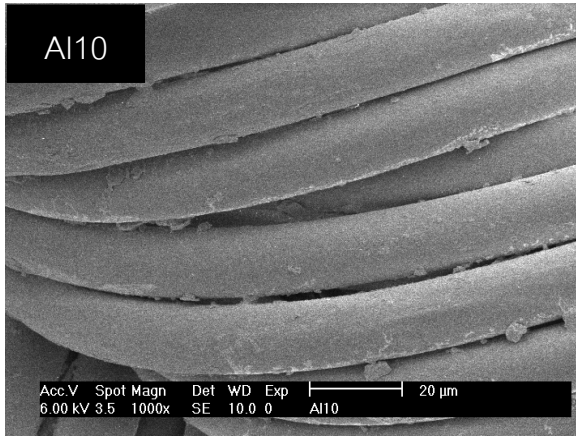
3000x



รูปที่ 4.15 (ต่อ)

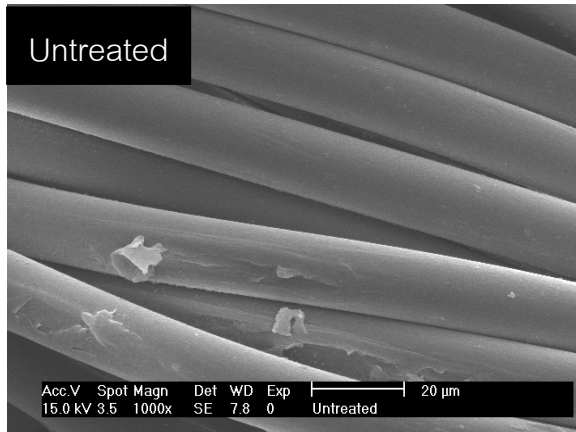
1000x

3000x

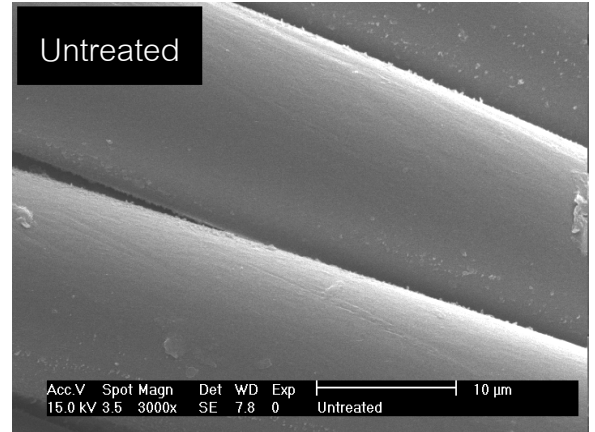


รูปที่ 4.15 (ต่อ)

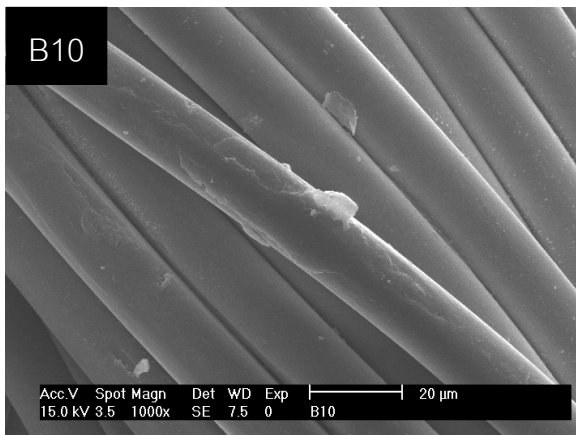
1000x



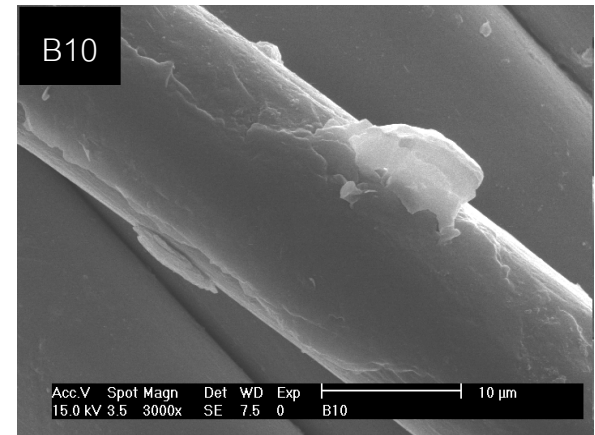
3000x



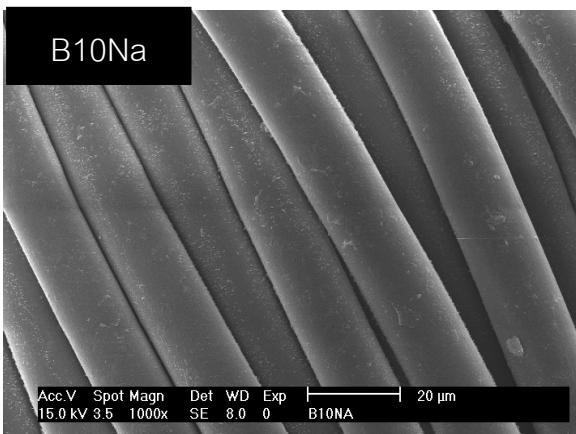
B10



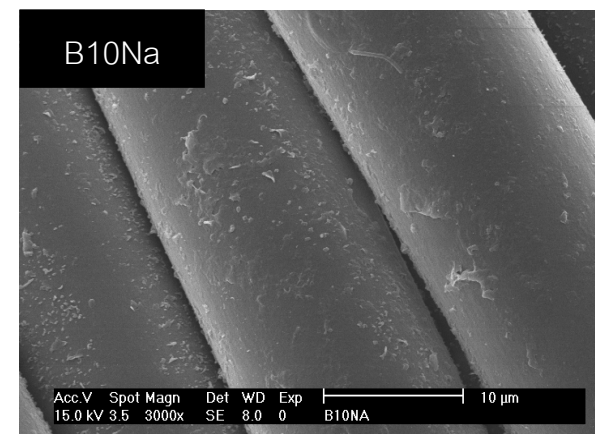
B10



B10Na



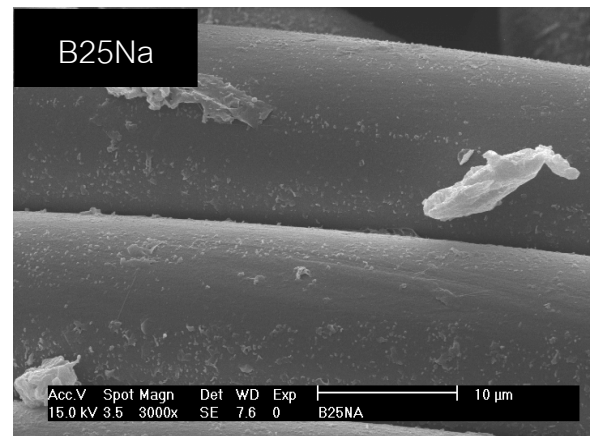
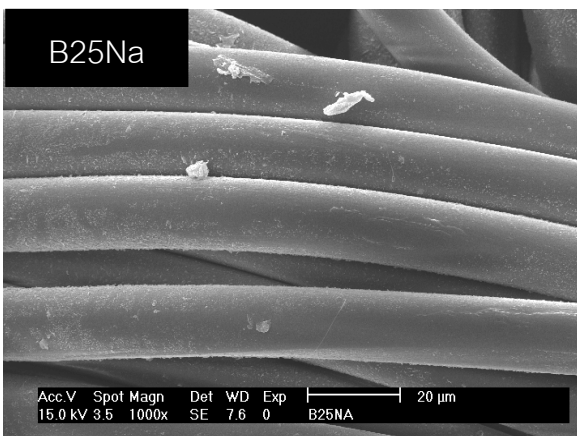
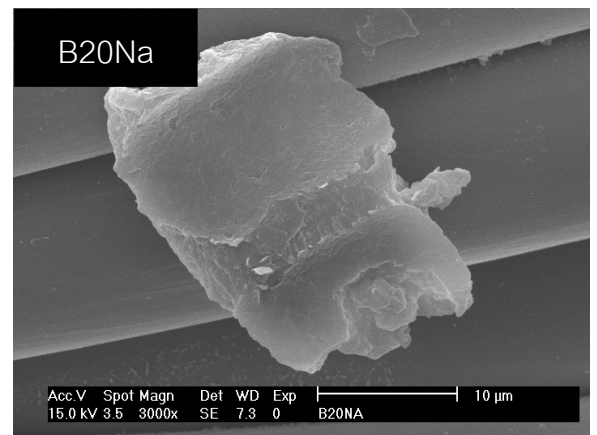
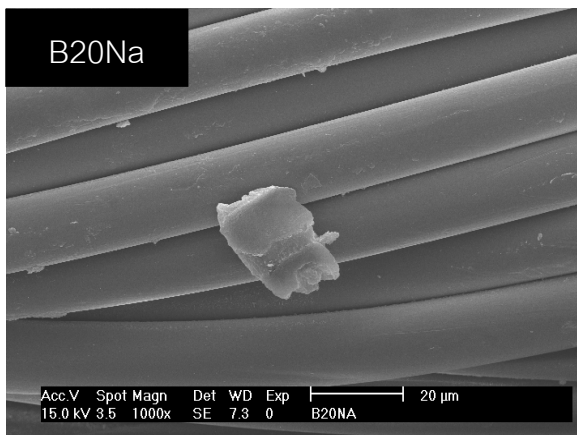
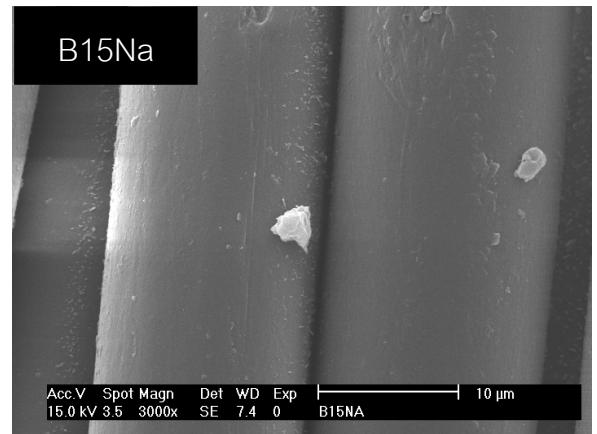
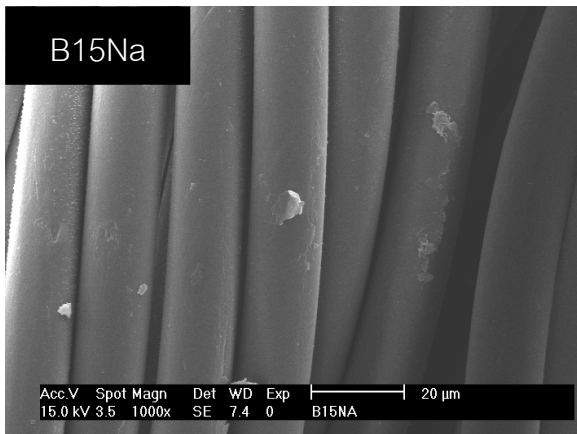
B10Na



รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผ้าพอลิเอสเตอร์ทั้งก่อนและหลังการตกแต่งหน้าผิวไฟลิ่งผ่านการซัก 5 รอบ

1000x

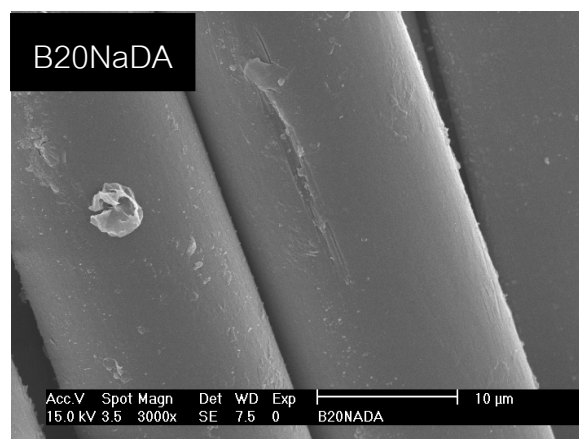
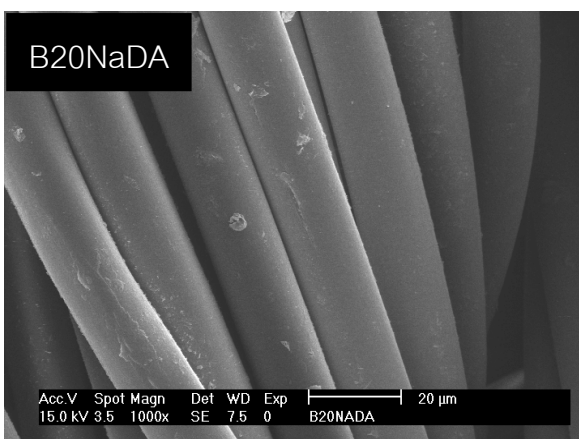
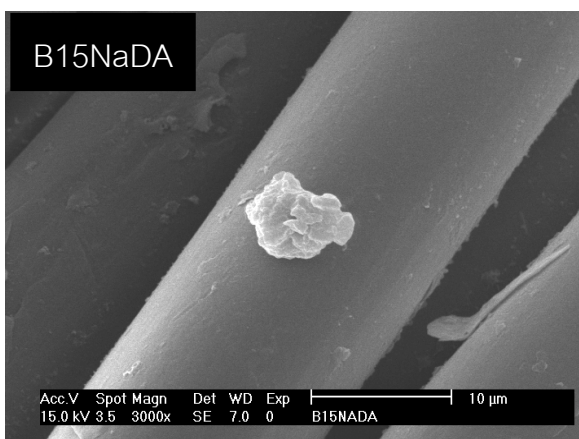
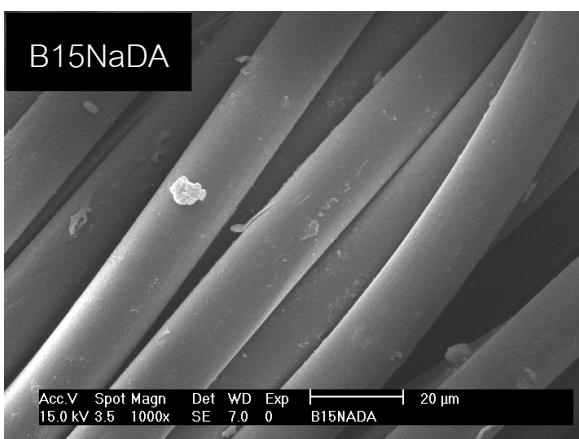
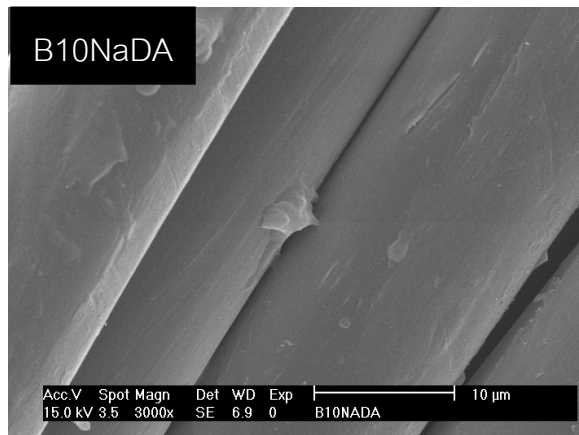
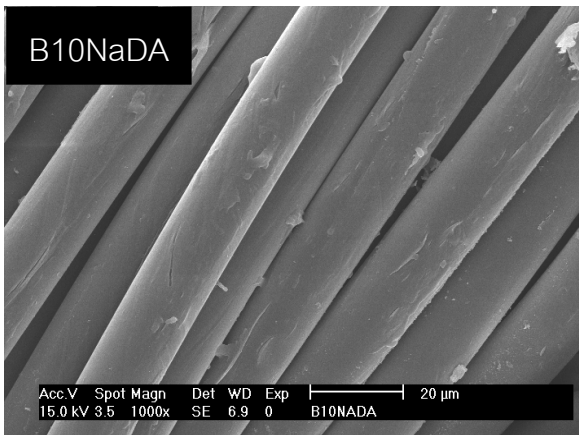
3000x



รูปที่ 4.16 (ต่อ)

