การใช้เบนโทไนต์ ผงกาวไหม และสารประกอบฟอสฟอรัสเป็นสารหน่วงไฟและสารต้านการหลอมหยดสำหรับผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวน

นางสาวภารุณี เขื่อนพงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2552
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

UTILIZATION OF BENTONITE, SERICIN POWDER AND PHOSPHORUS COMPOUNDS AS FLAME RETARDANT AND ANTIDRIPPING AGENTS FOR POLYESTER NONWOVEN FABRIC

Miss Parunee Kuenpong

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 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้เบนโทไนต์ ผงกาวไหม และสารประกอบฟอสฟอรัสเป็นสารหน่วงไฟและสารต้านการหลอมหยดสำหรับผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวน
โดย	นางสาวภารุณี เขื่อนพงศ์
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิรีรัตน์ จารุจินดา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

……ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ)

…….. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิรีรัตน์ จารุจินดา)

……กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. กาวี ศรีกูลกิจ)

……กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. นันทยา ยานุเมศ)

นางสาวภารุณี เขื่อนพงศ์ : การใช้เบนโทไนต์ ผงกาวไหม และสารประกอบฟอสฟอรัสเป็นสารหน่วงไฟและสารต้านการหลอมหยดสำหรับผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวน. (UTILIZATION OF BENTONITE, SERICIN POWDER AND PHOSPHORUS COMPOUNDS AS FLAME RETARDANT AND ANTIDRIPPING AGENTS FOR POLYESTER NONWOVEN FABRIC) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร. สิรีรัตน์ จารุจินดา, 140 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการใช้เบนโทไนต์ ผงกาวไหม และสารประกอบฟอสฟอรัส ได้แก่แอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตเป็นสารหน่วงไฟและสารต้านการหลอมหยดสำหรับตกแต่งบนผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนด้วยเทคนิคจุ่มอัด-อบให้แห้ง โดยทำการตกแต่งด้วยเบนโทไนต์และผงกาวไหมในปริมาณต่างๆที่ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10 เปอร์เซ็นต์ และเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟต 1 และ 3 เปอร์เซ็นต์ จากการทดสอบการติดไฟแนว 45 องศา พบว่าเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟตทั้ง 2 ชนิดที่ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ สามารถทำให้ผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่เมื่อติดไฟแล้วเปลวไฟดับเองได้หลังจากนำแหล่งต้นไฟออก นอกจากนี้ผ้ายังไม่เกิดการหลอมหยดอีกด้วย ส่วนผ้าที่ผ่านการตกแต่งด้วยเบนโทไนต์เพียงอย่างเดียวในปริมาณที่น้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ผ้ายังคงมีการลุกไหม้และเกิดการหลอมหยด แต่เมื่อปริมาณเบนโทไนต์เพิ่มขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์พบว่าผ้าไม่เกิดการหลอมหยดแต่ผ้าก็ยังคงลุกไหม้ ในขณะที่ผงกาวไหมเพียงอย่างเดียวไม่สามารถหน่วงไฟและต้านการหลอมหยดผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนได้เลยและสิ่งที่หลอมหยดยังทำให้แผ่นสำลีรองรับเกิดการลุกไหม้อย่างรุนแรงอีกด้วย แต่เมื่อนำผงกาวไหมผสมกับเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟตทั้ง 2 พบว่าผ้ายังคงลุกไหม้เช่นเดิมแต่ไม่มีการหลอมหยด ที่น่าสนใจเมื่อผสมผงกาวไหมกับเบนโทไนต์ในอัตราส่วนของเบนโทไนต์ที่สูงกว่าได้ทำให้ผ้าต้านการหลอมหยดได้แต่เปลวไฟลุกไหม้รุนแรงและมีชาร์เหลืออยู่ จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA พบว่าผ้าที่ผ่านการตกแต่งมีอุณหภูมิการสลายตัวต่ำกว่าผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านการตกแต่ง และมีปริมาณชาร์เหลืออยู่มากกว่าผ้าที่ไม่ผ่านการตกแต่ง

ภาควิชา วัสดุศาสตร์ ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา 2552.....

##5072414423: MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY
KEYWORDS : Flame retardant / Antidripping / Sericin powder / Bentonite / Ammonium phosphate / Polyester nonwoven fabric

PARUNEE KUENPONG : UTILIZATION OF BENTONITE, SERICIN POWDER AND PHOSPHORUS COMPOUNDS AS FLAME RETARDANT AND ANTIDRIPPING AGENTS FOR POLYESTER NONWOVEN FABRIC. THESIS ADVISOR : ASST.PROF.SIREERAT CHARUCHINDA, Ph.D, 140 pp.

The aim of this research was to utilize bentonite, sericin powder and phosphorus compounds (ammonium di hydrogen phosphate and di ammonium hydrogen phosphate) as flame retardant and antidripping agents for finishing on polyester nonwoven fabric by pad-dry technique. The amounts of bentonite and sericin powder were varied from 0, 1, 3, 5, 7 and 10%, whereas, the amounts of both ammonium phosphates were varied from 1 and 3%. The 45-degree flammability test showed that both ammonium phosphates could promote self-extinguishment when the ignition source was removed. Moreover, melt-drip of polyester nonwoven fabric was not observed. In contrast, finished fabric with bentonite only (less than 10%) was found to remain burn and also melt drip. However, when the amount of bentonite increased to 10%, the finished fabric did not melt drip but burning still remained. Likewise, sericin powder only could not promote both flame retardancy and antidripping of polyester nonwoven fabric. Moreover, its flaming drip leading to severe burning of underlying cotton pad. However, when sericin powder was mixed with both ammonium phosphates, the finished fabric kept on burning but there was no dripping. Similarly, when sericin powder mixed with bentonite (with higher ratio of bentonite), after removing the ignition source, there was no dripping but the fabric was burning with intense flame and leaving some amounts of char. The TGA data demonstrated that bentonite, sericin powder and phosphorus compounds lowered the decomposition temperature of the finished polyester nonwoven fabric and leaving higher char yield than that of unfinished one.

Department : Materials Science Student's Signature .....
Field of Study: Applied polymer science and textile Technology Advisor's Signature .....
Academic Year : 2009 .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้อย่างสมบูรณ์เป็นเพราะได้รับคำแนะนำทางวิชาการ ความเอื้อเฟื้อด้านเครื่องมือ วัตถุดิบและสถานที่ทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังได้รับความช่วยเหลือและแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิด้านต่างๆ เป็นอย่างดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณบุคคล และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องดังรายนาม ต่อไปนี้

1. ผศ. ดร. สิรีรัตน์ จารุจินดา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาที่ดีเยี่ยมในการแก้ไขปัญหา แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ และการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์ รวมทั้งให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์เสมอมา

2. ผศ. ดร. ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร. กาวี ศรีกูลกิจ และ รศ.ดร. นันทยา ยานุเมศ กรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนวคิด แนะนำด้านวิชาการ และช่วยตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

3. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. ศูนย์วิจัยเฉพาะทางด้านวัสดุเซรามิกส์ และพอลิเมอร์ขั้นสูง ศูนย์ความเป็นเลิศด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนการศึกษาและทุนสนับสนุนในการวิจัยบางส่วน

5. ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านสิ่งทอ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนสนับสนุนในการวิจัยบางส่วน

6. บริษัท เทยินโพลีเอสเตอร์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนในการทำวิจัย

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถสร้างสรรค์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฌ

สารบัญภาพ..... ฎ

บทที่

1. บทนำ..... 1

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 3

2.1 พอลิเอสเทอร์..... 3

2.2 ผ้านอนวูเวน..... 6

2.3 การตกแต่งหน่วงไฟผ้าพอลิเอสเทอร์..... 11

2.4 แร่ดิน..... 24

2.5 ผงกาวไหม..... 28

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 32

3. วิธีการทดลอง..... 34

3.1 วัสดุและสารเคมี..... 34

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... 34

3.3 การดำเนินงานวิจัย..... 35

3.4 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการตกแต่งหน่วงไฟผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวน..... 37

3.5 การศึกษาพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดบนผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวน..... 41

3.6 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเทคนิค ATR-FTIR..... 42

บทที่ หน้า

3.7 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ..... 43
3.8 การศึกษาสัณฐานวิทยาของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)..... 44
3.9 การศึกษาความแข็งกระด้างของผ้า..... 45
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง..... 46
4.1 พฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนแนว 45 องศา..... 46
4.1.1 ผลของเบนโทไนต์และเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟต..... 46
4.1.2 ผลของผงกาวไหมและเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟต..... 54
4.1.3 ผลของผงกาวไหมและเบนโทไนต์..... 61
4.1.4 ผลของเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟต..... 65
4.2 การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ..... 68
4.2.1 สมบัติทางความร้อนของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่าน และผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเทคนิค TGA..... 68
4.2.2 สมบัติทางความร้อนของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเทคนิค DSC..... 80
4.3 การศึกษาโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค ATR-FTIR 84
4.4 การศึกษาลักษณะพื้นผิวโดยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)..... 89
4.5 การศึกษาความกระด้างของผ้า..... 105
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 106
5.1 สรุปผลการวิจัย..... 106
5.2 ข้อเสนอแนะ..... 107
รายการอ้างอิง..... 108
ภาคผนวก..... 112
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 140

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 2.1	เปรียบเทียบสมบัติในด้านความคงทนต่อความร้อนของเส้นใยชนิดต่างๆ....	11
ตารางที่ 2.2	โครงสร้างและปริมาณของกรดอะมิโนของโปรตีนเซริซิน (กรดอะมิโนเป็นกรัมในโปรตีน 100 กรัม).....	29
ตารางที่ 2.3	การจำแนกประเภทของกรดอะมิโนของโปรตีนเซริซิน.....	30
ตารางที่ 3.1	องค์ประกอบของเบนโทไนต์.....	34
ตารางที่ 3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	35
ตารางที่ 3.3	แสดงสูตรการตกแต่งหน่วงไฟผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน (% น้ำหนัก/ปริมาตร).....	38
ตารางที่ 4.1	ผลของการทดสอบการติดไฟแนว 45 องศา ของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ และเบนโทไนต์กับเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟตในปริมาณที่แตกต่างกัน.....	53
ตารางที่ 4.2	ผลของการทดสอบการติดไฟแนว 45 องศา ของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม และผงกาวไหมกับเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟตในปริมาณที่แตกต่างกัน.....	60
ตารางที่ 4.3	ผลของการทดสอบการติดไฟแนว 45 องศา ของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหมกับเบนโทไนต์ในปริมาณที่แตกต่างกัน.....	64
ตารางที่ 4.4	ผลของการทดสอบการติดไฟแนว 45 องศา ของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟตในปริมาณที่แตกต่างกัน.....	67
ตารางที่ 4.5	อุณหภูมิการสลายตัวและปริมาณชาร์ที่เหลืออยู่ของผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ.....	68
ตารางที่ 4.6	อุณหภูมิการหลอมเหลวของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารหน่วงไฟสูตรต่างๆ.....	83
ตารางที่ 4.7	หมู่ฟังก์ชันของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารต่างๆ.....	88

ตารางที่ หน้า

ตารางที่ 4.8 ค่าความกระด้างของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารหน่วงไฟสูตรต่างๆ..... 105

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ		หน้า
รูปที่ 2.1	โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอสเทอร์ (PET)……	4
รูปที่ 2.2	กระบวนการผลิตผ้านอนวูฟเวนแบบ Dry-laid.....	7
รูปที่ 2.3	กระบวนการผลิตผ้านอนวูฟเวนแบบ Wet-laid……...	8
รูปที่ 2.4	กระบวนการผลิตผ้านอนวูฟเวนแบบ Spun-bonded……	8
รูปที่ 2.5	กระบวนการผลิตผ้านอนวูฟเวนแบบ Hydroentangled หรือ spunlace.....	9
รูปที่ 2.6	กระบวนการผลิตผ้านอนวูฟเวนแบบ Melt-blown.....	9
รูปที่ 2.7	กระบวนการผลิตผ้านอนวูฟเวนแบบ Thermal bonding.....	10
รูปที่ 2.8	กระบวนการผลิตผ้านอนวูฟเวนแบบ Needle punching……...	10
รูปที่ 2.9	กระบวนการเผาไหม้……..	13
รูปที่ 2.10	วงจรการลุกไหม้ของวัสดุสิ่งทอ……	13
รูปที่ 2.11	การฟอสฟอริเลชันของเซลลูโลส.....	21
รูปที่ 2.12	การเกิดชาร์.....	21
รูปที่ 2.13	โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์……...	27
รูปที่ 2.14	การยึดติดกันระหว่างชั้นของดินกับประจุบวกที่อยู่ระหว่างชั้นของดิน……..	27
รูปที่ 2.15	เส้นไหมดิบ……..	28
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนการทดลอง.....	36
รูปที่ 3.2	เครื่อง Atlas 45° Automatic Flammability Tester……	41
รูปที่ 3.3	เครื่อง Fourier transform infrared spectrometer (FTIR)……	42
รูปที่ 3.4	เครื่อง Thermogravimetric analysis (TGA)……..	43
รูปที่ 3.5	เครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC)……	44
รูปที่ 3.6	เครื่อง Scanning electron microscope (SEM)……	44
รูปที่ 3.7	เครื่อง CANTILEVER TESTER……...	45
รูปที่ 4.1	ภาพพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์และเบนโทไนต์กับเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟต ณ เวลาแตกต่างกันหลังจากเริ่มจุดไฟ (เวลาจุดไฟ 5 วินาที)……	47

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 4.2 ภาพของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์และเบนโทไนต์กับเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟตที่เหลืออยู่ภายหลังการทดสอบพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเทอร์แนว 45 องศา..... 52

รูปที่ 4.3 ภาพพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม และผงกาวไหมกับเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟต ณ เวลาแตกต่างกันหลังจากเริ่มจุดไฟ (เวลาจุดไฟ 5 วินาที)..... 55

รูปที่ 4.4 ภาพของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหมและผงกาวไหมกับเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟตที่เหลืออยู่ภายหลังการทดสอบพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเทอร์แนว 45 องศา..... 59

รูปที่ 4.5 ภาพพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์นอนวูฟ เวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหมกับเบนโทไนต์ ณ เวลาแตกต่างกันหลังจากเริ่มจุดไฟ (เวลาจุดไฟ 5 วินาที)..... 61

รูปที่ 4.6 ภาพของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหมกับเบนโทไนต์ที่เหลืออยู่ภายหลังการทดสอบพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเทอร์แนว 45 องศา..... 63

รูปที่ 4.7 ภาพพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟต ได้แก่ แอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ณ เวลาแตกต่างกันหลังจากเริ่มจุดไฟ (เวลาจุดไฟ 5 วินาที)..... 65

รูปที่ 4.8 ภาพของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟตที่เหลืออยู่ภายหลังการทดสอบพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเทอร์แนว 45 องศา..... 66

รูปที่ 4.9 TGA เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์..... 69

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 4.10 DTG เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์..... 69
รูปที่ 4.11 TGA เทอร์โมแกรมแสดงเสถียรภาพทางความร้อนของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์กับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต..... 71
รูปที่ 4.12 DTG เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์กับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต..... 71
รูปที่ 4.13 TGA เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม..... 73
รูปที่ 4.14 DTG เทอร์โมแกรมแสดงเสถียรภาพทางความร้อนของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม..... 73
รูปที่ 4.15 TGA เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหมกับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต..... 75
รูปที่ 4.16 DTG เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหมกับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต..... 75
รูปที่ 4.17 TGA เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหมกับเบนโทไนต์..... 77
รูปที่ 4.18 DTG เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหมกับเบนโทไนต์..... 77
รูปที่ 4.19 TGA เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต..... 79
รูปที่ 4.20 DTG เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต..... 79
รูปที่ 4.21 DSC เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ และเบนโทไนต์กับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต..... 81
รูปที่ 4.22 DSC เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม และผงกาวไหมกับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต..... 81

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 4.23 DSC เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหมกับเบนโทไนต์..... 82

รูปที่ 4.24 DSC เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต..... 82

รูปที่ 4.25 FTIR-ATR สเปกตราของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์..... 85

รูปที่ 4.26 FTIR-ATR สเปกตราของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์กับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต..... 85

รูปที่ 4.27 FTIR-ATR สเปกตราของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม..... 86

รูปที่ 4.28 FTIR-ATR สเปกตราของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหมกับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต..... 86

รูปที่ 4.29 FTIR-ATR สเปกตราของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหมกับเบนโทไนต์..... 87

รูปที่ 4.30 FTIR-ATR สเปกตราของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต..... 87

รูปที่ 4.31 เส้นใยพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ที่ความเข้มข้นต่างๆ..... 90

รูปที่ 4.32 เส้นใยพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์และแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ความเข้มข้นต่างๆ..... 92

รูปที่ 4.33 เส้นใยพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ..... 94

รูปที่ 4.34 เส้นใยพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหมที่ความเข้มข้นต่างๆ..... 96

รูปที่ 4.35 เส้นใยพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหมและแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ความเข้มข้นต่างๆ..... 98

รูปที่ 4.36 เส้นใยพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหมและไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ..... 100

ภาพประกอบ หน้า
รูปที่ 4.37 เส้นใยพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหมกับเบนโทไนต์ที่ความเข้มข้นต่างๆ…….. 102
รูปที่ 4.38 เส้นใยพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารประกอบฟอสฟอรัสที่ความเข้มข้นต่างๆ…… 104

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมสิ่งทอได้นำผ้านอนวูฟเวนมาใช้งานในหลากหลายด้านไม่ว่าจะเป็นด้านสุขอนามัย ด้านการแพทย์ ด้านเครื่องนุ่งห่มและเคหะสิ่งทอ และด้านสิ่งทอโยธา เป็นต้น นอกจากนี้อุตสาหกรรมยานยนต์ก็มีปริมาณการนำผ้านอนวูฟเวนมาใช้เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยทั่วไปผ้านอนวูฟเวนที่ใช้มักผลิตจากเส้นใยพอลิพรอพิลีน และเส้นใยพอลิเอสเทอร์ ซึ่งเมื่อเกิดอัคคีภัยแล้วเส้นใยดังกล่าวจะติดไฟแล้วเกิดการหลอมหยดนับเป็นอันตรายต่อชีวิตหากเกิดการหลอมติดผิวหนัง อีกทั้งสารที่หลอมละลายหยดลงมานั้นมีความร้อนสูงสามารถเป็นแหล่งต้นเพลิงทำให้เชื้อเพลิงบริเวณใกล้ๆเกิดการลุกไหม้ได้อย่างรวดเร็วสร้างความเสียหายต่อทรัพย์สินของผู้บริโภค ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องพัฒนาผ้านอนวูฟเวนให้มีสมบัติหน่วงไฟรวมทั้งสามารถต้านการหลอมหยดได้เพื่อเพิ่มความปลอดภัยให้แก่ผู้บริโภค เป็นที่ทราบกันดีว่าสารประกอบฮาโลเจนมีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดีและมีความคงทนสูงสำหรับพอลิเอสเทอร์ แต่สารดังกล่าวก็เป็นสารก่อมะเร็งและเมื่อเกิดการเผาไหม้จะเกิดแก๊สฮาโลเจนซึ่งเป็นแก๊สพิษที่อันตรายหากสูดดมเข้าไปในปริมาณมากอาจถึงแก่ความตายได้ ด้วยเหตุนี้สหภาพยุโรปจึงได้ประกาศห้ามใช้หรือนำเข้าผลิตภัณฑ์ที่มีการตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารประกอบฮาโลเจนส่งผลให้มีความพยายามนำสารหน่วงไฟที่ไม่มีฮาโลเจนมาใช้ทดแทนสารหน่วงไฟ ฮาโลเจนเพิ่มมากขึ้น สำหรับสารหน่วงไฟที่ไม่มีธาตุฮาโลเจน เช่นสารประกอบฟอสฟอรัส ได้แก่เกลือแอมโมเนียมฟอสเฟต หรือออร์กาโนฟอสฟอรัส พบว่ามีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดีเช่นกันเนื่องจากทำให้เกิดชั้นชาร์ที่มีความคงทนต่อความร้อนปกคลุมพื้นผิววัสดุเปรียบเสมือนฉนวนกันความร้อน ป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจนและป้องกันมิให้สารซึ่งเป็นองค์ประกอบของวัสดุภายในเปลี่ยนสภาพเป็นแก๊สที่ติดไฟ อีกทั้งสารนี้ยังไม่ให้แก๊สพิษที่เป็นอันตรายออกมาอีกด้วย นอกจากนี้การใช้สารประกอบไนโตรเจนร่วมกับสารประกอบฟอสฟอรัสยังเสริมสมบัติในการหน่วงไฟของสารประกอบฟอสฟอรัสให้ดียิ่งขึ้นผงกาว-ไหมประกอบด้วยส่วนประกอบของไนโตรเจนและซัลเฟอร์ จึงอาจนำมาใช้ร่วมกับสารประกอบฟอสฟอรัสเพื่อเสริมสมบัติการหน่วงไฟ เช่นเดียวกับที่ได้มีการนำมอนต์มอริลโลไนต์มาผสมกับพอลิเอทิลีนแล้วพบว่ามอนต์มอริลโลไนต์สามารถต้านการหลอมหยดของพอลิเอทิลีนได้

จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะปรับปรุงสมบัติการหน่วงไฟและต้านการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนโดยคำนึงถึงความปลอดภัยของผู้ใช้ ผู้ผลิต

สังคมและสิ่งแวดล้อม ด้วยการใช้เบนโทไนต์ (โซเดียมมอนต์มอริลโลไนต์) ซึ่งเป็นดินอนินทรีย์ธรรมชาติที่มีชั้นของซิลิเกตเป็นองค์ประกอบทำให้มีความคงทนต่อความร้อนสูงและมีอยู่แถบ อ. ชัยบาดาล จ. ลพบุรี มาเป็นส่วนผสมของสารหน่วงไฟที่อาจต้านการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนได้ และมีการใช้เกลือแอมโมเนียมฟอสเฟตได้แก่ แอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($NH_4 \bullet H_2PO_4$) และ ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($(NH_4)_2HPO_4$) ซึ่งเป็นสารที่หาได้ง่าย ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มาใช้ร่วมกับสารประกอบไนโตรเจนที่ได้จากผงกาวไหมซึ่งสกัดได้จากรังไหมดิบเหลือใช้หรือจากน้ำทิ้งของกระบวนการลอกกาวไหมโดยคาดว่าสารดังกล่าวจะทำให้ผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนสามารถหน่วงไฟและต้านการหลอมหยดได้ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาภาวะและปริมาณที่เหมาะสมในการตกแต่งหน่วงไฟและต้านการหลอมหยดด้วยเบนโทไนต์ ผงกาวไหม และสารประกอบฟอสฟอรัสบนผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวน
2. ศึกษาสมบัติทางกายภาพ เคมี ความร้อน ความสามารถในการติดไฟ และต้านการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำดินเบนโทไนต์ ผงกาวไหม และสารประกอบฟอสฟอรัสมาใช้เป็นสารหน่วงไฟและสารต้านการหลอมหยดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมสำหรับผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวน

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 **พอลิเอสเทอร์** (Polyester) [1,2]

พอลิเอสเทอร์ เป็นเส้นใยประดิษฐ์ที่มีผู้ใช้มากที่สุดในกลุ่มเส้นใยประดิษฐ์ทั้งหลาย ทั้งนี้เนื่องจากมีสมบัติที่ดีหลายประการ นับได้ว่าไม่มีเส้นใยประดิษฐ์ชนิดไหนที่สามารถแข่งขันเพื่อการใช้งานกับพอลิเอสเทอร์ได้ด้วยสมบัติที่โดดเด่นทั้งในขณะแห้งและขณะเปียก และขณะเปียกจะมีความสามารถคืนตัวได้สูง ไม่ยับ ไม่หด ดูแลรักษาง่าย อีกทั้งสามารถใช้ผสมกับเส้นใยชนิดอื่นได้มากมาย ที่ประสบความสำเร็จคือการผสมกับผ้าฝ้าย ในสัดส่วนพอลิเอสเทอร์ : ฝ้าย ที่ 65 : 35 หรือที่เรียกกันว่าผ้า T/C และอีกชนิดหนึ่งคือ การผสมกับเส้นใยเรยอนเป็นผ้า T/R เป็นต้น สามารถนำพอลิเอสเทอร์ไปใช้งานต่างๆ ได้มากมายนับจากเสื้อผ้าสวมใส่เพื่อความสวยงาม เสื้อผ้าทำงาน เสื้อสูท กระโปรง ผ้าม่าน ผ้าตกแต่งเฟอร์นิเจอร์ เน็คไท ไปจนถึงพรม นับเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูง สามารถทำจีบถาวรด้วยความร้อน ทำเส้นด้ายเทกซ์เจอร์ ซักได้ด้วยเครื่องซัก และไม่ต้องรีดภายหลังการซัก

พอลิเอสเทอร์มีสมบัติที่ไม่เหมาะต่อการใช้ประโยชน์หลายประการ เช่น การเป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดี ดูดความชื้นต่ำ ทำให้สวมใส่ไม่สบายในอากาศร้อน และความชื้นสูง จะสะสมประจุไฟฟ้าสถิตในขณะอากาศเย็นและแห้ง ผู้ผลิตผ้าพอลิเอสเทอร์ได้แก้ข้อเสียโดยวิธีการต่างๆ เช่น ดัดแปลงรูปร่างเป็นรูปเหลี่ยมต่างๆ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของเส้นใยให้มากขึ้น เมื่อทำเป็นเส้นด้ายก็จะมีสมบัติซับความชื้นไว้ตามพื้นที่ผิวของเส้นใย และจะระเหยไปได้รวดเร็ว ทำให้มีการดูดซับความชื้นได้เรื่อยๆ นอกจากนี้การผลิตเส้นด้ายผสมระหว่างเส้นใยพอลิเอสเทอร์กับเส้นใยธรรมชาติก็เป็นวิธีที่ช่วยให้ผ้ามีสมบัติที่ดีมากขึ้น เช่น การผสมพอลิเอสเทอร์กับฝ้าย (polyester cotton blends) ทำให้ได้ผ้าที่มีลักษณะผิวเหมือนผ้าใยธรรมชาติมากขึ้น มีความอ่อนนุ่ม คงทน ไม่ยับง่าย และดูดซับความชื้นได้ดี ถ้าเป็นผ้าที่มีน้ำหนัก เนื้อหนาเหมาะกับที่จะใช้ตัดเป็นเสื้อผ้าชายหญิงสำหรับใช้เมื่ออากาศหนาว ถ้าเป็นผ้าบางเบาก็จะใช้กับอากาศตลอดปีได้

ผ้าพอลิเอสเทอร์ค่อนข้างกระด้าง ไม่อ่อนนุ่มเช่นผ้าที่ทำจากเส้นใยธรรมชาติ มีการทิ้งตัวไม่ดี ปัจจุบันผู้ผลิตพอลิเอสเทอร์ได้ใช้วิธีลดน้ำหนักผ้าพอลิเอสเทอร์ โดยแช่ในสารละลายโซดาไฟที่มีความเข้มข้นพอดี ในเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสม ทำให้ลดน้ำหนักผ้า 20-30% จะทำให้ผ้ามีคุณสมบัติเบาอ่อนนุ่ม ไม่แข็งกระด้าง ทิ้งตัวดี มีความเงางามเหมือนไหม (นันทยา ยานุเมศ. 2529 : 23)

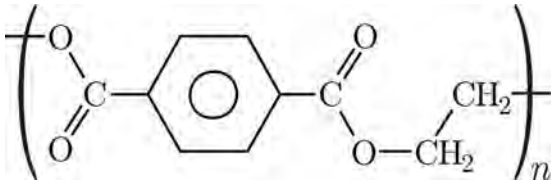
นอกจากนี้ผ้าพอลิเอสเทอร์เมื่อติดไฟแล้วจะเกิดการหลอมหยดนับเป็นอันตรายต่อชีวิต หากเกิดการหลอมติดผิวหนัง อีกทั้งสารที่หลอมละลายหยดลงมานั้นมีความร้อนสูงสามารถเป็นแหล่งต้นเพลิงทำให้เชื้อเพลิงบริเวณใกล้ๆ เกิดการลุกไหม้ได้อย่างรวดเร็วสร้างความเสียหายต่อทรัพย์สินของผู้บริโภค ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องพัฒนาผ้าพอลิเอสเทอร์ให้มีสมบัติหน่วงไฟรวมทั้งสามารถต้านการหลอมหยดได้เพื่อเพิ่มความปลอดภัยให้แก่ผู้บริโภค

2.1.1 สมบัติของเส้นใย

2.1.1.1 รูปร่างและโครงสร้างทางเคมี

เมื่อตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ ลักษณะตามความยาวจะเป็นเส้นตรงไม่บิดตัว ผิวเรียบอาจเห็นจุดเล็กๆ ของพิกเมนต์กระจายอยู่ทั่วไป ถ้าดูด้านภาคตัดขวางจะมีลักษณะหลายแบบ เช่น กลม สามเหลี่ยมมุมมน ห้าเหลี่ยมมุมมน หรือมีรูปร่างอื่นๆ ต่างกันไปแล้วแต่จุดประสงค์ของผู้ผลิต โดยทั่วไปมีสีเป็นสีขาวและมีความมันหลายระดับตั้งแต่สว่าง กึ่งทึบ และทึบ

พอลิเอสเทอร์เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากการเกาะเกี่ยวระหว่างสารอะโรมาติกที่เป็นกรดและสารแอลกอฮอล์ ด้วยพันธะของหมู่เอสเทอร์ และเนื่องจากในโมเลกุลมีโครงสร้างวงแหวนอยู่มาก ทำให้มีสมบัติไม่ชอบยึดจับน้ำ แต่ยึดจับสารไขมันได้ดี



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอสเทอร์ (PET)

2.1.1.2 สมบัติทางกายภาพ

ความแข็งแรง จัดได้ว่าเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรง และทนทานต่อการขัดถูดีไม่ว่าอยู่ในสภาพแห้งหรือสภาพเปียกก็ตาม พอลิเอสเทอร์ชนิด PET โดยทั่วไปมีความแข็งแรงกว่าชนิด PCDT การยืดดึงร้อนทำให้การเรียงตัวของโครงสร้างภายในที่เป็นผลึกมีความเป็นระเบียบมากขึ้น อันเป็นผลโดยตรงต่อการเพิ่มความแข็งแรงของเส้นใยให้สูงขึ้น ความทนแรงดึง ณ จุดขาดมีค่าอยู่ในช่วง 4.0-5.5 กรัมต่อดีเนียร์ สำหรับเส้นใยยาวชนิดทั่วไป แต่สูงขึ้นไปอยู่ในช่วง 6.3-9.5 กรัมต่อดีเนียร์ ในเส้นใยยาวชนิดความแข็งแรงสูง ในกรณีของเส้นใยสั้นมีค่า 2.5-5.5 กรัม

ต่อดีเนียร์ เส้นใยยาวชนิดความแข็งแรงสูงมักใช้ในงานพิเศษเฉพาะด้าน เช่น ทำเป็นผ้าใบยางรถยนต์ และผ้าใบในงานอุตสาหกรรม

สภาพยืดหยุ่น อยู่ระดับปานกลางไปจนถึงดี โดยทั่วไปพอลิเอสเทอร์เป็นเส้นใยที่ไม่มีสภาพยืดหยุ่น หรือการยืดตัวดีนัก โดยเฉพาะที่เปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงจะคืนกลับสภาพไม่ดี ในขณะที่ถ้ามีการยืดตัวเพียงเล็กน้อยจะสามารถคืนตัวกลับได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับไนลอน

การคืนตัวจากแรงอัด อยู่ในระดับดีถึงดีมากทนทานต่อการยับทั้งในสภาพแห้งและเปียก นับเป็นสมบัติเด่นที่เหมาะกับการนำเส้นใยพอลิเอสเทอร์ไปใช้บรรจุภายในผลิตภัณฑ์หมอนและผ้าห่มที่ต้องการรับน้ำหนักโดยไม่เสียรูปทรง หรือสามารถคืนตัวกลับอยู่ในสภาพเดิมได้ดีภายหลังการใช้งาน

ความสามารถในการดูดซึมความชื้นค่อนข้างต่ำมากโดยมีความสามารถในการดูดซึมความชื้นอยู่ระหว่าง 0.4-0.8% เท่านั้นเอง ส่งผลในเชิงบวกต่อผลิตภัณฑ์ในลักษณะที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่แห้งเร็ว เหมาะกับการใช้งานที่ไม่ต้องการให้น้ำเกาะซึมได้มาก และจับคราบต่างๆ ได้ยาก โดยเฉพาะคราบที่มากับน้ำสามารถกำจัดออกได้ง่ายเพียงเช็ดออกเท่านั้นเอง แต่ก็มีผลในเชิงลบเช่นเดียวกัน คือ ทำให้การนำมาใช้งานทำเป็นเสื้อผ้าแล้วมีความรู้สึกไม่สบายตัว อึดอัด เนื่องจากความชื้นจากเหงื่อ มีปัญหาการสะสมประจุไฟฟ้าและมีการจับเกาะของคราบที่มากับน้ำมันได้ง่าย ปัญหาของจุดอ่อนนี้มักแก้ด้วยการผสมกับเส้นใยชนิดอื่น เช่น ฝ้าย

ผลจากความร้อนขึ้นกับชนิดของพอลิเอสเทอร์ ซึ่งเริ่มเกิดการเหนียว หรืออ่อนตัวลงที่อุณหภูมิ 227-242 องศาเซลเซียส ดังนั้นหากต้องการรีดต้องใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าระดับนี้เสมอ ที่อุณหภูมิสูงขึ้นในช่วง 249-290 องศาเซลเซียส พอลิเอสเทอร์จะหลอมตัวและติดไฟแต่ดับเองได้ ด้วยความที่พอลิเอสเทอร์เป็นวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกชนิดหนึ่ง ดังนั้นจึงสามารถทำให้อยู่ตัวด้วยความร้อนได้ ทำจีบถาวรในเสื้อผ้าได้รูปทรงที่สวยงามและทนทาน

การติดไฟ เมื่อพอลิเอสเทอร์ติดไฟจะเกิดการลุกติดไฟช้าๆ หดหนีเปลวไฟ หลอมตัวเป็นของเหลวหนืด และหยดจากเปลวไฟ เมื่อเย็นตัวจะเป็นก้อนแข็งสีดำ เมื่อเผาไหม้มีกลิ่นคล้ายน้ำมันเบนซิน และมีเขม่าดำ

ความถ่วงจำเพาะ แล้วแต่ชนิดของพอลิเอสเทอร์ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1.22-1.38

2.1.1.3 สมบัติทางเคมี

กรดและด่าง โดยทั่วไปทนต่อสารเคมีทั้งกรดและด่างได้ แต่ในภาวะที่อุณหภูมิสูงขึ้นความทนทานจะลดลง เช่น กับกรดกำมะถันที่อุณหภูมิสูงเส้นใยเสื่อมสภาพลงได้ เหงื่อไม่มีผลต่อเส้นใย นอกจากนั้นแล้วพอลิเอสเทอร์ยังสามารถซักแห้งได้เช่นกัน

สารทำละลายอินทรีย์ ทนต่อสารอินทรีย์บางชนิด เช่น แอลกอฮอล์ คีโตน และสารทำละลายซักแห้ง แต่ละลายได้ในเมตาครีซอลที่ร้อน กรดไตรฟลูออโรอะซิติก ฟีนอล ออโธคลอโรฟีนอล

สารซักฟอก สามารถใช้สารซักฟอกทั้งชนิดออกซิไดส์และชนิดรีดิวส์ที่มีจำหน่ายในตลาดได้ทุกชนิด โดยไม่มีผลเสียแต่อย่างใด

ราและแมลง พอลิเอสเทอร์ทนทานต่อราและแมลงได้อย่างดี หากมีปัญหาบ้างก็เนื่องมาจากสารที่ใช้ทำการตกแต่งสำเร็จมากกว่าตัวเส้นใยเอง

แสงแดด ภายใต้ภาวะปกติพอลิเอสเทอร์ทนต่อแสงแดดได้ดี แต่ถ้าถูกแสงโดยตรงเป็นเวลานานๆ เส้นใยอาจมีสมบัติเสื่อมลงได้ ในกรณีที่รับแสงผ่านกระจก เช่น หน้าต่าง ประตู ความสามารถในการทนต่อแสงจะยืดยาวออกไป ดังนั้นจึงนิยมนำพอลิเอสเทอร์ทำเป็นผ้าม่านภายในบ้าน

การย้อมสี ที่เหมาะสมกับพอลิเอสเทอร์ คือ สีประเภทดิสเพิร์สที่อุณหภูมิค่อนข้างสูง นอกจากนั้นก็มีความพยายามในการดัดแปรเพื่อให้พอลิเอสเทอร์สามารถรับสีประเภทเบสิกได้

2.2 **ผ้านอนวูฟเวน** (nonwovens) [3,4]

ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ การสร้างผืนผ้าเป็นการนำเส้นด้าย 2 ชุด มาผ่านกระบวนการถักทอจนเกิดเป็นผืนผ้า แต่ยังมีการผลิตผ้าอีกชนิดหนึ่งที่ไม่ต้องผ่านกระบวนการถักทอ และสามารถเกิดเป็นผืนผ้าได้ นั่นก็คือ ผ้านอนวูฟเวน

ผ้านอนวูฟเวนมีลักษณะโครงสร้างเป็นแผ่นผ้าที่เกิดจากการสานไปมาของเส้นใย (fibrous web) มีการยึดกันด้วยการที่เส้นใยพันกันไปมา (mechanical entanglement) หรือโดยการใช้ความร้อน เรซิน หรือสารเคมีในการทำให้ เกิดการยึดกันระหว่างเส้นใย ในปัจจุบันผ้านอนวูฟเวนมีความสำคัญและมีความต้องการสูงในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เนื่องจากสามารถปรับแต่งสมบัติของผ้าได้จากสมบัติที่แตกต่างกันของวัตถุดิบ และมีการใช้เทคโนโลยีแบบต่างๆ ให้เหมาะกับการนำมาใช้ประโยชน์ ผลิตภัณฑ์ผ้านอนวูฟเวนสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท คือ

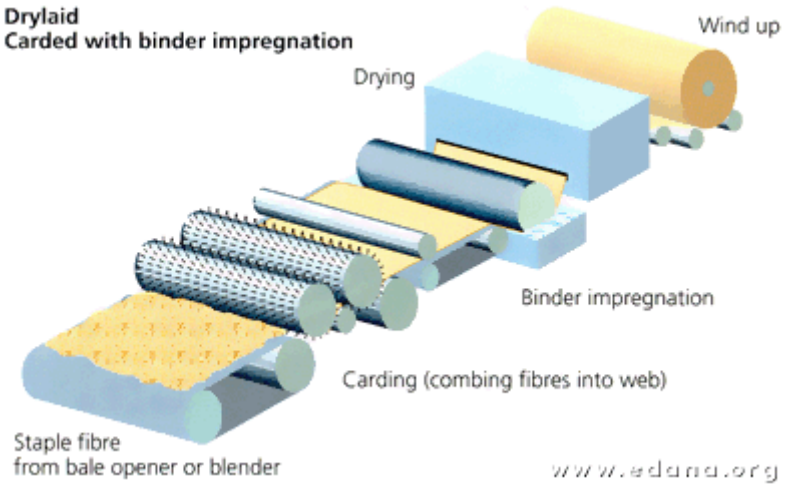
(1) ผลิตภัณฑ์ที่ใช้แล้วทิ้ง (disposable uses) ผลิตภัณฑ์ชนิดนี้การใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่จะเน้นทางด้านสุขอนามัย เช่น ผ้าอ้อมเด็ก ผ้าอนามัย ชุดสำหรับศัลยแพทย์ เครื่องนุ่งห่มซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ชุดชั้นในที่ใช้ในการเดินทาง

(2) ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ได้ทนนาน (durable applications) ผลิตภัณฑ์ชนิดนี้จะเน้นทางด้านเครื่องนุ่งห่ม เคหะสิ่งทอ และด้านสิ่งทอโยธา ได้แก่ ผ้าซับในปกเสื้อ ผ้าตกแต่งเครื่องเรือน ผ้าเคลือบผ้าอัดสำหรับรถยนต์

โดยทั่วไปผ้านอนวูฟเวนที่ใช้มักผลิตจากเส้นใยพอลิพรอพิลีน และเส้นใยพอลิเอสเทอร์ เมื่อเกิดอัคคีภัยแล้วเส้นใยดังกล่าวจะติดไฟแล้วเกิดการหลอมหยดซึ่งเป็นอันตรายต่อชีวิตหากเกิดการหลอมติดผิวหนัง อีกทั้งสารที่หลอมละลายหยดลงมานั้นหากมีความร้อนสูงสามารถเป็นแหล่งต้นเพลิงทำให้เชื้อเพลิงบริเวณใกล้ๆ เกิดการลุกไหม้ได้อย่างรวดเร็วสร้างความเสียหายต่อทรัพย์สินได้

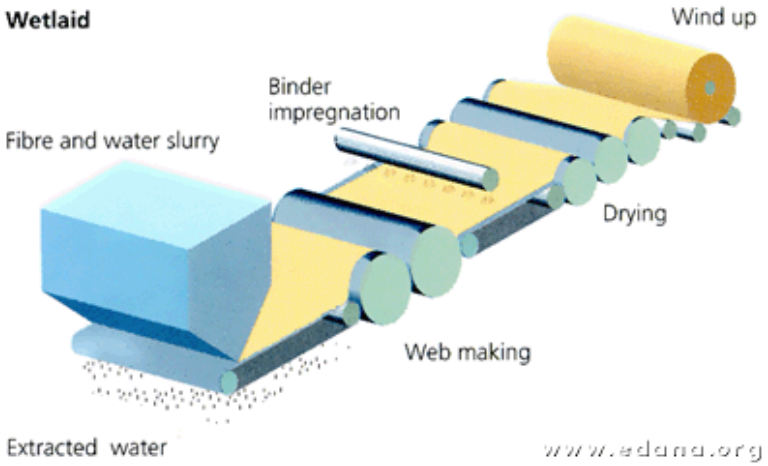
ผ้านอนวูฟเวนสามารถผลิตได้โดยหลายกระบวนการผลิต คือ

Dry-laid เป็นกระบวนการที่ใช้ลมพ่นเส้นใยลงบนสายพานที่กำลังเคลื่อนตัวไป โดยการเรียงตัวของเส้นใยจะไม่มีทิศทาง (random oriented) ทำให้มีความแข็งแรงเท่ากันในทุกทิศทาง ตัวอย่างผ้าที่ได้จากการผลิตโดยกระบวนการนี้ได้แก่ ผ้าเช็ดเอนกประสงค์ กระดาษแยกช่องแบตเตอรี่ (battery separators) ไส้กรอง (filters)



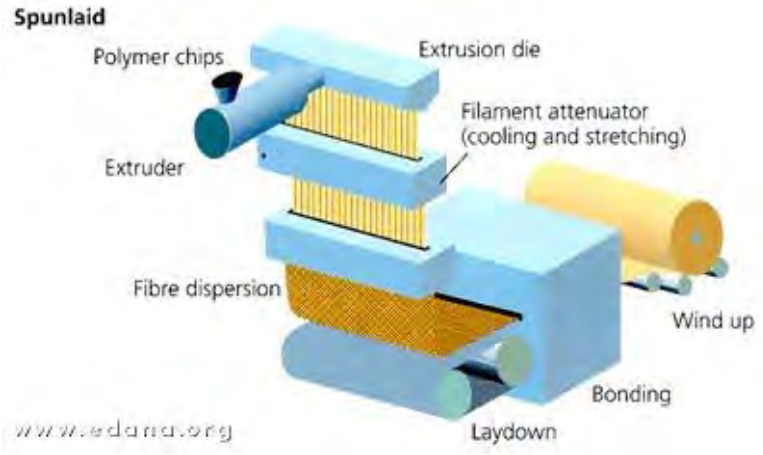
รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตผ้านอนวูฟเวนแบบ dry-laid [5]

Wet-laid เป็นกระบวนการที่กระจายเส้นใยสั้นในน้ำ แล้วทำการกรองผ่านเพื่อแยกน้ำออกจากเส้นใย ที่มีการเรียงตัวในทุกทิศทาง ตัวอย่างผ้าที่ได้จากการผลิตโดยกระบวนการนี้ได้แก่ ไส้กรอง ไส้ฉนวน ผ้าเช็ดเอนกประสงค์ และกระดาษแยกช่องแบตเตอรี่



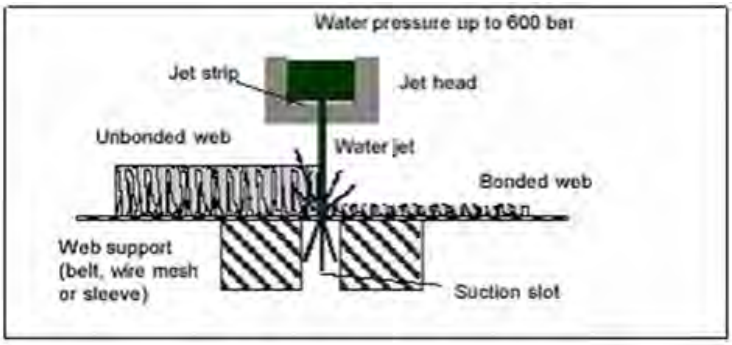
รูปที่ 2.3 กระบวนการผลิตผ้านอนวูฟเวนแบบ wet-laid [5]

Spun-bonded เป็นการเตรียมผ้าโดยตรงจากเส้นใยที่ถูกฉีดออกมาจากหัวฉีดเส้นใย (spinnerets) เส้นใยต่อเนื่อง (continuous filament) ที่กำลังร้อนก็จะถูกฉีดสานไปมาบนสายพานที่กำลังหมุนอยู่ เส้นใย ที่เย็นตัวลงจะมีการเชื่อมติดตรงจุดที่มีการพาดผ่านระหว่างเส้นใยด้วยกัน การเชื่อมติดอาจทำเพิ่มเติม โดยการใช้ความร้อนและแรงกด นอนวูฟเวนที่ได้จากการผลิตโดยวิธีนี้จะมีค่าการทนต่อแรงดึงและแรงฉีก และบาง (low bulk) ตัวอย่างการใช้งานได้แก่ พื้นพรม (carpet backing) ผ้าที่ใช้ในงานธรณี (geotextiles) เสื้อผ้าป้องกัน (protective apparel) ไส้กรอง



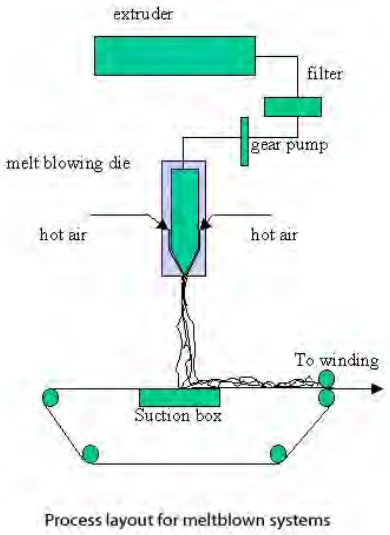
รูปที่ 2.4 กระบวนการผลิตผ้านอนวูฟเวนแบบ spun-bonded [5]

Hydroentangled หรือ spunlace เป็นกระบวนการผลิตที่คล้ายกับการผลิตนอนวูฟเวนแบบ spun-bond ยกเว้นใช้น้ำแรงดันสูงฉีดผ่านโครงสร้างที่สานไปมาของเส้นใย ทำให้เกิดโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายผ้าทอ ผ้าที่ได้จะมีความยืดหยุ่น (elasticity) และโค้งงอ (flexibility) มากกว่า spun bond



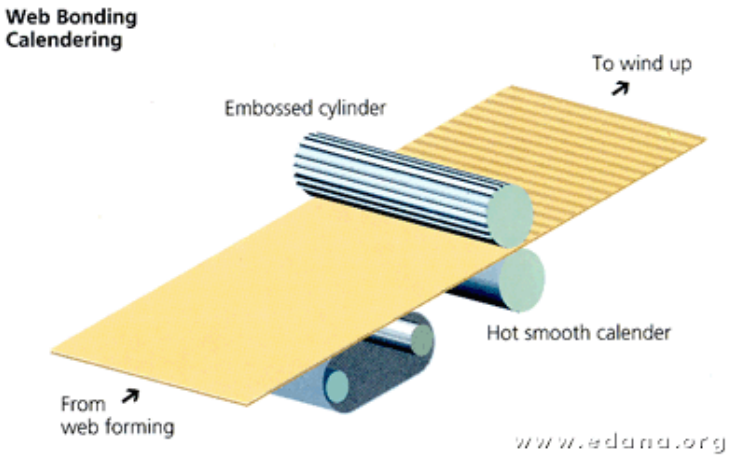
รูปที่ 2.5 กระบวนการผลิตผ้านอนวูฟเวนแบบ hydroentangled หรือ spunlace [6]

Melt-blown เป็นกระบวนการที่ฉีดเส้นใยผ่านหัวฉีดไปยังอากาศร้อนที่มีความเร็วสูง ทำให้เส้นใยเป็นเส้นใยสั้นๆ ซึ่งจะถูกเก็บลงบนสายพานที่เคลื่อนที่ การยึดติดเกิดจากการสานไปมาของเส้นใย และการใช้ความร้อน เนื่องจากเส้นใยไม่ได้ผ่านการดึงยืดก่อน ผ้าที่ได้จะมีความแข็งแรงน้อยกว่าชนิดอื่น เส้นใยที่ใช้เทคนิคการผลิตนี้มากคือเส้นใยโอเลฟินและพอลิเอสเทอร์ (olefin and polyester fibers) ตัวอย่างการใช้งานได้แก่ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ทางการแพทย์ และกระดาษแยกช่องแบตเตอรี่



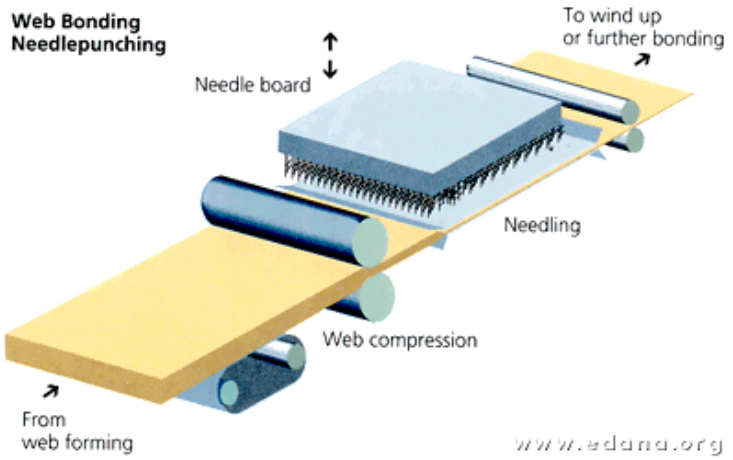
รูปที่ 2.6 กระบวนการผลิตผ้านอนวูฟเวนแบบ melt-blown [7]

Thermal bonding เป็นกระบวนการที่ทำให้เส้นใยติดกันโดยใช้ความร้อน วิธีนี้ใช้กับสารประกอบ พอลิเมอร์ที่ไม่ทนความร้อน เนื่องจากเมื่อถูกความร้อนแล้ว เกิดการอ่อนตัวละลายได้ ซึ่งการให้ความร้อนจะทำให้แผ่นเส้นใยเกิดการหลอมรวมตัวกันและยึดติดกันเป็นผืนผ้าเมื่อเย็นตัวลง



รูปที่ 2.7 กระบวนการผลิตผ้านอนวูฟเวนแบบ thermal bonding [5]

Needle punching เป็นกระบวนการเตรียมแผ่นนอนวูฟเวนโดยเทคนิค dry-laid แล้วนำมาผ่าน เครื่องปักเข็ม (needle loom) เพื่อช่วยเพิ่มการยึดเกาะและความแข็งแรงของแผ่นนอนวูฟเวนให้มากขึ้น



รูปที่ 2.8 กระบวนการผลิตผ้านอนวูฟเวนแบบ needle punching [5]

2.3 การตกแต่งหน่วงไฟผ้าพอลิเอสเทอร์ [8]

