



การสังเคราะห์สารห่วงไฟกลุ่มฟอสฟอรัส
ที่ปราศจากธาตุฮาโลเจนสำหรับใช้งานบนผ้าฝ้าย

นางสาวจิตราวรรณ ไวสาหลง



งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ 2559

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่น



Synthesis of a novel halogen free phosphorus based
flame retardant for cotton fabric

Miss Jittrawan Vaisalong

This research was funded from the Income Budget Year 2016

Rajamangala University of Technology Phra Nakhon,

Faculty of Industrial Textiles and Fashion Design

ชื่อเรื่อง : การสังเคราะห์สารห่วงไฟกลุ่มฟอสฟอรัสที่ปราศจากธาตุฮาโลเจนสำหรับใช้งานบนผ้าฝ้าย

ผู้วิจัย : นางสาวจิตราวรรณ ไวสาหลง

พ.ศ. : 2559

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์สารห่วงไฟตระกูลฟอสฟอรัสที่ปราศจากธาตุฮาโลเจน โดยใช้ไคโตซานและสารประกอบประเภทฟอสเฟตเป็นสารตั้งต้นเพื่อให้ได้สารห่วงไฟที่มีการทำงานร่วมกันระหว่างฟอสฟอรัสและไนโตรเจนและมีความปลอดภัยต่อสิ่งมีชีวิตมากขึ้น หลังจากทำการสังเคราะห์สารห่วงไฟได้แล้วจึงทดสอบความสามารถในการห่วงไฟของสารดังกล่าวเมื่อนำมาใช้งานบนผ้าฝ้าย โดยทดสอบการเผาไหม้เปรียบเทียบกับผ้าที่ยังได้ผ่านการตกแต่งด้วยสารห่วงไฟ

จากการสังเคราะห์ทำให้ได้สารห่วงไฟที่มีหมู่ฟอสเฟตและมีไนโตรเจนในโครงสร้างโดยยืนยันจากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี NMR spectroscopy เมื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติการติดไฟเมื่อใช้งานบนผ้าฝ้ายโดยวิธีการจุ่มแช่พบว่าระยะเวลาในการเผาไหม้ทั้งหมดเพิ่มขึ้นจากเดิมจาก 14 วินาทีเป็น 21 วินาทีเมื่อเทียบกับผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ตกแต่งด้วยสารห่วงไฟ หลังจากนั้นจะเป็นการทดสอบคุณสมบัติของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งและทดสอบความสามารถในการยึดติดของสารห่วงไฟเมื่อผ่านการซักล้าง รวมถึงทดลองการตกแต่งสารห่วงไฟลงบนผ้าฝ้ายด้วยเทคนิคอื่น

Title : การสังเคราะห์สารหน่วงไฟกลุ่มฟอสฟอรัสที่ปราศจากฮาโลเจนสำหรับใช้งานบนผ้าฝ้าย

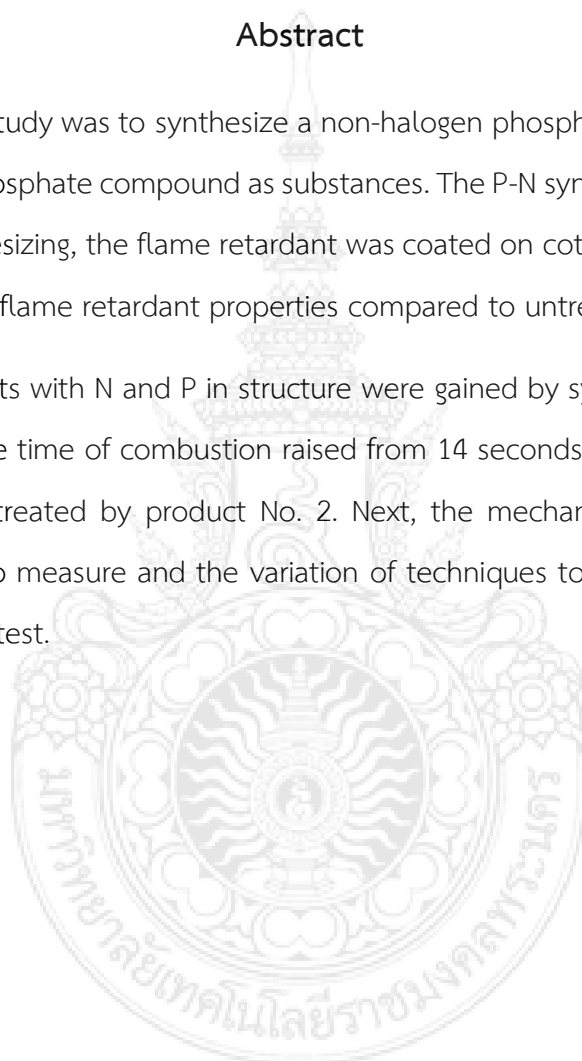
Researcher : Miss Jittrawan Vaisalong

Year : 2016

Abstract

The aim of this study was to synthesize a non-halogen phosphate based flame retardant by using chitosan and phosphate compound as substances. The P-N synergistic effect was required in this study. After synthesizing, the flame retardant was coated on cotton fabric by dipping, then the fabric was tested for flame retardant properties compared to untreated cotton fabric.

The three products with N and P in structure were gained by synthesis and confirmed by H-NMR spectroscopy. The time of combustion raised from 14 seconds in untreated cotton to 21 seconds in cotton that treated by product No. 2. Next, the mechanical properties of treated cotton fabric are going to measure and the variation of techniques to apply flame retardant on fabric surface is going to test.



กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คณะบดีคณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่น และรองคณบดีฝ่ายต่างๆ ที่ให้การสนับสนุนทุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 ทำให้การดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงได้ ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตนพล มงคลรัตนสิทธ์และนายวิโรจน์ ยิ้มขลิบ ตำแหน่งนักวิชาการการศึกษาปฏิบัติการ ที่ช่วยเหลือแนะนำในการทำวิจัย ขอขอบคุณคณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่นที่เอื้อเพื่อสถานที่และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณบุคลากรทุกท่านที่มีส่วนร่วมในความสำเร็จของงานวิจัย ตลอดจนขอบคุณผู้ให้ความอนุเคราะห์ในเรื่องต่างๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึงมา ณ ที่นี้ด้วย