1000x

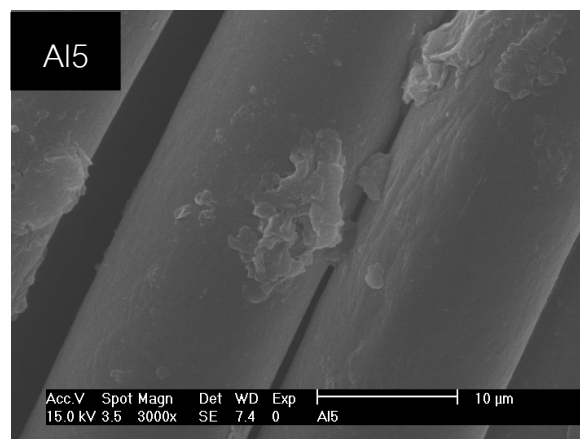
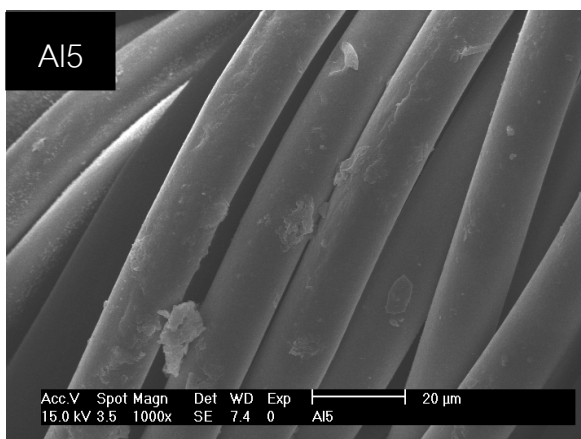
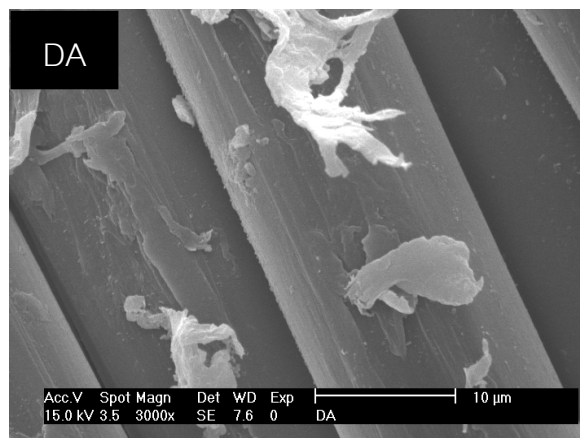
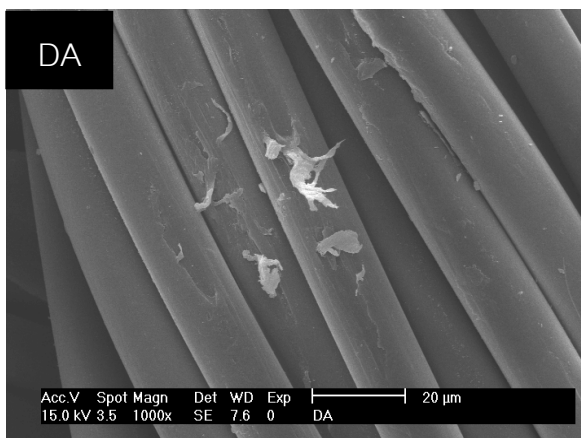
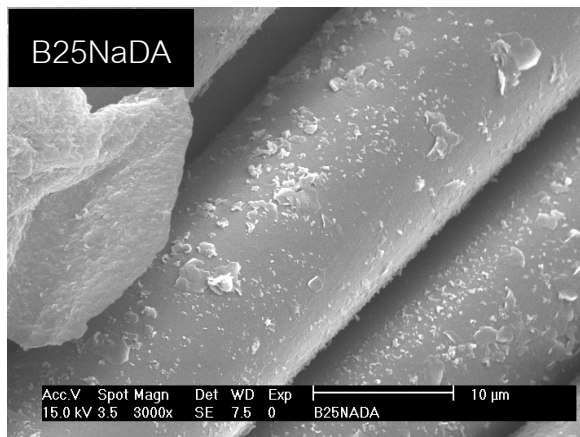
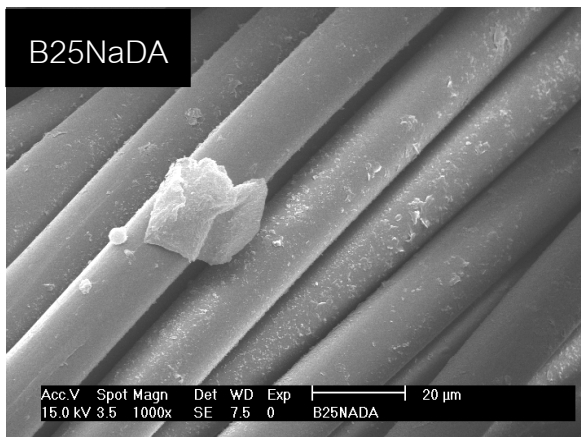
3000x



รูปที่ 4.16 (ต่อ)

1000x

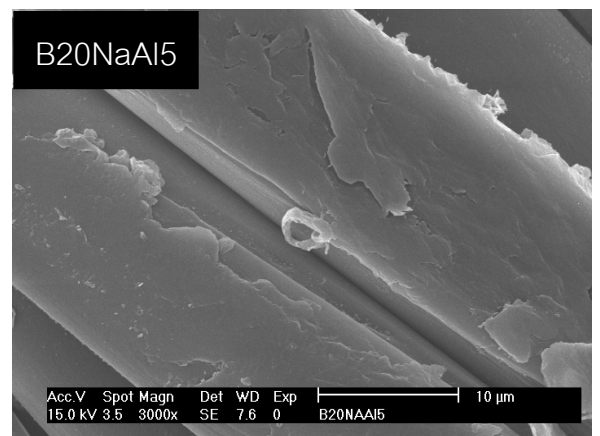
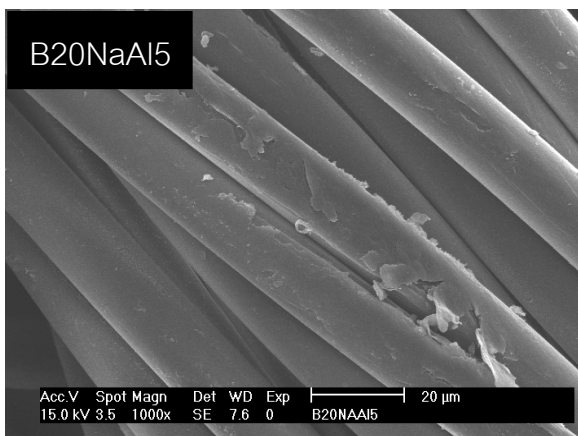
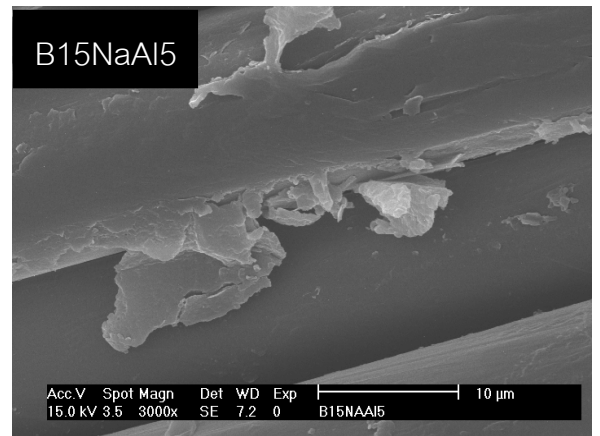
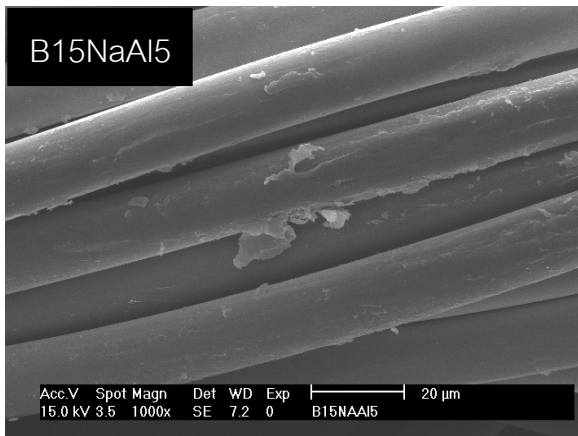
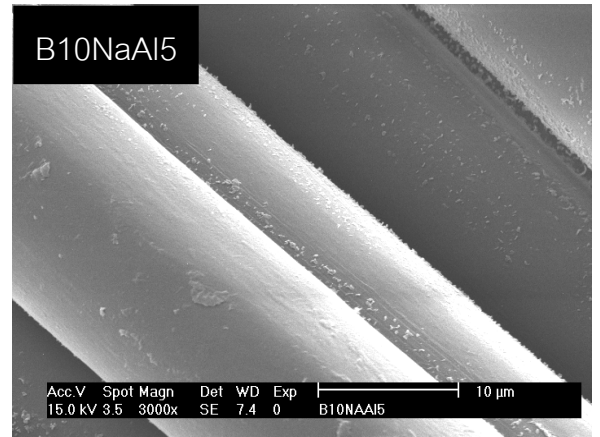
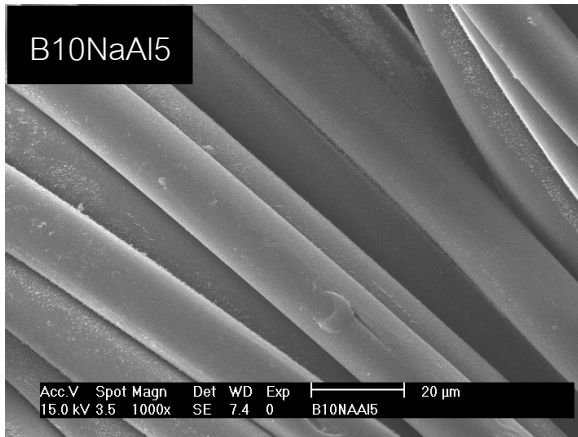
3000x



รูปที่ 4.16 (ต่อ)

1000x

3000x

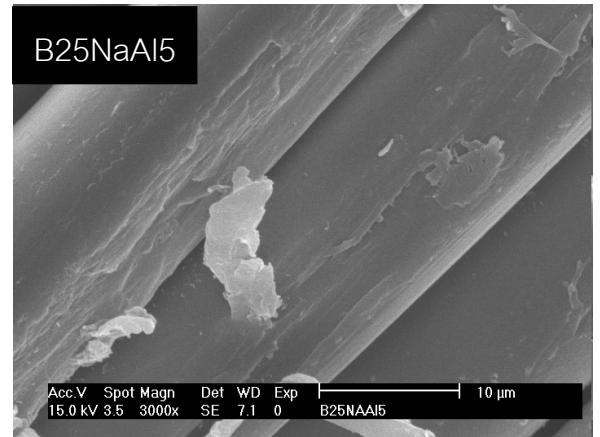
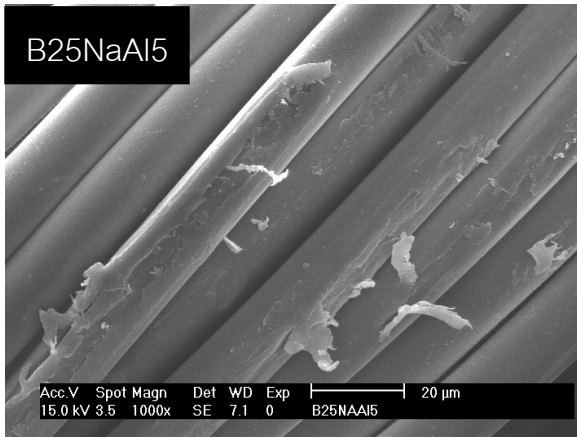


รูปที่ 4.16 (ต่อ)



1000x

3000x



รูปที่ 4.16 (ต่อ)

#### 4.7 การเปลี่ยนสีของผ้าพอลิเอสเตอร์ภายหลังการตกแต่งห่วงไฟ

เนื่องจากชนิดของสารตกแต่งห่วงไฟและภาวะที่ใช้ในการตกแต่งห่วงไฟอาจทำให้เจดสีของผ้ามีการเปลี่ยนแปลงได้ จึงได้ทำการวัดสีหรือวัดความขาวของผ้าที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งห่วงไฟด้วยสูตรต่างๆทั้งก่อนซักและหลังซัก แสดงผลในตารางที่ 4.5 ซึ่งจากการตรวจพินิจด้วยตาเปล่า พร้อมทั้งพิจารณา 1) ค่า 2) ค่า YI 3) ค่า Db\* 4) ค่า  $DE_{CMC(2:1)}$  กล่าวได้ว่า ก่อนซัก ผ้าที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟทุกสูตรยกเว้นสูตรที่มีไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตไม่สังเกตเห็นความแตกต่าง ผ้ายังคงเห็นเป็นสีขาวใกล้เคียงกับผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ได้ผ่านการตกแต่งห่วงไฟ ในขณะที่สูตรที่มีไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต พบว่าผ้ามีความขาวลดลงจากเดิมมาก สีเหลืองขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเวลาผ่านไป สอดคล้องกับค่า WI ลดลงมาก YI เพิ่มขึ้นมาก Db\* และ  $DE_{CMC(2:1)}$  ที่สูงมาก (ประมาณ 9 ขึ้นไป) ซึ่ง  $DE_{CMC(2:1)}$  ที่สูงมากเช่นนี้ สามารถสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงได้ด้วยตาเปล่าและอยู่ในระดับที่ยอมรับไม่ได้

แต่เมื่อตรวจวัดสีของผ้าภายหลังการซัก พบว่าผ้าทุกสูตรรวมทั้งผ้าที่มีการตกแต่งด้วยไดไฮโดรเจนฟอสเฟตพบว่ามีสีขาวมากกว่าเล็กน้อยหรือใกล้เคียงเมื่อเปรียบเทียบกับผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ได้ผ่านการตกแต่งห่วงไฟเมื่อตรวจพินิจด้วยตาเปล่า สอดคล้องกับค่า WI ที่เพิ่มสูงขึ้นกว่าก่อนซักและใกล้เคียงกับผ้า untreated ค่า YI ที่ลดลงมาน้อยกว่า 0.5 ค่า Db\* น้อยกว่า 0.5 และค่า  $DE_{CMC(2:1)}$  น้อยกว่า 0.5

จึงกล่าวได้ว่าการตกแต่งห่วงไฟผ้าพอลิเอสเตอร์ด้วยการใช้เบนโทไนด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ นอกจากสามารถห่วงไฟ ด้านการลอมหยดได้แล้ว ยังไม่ทำให้เจดสีเปลี่ยนแปลงได้อีก

ตารางที่ 4.6 การเปลี่ยนสีของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งห่วงไฟทั้งก่อนและหลังการซัก

สูตร	ก่อนการซัก								หลังการซัก							
	DL*	Da*	Db*	WI-CIE	YI-E313	DEcmc	P/F		DL*	Da*	Db*	WI-CIE	YI-E313	DEcmc	P/F	
							DEcmc	Visual							DEcmc	Visual
Untreated	0.07L	0.01	-0.08B	65.20	1.21	0.13	Passed	Passed	-0.05D	-0.07G	0	68.02	0.12	0.11	Passed	Passed
B10	5.65L	0.06R	1.52Y	69.70	4.34	2.99	Failed	Passed	0.14L	-0.13G	0.11Y	67.86	0.31	0.27	Passed	Passed
B10Na	1.79 L	0.11 R	0.59 Y	65.52	2.65	1.08	Failed	Passed	0.03L	-0.08G	-0.21B	69.25	-	0.35	Passed	Passed
B15Na	1.92 L	0.21 R	0.88 Y	64.38	3.32	1.49	Failed	Passed	0.01	-0.13G	0	68.17	0.06	0.20	Passed	Passed
B20Na	2.58 L	0.19 R	1.10 Y	64.75	3.73	1.87	Failed	Passed	-0.51D	-0.04G	0.03Y	66.96	0.21	0.20	Passed	Passed
B25Na	2.82 L	0.25 R	1.60 Y	62.88	4.77	2.56	Failed	Passed	0.23L	-0.14G	-0.17B	69.42	-	0.35	Passed	Passed
B10NaDA	-1.39 D	1.13 R	6.59 Y	29.02	15.75	9.73	Failed	Failed	0.13L	-0.06G	-0.04B	68.60	0.04	0.12	Passed	Passed
B15NaDA	-0.57 D	1.00 R	6.00 Y	33.83	14.37	8.84	Failed	Failed	0.14L	-0.07G	-0.01	68.45	0.10	0.12	Passed	Passed
B20NaDA	-4.76 D	2.65 R	10.17 Y	3.17	24.69	15.37	Failed	Failed	0.14L	-0.07G	-0.20B	69.41	-	0.33	Passed	Passed
B25NaDA	-1.17 D	1.69 R	7.91 Y	23.03	18.75	11.76	Failed	Failed	0.11L	-0.11G	0.09Y	67.93	0.27	0.21	Passed	Passed
DA	-4.93 D	1.39 R	7.69 Y	15.37	18.73	9.24	Failed	Failed	-0.08D	-0.11G	0.18Y	67.07	0.47	0.33	Passed	Passed
B10NaA5	1.62 L	0.10 R	0.78 Y	64.21	3.04	1.28	Failed	Passed	0.25L	-0.13G	-0.26B	69.91	-	0.45	Passed	Passed
B15NaA5	2.16 L	0.27 R	1.70 Y	60.94	5.02	2.62	Failed	Passed	0.17L	-0.13G	-0.11B	69.04	-	0.27	Passed	Passed
B20NaA5	2.27 L	0.24 R	1.17 Y	63.74	3.92	1.92	Failed	Passed	0.23L	-0.13G	-0.15B	69.35	-	0.31	Passed	Passed
B25NaA5	2.38 L	0.31 R	1.85 Y	60.74	5.33	2.85	Failed	Passed	0.20L	-0.15G	0.08Y	68.16	0.21	0.27	Passed	Passed
A5	-0.05 D	-0.01	0.69 Y	61.10	2.82	1.01	Failed	Passed	-0.29D	-0.11G	0.44Y	65.39	1.00	0.70	Passed	Passed