ผ้ามีสมบัติการทนไฟต่างกัน 3 ระดับ คือ ผ้าที่ทนไฟแบบกันไฟ (fire proof fabric) จะไม่ลุกไหม้และไม่เสียหาย ซึ่งได้แก่ผ้าใยหิน ผ้าที่มีสมบัติทนไฟแบบต้านไฟ (flame resistant fabric) จะสามารถทนหรือไม่เกิดการลุกไหม้เมื่อได้รับความร้อนสูงถึง 600 องศาเซลเซียส โดยจะยังคงรูปร่างอยู่ เช่น ผ้าที่ทำจากเส้นใยนอเมกซ์ และเคฟลาร์ ส่วนผ้าที่มีสมบัติต้านการลุกไหม้แบบหน่วงไฟ (flame retardant fabric) จะมีการลุกติดไฟที่อุณหภูมิต่ำกว่าปกติ และเกิดในระยะสั้นๆ หรือคุแดงโดยไม่มีเปลวไฟ เมื่อไม่มีการลุกไหม้ที่อุณหภูมิสูงก็จะไม่เกิดความร้อนที่จะทำให้เกิดการสลายตัวแล้วลุกไหม้ต่อไป ซึ่งผ้าที่มีสมบัติต้านการลุกไหม้แบบหน่วงไฟนี้ทำได้โดยการตกแต่งผ้านั้นด้วยสารเคมีชนิดต่างๆ

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบสมบัติด้านความคงทนต่อความร้อนของเส้นใยชนิดต่างๆ [8]

ชนิดของเส้นใย	อุณหภูมิสลายตัว (T_p, ^{O}ซ)	อุณหภูมิเผาไหม้ (T_c, ^{O}ซ)	LOI (%)
ฝ้าย	350	350	18.4
ไตรอะซิเตต	305	540	18.4
วิสโคสเรยอน	350	420	18.9
พอลิเอสเทอร์	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 เห็นได้ว่าฝ้ายซึ่งเป็นเส้นใยที่มีการนำมาทอเป็นผืนผ้าและมีปริมาณการใช้มากที่สุดเนื่องจากมีความสบายเมื่อสวมใส่จะมีอุณหภูมิในการสลายตัวและเผาไหม้ต่ำกว่าเส้นใยชนิดอื่นๆ และยังมีค่า LOI ต่ำเพียง 18.4 เท่านั้นจึงสามารถติดไฟได้ง่ายกว่าเส้นใยชนิดอื่น ดังนั้นฝ้ายจึงเป็นเส้นใยที่มีการนำมาตกแต่งหน่วงไฟมากที่สุด เช่นเดียวกับเส้นใยพอลิเอสเทอร์ ซึ่งมีค่า LOI เพียง 20-21 เท่านั้น เมื่อผ้าพอลิเอสเทอร์สัมผัสไฟจะหดหนีเปลวไฟ ความร้อนที่ได้รับจากเปลวไฟก็จะทำให้ผ้าพอลิเอสเทอร์เริ่มอ่อนตัวลงที่อุณหภูมิ 227-242 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิสูงขึ้นในช่วง 249-290 องศาเซลเซียส พอลิเอสเทอร์จะหลอมและติดไฟแต่ดับเองได้ แต่สิ่งที่หลอมหยดลงมานั้นมีความร้อนสูงสามารถเป็นแหล่งต้นเพลิงทำให้เชื้อเพลิงบริเวณใกล้ๆ เกิดการลุกไหม้ได้ จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องปรับปรุงสมบัติทางด้านการหน่วงไฟสำหรับผ้าพอลิเอสเทอร์ อย่างไรก็ตามก่อนที่จะตกแต่งหน่วงไฟผ้าพอลิเอสเทอร์ให้มีประสิทธิภาพจำเป็นต้องเข้าใจปัจจัยและกลไกที่ทำให้เกิดเพลิงไหม้ก่อน

2.3.1 ปัจจัยที่ทำให้เกิดเพลิงไหม้

โดยทั่วไปเกิดจาก 4 ปัจจัย ดังต่อไปนี้

2.3.1.1 เชื้อเพลิง

สิ่งที่สามารถทำให้เกิดการลุกติดไฟได้ มีทั้งของแข็ง ได้แก่ เสื้อผ้า กระดาษ พลาสติก ของเหลว ได้แก่ แอลกอฮอล์ และแก๊ส ได้แก่ มีเทน อะเซทิลีน

2.3.1.2 ความร้อน

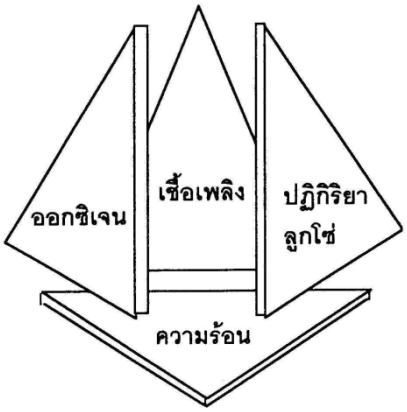
สิ่งที่จะทำให้เชื้อเพลิงมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงจุดติดไฟ (ignition point) ซึ่งเชื้อเพลิงแต่ละชนิดก็จะมีจุดติดไฟแตกต่างกัน เช่น เชื้อเพลิงที่อยู่ในรูปแก๊สมักมีจุดติดไฟที่ต่ำกว่าเชื้อเพลิงที่อยู่ในรูปของแข็ง

2.3.1.3 ออกซิเจน

เป็นแก๊สที่ช่วยทำให้การเผาไหม้เกิดง่ายขึ้น

2.3.1.4 ปฏิกิริยาลูกโซ่

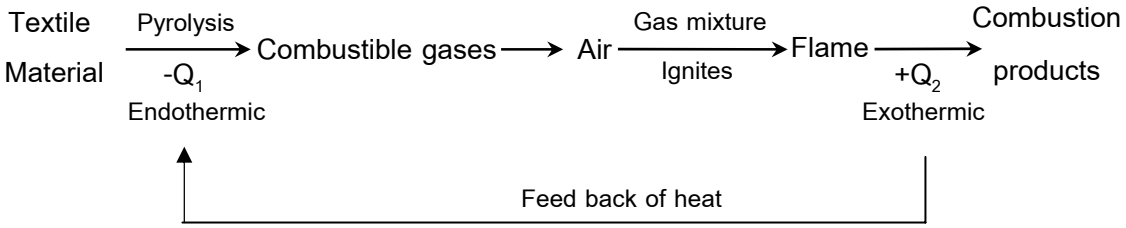
เป็นปฏิกิริยาที่ช่วยขยายผลของการลุกไหม้ให้มีขนาดใหญ่และต่อเนื่อง



รูปที่ 2.9 ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ [9]

2.3.2 **วงจรการลุกไหม้ของวัสดุสิ่งทอ** [10]

การที่เราจะสามารถหน่วงหรือต้านการติดไฟหรือการลุกไหม้ของวัสดุสิ่งทอได้นั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องเข้าใจวงจรการลุกไหม้ของวัสดุสิ่งทอเป็นอย่างดี วงจรการลุกไหม้ของวัสดุสิ่งทอแสดงในรูปที่ 2.10 ดังนี้



รูปที่ 2.10 วงจรการลุกไหม้ของวัสดุสิ่งทอ

จากรูปที่ 2.10 วัสดุสิ่งทอจะสลายตัวเป็นไอหรือแก๊สที่ติดไฟง่าย (flammable volatiles or flammable gases) เมื่อได้รับความร้อน เรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการ pyrolysis ซึ่งเป็นกระบวนการดูดความร้อน (endothermic reaction, - Q_1) ไอหรือแก๊สที่ติดไฟได้ดังกล่าวเมื่อผสมกับออกซิเจนในสัดส่วนที่เหมาะสมจะเกิดการลุกติดไฟเกิดการเผาไหม้ซึ่งเป็นกระบวนการคายความร้อน (exothermic reaction, + Q_2) และความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะถูกนำกลับไปทำให้วัสดุสิ่งทอร้อนและเกิดการสลายตัวให้ไอหรือแก๊สที่ติดไฟง่ายต่อไป ทำให้การเผาไหม้ดำเนินต่อไปเป็นวงจรเช่นเดิมอีก

2.3.2 ประเภทของสารหน่วงไฟ

สารหน่วงไฟมีมากมายหลายประเภท ซึ่งการจำแนกประเภทของสารหน่วงไฟนี้ช่วยให้เข้าใจความสามารถในการทำงานของสารหน่วงไฟ ทำให้สามารถเลือกใช้สารหน่วงไฟได้ตรงกับวัตถุประสงค์ที่ต้องการ ซึ่งสารหน่วงไฟสามารถจำแนกได้จากความคงทน จากวิธีการที่ใช้ร่วมกับวัสดุ จากกลไกการหน่วงไฟ และจากองค์ประกอบทางเคมี ดังต่อไปนี้

2.3.2.1 สารหน่วงไฟที่จำแนกได้จากความคงทน

(1) สารหน่วงไฟประเภทไม่คงทน (nondurable flame retardants) สารหน่วงไฟประเภทนี้ได้แก่ กรดอนินทรีย์ ซึ่งไม่คงทนต่อการซักล้าง สามารถถูกชะล้างออกไปได้ด้วยน้ำ เหงื่อ ตัวอย่างของกรดอนินทรีย์ เช่น กรดบอริก กรดฟอสฟอริก และซิงค์คลอไรด์ หรือเบส เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมคาร์บอเนต แต่เนื่องจากกรดและเบสทำให้เกิดปัญหาการกัดกร่อน ดังนั้นจึงนิยมใช้ในรูปที่เป็นเกลือมากกว่า เช่น แอมโมเนียมฟอสเฟต ไดแอมโมเนียม-ฟอสเฟต ยูเรียฟอสเฟต และแอมโมเนียมซัลฟาเมต ซึ่งรู้จักภายใต้ชื่อทางการค้าของ Amgard CD (แอมโมเนียมฟอสเฟต และแอมโมเนียมโบรไมด์) และ Amgard TR (แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต) ซึ่งเกลือเหล่านี้เมื่อได้รับความร้อนจะสลายตัวเป็นแก๊สแอมโมเนีย กรดฟอสฟอริก หรือกรดพอลิฟอสฟอริก เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกรดฟอสฟอริกจะขจัดน้ำออกกลายเป็นกรดเมตะไพโร-ฟอสฟอริกที่มีลักษณะเป็นของเหลวหนืด ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อากาศหรือออกซิเจนสัมผัสกับเส้นใย ทำให้เส้นใยไม่เกิดการเผาไหม้ รวมทั้งยังทำหน้าที่เป็นกรดลิวอิส (lewis acid) ที่ทำให้เส้นใยสลายตัวเกิดชาร์เพิ่มขึ้น สารหน่วงไฟประเภทนี้เหมาะที่จะใช้ตกแต่งผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องผ่านการซักล้าง เช่น ผ้าประเภทใช้แล้วทิ้ง ฉนวน กระดาษ จอภาพยนตร์แผ่นกั้นผนัง และบรรจุภัณฑ์

(2) สารหน่วงไฟประเภทกึ่งคงทน (semidurable flame retardants) สารหน่วงไฟประเภทนี้ ได้แก่ เกลือของกรดอนินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ เช่น เกลือฟอสเฟตหรือเกลือบอเรตของโลหะดีบุก สังกะสี อะลูมินัม หรือแสตนเนต ทังเสตต อะลูมิเนต รวมทั้งเกลือไอออนของพอลิฟอสเฟตน้ำหนักโมเลกุลสูง เมื่อทำการยึดติดสารเหล่านี้ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดการฟอสฟอริเลชันของเซลลูโลส ซึ่งในกระบวนการตกแต่งจะแช่ผ้าให้อิ่มตัวในสารละลายอ่างแรกที่เป็นเกลือของสารหน่วงไฟ และนำไปทำให้ตกตะกอนในสารละลายอ่างที่สอง สารหน่วงไฟประเภทนี้มีความคงทนต่อการซักล้าง 20 ครั้ง ดังนั้นจึงเหมาะที่จะใช้ตกแต่งผลิตภัณฑ์ที่ไม่จำเป็นต้องผ่านการซักล้างบ่อย เช่น ผลิตภัณฑ์ผ้าฟูก เคหะสิ่งทอ เบาะหุ้มเฟอร์นิเจอร์ และพรม

(3) สารหน่วงไฟประเภทมีความคงทนสูง (durable flame retardants) สารหน่วงไฟประเภทนี้ มีฟอสฟอรัสหรือฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ หรือเป็นสารประกอบประเภทออร์แกโนฟอสฟอรัส (organophosphorus compounds) ซึ่งรู้จักกันดี คือ เอ็นไฮดรอกซีเมทิล (ไดเมทิลฟอสฟอโน) โพรพิโนเอไมด์ เช่น Pyrovatex CP และเททราคิส (ไฮดรอกซีเมทิล)ฟอสฟอ-เนียมคลอไรด์ (THPC) เช่น Proban CC สารหน่วงไฟประเภทนี้มีความคงทนต่อการซักล้าง 50 ครั้งหรือมากกว่า ดังนั้นจึงเหมาะที่จะใช้ตกแต่งผลิตภัณฑ์ที่จำเป็นต้องผ่านการซักล้างบ่อย เช่น ผลิตภัณฑ์เสื้อผ้า [11]

2.3.2.2 สารหน่วงไฟที่จำแนกได้จากวิธีการที่ใช้ร่วมกับวัสดุ

(1) สารหน่วงไฟเชิงเติม (additive flame retardants) สารหน่วงไฟชนิดนี้เป็นลักษณะของสารเติมแต่ง (additives) โดยสารหน่วงไฟจะเคลือบอยู่บนบริเวณผิวหน้าวัสดุ ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีต่อกัน ตัวอย่างเช่น เกลืออนินทรีย์ เช่น โซเดียมคลอไรด์ แคลเซียมคลอไรด์ แอนติโมนีคลอไรด์ โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ซิงค์คลอไรด์ แอมโมเนียมคลอไรด์ แอมโมเนียมคาร์บอเนต แอมโมเนียมฟอสเฟต ซึ่งโดยปกติแล้วเกลืออนินทรีย์เหล่านี้จะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำ และช่วยเพิ่มชาร์จากการเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการดีไฮเดรชันแต่สารหน่วงไฟเชิงเติมนี้มีข้อเสียคือ สามารถเกิดการระเหยหรือแยกตัวออกจากวัสดุได้ง่ายกว่าสารหน่วงไฟเชิงปฏิกิริยา เมื่อเวลาผ่านไปสมบัติการหน่วงไฟจะค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ อาจแก้ปัญหาได้โดยการใช้สารหน่วงไฟที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ขึ้น

(2) สารหน่วงไฟเชิงปฏิกิริยา (reactive flame retardants) สารหน่วงไฟชนิดนี้จะทำปฏิกิริยากับวัสดุที่ต้องการตกแต่งหน่วงไฟ โดยนำสารหน่วงไฟมาทำปฏิกิริยากับเซลลูโลส เพื่อให้เซลลูโลสมีหมู่ฟังก์ชันที่ทำหน้าที่หน่วงการติดไฟบนสายโซ่โมเลกุลโดยตรง ซึ่งการทำปฏิกิริยาของเซลลูโลสกับสารเคมีชนิดต่างๆ จะทำให้ขนาดของสายโซ่โมเลกุลและหมู่ไฮดรอกซิลที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ตำแหน่งที่ 3 และตำแหน่งที่ 6 ของหน่วยซ้ำของกลูโคไพราโนส เกิดการแตกของพันธะไฮโดรเจนระหว่างไฮดรอกซิลเซลลูโลสออกแล้วเกิดปฏิกิริยากับอะลิฟาติกไฮดรอกซิล ซึ่งทำได้โดยทำการเอสเทอริฟายด้วยสารเคมีที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับเซลลูโลสได้ซึ่งจะให้อนุพันธ์ของเซลลูโลส ตัวอย่างการเกิดเอสเทอริฟิเคชัน เช่น การไนเตรชัน อะซิทิลเลชัน ฟอสฟอริเลชัน และซัลเฟชัน สารหน่วงไฟเชิงปฏิกิริยานี้จะทำให้วัสดุมีสมบัติหน่วงไฟที่คงทนเกิดการระเหย หรือแยกตัวออกจากวัสดุได้ยากแต่จะมีต้นทุนสูงในส่วนของราคาสารหน่วงไฟ และเครื่องมือเพิ่มเติมที่ต้องใช้ในกระบวนการเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาดังกล่าว

ตัวอย่างสารหน่วงไฟเชิงปฏิกิริยาประเภทมีความคงทนสูง ได้แก่ Pyrovatex, Proban (THPC และยูเรีย) [11]

2.3.2.3 สารหน่วงไฟที่จำแนกจากกลไกการหน่วงไฟ

การทำงานของสารหน่วงไฟจะไปขัดขวางวงจรของการเผาไหม้ไม่ให้ดำเนินต่อไปได้อย่างต่อเนื่อง เพื่อทำให้เปลวไฟลุกลามช้าลงแล้วดับในที่สุด สามารถจำแนกสารหน่วงไฟได้จากกลไกการหน่วงไฟ ดังนี้

(1) การขัดขวางทางกายภาพประกอบด้วย

- การทำให้ระบบเย็นตัวลง เนื่องจากการสลายตัวของสารหน่วงไฟเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ซึ่งใช้ความร้อนบางส่วนไปทำให้เกิดการหลอมหรือระเหิด ทำให้พลังงานที่ถูกปล่อยออกมาจากปฏิกิริยาการเผาไหม้มีค่าลดลง เส้นใยได้รับความร้อนน้อยลง ระบบจึงมีพลังงานไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้แบบสายโซ่ได้ หรือสารหน่วงไฟสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดน้ำระเหยออกมา ทำให้พื้นผิววัสดุเย็นลง ตัวอย่างของสารหน่วงไฟในกลุ่มนี้ เช่น อะลูมินาไตรไฮเดรต แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

- การทำให้เกิดชั้นเคลือบบนพื้นผิววัสดุ สารหน่วงไฟในกลุ่มนี้รวมถึงเกลืออนินทรีย์ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เมื่อเส้นใยได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิการเผาไหม้จะทำให้สารหน่วงไฟเกิดการหลอมละลายมาปกคลุมบริเวณผิวหน้าของเส้นใย ซึ่งจะช่วยป้องกันไม่ให้แก๊สออกซิเจนมาสัมผัสกับเส้นใย และกักขังไอระเหยที่สามารถลุกติดไฟที่เกิดจากการสลายตัวของเส้นใยไปสู่ผิวหน้าของเส้นใย ทำให้เส้นใยไม่เกิดการเผาไหม้ นอกจากนี้ยังช่วยลดการถ่ายเทความร้อนจากจุดที่เกิดการติดไฟไปยังจุดอื่นๆ ทำให้เปลวไฟไม่เกิดการลุกลามต่อ ซึ่งการเคลือบของสารบนผิวหน้าเส้นใยนี้จะต้องเสถียรจนถึงอุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส ตัวอย่างของสารหน่วงไฟในกลุ่มนี้ เช่น บอริก-บอแรกซ์ ซิลิเกต ฟอสเฟต และพอลิฟอสเฟต

- การปลดปล่อยแก๊สที่ไม่ติดไฟ สารหน่วงไฟในกลุ่มนี้เมื่อติดไฟแล้วจะสลายตัวให้แก๊สที่ติดไฟยากหรือไม่ติดไฟ เช่น แก๊สไนโตรเจน แก๊สแอมโมเนีย แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แก๊สไฮโดรเจนคลอไรด์ และไอน้ำ เป็นต้น จะทำให้แก๊สไฮโดรคาร์บอนที่เกิดจากการสลายตัวของเส้นใยซึ่งเป็นแก๊สที่ติดไฟได้ง่ายเจือจางลงจนมีความเข้มข้นต่ำกว่าจุดที่ติดไฟได้ และทำให้ปริมาณออกซิเจนภายในเส้นใยลดลง เส้นใยไม่สามารถเกิดการเผาไหม้ต่อไปได้ ตัวอย่างของสารหน่วงไฟในกลุ่มนี้ เช่น โซเดียมคาร์บอเนต

โซเดียมไบคาร์บอเนต แอมโมเนียมเฮไลด์ ซิงค์คลอไรด์ แคลเซียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต อะลูมิเนียมซัลเฟต แอมโมเนียมซัลฟาเมต และฟอสเฟต

(2) การขัดขวางทางเคมี ประกอบด้วย

- วัฏภาคแก๊ส (gas phase หรือ vapor phase) สารหน่วงไฟในกลุ่มนี้เมื่อโดนความร้อนจะเกิดอนุมูลอิสระที่สามารถไปจับกับอนุมูลอิสระที่เกิดจากการเผาไหม้ของเส้นใยได้ เช่น $H^{\bullet}$ และ $HO^{\bullet}$ กลายเป็นแก๊สซึ่งทำให้ปฏิกิริยาการขยายต่อของสายโซ่อนุมูลอิสระสิ้นสุดลง (free radical chain propagation) การลุกไหม้ก็จะสิ้นสุดลง ตัวอย่างของสารหน่วงไฟในกลุ่มนี้ เช่น สารประกอบฮาโลเจน และการทำงานของสารหน่วงไฟที่เป็นสารประกอบฮาโลเจนและแอนติโมนีออกไซด์

- วัฏภาคของแข็ง (solid phase หรือ condensed phase) สารหน่วงไฟในกลุ่มนี้ทำหน้าที่เร่งให้เส้นใยเกิดการสลายตัวเร็วขึ้นเป็นแก๊สที่ไม่ติดไฟหรือชาร์ เพื่อให้ส่วนที่มีการลุกติดไฟกับส่วนที่ยังไม่ลุกติดไฟแยกห่างออกจากกันมากขึ้น และในที่สุดไฟก็ไม่สามารถลุกลามไปถึงส่วนนั้นได้ อีกทางหนึ่งจะก่อให้เกิดชาร์ โดยเร่งให้วัสดุทำปฏิกิริยากับกรดลิวอิสผ่านคาร์บอเนียมไอออน เกิดการดีไฮเดรชันของเส้นใยแล้วเกิดการเชื่อมโยงกันเป็นร่างแห และเถ้าชาร์นี้จะช่วยในการหน่วงไฟโดยการเกิดขึ้นเป็นชั้นชาร์มาเคลือบเส้นใยไว้ ผิวหน้าวัสดุจะไม่สัมผัสกับความร้อน ตัวอย่างของสารหน่วงไฟในกลุ่มนี้ เช่น สารประกอบฟอสฟอรัส และการทำงานของสารหน่วงไฟที่เป็นสารประกอบฟอสฟอรัสและไนโตรเจน [11,12,13]

2.3.2.4 สารหน่วงไฟจำแนกจากองค์ประกอบทางเคมี

ความหลากหลายในหมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่มีอยู่ในโครงสร้างของสารหน่วงไฟชนิดต่างๆ ทำให้สารหน่วงไฟแต่ละชนิดมีสมบัติเฉพาะตัว อีกทั้งสมบัติของสารหน่วงไฟอาจเปลี่ยนไปตามชนิดของวัสดุที่นำไปผสม อย่างไรก็ตามสามารถจำแนกสารหน่วงไฟตามองค์ประกอบทางเคมีได้ดังนี้

(1) สารหน่วงไฟประเภทโลหะไฮดรอกไซด์ [12,15,16]

สารหน่วงไฟประเภทนี้ที่นิยมใช้ ได้แก่ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากหาซื้อได้ง่าย ราคาถูก และไม่เป็นพิษ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ตกแต่งหน่วงไฟในการเคลือบสิ่งทอหรือผสมลงไปในพลาสติก เมื่อสารหน่วงไฟชนิดนี้ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 180-200 องศาเซลเซียส อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จะเกิดการแตกตัว ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะดูดความร้อนบางส่วนไปใช้ในการขจัดน้ำออกเกิดเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ แสดงดังสมการที่ 2.1 ซึ่งไอน้ำที่

เกิดขึ้นนี้จะไปเจือจางแก๊สที่ติดไฟได้ง่าย และช่วยป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าใกล้พื้นผิวของวัสดุ ส่วนการเกิดอะลูมิเนียมออกไซด์จะช่วยทำให้เกิดชาร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันความร้อนให้แก่พื้นผิวของวัสดุ และมีสมบัติในการลดควันที่เกิดจากการเผาไหม้

$$2Al(OH)_3 \longrightarrow Al_2O_3 + 3H_2O \quad \text{.....(2.1)}$$

(2) สารหน่วงไฟประเภทที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบ [22,23]

สารประกอบโบรอน เช่น กรดบอริกจะดูดความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 130-200 และ 260-270 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการสลายน้ำออกเกิดเป็นบอริกออกไซด์ ดังแสดงในสมการที่ 2.2 ซึ่งอยู่ในรูปของการหลอมที่อุณหภูมิประมาณ 325 องศาเซลเซียส และไหลปกคลุมทั่วพื้นผิววัสดุที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งช่วยป้องกันเปลวไฟและการสัมผัสกับแก๊สออกซิเจน

$$2H_3BO \xrightarrow[-]{} 2HBO_2 \xrightarrow[-H_2O]{} B_2O_3 \quad \text{.....(2.2)}$$

(3) สารหน่วงไฟประเภทที่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ [20,22]

ฮาโลเจนนั้นประกอบด้วยธาตุ 4 ตัวด้วยกัน ได้แก่ ฟลูออรีน คลอรีน โบรมีน และไอโอดีน แต่ที่นิยมใช้เป็นสารหน่วงไฟคือ คลอรีน และโบรมีน เนื่องจากในกรณีของฟลูออรีนนั้น พันธะที่เกิดขึ้นกับคาร์บอนนั้นแข็งแรงเกินไปจึงไม่สามารถแตกตัวแล้วทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระได้ ส่วนในกรณีของไอโอดีน พันธะที่เกิดขึ้นกับคาร์บอนนั้นอ่อนแอเกินไปทำให้แตกตัวอย่างรวดเร็วด้วยพลังงานเพียงเล็กน้อย เช่น การโดนแสง และยังส่งผลให้สมบัติในการหน่วงไฟสูญเสียไป สารหน่วงไฟประเภทฮาโลเจนนี้สามารถปลดปล่อยอนุมูลอิสระของธาตุฮาโลเจนไอออนเข้าสู่บริเวณที่เกิดการลุกไหม้ โดยบริเวณนี้จะมีอนุมูลอิสระของธาตุไฮโดรเจนและอนุมูลอิสระอื่นๆ ที่เป็นผลมาจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ ดังแสดงในสมการที่ 2.3 และ 2.4

$$H^{\bullet} + O_2 \longrightarrow HO^{\bullet} + {}^{\bullet}O^{\bullet} \quad \text{.....(2.3)}$$

$${}^{\bullet}O^{\bullet} + H_2 \longrightarrow HO^{\bullet} + H^{\bullet} \quad \text{.....(2.4)}$$

เมื่ออนุมูลอิสระของธาตุไฮโดรเจนนี้มาพบกับอนุมูลอิสระของธาตุฮาโลเจน จะทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนเฮไลด์ (HCl หรือ HBr) มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ลดลง ดังนั้นสารประกอบฮาโลเจนสามารถเรียกได้ว่าเป็นตัวดักจับอนุมูลอิสระ (free radical scavengers) ทำให้สามารถลดอัตราการลุกลามของการเผาไหม้ได้ แสดงดังสมการที่ 2.5 ถึง 2.8

$$RX \longrightarrow R^{\bullet} + X^{\bullet} \quad \text{.....(2.5)}$$

$$X^{\bullet} + RH \longrightarrow R^{\bullet} + HX \quad \text{.....(2.6)}$$

$$HX + H^{\bullet} \longrightarrow H_2 + X^{\bullet} \quad \text{.....(2.7)}$$

$$HX + HO^{\bullet} \longrightarrow H_2O + X^{\bullet} \quad \text{.....(2.8)}$$

โดยที่ RX คือ สารหน่วงไฟที่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ X (คือ Cl หรือ Br) จากนั้นอนุมูลอิสระ X ทำปฏิกิริยากับสารพอลิเมอร์ RH เช่น เซลลูโลสเกิดเป็นแก๊สไฮโดรเจนไฮไลด์ (HCl หรือ HBr) ซึ่งสามารถจับกับอนุมูลอิสระ $H^{\bullet}$ และ $HO^{\bullet}$

ถ้าเปรียบเทียบสารหน่วงไฟที่มีโบรมีนและคลอรีนเป็นองค์ประกอบ สารหน่วงไฟที่มีโบรมีนเป็นองค์ประกอบจะมีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ สารหน่วงไฟที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ เนื่องจากโบรมีนจับกับคาร์บอนด้วยพันธะที่อ่อนแอกว่า ทำให้เมื่อถึงอุณหภูมิที่เกิดการแตกตัว สารหน่วงไฟที่มีโบรมีนเป็นองค์ประกอบจะสลายตัวเกิดเป็นไฮโดรเจนโบรไมด์ (HBr) ในปริมาณความเข้มข้นที่สูง สารหน่วงไฟประเภทนี้ที่นิยมใช้คือ โบรมิเนตเต็ดอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (brominated aromatic hydrocarbon) ซึ่งจะมีประสิทธิภาพดีเมื่อวงแหวนอะโรมาติกถูกแทนที่ทุกตำแหน่ง เช่น เดคะโบรโมไดฟีนิลออกไซด์ (decabromodifenyloxide) แต่ในบางกรณีที่ต้องการความคงทนต่อแสง สารหน่วงไฟที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบจะให้ประสิทธิภาพมากกว่า เนื่องจากส่วนหน่วงไฟที่มีโบรมีนเป็นองค์ประกอบสามารถสลายตัวได้เมื่อถูกแสง สารหน่วงไฟประเภทนี้ที่นิยมใช้คือ คลอริเนตเต็ดพาราฟิน (chlorinated paraffin) ซึ่งเป็นสารประกอบโฮโดรคาร์บอนที่ถูกนำมาทำปฏิกิริยากับคลอรีนเพื่อให้มีธาตุคลอรีนเป็นองค์ประกอบในโมเลกุล โดยมีส่วนประกอบของคลอรีนอยู่ประมาณ 30-70% โดยน้ำหนัก สารหน่วงไฟชนิดนี้ยังช่วยปรับปรุงสมบัติของเรซินที่ถูกนำไปผสมให้พลาสติไซต์มากขึ้น อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ที่ตกแต่งด้วยสารหน่วงไฟประเภทนี้เมื่อเกิดการลุกไหม้ จะให้ควันพิษที่เป็นอันตราย และเป็นสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งได้ โดยเฉพาะสารหน่วงไฟที่มีโบรมีนเป็นองค์ประกอบ จึงมีการห้ามตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารหน่วงไฟชนิดนี้

(4) สารหน่วงไฟประเภทที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ

สารหน่วงไฟประเภทนี้มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟกับวัสดุที่มีปริมาณออกซิเจนสูง เช่น เซลลูโลส อนุพันธ์ของเซลลูโลส และพลาสติกที่มีองค์ประกอบของออกซิเจน สารหน่วงไฟประเภทนี้มีทั้งในรูปสารประกอบอินทรีย์ อนินทรีย์ และธาตุ (ฟอสฟอรัสแดง) เช่น ฟอสฟีน ฟอสฟีนออกไซด์ สารประกอบฟอสฟอเนียม ฟอสฟอเนต ฟอสไฟต์ และฟอสเฟต สามารถหน่วงไฟได้ทั้ง vapor phase และ condensed phase ซึ่งสารหน่วงไฟประเภทนี้จะทำปฏิกิริยาใน vapor phase ระเหยกลายเป็นไอ เกิดในรูปอนุมูลอิสระ $PO^{\bullet}$ แล้วเข้าขัดขวางการลุกไหม้โดยการจับอนุมูลอิสระที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา ($H^{\bullet}$ และ $HO^{\bullet}$) ดังสมการที่ 2.9 ถึง 2.12

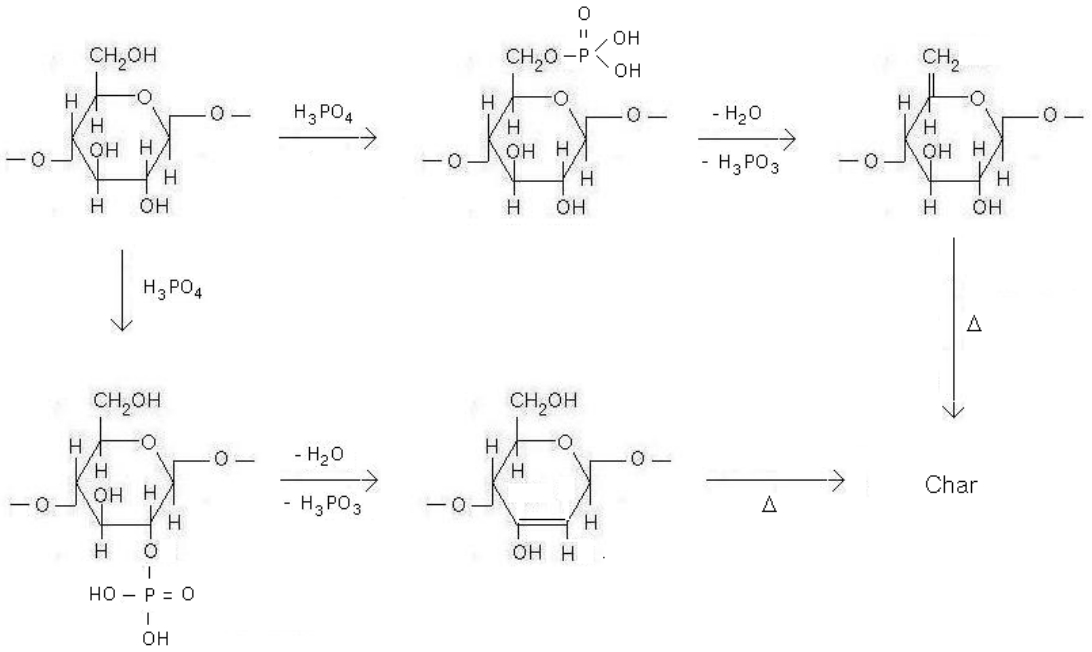
$$H_3PO_4 \longrightarrow HPO_2 + HPO + PO^{\bullet} \quad .....(2.9)$$

$$H^{\bullet} + PO^{\bullet} \longrightarrow HPO^{\bullet} \quad .....(2.10)$$

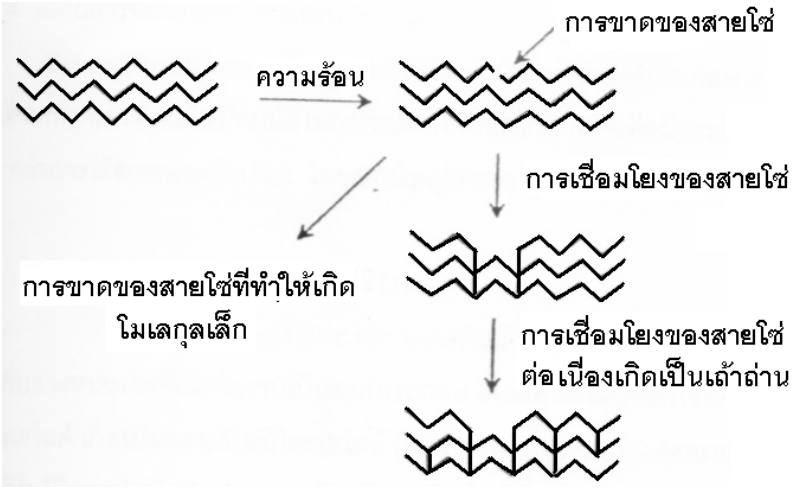
$$H^{\bullet} + HPO^{\bullet} \longrightarrow H_2 + PO^{\bullet} \quad .....(2.11)$$

$$HO^{\bullet} + PO^{\bullet} \longrightarrow HPO^{\bullet} + O^{\bullet} \quad .....(2.12)$$

ส่วนใน condensed phase สารหน่วงไฟประเภทนี้ได้รับความร้อนจะเกิดการสลายตัวไปเป็นกรดฟอสฟอริก หรือกรดพอลิฟอสฟอริก ซึ่งกรดที่เกิดขึ้นนี้จะไปเอสเทอริฟายหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลส เกิดชั้นของเหลวหนืดปกคลุมผิวของวัสดุเพื่อป้องกันไม่ให้เปลวไฟและแก๊สออกซิเจนสัมผัสกับเซลลูโลส และกรดที่เกิดขึ้นยังเป็นตัวทำให้เกิดการขจัดน้ำ (dehydrating agent) โดยการทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลคาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของแอนไฮโดรกลูโคส เพื่อสร้างชั้นของชาร์และไอน้ำที่เกิดขึ้นจะช่วยเจือจางแก๊สที่ติดไฟได้ง่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.11 และ 2.12



รูปที่ 2.11 การฟอสฟอริเลชันของเซลลูโลส [17,18]



รูปที่ 2.12 การเกิดชาร์ [19,20]

ตัวอย่างของสารประกอบของสารหน่วงไฟประเภทนี้ ได้แก่ ฟอสเฟต-เอสเทอร์ ซึ่งโครงสร้างของโมเลกุลประกอบด้วยฟอสเฟตเป็นหลักแล้วเกิดพันธะกับหมู่อัลคิลหรือเอริล สารหน่วงไฟที่มีฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบที่ใช้กันโดยทั่วไป คือ ไอโซโพรพิลไตรฟีนิลฟอสเฟต (isopropyltriphenylphosphate) อัลคิลไดเอริลฟอสเฟต(alkyldiaryphosphate) และกรดฟอสฟอริก โดยไอโซโพรพิลไตรฟีนิลฟอสเฟต และอัลคิลไดเอริลฟอสเฟตมีสมบัติเป็นพลาสติไซเซอร์

(plasticizer) จึงนิยมใช้ในการตกแต่งหน่วงไฟพอลิไวนิลคลอไรด์ ในขณะที่กรดฟอสฟอริกนิยมใช้ตกแต่งหน่วงไฟในวัสดุจำพวกเซลลูโลส แต่เนื่องจากกรดฟอสฟอริกมีการกัดกร่อนสูง จึงนิยมใช้ในรูปที่เป็นเกลือ เช่น แอมโมเนียมฟอสเฟต ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต อย่างไรก็ตามกรดฟอสฟอริกและสารที่เป็นเกลือสามารถละลายน้ำได้ง่าย จึงไม่คงทนต่อการใช้งานที่ต้องผ่านการซักล้าง [15,16,18]

(5) สารหน่วงไฟประเภทที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ [11]

สารหน่วงไฟประเภทนี้ได้แก่ เมลามีน เมลามีนไซยานูเรต เมทิลอล-เมลามีน สารประกอบกัวนิดีน ยูเรีย ไซยานาไดเอไมด์ โดยสารหน่วงไฟประเภทนี้ทำหน้าที่ในรูปของการเกิดอินทูเมสเซนต์ (intumescent) ซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดการพองตัวเป็นชั้นของชาร์ที่มีลักษณะคล้ายโฟมที่ทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันความร้อนและการสัมผัสกับออกซิเจนให้แก่วัสดุ

2.3.3 **ระบบการหน่วงไฟที่มีการเสริมกัน** (Synergisms) [14]

Synergisms เป็นระบบการหน่วงไฟที่มีการนำสารที่มีองค์ประกอบ 2 ชนิดที่แตกต่างกันมาใช้ร่วมกัน แล้วส่งผลให้มีสมบัติในการหน่วงไฟที่เสริมกัน กล่าวคือมีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟมากกว่าการใช้สารเพียงตัวเดียว โดยส่วนใหญ่สารหน่วงไฟที่นำมาใช้ร่วมกันในปัจจุบันมีดังนี้

2.3.3.1 ฮาโลเจนและแอนติโมนี [15,16]

การนำเกลือของโลหะ เช่น แอนติโมนีไตรออกไซด์ (Sb_2O_3) เป็นสารเสริมการหน่วงไฟกับสารหน่วงไฟที่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ โดยแอนติโมนีไตรออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเฮไลด์ เกิดเป็นแอนติโมนีไตรเฮไลด์ (SbX_3) และน้ำ ตัวอย่างดังสมการที่ 2.13 ถึง 2.16 ซึ่งแอนติโมนีไตรเฮไลด์ เกิดผ่านแอนติโมนีออกซีเฮไลด์ ซึ่งแอนติโมนีไตรเฮไลด์จะดักจับอนุมูลอิสระที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ เช่นเดียวกับ HCl หรือ HBr ดังสมการที่ 2.17 ถึง 2.19

$$Sb_2O_3 + 2HCl \xrightarrow{250\ ^{O}C} 2SbOCl + H_2O \quad \text{.....(2.13)}$$

$$5\ SbOCl \xrightarrow{245\text{-}280\ ^{O}C} Sb_4O_5Cl_2 + SbCl_3 \quad \text{.....(2.14)}$$

$$4\ Sb_4O_5Cl_2 \xrightarrow{475\text{-}565\ ^{O}C} 5\ Sb_3O_4Cl + SbCl_3 \quad \text{.....(2.15)}$$

$$3\ Sb_3O_4Cl \xrightarrow{410\text{-}475\ ^{O}C} 4\ Sb_2O_3 + SbCl_3 \quad \text{.....(2.16)}$$

$$SbX_3 + H^{\bullet} \longrightarrow HX + SbX_2 \quad \text{.....(2.17)}$$

$$SbX_2 + H^{\bullet} \longrightarrow HX + SbX \quad \text{.....(2.18)}$$

$$SbX + H^{\bullet} \longrightarrow HX + Sb \quad \text{.....(2.19)}$$

2.3.3.2 ฟอสฟอรัสและแฮโลเจน [17]

การทำงานร่วมกันของสารสองชนิดนี้จะอยู่ในรูปฟอสฟอรัสเฮไลด์ และฟอสฟอรัสออกซีเฮไลด์ ซึ่งจะทำหน้าที่ดักจับอนุมูลอิสระเพื่อหยุดการขยายสายโซ่ของกระบวนการเผาไหม้ เช่น สารประกอบไวนิลโบรโมฟอสเฟต นิยมใช้ในเทอร์โมพลาสติก ถึงแม้ว่าสารสองชนิดนี้มีการทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพ แต่ก็พบปัญหาความเป็นพิษของสารประกอบแฮโลเจน เช่น ทริส-2,3-ไดโบรโมโพรพิลฟอสเฟต ทริส(ไดคลอโรโพรพิล)ฟอสเฟต ทริส(2-ไดคลอโรเอทิล)ฟอสเฟต

2.3.3.3 ฟอสฟอรัสและไนโตรเจน

สารประกอบไนโตรเจนหากนำมาใช้เพียงชนิดเดียว จะไม่มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดี หรืออาจจะต้องใช้มากถึง 17% จึงจะช่วยให้เซลลูโลสมีความสามารถในการหน่วงไฟได้ปานกลาง ดังนั้นจึงมีการนำสารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสและไนโตรเจนมาใช้ร่วมกัน เนื่องจากสารประกอบไนโตรเจนทำหน้าที่เป็นนิวคลีโอไฟล์ ซึ่งทำให้เกิดการสร้างพันธะของสารประกอบฟอสฟอรัสกับสารประกอบไนโตรเจน และเมื่อเกิดการสลายตัวของสารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบไปเป็นกรดฟอสฟอริกแล้ว จะช่วยให้กรดฟอสฟอริกทำปฏิกิริยาฟอสฟอริเลชันกับเซลลูโลสได้ง่ายขึ้น เนื่องจากช่วยเพิ่มสภาพความเป็นบวก (electrophilicity) ของฟอสฟอรัส ซึ่งจะสามารถดีไฮเดรตเซลลูโลสสร้างชั้นชาร์ และสามารถปลดปล่อยแก๊สไนโตรเจนและแอมโมเนียมาเจือจางแก๊สที่ติดไฟ [11,13,14,15,21]

2.4 **แร่ดิน** (clay minerals) [26]

แร่ดินเป็นสารประกอบจำพวกไฮดรัสอะลูมินัสซิลิเกต (hydrous aluminous silicate) มีสมบัติ plasticity เมื่อผสมกับน้ำและเมื่อนำไปอบแห้งจะเปราะ โดย plasticity ของแร่ดินขึ้นกับธรรมชาติ และ ความละเอียดของแร่ดิน ถ้าละเอียดมากแร่ดินจะมี plasticity สูง แร่ดินส่วนใหญ่มีโครงสร้างแบบแผ่น (sheet silicate) จัดอยู่ในพวก phyllosilicates ประกอบด้วยชั้นของอลูมิเนียมออกตะฮีดรอน (Al-octahedral) และซิลิกอนเตตระฮีดรอน (Si-tetrahedral) และในระหว่างชั้นรอยต่อของชุด (interlayer) อาจมีไอออนของโลหะ เช่น เหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม โพแทสเซียม หรือโมเลกุลของน้ำแทรกอยู่ ทำให้ดินแต่ละชนิดมีสมบัติแตกต่างกัน กลุ่มแร่ดินที่สำคัญ ได้แก่ illite, koalinite, smectite และ vermiculite ยกเว้นแอตตาปุลไกต์ (attapulgite) หรือรู้จักในนาม ปาลีกอร์ซไกต์ (palygorskite) มีโครงสร้างต่อเนื่องกันเป็นลูกโซ่ (chain silicate) แร่ดินในธรรมชาติสามารถแบ่งแยกตามโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีได้ 4 กลุ่ม ดังนี้

1. Kaolinite มีสูตรเคมีทั่วไป คือ $2Al_2S1_2O_5(OH)_4$ มีโครงสร้างแบบแผ่นชนิด 1:1 ประกอบด้วยชั้นซิลิกาเรียงสลับกับชั้นอลูมินา

2. Illite มีสูตรเคมีทั่วไปดังนี้ คือ $Kal_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$ เป็นแร่ดินชนิด 2:1 ในหน่วยโครงสร้างจะมีชั้นซิลิกา 2 ชั้น ประกบชั้นอลูมินาอยู่และในแต่ละหน่วยมีประจุบวกของโพแทสเซียมแทรกอยู่ ทำให้ดินกลุ่มนี้ไม่สามารถพองตัวในน้ำได้

3. Smectite มีสูตรเคมีทั่วไปดังนี้ คือ $M_x(Al_{4-x}Mg_x)Si_8O_{20}(OH)_4$ โดย M คือ cation โครงสร้างเป็นชนิด 2:1 เหมือนกลุ่มอิลไลต์ แต่ในชั้นโครงสร้างมีโมเลกุลของน้ำแทรกอยู่ และประจุบวกส่วนใหญ่ที่พบเป็น แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็กและโซเดียม แร่กลุ่มนี้มีความสามารถในการพองตัวในน้ำได้ดี

4. Vermiculite มีสูตรเคมีทั่วไปดังนี้ คือ $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2.XH_2O$ มีโครงสร้างเหมือน Smectite แต่มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุสูงกว่า

แร่ดินที่นิยมนำมาใช้งานส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่ม kaolinite และ smectite โดยกลุ่ม kaolinite นิยมนำมาเป็นส่วนผสมในการทำผลิตภัณฑ์เซรามิกเช่น กระเบื้อง ถ้วยชาม และสุขภัณฑ์ เป็นต้น สำหรับกลุ่ม smectite ที่รู้จักกันดีได้แก่ มอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite) ซึ่งนิยมนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมสี หมึกพิมพ์ กระดาษ หรือใช้เป็นโคลนขุดเจาะ (drilling mud) และเป็นสารหล่อลื่น ปัจจุบันนี้นักวิทยาศาสตร์ได้พยายามอาศัยสมบัติของแร่ดินกลุ่มนี้เพื่อเป็นประโยชน์ในการใช้งานให้หลากหลายและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยใช้เทคนิคการปรับเปลี่ยนสภาพพื้นผิวให้

ได้ดินที่ชอบสารอินทรีย์หรือที่รู้จักกันทั่วไปว่า ออร์กาโนฟิลิกเคลย์ (organophilic clay) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในระบบที่ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ได้ เช่น ใช้เป็นสารปรับความหนืดในสี หมึกพิมพ์ และจาระบี

แร่ดินมีจุดเด่น คือมีโครงสร้างผลึกที่เป็นแผ่นหรือชั้นเรียงซ้อนกัน ทำให้มีความยืดหยุ่นและมีความเป็นขั้ว ทนความร้อนสูงได้ดี เพราะซิลิเกตเป็นฉนวนที่ดี การเผาไหม้จะให้ชาร์ ปกคลุมที่ผิวหน้า จึงไม่ลามไฟ และไฟดับอย่างรวดเร็ว

2.4.1 **ดินเบนโทไนต์** (bentonite)

ดินชนิดนี้ประกอบด้วยแร่ดินเหนียวชนิดมอนต์มอริลโลไนต์เป็นองค์ประกอบหลัก รองลงมา ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ เหล็กออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ มอนต์มอริลโลไนต์ทำให้ดินเบนโทไนต์มีสมบัติในการดูดซับที่ดี และสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้ อย่างไรก็ตาม สมบัติของดินยังต่างกันไปในด้านความสามารถในการดูดซับ และในการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมีของมอนต์มอริลโลไนต์ ตัวอย่างเช่น มอนต์มอริลโลไนต์ที่มีไอออนโซเดียมแทนที่อยู่ในโครงสร้างเป็นปริมาณมาก จะมีสมบัติในการดูดซับน้ำและเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับสิ่งแวดล้อมได้ดีกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ที่มีไอออนแคลเซียมหรือโพแทสเซียมแทนที่ดินเบนโทไนต์

ดินเบนโทไนต์ที่ใช้งานมากในอุตสาหกรรม สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มได้แก่

- Natural sodium bentonite หรือ sodium montmorilloniteเป็นการแลกเปลี่ยน Na^{+}

- Natural calcium bentonite หรือ calcium montmorillonite เป็นการแลกเปลี่ยน Ca^{+2}

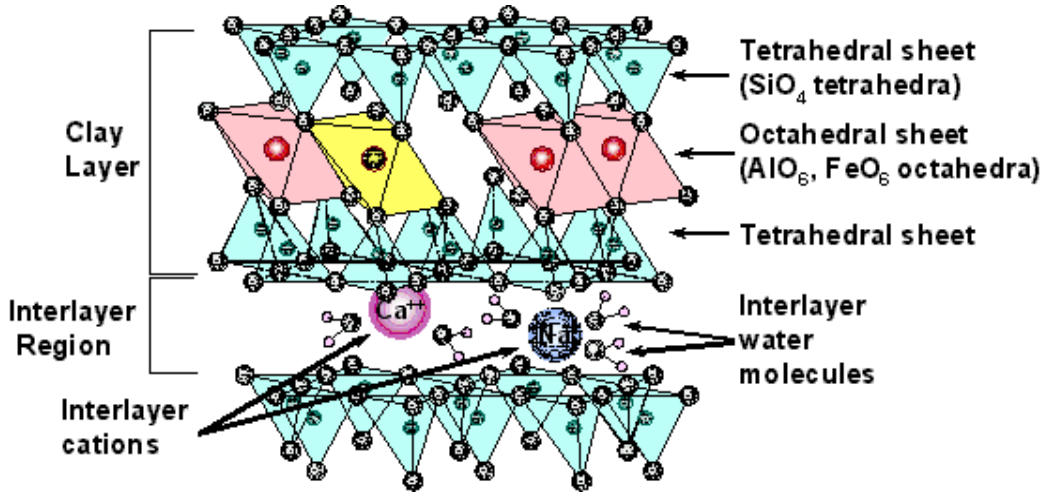
- Sodium activated bentonite หรือ sodium activated montmorillonite : เป็นการแลกเปลี่ยนประจุจาก Ca^{+2} เป็น Na^{+}

แหล่งดินเบนโทไนต์ที่สำคัญของโลกอยู่ที่เมืองไวโอมิง (Wyoming) ประเทศสหรัฐอเมริกา รองลงมาได้แก่ กลุ่มประเทศอิสระที่แยกตัวจากรัสเซียมเดิม (CIS) ประเทศกรีซ เยอร์มัน ญี่ปุ่น และตุรกี โดยคิดเป็นร้อยละ 84 ของกำลังการผลิตโลกในปี 1995 และจากการสำรวจแหล่งดินเบนโทไนต์พบว่ามีปริมาณสำรองอยู่ 1452 ล้านตัน ในขณะที่มีปริมาณการใช้เฉลี่ย