จิตรวราวรรณ ไวสาหลง

กันยายน 2559



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	1
1.4 แผนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ฝ้าย	4
2.2 กระบวนการเผาไหม้ของเส้นใย	5
2.3 สารหน่วงไฟ	8
2.4 ไคโตซาน	20
2.5 วิธีทดสอบการติดไฟ	22
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์	25
3.2 การสังเคราะห์สารหน่วงไฟ	25
3.3 การหาเอกลักษณ์ของสาร	27
3.4 การตกแต่งสารหน่วงไฟลงบนผ้าฝ้าย	27
3.5 การทดสอบความสามารถในการต้านไฟบนผืนผ้า	27

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์	
4.1 โครงสร้างของสารที่สังเคราะห์ได้	28
4.2 การทดสอบความต้านไฟบนผืนผ้า	30
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	32
5.2 ข้อเสนอแนะ	32
บรรณานุกรม	33
ประวัติผู้วิจัย	37



สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 โครงสร้างเส้นใยฝ้าย	4
2 การเผาไหม้และการขยายพื้นที่ในการเผาไหม้	6
3 กระบวนการเผาไหม้ของเส้นใยเซลลูโลส	7
4 โครงสร้างถ่านจากการเผาไหม้	8
5 ตัวอย่างการสังเคราะห์ระบบสารหน่วงไฟกลุ่ม THPX	16
6 การสังเคราะห์ MDPA และการทำพันธะกับผ้าฝ้ายของ MDPA	17
7 การสร้างพันธะของ MDPA กับผ้าฝ้ายผ่าน TMM	18
8 โครงสร้างของ HFPO	18
9 โครงสร้างครอสลิงค์ระหว่าง BTCA/HFPO/TEA	19
10 โครงสร้างของไคโตซาน	20
11 ขั้นตอนการละลายไคโตซานในสารละลายกรดอะซิติกในวิธีที่ 1	25
12 สารที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีที่ 1	26
13 ลักษณะของสารที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีที่ 1 และ 2	26
14 ลักษณะของสารที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีที่ 3	27
15 H NMR ของไคโตซาน	29
16 H NMR ของสารที่สังเคราะห์จากวิธีที่ 1	29
17 H NMR ของสารที่สังเคราะห์จากวิธีที่ 2	29
18 H NMR ของสารที่สังเคราะห์จากวิธีที่ 3	30
19 แสดงลักษณะของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งด้วยวิธีต่างๆ	30
20 แสดงลักษณะหลังเผาไหม้ของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยวิธีต่างๆ	31

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในแต่ละปีอัตราการเกิดอัคคีภัยในประเทศไทยสร้างความเสียหายทั้งต่อชีวิตและทรัพย์สินเป็นจำนวนมาก จากสถิติสถานการณ์อัคคีภัยของประเทศไทยระหว่าง พ.ศ. 2532-2554 โดยศูนย์อำนวยการบรรเทาสาธารณภัย ระบุว่า มูลค่าความเสียหายตลอด 23 ปีมีมากถึงกว่า 30,131 ล้านบาท หรือคิดเป็นปีละมากกว่าพันล้านบาท นอกจากนี้ยังมีผู้เสียชีวิตและบาดเจ็บจากเพลิงไหม้อีกจำนวนไม่น้อย เฉพาะในปีพ.ศ. 2554 เพียงปีเดียว ก็มีผู้บาดเจ็บและเสียชีวิตถึง 149 และ 42 รายตามลำดับ สถานที่เกิดเพลิงไหม้นั้นมีหลากหลาย เช่น ในครัวเรือน โรงงานอุตสาหกรรม อาคารพาณิชย์และอื่นๆ การป้องกันและลดระดับการลุกลามด้วยการใช้วัสดุกันไฟในการปลูกสร้างจึงเป็นสิ่งที่ควรกระทำ นอกจากสิ่งก่อสร้างแล้ว เครื่องนุ่งห่มที่ช่วยจำกัดการลุกลามเพื่อเพิ่มระยะเวลาให้ผู้สวมใส่ได้มีโอกาสพ้นจากภาวะอันตรายก็เป็นสิ่งจำเป็นเช่นกัน

การตกแต่งด้วยสารหน่วงไฟบนเครื่องนุ่งห่มหรือสิ่งทอในครัวเรือนนั้นมีมานานแล้ว การพัฒนาสารเติมแต่งเองก็มีการพัฒนาอย่างหลากหลาย โดยเฉพาะสำหรับผ้าจากเส้นใยธรรมชาติที่ลุกลามได้ดี สารหน่วงไฟที่ใช้กันอย่างแพร่หลายบนเส้นใยธรรมชาติคือสารในกลุ่มสารประกอบออร์แกนออสฟอรัส (Organophosphorus compound) เช่น เตตระคิส(ไฮดรอกซีเมทิล) ฟอสโฟเนียมคลอไรด์ (Tetrakis(hydroxymethyl)phosphonium chloride, THPC) แต่สารชนิดนี้ต้องใช้กระบวนการพิเศษในการตกแต่ง จึงมีการพัฒนาสารอื่นในกลุ่มเดียวกันหรือกลุ่มอื่นขึ้นมาอีกจำนวนมาก

แม้ว่าจะมีการสังเคราะห์สารกันไฟชนิดใหม่อยู่เสมอ แต่ข้อจำกัดเรื่องความคงทนในการซักล้าง สัมผัสของผ้าหลังผ่านการตกแต่ง ความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและการบวนการตกแต่งที่ง่ายและเสียค่าใช้จ่ายน้อยยังคงกระตุ้นให้เกิดการคิดค้นสารกันไฟที่สามารถบรรลุวัตถุประสงค์เหล่านั้นได้มากที่สุด อันเป็นที่มาของความพยายามในการสังเคราะห์สารกันไฟในกลุ่มฟอสฟอรัสชนิดใหม่ในครั้งนี้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการสังเคราะห์สารหน่วงไฟในกลุ่มที่ปราศจากธาตุฮาโลเจน
2. เพื่อสังเคราะห์สารหน่วงไฟในกลุ่มฟอสฟอรัสที่ปราศจากธาตุฮาโลเจน

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. การสังเคราะห์สารกันไฟกลุ่มฟอสฟอรัส/ไนโตรเจนหนึ่งชนิด

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1) ได้องค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับการสังเคราะห์สารหน่วงไฟ
- 2) ได้สารหน่วงไฟชนิดที่ปราศจากฮาตูลฮาโลเจน 1 ชนิด

1.6 นิยามศัพท์

สารหน่วงไฟ (flame retardant)

การเผาไหม้ (combustion)