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากการตกแต่งหน่วงไฟและด้านการหลอมหยดผ้าพอลิเอสเตอร์โดยใช้ เบนโทไนด์ ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ในปริมาณต่างๆ ด้วย เทคนิคการจุ่ม-อัด-อบแห้งซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 สารตกแต่งหน่วงไฟที่มีปริมาณเบนโทไนด์สูงตั้งแต่ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักขึ้นไป ที่เตรียมได้มีความหนืดสูงมากทำให้ตกแต่งบนผ้าพอลิเอสเตอร์ได้ยากและไม่สม่ำเสมอ สามารถแก้ไขโดยเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ซึ่งทำให้ความหนืดลดลงจากเดิม ประมาณ 1.7 -174 เท่า

5.1.2 พฤติกรรมการติดไฟ และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์

#### ก่อนการซัก

1) ผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยเบนโทไนด์เพียงอย่างเดียวในสูตรที่มีปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 10 หรือมี % add on ที่น้อยกว่า 5 โดยประมาณ ผ้ายังคงมีการลุกไหม้และหลอมหยดแต่มีชาร์เกิดขึ้น ที่น่าสนใจคือสูตรที่มีปริมาณเท่ากับ 10 หรือมี % add on ประมาณ 5 แม้ผ้าติดไฟและลุกไหม้เช่นเดิมแต่ไม่มีการหลอมหยดเกิดขึ้น

2) ผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยสารประกอบฟอสฟอรัสได้แก่ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตเพียงอย่างเดียวสามารถหน่วงไฟ และด้านการหลอมหยดได้ดี โดยพบว่าเมื่อติดไฟแล้วเปลวไฟจะดับทันทีหลังจากนำแหล่งจุดไฟออก ไฟไหม้ผ้าเป็นบริเวณแคบๆและไม่เกิดการหลอมหยด

3) ผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวในปริมาณร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก สามารถหน่วงไฟและด้านการหลอมหยดได้ดี โดยพบว่าเมื่อติดไฟแล้วเปลวไฟจะดับทันทีหลังจากนำแหล่งจุดไฟออก ไฟไหม้ผ้าเป็นบริเวณแคบๆและไม่เกิดการหลอมหยด

4) ผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยเบนโทไนด์ร่วมกับโซเดียมคลอไรด์และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต หรืออะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้ปริมาณเบนโทไนด์ ร้อยละ 10 โซเดียมคลอไรด์ ร้อยละ 4 และ ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ร้อยละ 3 หรือ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 5 และ 10 สามารถหน่วงไฟได้ดีขึ้นโดยมีเวลาการลามไฟที่สั้นกว่า

แต่ก็ยังไม่สามารถต้านการหลอมหยด อย่างไรก็ตามสามารถชะลอเวลาที่ผ้าเริ่มเกิดการหลอมหยดให้ช้าลงจากเดิมได้ แผ่นสาลีที่รองรับก็ลูกใหม่ไม่รุนแรงเท่า

#### หลังการซัก 5 รอบ

สูตรที่ใช้ในการตกแต่งห่วงไฟทุกสูตรโดยใช้ปริมาณเบนโทไนต์ ร้อยละ 10 โซเดียมคลอไรด์ ร้อยละ 4 และ ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ร้อยละ 3 หรือ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 5 เป็นสูตรที่มีความเหมาะสมเพราะเมื่อนำไปตกแต่งผ้าพอลิเอสเตอร์แล้วให้ผลการห่วงไฟและต้านการหลอมหยดที่ดีขึ้นกว่าก่อนการซักมาก โดยผ้าไม่เกิดการหลอมหยดและยังไม่เกิดการติดไฟหรือลามไฟอีกด้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ใช้ในการตกแต่งในงานวิจัยนี้ไม่ได้ผ่านการซักมาก่อน ทำให้อาจมีสารเคมีตกค้างอยู่บนพื้นผิวของผ้าได้ ควรซักผ้าเพื่อขจัดสิ่งสกปรกบนพื้นผิวก่อนนำมาตกแต่ง

5.2.2 ทดสอบสมบัติความคงทนต่อแรงดึงและแรงฉีกขาด ความกระด้างของผ้า และการระบายเหงื่อของผ้าที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟ

## รายการอ้างอิง

- [1] ภารุณี เชื้อนพวงศ์. การใช้เบนโทไนด์ ผงขาวใหม่ และสารประกอบฟอสฟอรัสเป็นสารหน่วงไฟ และสารต้านการหลอมหยดสำหรับผ้าพอลิเอสเตอร์นอนวูฟเวน. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุ- ศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [2] ชลวสา บางยี่ขัน และ ชุตติภัก ศุภะกะลิน. การปรับปรุงสมบัติความคงทนต่อการซักของสียดิส- เพอร์สบนเส้นใยพอลิเอสเตอร์ชนิดปั่นด้วยความเร็วสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, 2543.
- [3] Faissal, A., and El, T. Catalytic and mechanistic studies of polyethylene terephthalate synthesis. Berlin : Technischen Universität Berlin, 2006.
- [4] วิมลรัตน์ ศรีจรัสสิน. เทคโนโลยีสิ่งทอเบื้องต้น. ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : คราฟแมน เพรส, 2550.
- [5] นันทยา ยานูเมศ. การตกแต่งสิ่งทอ. กองอุตสาหกรรมสิ่งทอ, กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, 2540.
- [6] Holland, B. J., and Hay, J. N. The thermal degradation of PET and analogous polyesters measured by thermal analysis-Fourier transform infrared spectroscopy. Polymer 43 (2002) : 1835-1847.
- [7] Scheirs, J., and Long, T. E. Modern polyesters: chemistry and technology of polyesters and copolyesters. West Sussex : John Wiley & Sons, 2005.
- [8] A Smithers Group Company. Aromatic polyester sample chapter. England : [Online]. Available from [http://www.ismithers.net/downloads/chapters/Aromatic%20 Polyester%20Sample%20Chapter.pdf](http://www.ismithers.net/downloads/chapters/Aromatic%20Polyester%20Sample%20Chapter.pdf), 2011. [2011, Mar 3]
- [9] Horrocks, R. Flame-retardant finishing of textiles. Review of progress in coloration. 16 (1986) : 62-76.
- [10] Tang, H. Y, Chen, J. Y., and Guo, Y. H. A novel process for preparing anti-dripping polyethylene terephthalate fibers. Materials and design 31 (2010) : 3525–3530.
- [11] National research council. Toxicological risks of selected flame-retardant chemicals. Washington, D.C. : The national academies press, 2000.

- [12] Schindler, W. D., and Hauser, P. J. Chemical finishing of textiles. England : Woodhead publishing, 2004.
- [13] ชาญชัย สิริเกษมเลิศ. สิ่งทอหน่วงไฟ (Flame Retardant Textiles). กรุงเทพมหานคร : [Online]. Available from: <http://www.ttistextiledigest.com/articles/technology/item/2462-flame-retardant-textiles.html>, 2553. [2011, Mar 29]
- [14] Carty, P. , and Byrne, M. S. The chemical and mechanical finishing of textile material. Newcastle : Newcastle upon Tyne Polytechnic Products, 1987.
- [15] Carr, C. M. Chemistry of the textile industry. New York : Chapman & Hall, 1995.
- [16] สิริรัตน์ จารุจินดา. เกาะติดสถานการณ์ความเคลื่อนไหวของกฎข้อบังคับเพื่อความปลอดภัย จากอัคคีภัยของผลิตภัณฑ์สิ่งทอ. คัลเลอร์เวย์ 8(2544): 32-33.
- [17] สิริรัตน์ จารุจินดา. สิ่งทอทนไฟ. การพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกลยุทธ์การวิจัย. ศูนย์วิจัยและทดสอบสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [18] Takashi, I., Yoshio, O., and Kazuo, T. Rheological properties of organophilic synthetic hectorites and saponites. Clays and Clay Minerals 37(1989) : 248-257.
- [19] Baker E. Intercalation and deintercalation of organic compounds and polymers into minerals. Georgia : [Online]. Available from : <http://www.chemistry.armstrong.edu/lynch/mineral.pdf>, 2011. [2011, Jan 14]
- [20] Dero, B. Flame retardants fact sheet aluminium hydroxide. Brussels : European flame retardants association. 2010
- [21] Chinasun international industry co., ltd. Aluminum Hydroxide. Jiangsu : Asia.ru, 2006.
- [22] Chen, D. Q., et al. Flame-retardant and anti-dripping effects of a novel char-forming flame retardant for the treatment of poly(ethylene terephthalate) fabrics. Polymer Degradation and Stability 88 (2005) : 349-356.
- [23] Tian, C. M., Guo, H. Z., Zhang, H. Y., Xu, J. Z., and Shi, J. R. Study on the thermal degradation of cotton cellulose ammonium phosphate and its metal complexes. Thermochemica Acta 253 (1995) : 243-251.
- [24] Kandola, B. K., Horrocks, A. R., and Culeman, G. V. Reviews in macromolecular chemistry and Physics. Journal of Macromolecular Science C36 (1996) : 742-778.

- [25] Song, L., et al. Study on the properties of flame retardant polyurethane/organoclay nanocomposite. Polymer Degradation and Stability 87 (2005) : 111-116.
- [26] Daimatsu, K., et al. Preparation and physical properties of flame retardant acrylic resin containing nano-sized aluminum hydroxide. Polymer Degradation and Stability 92 (2007) : 1433-1438.
- [27] Gachte, R., and Muller H. Plastic additive handbook. New York : Chapman & Hall, 1997.
- [28] Carroll, P. W.. Method for preparing high solids bentonite slurries. Texas : United state patent , 1995.
- [29] Benna-Zayani, M., Mgaidi, A., Stambouli, M., Kbir-Arighuib, N., Trabelsi- Ayadi M., and Grossiord, J.L. Fractal nature of bentonite–water–NaCl gel systems evidenced by viscoelastic properties and model of gels. Applied Clay Science 46 (2009) : 260-264.
- [30] Nash, V.G. Role of exchangeable cations in viscosity of clay suspensions. Proceeding of the Seventh National Conference on Clays and Clay Minerals (1960) : 333.
- [31] Hao, X., et al. Flame retardancy and antidripping effect of OMT/PA nanocomposites. Materials Chemistry and Physics 96 (2006) : 34-41.
- [32] Ge, X. G., et al. A novel phosphorus-containing copolyester/montmorillonite nanocomposites with improved flame retardancy. European Polymer Journal 43 (2007) : 2882-2890.
- [33] Kashiwagi, T., and Gilman J. W. Silicon-Based Flame Retardants. In: Grand A. F. and Wilkie C. A. (ed.s), Flame retardancy of polymeric materials, 353-389. New York : Marcel Dekker, 2000.
- [34] Gotshal, Y. Fire retardant thread and method of manufacture. Hollywood : United states patent application publication, 2010.
- [35] Maged H. Zohdy. Cationization and gamma irradiation effects on the dyeability of polyester fabric towards disperse dyes. Radiation Physics and Chemistry 73 (2005) : 101–110.



- [36] Güngör, N., and Karaoglan, S. Interactions of polyacrylamide polymer with bentonite in aqueous systems. *Materials Letters* 48 (2001) : 168–175.
- [37] Yue, M. C., Ming, K. W. , Pan, M. H., Tsung, M. T., and Kuo C. L. Influence of catechin on precipitation of aluminum hydroxide. *Geoderma* 152 (2009) : 296–300.
- [38] วิชัย วิวัตรระกูล และคนอื่นๆ. การประยุกต์สเปโตรสโคปีในเคมีอินทรีย์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ห้องเรียน, 2526.

ภาคผนวก (Appendices)

ภาคผนวก ก (Appendix A)

ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก.1 % pick up และ % add on ของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการตกแต่ง  
 หนองไฟก่อนซัก

ตารางที่ ก-1 ผลของ% pick up และ % add on ของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการตกแต่ง  
 หนองไฟ

สูตร	น้ำหนักผ้า ก่อน pad (g)	น้ำหนักผ้า หลัง pad (g)	% Pick up	น้ำหนักผ้า หลังอบ (g)	% Add on
B3	7.489	12.394	65.50	7.632	1.91
B5	7.202	11.925	65.58	7.422	3.05
B7	7.445	12.354	65.94	7.769	4.35
B10	7.476	11.740	57.04	7.881	5.42
Na	7.325	12.148	65.84	7.533	2.84
B10Na	7.635	13.015	70.46	8.244	7.98
B15Na	7.347	12.602	71.53	8.163	11.11
B20Na	7.311	12.496	70.92	8.337	14.03
B25Na	7.613	12.662	66.32	8.770	15.20
DA	7.270	12.299	69.17	7.435	2.27
B10NaDA	7.445	12.824	72.25	8.245	10.75
B15NaDA	6.886	11.676	69.56	7.851	14.01
B20NaDA	7.160	12.242	70.98	8.366	16.84
B25NaDA	7.206	11.991	66.40	8.658	20.15

ตารางที่ ก-1 (ต่อ)

สูตร	น้ำหนักผ้า ก่อน pad (g)	น้ำหนักผ้า หลัง pad (g)	% Pick up	น้ำหนักผ้า หลังอบ (g)	% Add on
AI5	7.005	11.76	67.88	7.046	0.59
B10NaAI5	7.226	12.466	72.52	7.877	9.01
B15NaAI5	7.061	12.053	70.70	8.151	15.44
B20NaAI5	7.402	12.458	68.31	8.617	16.41
B25NaAI5	7.159	12.016	67.84	8.662	20.99
AI10	7.017	11.970	70.59	7.100	1.18
B10NaAI10	7.288	12.600	72.89	8.076	10.81
B15NaAI10	7.052	12.096	71.53	7.956	12.82
B20NaAI10	7.456	12.794	71.59	8.672	16.31
B25NaAI10	6.984	11.662	66.98	8.402	20.30

ภาคผนวก ก.2 % pick up และ % add on ของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการตกแต่ง  
 หนองไฟสำหรับซัก

ตารางที่ ก-2 ผลของ% pick up และ % add on ของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการตกแต่ง  
 หนองไฟสำหรับซัก

สูตร (หลังซัก)	น้ำหนักผ้า ก่อน pad (g)	น้ำหนักผ้า หลัง pad (g)	% Pick up	น้ำหนักผ้า หลังอบ (g)	% Add on
Untreated	7.264	-	-	-	-
B10	7.532	12.190	61.84	7.936	5.36
B10Na	7.55	12.504	65.62	8.241	9.15
B15Na	7.361	12.573	70.81	8.129	10.43
B20Na	7.5	12.664	68.85	8.478	13.04
B25Na	7.536	12.372	64.17	8.770	16.37
DA	7.471	12.303	64.68	7.6300	2.13
B10NaDA	7.701	13.313	72.87	8.540	10.89
B15NaDA	7.979	13.571	70.08	9.078	13.77
B20NaDA	7.933	12.390	56.18	8.781	10.69
B25NaDA	7.6	13.271	74.62	9.272	22.00
AI5	7.554	12.868	70.35	7.591	0.49
B10NaAI5	7.379	12.312	66.85	8.210	11.26
B15NaAI5	7.397	12.861	73.87	8.302	12.23
B20NaAI5	7.358	12.458	69.31	8.447	14.80
B25NaAI5	7.271	13.358	83.72	8.391	15.40
AI10	7.271	12.108	66.52	7.397	1.73

ตารางที่ ก-3 ผลของ% pick up และ % add on ของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการตกแต่ง  
หน่วยไฟหลังซัก

สูตร (หลังซัก)	น้ำหนักผ้า ก่อน pad (g)	น้ำหนักผ้า หลังอบ (g)	% Add on	น้ำหนักผ้า หลังซัก	% Add on ที่ถูกซักไป	% Add on หลังซัก ที่คำนวณได้	% Add on หลังซัก หลังปรับค่า คลาดเคลื่อน
Untreated	7.264	-	-	7.251	0.18	-0.18	0.00
B10	7.532	7.936	5.36	7.524	5.19	0.17	0.35
B10Na	7.55	8.241	9.15	7.516	8.80	0.35	0.53
B15Na	7.361	8.129	10.43	7.342	9.68	0.75	0.93
B20Na	7.5	8.478	13.04	7.4	12.72	0.32	0.50
B25Na	7.536	8.770	16.37	7.467	14.86	1.52	1.70
DA	7.471	7.6300	2.13	7.473	2.06	0.07	0.25
B10NaDA	7.701	8.540	10.89	7.679	10.08	0.81	0.99
B15NaDA	7.979	9.078	13.77	7.879	13.21	0.57	0.75
B20NaDA	7.933	8.781	10.69	7.471	14.92	-4.23	-4.05
B25NaDA	7.6	9.272	22.00	7.625	17.76	4.24	4.42
AI5	7.554	7.591	0.49	7.554	0.49	0.002	0.18
B10NaAI5	7.379	8.210	11.26	7.355	10.41	0.85	1.03
B15NaAI5	7.397	8.302	12.23	7.392	10.96	1.27	1.45
B20NaAI5	7.358	8.447	14.80	7.306	13.51	1.29	1.47
B25NaAI5	7.271	8.391	15.40	7.246	13.65	1.76	1.94
AI10	7.271	7.397	1.73	7.272	1.69	0.04	0.22