อยู่ที่ 9.8 ล้านตันต่อปี ในปี 1997-1998 พบว่าราคาเฉลี่ยของดินดิบชนิดนี้อยู่ที่ 98 เหรียญสหรัฐต่อตัน และเมื่อผ่านกระบวนการต่างๆ แล้ว ราคาจะอยู่ในช่วงกว้างตั้งแต่ 50 ถึง 250 เหรียญสหรัฐต่อตัน ขึ้นอยู่กับสมบัติ ปริมาณและความต้องการ สำหรับประเทศไทย ดินเบนโทไนต์นี้จะพบมากในอำเภอชัยบาดาล จังหวัดลพบุรี เป็นชนิดแคลเซียมเบนโทไนต์ ดินเบนโทไนต์ ซึ่งเป็นดินชนิดหนึ่ง ที่มีการนำมาใช้งานในหลายๆ ด้าน อาทิเช่น การใช้เป็นสารหล่อเย็นในการขุดเจาะสำหรับงานโยธา การใช้เป็นสารฟอกสี หรือสารดูดซึม เพื่อทำความสะอาดในอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมัน การใช้เป็นสารตัวเติม (filler) เพื่อเพิ่มปริมาณเนื้อสาร หรือใช้ในการปรับความหนืดสำหรับอุตสาหกรรมสีและหมึกพิมพ์ และจากสมบัติของดินเบนโทไนต์ ในการดูดซับที่ดี ทำให้มีการนำมาใช้เป็นสารดูดซับกลิ่นของเสีย ที่เกิดจากการขับถ่ายของสัตว์เลี้ยง วางขายตามซุปเปอร์มาเกตทั่วไป ซึ่งจะเห็นได้ว่าดินเบนโทไนต์มีประโยชน์อย่างมาก ควรที่เราจะได้รู้จักเกี่ยวกับดินเบนโทไนต์ให้มากขึ้น

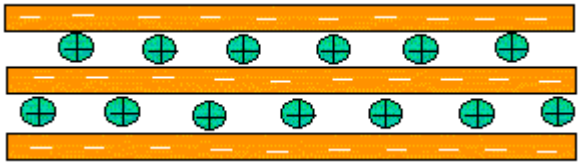
2.4.2 **มอนต์มอริลไลไนต์** (montmorillonite)

สูตรเคมี คือ $Al_4Si_8O_{20}(OH)_4.nH_2O$ มอนต์มอริลโลไนต์เป็นแร่ดินเหนี่ยวที่มีโครงสร้างซ้อนทับกัน ซึ่งประกอบด้วยชั้นของแผ่นอะลูมิเนียม โดยชั้นตรงกลางเป็นชั้นของอะลูมินาที่ถูกประกบบนและล่างด้วยชั้นซิลิกา แต่ละชั้นมีความหนาน้อยกว่า 1 นาโนเมตร และมีความยาวมากกว่าความหนา 200 เท่า ระหว่างชั้นจะมีช่องว่างขนาดเล็กเรียกว่า gallery ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ [27]

ในช่องว่างจะมี cation ได้แก่ โซเดียมไอออน หรือแคลเซียมไอออน จะทำหน้าที่ยึดชั้นของดินที่มีประจุลบเอาไว้ด้วยกัน จึงทำให้ชั้นของดินยึดติดแน่นดังรูปที่ 2.14

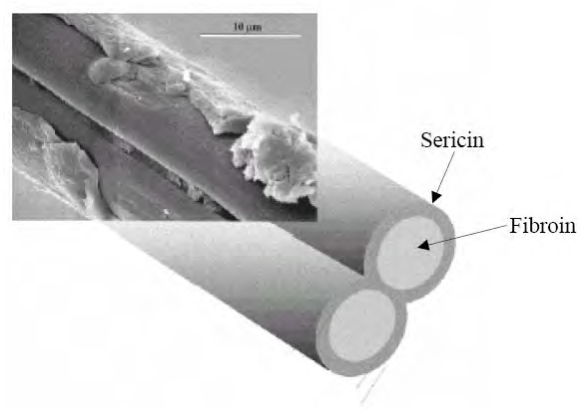


รูปที่ 2.14 การยึดติดกันระหว่างชั้นของดินกับประจุบวกที่อยู่ระหว่างชั้นของดิน [28]

มอนต์มอริลไลไนต์มีสมบัติ hydrophilic จึงทำให้ผสมและเกิดอันตรกิริยา (interaction) กับพอลิเมอร์ได้ยาก จำเป็นต้องทำการดัดแปรมอนต์มอริลไลไนต์ (modified montmorillonite) เพื่อทำให้สามารถเข้ารวมเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ได้ดียิ่งขึ้น โดยมอนต์มอริลโลไนต์ช่วยเสริมแรงให้กับพลาสติก ทำให้สมบัติบางอย่างของพลาสติกดีขึ้น เช่น ความต้านแรงดึง ความต้านการดัดโค้ง (flexural strength) และความทนความร้อน (heat resistance) ซึ่งได้มีการเปิดเผยครั้งแรกโดยทีมงานวิจัยที่ห้องปฏิบัติการบริษัทผู้ผลิตรถยนต์รายใหญ่ในประเทศญี่ปุ่น คือ บริษัท โตโยต้า โดยนำมอนต์มอริลโลไนต์มาเสริมแรงให้กับไนลอน 6 เพื่อผลิตชิ้นส่วนรถยนต์

2.5 ผงกาวไหม (Sericin) [29]

เซริซิน (sericin) หรือ กาวไหมเป็นโปรตีนที่อยู่รอบๆ โปรตีน Fibroin มีองค์ประกอบหลักทางเคมีเป็นโปรตีนโมเลกุลใหญ่ (macromolecular protein) ในเส้นไหมดิบประกอบด้วยเส้นใยไหม (fibroin) ประมาณ 70% และเซริซินประมาณ 19 – 28% ขึ้นกับชนิดหรือพันธ์ไหม เช่นไหมเลี้ยงพันธุ์ Bombyx mori หรือ Mulberry silk จะมีกาวไหม 20 – 30% ในขณะที่ไหมป่าพันธุ์ Tussah จะมีกาวไหม 5 – 15 %

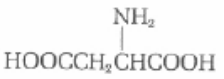
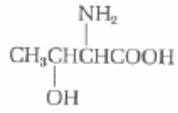
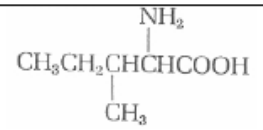
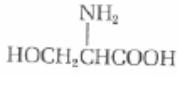
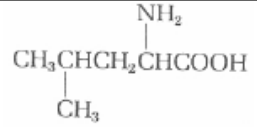
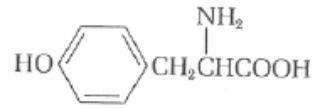
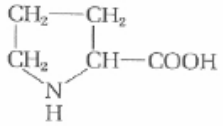
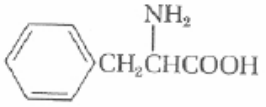
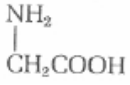
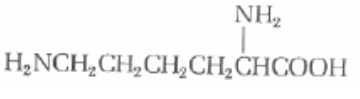
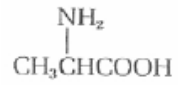
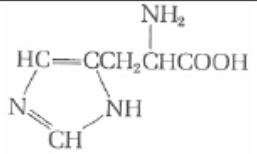
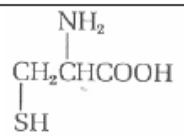
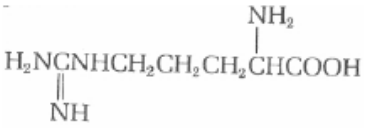
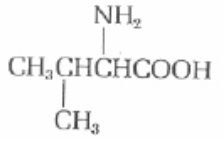
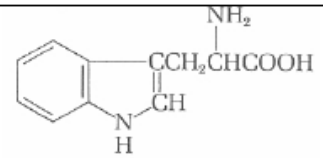


รูปที่ 2.15 เส้นไหมดิบ

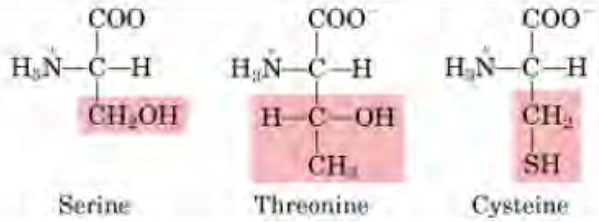
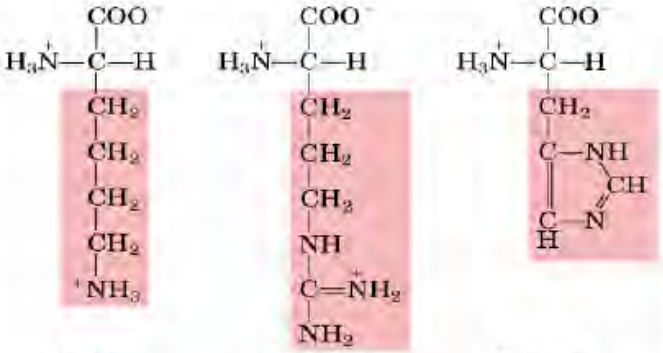
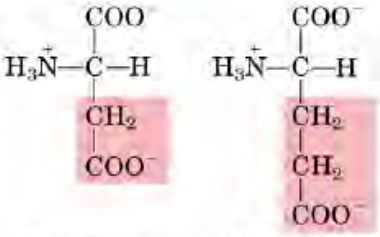
2.5.1 โครงสร้างของกรดอะมิโนของเซริซิน

เพปไทด์เป็นสารที่ประกอบด้วยกรดอะมิโน 2 ตัวหรือมากกว่าที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจนหรือพันธะไอออนิก เซริซินเป็นโปรตีนขนาดใหญ่ ซึ่งน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันตั้งแต่ 10 ถึง 300 กิโลดาลตัน ประกอบด้วยกรดอะมิโน 18 ชนิด ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยเซรีน (serine) และกรดแอสปาร์ติก ประมาณ 25.28% และ 20.55% ตามลำดับ ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างง่ายๆ และปริมาณ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 และ 2.3

ตารางที่ 2.2 โครงสร้างและปริมาณของกรดอะมิโนของโปรตีนเซริซิน (กรดอะมิโนเป็นกรัมในโปรตีน 100 กรัม)

Amino acid (%)	Structure	Amino acid (%)	Structure
Aspartic acid (20.55		Methionine (0.00)	
Threonine (7.96)		Isoleucine (0.88)	
Serine (25.28		Leucine (1.36)	
Glutamic acid (7.90)		Tyrosine (4.47)	
Proline (0.00)		Phylalanine (0.91)	
Glycine (10.51		Lysine (4.68)	
Alanine (3.97)		Histidine (1.75)	
Cysteine (0.72)		Arginine (5.26)	
Valine (3.79)		Tryptophane (0.00)	

ตารางที่ 2.3 การจำแนกประเภทของกรดอะมิโนของโปรตีนเซริซิน

Classification	Amino acid
Polar uncharged amino acid	 Serine Threonine Cysteine
Polar amino acids with positively charged side chains	 Lysine Arginine Histidine
Polar amino acids with negatively charged side chains	 Aspartate Glutamate

2.5.2 การนำไปใช้งานของเซริซิน

ในระหว่างกระบวนการลอกกาวไหมด้วยน้ำร้อนหรือสารละลายด่าง เซริซินจะหลุดออกมาได้ง่ายและย่อยสลายเป็นเซริซินเพปไทด์มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงระหว่าง 10 ถึงมากกว่า 300 kDa ขึ้นกับอุณหภูมิ pH และเวลาที่ใช้ในการลอกกาวไหม เซริซินที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 60 kDa โดยทั่วไปน้อยกว่า 5 kDa ละลายในน้ำเย็นและจะหลุดออกมาในช่วงต้นๆของการลอกกาวไหม เซริซินที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเช่นนี้จะมีสมบัติดูดและคายความชื้นได้ดีเยี่ยม มีสมบัติต้านการเกิดออกซิเดชัน ส่วนของเซริซินที่เหลือที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่าง 60 kDa และมากกว่า 300 kDa ละลายในน้ำเย็นไม่ดีนักแต่จะละลายได้ดีในน้ำเดือดและจะหลุดออกมาในช่วงหลังของการลอกกาวไหม เซริซินที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเช่นนี้มักนำไปใช้ประโยชน์ในการปรับปรุง

คุณภาพของวัสดุพอลิเมอร์ เช่นพอลิเอสเทอร์ พอลิเอไมด์ พอลิโอลิฟิน และพอลิอะคริโลไนไตรล์ ยิ่งกว่านั้นก็ยังนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุชีวภาพ วัสดุทางการแพทย์ วัสดุเมมเบรน และเส้นใยฟังก์ชันแนลให้สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้

เราอาจกล่าวได้ว่าโปรตีนเซริซินจากไหมมีสมบัติพิเศษต่างๆดังนี้

- ต่อต้านการเกิดออกซิเดชันส่งผลให้สามารถต้านจุลินทรีย์ ต้านแสง UV เป็นต้น
- ดูดและคายความชื้นได้ง่าย
- สามารถ cross-link, copolymerized หรือผสมกับพอลิเมอร์สังเคราะห์เพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์ให้ดีขึ้นได้
- ใช้เป็นสารเคลือบผิวสำหรับเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ ซึ่งวัสดุดังกล่าวสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุที่สลายได้ทางชีวภาพ วัสดุทางการแพทย์ เมมเบรน เส้นใย และผ้าผืนที่มีสมบัติพิเศษต่อการใช้งานบางประเภทเช่นการใช้ฟิล์มที่เคลือบด้วยเซริซินเคลือบไปบนพื้นผิวของตู้เย็น เครื่องทำความเย็น รถตู้คอนเทนเนอร์ เรือที่มีห้องเย็น ก็เนื่องมาจากฟิล์มดังกล่าวมีสมบัติในการต้านการแข็งตัวของน้ำแข็ง (anti-frosting) ยิ่งกว่านั้นการใช้สารเคลือบผิวดังกล่าวเคลือบถนนหรือหลังคาก็สามารถป้องกันการกัดทำลายของน้ำแข็งและทำให้กำจัดหิมะได้ง่าย
- ฟิล์มที่ผลิตจากไฟโบรอิน และเซริซินจากไหมมีสมบัติที่คล้ายคลึงกับแก้วตาของมนุษย์มากที่ยอมให้ออกซิเจนซึมผ่านได้อย่างดีเยี่ยม ดังนั้นจึงเป็นที่คาดหวังว่าในอนาคตฟิล์มดังกล่าวจะสามารถนำไปใช้เป็นกระจกตาเทียมได้ ในขั้นตอนการทำฟิล์มนั้นจะละลาย 1 กรัมของรังไหม (ไฟโบรอินและเซริซินโปรตีนจากไหม) ด้วย 3 มิลลิลิตร ของ 98% ไทรฟลูออโรอะซิติกแอซิด (CF_3COOH) ได้สารที่มีลักษณะคล้ายวุ้น จากนั้นเทสารดังกล่าวลงในแม่แบบหรือ นำสารดังกล่าวไปทำให้อยู่ในรูปของฟิล์ม และด้วยกรรมวิธีที่คล้ายกับที่ได้กล่าวมาทำให้เราสามารถนำฟิล์มดังกล่าวมาผลิตเป็นคอนแทคเลนส์ หลอดเหลือดเทียมที่มีความยืดหยุ่นได้
- โปรตีนจากไหมสามารถนำไปผลิตเป็นวัสดุทางชีวภาพที่มีสมบัติเป็นสารต้านการตกตะกอน (anticoagulant) โดยนำไฟโบรอินและเซริซินของไหมมาทำปฏิกิริยา sulphonation ด้วยการเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่ความเข้มข้น 10-90% หรือ 0.5 – 500 เท่าของปริมาณของ ไฟโบรอินหรือเซริซินที่สกัดได้ และทำปฏิกิริยา sulphonation ที่อุณหภูมิ 20-100°C เป็นเวลาหลายชั่วโมง สารต้านการตกตะกอนที่ได้จากปฏิกิริยานี้มีศักยภาพพอที่จะใช้แทน heparin ซึ่งเป็นกรดอินทรีย์ที่พบในเนื้อเยื่อปอดและตับมีสมบัติทำให้เลือดแข็งตัวช้า นอกจากนี้สารต้านการตกตะกอนดังกล่าวยังสามารถนำมาใช้ในยาสีฟันและครีมโกนหนวดเพื่อป้องกันการแพร่กระจายของเชื้อ HIV

นอกจากนี้กรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบหลักของเซริซิน ซึ่งประกอบไปด้วยสารประกอบไนโตรเจนอาจจะนำมาใช้เป็นสารหน่วงไฟประเภทที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบซึ่งสารหน่วงไฟประเภทนี้ทำหน้าที่ในรูปของการเกิดอินทูเมสเซนต์ (intumescent) เป็นเอกลักษณ์ที่เกิดการพองตัวเป็นชั้นของชาร์ที่มีลักษณะคล้ายโฟม ทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันความร้อนและการสัมผัสกับออกซิเจนให้แก่วัสดุ สารหน่วงไฟประเภทนี้ ได้แก่ เมลามีน เมลามีนไซยานูเรต เมทิลอลเมลามีน สารประกอบกัวนิดิน ยูเรีย ไซยานาไดเอไมด์ แต่เนื่องจากสารประกอบไนโตรเจนหากนำมาใช้เพียงชนิดเดียว จะไม่มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดี ดังนั้นจึงมีการนำสารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสและไนโตรเจนมาใช้ร่วมกัน

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chen และคณะ [30] ได้ทำการสังเคราะห์สารหน่วงไฟ คือ poly(2-hydroxy propylene spirocyclic pentaerythritol bisphosphonate) (PPPBP) มาใช้ในการตกแต่งหน่วงไฟและการต้านทานการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเทอร์ จากผลการทดสอบการหน่วงไฟ และการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน พบว่าผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการตกแต่งมีความสามารถในการหน่วงไฟและต้านทานการหลอมหยดได้ดีขึ้น และจากผลวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA พบว่าผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งหน่วงไฟมีอุณหภูมิในการสลายตัวช้ากว่าผ้าที่ไม่ตกแต่ง

Xin และคณะ [31] ได้เตรียมสารประกอบฟอสฟอรัสโคพอลิเอสเทอร์/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต (PET-*co*-HPPPA/O-MMT) เพื่อให้มีคุณสมบัติในด้านการหน่วงไฟ โดยทำการสังเคราะห์ PET-*co*-HPPPA/O-MMT ด้วย terephthalic acid, ethylene glycol, 2carboxyethyl (phenylphosphinic) acid (HPPPA) และมอนต์มอริลโลไนต์ (O-MMT) โดยวิธี in situ intercalation polycondensation และทำการทดสอบหน่วงไฟพบว่า PET-*co*-HPPPA/O-MMT มีความสามารถในการหน่วงไฟเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มขึ้น

Mayu และคณะ [32] ได้เตรียมนาโนคอมพอสิตระหว่างออร์กาโนเคลย์ (Closite 20A) สารหน่วงไฟ (decabromodiphenyl ether, DB และ antimony trioxide, AO) และ PMMA พบว่าพอลิเมอร์และสารหน่วงไฟมีความสามารถในการเข้ากันได้ดี และ PMMA/DB/AO มีความสามารถในการหน่วงไฟแต่ไม่สามารถต้านการหลอมหยดได้ ส่วน PMMA/DB/AO/Closite 20A (70/20/5/5) มีความสามารถในการหน่วงไฟและต้านการหลอมหยดได้ และยังมีชาร์เกิดขึ้นอีกด้วย

Bourbigot และคณะ [33] ได้ทำการเตรียมนาโนคอมพอสิตของไนลอน 6 และเคลย์ด้วยวิธี melt blending ได้โครงสร้างนาโนคอมพอสิตแบบแยกออก (exfoliate) และนำนาโนคอมพอสิต

ที่เตรียมได้ไปฉีดเป็นเส้นใยด้วยกระบวนการปั่นหลอม (melt spinning) ได้เป็นเส้นใยยาวและนำไปถักเป็นผ้าผืน และจากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนพบว่านาโนคอมพอสิตระหว่างไนลอน 6 และเคลย์มีความคงทนต่อความร้อนที่ดีกว่าไนลอน6 และยังมีความคงทนต่อการซักได้ดีและราคาถูกอีกด้วย

Song และคณะ [34] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมนาโนคอมพอสิตจากพอลิอีเทอร์ออร์กาโนเคลย์ (OMT) ฟีนิลมีเทนไดไอโซไซยาเนต ไดไกลคอล กลีเซอรีน และสารหน่วงไฟ (MPP) เพื่อให้มีสมบัติหน่วงไฟ ในการศึกษาครั้งนี้ได้เตรียมนาโนคอมพอสิตแบบ PU/OMT PU/MPP PU/OMT/MPP และ PU พบว่านาโนคอมพอสิตที่มีออร์กาโนเคลย์และสารหน่วงไฟจะมีความคงทนต่อความร้อนและสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด และมีสมบัติด้านการหน่วงไฟที่ดี โดยมีปริมาณชาร์เพิ่มขึ้น

Araújo และคณะ [35] ศึกษานาโนคอมพอสิตระหว่างพอลิเอทิลีน (PE) มอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการดัดแปรด้วยเกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียม (OMMT) ด้วยวิธี melt intercalation ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ที่ใช้คือ 3% และตัวอย่างมอนต์มอริลโลไนต์ได้จาก Barzilian โดยดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียมต่างชนิดกัน ศึกษาโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยเทคนิค XRD และ SEM และศึกษาการกระจายตัวและสัณฐานวิทยาของมอนต์โมริลโลไนต์ในพอลิเอทิลีน ด้วยเทคนิค XRD และ TEM สมบัติทางความร้อนและสมบัติการหน่วงไฟวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA และ horizontal burning tests ตามมาตรฐาน UL 94 พบว่า PE/OMMT มีความสามารถในการหน่วงไฟได้ดีกว่าพอลิเอทีลิน เนื่องจาก PE/OMMT ไม่เกิดการหลอมหยดและมีอัตราการลุกไหม้ต่ำกว่าพอลิเอทิลีนที่ไม่ผสม มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร (OMMT)

Xu และคณะ [36] ที่ได้ศึกษาการสลายตัวด้วยความร้อนในอากาศของผ้าป่านที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัส และไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ โดยใช้เทคนิค DTA และ TGA ในช่วงอุณหภูมิห้องถึง 600 องศาเซลเซียสภายใต้สภาวะออกซิเจน พบว่ามีค่า limiting oxygen index (LOI) และปริมาณชาร์สูง แสดงถึงความสามารถในการหน่วงไฟเพิ่มขึ้น โดยฟอสฟอรัสมีผลต่อการเกิดชาร์ซึ่งการสลายตัวขั้นที่สองจะมีอุณหภูมิต่ำลง และไนโตรเจนจะช่วยให้เกิดการดีฟอสฟอริเลชัน และเป็นตัวเร่งกรดให้เกิดการสลายน้ำเพื่อสร้างชาร์ให้มากขึ้น ดังนั้นผ้าที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟจะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำลง เมื่ออุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวมากที่สุดลดลง เกิดชาร์มากขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้ค่า Ea ลดลง และความสามารถในการเผาไหม้ลดลงอีกด้วย

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 วัสดุและสารเคมี

1. ผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวน ผลิตโดยกรรมวิธี Thermal bonding น้ำหนักผ้าต่อพื้นที่ 42.5 กรัมต่อตารางเมตร หนา 0.18 มิลลิเมตร
   (ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เทยินโพลีเอสเตอร์ จำกัด)
2. เบนโทไนต์ แมคเจล SAC เกรด ขนาดอนุภาคสามารถผ่านตะแกรงขนาด 200 mesh ได้มากกว่า 80% โดยมีองค์ประกอบต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3.1
   (ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทไทยนิปปอนเคมีภัณฑ์ จำกัด)

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของเบนโทไนต์

องค์ประกอบของเบนโทไนต์	ปริมาณ (%) โดยน้ำหนัก
SiO_2	65-67
Al_2O_3	13-17
Fe_2O_3	1-2
MgO	2-3
Na_2O	1.5-2.5
CaO	1.5-2.5
K_2O	0.4-0.8
TiO_2	0.2-0.3

3. ผงกาวไหม น้ำหนักโมเลกุล 10-300 กิโลดาลตัน
   (จากบริษัท จุลไหมไทย จำกัด)
4. สารประกอบฟอสฟอรัสที่ใช้คือเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟต ได้แก่ แอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($NH_4 \cdot H_2PO_4$) และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($(NH_4)_2HPO_4$) เกรดวิเคราะห์
   (จากบริษัท Wako Pure Chemical Industries Ltd.)

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

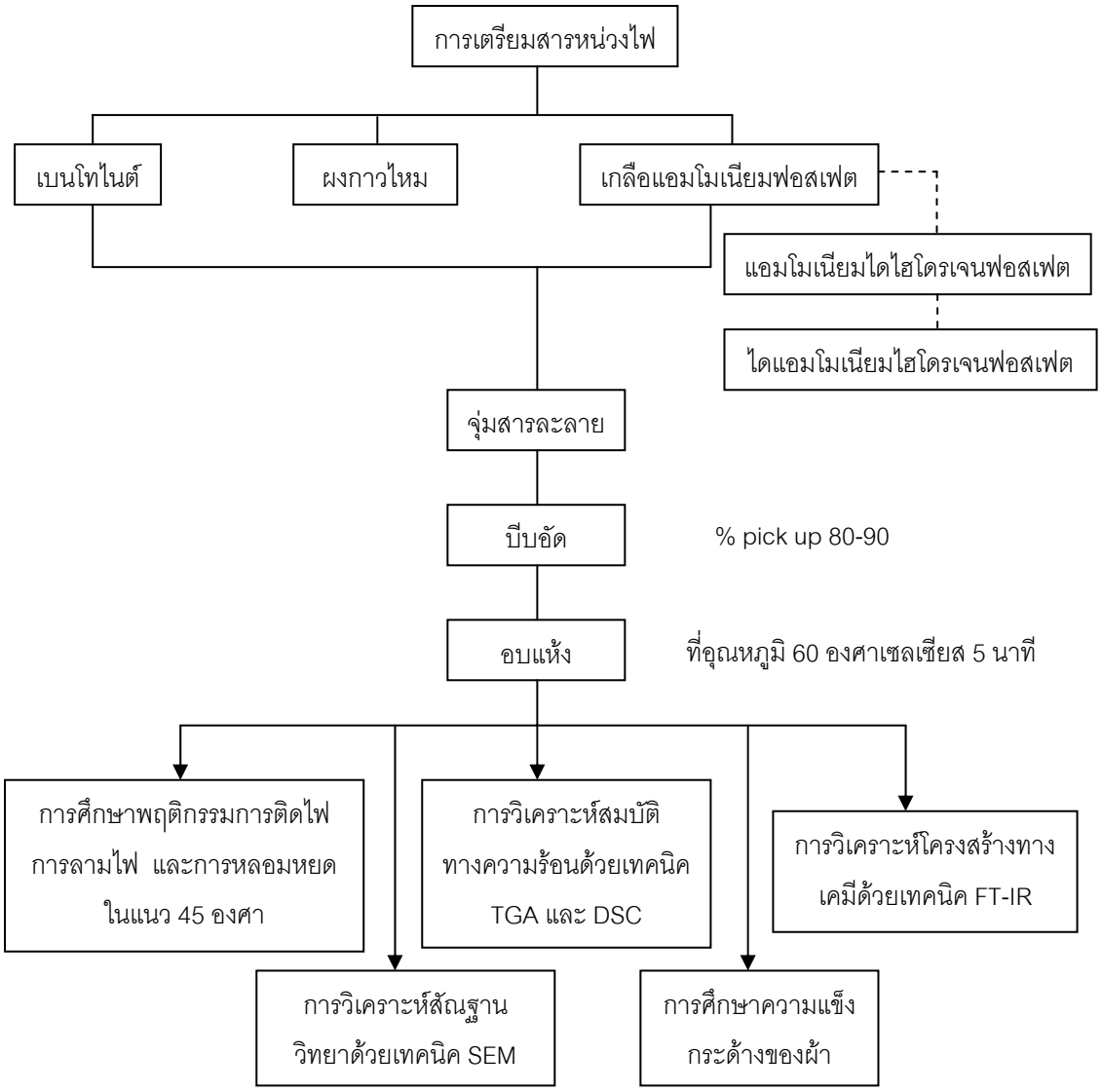
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

	ชื่อเครื่องมือ	รุ่น / บริษัทผู้ผลิต
1	เครื่องจุ่มอัด (Padder)	Labtec. NewAve Lab equipment Co.,Ltd.
2	ตู้อบ (isotemperature oven)	Fisher Scientific
3	เครื่องทดสอบหาอัตราเร็วและพฤติกรรมในการลุกลามไฟของเปลวไฟแนว 45 องศา	Atlas 45° Automatic Flammability Tester/ Atlas Chicago Illinois, USA
4	เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectro-photometer , FTIR)	NICOLET 6700 FT-IR Spectrometer / Thermo Fisher Scientific Inc.
5	เครื่องเทอโมกราวิเมทริกแอนาลิซิส (Thermogravimetric analysis, TGA)	Mettler Toledo TGA/STDA 851^{e}/ Greifensee, Switzerland
6	ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC)	Mettler Toledo $DSC822^{e}$
7	เครื่องทดสอบความแข็งกระด้างของผ้า	Cantilever Tester
8	กล้องบันทึกภาพเคลื่อนไหวระบบดิจิตอล	Sony cybershot รุ่น DSC-T20

3.3 การดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนในการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้แสดงได้ด้วยแผนภาพดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลอง

3.4 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการตกแต่งหน่วงไฟผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวน

3.4.1 การตกแต่งหน่วงไฟผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนด้วยเบนโทไนต์ ผงกาวไหม และสารประกอบฟอสฟอรัส

3.4.1.1 การเตรียมสารหน่วงไฟ

1) การเตรียมสารแขวนลอยเบนโทไนต์ โดยเตรียมเบนโทไนต์ในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 1, 3, 5, 7 และ 10 กรัม ในน้ำกลั่นปริมาณ 100 มิลลิลิตร กวนให้ละลาย เป็นเวลา 20 นาที

2) การเตรียมสารแขวนลอยเบนโทไนต์กับสารประกอบฟอสฟอรัส

- เตรียมสารแขวนลอยเบนโทไนต์ โดยเตรียมเบนโทไนต์ในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 1, 3, 5, 7 และ 10 กรัม ในน้ำกลั่นปริมาณ 70 มิลลิลิตร กวนให้เข้ากันเป็นเวลา 20 นาที

- ละลายสารประกอบฟอสฟอรัส ได้แก่ แอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และ ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ปริมาณ 3 กรัม ในน้ำกลั่นปริมาณ 30 มิลลิลิตร กวนให้ละลาย

- นำสารที่เตรียมได้ทั้งสองข้างต้นมาผสมกัน

3) การเตรียมสารละลายผงกาวไหม โดยละลายผงกาวไหมในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 1, 3, 5, 7 และ 10 กรัม ในน้ำกลั่นปริมาณ 100 มิลลิลิตร กวนให้ละลายที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที พักไว้ให้เย็น

4) การเตรียมสารละลายผงกาวไหมกับสารประกอบฟอสฟอรัส

- ละลายผงกาวไหมในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 1, 3, 5, 7 และ 10 กรัม ในน้ำกลั่นปริมาณ 70 มิลลิลิตร กวนให้ละลายที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที พักไว้ให้เย็น

- ละลายสารประกอบฟอสฟอรัส ได้แก่ แอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และ ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ปริมาณ 3 กรัม ในน้ำกลั่นปริมาณ 30 มิลลิลิตร กวนให้ละลาย

- นำสารที่เตรียมได้ทั้งสองข้างต้นมาผสมกัน

5) การเตรียมสารละลายผงกาวไหมกับเบนโทไนต์

- ละลายผงกาวไหมในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 1, 3, 5, 7 และ 9 กรัม ในน้ำกลั่นปริมาณ 50 มิลลิลิตร กวนให้ละลายที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที พักไว้ให้เย็น

- เตรียมสารแขวนลอยเบนโทไนต์ โดยเตรียมเบนโทไนต์ในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 1, 3, 5, 7 และ 9 กรัม ในน้ำกลั่นปริมาณ 50 มิลลิลิตร กวนให้เข้ากันเป็นเวลา 20 นาที

- นำสารที่เตรียมได้ทั้งสองข้างต้นมาผสมกัน

6) การเตรียมสารละลายสารประกอบฟอสฟอรัสได้แก่ แอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต โดยละลายแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตปริมาณ 3 กรัม ในน้ำกลั่นปริมาณ 100 มิลลิลิตร

โดยสูตรการตกแต่งหน่วงไฟผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ความเข้มข้นต่างๆ กันแสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สูตรการตกแต่งหน่วงไฟผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน (% น้ำหนัก/ปริมาตร)

สูตรการตกแต่ง	เบนโทไนต์	ผงกาวไหม	$NH_4 \cdot H_2PO_4$	$(NH_4)_2HPO_4$
untreated	0	0	0	0
B1	1			
B3	3			
B5	5			
B7	7			
B10	10			
B1MA3	1		3	
B3MA3	3		3	
B5MA3	5		3	
B7MA3	7		3	
B10MA3	10		3	

ตารางที่ 3.3 (ต่อ)

สูตรการตกแต่ง	เบนโทไนต์	ผงกาวไหม	$NH_4 \cdot H_2PO_4$	$(NH_4)_2HPO_4$
B1DA3	1			3
B3DA3	3			3
B5DA3	5			3
B7DA3	7			3
B10DA3	10			3
S1		1		
S3		3		
S5		5		
S7		7		
S10		10		
S1MA3		1	3	
S3MA3		3	3	
S5MA3		5	3	
S7MA3		7	3	
S10MA3		10	3	
S1DA3		1		3
S3DA3		3		3
S5DA3		5		3
S7DA3		7		3
S10DA3		10		3
S1B9	9	1		
S3B7	7	3		
S5B5	5	5		
S7B3	3	7		
S9B1	1	9		
MA3			3	
DA3				3

3.4.1.2. การจุ่มอัดผ้า

1) นำผ้าพอลิเอสเทอร์ขนาด 20x20 เซนติเมตร มาเข้าตู้ดูดความชื้นเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง จากนั้นนำผ้าออกมาชั่งน้ำหนักก่อนการจุ่มอัด หลังจากนั้นทำการจุ่มอัดด้วยสารแขวนลอยเบนโทไนต์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ให้มี % pick up 80-90 โดยใช้สูตรในการคำนวณดังนี้

$$\% \text{ pick up} = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100 \qquad \text{.....(3.1)}$$

โดยที่ W_0 = น้ำหนักผ้าก่อนการตกแต่งหน่วงไฟ

W_1 = น้ำหนักผ้าหลังการจุ่มอัด

2) นำผ้าที่ผ่านการจุ่มอัดไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที

3) นำผ้าเข้าตู้ดูดความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำผ้ามาชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหา % add on โดยใช้สูตรในการคำนวณดังนี้

$$\% \text{ add on} = \frac{W_2 - W_0}{W_0} \times 100 \qquad \text{.....(3.2)}$$

โดยที่ W_0 = น้ำหนักผ้าก่อนการตกแต่งหน่วงไฟ

W_2 = น้ำหนักผ้าหลังการตกแต่งหน่วงไฟ

3.5 การศึกษาพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดบนผ้าพอลิเอส-เทอร์นอนวูฟเวน

วัตถุประสงค์ของการทดสอบนี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งในแนว 45 องศา โดยการศึกษาดังกล่าวจะทำการสังเกตพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดจากกล้องบันทึกภาพเคลื่อนไหว

3.5.1 วิธีการทดสอบ

เตรียมผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนขนาดความกว้าง 5 เซนติเมตร และความยาว 16.5 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน ASTM D 1230 และวิธีการทดสอบของเครื่องทดสอบ Atlas 45° Automatic Flammability Tester แสดงดังรูปที่ 3.2 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์จุดไฟมาตรฐาน Rack สำหรับยึดผ้าที่จะทำการทดสอบ และอุปกรณ์จับเวลาอัตโนมัติ (งานวิจัยนี้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 28±2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50±2 โดยกำหนดเวลาที่ใช้ในการจุดไฟนาน 5 วินาที และมีการปูพื้นด้านล่างของเครื่องทดสอบด้วยแผ่นสำลีทางการแพทย์หนัก 694.6 มิลลิกรัม มีขนาดพื้นที่ 64 ตารางเซนติเมตร หนา 0.5 เซนติเมตร เพื่อสังเกตการติดไฟของแผ่นสำลีหากเกิดการหลอมหยด)

รูปที่ 3.2 เครื่อง Atlas 45° Automatic Flammability Tester

นำผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ยึดด้วย Rack มาทำการทดสอบ โดยวาง Rack บนเครื่องทดสอบด้วยมุมเอียง 45 องศา หลังจากนั้นจุดไฟให้ได้ความยาว 5/8 นิ้ว บนบริเวณพื้นผิวเหนือปลายผ้าด้านล่าง 19 มิลลิเมตร เป็นเวลา 5 วินาที และบันทึกเวลาที่เปลวไฟเคลื่อนที่ โดยบันทึกเวลาตั้งแต่นำแหล่งต้นไฟออกจนเปลวไฟดับ จะทำการทดสอบอย่างน้อย 3 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย สังเกตการคุแดงหลังเปลวไฟดับ และสังเกตการลามไฟและการหลอมหยดบนสำลีทางการแพทย์ที่รองด้านล่างของเครื่องทดสอบ

3.6 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเทคนิค ATR-FTIR

เพื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ โดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, FTIR) แสดงดังรูปที่ 3.3 โดยนำผ้าที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟมาทำการหาแถบการดูดกลืนที่เกิดจากหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ด้วยเทคนิค ATR ซึ่งสามารถบอกถึงโครงสร้างทางเคมีของสารได้

รูปที่ 3.3 เครื่อง Fourier transform infrared spectrometer (FTIR)

3.7 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ

Thermogravimetric analysis (TGA)

การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอโมกราวิเมทริกแอนาลิซิส (Thermogravimetric analysis, TGA) เพื่อศึกษาอุณหภูมิในการสลายตัวของสารเคมีที่ทำการตกแต่งหน่วงไฟบนผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวน รวมทั้งหาปริมาณที่เหลืออยู่ของสารเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การทดสอบใช้เครื่อง Thermogravimetric analysis รุ่น METTLER TOLEDO TGA/SDTA 851^e แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยเตรียมผ้าปริมาณ 5 มิลลิกรัม สำหรับอุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษาอยู่ในช่วง 30-600 องศาเซลเซียส และให้อัตราความร้อน (heating rate) 20 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้บรรยากาศออกซิเจนที่ไหลด้วยอัตราเร็ว (gas flow rate) 20 มิลลิลิตร/นาที

รูปที่ 3.4 เครื่อง Thermogravimetric analysis (TGA)

Differential scanning calorimetry (DSC)

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอรีเมทรี (Differential scanning calorimetry, DSC) เพื่อศึกษาอุณหภูมิในการหลอมเหลวของผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ การทดสอบใช้เครื่อง Differential scanning calorimeter รุ่น METTLER TOLEDO $DSC822^e$ แสดงดังรูปที่ 3.5 โดยตัดผ้าเป็นชิ้นเล็กๆ จากนั้นบรรจุลงใน aluminium crucible สำหรับอุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษาอยู่ในช่วง 30-300 องศาเซลเซียส โดยเพิ่มอุณหภูมิจาก 30 องศาเซลเซียส ถึง 300 องศาเซลเซียส และลดอุณหภูมิจาก 300 องศาเซลเซียส ถึง 30 องศาเซลเซียส และจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิขึ้นอีกครั้งจาก 30 องศาเซลเซียส ถึง 300 องศา

เซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มและการลดอุณหภูมิเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส/นาที ทดสอบภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

รูปที่ 3.5 เครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC)

3.8 การศึกษาสัณฐานวิทยาของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาเพื่อแสดงให้เห็นพื้นผิวและลักษณะของเส้นใยที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ ขั้นตอนการทดสอบทำได้โดยนำผ้าที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟขนาดความกว้าง 1 เซนติเมตร และความยาว 1 เซนติเมตร มาทำการเคลือบทองด้วย sputter-coater โดยทองจะถูกทำให้แตกตัวเพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าขณะตรวจสอบในภาวะที่เป็นสุญญากาศ โดยใช้เครื่อง Scanning electron microscope (SEM) รุ่น JEOL JSM-6480LV แสดงดังรูปที่ 3.6

รูปที่ 3.6 เครื่อง Scanning electron microscope (SEM)

3.9 การศึกษาความแข็งกระด้างของผ้า

เพื่อศึกษาผลของของเบนโทไนต์ ผงกาวไหม และสารประกอบฟอสฟอรัสที่ใช้เป็นสารหน่วงไฟว่ามีผลต่อความแข็งกระด้างของผ้ามากน้อยเพียงใด เมื่อเปรียบเทียบกับผ้าที่ไม่ผ่านการตกแต่ง ทำการทดสอบตามมาตรฐาน JIS 1096:1999 METHOD A (45°CANTILEVER METHOD) ด้วยเครื่อง CANTILEVER TESTER แสดงดังรูปที่ 3.7 วิธีการทดสอบทำได้โดย เตรียมผ้าขนาดความกว้าง 2 เซนติเมตร และความยาว 15 เซนติเมตร จากนั้นวางผ้าที่เครื่องทดสอบจัดผ้าให้อยู่ในแนวเดียวกันกับไม้บรรทัดหลังจากนั้นค่อยๆ เลื่อนผ้าให้ปลายผ้าโค้งตกลงมาในแนว 45° และอ่านค่าที่ไม้บรรทัดหน่วยเป็นมิลลิเมตร ทำการทดสอบซ้ำ 5 ชิ้นตัวอย่าง ถ้าค่าความกระด้าง (มิลลิเมตร) ที่ได้มีค่ามากกว่าผ้าที่ไม่ผ่านการตกแต่งแสดงว่าผ้ามีความกระด้างขึ้น

รูปที่ 3.7 เครื่อง CANTILEVER TESTER

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 พฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนแนว 45 องศา

4.1.1 ผลของเบนโทไนต์และเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟต

พฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟและการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งด้วยเบนโทไนต์ และเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟต และภาพของผ้าพอลิเอสเทอร์ภายหลังการทดสอบการติดไฟในแนว 45 องศา ในรูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงให้เห็นชัดเจนว่าผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ไม่ผ่านการตกแต่งเมื่อติดไฟแล้วได้เกิดการหลอมหยดที่ทำให้แผ่นสำลีรองรับเกิดลุกไหม้อย่างรุนแรงแต่เมื่อนำมาตกแต่งด้วยเบนโทไนต์พบว่าเมื่อปริมาณเบนโทไนต์เพิ่มขึ้นผ้ายังคงมีการหลอมหยดและทำให้แผ่นสำลีลุกไหม้ได้แต่เมื่อปริมาณเบนโทไนต์เพิ่มขึ้นถึง 10 เปอร์เซ็นต์ผ้ายังคงลุกไหม้ แต่ไม่เกิดการหลอมหยด เนื่องจากเบนโทไนต์มีสมบัติทนความร้อนสูงได้ดี เพราะมีชั้นซิลิเกตที่เป็นฉนวนที่ดีและเมื่อเผาไหม้จะทำให้เกิดชาร์ [35]

อย่างไรก็ตามเมื่อตกแต่งผ้าพอลิเอสเทอร์ด้วยเบนโทไนต์กับเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟต ได้แก่ แอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต พบว่าพฤติกรรมการติดไฟเปลี่ยนแปลงไป โดยผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยเบนโทไนต์ 1 และ 3 เปอร์เซ็นต์ กับแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 เปอร์เซ็นต์ ไม่เกิดการลามไฟ ไฟดับเองได้เมื่อนำแหล่งต้นไฟออกและไม่เกิดการหลอมหยด แต่เมื่อปริมาณเบนโทไนต์เพิ่มขึ้นผ้าติดไฟและเกิดการลามไฟนานกว่าผ้าที่ไม่ได้ผ่านการตกแต่ง และยังเกิดการหลอมหยดลงมาทำให้แผ่นสำลีลุกไหม้ค่อนข้างรุนแรงอีกด้วย

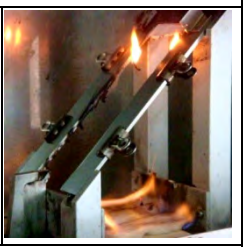
สำหรับผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยเบนโทไนต์ผสมกับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ก็มีพฤติกรรมการติดไฟเช่นเดียวกันกับที่ผสมกับแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โดยผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยเบนโทไนต์ 1 และ 3 เปอร์เซ็นต์ กับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 เปอร์เซ็นต์ ติดไฟแต่ไฟก็ดับเองได้เมื่อเอาแหล่งต้นไฟออก แต่เมื่อปริมาณเบนโทไนต์เพิ่มขึ้นผ้าติดไฟและเกิดการลามไฟนานกว่าผ้าที่ไม่ได้ผ่านการตกแต่ง และยังเกิดการหลอมหยดลงมาทำให้แผ่นสำลีลุกไหม้ค่อนข้างรุนแรง แต่เมื่อตรวจดูภาพการเผาไหม้และภาพของผ้าพอลิเอสเทอร์ที่เหลือหลังจากการทดสอบแล้วในรูปที่ 4.2 พบว่าปริมาณเบนโทไนต์ที่ผสมเพียง

1 เปอร์เซ็นต์ จะให้ผลดีกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากบริเวณที่ผ้าหลอมมีพื้นที่น้อยกว่า นั่นคือเปลวไฟดับได้เองเร็วกว่า

โดยสรุปแล้วปริมาณเบนโทไนต์ที่เพิ่มขึ้นสามารถต้านการหลอมหยดได้แต่ไม่ได้ทำให้ผ้าหน่วงไฟเพิ่มขึ้นในทางกลับกันทำให้ผ้าติดไฟและไฟลามนานกว่าผ้าที่ไม่ได้ผ่านการตกแต่ง นอกจากนี้ผ้าที่ตกแต่งด้วยเบนโทไนต์ 10 เปอร์เซ็นต์หลังจากผ้าเผาไหม้จนหมดมีชาร์เกิดขึ้นเล็กน้อย ส่วนผ้าที่ผ่านการตกแต่งด้วยเบนโทไนต์กับเกลือแอมโมเนียมทั้งสองชนิด ปริมาณเบนโทไนต์ที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ทำให้ผ้าหน่วงไฟเพิ่มขึ้นและยังเกิดการหลอมหยดทำให้แผ่นสำลีลุกไหม้ นอกจากนี้ยังพบว่าผ้าที่ตกแต่งด้วยสารละลายเบนโทไนต์มากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ไม่เหมาะที่จะนำมาตกแต่งผ้าเพราะมีความหนืดสูงเกินไป

สูตร	3 วินาที	5 วินาที	7 วินาที	10 วินาที
untreated				
	ผ้าลุกติดไฟ และหดหนีเปลวไฟ มีควันสีดำเล็กน้อย และเกิดการหลอมหยดมีลักษณะเป็นของแข็ง เปราะสีดำ และติดไฟบนวัสดุที่รองอยู่ด้านล่าง			
B1				
	ผ้าลุกติดไฟ และหดหนีเปลวไฟ เกิดการลุกไหม้อย่างรุนแรง มีควันสีดำเล็กน้อย และเกิดการหลอมหยดมีลักษณะเป็นของแข็งเปราะสีดำ และติดไฟบนวัสดุที่รองอยู่ด้านล่าง			

รูปที่ 4.1 ภาพพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์และเบนโทไนต์กับเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟต ณ เวลาแตกต่างกันหลังจากเริ่มจุดไฟ (เวลาจุดไฟ 5 วินาที)

สูตร	3 วินาที	5 วินาที	7 วินาที	10 วินาที
B3				
	ผ้าลุกติดไฟ และหดหนีเปลวไฟ เกิดการลุกไหม้อย่างรุนแรง มีควันสีดำเล็กน้อย และเกิดการหลอมหยดมีลักษณะเป็นของแข็งเปราะสีดำ และติดไฟบนวัสดุที่รองอยู่ด้านล่าง			
B5				
	ผ้าลุกติดไฟ และหดหนีเปลวไฟ เกิดการลุกไหม้อย่างรุนแรง มีควันสีดำเล็กน้อย และเกิดการหลอมหยดมีลักษณะเป็นของแข็งเปราะสีดำ และติดไฟบนวัสดุที่รองอยู่ด้านล่าง			
B7				
	ผ้าลุกติดไฟ และหดหนีเปลวไฟ เกิดการลุกไหม้อย่างรุนแรง มีควันสีดำเล็กน้อย และเกิดการหลอมหยดมีลักษณะเป็นของแข็งเปราะสีดำ และติดไฟบนวัสดุที่รองอยู่ด้านล่าง			
B10				
	ผ้าลุกติดไฟ และเกิดการลุกไหม้อย่างรุนแรง มีควันสีเทาดำเล็กน้อย ผ้าไม่เกิดการหลอมหยด เมื่อไฟไหม้ผ้าหมดเกิดชาร์เล็กน้อย			

รูปที่ 4.1 (ต่อ)

สูตร	3 วินาที	5 วินาที	7 วินาที	10 วินาที
B1MA3				
	ผ้าลุกติดไฟ และหดหนีเปลวไฟ ผ้าไม่เกิดการหลอมหยด			
B3MA3				
	ผ้าลุกติดไฟ และหดหนีเปลวไฟ มีควันสีเทาดำเล็กน้อย และเกิดการหลอมหยดมีลักษณะเป็นของแข็งสีดำ และติดไฟบนวัสดุที่รองอยู่ด้านล่าง			
B5MA3				
	ผ้าลุกติดไฟ และหดหนีเปลวไฟ มีควันสีเทาดำเล็กน้อย และเกิดการหลอมหยดมีลักษณะเป็นของแข็งสีดำ และติดไฟบนวัสดุที่รองอยู่ด้านล่าง			
B7MA3				
	ผ้าลุกติดไฟ และหดหนีเปลวไฟ มีควันสีเทาดำเล็กน้อย และเกิดการหลอมหยดมีลักษณะเป็นของแข็งสีดำ และติดไฟบนวัสดุที่รองอยู่ด้านล่าง			

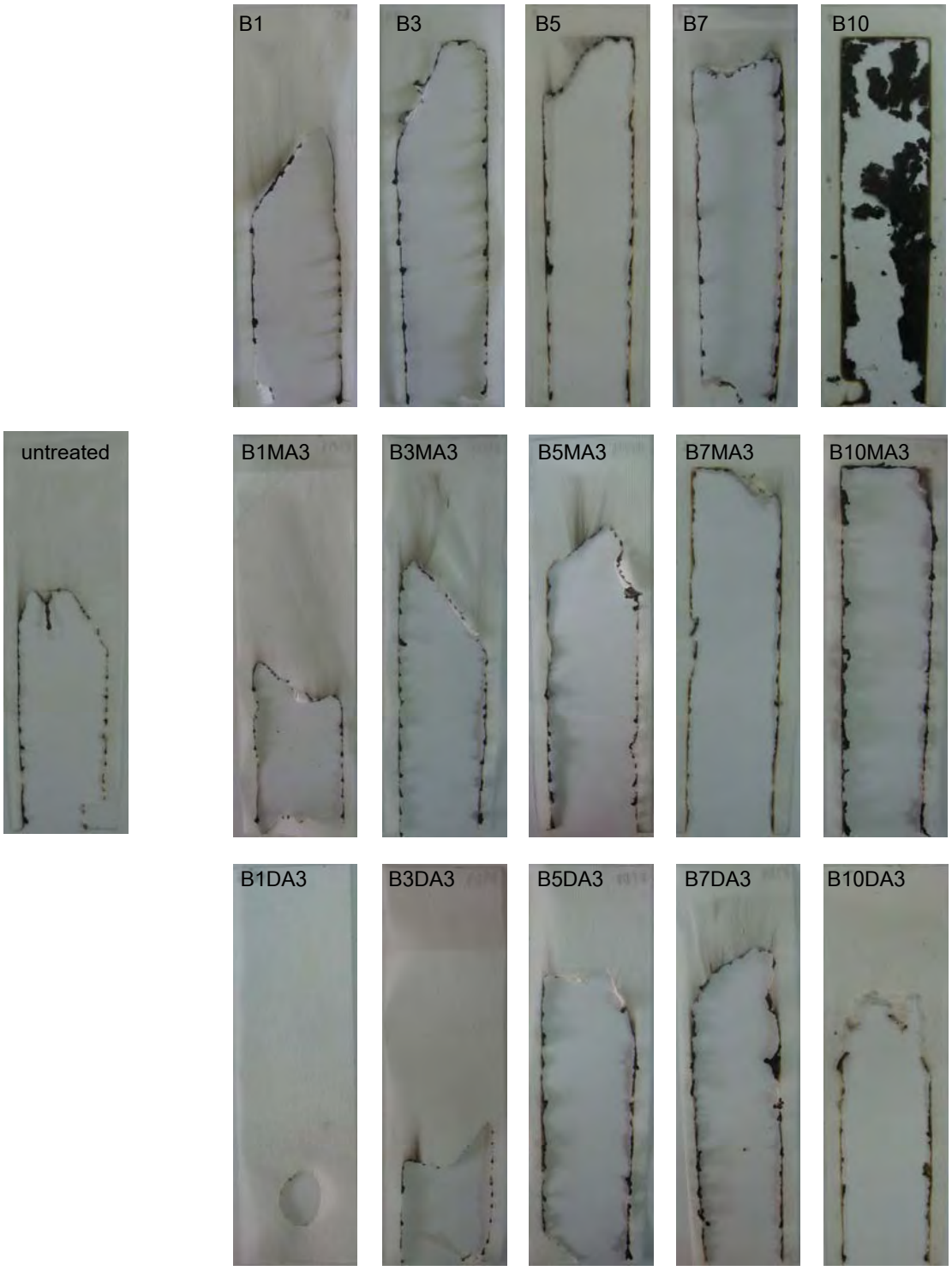
รูปที่ 4.1 (ต่อ)