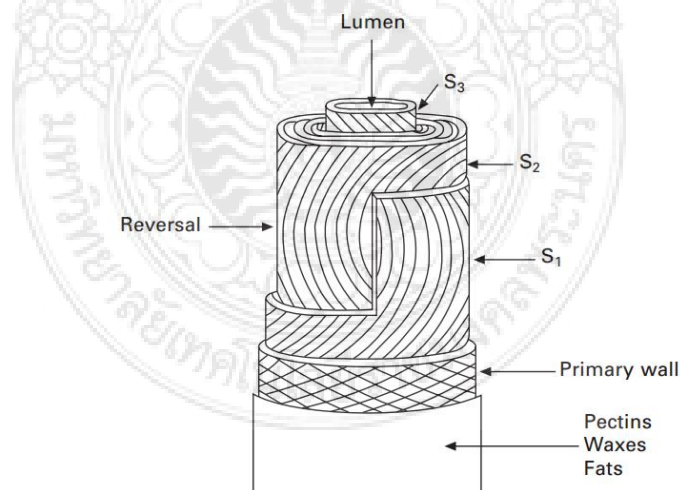
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฝ้าย

ฝ้าย (cotton) เป็นเส้นใยธรรมชาติจากพืช โดยได้จากใยของเมล็ดฝ้าย ฝ้ายมีหลากหลายสายพันธุ์โดยแต่ละสายพันธุ์จะให้เส้นใยที่มีลักษณะแตกต่างกัน ฝ้ายถูกแบ่งได้ตามคุณสมบัติ เช่น สี ความสะอาด ความยาวของเส้นใย ความละเอียดของเส้นใย เป็นต้น เส้นใยธรรมชาติชนิดนี้ถูกใช้งานมากที่สุด เนื่องจากมีราคาถูก คงทน ซักง่าย สวมใส่สบาย เหมาะสำหรับใช้เป็นเสื้อผ้าในฤดูร้อน ผ้าขนหนูและผ้าปูที่นอน

ใยฝ้ายประกอบด้วยเซลลูโลสเป็นส่วนใหญ่ มีรูปร่างตามขวางเป็นรูปถั่วที่มีช่องว่างตรงกลาง เรียกว่าลูเมน (Lumen) เส้นใยมีความยาวตั้งแต่ 1/8 ถึง 2 1/2 นิ้วตามชนิดสายพันธุ์ เส้นใยฝ้ายที่ยาวจะสามารถนำมาปั่นด้ายที่มีความเหนียวทนต่อแรงดึงสูงจึงมีความต้องการมากกว่า เส้นใยฝ้ายมีสีขาว ครีมน้ำตาล มีความมันเงาต่ำ มีความเหนียวปานกลาง (3.0-5.0 กรัม/ดีเนียร์) และจะเหนียวมากขึ้น 10 – 20 เปอร์เซ็นต์เมื่อเปียก มีความยืดหยุ่นและการคืนตัวต่ำ สามารถดูดความชื้นได้ถึง 7-10% ที่อุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 65% ฝ้ายทนความร้อน ทนกรดอ่อนแต่ไม่ทนกรดแก่ จำพวกกรดเกลือและกรดซัลฟิวริก ทนต่อต่างแก่ สารละลายอินทรีย์ สารฟอกที่ไม่ใช้ตัวออกซิไดซ์ ไม่ทนเชื้อราและแสง โดยรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะเปลี่ยนโครงสร้างเซลลูโลสเป็นดีออกซีเซลลูโลสซึ่งทำให้ความเหนียวของฝ้ายลดลง [1]



รูปที่ 1 โครงสร้างของเส้นใยฝ้าย (Marton and Hearle, 1975)

ถึงแม้จะมีข้อดีหลายอย่างแต่ฝ้ายก็เป็นเส้นใยที่ติดไฟได้ง่ายและทนความร้อนต่ำเนื่องจากมีค่าดัชนีออกซิเจนจำกัด (Limiting Oxygen Index, LOI) ต่ำที่เพียง 18.4% โดยเส้นใยที่มีค่า LOI ต่ำกว่า 21.0 ถือว่าเป็นเส้นใยที่ติดไฟได้ดี ส่วนเส้นใยที่มีค่า LOI ระหว่าง 21.0 – 25.0 ถือว่าติดไฟปาน

กลาง ส่วนเส้นใยที่มี LOI สูงกว่า 25.0 ถือว่าเป็นเส้นใยที่ติดไฟยากและมักผ่านข้อกำหนดในการทดสอบความหน่วงไฟ [2]

ตารางที่ 1 ดัชนีออกซิเจนจำกัด (LOI) ของเส้นใยชนิดต่างๆ (Horrocks, 2003)

เส้นใย	LOI (%)
Acrylic	18.2
Cotton	18.4
Cellulose acetate**	18.4
Cellulose triacetate**	18.6
Polypropylene	18.6
Rayon	18.9
Polyester	20-21
Nylon 6	20-21.5
Nylon 6,6	20-21.5
Silk**	22.8
Wool	25
Modacrylic	29-30

** (Schwartz and Goodman, 1982; Guan et al, 2009)

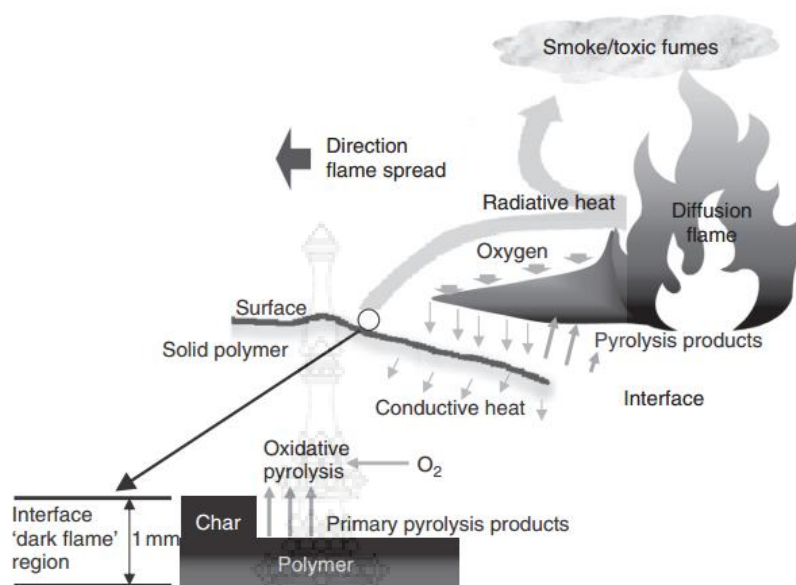
2.2 กระบวนการเผาไหม้ของเส้นใย

ในการเผาไหม้ของเส้นใยพอลิเมอร์นั้น มีกระบวนการ 2 แบบที่แตกต่างคือการเผาไหม้แบบมีเปลวไฟเช่น การไหม้ของไม้ขีดไฟ และการเผาไหม้แบบไม่มีเปลวเช่น การเผาไหม้ของปลายมวนบุหรี่