ภาคผนวก ก.3 พฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดของผ้า  
พอลิเอสเตอร์แนว 45 องศาหลังการตกแต่งหน่วงไฟก่อนซัก

ตารางที่ ก-4 เวลาในการลามไฟ (วินาที) และระยะทางการลามไฟ (ซม.) ของผ้าพอลิเอสเตอร์  
ก่อนและหลังตกแต่งหน่วงไฟก่อนซัก

สูตร	ระยะทางการลามไฟ (ซม.)					เฉลี่ย (ซม.)	เวลาในการลามไฟ (วินาที)					เฉลี่ย (วินาที)	อัตราการ ลามไฟ (ซม./วินาที)
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		
Untreated	2.0	8.1	2.1	2.2	2.2	3.32	-	12	-	-	-	12.0	0.28
B3	9.5	1.0	15.2	15.2	15.2	11.22	16	-	26	47	34	30.8	0.36
B5	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.20	29	33	41	29	26	31.6	0.48
B7	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.20	26	31	26	23	31	27.4	0.55
B10	15.2	12.7	15.2	13.7	15.2	14.40	26	27	26	23	27	25.8	0.56
Na	3.0	4.8	3.4	3.0	3.4	3.52	17	15	14	-	18	16.0	0.22
B10Na	9.2	4.6	10.0	15.2	8.3	9.46	35	-	19	71	-	41.7	0.23
B15Na	13.4	15.2	7.2	7.9	15.2	11.78	20	28	15	42	22	25.4	0.46
B20Na	8.4	13.2	12.8	7.7	11.2	10.66	13	19	28	17	-	19.3	0.55
B25Na	15.2	10.7	1.0	15.2	9.2	10.26	22	18	-	27	22	22.3	0.46
DA	1.0	1.7	1.2	1.3	1.7	1.38	-	-	-	-	-	-	ดับทันที
B10NaDA	1.7	5.2	10.5	11.4	5.0	6.76	-	18	16	28	18	20.0	0.34
B15NaDA	1.5	14.0	0.8	8.4	10.2	6.98	-	22	-	13	16	17.0	0.41
B20NaDA	15.2	11.2	15.2	14.5	13.2	13.86	32	19	27	24	29	26.2	0.53
B25NaDA	8.3	0.5	13.8	15.2	12.5	10.06	29	-	21	44	17	27.8	0.36



ตารางที่ ก-4 (ต่อ)

สูตร	ระยะทางการลามไฟ					เฉลี่ย (ซม.)	เวลาในการลามไฟ					เฉลี่ย (วินาที)	อัตราการลามไฟ (ซม./วินาที)
	(ซม.)						(วินาที)						
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		
AI5	1.6	2.3	1.5	1.3	2.5	1.84	-	-	-	-	-	-	ดัดบันทึก
B10NaAI5	15.2	5.9	9.6	3.7	11.2	9.12	35	13	28	27	25	25.6	0.36
B15NaAI5	1.0	15.2	8.8	12.7	1.1	7.76	-	12	17	45	-	24.7	0.31
B20NaAI5	11.4	15.2	15.2	7.8	9.7	11.86	14	41	23	14	16	21.6	0.55
B25NaAI5	15.2	12.0	11.4	15.2	12.7	13.30	22	13	15	40	20	22.0	0.60
AI10	5.1	1.9	1.5	5.0	2.0	3.10	-	-	-	-	-	-	ดัดบันทึก
B10NaAI10	13.3	15.2	8.3	10.0	12.1	11.78	21	22	15	24	20	20.4	0.58
B15NaAI10	15.2	15.2	9.9	6.1	10.4	11.36	16	59	17	18	24	26.8	0.42
B20NaAI10	15.2	7.8	15.2	12.4	11.4	12.40	59	16	23	23	24	29.0	0.43
B25NaAI10	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.20	22	25	38	31	24	28.0	0.54

ตารางที่ ก-5 เวลาที่ผ้าพอลิเอสเตอร์ทั้งก่อนและหลังตกแต่งหน่วงไฟเริ่มหลอมหยุดหลอมหลังนำแหล่งกำเนิดไฟออกและความรุนแรงของสำลีที่ลูกไหม้ก่อนการซัก

สูตร	เวลาที่เริ่มหลอมหยุด หลังนำแหล่งกำเนิดไฟออก (วินาที)					เฉลี่ย (วินาที)	ความรุนแรงของเปลวไฟ ที่ลูกไหม้สำลีรองรับ (รุนแรง <b>III</b> , ปานกลาง <b>II</b> , ไม่รุนแรง <b>I</b> )					เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5	
Untreated	ไม่หยุด	3	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	3	ไม่หยุด	<b>III</b>	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	<b>III</b>
B3	5	ไม่หยุด	ไม่หยุด	8	14	6.8	<b>III</b>	ไม่หยุด	ไม่หยุด	<b>III</b>	<b>III</b>	<b>III</b>
B5	4	ไม่หยุด	ไม่หยุด	19	14	12.3	<b>III</b>	ไม่หยุด	ไม่หยุด	<b>III</b>	<b>II</b>	<b>III</b>
B7	ไม่หยุด	ไม่หยุด	14	11	ไม่หยุด	6.3	ไม่หยุด	ไม่หยุด	<b>III</b>	<b>III</b>	ไม่หยุด	<b>III</b>
B10	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด
Na	ไม่หยุด	ไม่หยุด	10	13	5	9.3	ไม่หยุด	ไม่หยุด	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>II</b>	<b>II</b>
B10Na	29	ไม่หยุด	13	2	4	6.3	<b>III</b>	ไม่หยุด	<b>II</b>	<b>II</b>	<b>II</b>	<b>II</b>
B15Na	10	14	2	3	4	6.6	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>II</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>II</b>
B20Na	4	12	11	3	8	7.5	<b>III</b>	<b>II</b>	<b>II</b>	<b>II</b>	<b>II</b>	<b>II</b>
B25Na	12	6	ไม่หยุด	9	5	8.0	<b>II</b>	<b>II</b>	ไม่หยุด	<b>III</b>	<b>III</b>	<b>III</b>

ตารางที่ ก-5 (ต่อ)

สูตร	เวลาที่เริ่มหลอมหยุด หลังนำแหล่งกำเนิดไฟออก (วินาที)					เฉลี่ย (วินาที)	ความรุนแรงของเปลวไฟ ที่ลุกไหม้ดำดีรองรับ (รุนแรง III, ปานกลาง II, ไม่รุนแรง I)					เฉลี่ย	
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		
DA	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด
B10NaDA	ไม่หยุด	ไม่หยุด	8	20	14	14.0	ไม่หยุด	ไม่หยุด	II	II	I	II	
B15NaDA	ไม่หยุด	12	ไม่หยุด	6	2	4.0	ไม่หยุด	II	ไม่หยุด	II	III	II	
B20NaDA	21	12	19	16	19	17.4	II	II	I	II	I	II	
B25NaDA	6	ไม่หยุด	4	1	9	5	III	ไม่หยุด	III	III	II	III	
AI5	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด
B10NaAI5	29	8	20	20	10	17.4	II	II	II	II	I	II	
B15NaAI5	ไม่หยุด	4	4	9	ไม่หยุด	5.7	ไม่หยุด	III	III	III	ไม่หยุด	III	
B20NaAI5	6	6	11	4	3	6.0	II	III	III	II	III	III	
B25NaAI5	4	3	1	2	8	3.6	III	II	III	III	II	III	

ตารางที่ ก-5 (ต่อ)

สูตร	เวลาที่เริ่มหลอมหยุด หลังนำแหล่งกำเนิดไฟออก (วินาที)					เฉลี่ย (วินาที)	ความรุนแรงของเปลวไฟ ที่ลุกไหม้ลำดับรองรับ (รุนแรง <b>III</b> ,ปานกลาง <b>II</b> ,ไม่รุนแรง <b>I</b> )					เฉลี่ย	
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		
AI10	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด
B10NaAI10	2	14	1	15	17	9.8	<b>III</b>	<b>II</b>	<b>II</b>	<b>II</b>	<b>II</b>	<b>II</b>	<b>II</b>
B15NaAI10	6	10	10	0	16	8.4	<b>III</b>	<b>II</b>	<b>II</b>	<b>II</b>	<b>II</b>	<b>II</b>	<b>II</b>
B20NaAI10	6	4	4	11	11	7.2	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>II</b>
B25NaAI10	14	8	2	14	15	10.6	<b>I</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>III</b>	<b>II</b>	<b>II</b>

ภาคผนวก ก.4 พฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดของผ้า  
พอลิเอสเตอร์แนว 45 องศาหลังการตกแต่งห่วงวงไฟหลังซัก

ตารางที่ ก-6 เวลาในการลามไฟ (วินาที) และระยะทางการลามไฟ (ซม.) ของผ้าพอลิเอสเตอร์  
ก่อนและหลังตกแต่งห่วงวงไฟหลังซัก

สูตร (หลังซัก)	ระยะทางการลามไฟ (ซม.)					เฉลี่ย (ซม.)	เวลาในการลามไฟ (วินาที)					เฉลี่ย (วินาที)	อัตราการ ลามไฟ (ซม./วินาที)
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		
Untreated	1.6	0.6	1.4	9.0	2.3	2.98	-	-	-	12	-	12.0	0.25
B10	1.6	1.9	1.5	1.1	1.6	1.54	-	-	-	-	-	-	-
B10Na	1.6	1.7	1.6	2.4	1.6	1.78	-	-	-	-	-	-	-
B15Na	3.9	8.2	1.7	1.9	1.2	3.38	8	13	-	-	-	10.5	0.32
B20Na	1.2	1.5	1.2	1.4	0.9	1.24	-	-	-	-	-	-	-
B25Na	1.8	1.5	1.7	1.4	2.2	1.72	-	-	-	-	-	-	-
DA	1.6	1.7	1.3	1.8	1.0	1.48	-	-	-	-	-	-	-
B10NaDA	1.5	1.4	0.9	2.0	2.2	1.60	-	-	-	-	-	-	-
B15NaDA	1.7	2.5	1.6	2.7	1.8	2.06	-	-	-	3	-	3.0	0.69
B20NaDA	1.2	1.6	1.4	0.8	1.3	1.26	-	-	-	-	-	-	-
B25NaDA	1.5	9.6	2.0	1.2	1.2	3.10	-	16	-	-	-	16.0	0.19
AI5	1.7	0.9	1.3	1.5	1.4	1.36	-	-	-	-	-	-	-
B10NaAI5	2.2	1.4	2.6	1.7	1.6	1.90	-	-	7	-	-	7.0	0.27
B15NaAI5	2.1	0.5	2.5	0.9	1.7	1.54	-	-	-	-	-	-	-
B20NaAI5	1.3	1.6	1.5	1.5	2.1	1.60	-	-	-	-	-	-	-
B25NaAI5	1.4	1.6	1.0	3.3	1.3	1.72	-	-	-	-	-	-	-
AI10	0.8	1.4	1.2	0.6	1.5	1.10	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ก-7 เวลาที่ผ้าพอลิเอสเตอร์ทั้งก่อนและหลังตกแต่งหน่วยไฟเริ่มหลอมหยุดหลั้่นนำ แหล่งกำเนิดไฟออกและความรุนแรงของสำลีที่ลูกไหม้หลังการซัก

สูตร (หลังซัก)	เวลาที่เริ่มหลอมหยุด หลั้่นนำแหล่งกำเนิดไฟออก (วินาที)					เฉลี่ย (วินาที)	ความรุนแรงของเปลวไฟ ที่ลูกไหม้สำลีรองรับ (รุนแรง <b>III</b> ,ปานกลาง <b>II</b> ,ไม่รุนแรง <b>I</b> )					เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5	
Untreated	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	4	ไม่หยุด	4.0	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	<b>III</b>	ไม่หยุด	<b>III</b>
B10	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด
B10Na	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด
B15Na	ไม่หยุด	5	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	5.0	ไม่หยุด	<b>II</b>	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	<b>II</b>
B20Na	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด
B25Na	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด
DA	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด
B10NaDA	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด
B15NaDA	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด
B20NaDA	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด
B25NaDA	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด	ไม่หยุด

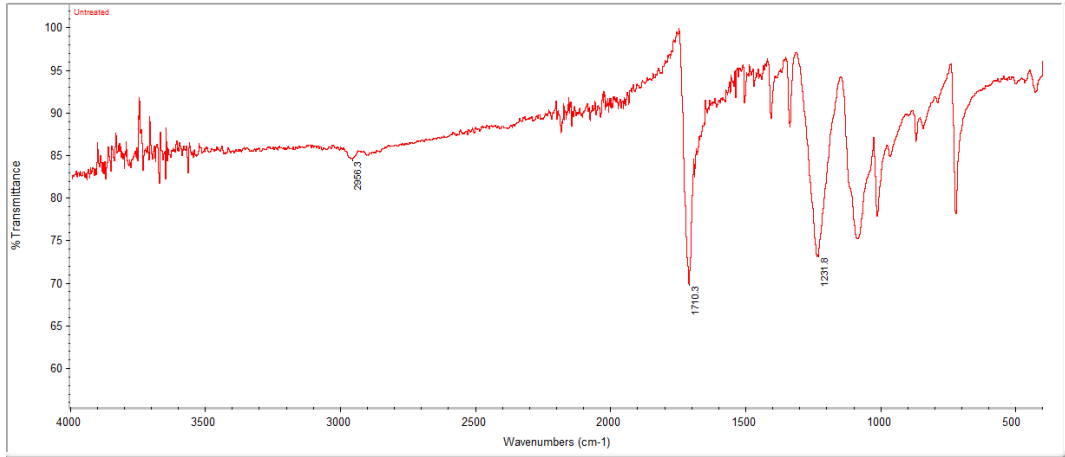


ภาคผนวก ข (Appendix B)

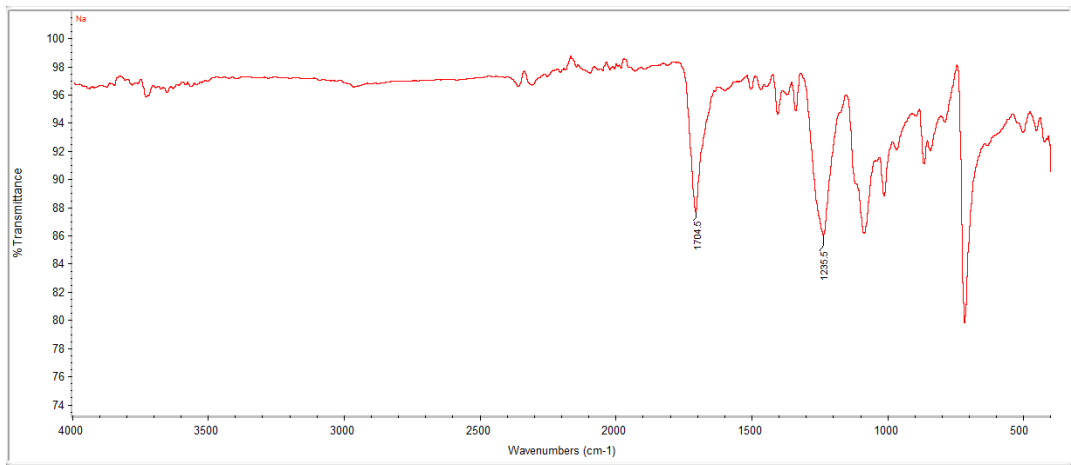


## ภาคผนวก ข

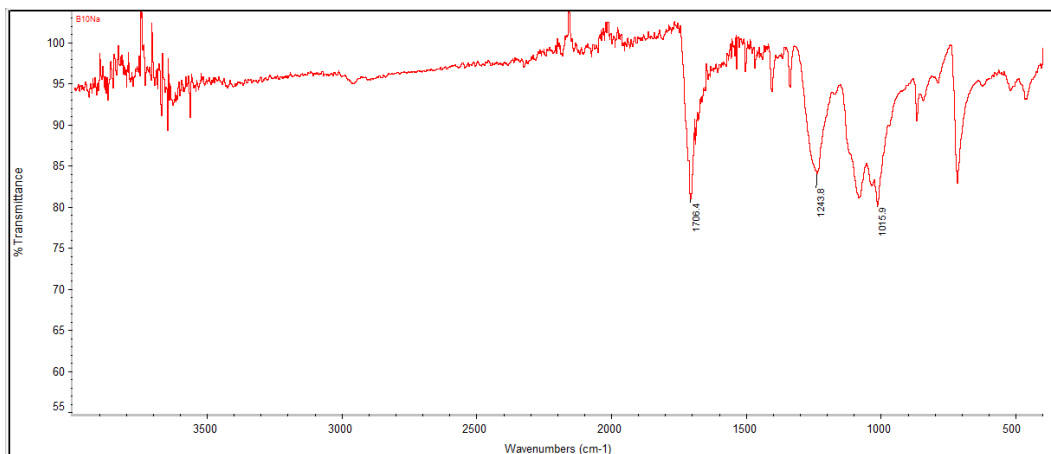
### ภาคผนวก ข. การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)