สูตร	3 วินาที	5 วินาที	7 วินาที	10 วินาที
B10MA3				
	ผ้าลุกติดไฟ และหดหนีเปลวไฟ มีควันสีเทาดำเล็กน้อย และเกิดการหลอมหยดมีลักษณะเป็นของแข็งสีดำ และติดไฟบนวัสดุที่รองอยู่ด้านล่าง			
B1DA3				
	ไฟดับเองได้ทันทีเมื่อนำแหล่งต้นไฟออก			
B3DA3				
	ผ้าลุกติดไฟ หดหนีเปลวไฟ และไม่เกิดการหลอมหยด			
B5DA3				
	ผ้าลุกติดไฟ และหดหนีเปลวไฟ มีควันสีเทาดำเล็กน้อย และเกิดการหลอมหยดมีลักษณะเป็นของแข็งสีดำ และติดไฟบนวัสดุที่รองอยู่ด้านล่าง			

รูปที่ 4.1 (ต่อ)

สูตร	3 วินาที	5 วินาที	7 วินาที	10 วินาที
B7DA3				
	ผ้าลุกติดไฟ และหดหนีเปลวไฟ มีควันสีเทาดำเล็กน้อย และเกิดการหลอมหยดมีลักษณะเป็นของแข็งสีดำ และติดไฟบนวัสดุที่รองอยู่ด้านล่าง			
B10DA3				
	ผ้าลุกติดไฟ และหดหนีเปลวไฟ มีควันสีเทาดำเล็กน้อย และเกิดการหลอมหยดมีลักษณะเป็นของแข็งสีดำ และติดไฟบนวัสดุที่รองอยู่ด้านล่าง			

รูปที่ 4.1 (ต่อ)



รูปที่ 4.2 ภาพของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์และเบนโทไนต์กับเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟตที่เหลืออยู่ภายหลังการทดสอบพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเทอร์แนว 45 องศา

ตารางที่ 4.1 ผลของการทดสอบการติดไฟแนว 45 องศาของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ และเบนโทไนต์กับเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟตในปริมาณที่แตกต่างกัน

สูตร	add-on (%)	การทดสอบการติดไฟแนว 45 องศา				
		เวลาที่ไฟลามหลังนำแหล่งต้นไฟออก (วินาที)	เวลาที่เกิดคุแดงหลังเปลวไฟดับ (วินาที)	การเกิดชาร์	การหลอมหยด	สภาพการลุกไหม้ของแผ่นสำลี
untreated	-	3.8	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	หยด	ลุกไหม้อย่างรุนแรง
B1	3.9	4.5	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	หยด	ลุกไหม้
B3	4.1	4.7	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	หยด	ลุกไหม้
B5	5.9	5.4	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	หยด	ลุกไหม้
B7	6.8	5.9	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	หยด	ลุกไหม้
B10	10.3	8.0	ไม่เกิดการคุแดง	เกิดชาร์	ไม่หยด	ไม่ลุกไหม้
B1MA3	5.4	3.3	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	ไม่หยด	ไม่ลุกไหม้
B3MA3	7.4	6.2	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	หยด	ลุกไหม้
B5MA3	8.2	8.6	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	หยด	ลุกไหม้
B7MA3	11.9	10.0	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	หยด	ลุกไหม้
B10MA3	15.5	8.5	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	หยด	ลุกไหม้
B1DA3	3.9	n.d[a]	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	ไม่หยด	ไม่ลุกไหม้
B3DA3	7.6	6.6	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	ไม่หยด	ไม่ลุกไหม้
B5DA3	9.4	8.5	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	หยด	ลุกไหม้
B7DA3	12.58	8.30	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	หยด	ลุกไหม้
B10DA3	15.08	8.75	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	หยด	ลุกไหม้

n.d : not detectable (ไม่สามารถวัดได้) a : เมื่อนำแหล่งต้นไฟออกไฟดับทันที

4.1.2 ผลของผงกาวไหมและเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟต

พฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟและการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งด้วยผงกาวไหมและเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟต และภาพของผ้าพอลิเอสเทอร์ภายหลังการทดสอบการติดไฟในแนว 45 องศา ในรูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงให้เห็นชัดเจนว่าผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยผงกาวไหมเพียงอย่างเดียวยังคงติดไฟและลุกไหม้มากกว่าผ้าที่ไม่ผ่านการตกแต่งอีกทั้งยังมีการหลอมหยดและทำให้แผ่นสำลีรองรับลุกไหม้โดยเฉพาะเมื่อปริมาณผงกาวไหมเพิ่มขึ้นการหลอมหยดจะเกิดเร็วขึ้นและแผ่นสำลีรองรับลุกไหม้อย่างรุนแรง อย่างไรก็ตามเปลวไฟก็ไม่รุนแรงเท่าเปลวไฟที่ลามบนผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยเบนโทไนต์ แต่เมื่อตกแต่งผ้าพอลิเอสเทอร์ด้วยผงกาวไหมกับเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟต ได้แก่ แอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และ ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต พบว่าผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการตกแต่งด้วยผงกาวไหม 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์กับแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 เปอร์เซ็นต์ ติดไฟแต่ไม่เกิดการลามไฟและไม่เกิดการหลอมหยดลงมาทำให้แผ่นสำลีรองรับลุกไหม้ ผ้าจะลุกติดไฟและลามไฟเร็วขึ้นแต่ไม่เกิดการหลอมหยดเมื่อปริมาณผงกาวไหมเพิ่มขึ้น

สำหรับผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยผงกาวไหมผสมกับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ก็มีพฤติกรรมการติดไฟเช่นเดียวกันกับที่ผสมกับแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โดยผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการตกแต่งด้วยผงกาวไหม 1, 3 และ 5เปอร์เซ็นต์ กับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 เปอร์เซ็นต์ ติดไฟแต่ไฟก็ดับเองได้เมื่อเอาแหล่งต้นไฟออก และไม่เกิดการหลอมหยด แต่เมื่อปริมาณผงกาวไหมเพิ่มขึ้นอีก พบว่าผ้าลุกติดไฟและลามไฟเร็วขึ้นแต่ไม่เกิดการหลอมหยด นอกจากนี้ปริมาณผงกาวไหมที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดชาร์อีกด้วย

สรุปได้ว่าสารประกอบไนโตรเจนที่อยู่ในผงกาวไหมเมื่อนำมาใช้ร่วมกับเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟตทำให้การหลอมของพอลิเอสเทอร์เปลี่ยนแปลงไป ผ้าไม่เกิดการหลอมหยดแต่เกิดเป็นระบบหน่วงไฟที่มีการสร้างชั้นชาร์เพิ่มขึ้น

สูตร	3 วินาที	5 วินาที	7 วินาที	10 วินาที
S1				
	ผ้าลุกติดไฟ และหดหนีเปลวไฟ มีควันสีดำเล็กน้อย เกิดการหลอมหยดมีลักษณะเป็นของแข็งเปราะสีดำ และติดไฟบนวัสดุที่รองอยู่ด้านล่าง			
S3				
	ผ้าลุกติดไฟ และหดหนีเปลวไฟ มีควันสีดำเล็กน้อย เกิดการหลอมหยดมีลักษณะเป็นของแข็งเปราะสีดำ และติดไฟบนวัสดุที่รองอยู่ด้านล่าง			
S5				
	ผ้าลุกติดไฟ และหดหนีเปลวไฟ มีควันสีเทาดำเล็กน้อย เกิดการหลอมหยดมีลักษณะเป็นของแข็งสีดำ และติดไฟบนวัสดุที่รองอยู่ด้านล่าง			
S7				
	ผ้าลุกติดไฟ และหดหนีเปลวไฟ มีควันสีดำเล็กน้อย เกิดการหลอมหยดมีลักษณะเป็นของแข็งเปราะสีดำ และติดไฟบนวัสดุที่รองอยู่ด้านล่าง			

รูปที่ 4.3 ภาพพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม และผงกาวไหมกับเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟต ณ เวลาแตกต่างกันหลังจากเริ่มจุดไฟ (เวลาจุดไฟ 5 วินาที)

สูตร	3 วินาที	5 วินาที	7 วินาที	10 วินาที
S10				
	ผ้าลุกติดไฟ และหดหนีเปลวไฟ มีควันสีเทาดำเล็กน้อย เกิดการหลอมหยดมีลักษณะเป็นของแข็งสีดำ และติดไฟบนวัสดุที่รองอยู่ด้านล่าง			
S1MA3				
	ผ้าลุกติดไฟ หดหนีเปลวไฟ และผ้าไม่เกิดการหลอมหยด			
S3MA3				
	ผ้าลุกติดไฟ หดหนีเปลวไฟ และผ้าไม่เกิดการหลอมหยด			
S5MA3				
	ผ้าลุกติดไฟ หดหนีเปลวไฟ และผ้าไม่เกิดการหลอมหยด			
S7MA3				
	ผ้าลุกติดไฟ หดหนีเปลวไฟ และผ้าไม่เกิดการหลอมหยด			

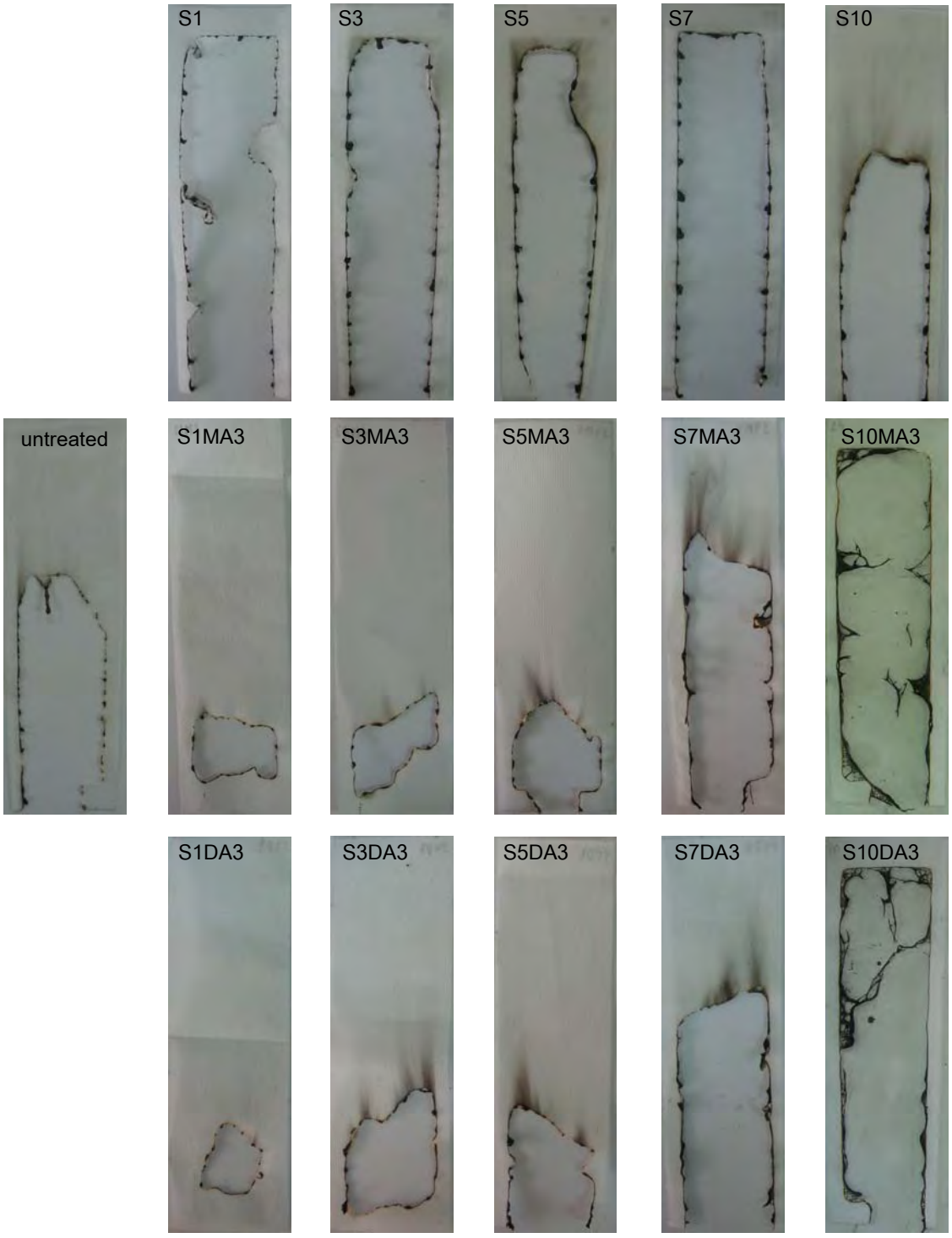
รูปที่ 4.3 (ต่อ)

สูตร	3 วินาที	5 วินาที	7 วินาที	10 วินาที
S10MA3				
	ผ้าลุกติดไฟ และหดหนีเปลวไฟ มีควันสีเทาดำเล็กน้อย ผ้าไม่เกิดการหลอมหยด เมื่อไฟไหม้ผ้าหมดเกิดชาร์เล็กน้อย			
S1DA3				
	ไฟดับเองได้ทันทีเมื่อนำแหล่งต้นไฟออก			
S3DA3				
	ไฟดับเองได้ทันทีเมื่อนำแหล่งต้นไฟออก			
S5DA3				
	ผ้าลุกติดไฟ หดหนีเปลวไฟ และผ้าไม่เกิดการหลอมหยด			
S7DA3				
	ผ้าลุกติดไฟ หดหนีเปลวไฟ และผ้าไม่เกิดการหลอมหยด			

รูปที่ 4.3 (ต่อ)

สูตร	3 วินาที	5 วินาที	7 วินาที	10 วินาที
S10DA3				
	ผ้าลุกติดไฟ และเกิดการลุกไหม้อย่างรุนแรง มีควันสีเทาดำเล็กน้อย ผ้าไม่เกิดการหลอมหยด เมื่อไฟไหม้ผ้าหมดเกิดชาร์เล็กน้อย			

รูปที่ 4.3 (ต่อ)



รูปที่ 4.4 ภาพของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหมและผงกาวไหมกับเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟตที่เหลืออยู่ภายหลังการทดสอบพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเทอร์แนว 45 องศา

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการติดไฟแนว 45 องศาของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม และผงกาวไหมกับเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟตในปริมาณที่แตกต่างกัน

สูตร	add-on (%)	การทดสอบการติดไฟแนว 45 องศา				
		เวลาที่ไฟลามหลังนำแหล่งต้นไฟออก (วินาที)	เวลาที่เกิดคุแดงหลังเปลวไฟดับ (วินาที)	การเกิดชาร์	การหลอมหยด	สภาพการลุกไหม้ของแผ่นสำลี
untreated	-	3.8	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	หยด	ลุกไหม้อย่างรุนแรง
S1	2.6	4.9	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	หยด	ลุกไหม้
S3	5.1	2.8	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	หยด	ลุกไหม้
S5	13.6	3.6	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	หยด	ลุกไหม้
S7	14.0	3.2	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	หยด	ลุกไหม้
S10	15.2	4.0	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	หยด	ลุกไหม้
S1MA3	4.7	0.4	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	ไม่หยด	ไม่ลุกไหม้
S3MA3	7.0	2.4	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	ไม่หยด	ไม่ลุกไหม้
S5MA3	10.5	0.6	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	ไม่หยด	ไม่ลุกไหม้
S7MA3	12.3	10.9	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	ไม่หยด	ไม่ลุกไหม้
S10MA3	14.1	11.5	ไม่เกิดการคุแดง	เกิดชาร์	ไม่หยด	ไม่ลุกไหม้
S1DA3	7.8	1.6	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	ไม่หยด	ไม่ลุกไหม้
S3DA3	8.5	0.4	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	ไม่หยด	ไม่ลุกไหม้
S5DA3	11.6	6.6	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	ไม่หยด	ไม่ลุกไหม้
S7DA3	13.7	2.1	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	ไม่หยด	ไม่ลุกไหม้
S10DA3	14.5	15.4	ไม่เกิดการคุแดง	เกิดชาร์	ไม่หยด	ไม่ลุกไหม้

4.1.3 ผลของผงกาวไหมและเบนโทไนต์

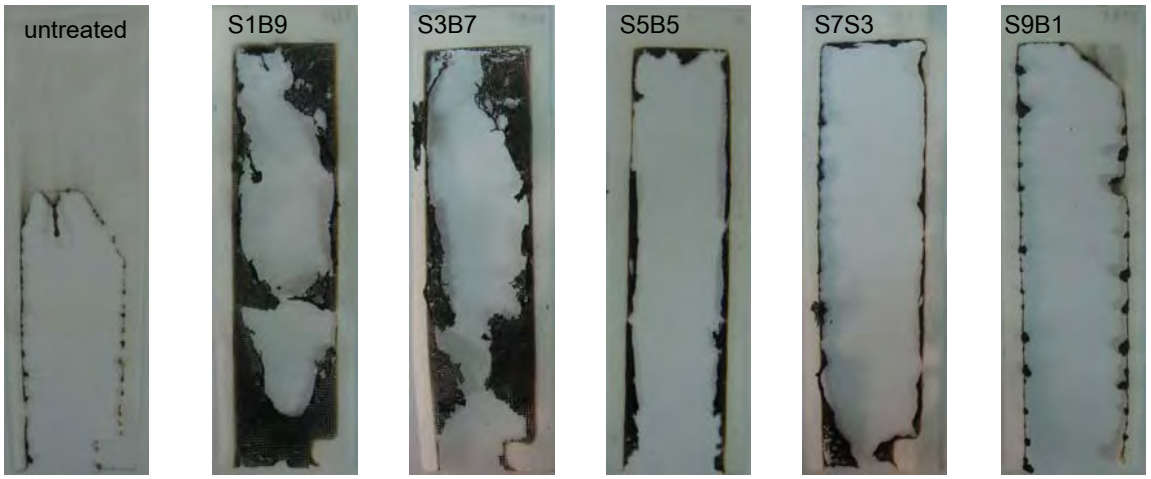
พฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟและการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งด้วยผงกาวไหมและเบนโทไนต์และภาพของผ้าพอลิเอสเทอร์ภายหลังการทดสอบการติดไฟแนว 45 องศา ในรูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงให้เห็นชัดเจนว่าผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยสารตกแต่งรวม 10 เปอร์เซ็นต์ ระหว่าง ผงกาวไหม 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์ กับ เบนโทไนต์ 9, 7, 5, 3 เปอร์เซ็นต์ ติดไฟช้าลง ช่วงแรกไฟจะลุกไหม้อย่างช้าๆและจะค่อยๆ ลุกไหม้อย่างรุนแรง แต่ไม่มีการหลอมหยดเกิดขึ้น ส่วนผ้าที่ตกแต่งด้วยผงกาวไหม 9 เปอร์เซ็นต์ กับ เบนโทไนต์ 1 เปอร์เซ็นต์ ผ้าเกิดการลุกไหม้อย่างรุนแรงและเกิดการหลอมหยดทำให้แผ่นสำลีรองรับลุกไหม้อย่างรุนแรง จะเห็นว่าปริมาณเบนโทไนต์เพิ่มขึ้นสามารถต้านการหลอมหยดได้แต่ไม่ได้ทำให้ผ้าหน่วงไฟเพิ่มขึ้น และปริมาณผงกาวไหมที่เพิ่มขึ้นที่ 9 เปอร์เซ็นต์กลับทำให้ผ้าเกิดการหลอมหยด ซึ่งก็สอดคล้องกับผลการทดลองข้างต้น ที่ปริมาณเบนโทไนต์เพิ่มขึ้นทำให้ผ้าต้านการหลอมหยดได้แต่ไม่ได้ทำให้ผ้าหน่วงไฟเพิ่มขึ้น และผงกาวไหมเพียงอย่างเดียวไม่สามารถหน่วงไฟและต้านการหลอมหยดได้ แต่จะสังเกตได้ว่าเมื่อนำผงกาวไหมและเบนโทไนต์ผสมกันทำให้เกิดชาร์ปริมาณมาก

สูตร	3 วินาที	5 วินาที	7 วินาที	10 วินาที
S1B9				
	ผ้าลุกติดไฟอย่างช้าๆ และเกิดการลุกไหม้อย่างรุนแรง มีควันสีเทาดำเล็กน้อย ผ้าไม่เกิดการหลอมหยด เมื่อไฟไหม้ผ้าหมดมีชาร์เกิดขึ้น			
S3B7				
	ผ้าลุกติดไฟอย่างช้าๆ และเกิดการลุกไหม้อย่างรุนแรง มีควันสีเทาดำเล็กน้อย ผ้าไม่เกิดการหลอมหยด เมื่อไฟไหม้ผ้าหมดมีชาร์เกิดขึ้น			
S5B5				
	ผ้าลุกติดไฟอย่างช้าๆ และเกิดการลุกไหม้อย่างรุนแรง มีควันสีเทาดำเล็กน้อย ผ้าไม่เกิดการหลอมหยด เมื่อไฟไหม้ผ้าหมดมีชาร์เกิดขึ้นเล็กน้อย			
S7B3				
	ผ้าลุกติดไฟอย่างช้าๆ และเกิดการลุกไหม้อย่างรุนแรง มีควันสีเทาดำเล็กน้อย ผ้าไม่เกิดการหลอมหยด			

รูปที่ 4.5 ภาพพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหมกับเบนโทไนต์ ณ เวลาแตกต่างกันหลังจากเริ่มจุดไฟ (เวลาจุดไฟ 5 วินาที)

สูตร	3 วินาที	5 วินาที	7 วินาที	10 วินาที
S9B1				
	ผ้าลุกติดไฟอย่างช้าๆ และเกิดการลุกไหม้อย่างรุนแรง มีควันสีเทาดำเล็กน้อย ผ้าเกิดการหลอมหยด			

รูปที่ 4.5 (ต่อ)



รูปที่ 4.6 ภาพของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหมกับเบน-โทไนต์ที่เหลืออยู่ภายหลังการทดสอบพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเทอร์แนว 45 องศา

ตารางที่ 4.3 ผลของการทดสอบการติดไฟแนว 45 องศา ของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหมกับเบนโทไนต์ในปริมาณที่แตกต่างกัน

สูตรการตกแต่ง	add-on (%)	การทดสอบการติดไฟแนว 45 องศา				
		เวลาที่ไฟลามหลังนำแหล่งต้นไฟออก (วินาที)	เวลาที่เกิดคุแดงหลังเปลวไฟดับ (วินาที)	การเกิดชาร์	การหลอมหยด	สภาพการลุกไหม้ของแผ่นสำลี
untreated	-	3.8	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	หยด	ลุกไหม้อย่างรุนแรง
S1B9	2.6	4.8	ไม่เกิดการคุแดง	เกิดชาร์	ไม่หยด	ไม่ลุกไหม้
S3B7	5.1	5.9	ไม่เกิดการคุแดง	เกิดชาร์	ไม่หยด	ไม่ลุกไหม้
S5B5	13.6	7.4	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	ไม่หยด	ไม่ลุกไหม้
S7B3	14.0	8.7	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	ไม่หยด	ไม่ลุกไหม้
S9B1	15.2	2.9	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	หยด	ลุกไหม้

4.1.4 ผลของเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟต

พฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟและการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งด้วยเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟต 2 ชนิด ได้แก่ แอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และ ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต และภาพของผ้าพอลิเอสเทอร์ภายหลังการทดสอบการติดไฟแนว 45 องศา ในรูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงให้เห็นชัดเจนว่าผ้าที่ตกแต่งด้วยแอมโมเนียมฟอสเฟตทั้ง 2 ไฟดับเองได้ทันทีเมื่อนำแหล่งต้นไฟออก ไม่มีการลามไฟ และไม่มีการหลอมหยดเกิดขึ้น ประสิทธิภาพของแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตในการหน่วงไฟและต้านการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเทอร์มีใกล้เคียงกันในขณะที่ % add on ของไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตมากกว่า

สูตร	3 วินาที	5 วินาที	7 วินาที	10 วินาที
MA3				
	ไฟดับเองได้ทันทีเมื่อนำแหล่งต้นไฟออก			
DA3				
	ไฟดับเองได้ทันทีเมื่อนำแหล่งต้นไฟออก			

รูปที่ 4.7 ภาพพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเตอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟต ได้แก่ แอมโมเนียมได-ไฮโดรเจนฟอสเฟต และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ณ เวลาแตกต่างกันหลังจากเริ่มจุดไฟ (เวลาจุดไฟ 5 วินาที)

รูปที่ 4.8 ภาพของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟตที่เหลืออยู่ภายหลังการทดสอบพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเทอร์แนว 45 องศา

ตารางที่ 4.4 ผลของการทดสอบการติดไฟแนว 45 องศา ของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟตในปริมาณที่แตกต่างกัน

สูตรการตกแต่ง	add-on (%)	การทดสอบการติดไฟแนว 45 องศา				
		เวลาที่ไฟลามหลังนำแหล่งต้นไฟออก (วินาที)	เวลาที่เกิดคุแดงหลังเปลวไฟดับ (วินาที)	การเกิดชาร์	การหลอมหยด	สภาพการลุกไหม้ของแผ่นสำลี
untreated	-	3.8	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	หยด	ลุกไหม้อย่างรุนแรง
MA3	2.6	n.d[a]	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	ไม่หยด	ไม่ลุกไหม้
DA3	5.1	n.d[a]	ไม่เกิดการคุแดง	ไม่เกิดชาร์	ไม่หยด	ไม่ลุกไหม้

n.d : not detectable (ไม่สามารถวัดได้) a : ไฟดับเองได้ทันทีเมื่อนำแหล่งต้นไฟออก

จากการศึกษาผลของเบนโทไนต์ ผงกาวไหม และเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟต ต่อพฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟและการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวน สรุปได้ว่าเบนโทไนต์ และผงกาวไหมอย่างเดียวไม่สามารถหน่วงไฟและต้านการหลอมหยดผ้าพอลิเอสเทอร์ได้ยกเว้นเมื่อปริมาณเบนโทไนต์สูงถึง 10% สามารถต้านการหลอมหยดได้ แต่เมื่อนำสารทั้งสองมาผสมกันโดยมีอัตราส่วนของเบนโทไนต์สูงกว่าจะมีผลทำให้ผ้าพอลิเอสเทอร์ไม่หลอมหยด อย่างไรก็ตามผ้ายังคงมีการลุกไหม้ กล่าวคือทั้งสองสามารถต้านการหลอมหยดแต่ยังไม่สามารถหน่วงไฟได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งต่างจากการใช้เกลือแอมโมเนียมฟอสเฟตเพียงอย่างเดียวก็สามารถต้านการหลอมหยดและเมื่อผ้าติดไฟแล้วก็ดับเองได้เมื่อนำแหล่งต้นไฟออก

4.2 สมบัติทางความร้อนของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ

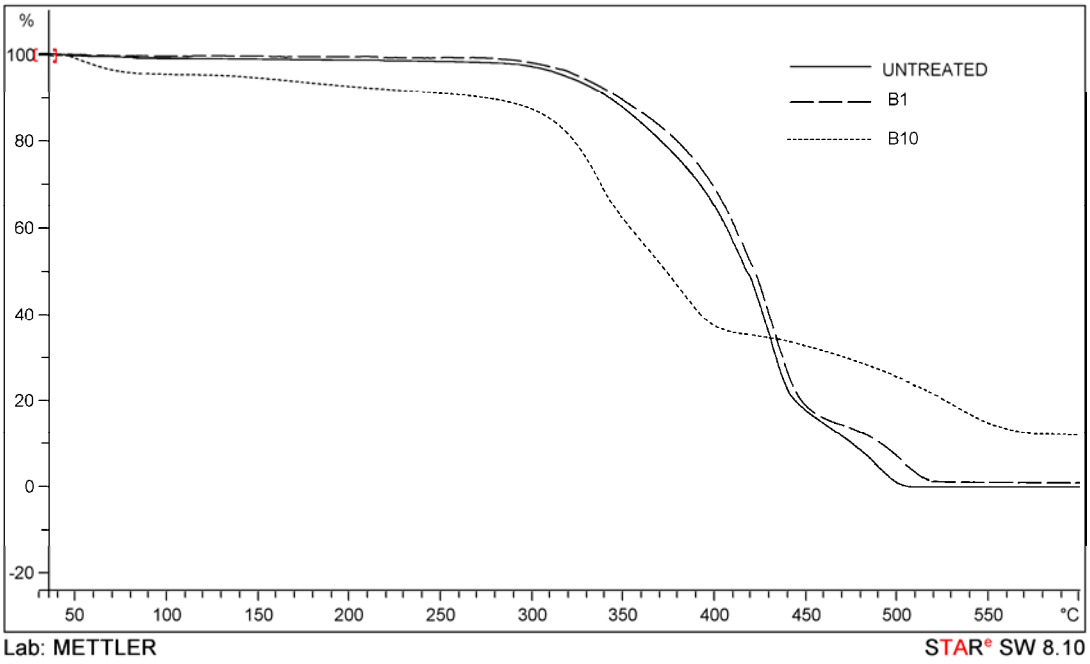
4.2.1 สมบัติทางความร้อนของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเทคนิค TGA

ในงานวิจัยได้เลือกตัวอย่างผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ ทั้งสูตรที่ให้ผลการหน่วงไฟและต้านการหลอมหยดได้ดี และไม่ดีมาทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA เพื่อศึกษาอุณหภูมิในการสลายตัวและปริมาณชาร์ที่เกิดขึ้น ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.9 ถึง 4.20 และตารางที่ 4.5

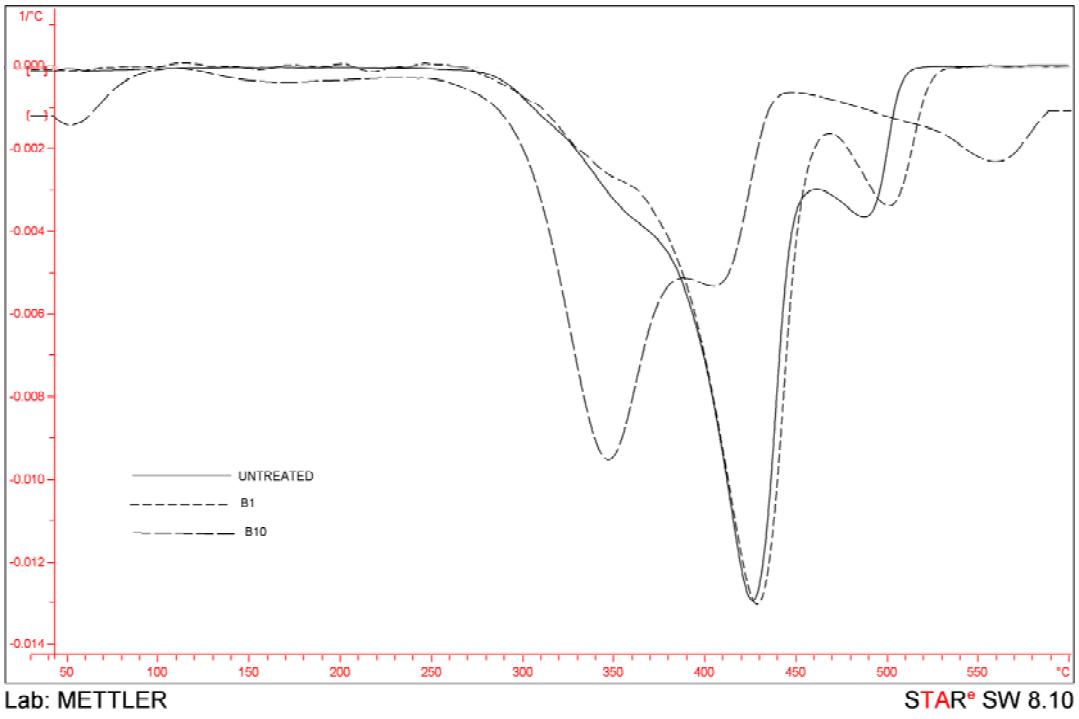
ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิการสลายตัวและปริมาณชาร์ที่เหลืออยู่ของผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ

สูตรการตกแต่ง	T_1 (°ซ)	T_2 (°ซ)	% ชาร์
untreated	351	478	0.23
B1	342	487	1.06
B10	312	516	12.67
B1DA3	343	498	2.34
B10DA3	316	483	11.05
S1	333	473	0.76
S10	-	-	-
S1DA3	335	496	3.21
S10DA3	345	490	3.34
S1B9	316	491	7.50
DA3	322	494	2.19

T_1 อุณหภูมิการสลายตัวขั้นที่ 1 T_2 อุณหภูมิการสลายตัวขั้นที่ 2



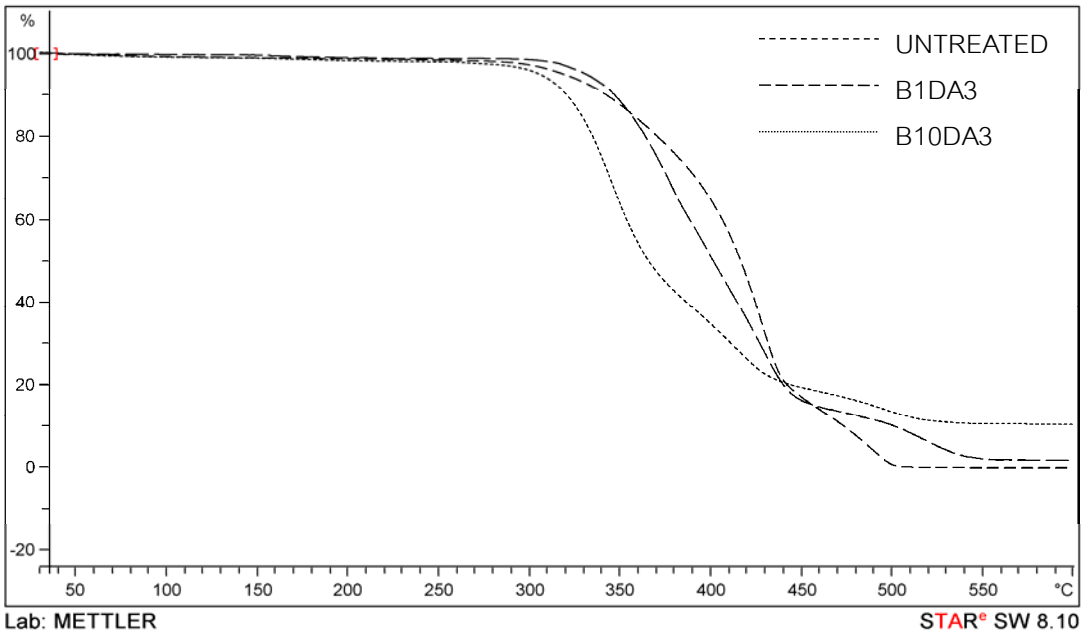
รูปที่ 4.9 TGA เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์



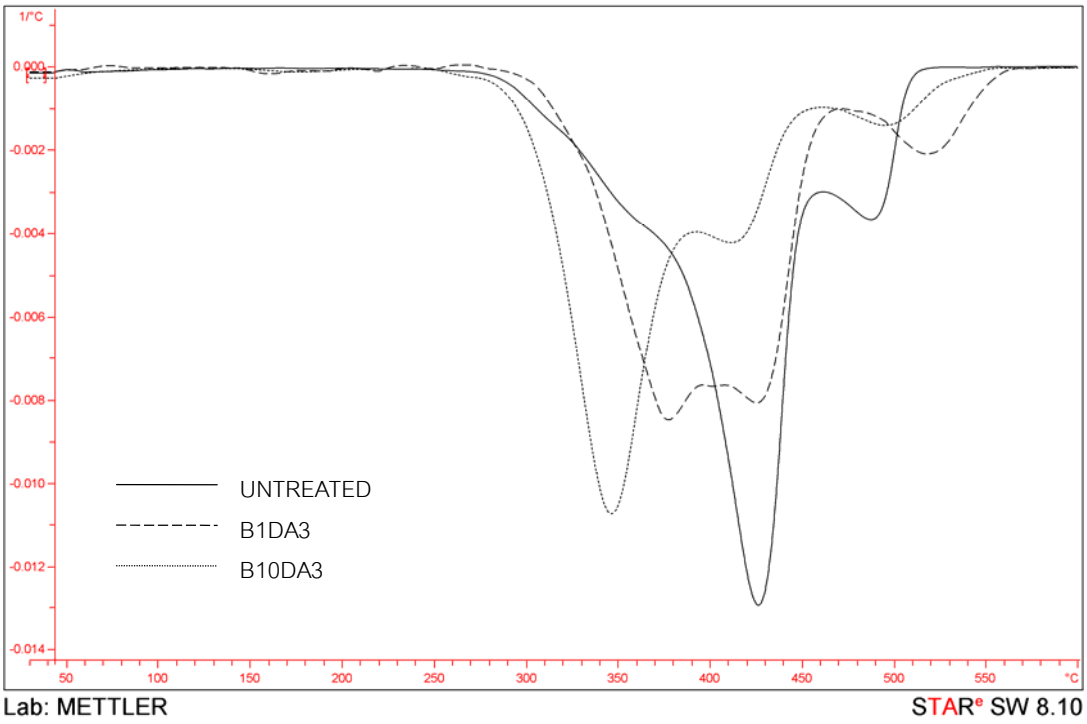
รูปที่ 4.10 DTG เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์

จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ 1 และ 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยเบนโทไนต์ 1และ 10 เปอร์เซ็นต์ มีการสลายตัวสองขั้นเช่นเดียวกันกับผ้าพอลิเอสเทอนอนวูฟเวนที่ไม่ตกแต่งหน่วงไฟและมีอุณหภูมิการสลายตัวเร็วกว่าผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ไม่ตกแต่งหน่วงไฟ คือ ผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ไม่ตกแต่งหน่วงไฟสลายตัวที่อุณหภูมิ 351 องศาเซลเซียส ผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยเบนโทไนต์ 1 เปอร์เซ็นต์ สลายตัวที่อุณหภูมิ 343 องศาเซลเซียส และสลายตัวอีกครั้งที่อุณหภูมิ 487 องศาเซลเซียส ส่วนผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยเบนโทไนต์ 10 เปอร์เซ็นต์ สลายตัวที่อุณหภูมิ 312 องศาเซลเซียส และสลายตัวอีกครั้งที่อุณหภูมิ 516 องศาเซลเซียส และผ้าที่ผ่านตกแต่งด้วยเบนโทไนต์ 10 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณชาร์เหลืออยู่มากที่สุด คือ ประมาณ 12.67 เปอร์เซ็นต์ ชั้นชาร์ที่เกิดขึ้นนั้นมีความคงทนต่อความร้อนปกคลุมพื้นผิววัสดุเปรียบเสมือนฉนวนกันความร้อน ป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจนและป้องกันมิให้สารซึ่งเป็นองค์ประกอบของวัสดุภายในเปลี่ยนสภาพเป็นแก๊สที่ติดไฟ

สรุปได้ว่าผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์เพียงอย่างเดียวมีอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้นและอุณหภูมิที่มีการสลายตัวมากที่สุดต่ำกว่าผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านตกแต่ง



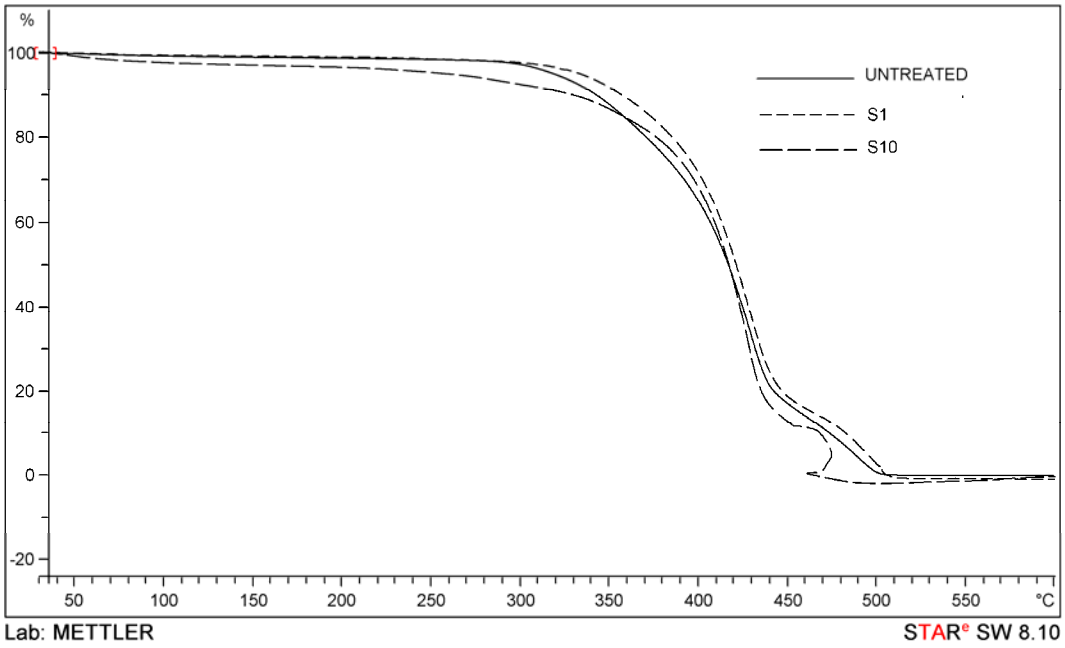
รูปที่ 4.11 TGA เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์กับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต



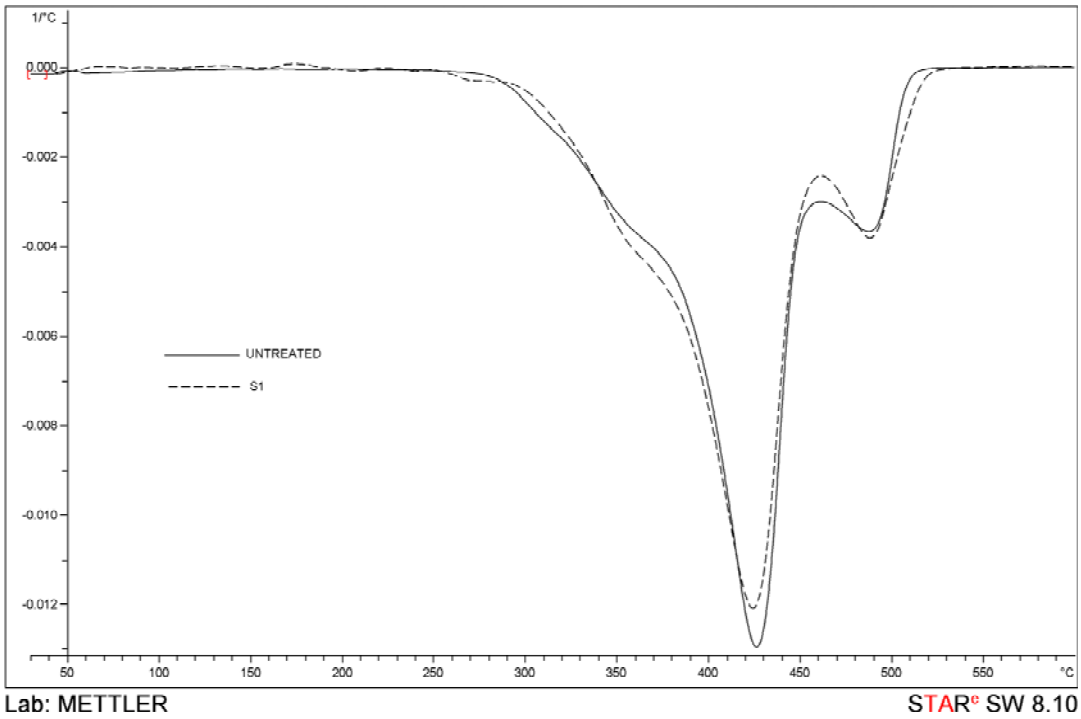
รูปที่ 4.12 DTG เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์กับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต

จากรูปที่ 4.11 และ 4.12 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ 1 และ 10 เปอร์เซ็นต์ กับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยเบนโทไนต์ 1 และ 10 เปอร์เซ็นต์ กับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 เปอร์เซ็นต์ มีการสลายตัวสองขั้นเช่นเดียวกันกับผ้าพอลิเอสเทอนอนวูฟเวนที่ไม่ตกแต่งหน่วงไฟและมีอุณหภูมิการสลายตัวเร็วกว่าผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ไม่ตกแต่งหน่วงไฟ คือ ผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ไม่ตกแต่งหน่วงไฟสลายตัวที่อุณหภูมิ 351 องศาเซลเซียส ผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยเบนโทไนต์ 1 เปอร์เซ็นต์ กับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 เปอร์เซ็นต์ สลายตัวที่อุณหภูมิ 343 องศาเซลเซียส และสลายตัวอีกครั้งที่อุณหภูมิ 498 องศาเซลเซียส ส่วนผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยเบนโทไนต์ 10 เปอร์เซ็นต์ กับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 เปอร์เซ็นต์ สลายตัวที่อุณหภูมิ 316 องศาเซลเซียส และสลายตัวอีกครั้งที่อุณหภูมิ 483 องศาเซลเซียส และมีปริมาณชาร์เหลืออยู่มากที่สุด คือ ประมาณ 11.05 เปอร์เซ็นต์

สรุปได้ว่าผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์กับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต มีอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้นและอุณหภูมิที่มีการสลายตัวมากที่สุดกว่าผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านตกแต่ง และผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยเบนโทไนต์ 1 เปอร์เซ็นต์ กับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 เปอร์เซ็นต์ หน่วงไฟได้ดีกว่าผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยเบนโทไนต์ 10 เปอร์เซ็นต์ กับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 เปอร์เซ็นต์



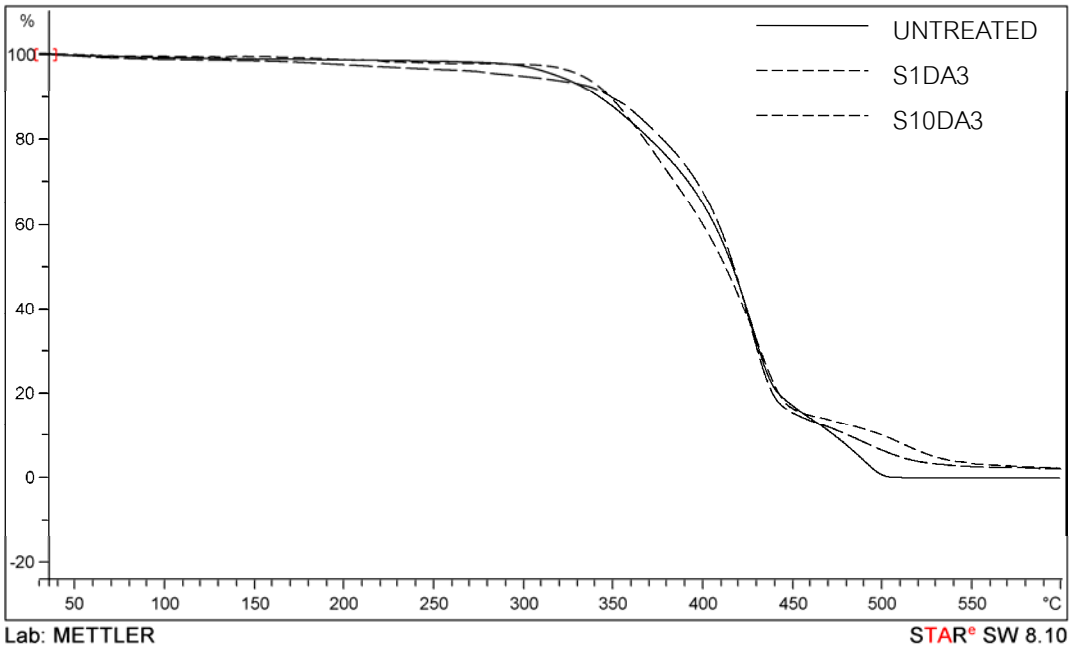
รูปที่ 4.13 TGA เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม



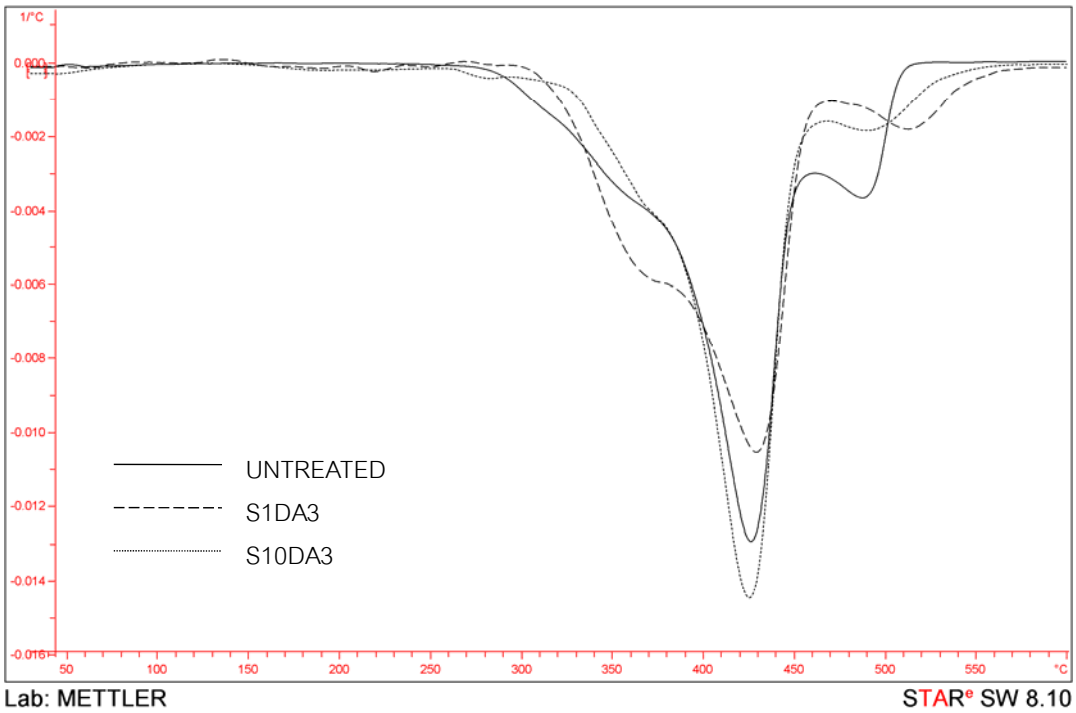
รูปที่ 4.14 DTG เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม

จากรูปที่ 4.13 และ 4.14 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม1 และ 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยผงกาวไหม 1 เปอร์เซ็นต์มีอุณหภูมิการสลายตัวเร็วกว่าผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ไม่ตกแต่งหน่วงไฟ คือ ผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ไม่ตกแต่งหน่วงไฟสลายตัวที่อุณหภูมิ 351 องศาเซลเซียส ผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยผงกาวไหม 1 เปอร์เซ็นต์ สลายตัวที่อุณหภูมิ 333 องศาเซลเซียส และสลายตัวอีกครั้งที่อุณหภูมิ 473 องศาเซลเซียส และมีปริมาณชาร์เหลืออยู่ประมาณ 0.76 เปอร์เซ็นต์ แต่ที่น่าสังเกตพบว่าผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยผงกาวไหม 10 เปอร์เซ็นต์ มีกราฟลักษณะผิดปกติไม่สามารถวิเคราะห์ผล TGA และ DTG ได้

สรุปได้ว่าผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหมเพียงอย่างเดียวมีอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้นและอุณหภูมิที่มีการสลายตัวมากที่สุดต่ำกว่าผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านตกแต่ง



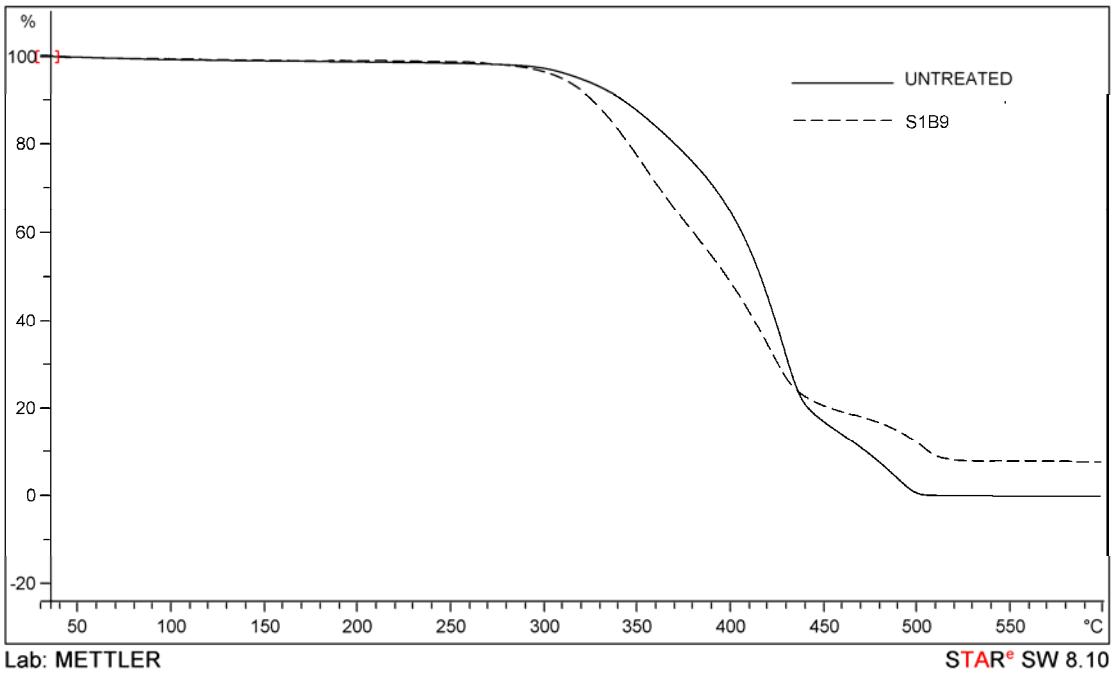
รูปที่ 4.15 TGA เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหมกับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต



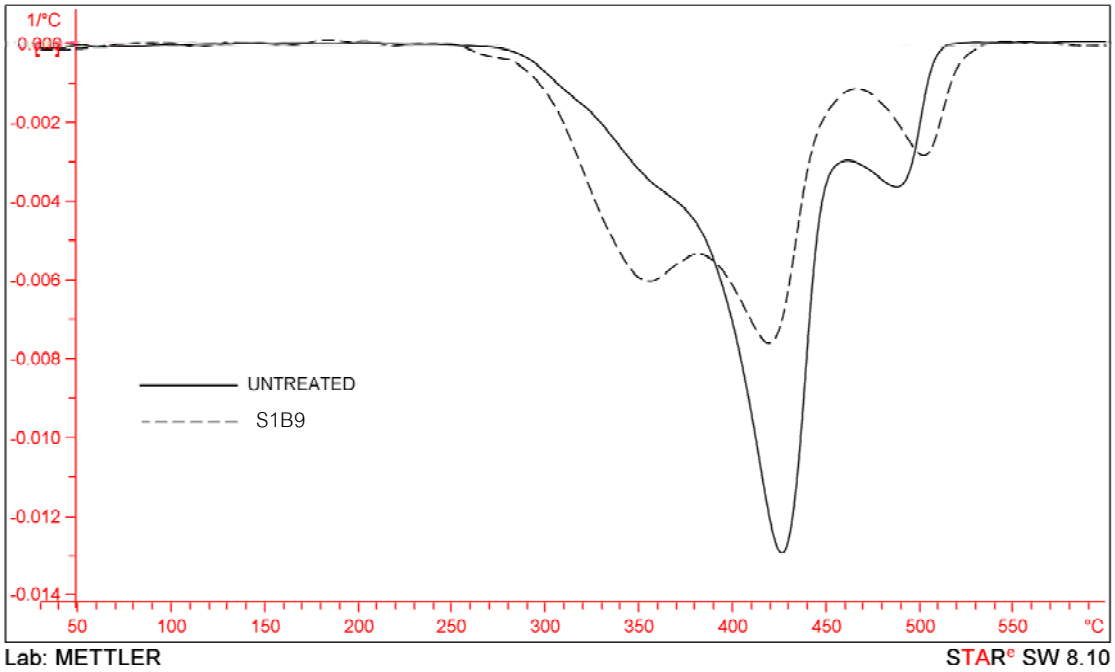
รูปที่ 4.16 DTG เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหมกับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต

จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม 1 และ 10 เปอร์เซ็นต์ กับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยผงกาวไหม 1 และ 10 เปอร์เซ็นต์ กับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 เปอร์เซ็นต์ มีการสลายตัวสองขั้นเช่นเดียวกันกับผ้าพอลิเอสเทอนอนวูฟเวนที่ไม่ตกแต่งหน่วงไฟและมีอุณหภูมิการสลายตัวเร็วกว่าผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ไม่ตกแต่งหน่วงไฟ คือ ผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ไม่ตกแต่งหน่วงไฟสลายตัวที่อุณหภูมิ 351 องศาเซลเซียส ผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยผงกาวไหม 1 เปอร์เซ็นต์ กับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 เปอร์เซ็นต์ สลายตัวที่อุณหภูมิ 335 องศาเซลเซียส และสลายตัวอีกครั้งที่อุณหภูมิ 496 องศาเซลเซียส ส่วนผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยผงกาวไหม 10 เปอร์เซ็นต์ กับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 เปอร์เซ็นต์ สลายตัวที่อุณหภูมิ 345 องศาเซลเซียส และสลายตัวอีกครั้งที่อุณหภูมิ 490 องศาเซลเซียส และปริมาณชาร์ที่เหลืออยู่ของผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยผงกาวไหม 1 และ 10 เปอร์เซ็นต์ กับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 เปอร์เซ็นต์ ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ไม่ตกแต่ง

สรุปได้ว่าผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหมกับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตมีอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้นและอุณหภูมิที่มีการสลายตัวมากที่สุดกว่าผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านตกแต่ง



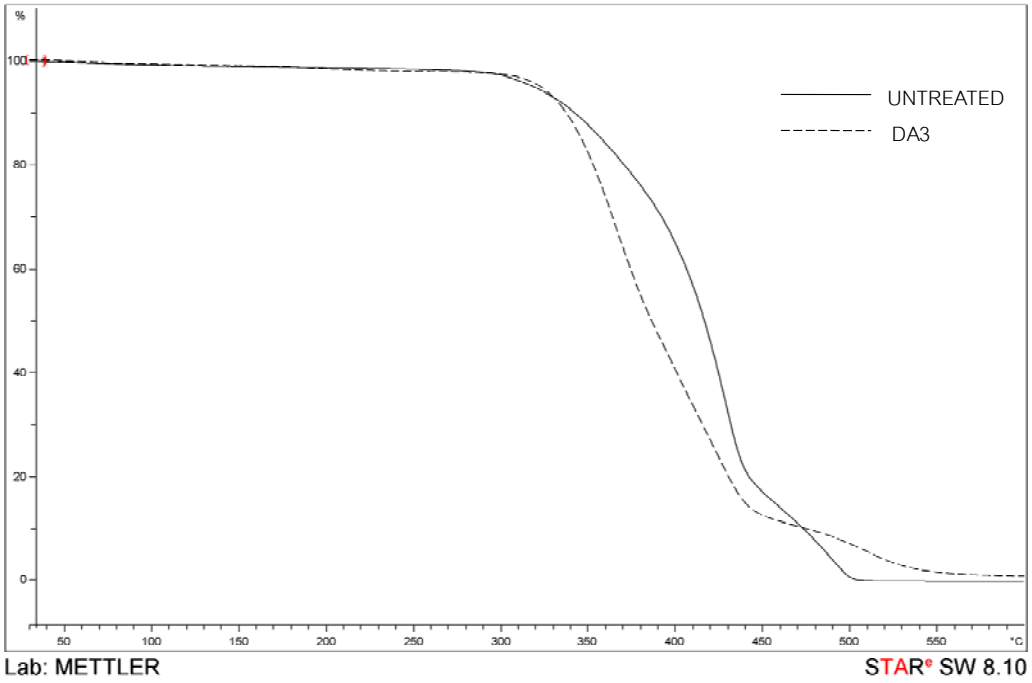
รูปที่ 4.17 TGA เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหมกับเบนโทไนต์



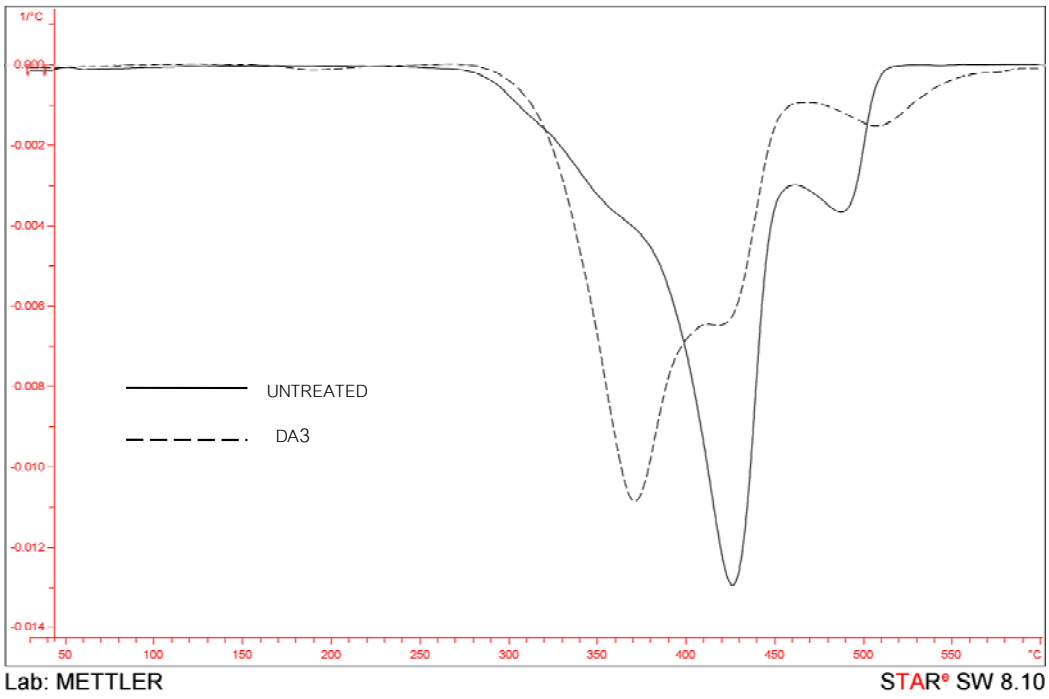
รูปที่ 4.18 DTG เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหมกับเบนโทไนต์

จากรูปที่ 4.17 และ 4.18 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม 1 เปอร์เซ็นต์ กับเบนโทไนต์ 9 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยผงกาวไหม 1 เปอร์เซ็นต์ กับเบนโทไนต์ 9 เปอร์เซ็นต์ มีการสลายตัวสองขั้นเช่นเดียวกันกับผ้าพอลิเอสเทอนอนวูฟเวนที่ไม่ตกแต่งหน่วงไฟและมีอุณหภูมิการสลายตัวเร็วกว่าผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ไม่ตกแต่งหน่วงไฟ คือ ผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ไม่ตกแต่งหน่วงไฟสลายตัวที่อุณหภูมิ 351 องศาเซลเซียส ผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยผงกาวไหม 1 เปอร์เซ็นต์ กับเบนโทไนต์ 9 เปอร์เซ็นต์ สลายตัวที่อุณหภูมิ 316 องศาเซลเซียส และสลายตัวอีกครั้งที่อุณหภูมิ 491 องศาเซลเซียส และมีปริมาณชาร์เหลืออยู่ประมาณ 7.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ไม่ตกแต่งหน่วงไฟ

สรุปได้ว่าผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหมกับเบนโทไนต์มีอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้นและอุณหภูมิที่มีการสลายตัวมากที่สุดกว่าผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านตกแต่ง



รูปที่ 4.19 TGA เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต



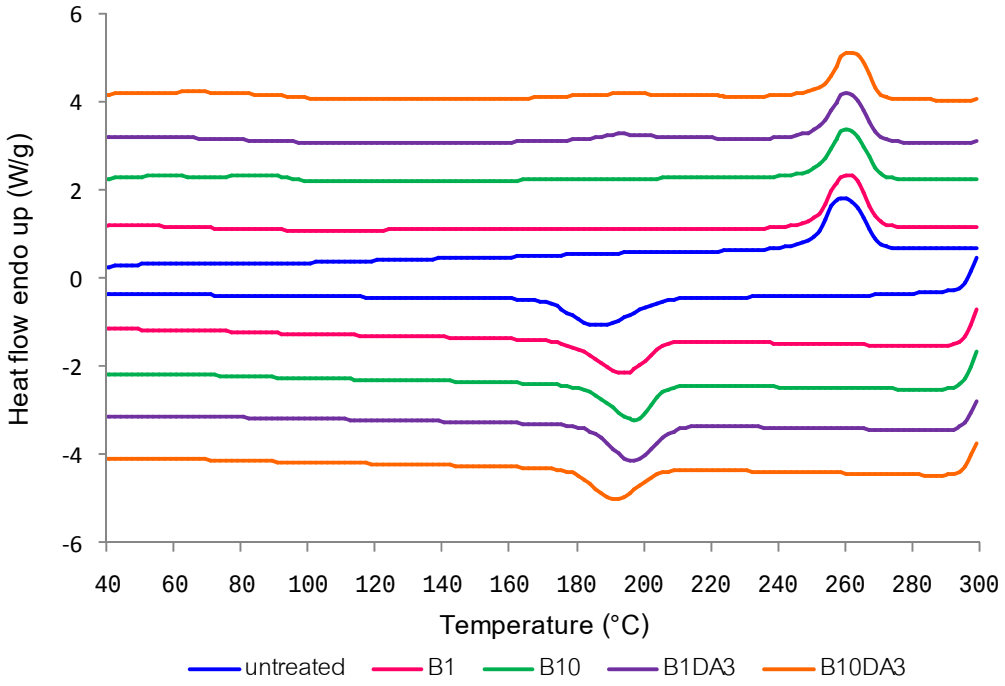
รูปที่ 4.20 DTG เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต

จากรูปที่ 4.19 และ 4.20 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 เปอร์เซ็นต์ มีการสลายตัวสองขั้นเช่นเดียวกันกับผ้าพอลิเอสเทอนอนวูฟเวนที่ไม่ตกแต่งหน่วงไฟและมีอุณหภูมิการสลายตัวเร็วกว่าผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ไม่ตกแต่งหน่วงไฟ คือ ผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ไม่ตกแต่งหน่วงไฟสลายตัวที่อุณหภูมิ 351 องศาเซลเซียส ผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 เปอร์เซ็นต์ สลายตัวที่อุณหภูมิ 322 องศาเซลเซียส และสลายตัวอีกครั้งที่อุณหภูมิ 494 องศาเซลเซียส และมีปริมาณชาร์เหลืออยู่ประมาณ 2.19 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ไม่ตกแต่งหน่วงไฟ

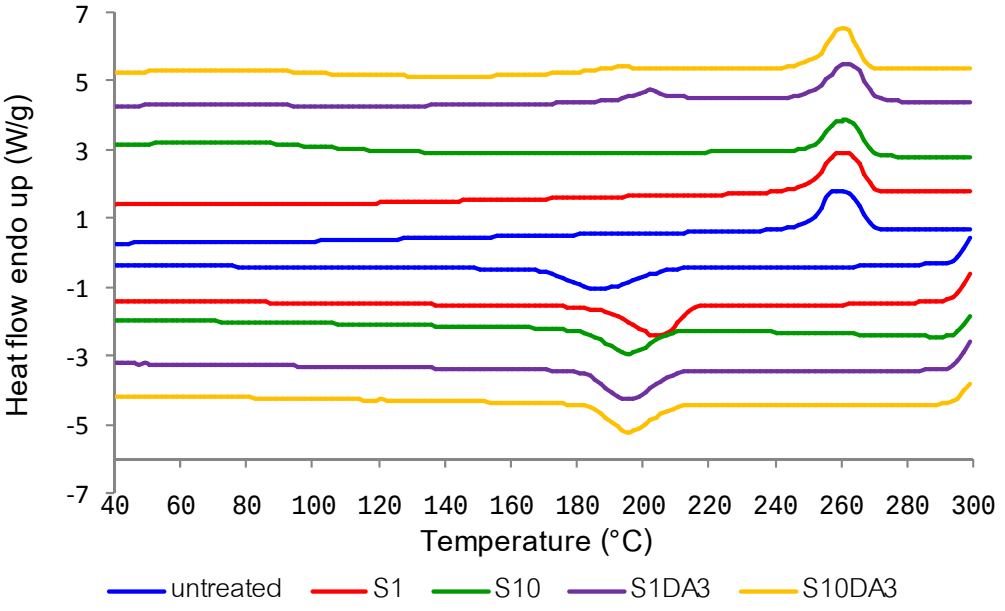
สรุปได้ว่าผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วยไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตมีอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้นและอุณหภูมิที่มีการสลายตัวมากที่สุดกว่าผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านตกแต่ง โดยเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟตจะสลายตัวได้กรอฟอสฟอริกที่จะไปทำให้เกิดชั้นชาร์

4.2.2 **สมบัติทางความร้อนของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเทคนิค** DSC

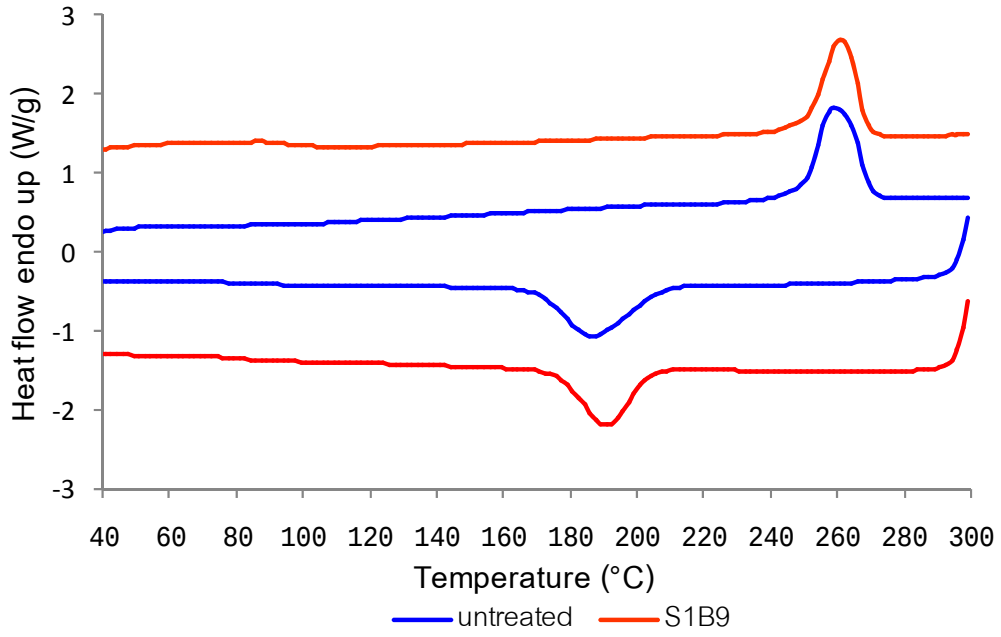
ในงานวิจัยได้เลือกตัวอย่างผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ ทั้งสูตรที่ให้ผลการหน่วงไฟและต้านการหลอมหยดได้ดี และไม่ดีมาทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.21 ถึง 4.24 และตารางที่ 4.6 พบว่าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิการหลอมเหลว ทั้งนี้อาจเกิดจากผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟนั้นมีสารตกแต่งได้แก่ เบนโทไนต์ ผงกาวไหม และสารประกอบฟอสฟอรัส เคลือบบนผิวผ้าเท่านั้น โดยไม่ได้ไปทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับโมเลกุลของผ้าจึงทำให้อุณหภูมิการหลอมเหลวไม่เกิดการเปลี่ยงแปลง ดังนั้นเทคนิค DSC จึงเป็นเทคนิคที่ไม่เหมาะสม



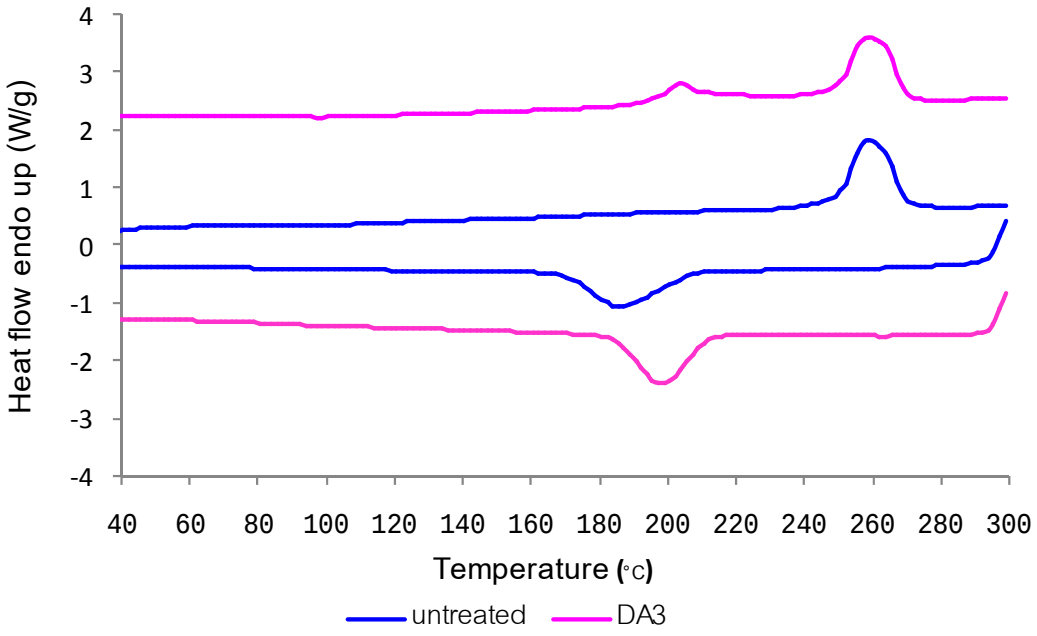
รูปที่ 4.21 DSC เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ และเบนโทไนต์กับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต



รูปที่ 4.22 DSC เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม และผงกาวไหมกับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต



รูปที่ 4.23 DSC เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหมกับเบนโทไนต์



รูปที่ 4.24 DSC เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต

ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิการหลอมเหลวของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารหน่วงไฟสูตรต่างๆ

สูตร	T_m (Peak) (°C)	T_m (Onset) (°C)	Area (mJ)	ΔHm (J/g)
untreated	258	250	176	52
B1	261	250	182	49
B10	260	251	178	46
B1DA3	260	250	247	71
B10DA3	262	252	237	66
S1	260	250	202	53
S10	261	251	152	42
S1DA3	262	249	322	82
S10DA3	260	250	226	67
S1B9	256	238	116	35
DA3	259	249	283	82

4.3 โครงสร้างทางเคมีของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเทคนิค ATR- FTIR

ในงานวิจัยได้เลือกตัวอย่างผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ ทั้งสูตรที่ให้ผลการหน่วงไฟและต้านการหลอมหยดได้ดี และไม่ดีมาทำการศึกษาโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค ATR-FTIR ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.25 ถึง 4.30 และตารางที่ 4.7

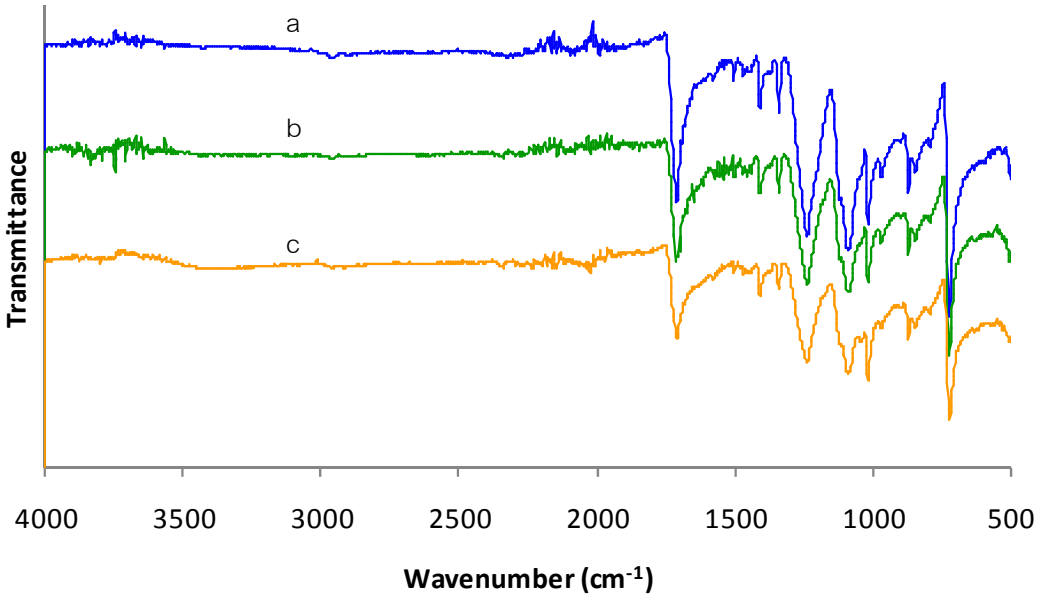
ATR-FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์แสดงในรูปที่ 4.25 โดยเบนโทไนต์ 1 เปอร์เซ็นต์ พบพีกการดูดกลืนรังสีที่ตำแหน่ง 1019 cm^{-1} และเบนโทไนต์ 10 เปอร์เซ็นต์ ปรากฏพีกการดูดกลืนรังสีที่ตำแหน่ง 1013 cm^{-1} แสดงถึง Si-O stretching ของเบนโทไนต์ ในขณะที่ผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ตกแต่งก็ปรากฏพีกการดูดกลืนรังสีของ C-O ในตำแหน่งนี้เช่นกัน ซึ่งอาจทำให้เกิดการซ้อนทับกันทำให้ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัม

สำหรับ ATR-FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม 1 และ 10 เปอร์เซ็นต์ แสดงในรูปที่ 4.27 ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัม

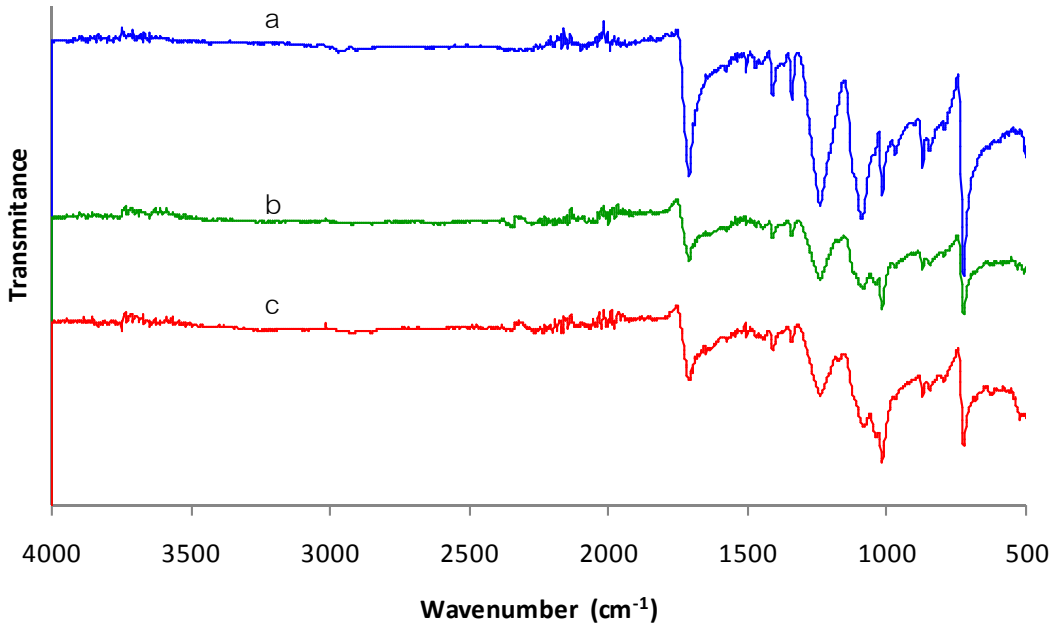
สำหรับผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการตกแต่งด้วยเบนโทไนต์กับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต และผงกาวไหมกับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต แสดงในรูปที่ 4.26 และ 4.28 พบพีกการดูดกลืนรังสีของหมู่ฟอสฟอนิก (P=O) ที่ตำแหน่ง 1171 cm^{-1} เช่นเดียวกันกับผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต แสดงในรูปที่ 4.30 พบพีกการดูดกลืนรังสีของหมู่ฟอสฟอนิก (P=O) ที่ตำแหน่ง 1169 cm^{-1} มีลักษณะเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเกิดจากการซ้อนทับกันกับพีกของ C-O ซึ่งอยู่ในช่วง 1300-1050 cm^{-1} จึงทำให้พีกบริเวณนี้มีความกว้างมากขึ้น แสดงว่าไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตที่ตกแต่งอาจจะไปทำปฏิกิริยากับผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวน

ATR-FTIR สเปกตรัมผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์กับผงกาวไหม แสดงในรูปที่ 4.29 ปรากฏพีกการดูดกลืนรังสีที่ตำแหน่ง 1019 cm^{-1} แสดงถึง Si-O stretching ของเบนโทไนต์ ในขณะที่ผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนก็ปรากฏพีกการดูดกลืนรังสีของ C-O ในตำแหน่งนี้เช่นกัน อาจทำให้เกิดการซ้อนทับกันทำให้ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัม

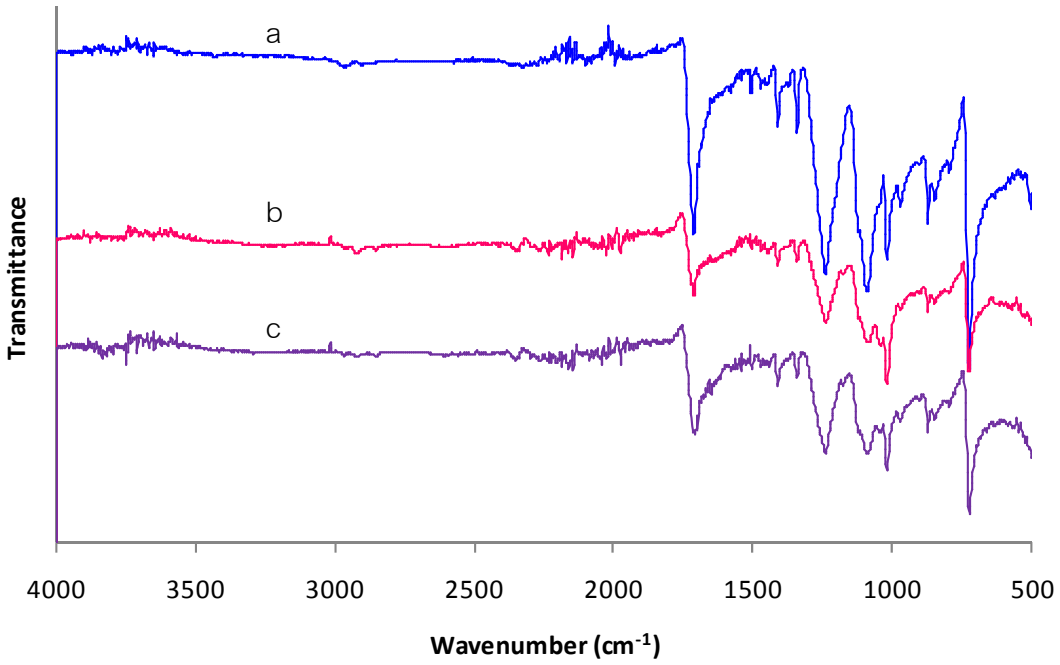
นอกจากนี้ยังพบว่าพีกของสเปกตรัมตำแหน่ง 1710 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึง C=O stretching ของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งด้วยเบนโทไนต์ ผงกาวไหม และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตลดลง ซึ่งอาจเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารหน่วงไฟที่ใช้ในการตกแต่งกับผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวน



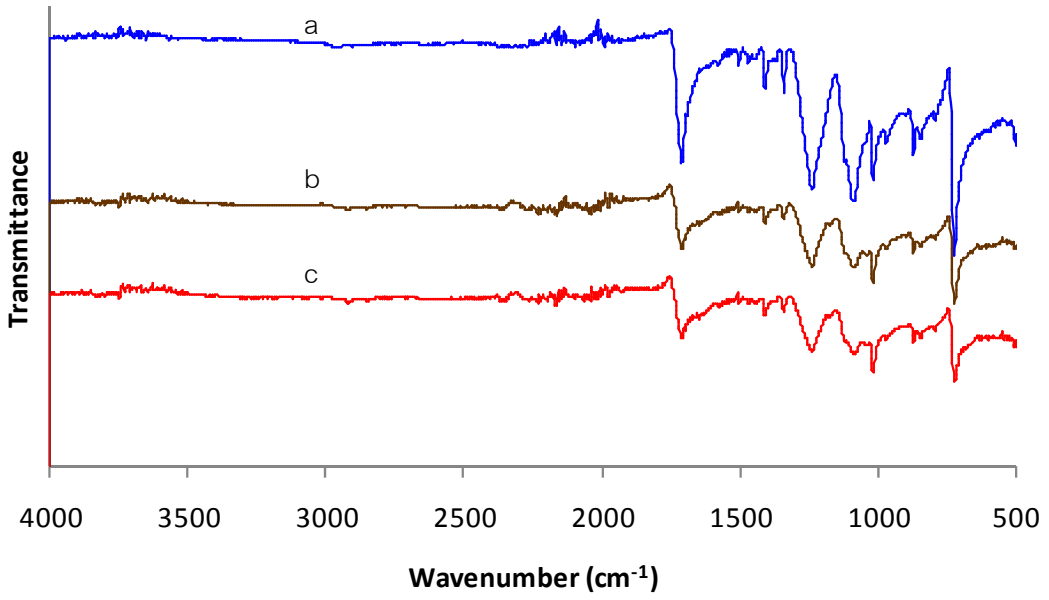
รูปที่ 4.25 ATR-FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ a) untreated b) B1 c) B10



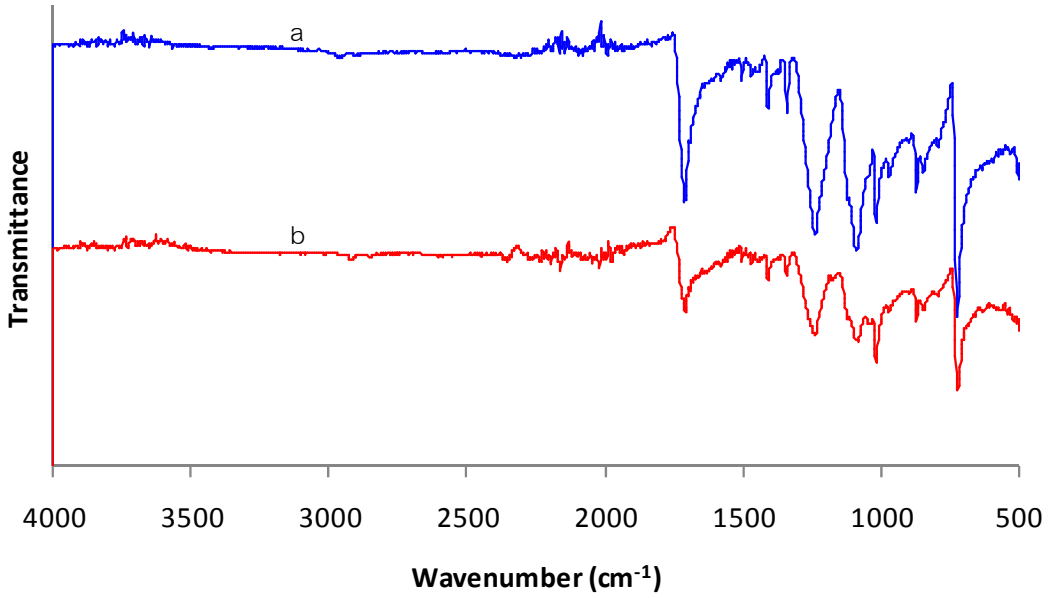
รูปที่ 4.26 ATR-FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์กับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต a) untreated b) B1DA3 c) B10DA3



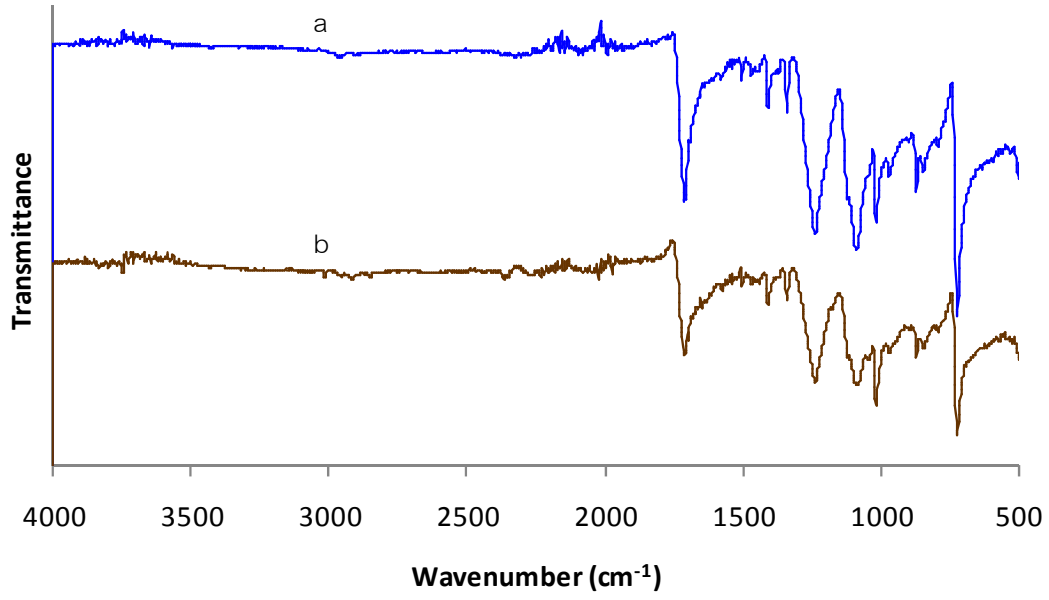
รูปที่ 4.27 ATR-FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม a) untreated b) S1 c) S10



รูปที่ 4.28 ATR-FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหมกับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต a) untreated b) S1DA3 c) S10DA3



รูปที่ 4.29 ATR-FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหมกับเบนโทไนต์ a) untreated b) S1B9



รูปที่ 4.30 ATR-FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต a) untreated b) DA3

ตารางที่ 4.7 หมู่ฟังก์ชันของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารต่างๆ

Functional group	Wavenumber (cm^{-1})											
	Reported*	untreated	B1	B10	B1DA3	B10DA3	S1	S10	S1DA3	S10DA3	S1B9	DA3
C=O	1730-1700	1710	1704	1704	1704	1710	1710	1704	1704	1710	1710	1707
C-O	1300-1050	1241	1235	1241	1235	1241	1235	1238	1235	1238	1241	1232
P=O	1300-1140	-	-	-	1171	1171	-	-	1171	1171	-	1169
Si-O	1090-1020	-	1019	1013	1024	1014	-	-	-	-	1019	-
N-H	1660-1610 (asymmetric deformation) 1550-1485 (symmetric deformation)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Reported* จากหนังสือ การประยุกต์สเปคโตรสโคปีในเคมีอินทรีย์ [37]

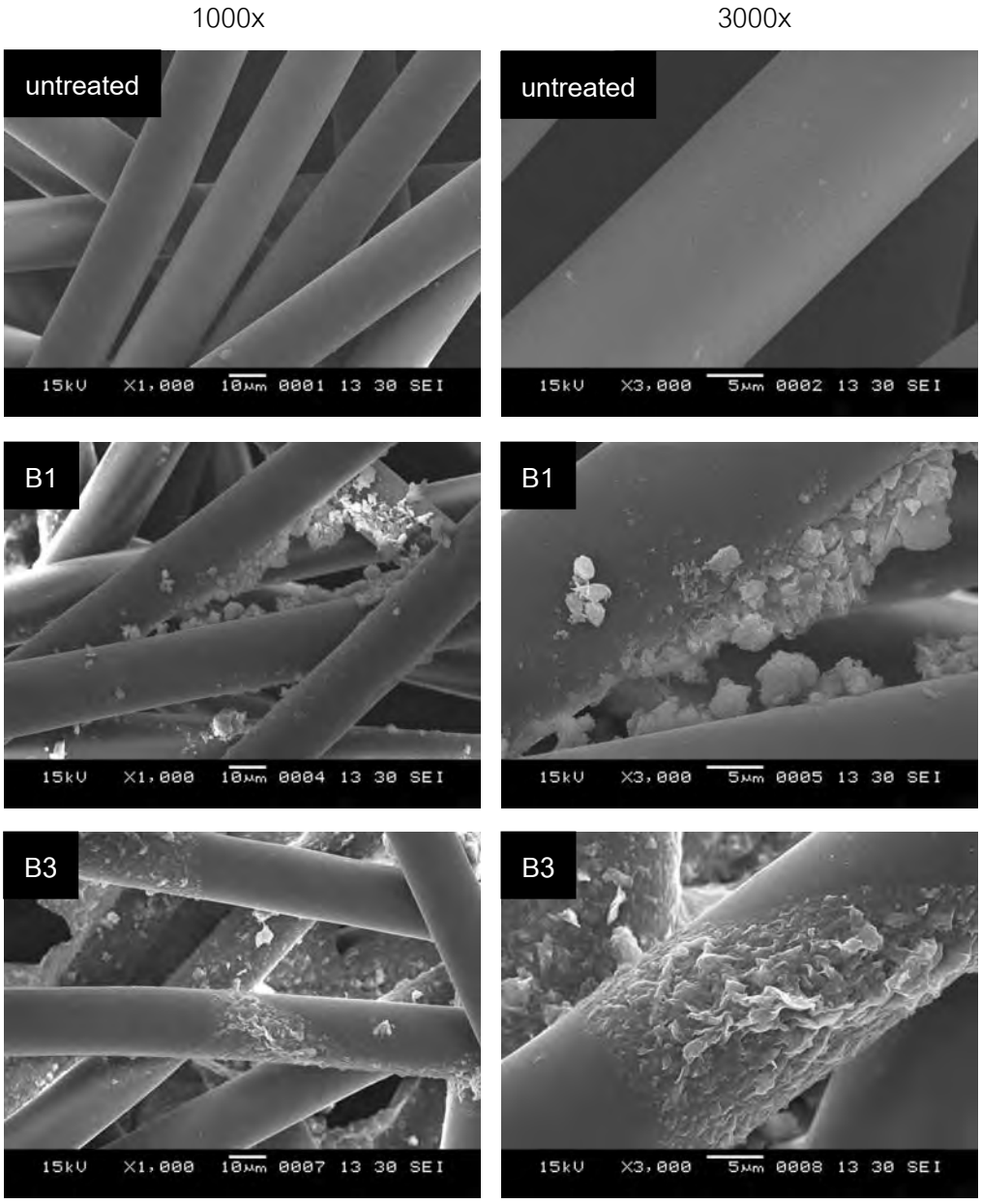
4.4 ลักษณะทางสัญฐานวิทยาของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเทคนิค SEM

ผลที่ได้จากการส่องดูพื้นผิวของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ พบว่าเส้นใยพอลิเอสเทอร์มีลักษณะเป็นเส้นตรง ไม่บิดตัว มีพื้นผิวเรียบ และสะอาด และเมื่อตกแต่งหน่วงด้วยเบนโทไนต์ ดังรูปที่ 4.31 พบว่า มีเบนโทไนต์เกาะอยู่บนเส้นใยเป็นกลุ่มก้อนอย่างไม่สม่ำเสมอ และเบนโทไนต์เกาะบนเส้นใยมากขึ้นเมื่อปริมาณเบนโทไนต์เพิ่มขึ้น ส่วนผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์กับแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตและไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ดังรูปที่ 4.32 และ 4.33 พบว่า มีสารเกาะอยู่บนผิวของเส้นใยจำนวนมาก และปริมาณสารที่เกาะอยู่บนผิวของเส้นใยมากกว่าผ้าที่ผ่านการตกแต่งด้วยเบนโทไนต์เพียงอย่างเดียว

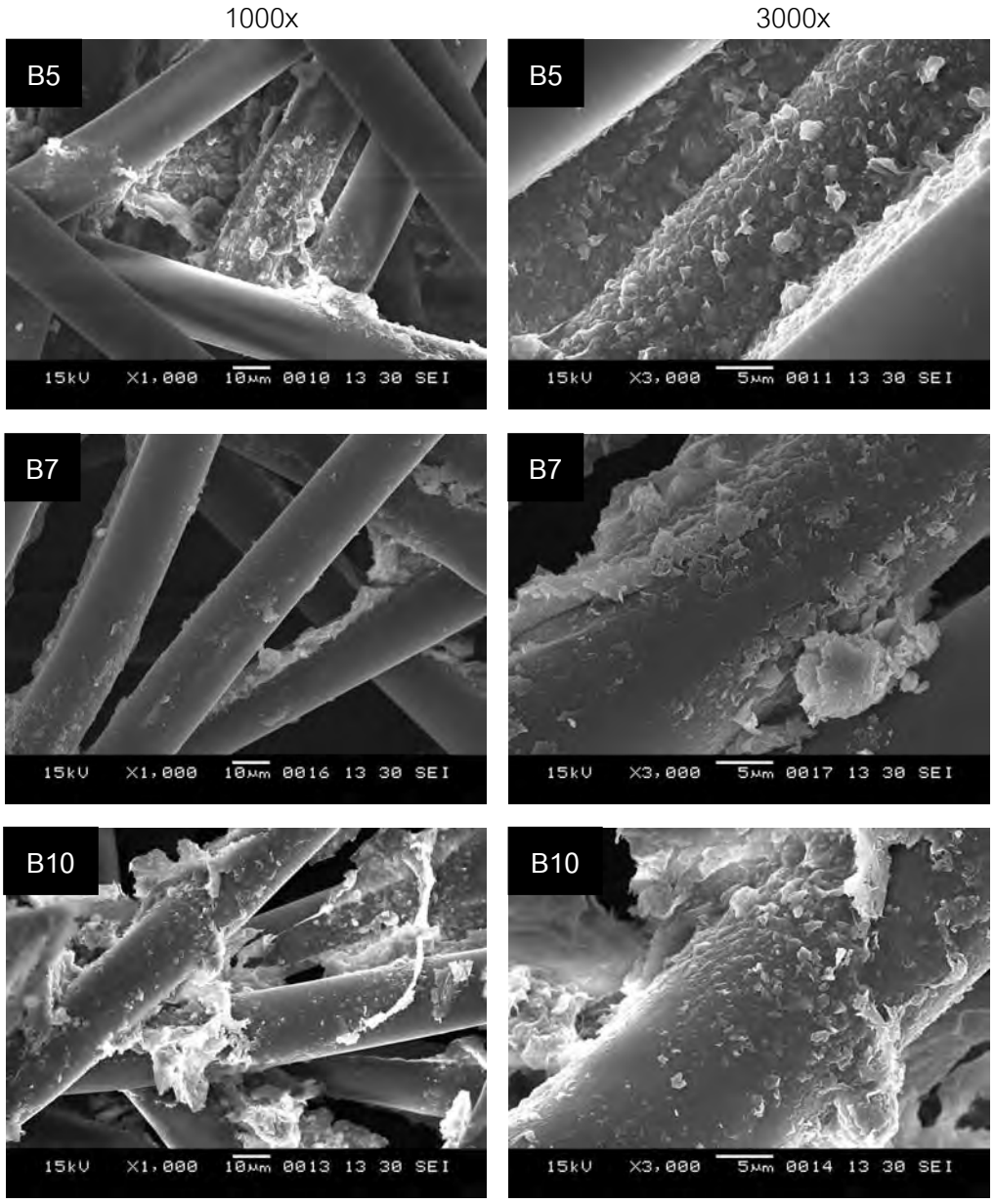
สำหรับผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม ดังรูปที่ 4.34 พบว่า มีผงกาวไหมเคลือบอยู่บนเส้นใย และมีลักษณะเป็นแผ่นเกาะอยู่บนเส้นใยอย่างไม่สม่ำเสมอ ส่วนผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหมกับแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตและไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ดังรูปที่ 4.35 และ 4.36 พบว่า มีสารเคลือบอยู่บนเส้นใย และมีลักษณะเป็นแผ่นเกาะอยู่บนเส้นใยอย่างไม่สม่ำเสมอ และปริมาณสารที่เกาะอยู่บนผิวของเส้นใยมากกว่าผ้าที่ผ่านการตกแต่งด้วยผงกาวไหมเพียงอย่างเดียว

ผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ ด้วยผงกาวไหมกับเบนโทไนต์ ดังรูปที่ 4.37 พบว่า ผ้าที่ถูกตกแต่งด้วยสูตรการตกแต่งที่มีปริมาณเบนโทไนต์มากกว่าผงกาวไหม จะมีสารเกาะอยู่บนเส้นใยจำนวนมาก มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนกระจายตัวบนเส้นใยอย่างไม่สม่ำเสมอ ส่วนผ้าที่ตกแต่งด้วยสูตรการตกแต่งที่มีปริมาณเบนโทไนต์น้อยกว่าผงกาวไหม จะมีสารเกาะอยู่บนเส้นใยน้อย กระจายตัวบนเส้นใยอย่างไม่สม่ำเสมอ และเส้นใยมีลักษณะเหมือนถูกเคลือบด้วยสารตกแต่ง