กระบวนการทั่วไปของการเผาไหม้เกิดขึ้นดังนี้คือเมื่อเส้นใยได้รับความร้อนจะทำให้เกิดการสลายตัว (degradation) ให้สารประกอบที่สามารถติดไฟได้ออกมารวมตัวกับออกซิเจนกลายเป็นแหล่งเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ในกระบวนการเผาไหม้ในสถานะก๊าซ การเผาไหม้เป็นกระบวนการคายพลังงาน พลังงานที่คายออกมาจะทำให้พื้นผิวของเส้นใยเกิดการเสื่อมสภาพและปลดปล่อยสารประกอบที่ติดไฟออกมาอีก กลายเป็นวัฏจักรของการเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 2

การเสื่อมสลายของพอลิเมอร์สามารถเกิดผ่านกระบวนการที่แตกต่างกันขึ้นกับโครงสร้างของพอลิเมอร์แต่ละชนิด เช่น การแตกของมอนอเมอร์ที่ปลายสายโซ่ พบในเส้นใยประเภทพอลิเมทอะคริเลต การแตกของมอนอเมอร์แบบสุ่มไม่ระบุตำแหน่ง พบในสารพวกลอนและพอลิสไตรีน การแตกของอะตอมหรือกลุ่มที่ไม่ใช่โครงสร้างหลักของพอลิเมอร์ พบในเส้นใยเซลลูโลสที่ปลดปล่อยน้ำ และพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ปลดปล่อย

กรดไฮโดรคลอริก สารแอมโมเนียและถ่าน นอกจากการแตกตัวแล้วยังสามารถเกิดการสร้างพันธะเชื่อมระหว่างสายโซ่ได้ถ่าน ดังที่พบในพอลิอะคริโลไนไตรล์ [2]



รูปที่ 2 การเผาไหม้และการขยายพื้นที่ในการเผาไหม้ (Price and Horrocks, 2010)

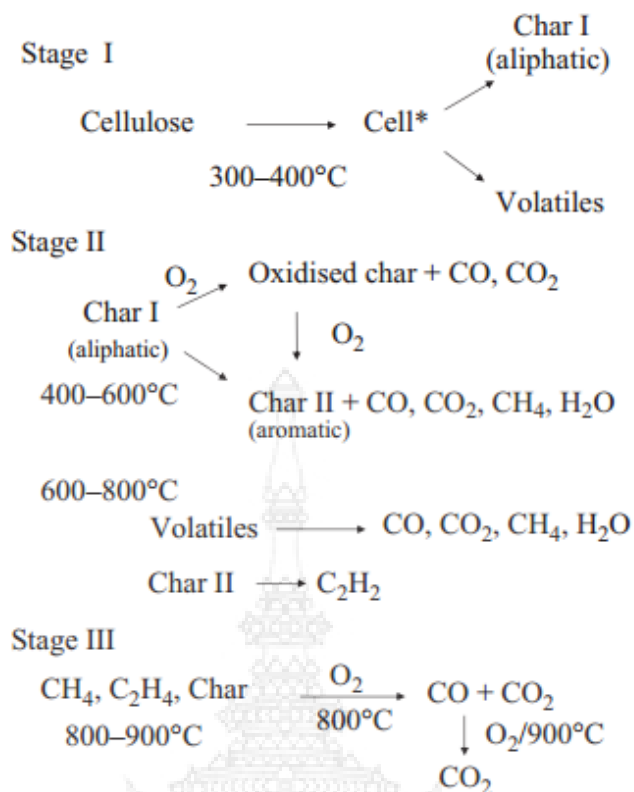
กระบวนการเผาไหม้ของเส้นใยเซลลูโลสแบบฝ้ายมี 3 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 เกิดที่อุณหภูมิ 300-400 องศาเซลเซียส เส้นใยฝ้ายจะเกิดการสลายตัวผ่านการแข่งขันของปฏิกิริยา 2 ชนิดคือ ปฏิกิริยาดีไฮเดรชันและดีโพลิเมอไรเซชัน ปฏิกิริยาดีไฮเดรชันจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นถ่านจากการเผาไหม้ (Char) ซึ่งจะทำตัวเป็นฉนวนความร้อนที่ผิว ส่วนปฏิกิริยาดีโพลิเมอไรเซชันจะทำให้เกิดเลวกลูโคซาน (Levoglucosan) ซึ่งสลายตัวให้สารที่มีความสามารถติดไฟสูงและทำให้การสลายของเส้นใยเซลลูโลสเกิดมากขึ้น

ขั้นที่ 2 เกิดที่อุณหภูมิ 400-800 องศาเซลเซียส โดยในช่วง 400-600 องศาเซลเซียส ถ่านจากการเผาไหม้จะกลายเป็นสารแอมโมเนียจากนั้นเมื่ออุณหภูมิระหว่าง 600-800 องศาเซลเซียสจะสลายตัวได้อะเซทิลีน

ขั้นสุดท้าย เกิดที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสขึ้นไป จะเกิดการเผาไหม้โดยสมบูรณ์ได้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

เส้นใยเซลลูโลสจะลุกไหม้ทันทีที่สัมผัสไฟ ไม่เกิดการหลอมหรือหดตัว เมื่อลุกไหม้มีกลิ่นคล้ายกระดาษไหม้ไฟ และเกิดถ่านเล็กน้อย [2]