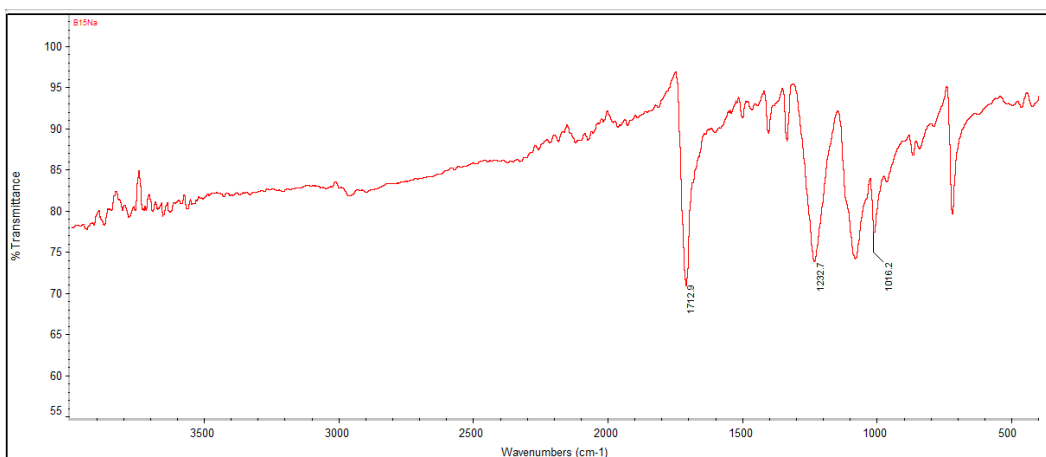
รูปที่ ข-1 ATR -FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเตอร์ก่อนผ่านการตกแต่งห่วงไฟ



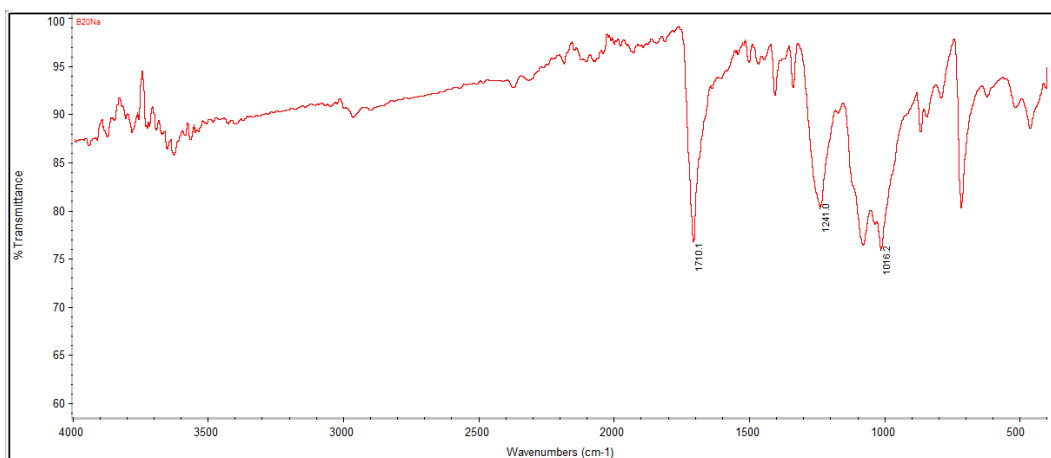
รูปที่ ข-2 ATR -FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังผ่านการตกแต่งด้วยโซเดียมคลอไรด์



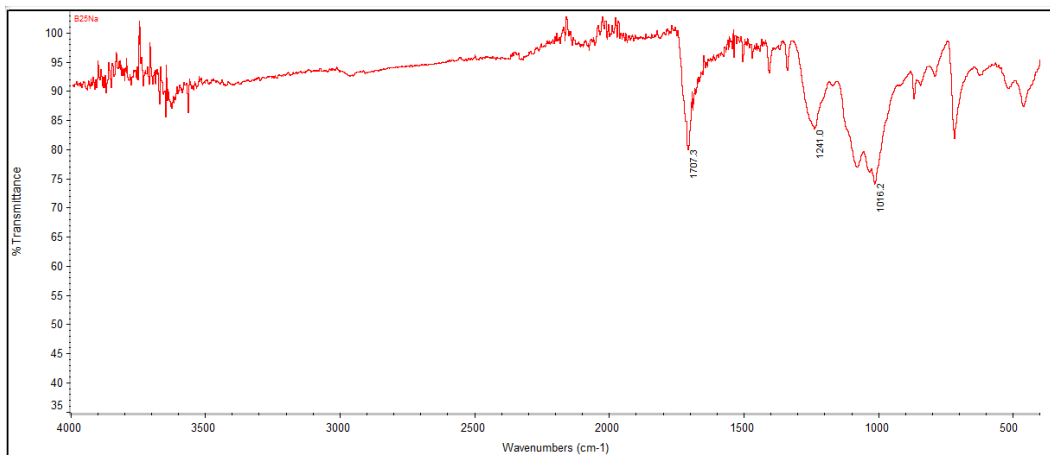
รูปที่ ข-3 ATR -FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังผ่านการตกแต่งหน่วงไฟสูตรB10Na



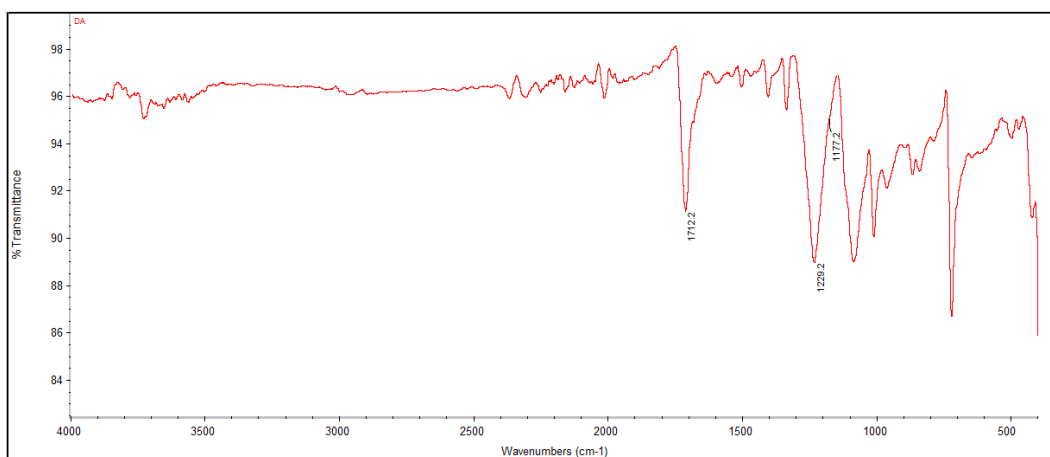
รูปที่ ข-4 ATR -FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังผ่านการตกแต่งหน่วงไฟสูตรB15Na



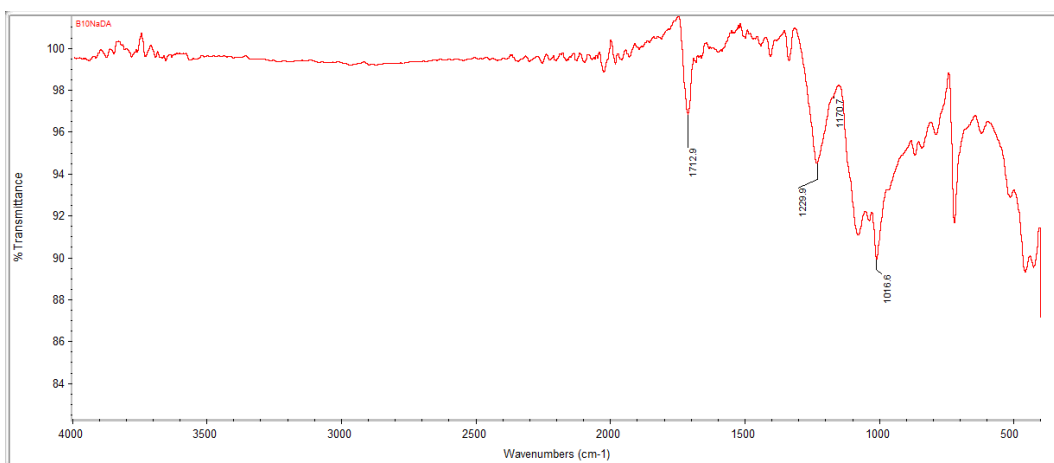
รูปที่ ข-5 ATR -FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังผ่านการตกแต่งหน่วงไฟสูตรB20Na



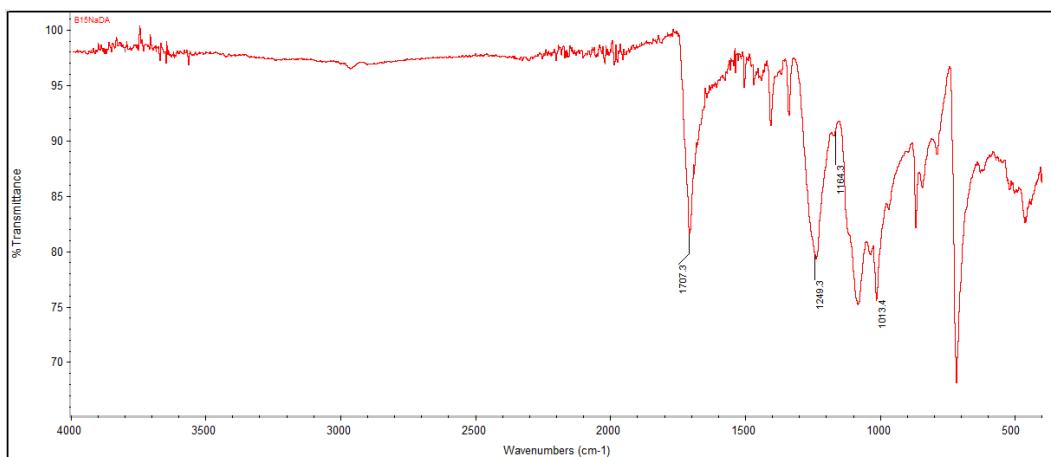
รูปที่ ข-6 ATR -FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังผ่านการตกแต่งห่วงไฟสูตรB25Na



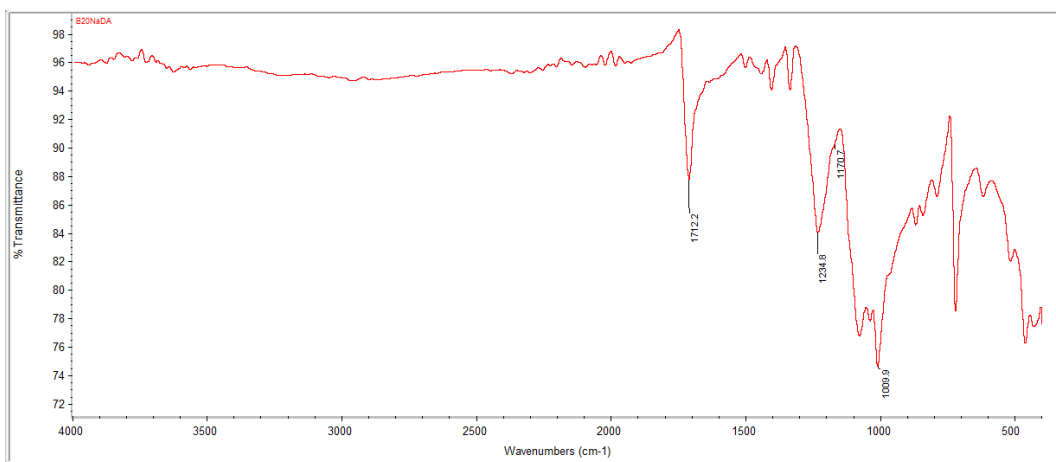
รูปที่ ข-7 ATR -FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังผ่านการตกแต่งห่วงไฟสูตร DA



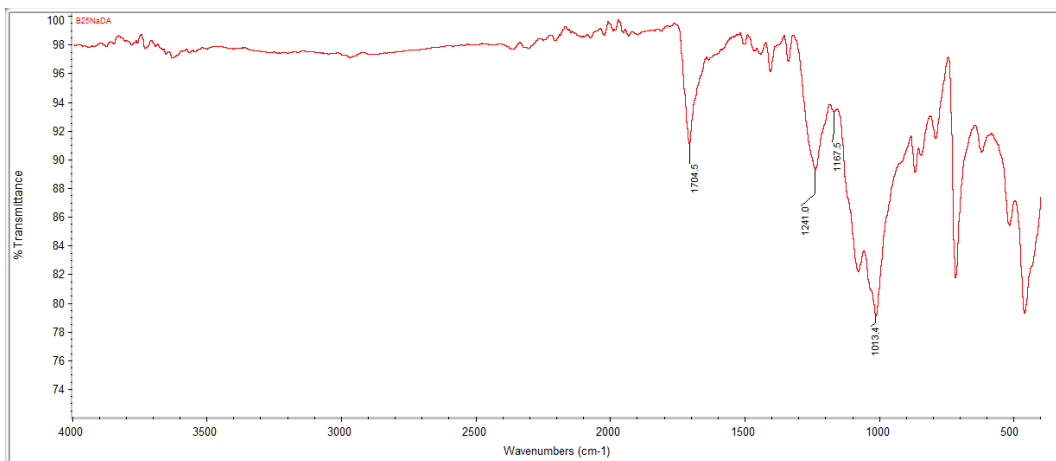
รูปที่ ข-8 ATR -FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังผ่านการตกแต่งห่วงไฟสูตรB10NaDA



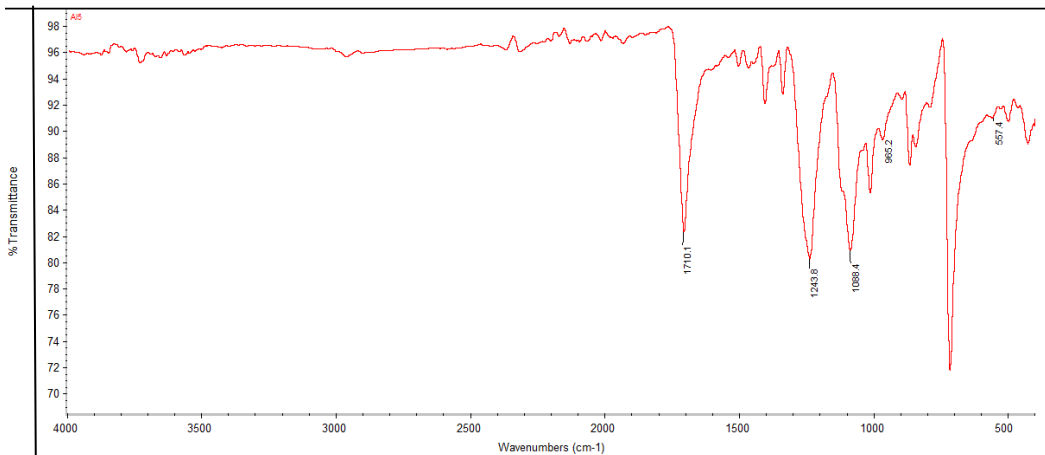
รูปที่ ข-9 ATR -FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังผ่านการตกแต่งห่วงใยใย B15NaDA



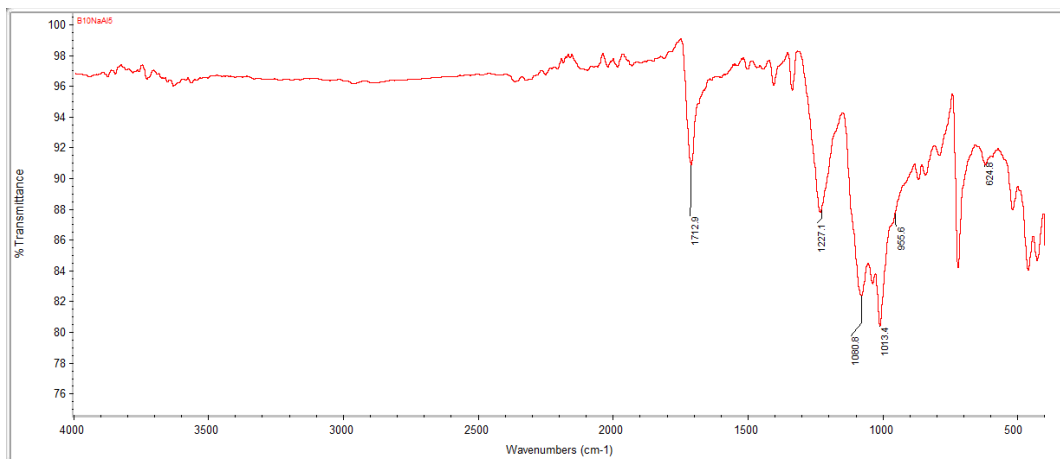
รูปที่ ข-10 ATR -FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังผ่านการตกแต่งห่วงใยใย B20NaDA