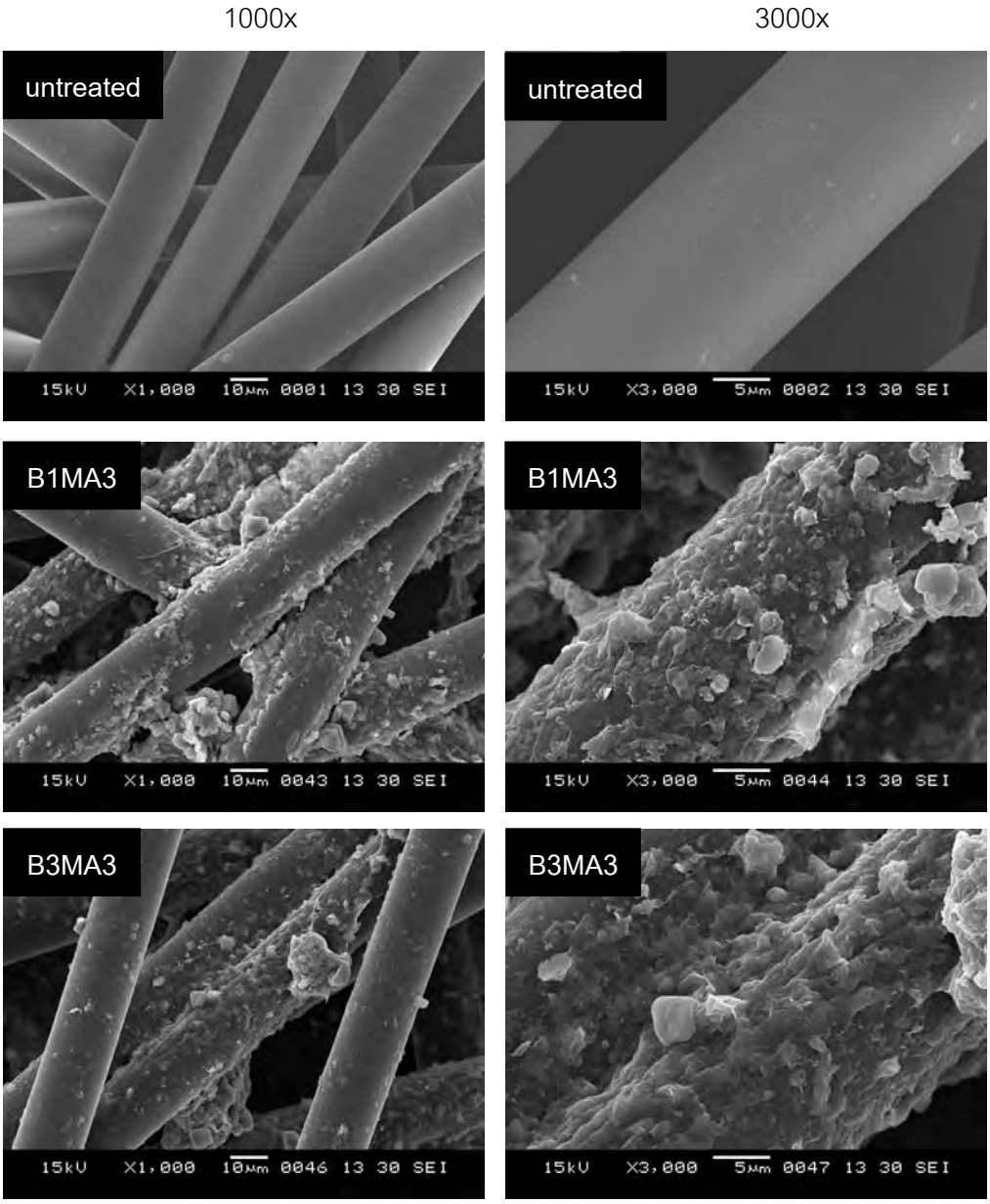
ผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ ด้วย สารประกอบฟอสฟอรัสได้แก่ แอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ดังรูปที่ 4.38 พบว่าเส้นใยมีลักษณะถูกเคลือบด้วยสารตกแต่งทั่วบริเวณผ้า



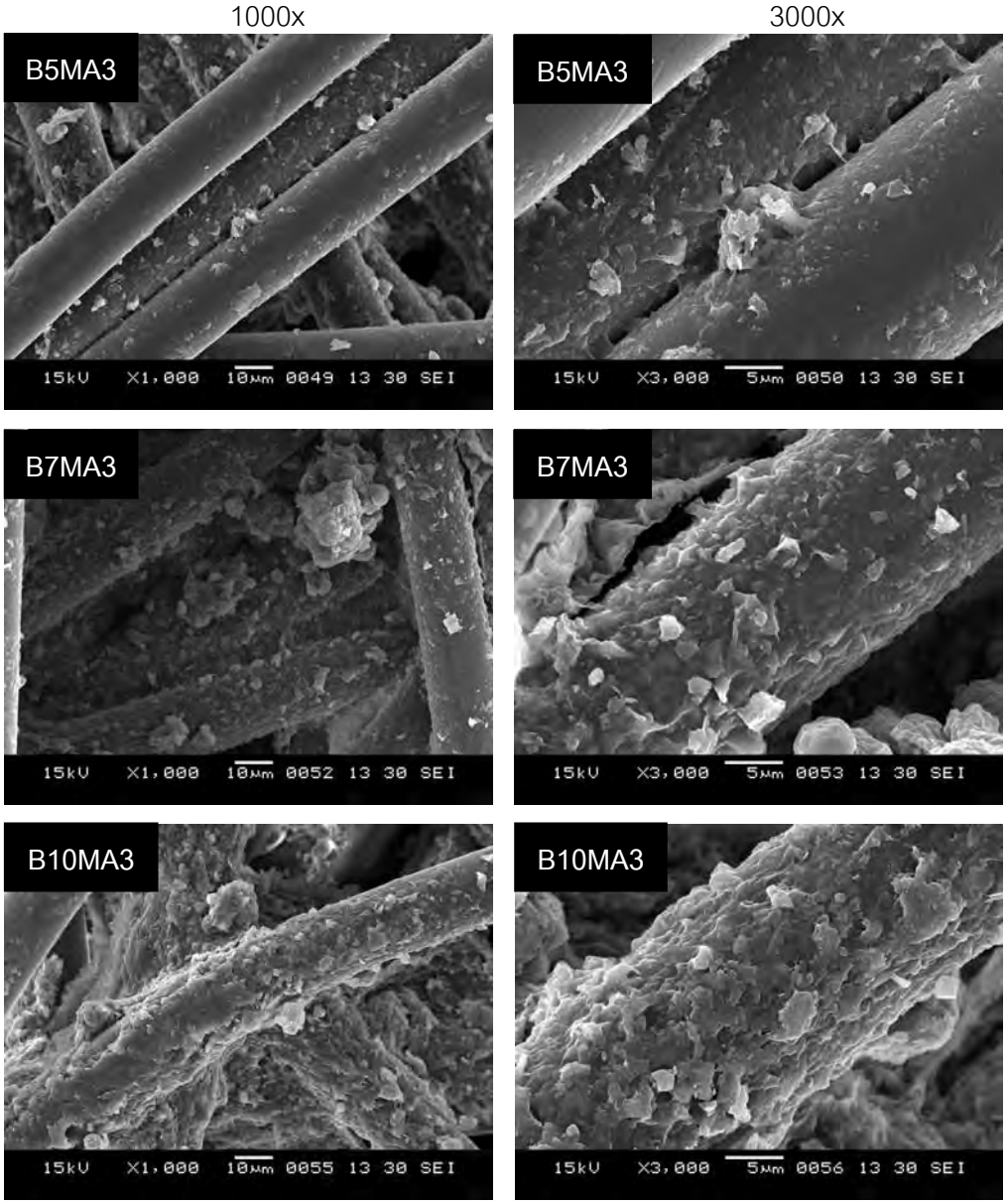
รูปที่ 4.31 เส้นใยพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ที่ความเข้มข้นต่างๆ


1000x
3000x
B5
15kV X1,000 10µm 0010 13 30 SEI
B5
15kV X3,000 5µm 0011 13 30 SEI
B7
15kV X1,000 10µm 0016 13 30 SEI
B7
15kV X3,000 5µm 0017 13 30 SEI
B10
15kV X1,000 10µm 0013 13 30 SEI
B10
15kV X3,000 5µm 0014 13 30 SEI

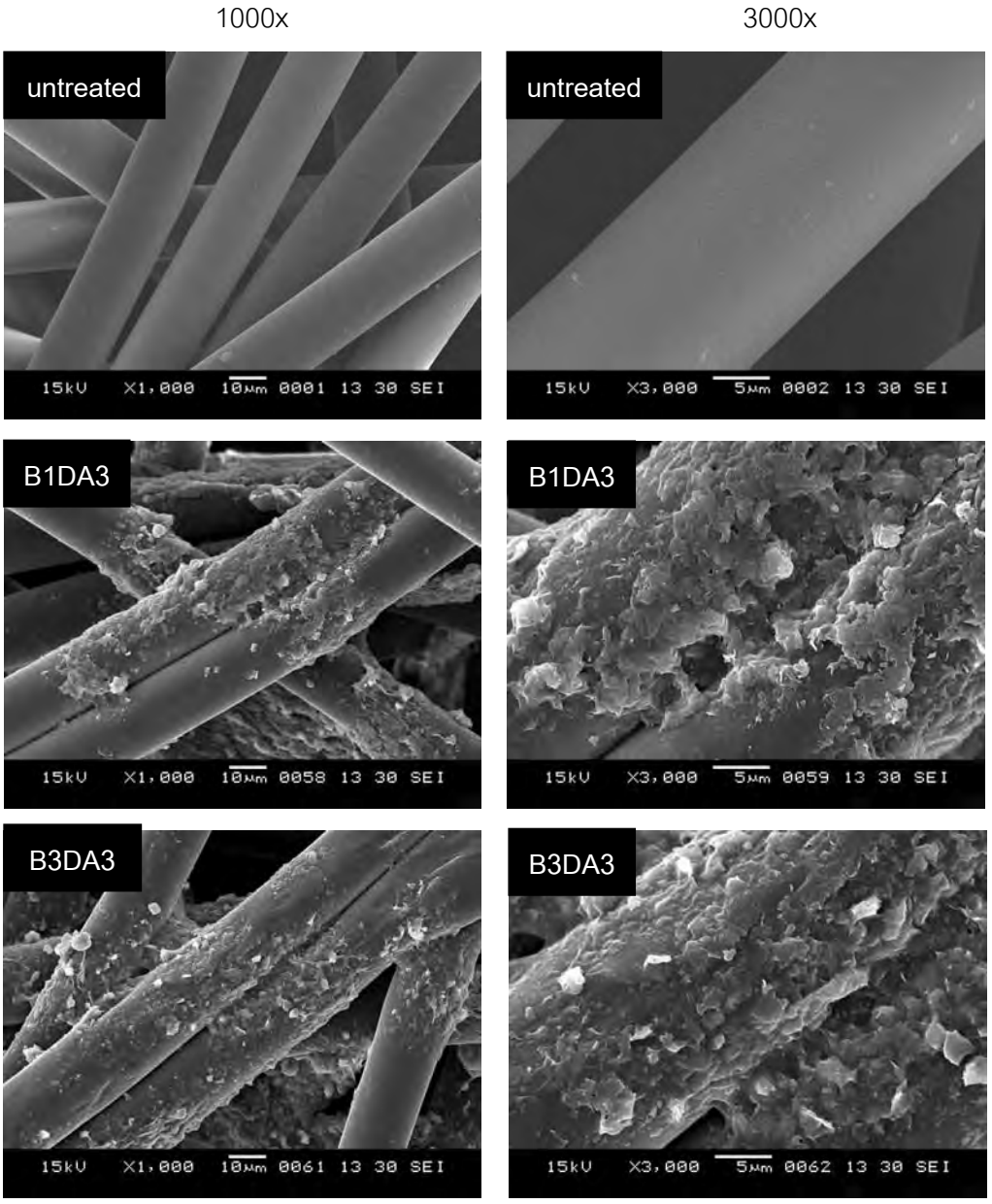
รูปที่ 4.31 (ต่อ)



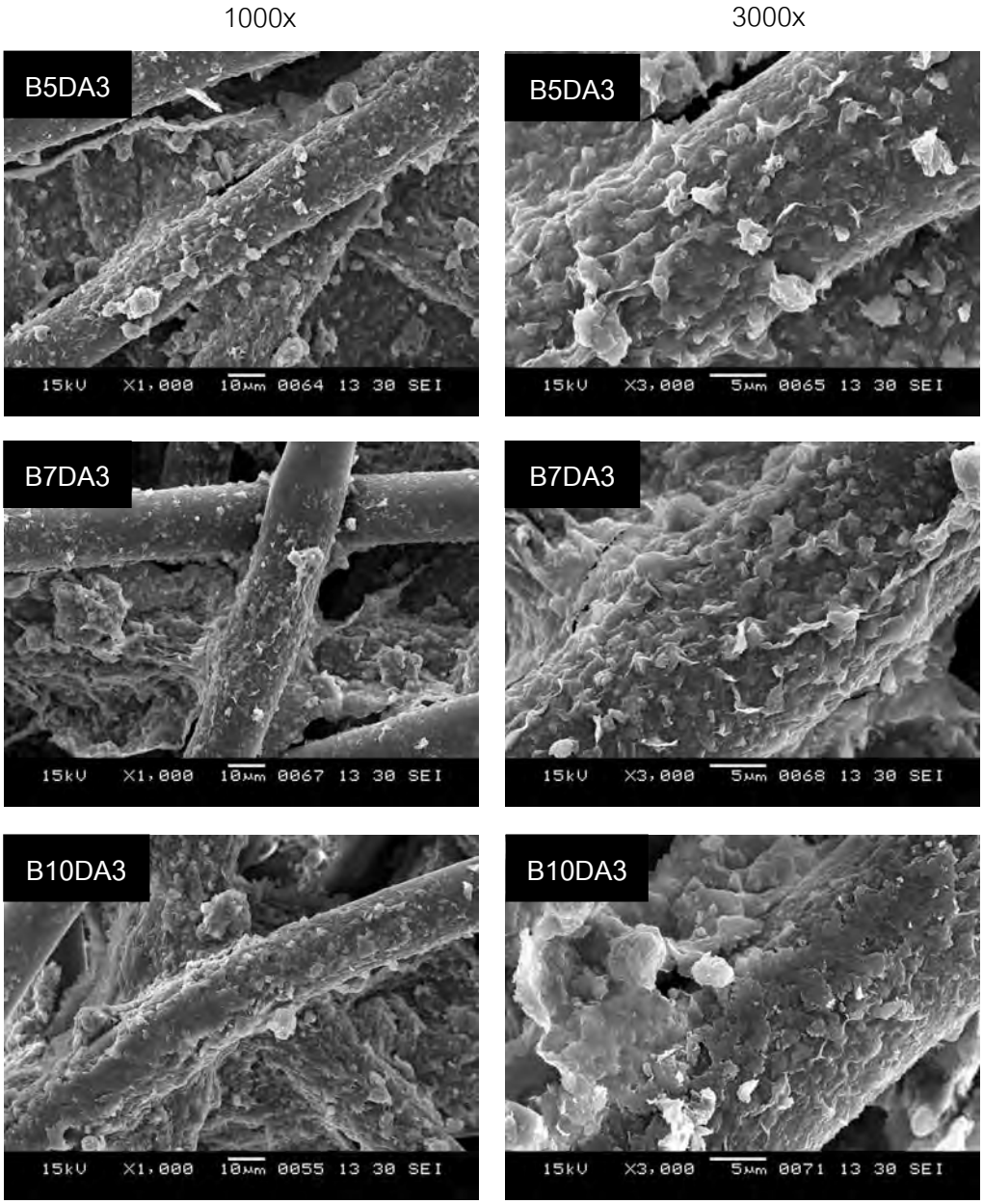
รูปที่ 4.32 เส้นใยพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์และแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ


1000x
3000x
B5MA3
15kV X1,000 10µm 0049 13 30 SEI
B5MA3
15kV X3,000 5µm 0050 13 30 SEI
B7MA3
15kV X1,000 10µm 0052 13 30 SEI
B7MA3
15kV X3,000 5µm 0053 13 30 SEI
B10MA3
15kV X1,000 10µm 0055 13 30 SEI
B10MA3
15kV X3,000 5µm 0056 13 30 SEI

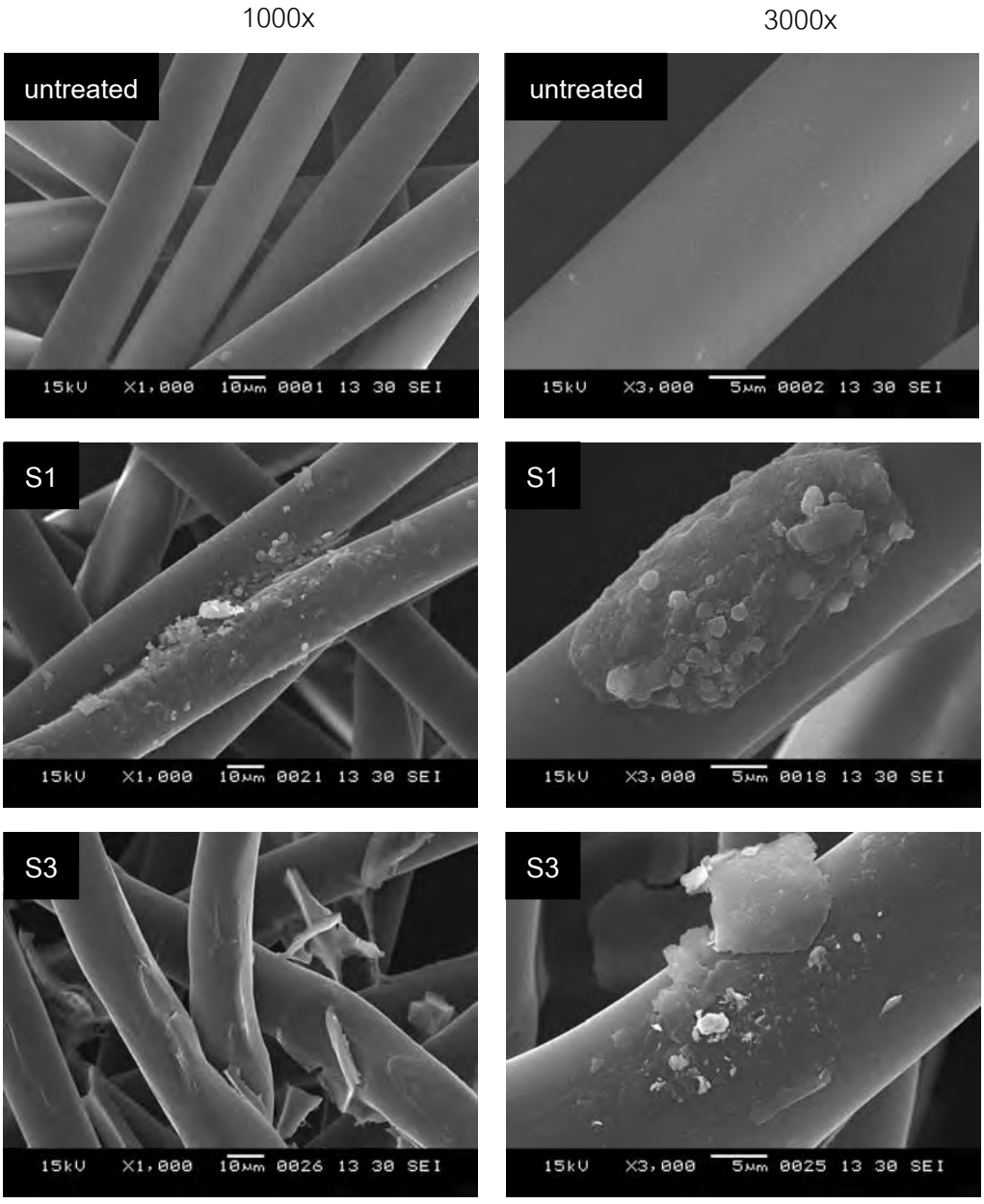
รูปที่ 4.32 (ต่อ)



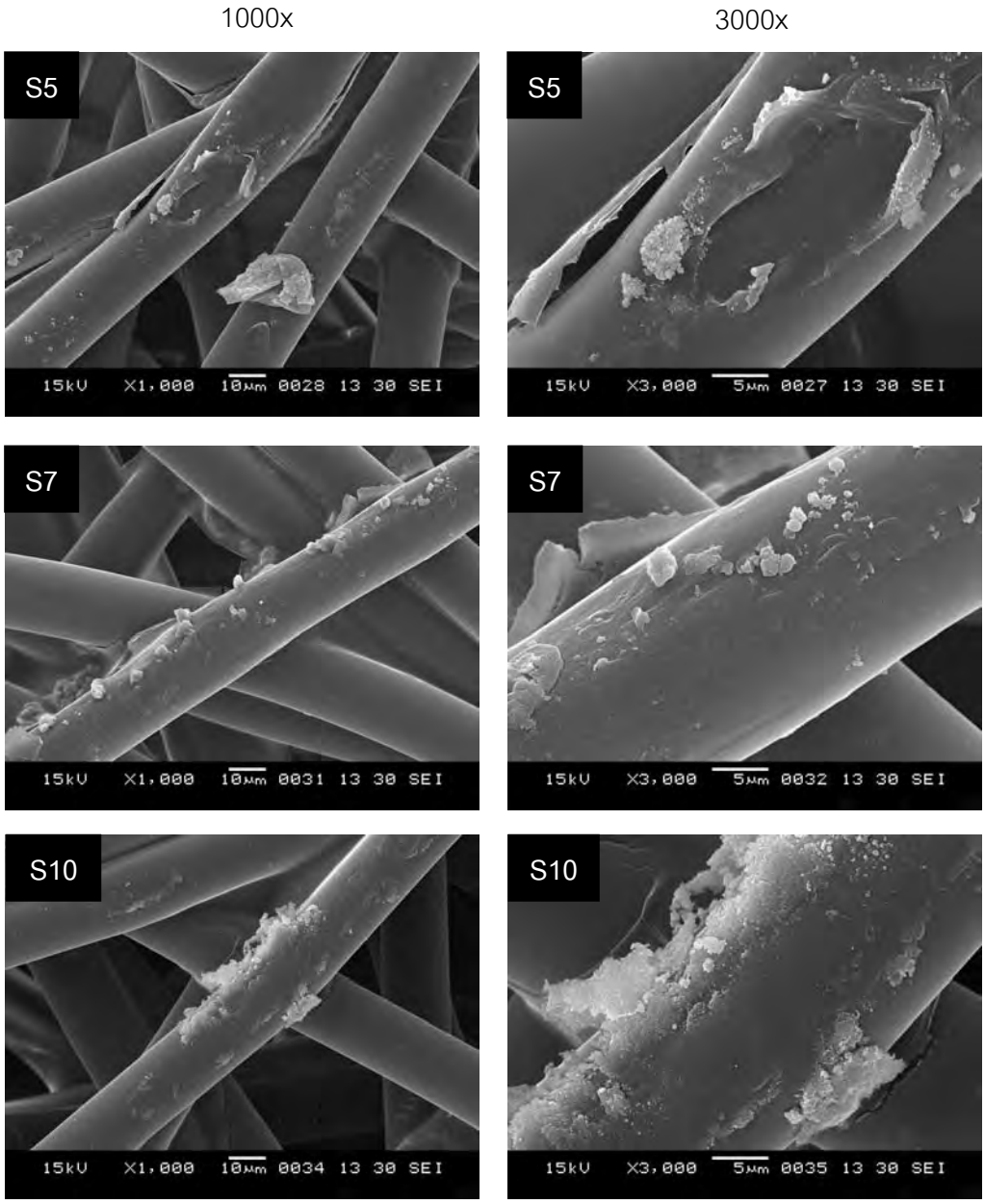
รูปที่ 4.33 เส้นใยพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ


1000x
3000x
B5DA3
15kV X1,000 10µm 0064 13 30 SEI
B5DA3
15kV X3,000 5µm 0065 13 30 SEI
B7DA3
15kV X1,000 10µm 0067 13 30 SEI
B7DA3
15kV X3,000 5µm 0068 13 30 SEI
B10DA3
15kV X1,000 10µm 0055 13 30 SEI
B10DA3
15kV X3,000 5µm 0071 13 30 SEI

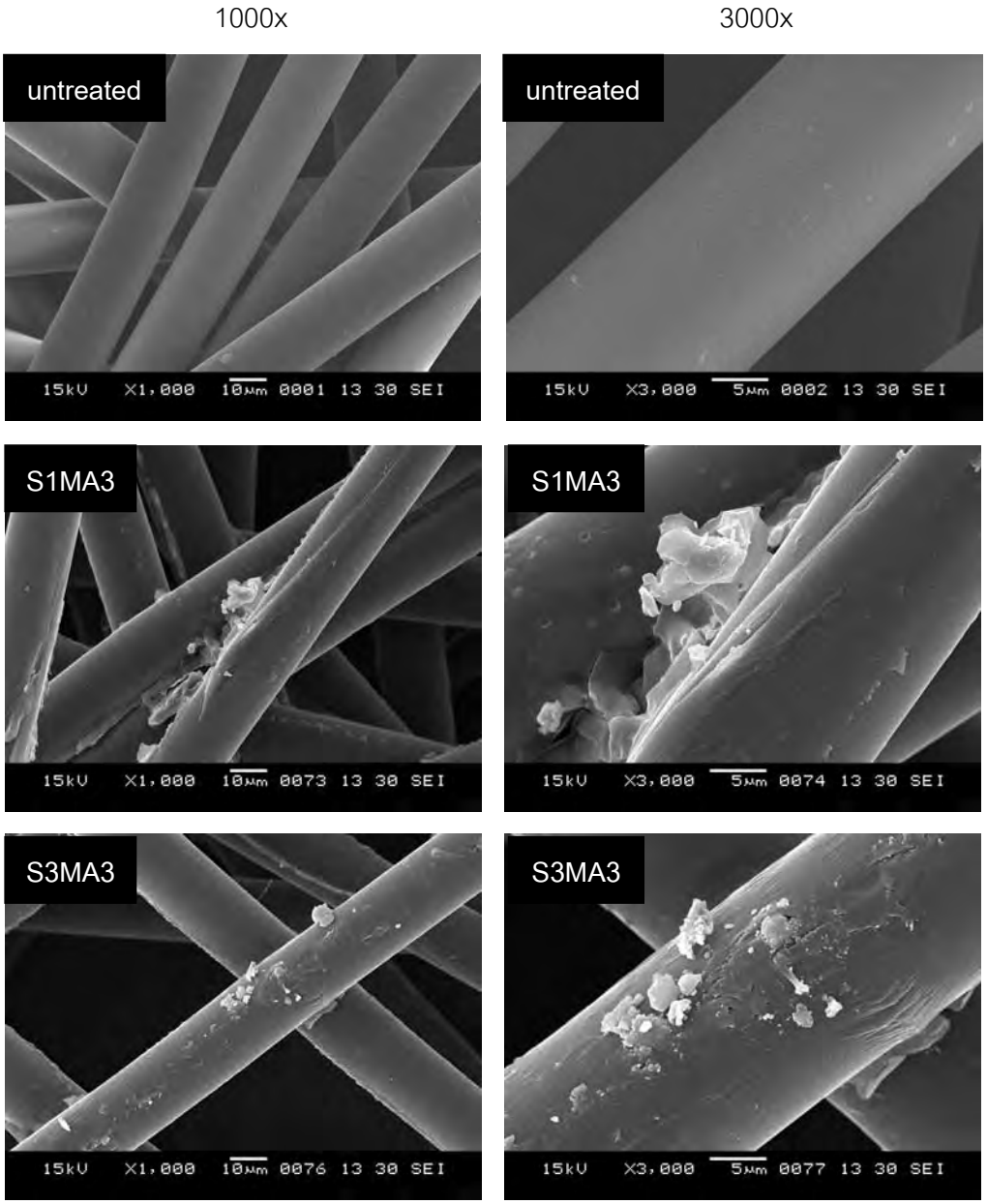
รูปที่ 4.33 (ต่อ)



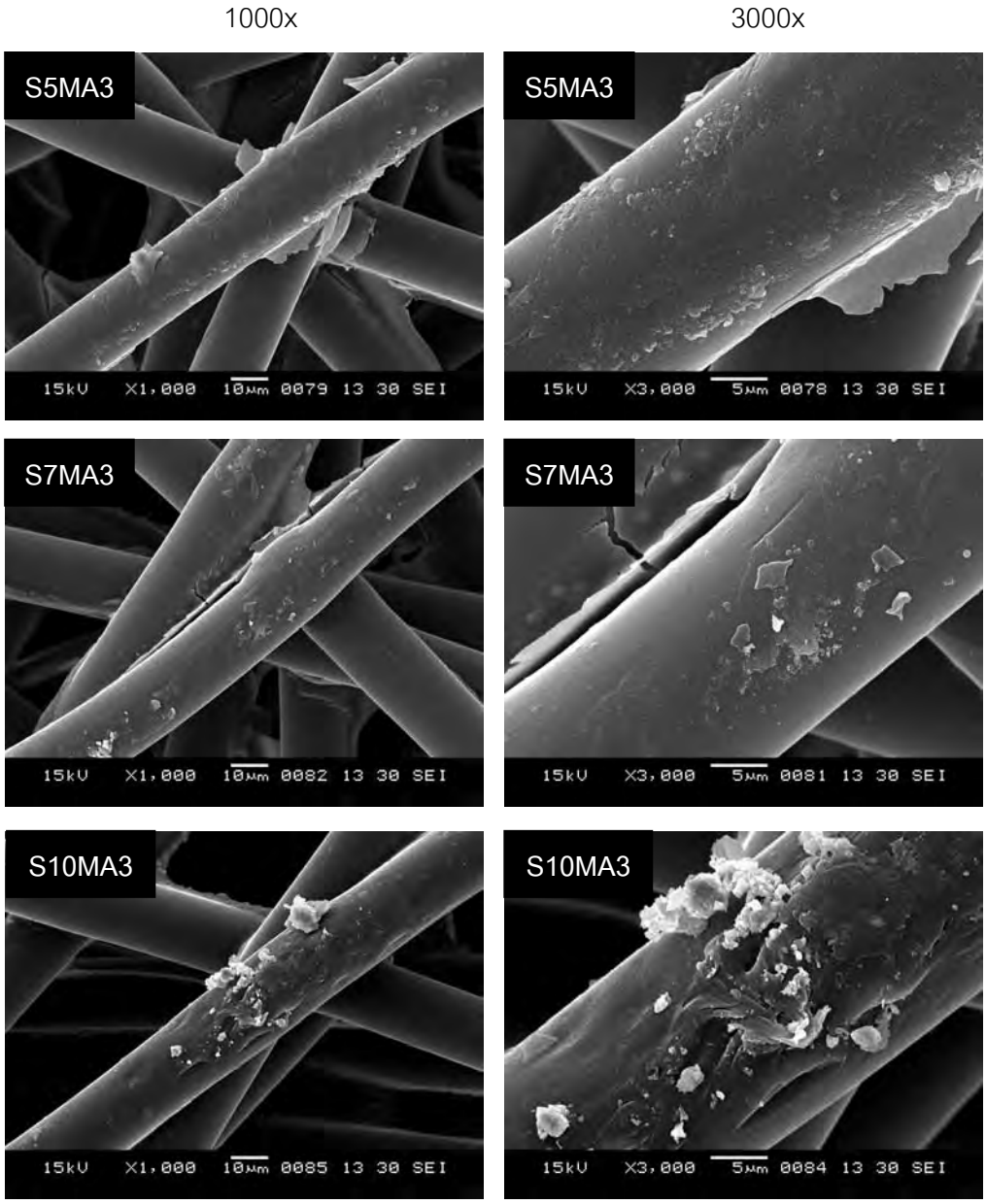
รูปที่ 4.34 เส้นใยพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหมที่ความเข้มข้นต่างๆ


1000x
3000x
S5
15kV X1,000 10µm 0028 13 30 SEI
S5
15kV X3,000 5µm 0027 13 30 SEI
S7
15kV X1,000 10µm 0031 13 30 SEI
S7
15kV X3,000 5µm 0032 13 30 SEI
S10
15kV X1,000 10µm 0034 13 30 SEI
S10
15kV X3,000 5µm 0035 13 30 SEI

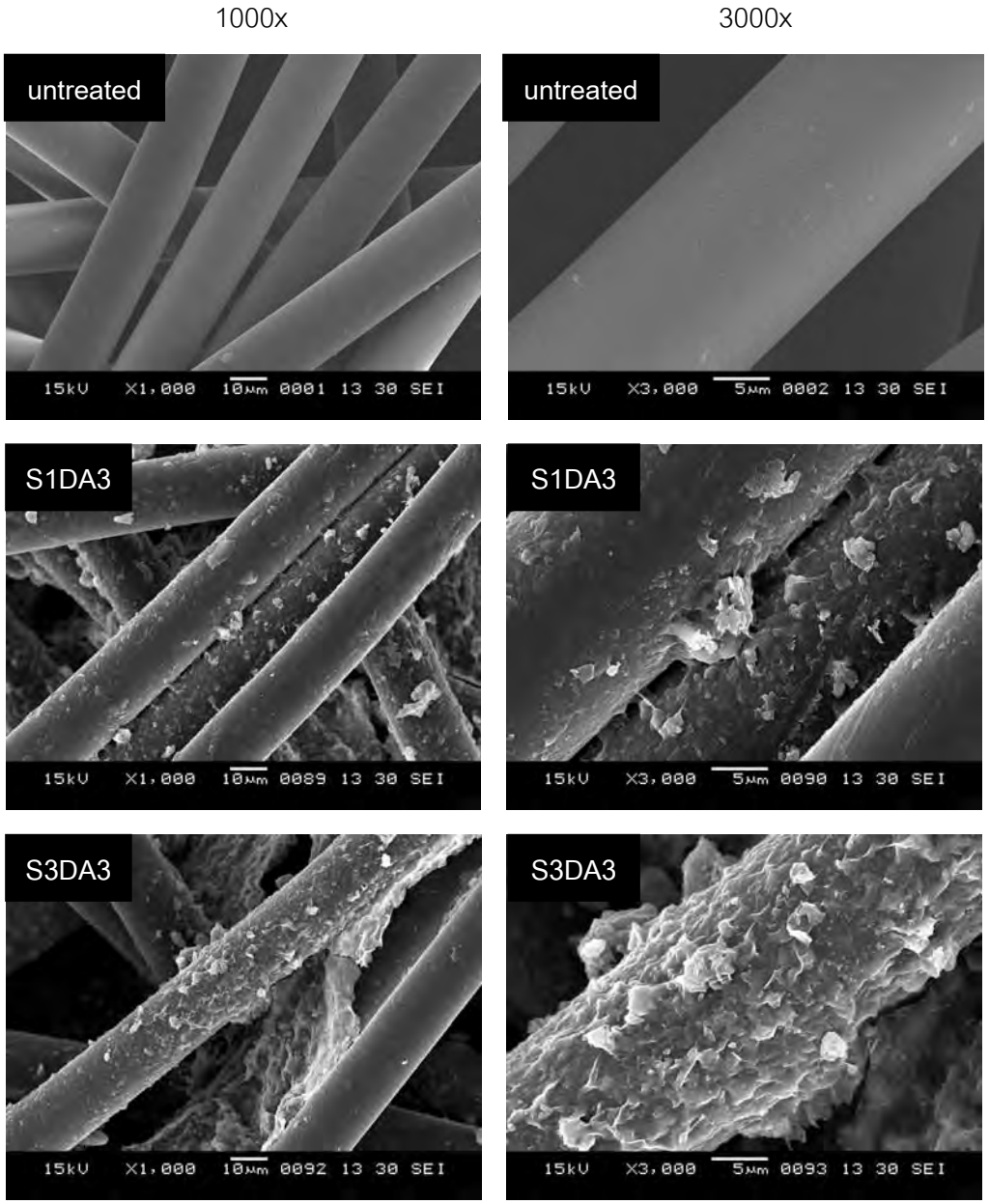
รูปที่ 4.34 (ต่อ)



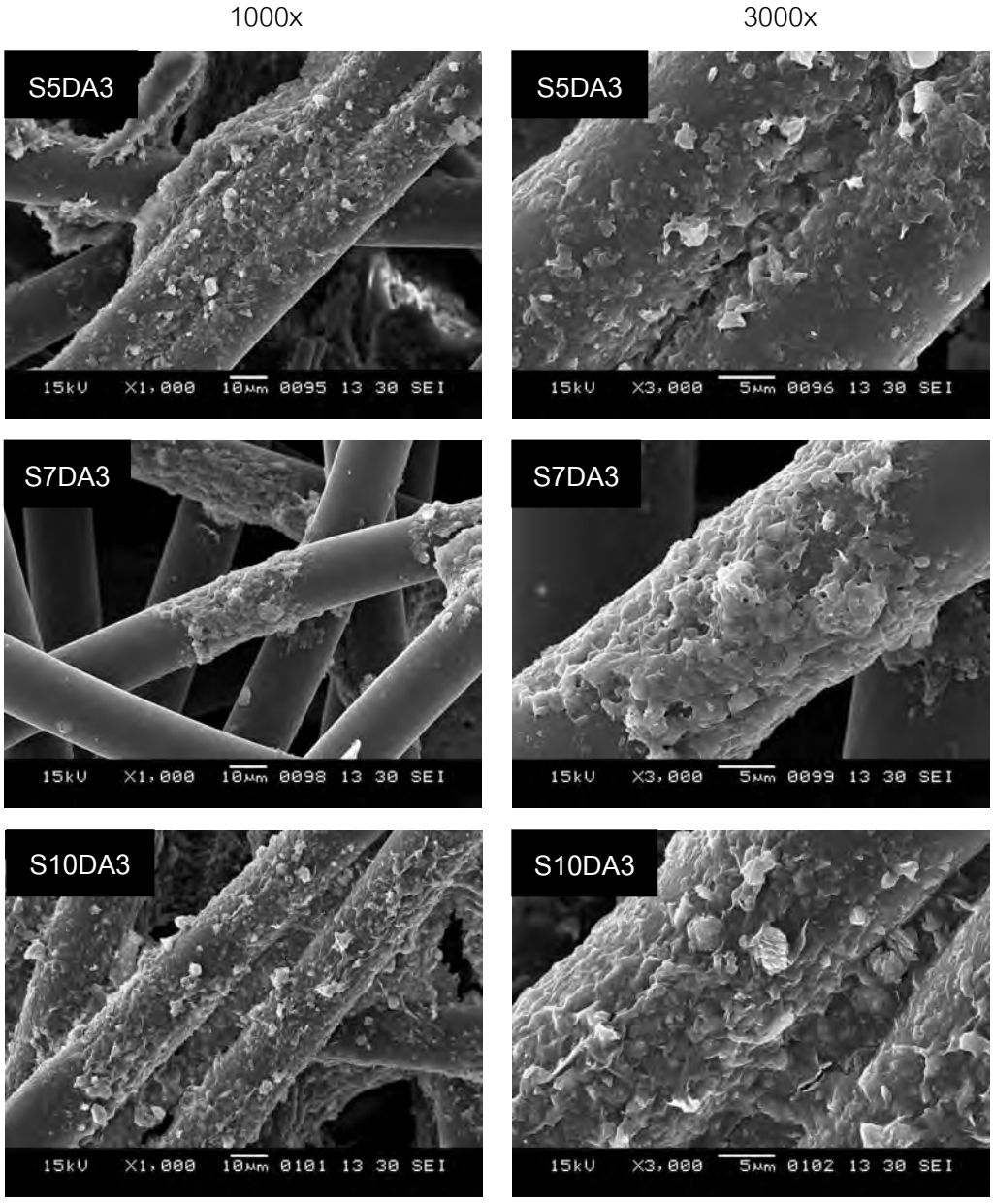
รูปที่ 4.35 เส้นใยพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหมและแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ


1000x
3000x
S5MA3
15kV X1,000 10µm 0079 13 30 SEI
S5MA3
15kV X3,000 5µm 0078 13 30 SEI
S7MA3
15kV X1,000 10µm 0082 13 30 SEI
S7MA3
15kV X3,000 5µm 0081 13 30 SEI
S10MA3
15kV X1,000 10µm 0085 13 30 SEI
S10MA3
15kV X3,000 5µm 0084 13 30 SEI

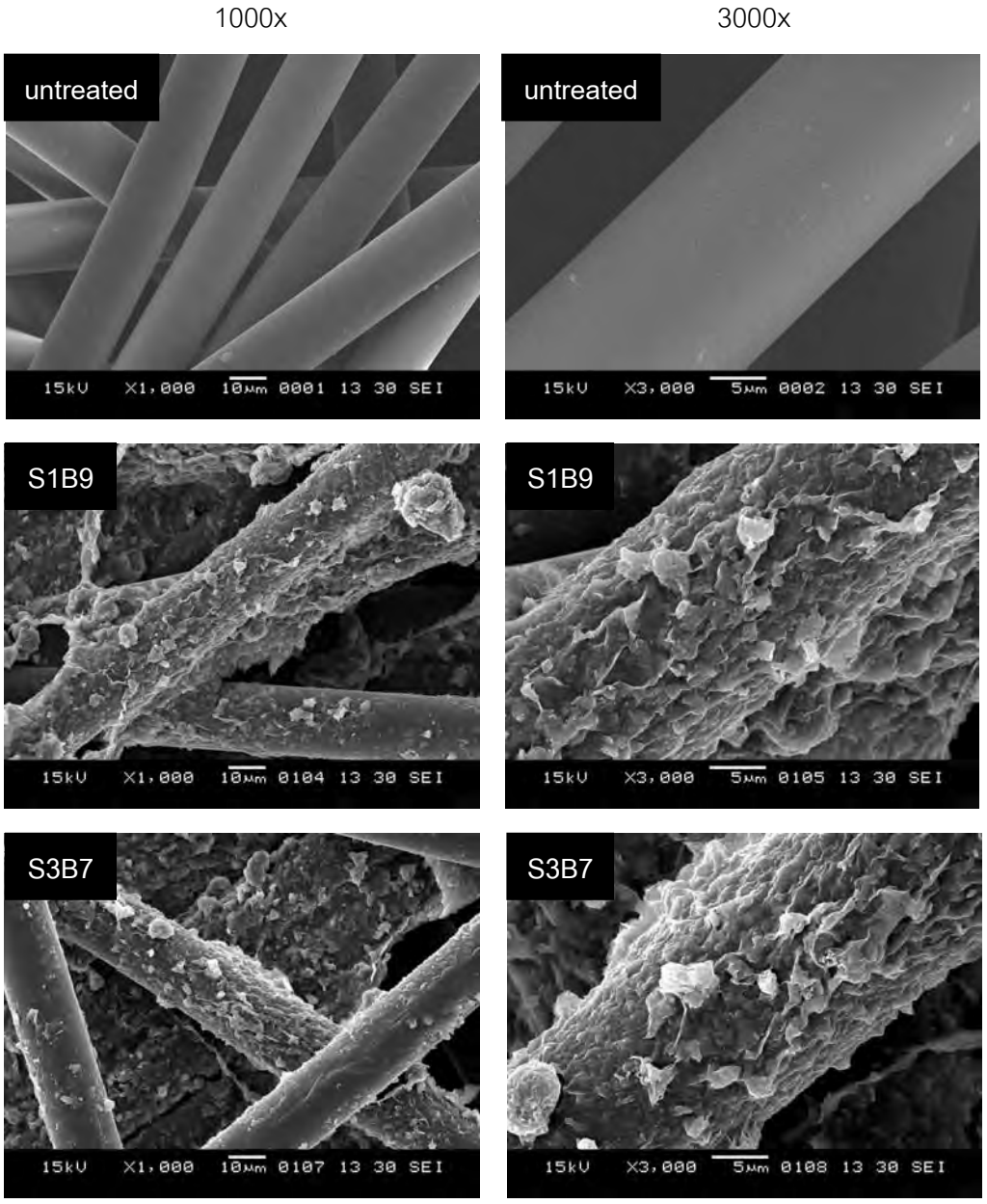
รูปที่ 4.35 (ต่อ)



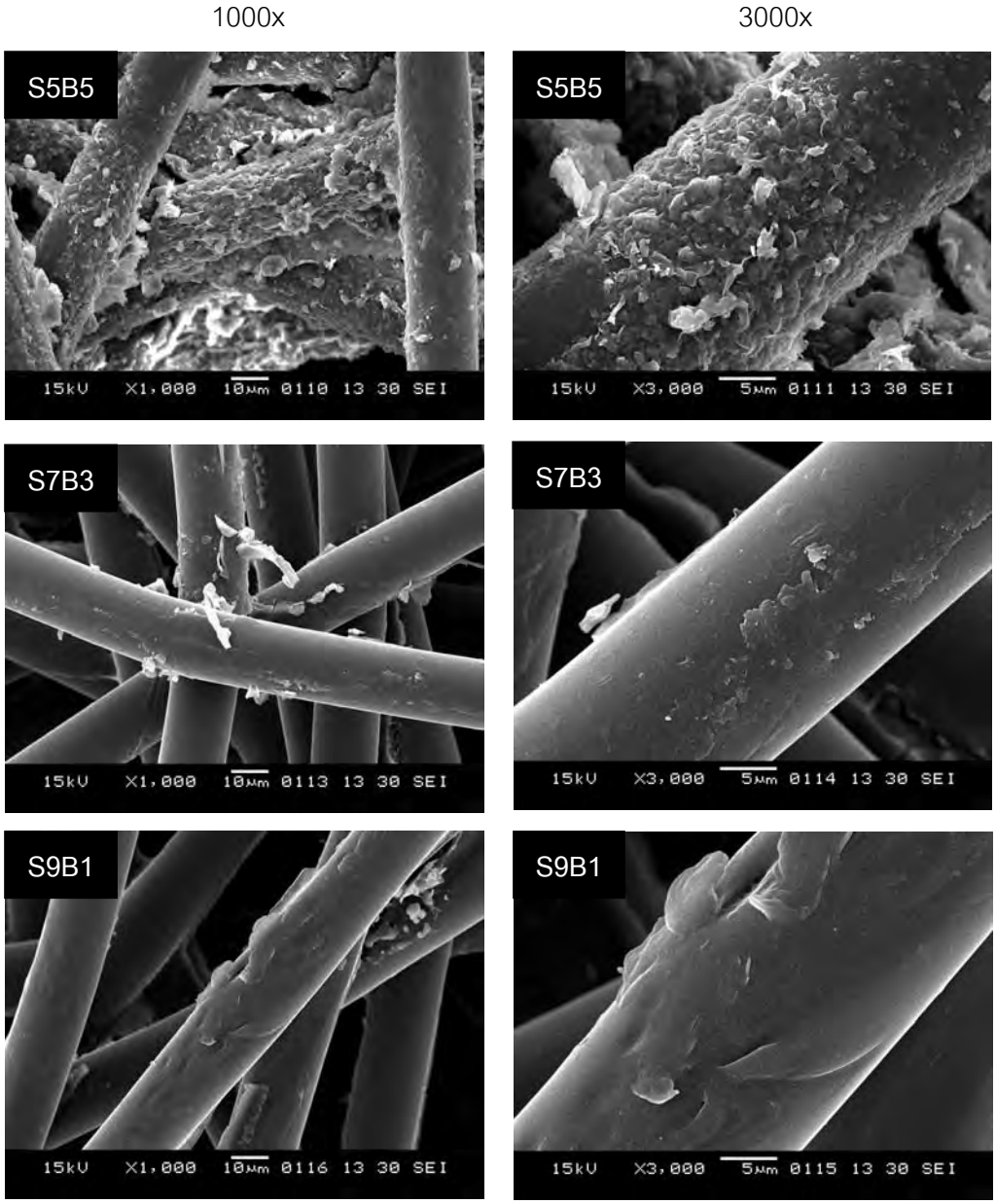
รูปที่ 4.36 เส้นใยพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหมและไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนที่ความเข้มข้นต่างๆ


1000x
3000x
S5DA3
15kV X1,000 10µm 0095 13 30 SEI
S5DA3
15kV X3,000 5µm 0096 13 30 SEI
S7DA3
15kV X1,000 10µm 0098 13 30 SEI
S7DA3
15kV X3,000 5µm 0099 13 30 SEI
S10DA3
15kV X1,000 10µm 0101 13 30 SEI
S10DA3
15kV X3,000 5µm 0102 13 30 SEI

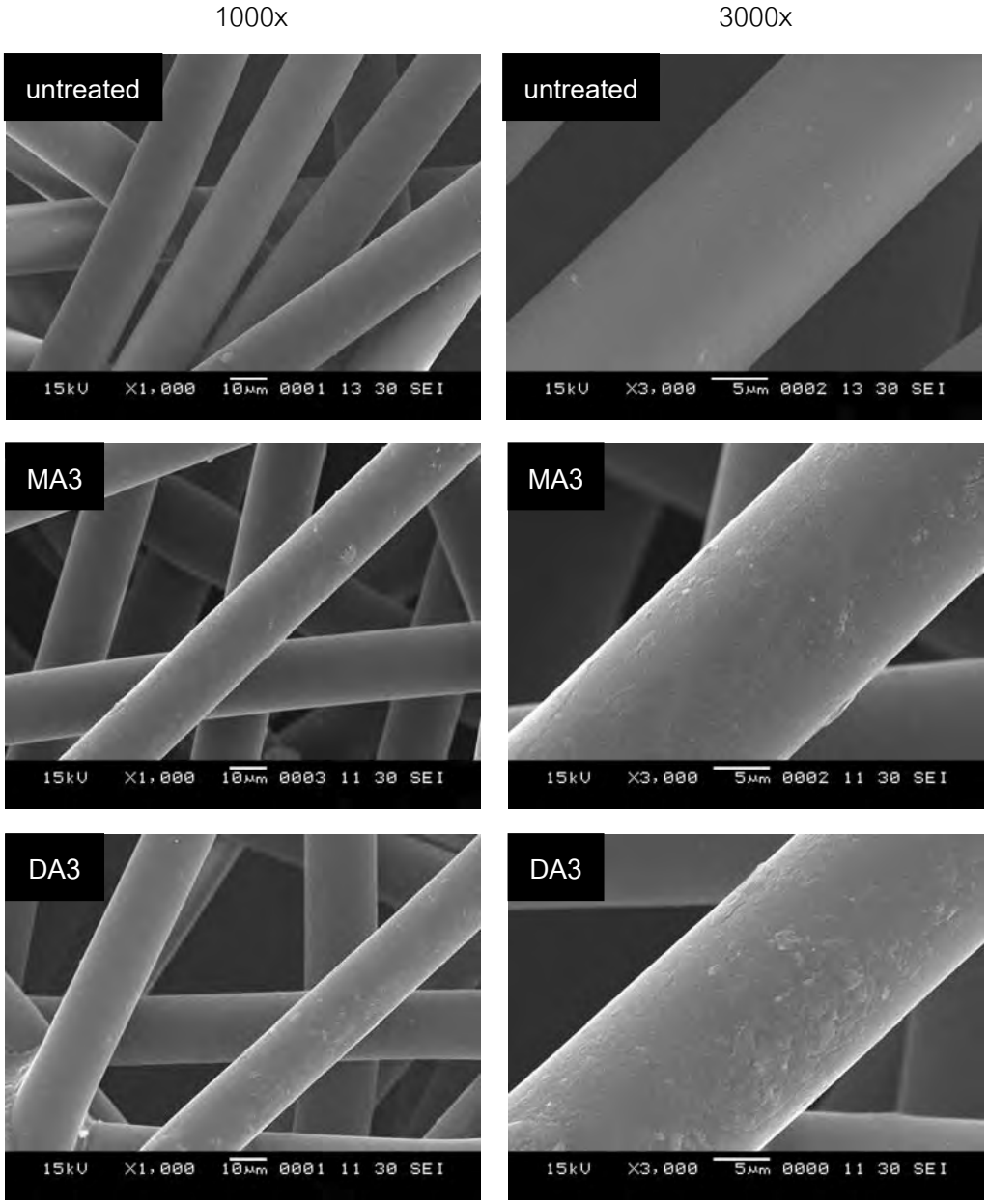
รูปที่ 4.36 (ต่อ)



รูปที่ 4.37 เส้นใยพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหมกับเบนโทไนต์ที่ความเข้มข้นต่างๆ


1000x
3000x
S5B5
15kV X1,000 10µm 0110 13 30 SEI
S5B5
15kV X3,000 5µm 0111 13 30 SEI
S7B3
15kV X1,000 10µm 0113 13 30 SEI
S7B3
15kV X3,000 5µm 0114 13 30 SEI
S9B1
15kV X1,000 10µm 0116 13 30 SEI
S9B1
15kV X3,000 5µm 0115 13 30 SEI

รูปที่ 4.37 (ต่อ)



รูปที่ 4.38 เส้นใยพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารประกอบฟอสฟอรัส

4.5 ความกระด้างของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนภายหลังการตกแต่งหน่วงไฟ

ในงานวิจัยได้เลือกตัวอย่างผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ ทั้งสูตรที่ให้ผลการหน่วงไฟและต้านการหลอมหยดได้ดี และไม่ดีมาทำการทดสอบความกระด้างของผ้า โดยค่าความกระด้างของผ้า แสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าความกระด้างของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารหน่วงไฟสูตรต่างๆ

สูตร	ค่าความกระด้าง (มิลลิเมตร)
untreated	39
B1DA3	37
S1DA3	39
DA3	39

จากตารางที่ 4.8 พบว่าผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านการตกแต่ง ผ้าที่ผ่านการตกแต่งด้วยผงกาวไหม 1 เปอร์เซ็นต์ กับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 เปอร์เซ็นต์ และผ้าที่ผ่านการตกแต่งด้วยไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความกระด้าง 39 มิลลิเมตร และผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเว่นที่ผ่านการตกแต่งด้วยเบนโทไนต์ 1 เปอร์เซ็นต์ กับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความกระด้าง 37 มิลลิเมตร แสดงว่าผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเว่นที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ 1 เปอร์เซ็นต์ กับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 เปอร์เซ็นต์ มีความกระด้างน้อยกว่าผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านการตกแต่ง และจะเห็นว่าค่าความกระด้างที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อเปรียบเทียบระหว่างผ้าที่ไม่ผ่านการตกแต่ง และผ้าที่ผ่านการตกแต่ง แสดงว่าสารหน่วงไฟที่นำมาตกแต่งบนผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนนี้ไม่มีผลต่อความกระด้างของผ้า

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการวิจัยการใช้เบนโทไนต์ ผงกาวไหม และสารประกอบฟอสฟอรัสเป็นสารหน่วงไฟและสารต้านการหลอมหยดสำหรับผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 ผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ตกแต่งด้วยสารประกอบฟอสฟอรัสได้แก่แอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต มีความสามารถในการหน่วงไฟและต้านการหลอมหยดได้ดี โดยพบว่าเมื่อติดไฟแล้วเปลวไฟจะดับทันทีหลังจากนำแหล่งต้นไฟออก ไฟไหม้ผ้าเป็นบริเวณแคบๆ และไม่เกิดการหลอมหยด เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการหน่วงไฟและต้านการหลอมหยดระหว่างแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต พบว่ามีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันในขณะที่ % add on ของ ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตมากกว่า

5.1.2 ผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ตกแต่งด้วยเบนโทไนต์เพียงอย่างเดียวในปริมาณที่น้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ผ้ายังคงมีการลุกไหม้และเกิดการหลอมหยด แต่เมื่อปริมาณเบนโทไนต์ 10 เปอร์เซ็นต์ ผ้ายังติดไฟและลุกไหม้เช่นเดิมแต่ไม่มีการหลอมหยดจึงทำให้แผ่นสำลีรองรับไม่ลุกไหม้ และยังพบชาร์เกิดขึ้นหลังจากไฟดับ นอกจากนี้เมื่อนำเบนโทไนต์มาใช้ร่วมกับสารประกอบฟอสฟอรัส ได้แก่ แอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต พบว่าปริมาณเบนโทไนต์ 1 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับสารประกอบฟอสฟอรัสทั้งสองชนิดสามารถหน่วงไฟและต้านการหลอมหยดได้ดี แต่เมื่อปริมาณเบนโทไนต์เพิ่มขึ้นผ้าเกิดลุกไหม้และหลอมหยด

5.1.3 ผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ตกแต่งด้วยผงกาวไหมเพียงอย่างเดียวผ้ายังคงติดไฟและลุกไหม้มากกว่าผ้าที่ไม่ผ่านการตกแต่ง เมื่อนำผงกาวมาใช้ร่วมกับสารประกอบฟอสฟอรัส ได้แก่ แอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต พบว่า ผ้ายังคงติดไฟและลุกไหม้เช่นเดิมแต่ไม่มีการหลอมหยดจึงทำให้แผ่นสำลีรองรับไม่ลุกไหม้ และยังพบชาร์เกิดขึ้นเล็กน้อยหลังจากไฟดับ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อนำผงกาวไหม 1 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับเบนโทไนต์ 9 เปอร์เซ็นต์ ผ้าไม่เกิดการหลอมหยดแต่ยังคงลุกไหม้อย่างช้าๆ เมื่อไฟดับพบชาร์เกิดขึ้นจำนวนมาก

5.1.4 จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ตกแต่งด้วยที่ตกแต่งด้วยเบนโทไนต์ ผงกาวไหม และสารประกอบฟอสฟอรัส พบว่าสารหน่วงไฟดังกล่าวมีอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้นและอุณหภูมิที่มีการสลายตัวมากที่สุดต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบกับผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านตกแต่ง แต่เบนโทไนต์และผงกาวไหมเพียงอย่างเดียวไม่ได้มีความสามารถในการหน่วงไฟเพิ่มขึ้น ส่วนการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC นั้นไม่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้ เนื่องจากสารที่ตกแต่งเพียงเคลือบบนผิวของผ้าเท่านั้น ทำให้ผลของอุณหภูมิการหลอมเหลวที่ได้ไม่แตกต่างกัน

5.1.5 สูตรการตกแต่งผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ให้ผลการหน่วงไฟที่ดี ผ้าติดไฟแล้วดับเองได้ ไม่เกิดการหลอมหยดและไม่ทำให้แผ่นสำลีรองรับลุกไหม้ นอกจากนี้ผ้ายังไม่เกิดความกระด้าง คือสูตรที่ตกแต่งด้วยแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตอย่างเดียว หรือสูตรที่ผสมเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟต 3 เปอร์เซ็นต์ กับเบนโทไนต์ 1 เปอร์เซ็นต์ หรือสูตรที่ผสมเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟต 3 เปอร์เซ็นต์ กับผงกาวไหม 1 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้นเบนโทไนต์และผงกาวไหม อาจจะนำมาใช้ร่วมกับสารหน่วงไฟเพื่อลดการใช้สารเคมีลงได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การนำเบนโทไนต์มาใช้เป็นสารหน่วงไฟ เมื่อใช้เบนโทไนต์ในปริมาณมากจะทำให้ผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนต้านการหลอมหยดได้และมีชาร์เกิดขึ้น แต่สารละลายมีความหนืดสูงซึ่งไม่เหมาะกับวิธีการจุ่ม อัด อาจจะต้องใช้เทคนิคอื่น

5.2.2 การนำผงกาวไหมเพียงอย่างเดียว ยังไม่สามารถหน่วงไฟและต้านการหลอมหยดได้ดี แต่ควรทำการศึกษาใช้ร่วมกับสารหน่วงไฟธรรมชาติอื่นๆ ที่ทำให้เกิดชาร์ได้ก็อาจทำให้ผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนหน่วงไฟและต้านการหลอมหยดได้ดีขึ้น

5.2.3 ในการตกแต่งผ้าพอลิเอสเทอร์ซึ่งเป็นผ้าที่มีการดูดซึมน้ำที่ต่ำมาก การตกแต่งด้วยวิธีจุ่ม อัด อาจทำให้ผ้าดูดซึมน้ำได้ไม่ดีพอ ควรใช้สารช่วยเปียก (wetting agent) เพื่อช่วยทำให้ผ้าพอลิเอสเทอร์มีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้ดีขึ้น

รายการอ้างอิง

[1] มณฑา จันทร์เกตุเลี้ยด. วิทยาศาสตร์สิ่งทอเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : หอรัตนชัยการพิมพ์, 2541.