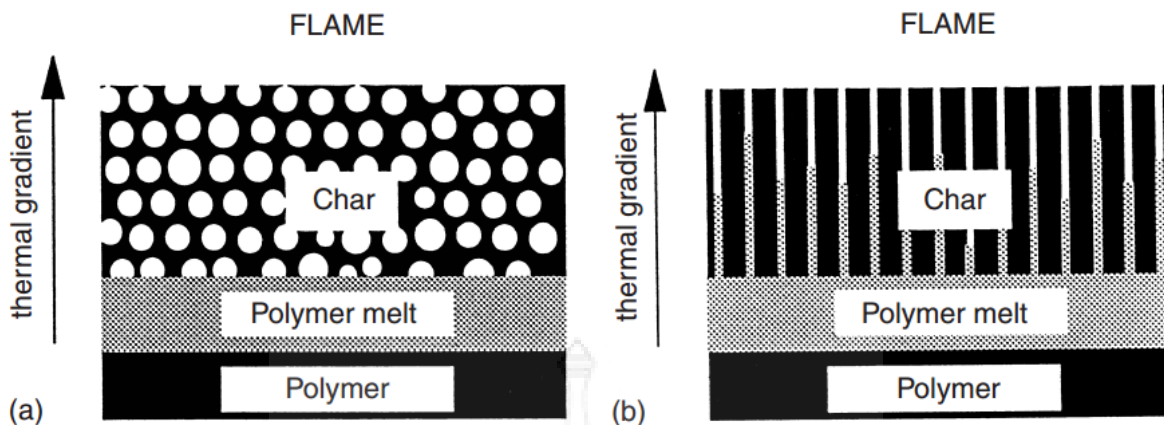
รูปที่ 3 กระบวนการเผาไหม้ของเส้นใยเซลลูโลส (Bradbury and Shafizadeh, 1978; Price et al., 1997)

การเกิดถ่าน (Char forming)

ถ่านคือสารที่ประกอบไปด้วยคาร์บอนจากการเผาไหม้ โดยมีคาร์บอนมากกว่าตัวพอลิเมอร์เริ่มต้นเสียอีก กระบวนการนี้เกิดที่พื้นผิวของเส้นใย โดยถ่านที่เกิดขึ้นทำหน้าที่เป็นฉนวนความร้อนและลดการเคลื่อนย้ายมวลสาร อันหมายถึงการลดการปลดปล่อยสารประกอบที่ติดไฟออกมา ความสามารถของถ่านในการต่อต้านการเผาไหม้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของถ่าน โดยถ่านที่เกิดนั้นไม่ได้ทนต่อความร้อนและการเผาไหม้โดยสมบูรณ์

ถ่านในอุดมคติ (ideal char) สำหรับการหน่วงไฟนั้น ตำแหน่งที่สัมผัสกับผิวของเส้นใยควรจะเป็นชั้นฉนวนที่ประกอบไปด้วยช่องแก๊สที่ช่วยป้องกันการเคลื่อนที่ของสารประกอบติดไฟได้จากพื้นผิวออกไปสู่กระบวนการเผาไหม้ในสถานะแก๊ส ทำให้การขยายการติดไฟลดลง อย่างไรก็ตามถ่านในความเป็นจริงมีโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์ในการปิดกั้นสารประกอบที่ติดไฟจากพื้นผิว ทำให้มีสารประกอบบางส่วนออกไปร่วมในกระบวนการเผาไหม้ในสถานะแก๊ส

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดถ่านยังไม่กระจ่างนัก แต่น่าจะประกอบไปด้วย ความหนืดเมื่อหลอมเหลว, แรงดึงผิวของของเหลวที่เกิดจากการหลอมและจลนพลศาสตร์ของการเกิดแก๊สและการเกิดเชื่อมพันธะของพอลิเมอร์ [2]



รูปที่ 4 a) โครงสร้างถ่านในอุดมคติ, b) โครงสร้างถ่านด้อยประสิทธิภาพ
(Price, Anthony and Carty, 2001)

2.3 สารหน่วงไฟ

สารหน่วงไฟ (flame retardant) คือสารที่ช่วยลดอัตราการเผาไหม้ของวัสดุ โดยกลวิธียับยั้งการลุกลามไหม้สามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

- 1) นำวัสดุออกจากเปลวไฟ
- 2) เพิ่มอุณหภูมิการสลายตัวของวัสดุอันเป็นอุณหภูมิที่จะเกิดสารระเหยติดไฟง่าย
- 3) ลดแก๊สที่เกิดการเผาไหม้โดยทำให้เกิดถ่านจากการเผาไหม้ที่ผิวของวัสดุ
- 4) ป้องกันออกซิเจนเข้าไปในบริเวณที่เกิดการลุกไหม้
- 5) เพิ่มอุณหภูมิที่ต้องการในการเผาไหม้ โดยสารหน่วงไฟแต่ละชนิดสามารถใช้กลไกการ

หน่วงไฟได้หลายแบบ [3]

วิธีการเติมสารหน่วงไฟเข้าไปยังวัสดุต่างๆ เช่น พลาสติก สิ่งทอและวัสดุอื่น มี 3 วิธี คือ

- 1) เติมสารหน่วงไฟเข้าไปในตัววัสดุโดยไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี วิธีนี้มีราคาถูกและรวดเร็ว แต่จำเป็นต้องใช้สารหน่วงไฟในปริมาณมากและอาจเกิดผลกระทบต่อความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของวัสดุ
- 2) ใช้สารหน่วงไฟที่หมู่ฟังก์ชันจะทำพันธะกับวัสดุ วิธีนี้ให้ผลคงทนและมีประสิทธิภาพสูง แต่อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของตัวโพลีเมอร์ได้ นอกจากนี้ยังสามารถทำได้ยากในการผลิตเชิงอุตสาหกรรมสำหรับเส้นใย สิ่งทอ และโฟมยืดหยุ่น
- 3) ปรับปรุงพื้นผิวโดยกระบวนการที่หลากหลาย เช่น การเคลือบด้วยสารหน่วงไฟ ซึ่งมีราคาถูก ให้ประสิทธิภาพที่ดี และยังคงสภาพของวัสดุดั้งเดิมไว้ได้ค่อนข้างมาก โดยการเคลือบด้วยสารหน่วงไฟนี้มีกระบวนการหลายแบบ เช่น กระบวนการเคลือบแบบโซล-เจล กระบวนการเคลือบแบบพลาสมา เป็นต้น

สารหน่วงไฟสำหรับผ้าฝ้ายถูกพัฒนาอย่างจริงจังในช่วงปีค.ศ. 1950 – 1980 มีทั้งแบบคงทนและคงทนปานกลาง สารส่วนใหญ่ถูกค้นพบในช่วงนี้และยังคงถูกพัฒนามาถึงปัจจุบัน ตัวอย่างสารหน่วงไฟที่พบช่วงแรกคือ แอมโมเนียมฟอสเฟต, แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต, เกลือเตตระ(ไฮดรอกซีเมทิล)ฟอสฟอเนียม และสารประกอบอินทรีย์ที่มีหมู่ฮาโลเจน เป็นต้น

นับจากนั้นจนปีค.ศ. 2000 การพัฒนาสารหน่วงไฟมุ่งหาสารราคาถูก เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แต่สารที่ค้นพบยังคงให้ผลที่ไม่ดีกับคุณสมบัติของผ้าหลังผ่านการตกแต่งด้วยสารหน่วงไฟ [3]