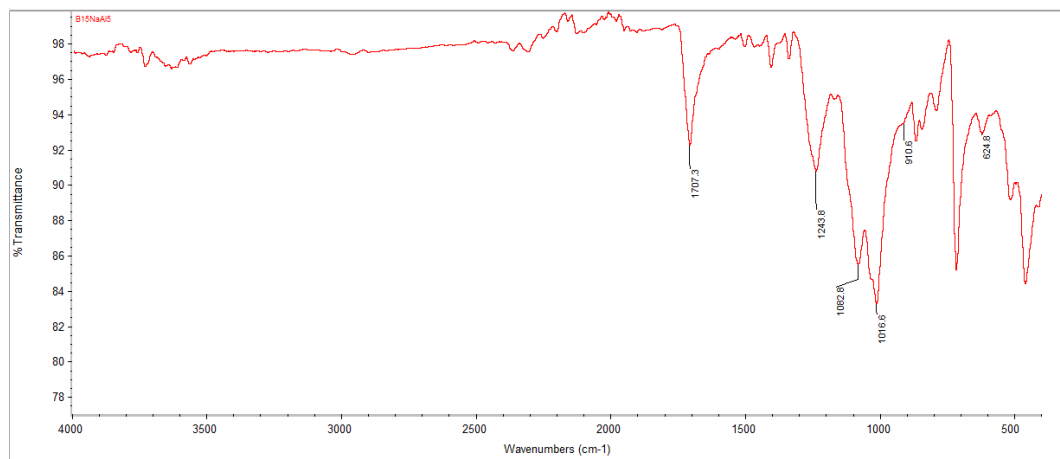
รูปที่ ข-11 ATR -FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเทอร์หลังผ่านการตกแต่งห่วงใยสูตร B25NaDA



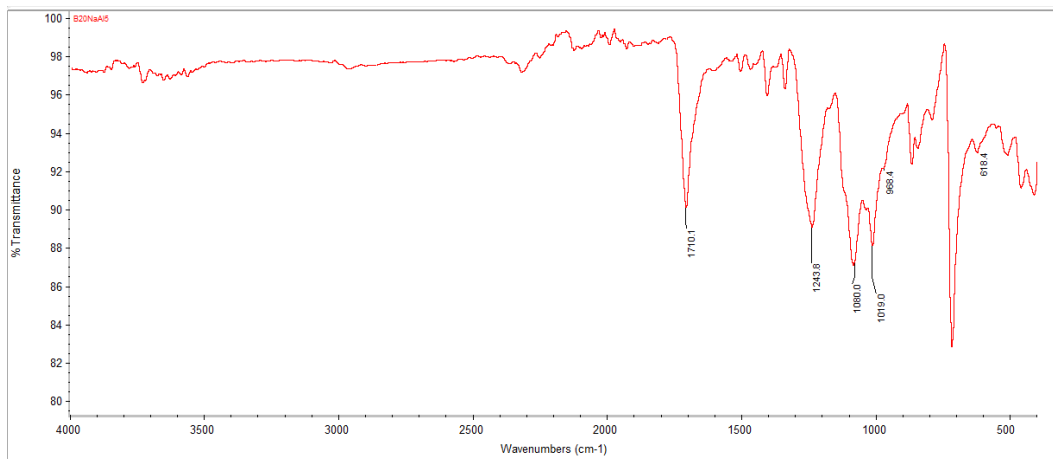
รูปที่ ข-12 ATR -FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเทอร์หลังผ่านการตกแต่งห่วงใยสูตร AI5



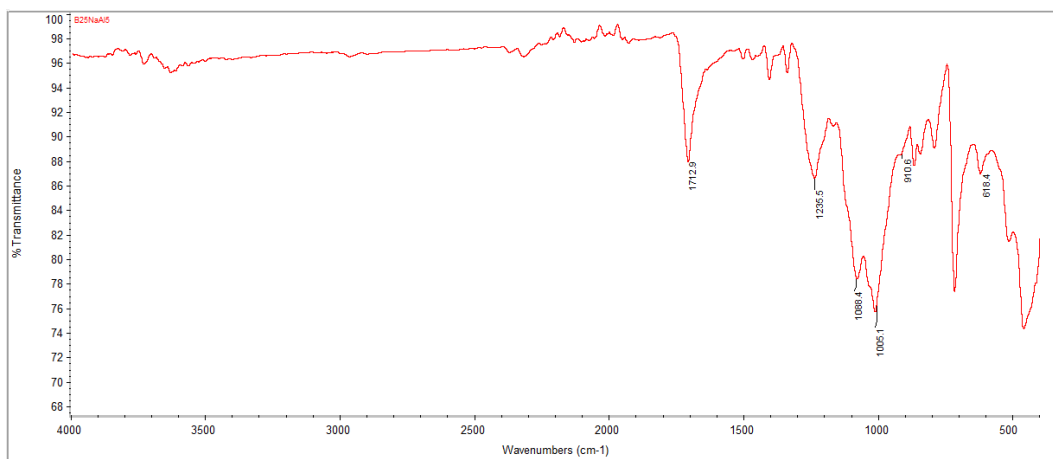
รูปที่ ข-13 ATR -FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเทอร์หลังผ่านการตกแต่งห่วงไฟสุตร B10NaAl5



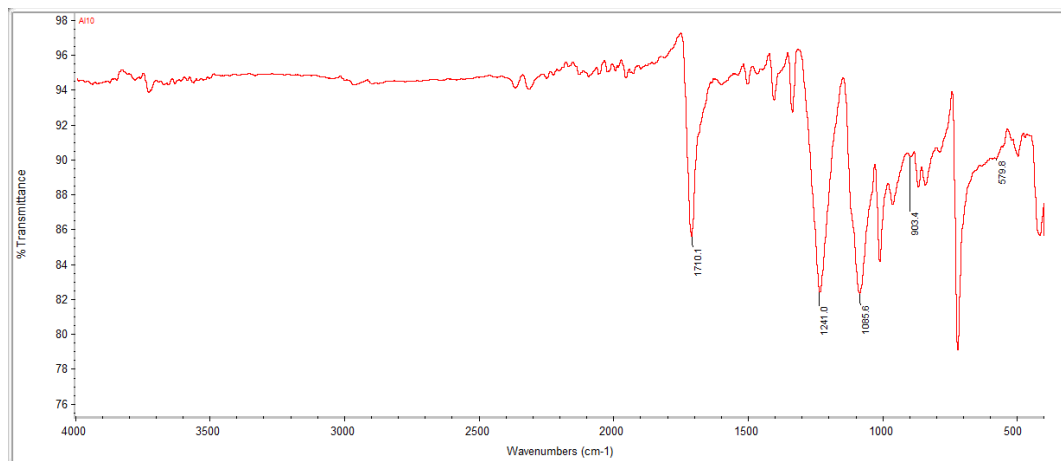
รูปที่ ข-14 ATR -FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเทอร์หลังผ่านการตกแต่งห่วงไฟสุตร B15NaAl5



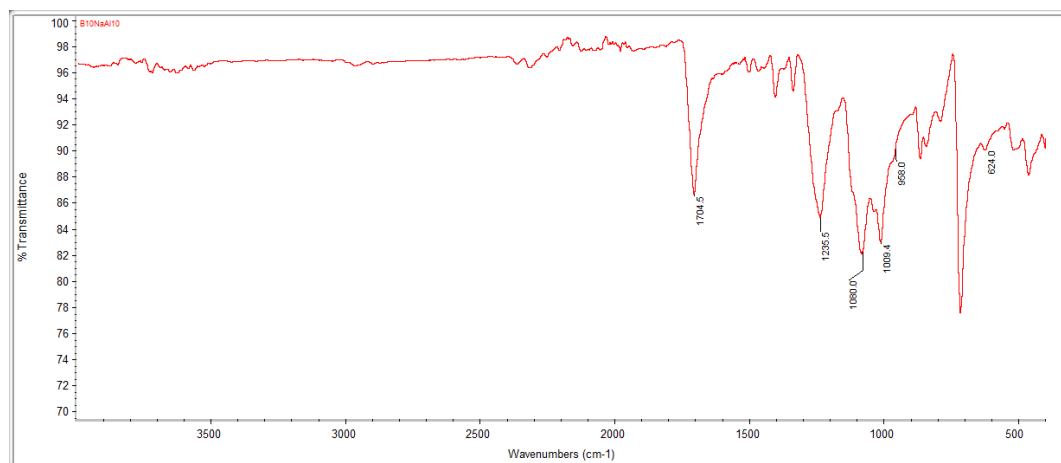
รูปที่ ข-15 ATR -FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเทอร์หลังจากการตกแต่งห่วงใยสูตร B20NaAl5



รูปที่ ข-16 ATR -FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเทอร์หลังจากการตกแต่งห่วงใยสูตร B25NaAl5



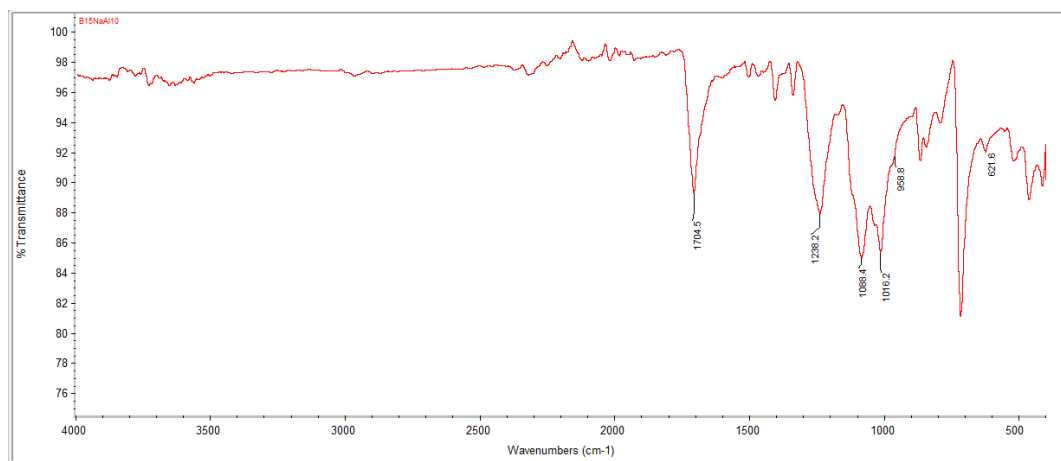
รูปที่ ข-17 ATR -FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังจากการตกแต่งห่วงไฟสูตร Al10



รูปที่ ข-18 ATR -FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังจากการตกแต่งห่วงไฟสูตร

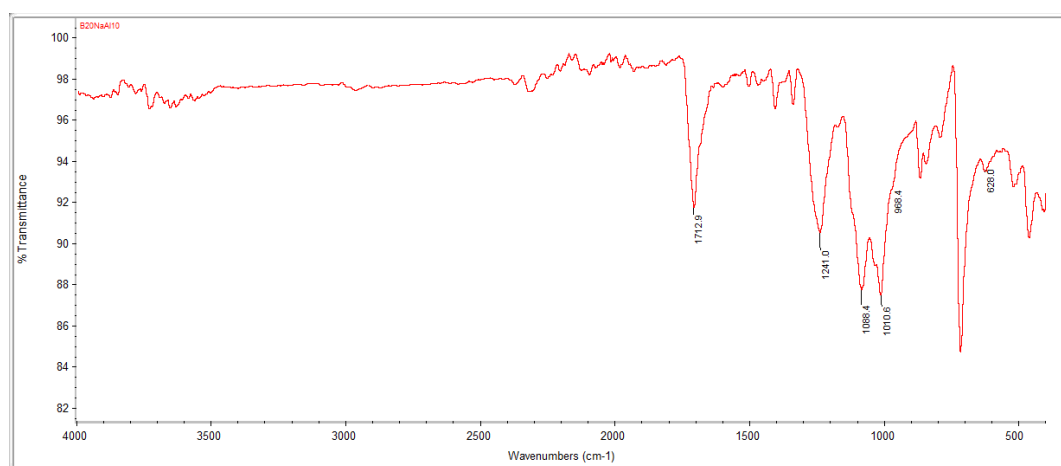
B10NaAl10





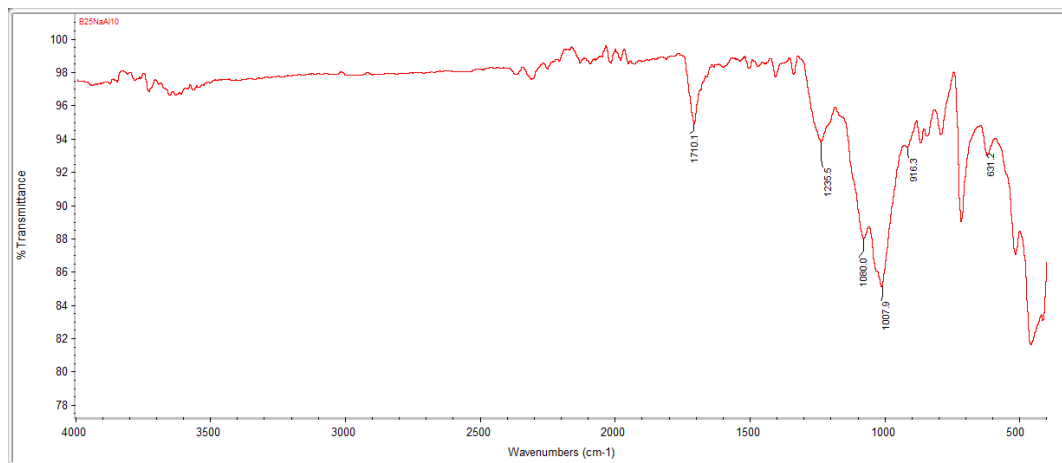
รูปที่ ข-19 ATR -FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเทอร์หลังผ่านการตกแต่งห่วงไฟสุตร

B15NaAl10



รูปที่ ข20 ATR -FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเทอร์หลังผ่านการตกแต่งห่วงไฟสุตร

B20NaAl10



รูปที่ ข-21 ATR -FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังผ่านการตกแต่งห่วงไฟสุตร

B25NaAl10

ภาคผนวก ค (Appendix C)

## ภาคผนวก ค

## ภาคผนวก ค. การวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดสี (Reflectance Spectrophotometer)

ตารางที่ ค-1 สีของผ้าพอลิเอสเตอร์ก่อนการซัก

ชิ้นงานมาตรฐานก่อนการซัก					
Untreated	L*	a*	b*	WI-CIE	YI-E313
	86.19	-0.24	0.76	64.63	1.38

ตารางที่ ค-2 สีของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการซัก

ชิ้นงานมาตรฐานหลังการซัก					
Untreated	L*	a*	b*	WI-CIE	YI-E313
	86.45	-0.17	0.15	68.14	0.18

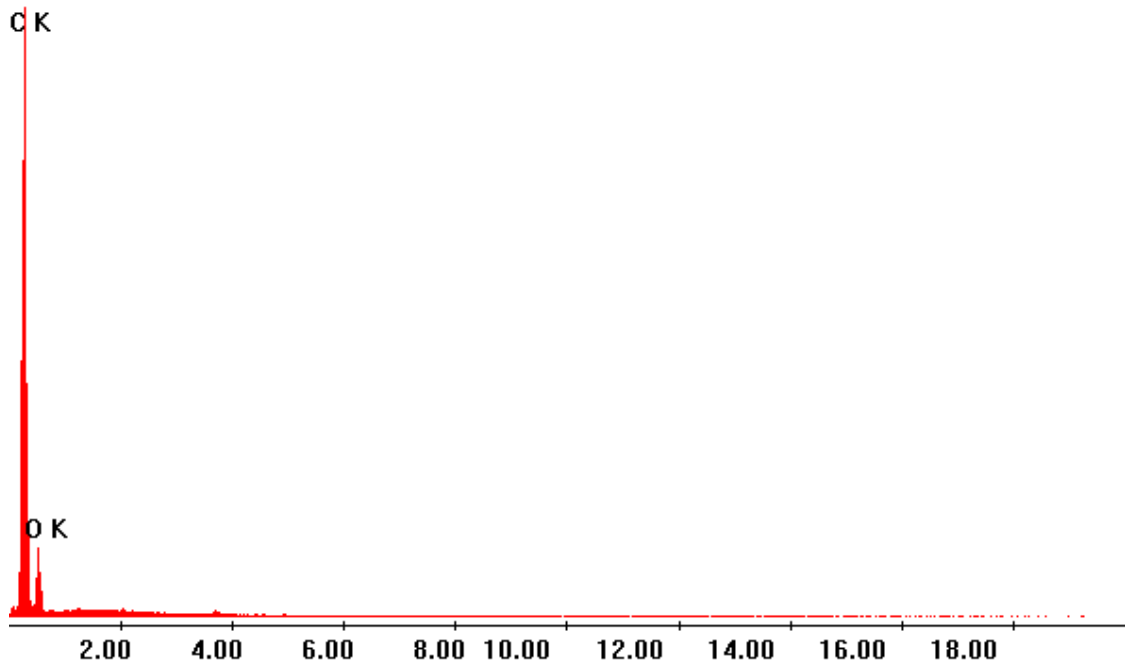
ตารางที่ ค-3 การเปลี่ยนสีของผ้าพอลิเอสเตอร์ก่อนและหลังการซัก