[2] วีรศักดิ์ อุดมกิจเดชา. วิทยาศาสตร์เส้นใย. พิมพ์ครั้งที่ 1. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.

[3] สมจิตต์ ตั้งชัยวัฒนา, ขนิษฐา อัศวชัยณรงค์ และพรทิพย์ ลามอ.ผ้าไม่ทอ. วารสารวิทยาศาสตร์บริการ.ปีที่ 54 ฉบับที่171 (พฤษภาคม 2549) : 35-36.

[4] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. ความรู้และเทคโนโลยีสิ่งทอ[ออนไลน์]. กรุงเทพมหานคร : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2552. แหล่งที่มา: http://www2.mtec.or.th [10 มีนาคม 2552].

[5] EDANA. Discover nonwovens[Online]. Available from : http://www.edana.org. [14 May 2009]

[6] M. G. Kamath, Atul Dahiya, Raghavendra R. Hegde. SPUNLACE [Online]. Available from : http://web.utk.edu/~mse/pages/Textiles/Spunlace_files/image002.jpg [14 May 2009]

[7] Fluent. Process layout for meltblown systems[Online]. Available from : http://www.fluent.com/solutions/examples/img/melt_blown_layout.jpg. [14 May 2009]

[8] นันทยา ยานุเมศ. การตกแต่งสิ่งทอ. กองอุตสาหกรรมสิ่งทอ, กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, 2540.

[9] ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ . Safty engineering [ออนไลน์]. ,เชียงใหม่: ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยแม่โจ้, 2552. แหล่งที่มา: http://coursewares.mju.ac.th [10 มีนาคม 2552]

[10] van Krevelen, D. W. Some basic aspects of flame resistance of polymeric materials. Polymer. 16 (1975): 615-620.

[11] Carty P. and Byrne M.S. The chemical and mechanical finishing of textile material. England: Newcastle upon Tyne Polytechnic Products, (1987).

[12] สิรีรัตน์ จารุจินดา. สิ่งทอทนไฟ. การพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกลยุทธ์การวิจัย. ศูนย์วิจัยและทดสอบสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.

[13] Horrocks, R. Flame-retardant finishing of textiles. Review of Progress in Coloration 16 (1986): 62-76.

[14] Troitzsh, J. Methods for The Fire Protection of Plastics and Coatings by Flame Retardant and Intumescent Systems. Progress in Organic Coatings 11 (1983): 41-69.

[15] Carr C. M. Chemistry of the textiles industry. New York : Chapman&Hall, 1995.

[16] Gachter, R.; and Muller, H. Plastic Additives Handbook. New York: Hanser, 1997.

[17] Kandola, B.; Horrocks, R.; and Culeman, G. Journal of Macro Molecular Science, Reviews in Macro Molecular Chemistry and Physics 36 (1996): 742-778.

[18] Cotton Technical Brief. Flame Resistant Cotton Fabrics. New York, 1982.

[19] Tomasino, C. Chemistry and Technology of Fabrics Preparation and Finishing. USA, 1992.

[20] Wikie, C. Fire Properties of Future Material Candidates[Online]. Available from : http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=4970&page=116 [1 August 2009]

[21] Aenishanslin, R.; Guth, C.; Hofmann, P.; Maeder A.; and Nachbur, H. A New Chemical Approach to Durable Flame-Retardant Cotton Fabrics. Textile Research Journal 39 (1969): 375-381.

[22] สิรีรัตน์ จารุจินดา. เกาะติดสถานการณ์ความเคลื่อนไหวของกฎข้อบังคับเพื่อความปลอดภัยจากอัคคีภัยของผลิตภัณฑ์สิ่งทอ. คัลเลอร์เวย์ 8(44) : หน้า 32-33.

[23] ฐิติพร โมวัฒนะ. การใช้สารประกอบฟอสฟอรัสร่วมกับไคโทซานเพื่อปรับปรุงสมบัติการหน่วงไฟของผ้าฝ้าย. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ; คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

[24] ดาววัน จาระเวชสาร. ผลขององค์ประกอบหลักของสารเคลือบผิวอินทูเมสเซนต์ต่อสมบัติหน่วงไฟของผ้าฝ้าย. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ; คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.

[25] Horrocks A.R. and Price C.D. Flame Retardant Materials. England : Woodhead Publishing Limited, 2001.

[26] ทรรศพร พิศรูป. สารดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์สำหรับสารเคลือบผิวอะคลิลิก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ; คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

[27] David Mogk. Montmorillonite Structure [Online]. Mineesota: Science Education Resource Center, 2009. Available form: http://serc.carleton.edu/NAGT workshops/mineralogy/clay_mineralogy.html [14 March 2009]

[28] อรรถกิต ฉัตรภูมิ. โครงสร้างดินเหนียว [ออนไลน์]. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2552. แหล่งที่มา: http://www.vichakarn.com [16 มีนาคม 2552]

[29] Se Jin Kim. Gas permeation through water-swollen sericin/ PVA membranes. Master of Applied Science, Chemical Engineering, University of Waterloo, 2007.

[30] Dan Q.C., Yu Z. W., Xiao-P. H., De-Y W., Ming H. Q., Bing Y. 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.

[31] Xin-Guo. G., De Y.W., Chuan W., Ming H. Q., Jun S. W., Cheng S. Z., Xin K. J., Yu Z. W. A novel phosphorus-containing copolyester/montmorillonite nanocomposites with improved flame retardancy. Macromolecular Nanotechnology. 43(2007) : 2882-2890.

[32] Mayu S., Vladimir Z., Michael G., Anatoly F., Dennis P., Edward W., Jonathan S., Miriam R. Self-extinguishing polymer/organoclay nanocomposites. Polymer Degradation and Stability 92 (2007) : 86-93.

[33] Serge B., Eric D., Xavier F. Flammability of polyamide-6/clay hybrid nanocomposite textiles. Polymer Degradation and Stability 75 (2002) : 397-420.

[34] Lei S., Yuan H., Yong T., Rui Z., Zuyao C., Weicheng F. Study on the properties of flame retardant polyurethane/organoclay nanocomposite. Polymer Degradation and Stability 87 (2005) : 111-116.

[35] Araujo E.M., Barbosa R., Rodrigues A.W.B., Melo T.J.A., Ito E.N. Processing and characterization of polyethylene/Brazilian clay nanocomposites. Materials Science and Engineering A 445–446 (2007) : 141–147

[36] Xu J.Z., Gao M., Guo H.Z., Liu X.L., Li Z., Wang H., Tian C.M. Study on the Thermal Degradation of Cellulosic Fibers Treated with Flame Retardants. Journal of Fire Science. 20 (2002) : 227-235.

[37] วิชัย ริ้วตระกลู และคณะ. การประยุกต์สเปกโตรสโครปีในเคมีอินทรีย์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ห้องเรียน, 2526.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก.1 % pick up และ % add on ของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ

ตารางที่ ก-1 ผลของ % pick up และ % add on ของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ และเบนโทไนต์กับเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟตในปริมาณที่แตกต่างกัน

สูตร	น้ำหนักผ้าก่อน pad (g)	น้ำหนักผ้าหลัง pad (g)	% pick up	น้ำหนักผ้าก่อนอบ (g)	น้ำหนักผ้าหลังอบ (g)	% add on
B1	1.63	3.47	113.35	1.63	1.69	3.87
B3	1.55	3.37	117.72	1.55	1.61	4.08
B5	1.63	3.84	135.69	1.63	1.73	5.96
B7	1.77	3.38	90.96	1.77	1.89	6.78
B10	1.64	3.44	109.38	1.64	1.81	10.29
B1MA3	1.66	3.19	92.17	1.66	1.75	5.42
B3MA3	1.63	3.42	109.82	1.63	1.75	7.36
B5MA3	1.83	4.06	121.86	1.83	1.98	8.20
B7MA3	1.68	3.98	136.90	1.68	1.88	11.91
B10MA3	1.46	3.19	115.88	1.46	1.72	15.53
B1DA3	1.54	3.32	115.58	1.54	1.60	3.90
B3DA3	1.57	3.17	101.91	1.57	1.69	7.64
B5DA3	1.70	3.71	118.24	1.70	1.86	9.41
B7DA3	1.59	3.30	107.55	1.59	1.79	12.58
B10DA3	1.47	3.15	113.93	1.47	1.69	15.08

ตารางที่ ก-2 ผลของ % pick up และ % add on ของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม และผงกาวไหมกับเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟตในปริมาณที่แตกต่างกัน

สูตร	น้ำหนักผ้าก่อน pad (g)	น้ำหนักผ้าหลัง pad (g)	% pick up	น้ำหนักผ้าก่อนอบ (g)	น้ำหนักผ้าหลังอบ (g)	% add on
S1	1.55	3.28	111.61	1.55	1.59	2.58
S3	1.58	3.48	119.97	1.58	1.66	5.06
S5	1.68	3.87	130.26	1.68	1.91	13.64
S7	1.57	3.45	119.75	1.57	1.79	14.01
S10	1.67	3.74	124.07	1.67	1.92	15.21
S1MA3	1.69	3.73	120.71	1.69	1.77	4.73
S3MA3	1.71	3.75	119.30	1.71	1.83	7.02
S5MA3	1.72	3.72	116.28	1.72	1.90	10.47
S7MA3	1.71	3.82	123.39	1.71	1.92	12.28
S10MA3	1.52	3.22	112.26	1.52	1.73	14.11
S1DA3	1.80	4.32	140.00	1.80	1.94	7.78
S3DA3	1.88	4.34	130.85	1.88	2.04	8.51
S5DA3	1.64	3.72	126.83	1.64	1.83	11.59
S7DA3	1.75	4.13	136.00	1.75	1.99	13.71
S10DA3	1.54	3.35	117.53	1.54	1.78	14.45

ตารางที่ ก-3 ผลของ % pick up และ % add on ของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์กับผงกาวไหมในปริมาณที่แตกต่างกัน

สูตร	น้ำหนักผ้าก่อน pad (g)	น้ำหนักผ้าหลัง pad (g)	% pick up	น้ำหนักผ้าก่อนอบ (g)	น้ำหนักผ้าหลังอบ (g)	% add on
S1B9	1.62	3.33	105.55	1.62	1.78	9.88
S3B7	1.60	3.37	110.63	1.60	1.79	11.88
S5B5	1.59	3.67	130.18	1.59	1.80	12.80
S7B3	1.70	3.96	133.22	1.70	1.98	16.61
S9B1	1.53	3.63	137.25	1.53	1.89	23.53

ตารางที่ ก-4 ผลของ % pick up และ % add on ของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟตได้แก่ แอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และ ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตในปริมาณที่แตกต่างกัน

สูตร	น้ำหนักผ้าก่อน pad (g)	น้ำหนักผ้าหลัง pad (g)	% pick up	น้ำหนักผ้าก่อนอบ (g)	น้ำหนักผ้าหลังอบ (g)	% add on
MA3	1.61	2.91	80.40	1.61	1.69	4.78
DA3	1.67	3.57	113.59	1.67	1.81	8.26

ภาคผนวก ก.2 พฤติกรรมการติดไฟ การลามไฟ และการหลอมหยดของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนแนว 45 องศา

ตารางที่ ก-5 เวลาในการลามไฟ (วินาที)และระยะทางการลามไฟ (ซม.) ของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ และเบนโทไนต์กับเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟตในปริมาณที่แตกต่างกัน

สูตร	เวลาในการลามไฟ (วินาที)			เฉลี่ย (วินาที)	ระยะทางการลามไฟ (ซม.)			เฉลี่ย (วินาที)
untreated	3.82	4.30	3.25	3.79	9.00	13.20	10.10	10.77
B1	5.21	3.22	4.98	4.47	15.00	15.00	15.00	15.00
B3	4.95	5.11	4.04	4.70	15.00	15.00	15.00	15.00
B5	6.50	3.70	6.00	5.40	8.40	15.00	15.00	12.80
B7	6.66	4.40	6.69	5.92	14.80	12.70	14.50	14.00
B10	5.81	7.61	10.50	7.97	15.00	15.00	15.00	15.00
B1MA3	0	4.09	5.66	3.25	1.70	7.30	14.80	7.90
B3MA3	8.25	7.18	3.28	6.24	15.00	12.40	11.50	13.00
B5MA3	10.72	7.38	7.66	8.59	12.90	12.50	12.40	12.60
B7MA3	9.86	9.97	10.15	9.99	10.10	13.50	15.00	12.90
B10MA3	7.53	9.82	8.28	8.54	14.30	15.00	15.00	14.80
B1DA3	0	0	0	0	1.90	2.70	2.40	2.30
B3DA3	8.19	6.57	4.97	6.58	13.70	6.60	6.00	8.80
B5DA3	8.75	10.54	6.19	8.49	14.00	14.60	12.20	13.60
B7DA3	8.72	10.16	6.03	8.3	15.00	12.90	13.10	13.70
B10DA3	5.97	11.13	9.16	8.75	11.10	14.80	13.80	13.20

ตารางที่ ก-6 เวลาในการลามไฟ (วินาที)และระยะทางการลามไฟ (ซม.) ของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม และผงกาวไหม กับเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟตในปริมาณที่แตกต่างกัน

สูตร	เวลาในการลามไฟ (วินาที)			เฉลี่ย (วินาที)	ระยะทางการลามไฟ (ซม.)			เฉลี่ย (วินาที)
S1	8.22	2.75	3.85	4.94	15.00	12.20	14.70	13.97
S3	2.62	2.88	2.91	2.80	13.70	14.80	10.20	12.90
S5	4.15	2.13	4.37	3.55	10.60	13.90	14.60	13.03
S7	2.69	2.81	4.03	3.18	13.50	12.40	14.80	13.57
S10	3.38	5.04	3.50	3.97	10.60	14.90	14.80	13.43
S1MA3	0	1.09	0	0.36	3.10	12.00	3.40	6.17
S3MA3	2.88	1.75	2.56	2.40	5.90	4.60	4.50	5.00
S5M3	0.58	0.37	0.88	0.61	6.10	4.70	6.70	5.83
S7MA3	11.91	13.81	7.00	10.91	11.60	12.00	6.00	9.87
S10MA3	13.25	10.75	10.47	11.49	15.00	15.00	15.00	15.00
S1DA3	0	3.15	1.50	1.55	3.10	5.60	5.60	4.77
S3DA3	0.50	0	0.79	0.43	5.20	2.90	5.20	4.43
S5DA3	10.59	3.91	5.16	6.55	13.60	5.40	5.40	8.13
S7DA3	1.30	1.79	3.19	2.09	10.10	5.40	15.00	10.17
S10DA3	17.50	15.28	13.41	15.40	15.00	15.00	15.00	15.00

ตารางที่ ก-7 เวลาในการลามไฟ (วินาที) และระยะทางการลามไฟ (ซม.) ของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์กับผงกาวไหมในปริมาณที่แตกต่างกัน

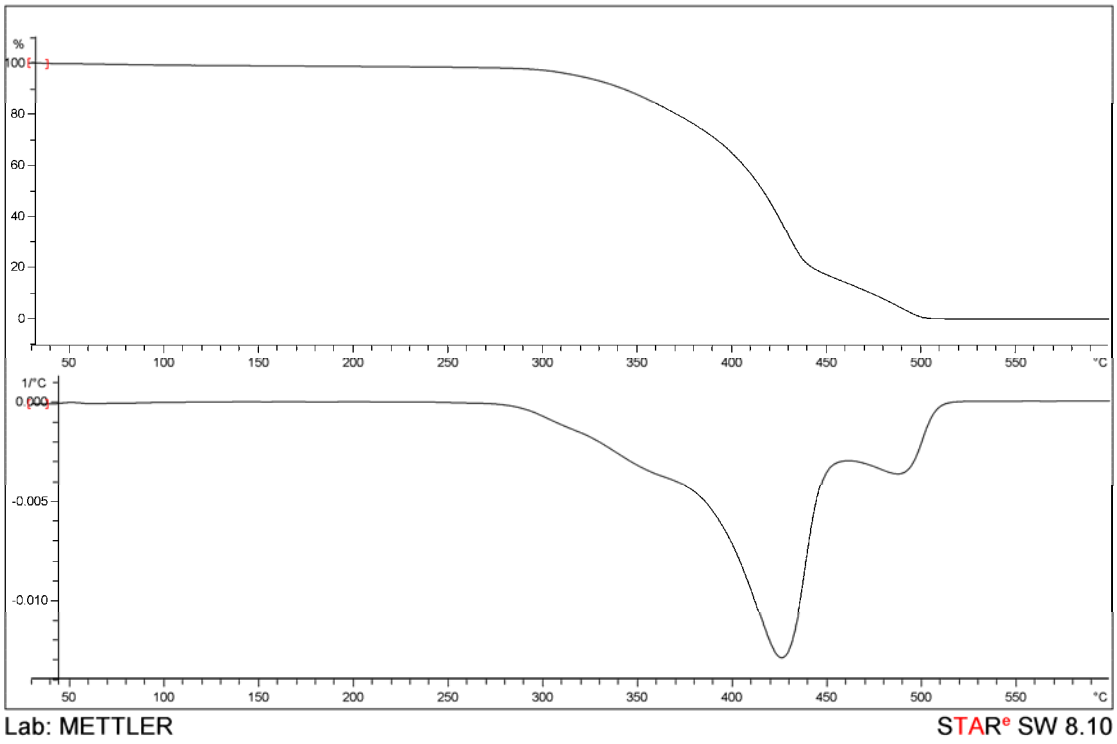
สูตร	เวลาในการลามไฟ (วินาที)			เฉลี่ย (วินาที)	ระยะทางการลามไฟ (ซม.)			เฉลี่ย (วินาที)
S1B9	5.84	5.25	3.41	4.83	15.00	15.00	15.00	15.00
S3B7	4.56	6.31	6.72	5.86	15.00	15.00	15.00	15.00
S5B5	8.87	7.69	5.72	7.43	15.00	15.00	15.00	15.00
S7B3	7.25	10.50	8.34	8.70	15.00	15.00	15.00	15.00
S9B1	2.38	3.65	2.78	2.94	15.00	15.00	15.00	15.00

ตารางที่ ก-8 เวลาในการลามไฟ (วินาที) และระยะทางการลามไฟ (ซม.) ของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเกลือแอมโมเนียมฟอสเฟตได้แก่ แอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และ ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตในปริมาณที่แตกต่างกัน

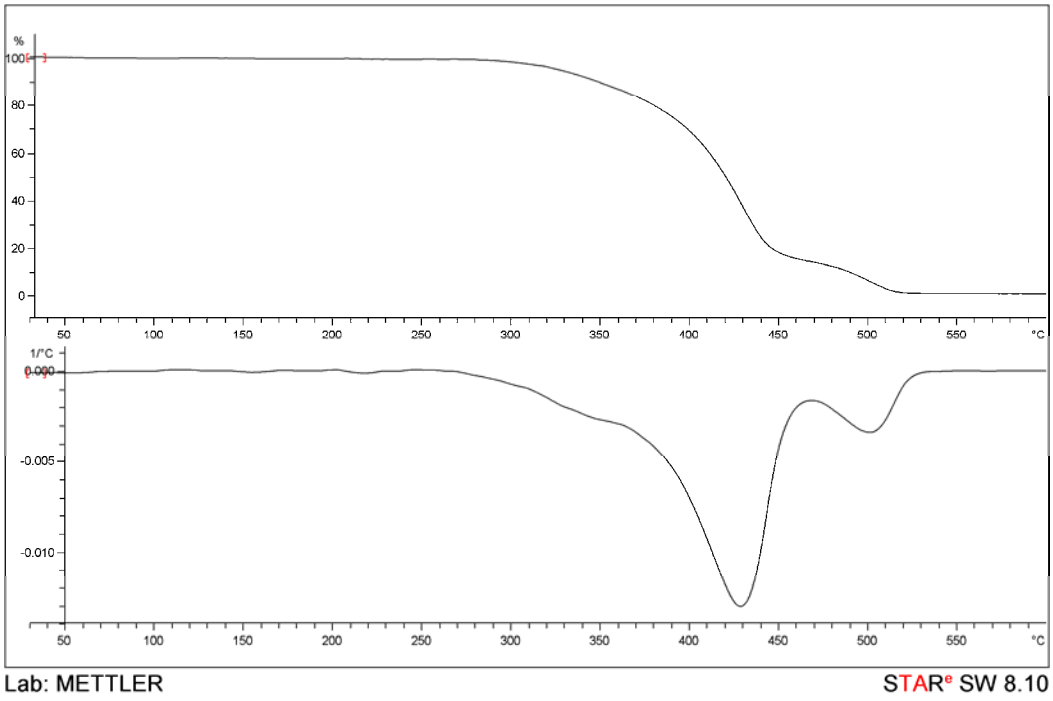
สูตร	เวลาในการลามไฟ (วินาที)			เฉลี่ย (วินาที)	ระยะทางการลามไฟ (ซม.)			เฉลี่ย (วินาที)
MA3	0	0	0	0	3.60	3.50	2.90	3.17
DA3	0	0	0	0	2.30	4.60	2.50	3.13

ภาคผนวก ข

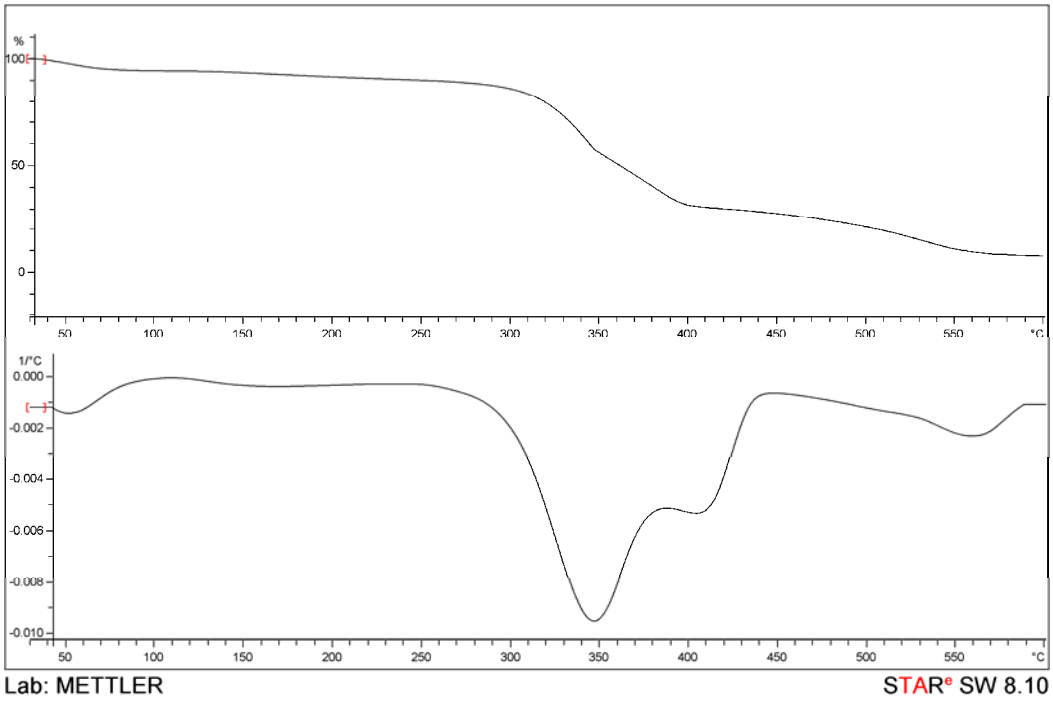
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ไม่ผ่านและผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ ด้วยเทคนิค TGA และ DSC



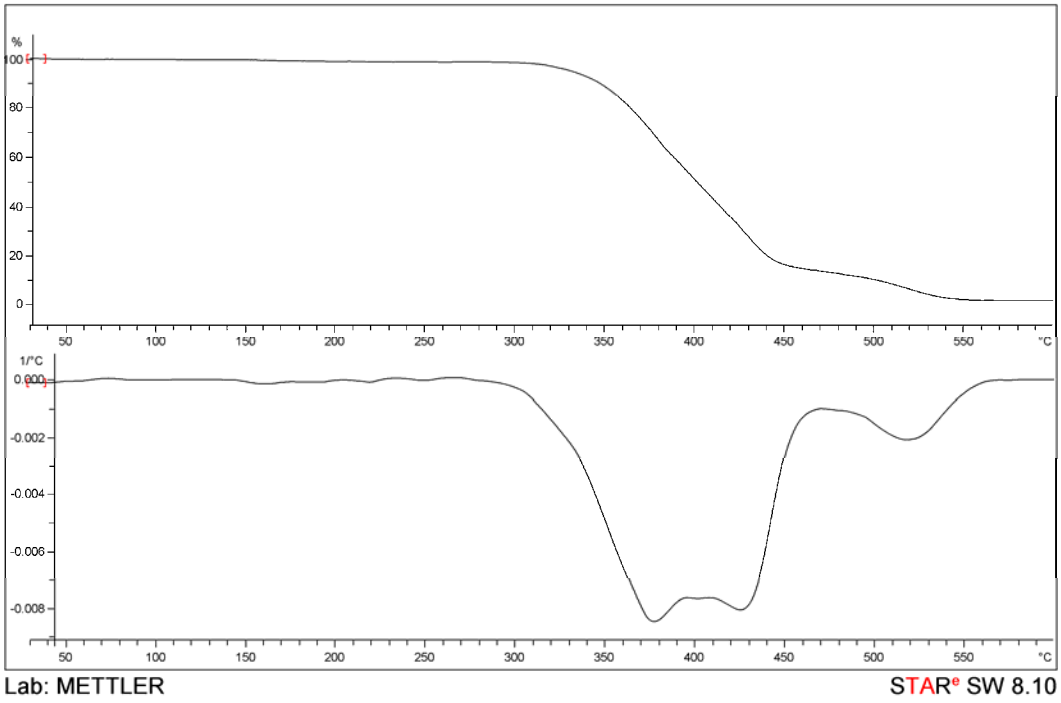
รูปที่ ข-1 TGA เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ



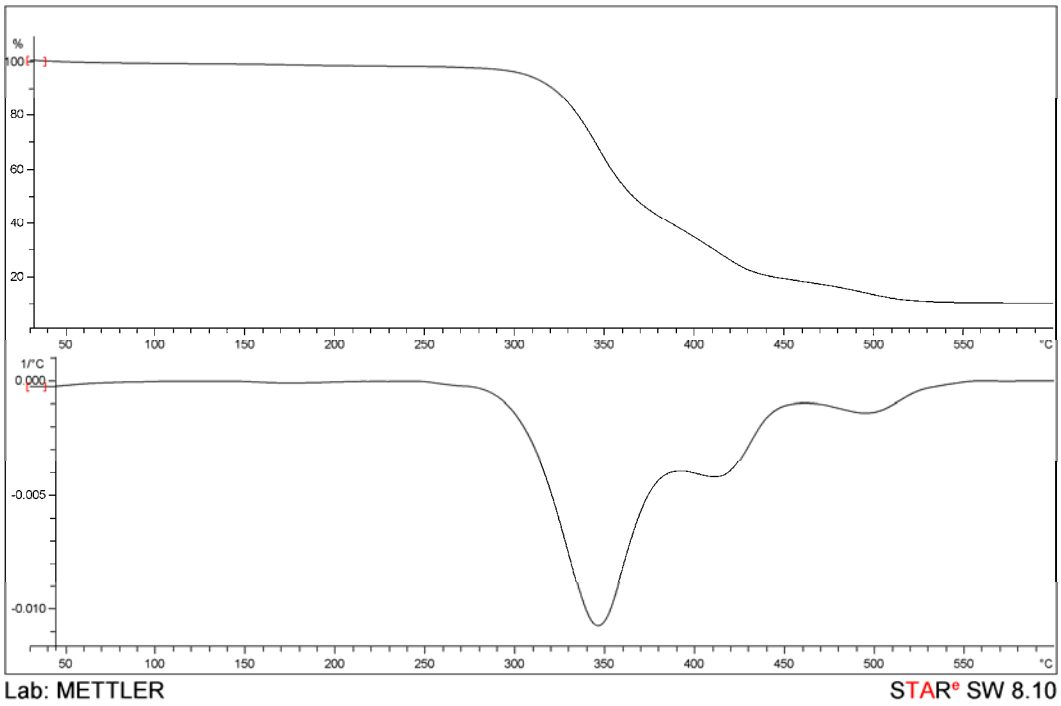
รูปที่ ข-2 TGA เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ 1 %



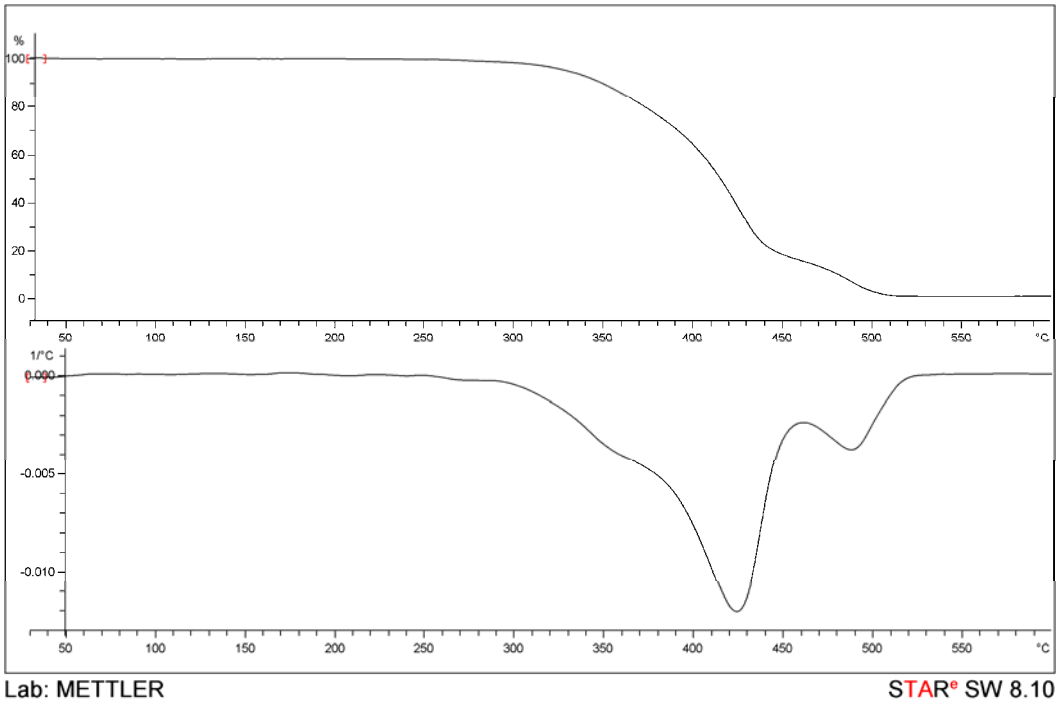
รูปที่ ข-3 TGA เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ 10 %



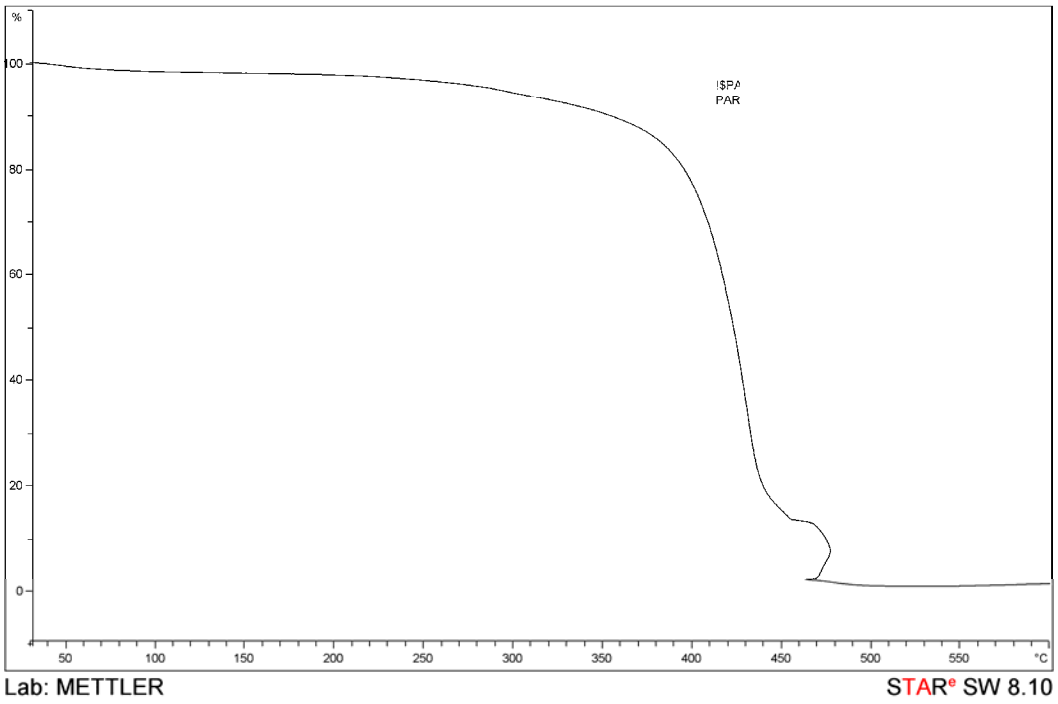
รูปที่ ข-4 TGA เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ 1 % กับ ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 %



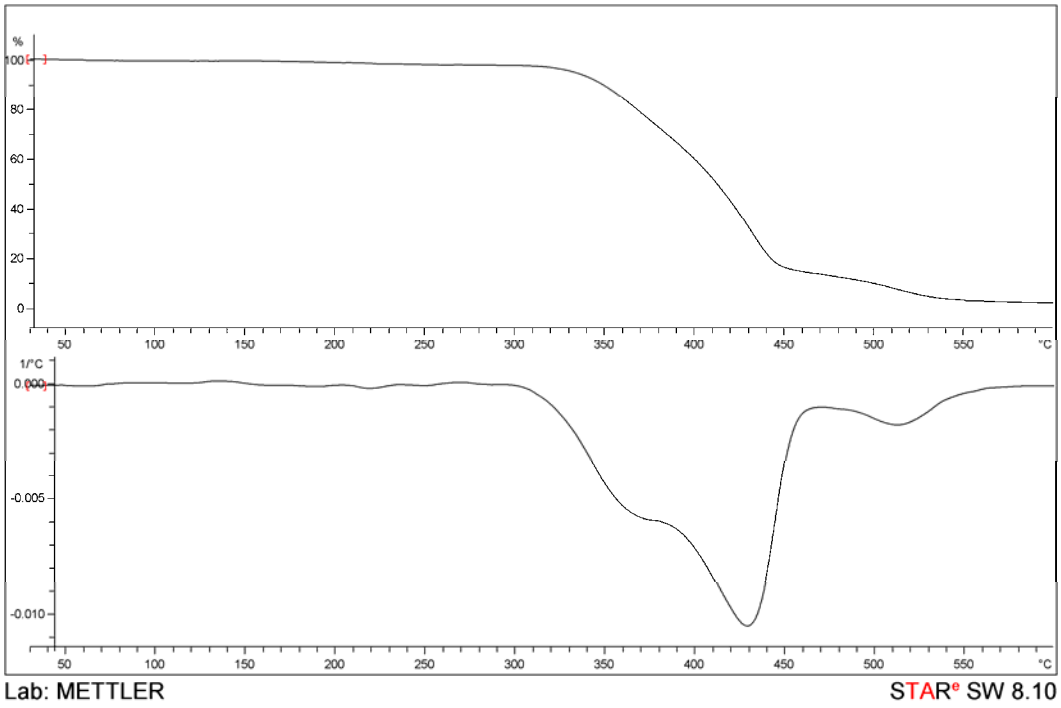
รูปที่ ข-5 TGA เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ 10 % กับ ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 %



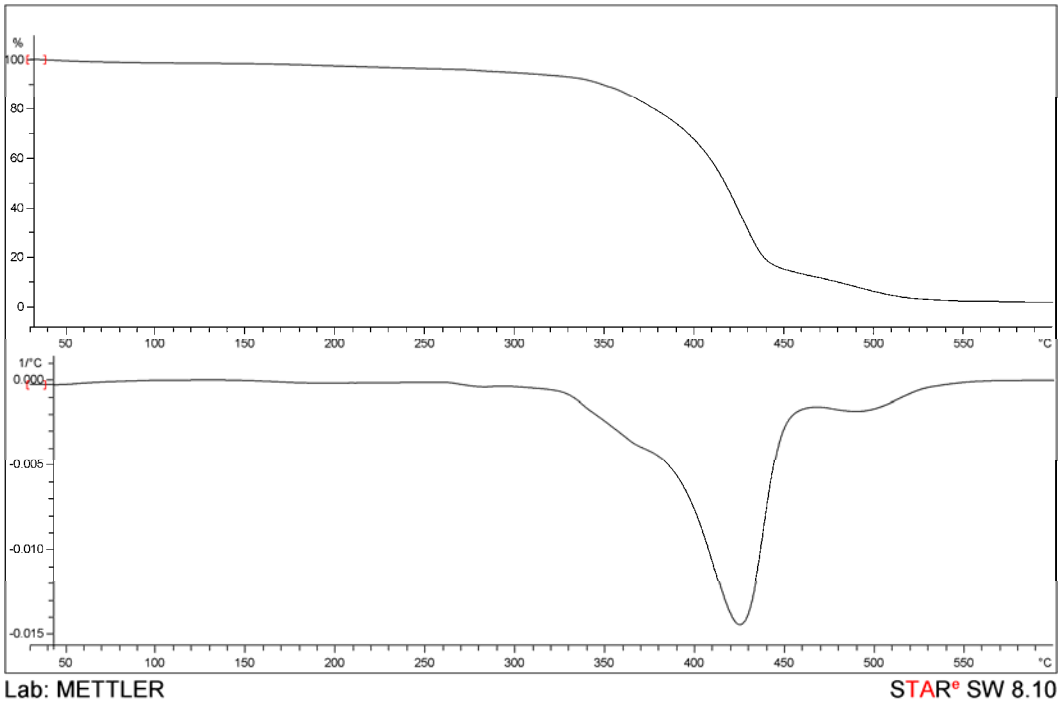
รูปที่ ข-6 TGA เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม 1 %



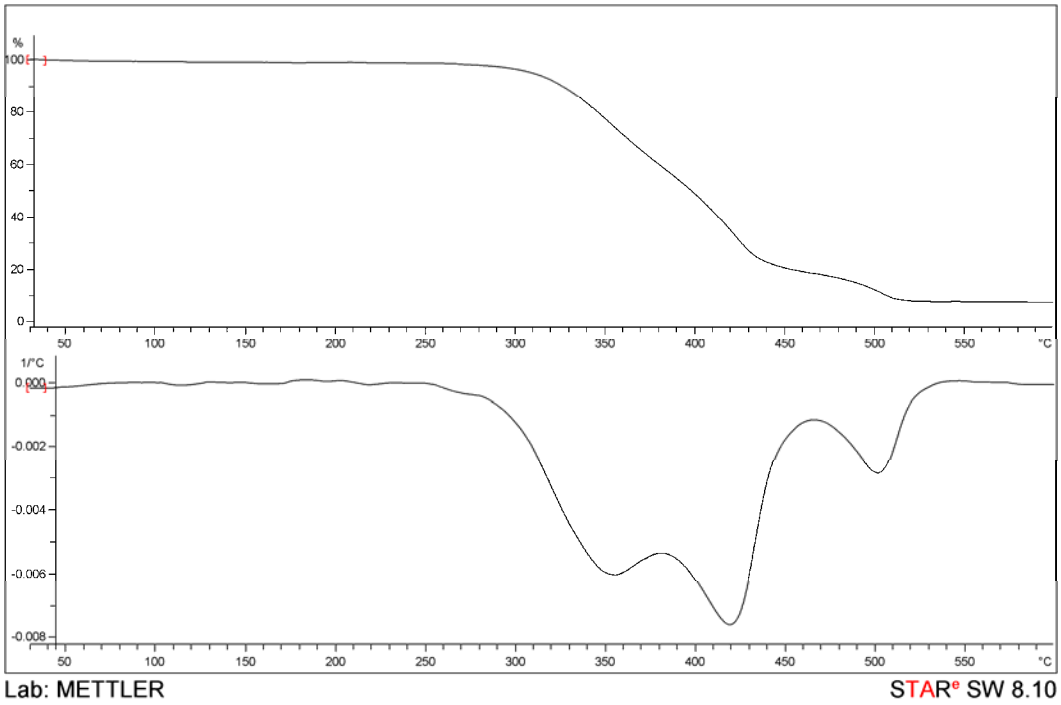
รูปที่ ข-7 TGA เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม 10 %



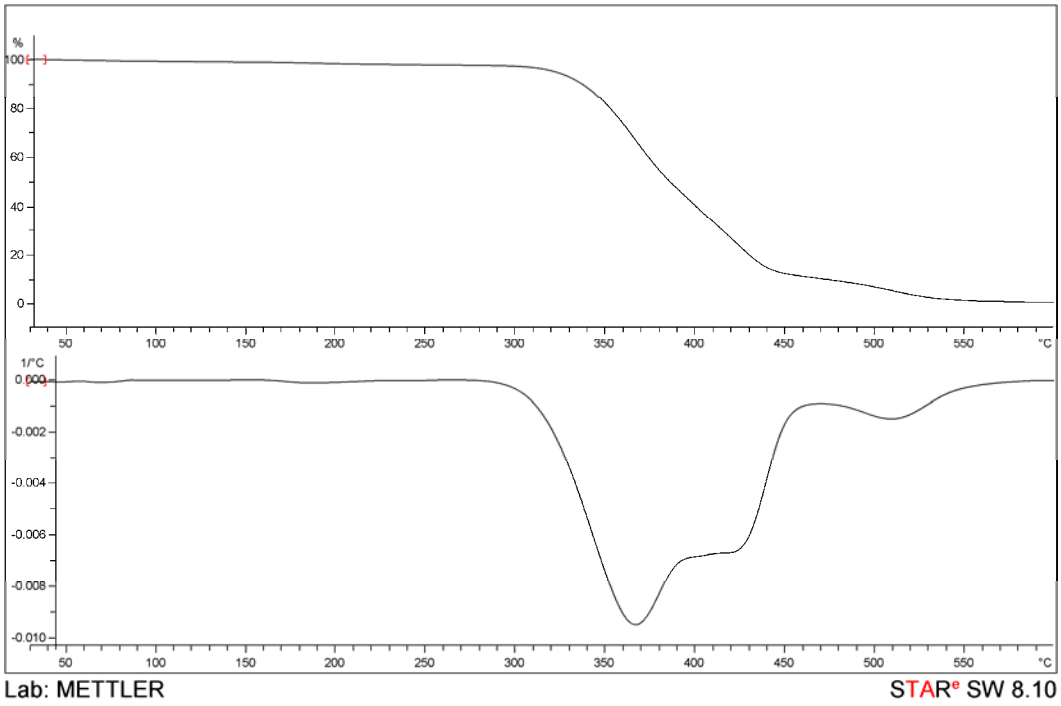
รูปที่ ข-8 TGA เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม 1 % กับ ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 %



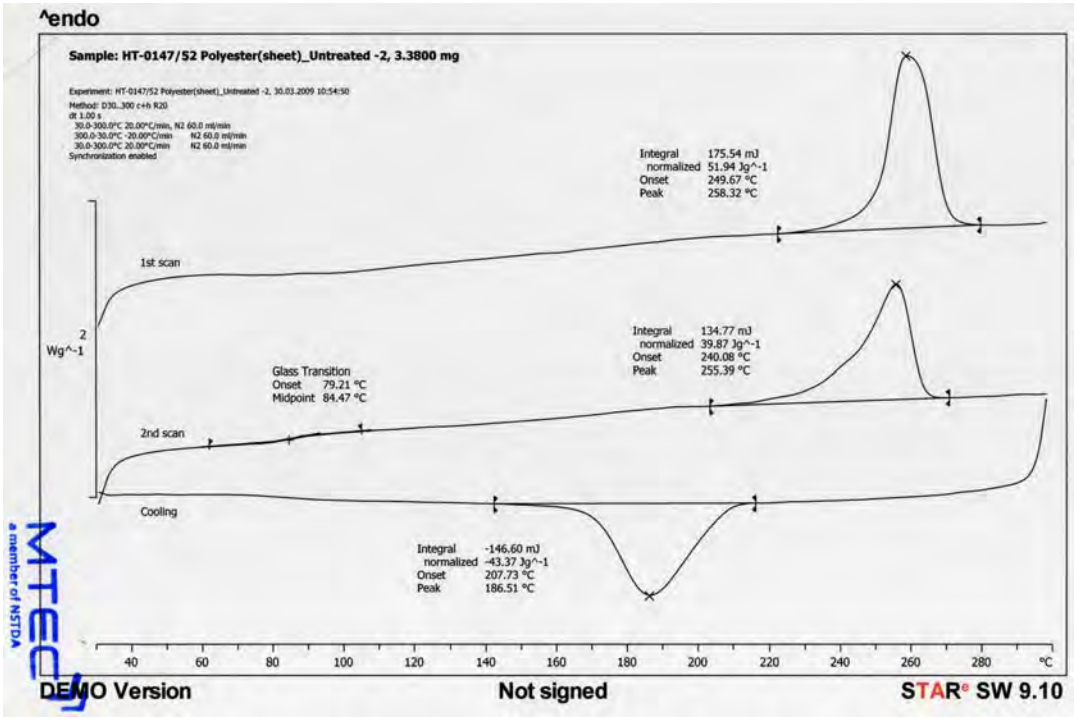
รูปที่ ข-9 TGA เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม 10 % กับ ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 %