สารหน่วงไฟสำหรับผ้าฝ้ายจะถูกเติมเข้าในกระบวนการตกแต่งสำเร็จขึ้นกับลักษณะทางเคมี ค่าใช้จ่ายและความคงทนในการซักล้างของสารหน่วงไฟที่ต้องการ ถ้าต้องการความหน่วงไฟเพียงชั่วคราวก็ใช้สารประเภทเกลือที่ละลายน้ำ เช่น แอมโมเนียมฟอสเฟส พอลิฟอสเฟสและโบรไมด์ เป็นต้น ถ้าต้องการความหน่วงไฟแบบถาวร ก็ต้องเลือกใช้สารที่มีความว่องไว เช่น อนุพันธ์ของแอลคิลฟอสฟานาไมด์ เป็นต้น สำหรับฝ้ายนั้นสารหน่วงไฟที่นิยมมักเป็นสารประเภทฟอสฟอรัส และฟอสฟอรัสร่วมกับสารอื่น

สารหน่วงไฟกลุ่มฟอสฟอรัส ถูกใช้แพร่หลายมากขึ้นหลังจากสารหน่วงไฟประเภทฮาโลเจนถูกระงับใช้เนื่องจากก่อให้เกิดอันตราย โดยสารกลุ่มฟอสฟอรัสมีข้อดีคือให้ควันน้อยและความเป็นพิษต่ำ ตัวอย่างของสารกลุ่มนี้คือ ฟอสฟอรัสแดง ฟอสฟีน ฟอสฟีนออกไซด์ ฟอสฟิเนตและฟอสเฟต สารเหล่านี้จะเกิดปฏิกิริยาที่สถานะควบแน่นโดยเปลี่ยนเส้นทางการสลายตัวของพอลิเมอร์และลดก๊าซที่จะเผาไหม้โดยเกิดถ่านจากการเผาไหม้กลุ่มที่ผิวของพอลิเมอร์

สารหน่วงไฟกลุ่มฟอสฟอรัสสามารถรวมกับไนโตรเจนและทำให้เกิดประสิทธิภาพในการเพิ่มความหน่วงไฟได้ ดังที่มีการทดลองสังเคราะห์สารที่มีจำนวนไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเพิ่มมากขึ้นจะช่วยให้มีความสามารถในการหน่วงไฟมากขึ้น รวมถึงการสังเคราะห์สารประกอบที่มีฟอสฟอรัสและไนโตรเจนจากฟอสฟาซีน ก็ช่วยชี้ให้เห็นว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างฟอสฟอรัสและไนโตรเจนที่ช่วยในการเพิ่มความหน่วงไฟจริง นอกจากนี้สารกลุ่มฟอสฟอรัสยังสามารถรวมกับสารหน่วงไฟประเภทอื่น เช่น ซิลิคอนหรือสารอนินทรีย์ เพื่อปรับปรุงความสามารถหน่วงไฟให้เพิ่มขึ้น

สารหน่วงไฟกลุ่มฟอสฟอรัสทำหน้าที่ขัดขวางการลุกลามทั้งในสถานะก๊าซและสถานะควบแน่น เช่น ลดการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการไหลจากการหลอมเหลว กัดขวางผิวหน้าด้วยกรดที่มีฟอสฟอรัส กระตุ้นให้เกิดถ่าน เป็นต้น

บทบาทของสารหน่วงไฟกลุ่มฟอสฟอรัสในสถานะควบแน่น

1. การเกิดถ่านจากการเผาไหม้

สารหน่วงไฟกลุ่มฟอสฟอรัสช่วยเพิ่มปริมาณถ่านเมื่อเผาไหม้โดยเฉพาะในพอลิเมอร์ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น เซลลูลอสหรือพอลิยูรีเทน ซึ่งการเพิ่มขึ้นของถ่านมีผลทำให้การเผาไหม้เกิดลดลง นอกจากนี้

ในกระบวนการเกิดถ่านจะปลดปล่อยโมเลกุลน้ำซึ่งช่วยเจือจางสารประกอบที่ติดไฟ กระบวนการเพิ่มถ่านนี้เกิดเมื่อสารหน่วงไฟกลุ่มฟอสฟอรัสได้รับความร้อนและเปลี่ยนสภาพเป็นกรดหรือแอนไฮไดรต์ที่มีความว่องไว จากนั้นเข้าทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ที่มีออกซิเจนอย่างเซลลูโลส ได้เซลลูโลสที่เติมหมู่ฟอสฟอรัสและปลดปล่อยโมเลกุลน้ำออกมา สุดท้ายแล้วเซลลูโลสที่มีหมู่ฟอสเฟตจะเกิดการแตกและกลายเป็นถ่าน

การหน่วงไฟเกิดจากการเพิ่มของโมเลกุลน้ำที่ทำให้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้ลดลงและในบางกรณีเกิดเนื่องจากการปกคลุมผิวด้วยถ่าน โดยเฉพาะถ้าถ่านนั้นทนต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน อย่างไรก็ตามแม้จะไม่ทนต่อการถูกออกซิไดซ์การมีฟอสฟอรัสอยู่ก็ช่วยให้กระบวนการออกซิเดชันไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้ช่วยเพิ่มปริมาณการเกิดถ่านแล้ว สารหน่วงไฟกลุ่มฟอสฟอรัสยังอาจปกคลุมถ่าน ช่วยลดการเผาไหม้ที่ผิวหน้าของพอลิเมอร์ได้

มีการใช้สารประกอบกลุ่มไนโตรเจน เช่น เมลามีน, ยูเรียและไดไซยาไมด์ (dicyandiamide) ในการเพิ่มประสิทธิภาพการหน่วงไฟของสารประเภทฟอสฟอรัสมานานแล้ว โดยเชื่อว่าพันธะระหว่างฟอสฟอรัสและไนโตรเจนทำให้เกิดสารที่ทำให้หมู่ฟอสฟอรัสได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังเชื่อว่าไนโตรเจนช่วยลดการสูญเสียฟอสฟอรัสจากกระบวนการเผาไหม้ที่เกิดในสถานะควบแน่น หรือยังมีงานวิจัยที่สนับสนุนว่าสารประกอบไนโตรเจนช่วยให้ฟอสฟอรัสเกิดออกซิเดชันแล้วได้สารที่เฉื่อยต่อการเผาไหม้อย่างแอมโมเนีย