ก่อนการซัก							
สูตร	DL*	Da*	Db*	WI-CIE	YI-E313	DEcmc	P/F DEcmc
Na	0.12 L	0.01	0.44 Y	62.69	2.31	0.65	Passed
B10NaA10	2.06 L	0.07 R	0.76 Y	65.25	2.95	1.33	Failed
B15NaA10	2.23 L	0.09 R	0.93 Y	64.81	3.32	1.58	Failed
B20NaA10	2.34 L	0.22 R	1.55 Y	62.09	4.65	2.42	Failed
B25NaA10	0.46 L	0.67 R	4.63 Y	42.92	11.28	6.80	Failed
A10	0.48 L	-0.03 G	0.44 Y	63.47	2.26	0.66	Passed
หลังการซัก							
สูตร	DL*	Da*	Db*	WI-CIE	YI-E313	DEcmc	P/F DEcmc
A10	0.12L	-0.12G	-0.20B	69.36	-	0.36	Passed

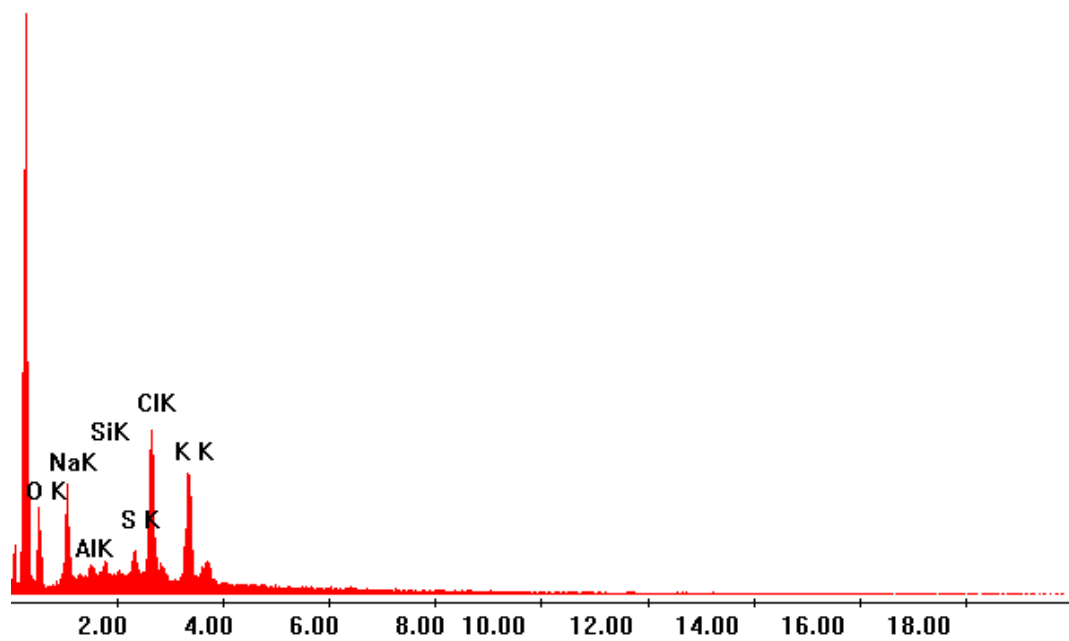
ภาคผนวก ง (Appendix D)

## ภาคผนวก ง

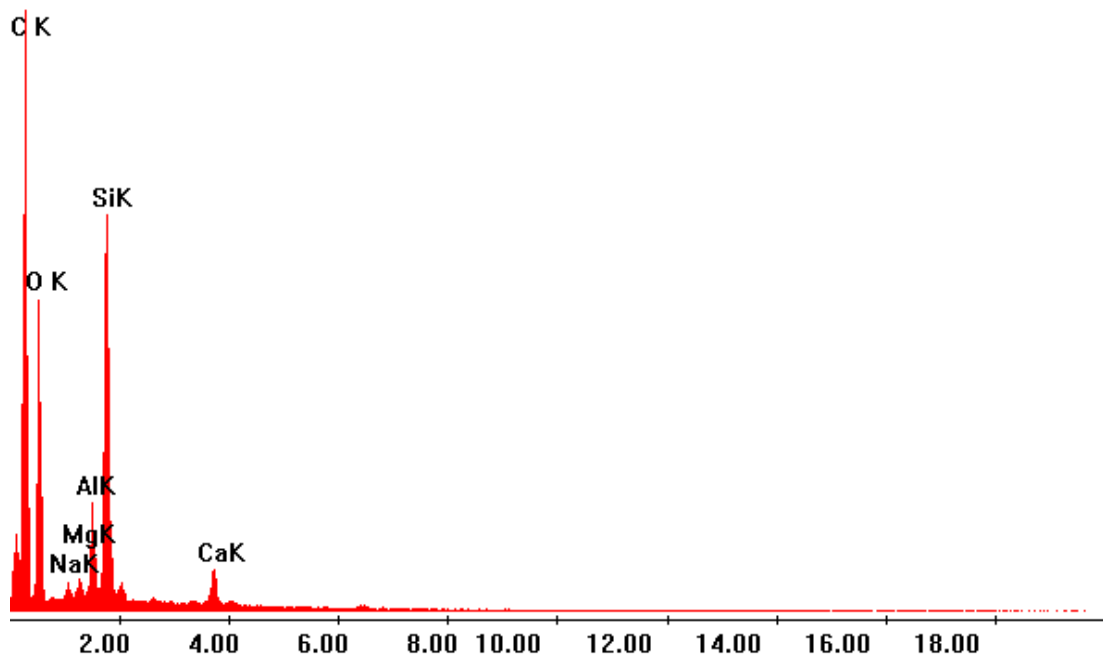
ภาคผนวก ง. การวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของสารที่เคลือบอยู่บนผิวเส้นใยผ้าและ  
อนุภาค ด้วยเครื่อง SEM/ EDX หรือ Energy Dispersive X-ray Analysis



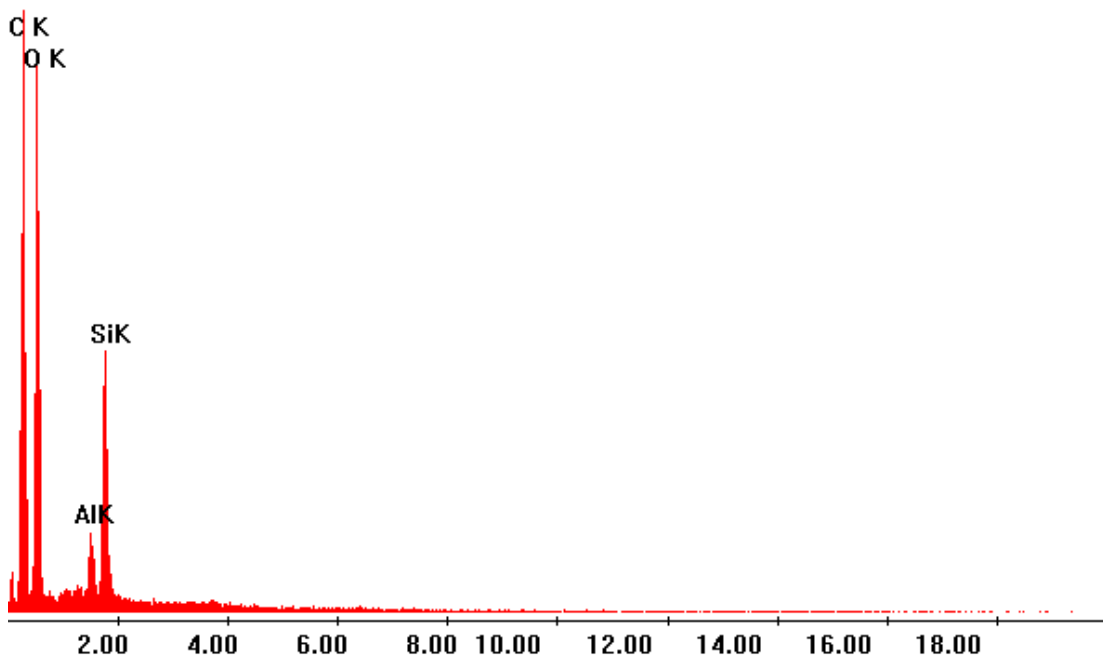
รูปที่ ง-1 ผ้าพอลิเอทเธอร์ก่อนการตกแต่งหน้าผิวไฟ (ก่อนซัก)



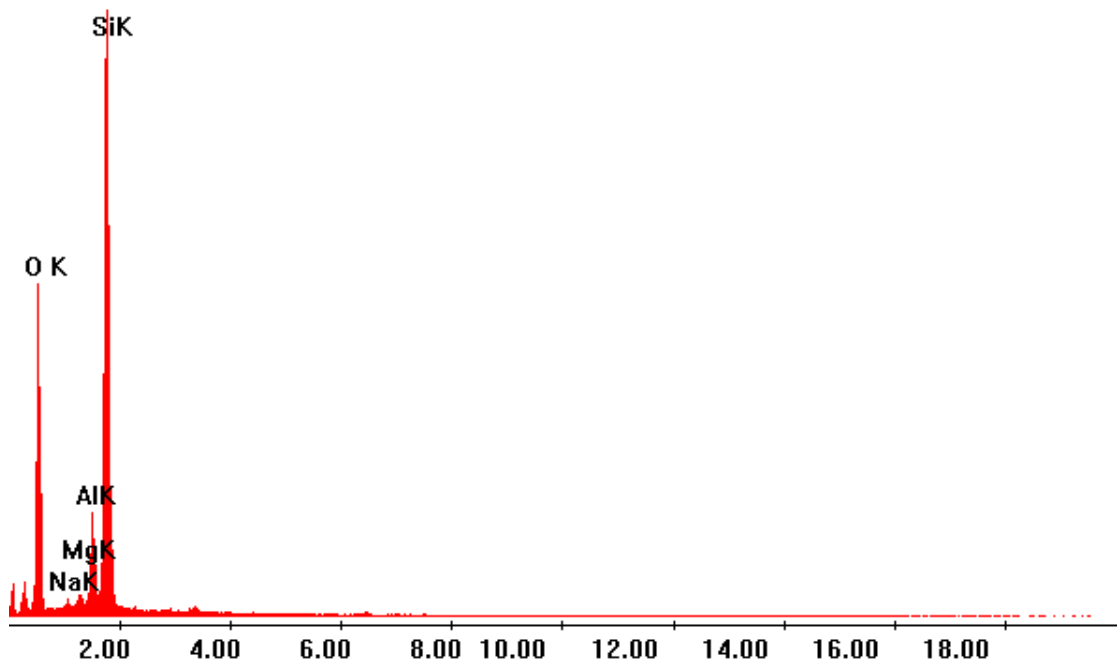
รูปที่ ง-2 ผ้าพอลิเอทเธอร์ก่อนการตกแต่งหน้าผิวไฟ (หลังซัก)



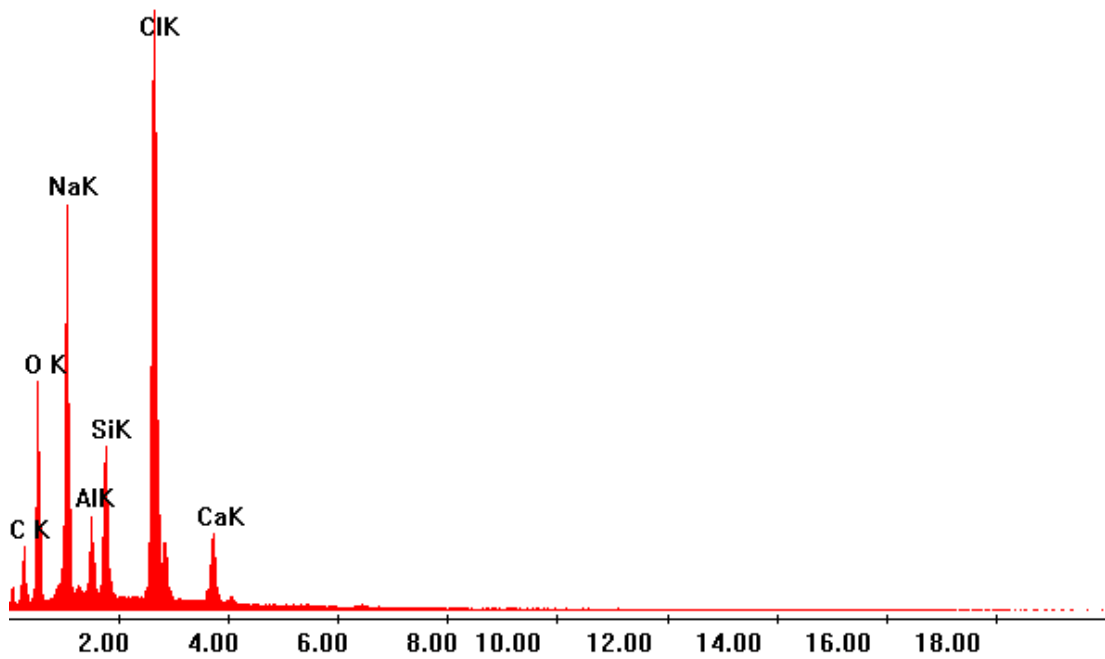
รูปที่ ง-3 ฝ้าพอลิเอสเตอร์หลังการตกแต่งหน้าไฟด้วยสูตร B10 (ก่อนซัก)



รูปที่ ง-4 ฝ้าพอลิเอสเตอร์หลังการตกแต่งหน้าไฟด้วยสูตร B10 (หลังซัก)

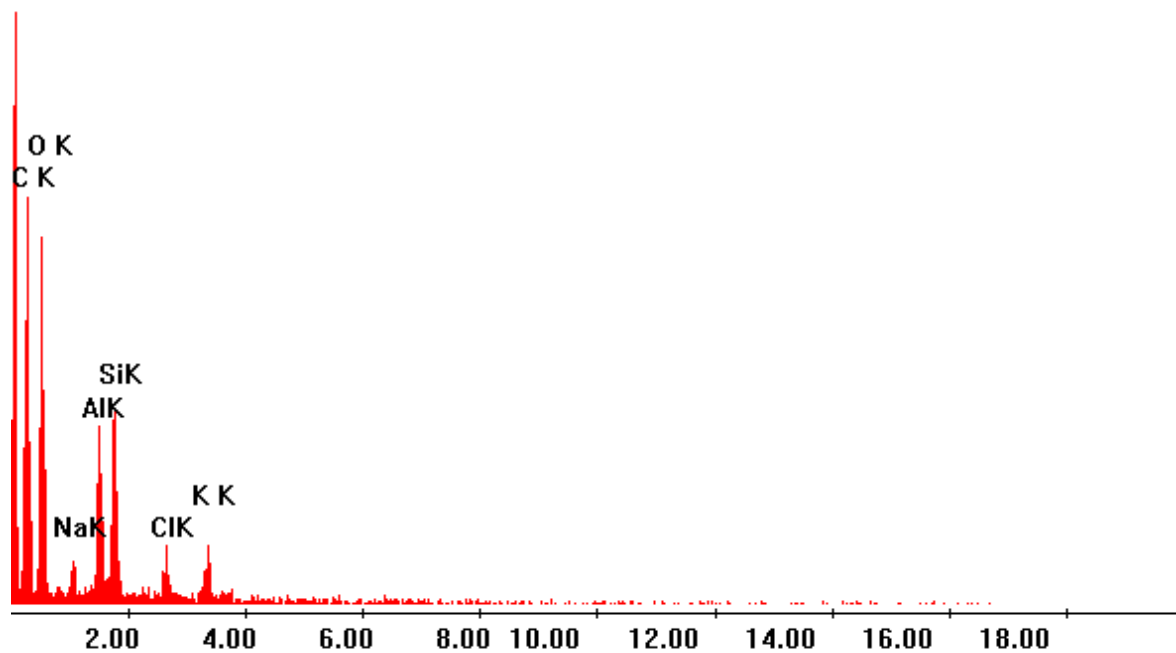


รูปที่ ง-5 อนุภาคเบนโทไนต์

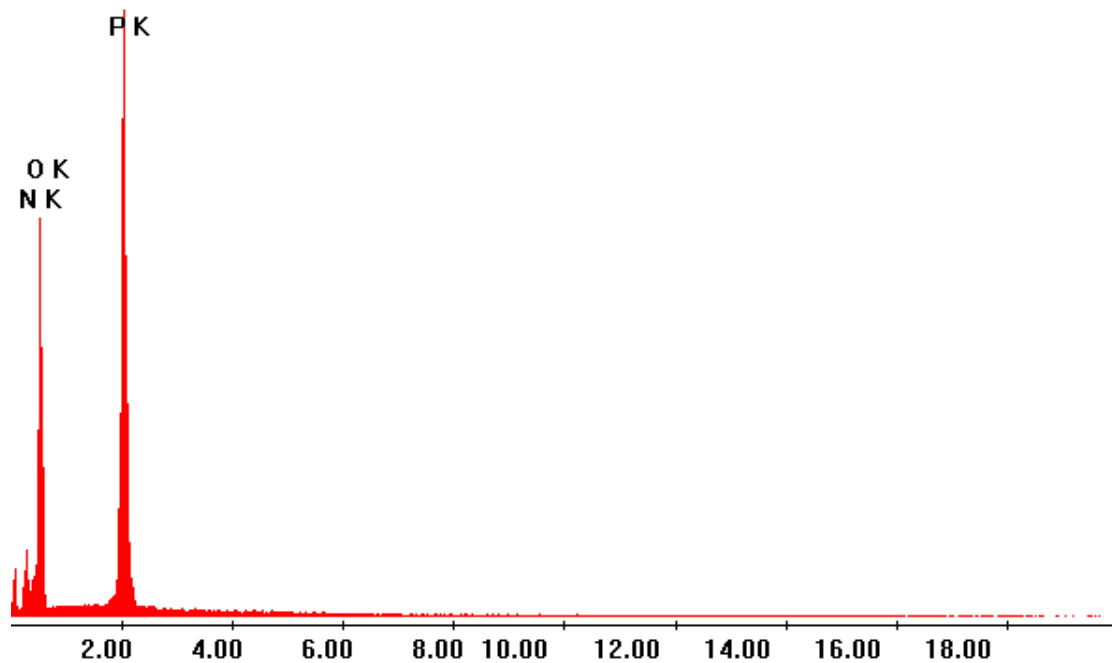


รูปที่ ง-6 ผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการตกแต่งผนังไฟด้วยสูตร B10Na (ก่อนซัก)