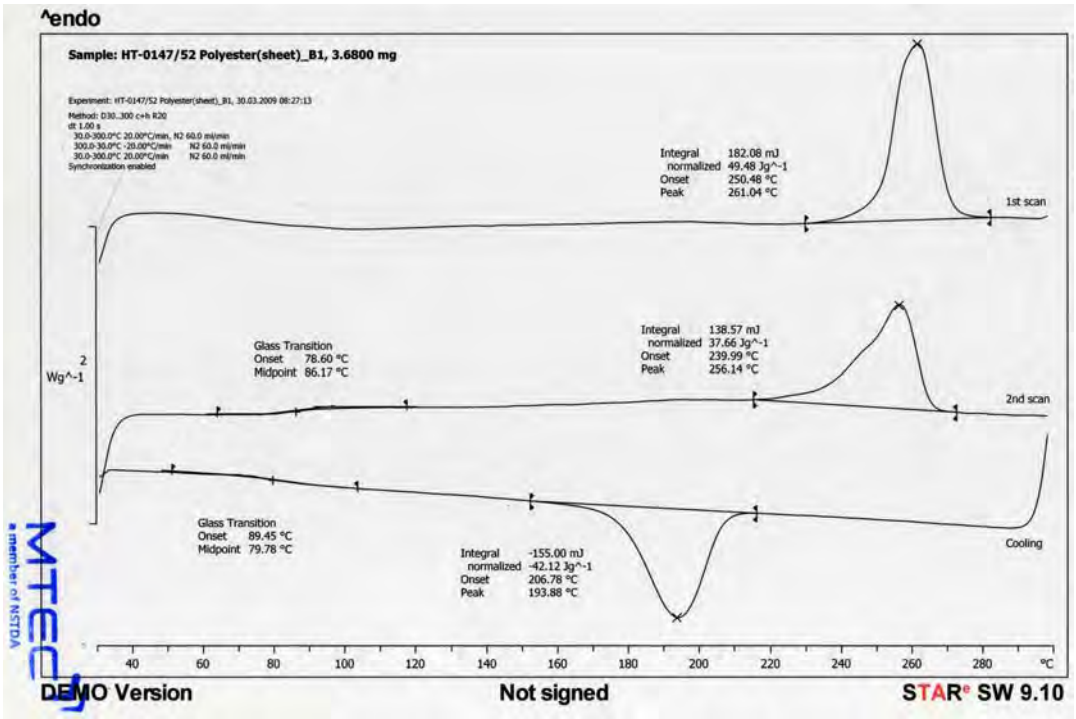
รูปที่ ข-10 TGA เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม 1 % กับ เบนโทไนต์ 9 %



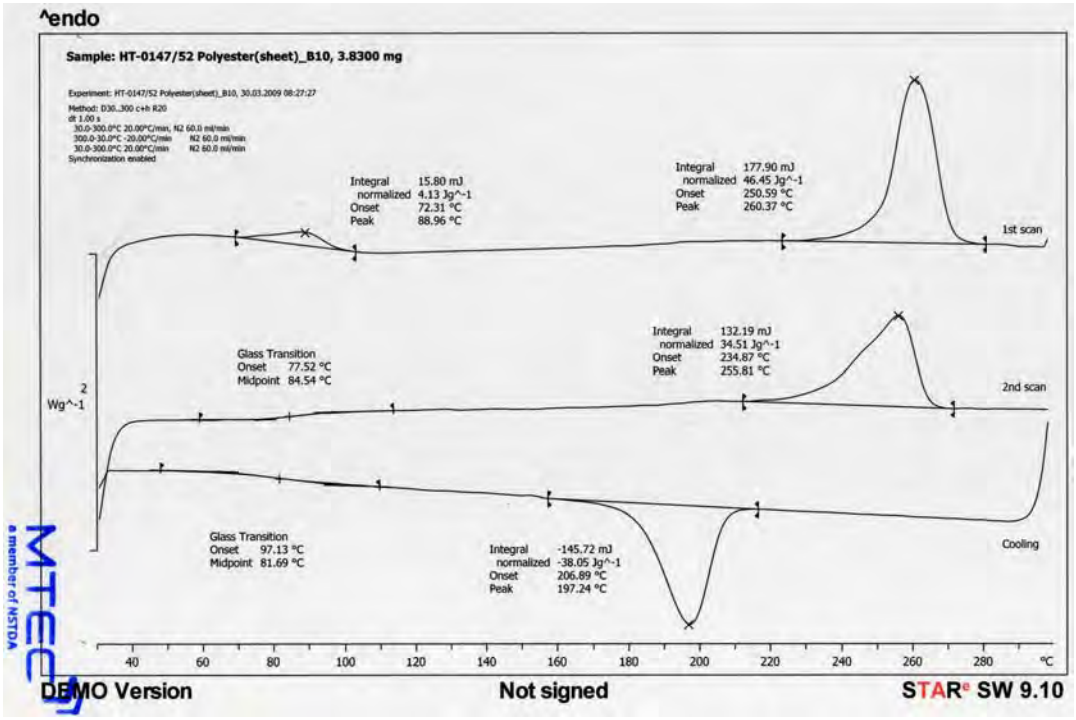
รูปที่ ข-11 TGA เทอร์โมแกรมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 %



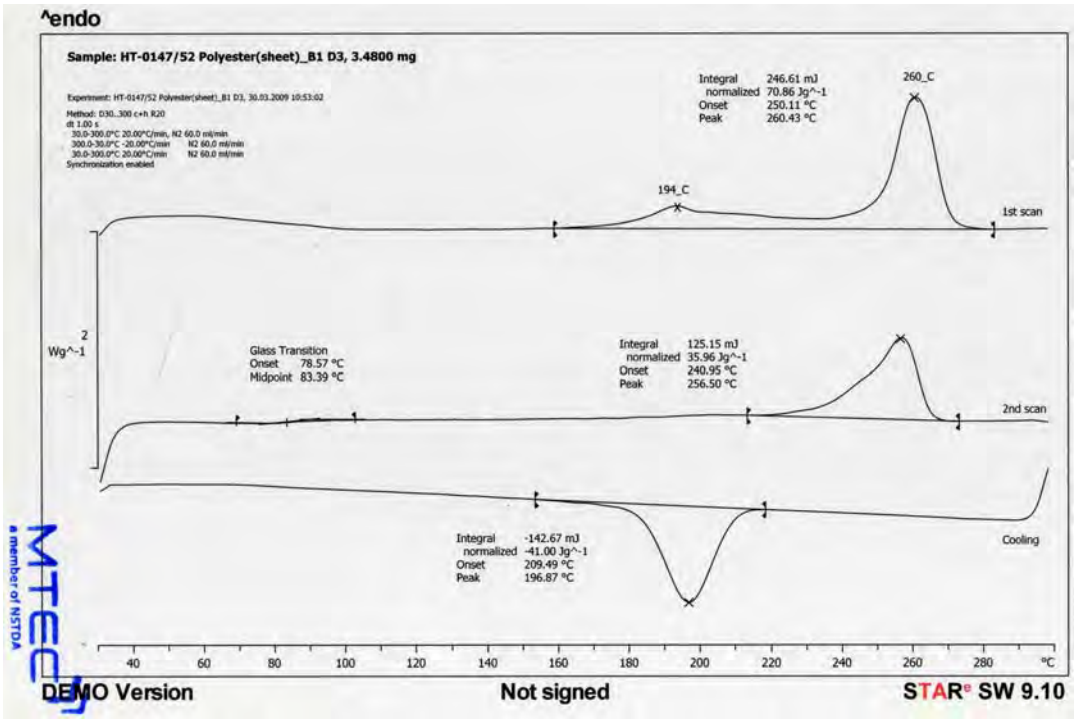
รูปที่ ข-12 กราฟ DSC ของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ



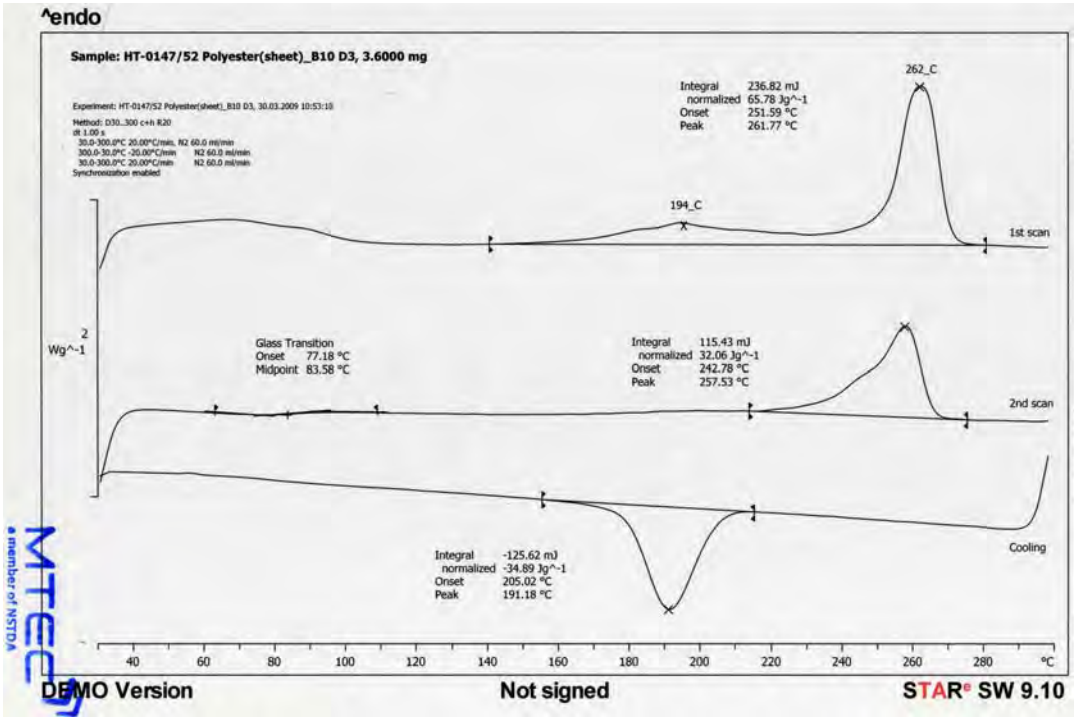
รูปที่ ข-13 กราฟ DSC ของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ 1%



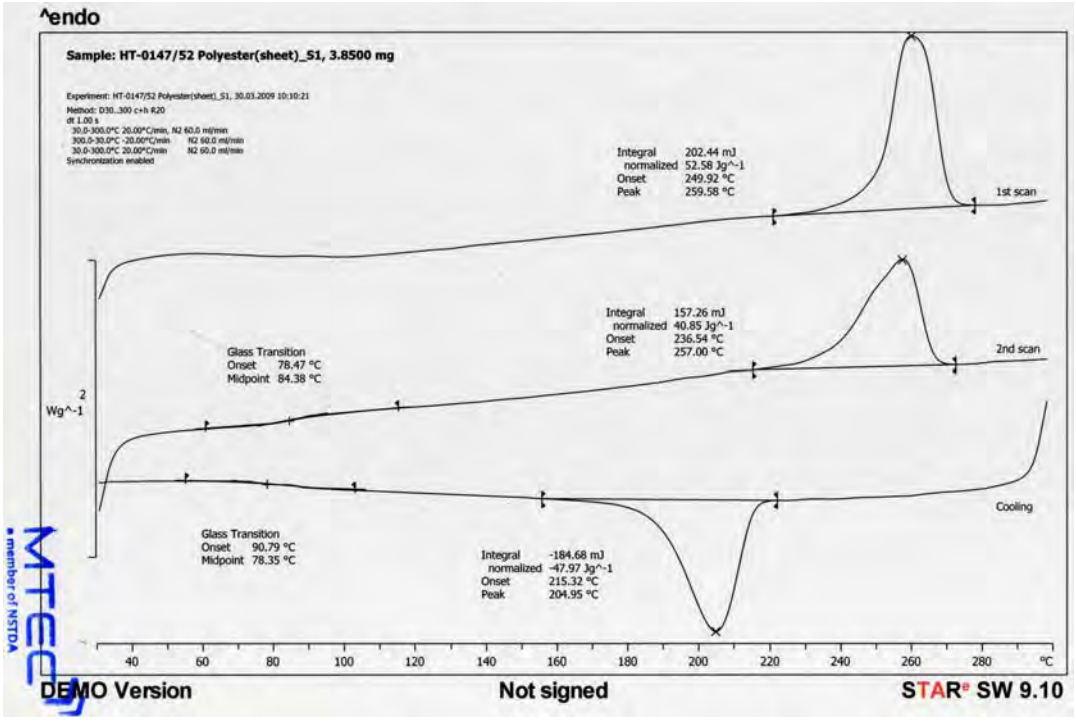
รูปที่ ข-14 กราฟ DSC ของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ 10 %



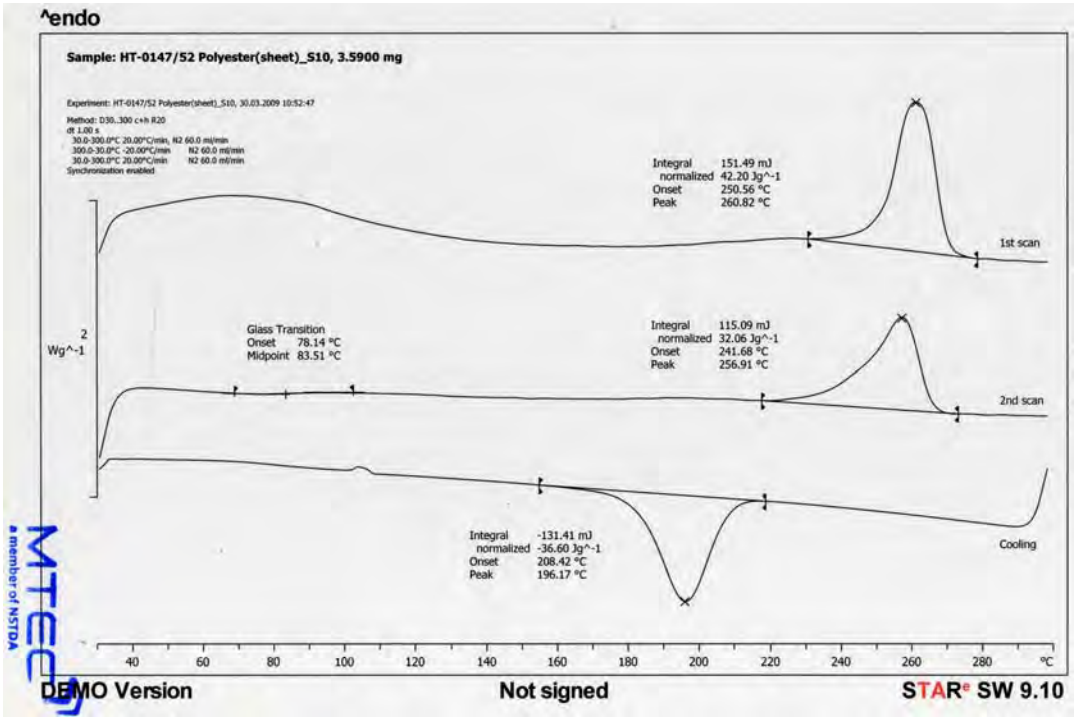
รูปที่ ข-15 กราฟ DSC ของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ 1 % กับ ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 %



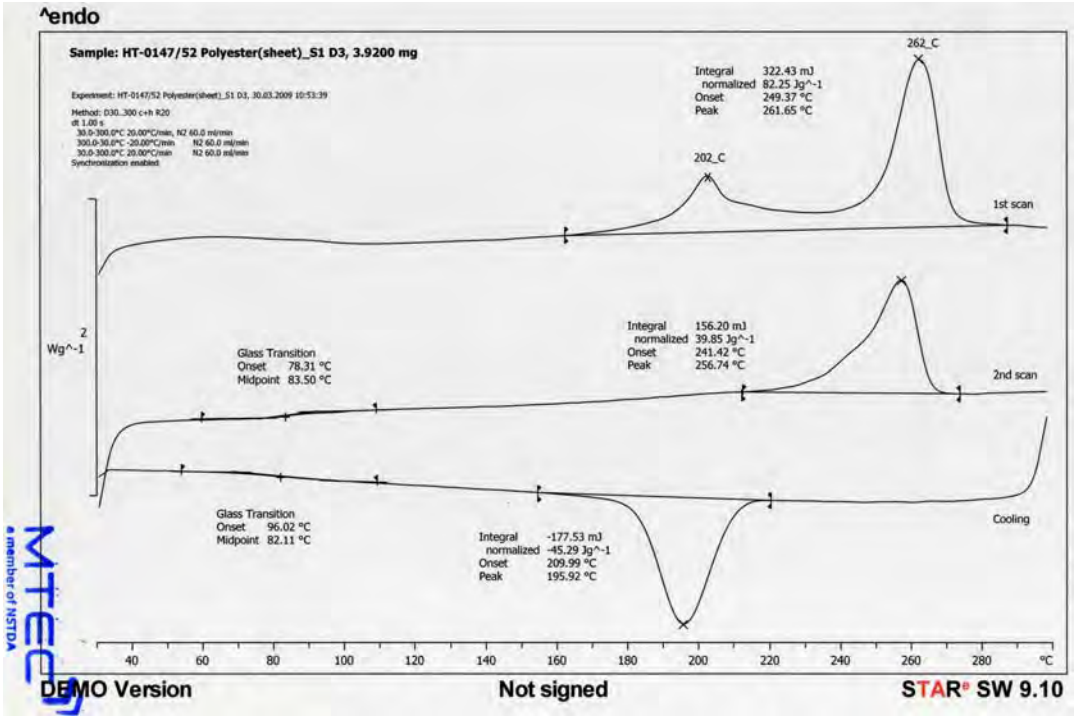
รูปที่ ข-16 กราฟ DSC ของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ 10 % กับ ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 %



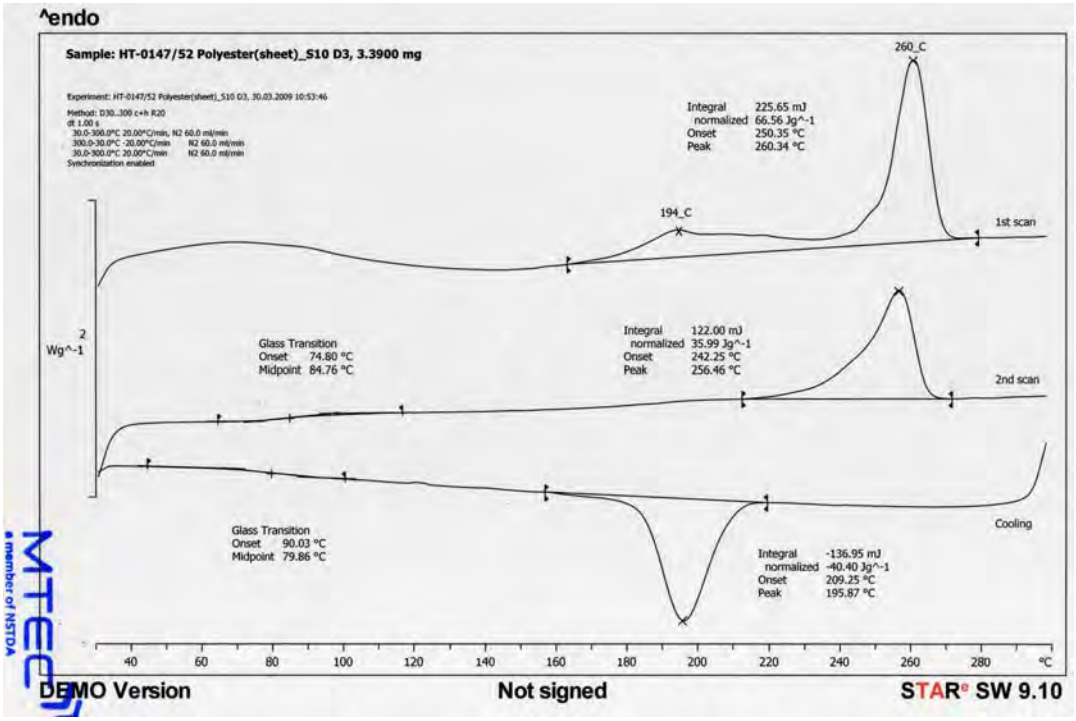
รูปที่ ข-17 กราฟ DSC ของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม 1 %



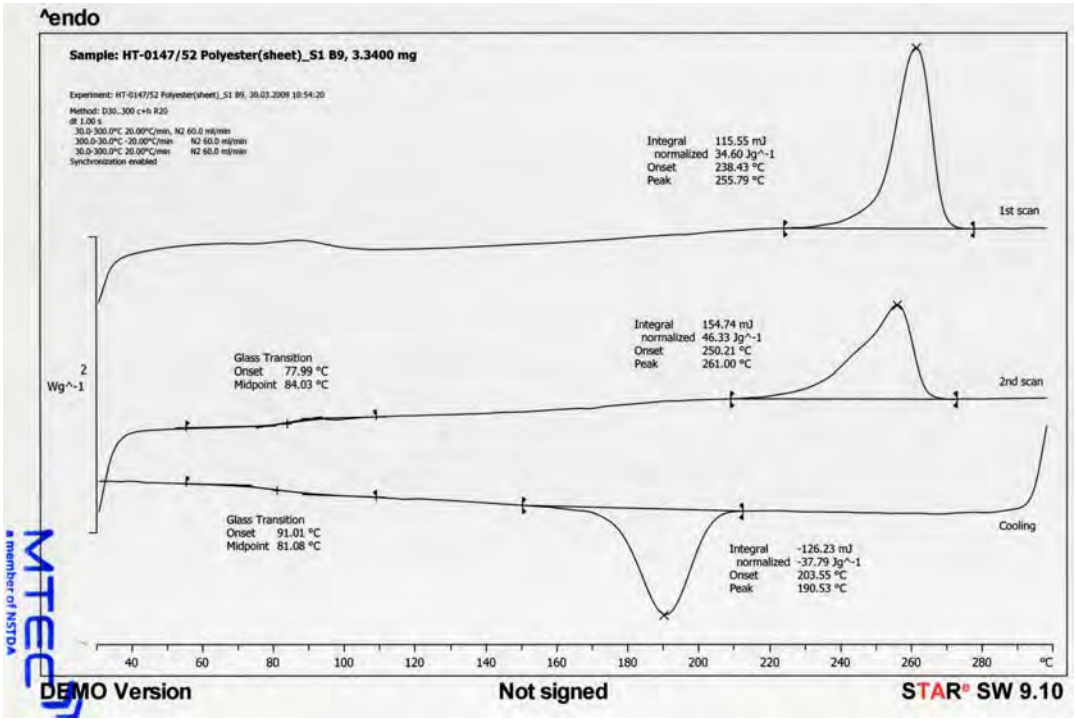
รูปที่ ข-18 กราฟ DSC ของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม 10 %



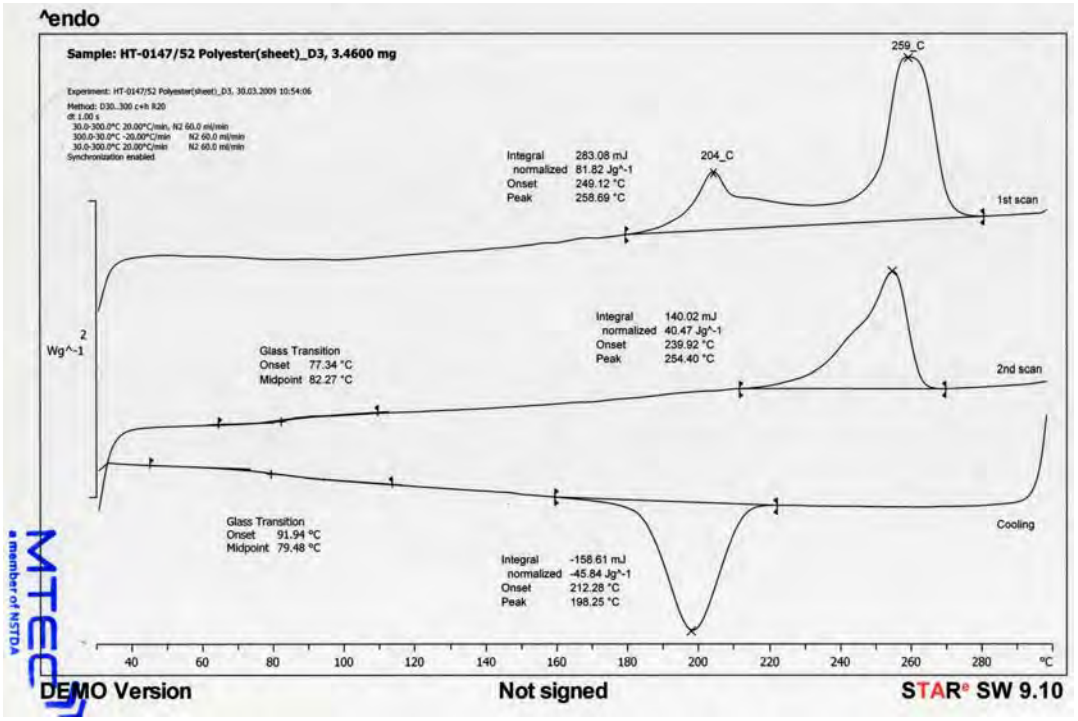
รูปที่ ข-19 กราฟ DSC ของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม 1 % กับ ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 %



รูปที่ ข-20 กราฟ DSC ของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม 10 % กับ ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 %



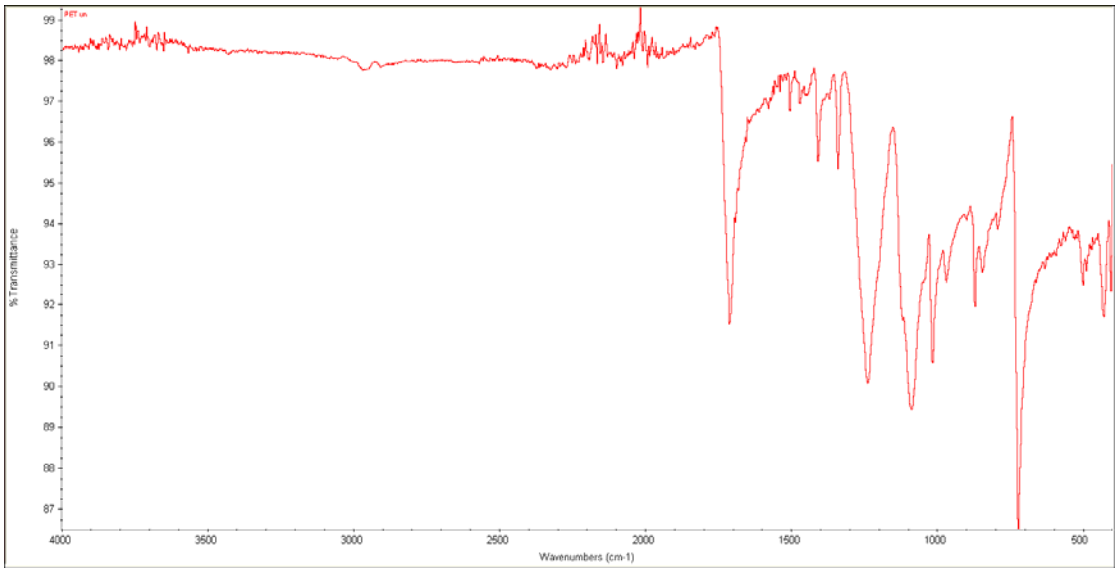
รูปที่ ข-21 กราฟ DSC ของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม 1 % กับ เบนโทไนต์ 9 %



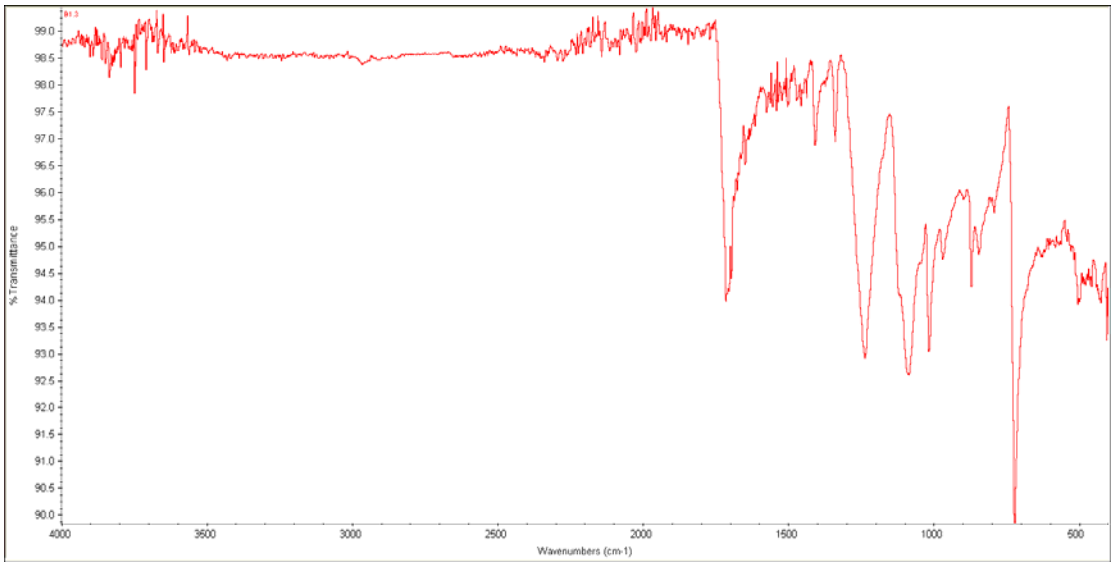
รูปที่ ข-22 กราฟ DSC ของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 %

ภาคผนวก ค

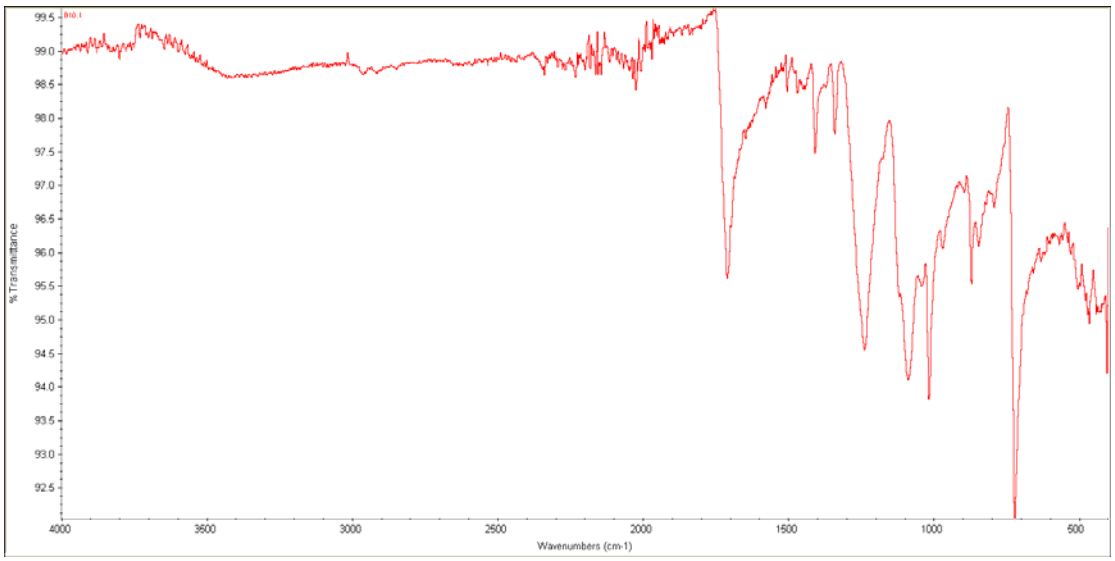
ภาคผนวก ค. การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)



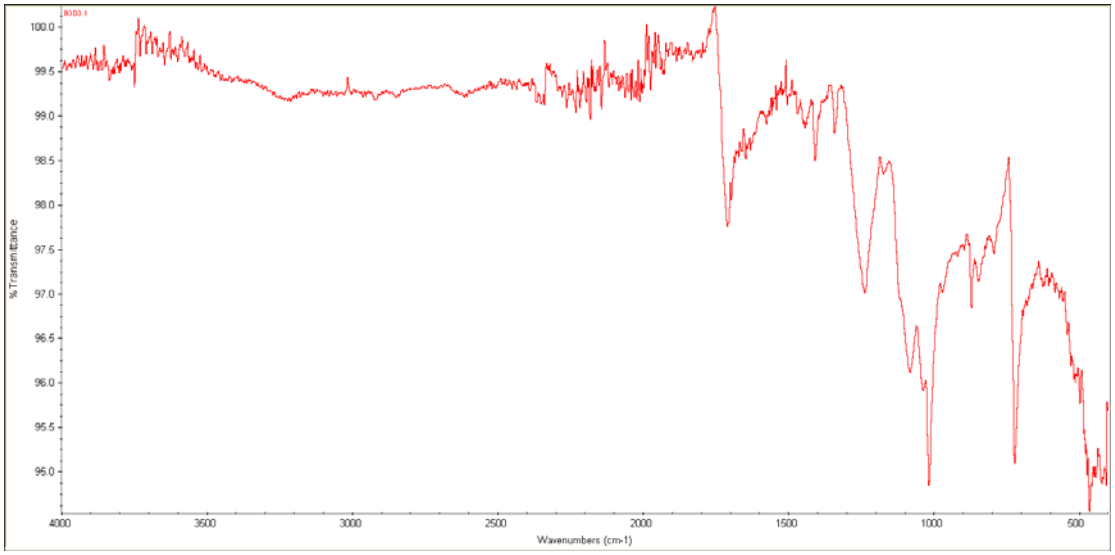
รูปที่ ค-1 ATR -FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ



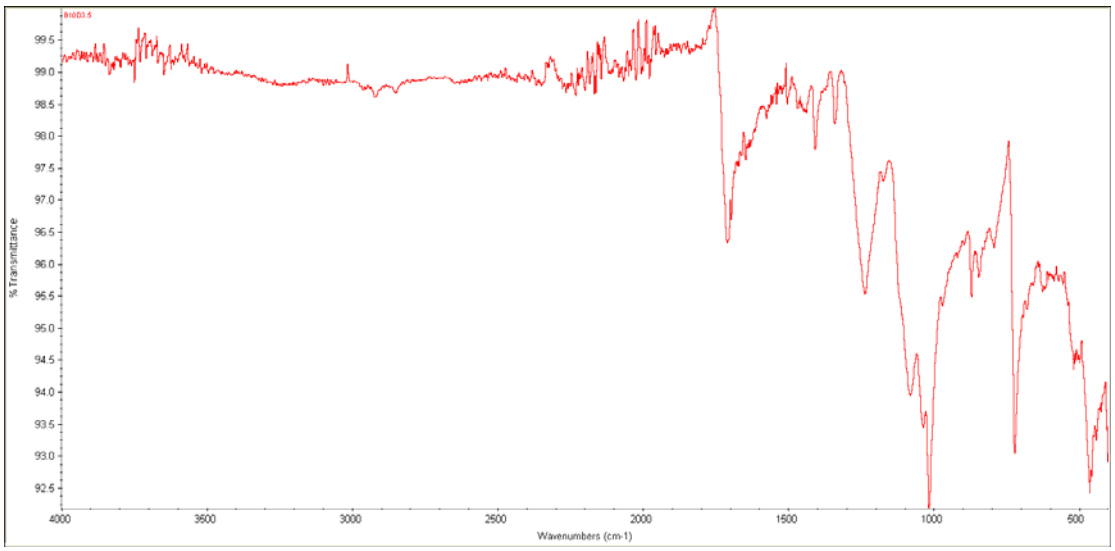
รูปที่ ค-2 ATR -FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ 1 %



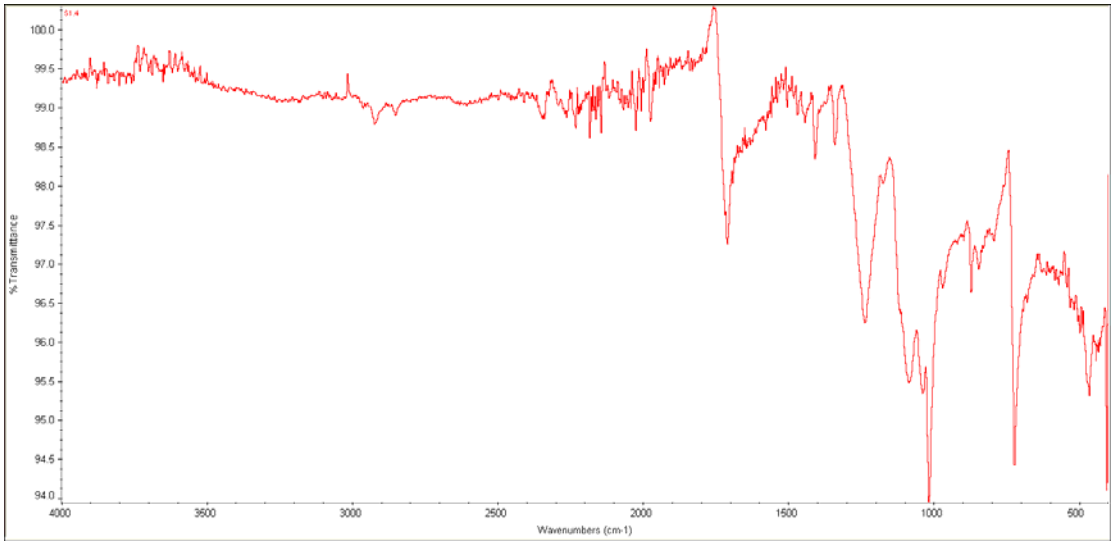
รูปที่ ค-3 ATR -FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ 10 %



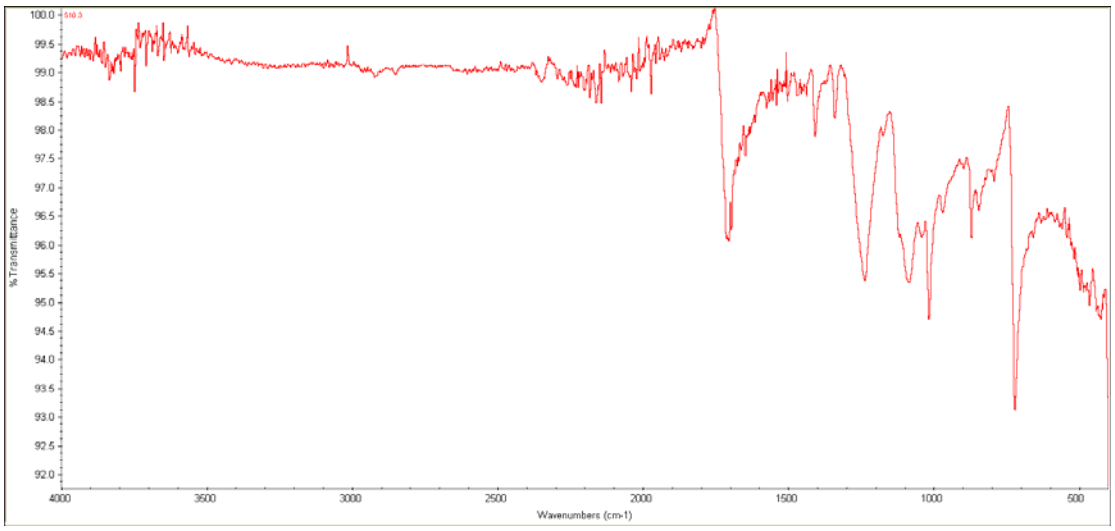
รูปที่ ค-4 ATR -FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ 1 % กับ ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 %



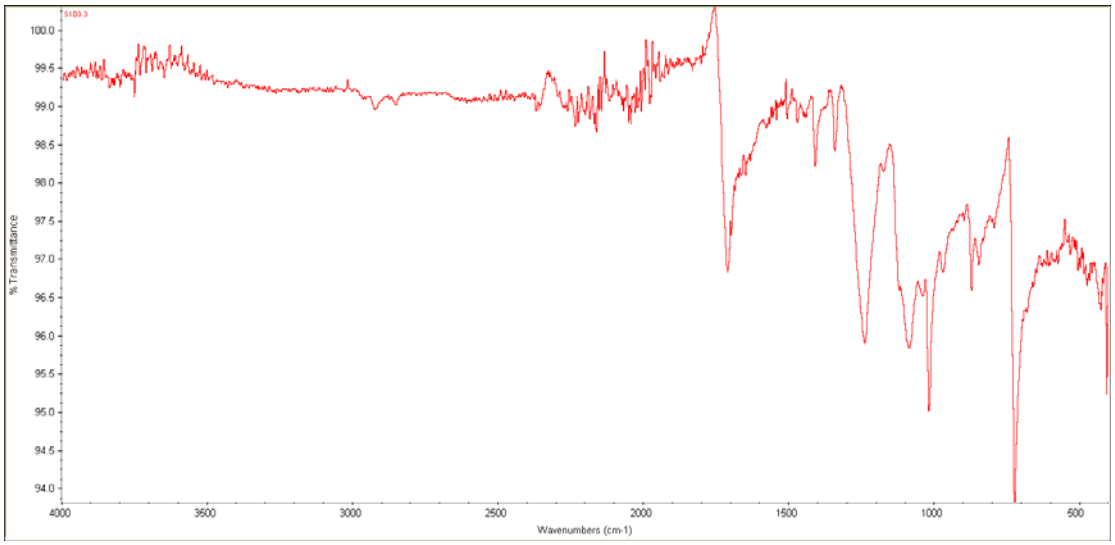
รูปที่ ค-5 ATR -FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ 10 % กับ ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 %



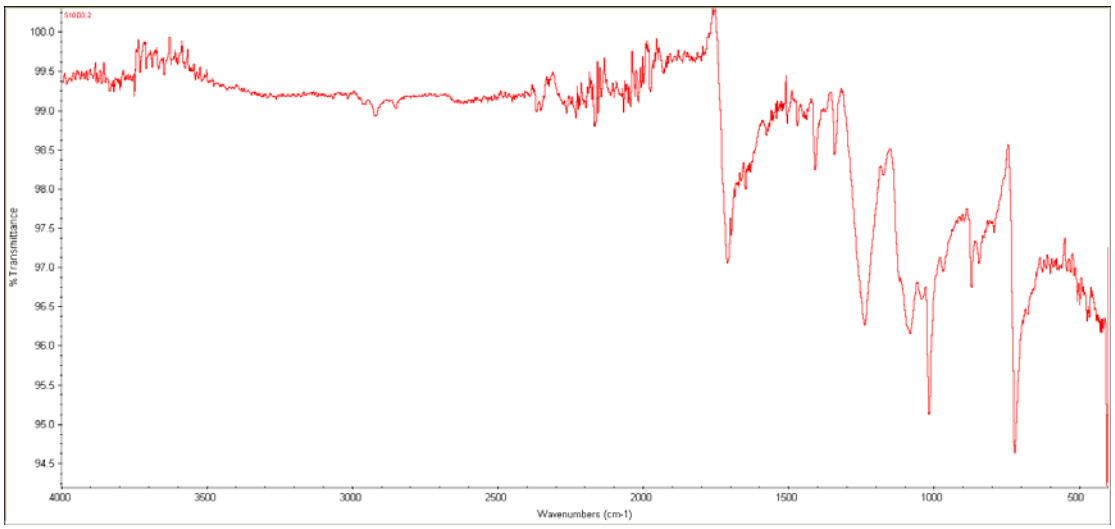
รูปที่ ค-6 ATR -FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม 1 %



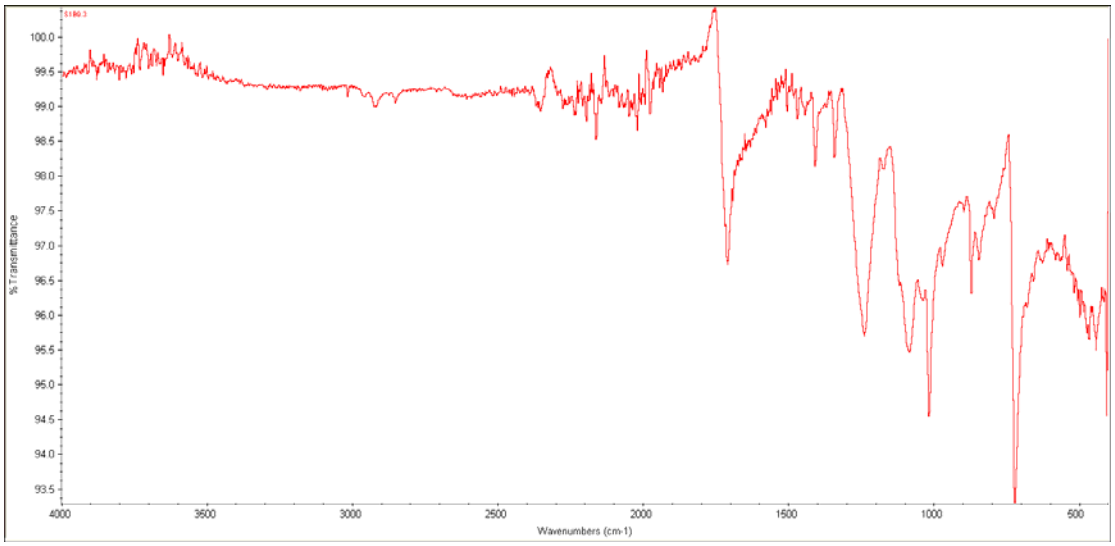
รูปที่ ค-7 ATR -FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม 10 %



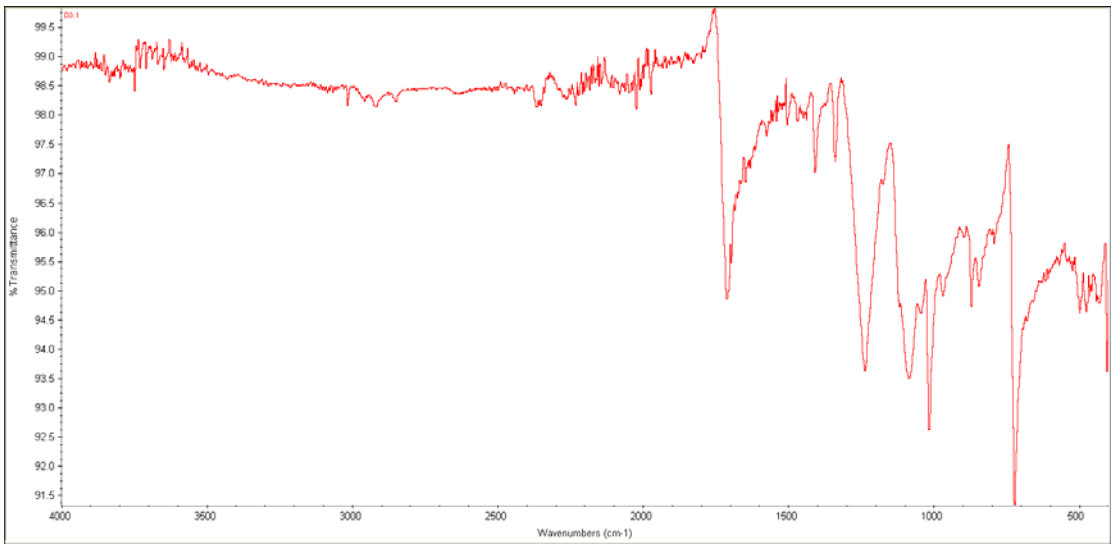
รูปที่ ค-8 ATR -FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม 1 % กับ ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 %



รูปที่ ค-9 ATR -FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม 10 % กับ ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 %



รูปที่ ค-10 ATR-FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม 1 % กับเบนโทไนต์ 9 %



รูปที่ ค-11 ATR -FTIR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 %

ภาคผนวก ง

ภาคผนวก ง ค่าความกระด้างของพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารหน่วงไฟสูตรต่างๆ

ตารางที่ ง-1 ค่าความกระด้างของพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ไม่ผ่านตกแต่งหน่วงไฟ

UNTREATED	ค่าความกระด้าง (มิลลิเมตร)				
	ชิ้นที่ 1	**ชิ้นที่ 2**	**ชิ้นที่ 3**	**ชิ้นที่ 4**	**ชิ้นที่ 5**
1	38.5	40.0	39.5	42.0	41.0
2	39.0	41.5	38.0	38.0	37.0
3	35.5	36.5	40.0	40.0	36.0
4	36.0	37.5	39.5	39.5	38.5
ค่าเฉลี่ย	**37.3**	**37.5**	**39.9**	**39.9**	**38.1**
ค่าเฉลี่ยรวม	**39**				

ตารางที่ ง-2 ค่าความกระด้างของพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านตกแต่งหน่วงไฟด้วยเบนโทไนต์ 1 % กับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 %

B1DA3	ค่าความกระด้าง (มิลลิเมตร)				
	ชิ้นที่ 1	**ชิ้นที่ 2**	**ชิ้นที่ 3**	**ชิ้นที่ 4**	**ชิ้นที่ 5**
1	38.0	41.5	36.0	36.5	37.5
2	36.0	35.5	39.5	40.0	40.5
3	41.5	39.0	35.0	34.0	34.5
4	34.5	34.5	32.5	32.0	38.0
ค่าเฉลี่ย	**37.5**	**37.6**	**35.8**	**35.6**	**37.6**
ค่าเฉลี่ยรวม	**37**				

ตารางที่ ง-3 ค่าความกระด้างของพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านตกแต่งหน่วงไฟด้วยผงกาวไหม 1 % กับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 %

S1DA3	**ค่าความกระด้าง (มิลลิเมตร)**				
	ชิ้นที่ 1	**ชิ้นที่** 2	**ชิ้นที่** 3	**ชิ้นที่** 4	**ชิ้นที่** 5
1	38.5	39.5	36.5	42.5	37.0
2	36.0	38.0	37.5	41.0	34.5
3	40.5	37.5	40.0	39.0	38.0
4	42.0	41.0	38.0	37.5	39.0
ค่าเฉลี่ย	**39.3**	**39.0**	**38.0**	**40.0**	**37.1**
ค่าเฉลี่ยรวม	39				

ตารางที่ ง-4 ค่าความกระด้างของพอลิเอสเทอร์นอนวูฟเวนที่ผ่านตกแต่งหน่วงไฟด้วยไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3 %

DA3	**ค่าความกระด้าง (มิลลิเมตร)**				
	ชิ้นที่ 1	**ชิ้นที่** 2	**ชิ้นที่** 3	**ชิ้นที่** 4	**ชิ้นที่** 5
1	35.5	38.5	41.0	38.0	40.0
2	39.5	42.5	36.0	37.0	40.5
3	37.0	38.0	39.5	39.5	41.5
4	40.0	40.0	42.0	40.5	37.5
ค่าเฉลี่ย	**38.0**	**39.8**	**39.6**	**38.8**	**39.9**
ค่าเฉลี่ยรวม	39				

ภาคผนวก จ

ภาคผนวก จ สมบัติทางเคมีและกายภาพของเบนโทไนต์ แมคเจล SAC เกรด

SAC GRADE

เบนโทไนต์ แมคเจล SAC เกรด เป็นนวัตกรรมใหม่ของเรา ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์อื่นๆ มากกว่า 10 เท่า ซึ่งสามารถใช้กับอุตสาหกรรมได้หลายประเภท อาทิเช่น อุตสาหกรรมเซรามิค อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง เป็นต้น

คุณสมบัติทางเคมี (On dry basis at 105 ^{o}C)

SiO_2	: 65-70	%	MgO	: 2.0-3.0	%
Al_2O_3	: 13-17	%	CaO	: 1.5-2.5	%
Fe_2O_3	: 1-2	%	K_2O	: 0.4-0.8	%
Na_2O	: 1.5-2.5	%	TiO_2	: 0.2-0.3	%
LOI	: 10-12	%			

คุณสมบัติทางกายภาพ

Moisture Content , %	8-12	
5% Suspension , pH	9.5-11.0	
Swelling Index , ml per 2 g of clay	15	min
Viscometer Dial Reading @ 600 rpm	12-20	
Dry partical size (pass 200 mesh) , %	80	min
Liquid Limit , %	400	min

19/7 M00 6, SOI WATBANGPLA, NADEE, AMPHUR MUANG, SAMUT SAKHON 74000.
2006 COPYRIGHT. THAI NIPPON CHEMICAL INDUSTRY CO., LTD. ALL RIGHTS RESERVED.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวภารุณี เขื่อนพงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 30 มกราคม พ.ศ. 2527 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งทอ จากคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปีการศึกษา 2549 หลังจากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2550 และสำเร็จการศึกษาในภาคต้นปีการศึกษา 2552