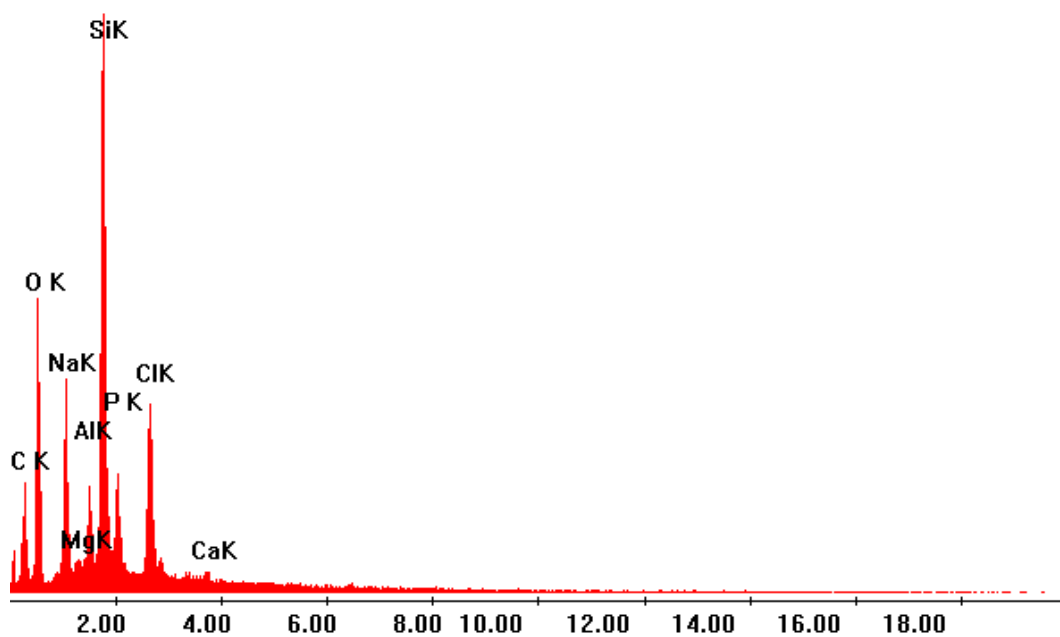




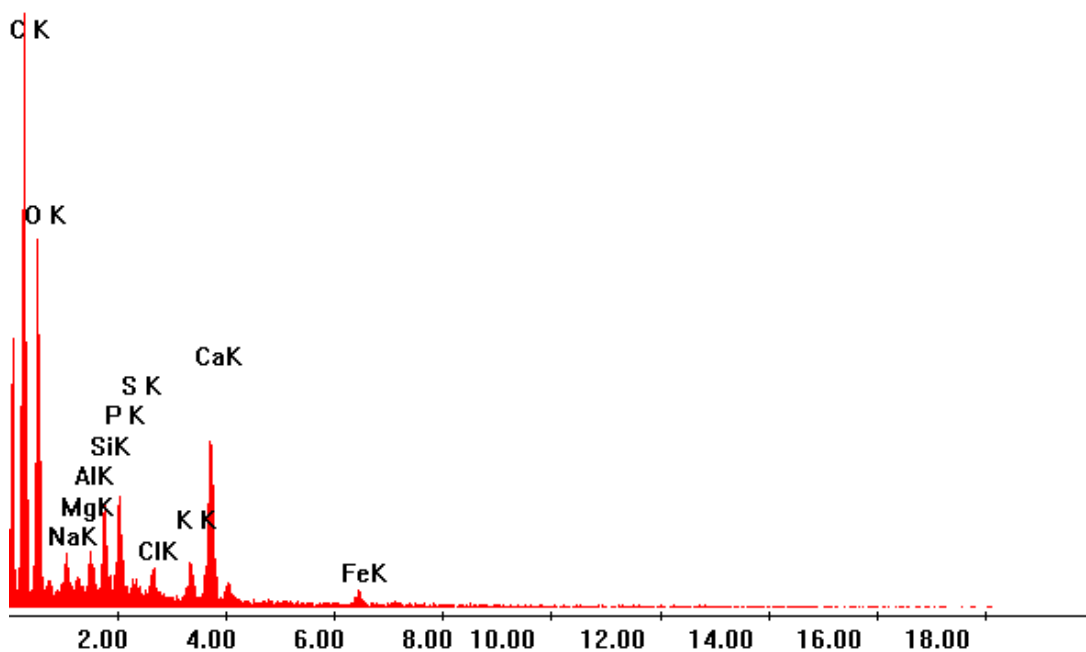
รูปที่ ง-7 ผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการตกแต่งหน้าไฟด้วยสูตร B10Na (หลังซัก)



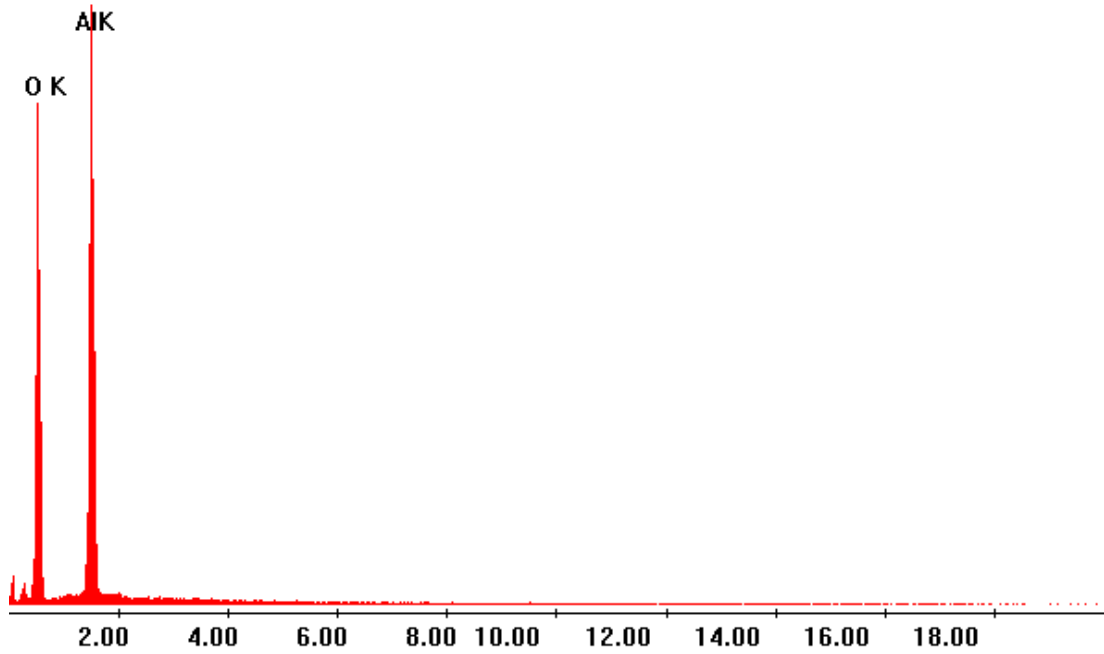
รูปที่ ง-8 อนุภาคไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต



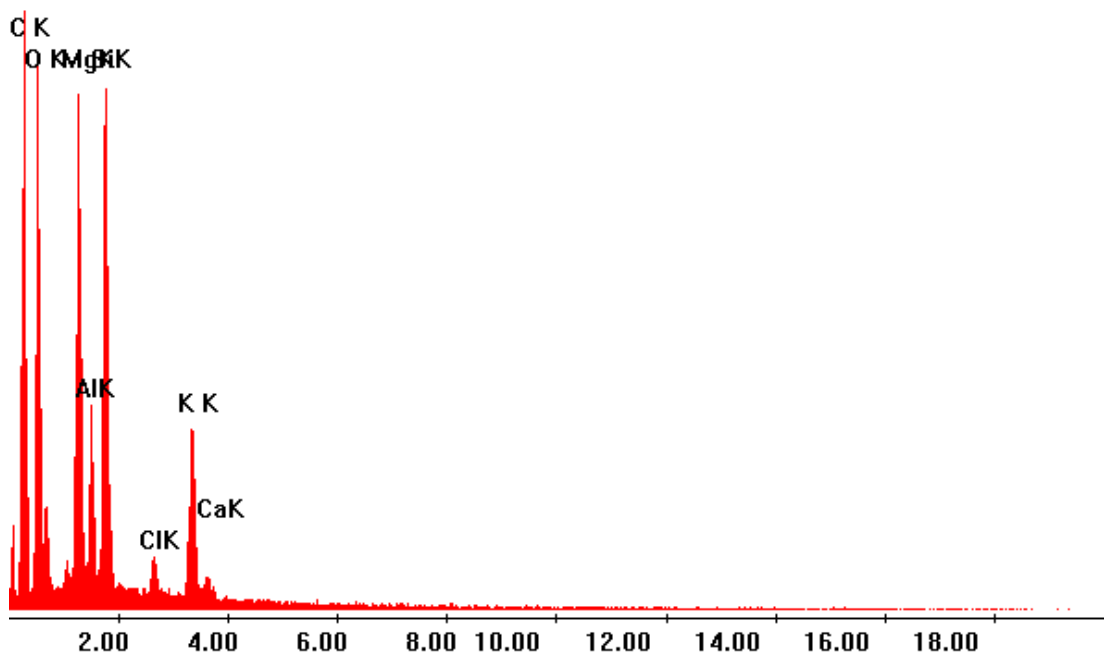
รูปที่ ง-9 ฟ้าพอลิเอสเตอร์หลังการตกแต่งหน้าวงไฟด้วยสูตร B10NaDA (ก่อนซัก)



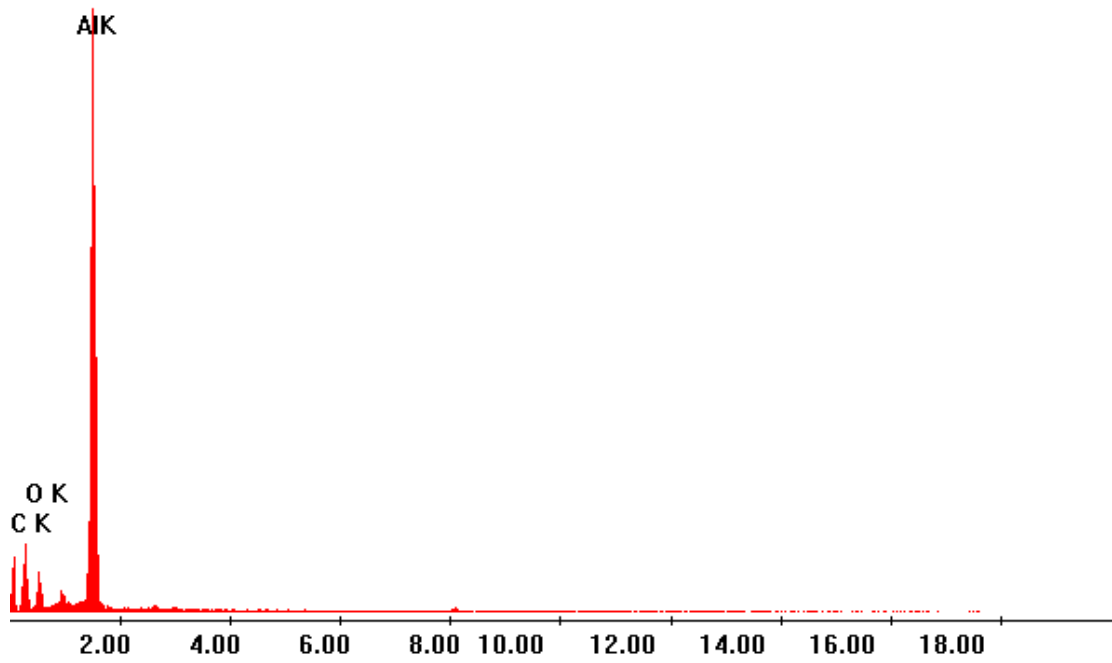
รูปที่ ง-10 ฟ้าพอลิเอสเตอร์หลังการตกแต่งหน้าวงไฟด้วยสูตร B10NaDA (หลังซัก)



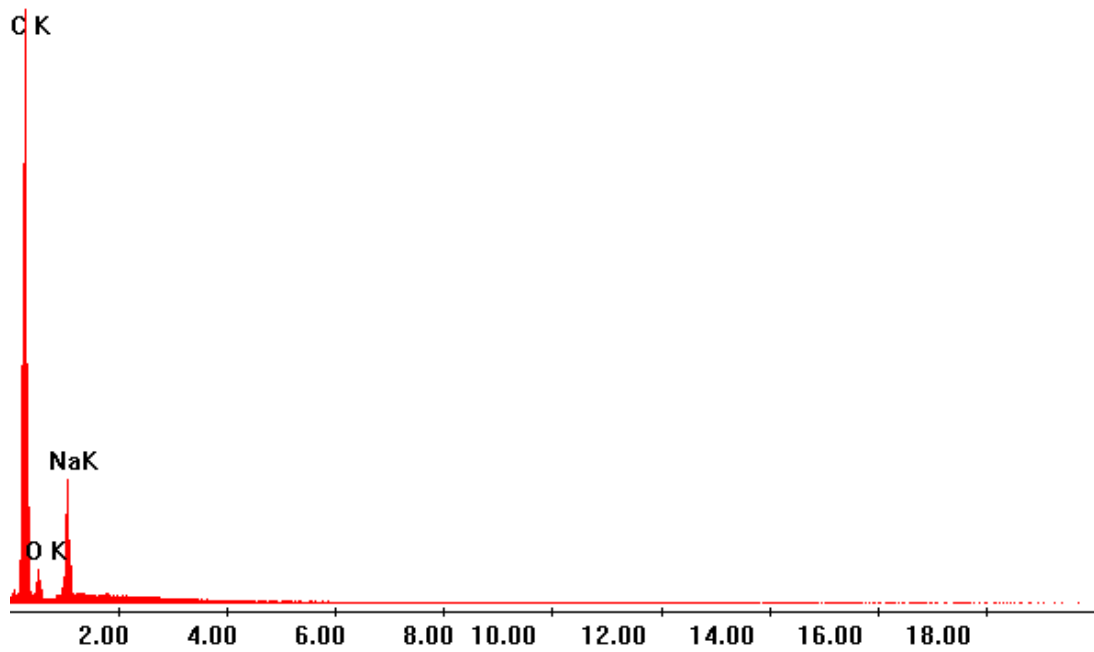
รูปที่ ง-11 อนุภาคอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ ง-12 ผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการตกแต่งหน้าไฟด้วยสูตร B10NaAl5 (ก่อนซัก)



รูปที่ ง-13 ผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการตกแต่งหน้าวงไฟด้วยสูตร B10NaAl5 (หลังซัก)



รูปที่ ง-14 อนุภาค Standard soap

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปนิษฐา เลิศขจรสุข เกิดเมื่อวันที่ 12 เมษายน พ.ศ. 2528 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์จากคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2550 หลังจากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2551 สำเร็จการศึกษาในภาคปลายปีการศึกษา 2553

การเสนอผลงานวิจัย ดังนี้

P. Lerdkajornsuk and S. Charuchinda, Effects of Bentonite and Sodium Chloride on Flame Retardancy and Antidripping of Polyester Fabric , The 3<sup>rd</sup> KSDF International Conference on Dyeing and Finishing, March 12, 2010, Daegu, Korea.

P. Lerdkajornsuk and S. Charuchinda, Study on Flame Retardancy and Antidripping of Polyester Fabric Treated with Bentonite, Diammonium hydrogen phosphate and Aluminium hydroxide, Thailand Textile Symposium 2010, August 26 2010, Bangkok, Thailand.

ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติ ดังนี้

Lerdkajornsuk, P., and Charuchinda S. (2010). Study on Flame Retardancy and Antidripping of Polyester Fabric Treated with Bentonite, Diammonium hydrogen phosphate and Aluminium hydroxide. Metals, Materials and Minerals, 20, 63-70.