2. การเคลือบผิว

ฟอสฟอรัสสามารถยับยั้งการเผาชนิดไร้เปลวไฟ (การเผาไหม้ของถ่าน) ได้ โดยเชื่อว่ากลไกเกิดจากกรดฟอสฟอริกไปเคลือบที่ผิวและทำตัวเป็นฉนวนป้องกันการเกิดออกซิเดชัน โดยพบว่าฟอสฟอรัสเพียง 0.1% ก็สามารถป้องกันการเกิดออกซิเดชันได้ ในการยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันนั้น กรดฟอสฟอริกหรือสารประกอบที่มีหมู่ P=O จะจับกับตำแหน่งของสารที่มีแนวโน้มถูกออกซิไดส์เอาไว้ นอกจากนี้การเคลือบผิวยังช่วยเพื่อประสิทธิภาพของถ่านโดยทำให้ถ่านมีความสามารถในการส่งผ่านน้อยลง กรดฟอสฟอริกทำหน้าที่กั้นการระเหยของเชื้อเพลิงจากพอลิเมอร์ที่กำลังเผาไหม้

3. การเพิ่มความหนืดเมื่อหลอม

ในบางกรณีกรดจากฟอสฟอรัสจะเร่งให้พอลิเมอร์มีความหนืดเมื่อหลอมลดลง ส่วนที่หลอมจึงเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นและสามารถยับยั้งออกจากบริเวณเผาไหม้ได้ เช่น เมื่อเติม 0.15 % ของฟอสฟอรัสลงในพอลิเอทิลีนเทอเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET) ทำให้สามารถผ่านการทดสอบการเผาไหม้ อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้สามารถถูกรบกวนโดยสิ่งปนเปื้อนที่ไม่หลอมมีผลทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น เช่น เมื่อมีเส้นด้ายฝ้ายอยู่ในผ้า PET จะทำให้ความเร็วในการยับหนิเปลวไฟช้าลงและไม่ผ่านการทดสอบการเผาไหม้

[4]

บทบาทของสารหน่วงไฟกลุ่มฟอสฟอรัสในสถานะก๊าซ

1. บทบาททางเคมี

สารประกอบฟอสฟอรัสที่ระเหยได้มีความสามารถในการยับยั้งการติดไฟ โดยสารจะแตกเป็นโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น P_2 , PO, PO_2 และ HPO_2 โมเลกุลเหล่านี้จะทำให้ก๊าซไฮโดรเจนที่เป็นเชื้อเพลิงเจือจางและลดการเผาไหม้ และช่วยยับยั้งการแตกตัวของโซ่กิ่งของพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนและออกซิเจนเกิดเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกไซด์ โดยการยับยั้งในขั้นตอนนี้เป็นการยับยั้งเช่นเดียวกับที่เกิดในสารหน่วงไฟกลุ่มฮาโลเจนที่ทำการจับไฮโดรเจนไว้ สารหน่วงไฟกลุ่มฟอสฟอรัสที่แสดงบทบาทในสถานะก๊าซได้แก่สารประเภทที่ระเหยง่าย เช่น ไตรอัลคิลฟอสเฟต (trialkyl phosphate) และไตรอัลคิลฟอสไฟน์ออกไซด์ (trialkyl phosphine oxide)

2. บทบาททางกายภาพ

การยับยั้งการเผาไหม้ในทางกายภาพเกี่ยวข้องกับความร้อน ความร้อนในการระเหย และพลังงานการสลายตัวในสถานะก๊าซ เชื่อว่ากระบวนการนี้มีความคล้ายคลึงกับสิ่งที่เกิดกับสารหน่วงไฟกลุ่มฮาโลเจน โดยสารประกอบฟอสฟอรัสจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความจุความร้อนและความร้อนในการระเหยของพอลิเมอร์

ในพอลิเมอร์แต่ละชนิดจะเกิดกระบวนการการหน่วงไฟที่ไม่เหมือนกัน เช่น ฝ้ายและพอลิเมทิลเมทาคริเลท (poly(methyl methacrylate), PMMA) จะเกิดการยับยั้งการเผาไหม้ได้ดีที่สถานะควบแน่น (ปฏิกิริยาที่ผิวของพอลิเมอร์) ในขณะที่พอลิยูรีเทนจะเกิดการยับยั้งที่สถานะก๊าซ (บริเวณเปลวไฟ) ได้ดีกว่า ดังนั้นการเลือกใช้งานสารหน่วงไฟกลุ่มฟอสฟอรัสที่เหมาะสมกับพอลิเมอร์แต่ละชนิดจึงเป็นสิ่งสำคัญ

ระบบสารหน่วงไฟกลุ่มฟอสฟอรัสกับสารประกอบอื่น

โดยปกติธาตุฮาโลเจนไม่มีผลในการเพิ่มประสิทธิภาพการยับยั้งการเผาไหม้ของสารหน่วงไฟกลุ่มฟอสฟอรัส แต่ในบางกรณีก็อาจมีการเสริมประสิทธิภาพกันและกันได้ ดังเช่นในระบบของฟอสฟอรัสและเดคะโบรมิโดฟีนิล (phosphorus-decadi-bromophenyl system) ที่มีอัตราส่วนของโบรมีนต่อฟอสฟอรัสเป็น 3 : 1

แอนติโมนีออกไซด์ไม่มีผลเพิ่มความสามารถหน่วงไฟของสารประกอบกลุ่มฟอสฟอรัส ส่วนการเติมสารอนินทรีย์อื่นๆให้ผลขึ้นกับชนิดของสาร เช่น ไทเทเนียม(IV)ออกไซด์ (TiO_2) มีผลช่วยให้สารกลุ่มฟอสฟอรัสยับยั้งการติดไฟได้ดีขึ้น เกิดถ่านมากขึ้น ในขณะที่สารประกอบดีบุก(IV)ออกไซด์ (SnO_2) ให้ผลในทางตรงกันข้าม โดยทำให้ประสิทธิภาพการหน่วงไฟลดลง คุณภาพถ่านที่เกิดขึ้นลดลง ถ่านมีรูพรุนมากขึ้น

การสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่มีฟอสฟอรัสอยู่ในโครงสร้างเป็นอีกวิธีที่ใช้เพื่อเพิ่มความคงทนต่อการเผาไหม้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากความยากในการสังเคราะห์และค่าใช้จ่ายที่สูงทำให้พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ถูกใช้ในทางการค้าน้อยมากเมื่อเทียบกับการใช้สารหน่วงไฟเติมแต่งในพอลิเมอร์ปกติ นอกจากนี้เมื่อศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการหน่วงไฟของพอลิเมอร์ที่ผ่านการตกแต่งและผ่านการสังเคราะห์พบว่าไม่ต่างกันมากนัก โดยเมื่อเปอร์เซ็นต์ฟอสฟอรัสน้อยๆ พอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟอสฟอรัสตัวจะมีประสิทธิภาพมากกว่า แต่เมื่อเปอร์เซ็นต์ของฟอสฟอรัสมากขึ้นพอลิเมอร์ที่ถูกเติมแต่งกลับสามารถทนการเผาไหม้ได้มากกว่า [4]

สารหน่วงไฟที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

สารหน่วงไฟถูกใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจากข้อกำหนดด้านความปลอดภัยของเครื่องนุ่งห่มและสิ่งทอที่ใช้ในงานด้านต่างๆ โดยทั่วไปใช้ในรูปของสารเติมแต่งไม่ได้ทำพันธะกับเส้นใย ดังนั้นสารเติมแต่งนี้จึงสามารถหลุดออกมาปนเปื้อนอยู่ในธรรมชาติได้ จากการศึกษาพบว่ามีการใช้สารหน่วงไฟประเภทฮาโลเจนโดยเฉพาะกลุ่มโบรมีนที่นิยมใช้ในช่วงปี 2547-2558 ในธรรมชาติจำนวนมาก รวมถึงพบในนมและเนื้อเยื่อโดยพบมากในประเทศสหรัฐอเมริกามากกว่าบริเวณอื่นๆ [5] เมื่อเป็นดังนั้นสารหน่วงไฟที่ใช้ควรเป็นสารที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต เนื่องจากสารดังกล่าวต้องสัมผัสกับร่างกายมนุษย์และมีโอกาสปนเปื้อนสูงมาก

คุณสมบัติอันพึงประสงค์ของสารหน่วงไฟที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมคือ ต้องไม่มีการสะสมทางชีวภาพ ไม่เป็นพิษกับมนุษย์ สัตว์และระบบนิเวศน์ ไม่เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (ดิน, น้ำ และอากาศ)

สารประกอบกลุ่มโบรมีนและคลอรีนถูกระงับการใช้งานในประเทศสหรัฐอเมริกาและยุโรป สารกลุ่มนี้ทำให้เกิดไดออกซินและฟิวแรนเมื่อเกิดการเผาไหม้ ซึ่งสารทั้งสองชนิดมีการสะสมทางชีวภาพและเป็นพิษกับมนุษย์ นอกจากนี้การเติมแอนติโมนีออกไซด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการหน่วงไฟยังมีผลในการเกิดไดออกซินอีกด้วย อย่างไรก็ตามการใช้งานแอนติโมนีออกไซด์ยังคงแพร่หลายทั้งกับเฟอร์นิเจอร์และสิ่งทออื่นๆ เนื่องจากยังไม่มีผลรายงานถึงความเป็นพิษของออกไซด์ดังกล่าว

สารหน่วงไฟที่ใช้กับผ้าฝ้ายในปัจจุบันเป็นสารกลุ่มฟอสฟอรัสเป็นหลัก ไม่มีรายงานเรื่องความเป็นพิษ แต่เนื่องจากกระบวนการตกแต่งต้องผ่านกระบวนการเติมสารลงไปในพื้นที่ผิวทำให้ผ้าที่ได้แข็ง ด้าน หรือมีกลิ่นไม่พึงประสงค์ และสีย้อมที่ใช้อาจได้รับผลกระทบจากค่า pH จากขั้นตอนการเติมสารหน่วงไฟ

ในการเพิ่มคุณสมบัติในการหน่วงไฟให้กับผ้าฝ้ายและยังคงความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีความพยายามใช้กรดบอริกและบอเรตตกแต่ง เนื่องจากสารทั้งสองชนิดปลอดภัยสำหรับมนุษย์ หรืออาจใช้การผสมฝ้ายกับเส้นใยที่ทนไฟ เช่น มอดอะคริลิก (modacrylic) โพลีเอสเตอร์ทนไฟ หรือไวซิล (visil) เป็นต้น [6]

ระบบสารหน่วงไฟชนิดคงทนและไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ที่ใช้งานสำหรับเส้นใยเซลลูโลสในปัจจุบัน ได้แก่ระบบพอลิเมอร์ควบแน่น/แอมโมเนีย (precondensate/NH₃) ตัวอย่างเช่น Proban และ Rhodia, ระบบสารหน่วงไฟที่เกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ เช่น pyrovatex, ฟอสเฟต-ฟอสฟาเนตเอสเทอร์ และกรดพอลิคาร์บอกซิลิก

ระบบพอลิเมอร์ควบแน่น เป็นการใช้ควบแน่นเกลือเตตระคิสไฮดรอกซิลเมทิลฟอสฟอเนียม (tetrakis (hydroxyl methyl) phosphonium salt) ซึ่งโดยปกติเป็นเกลือของคลอไรด์ (THPC) หลังจากนั้นทำปฏิกิริยากับแอมโมเนีย สุดท้ายแล้วจะได้พอลิเมอร์เซลลูโลสที่ไม่ละลายน้ำมี THPC เกาะอยู่ในตำแหน่งที่ไม่ใช่ไฮดรอกซี เส้นใยที่ได้สามารถทนต่อการซักล้างได้มากกว่า 50 ครั้งและสามารถใช้งานได้ทั้งกับผ้าฝ้ายบริสุทธิ์และผ้าฝ้ายผสม แต่ในกระบวนการมีการใช้ฟอร์มัลดีไฮด์ ดังนั้นจึงมีการปลดปล่อยฟอร์มัลดีไฮด์จำนวนที่น้อยกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดออกมา

ระบบสารหน่วงไฟที่เกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ เกิดโดยสารหน่วงไฟจะทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสที่หมู่ไฮดรอกซี โดยใช้วิธีจุ่มอัด – อบแห้ง – ผนึก (pad – dry – cure method) โดยมีกรดฟอสฟอริกเป็นตัวเร่ง สารหน่วงไฟที่ใช้ในระบบนี้ได้แก่ N-methylol dimethyl phosphonopropionamide (MDPPA) ซึ่งมีชื่อทางการค้าว่า pyrovatex อย่างไรก็ตามการผนึกโดยใช้กรดทำให้เส้นใยเสื่อมสลายและอาจทำให้สีเปลี่ยนได้ เมื่อใช้ผ้าไปนานๆสมบัติความหน่วงไฟก็ลดลงแม้ไม่ได้ซักล้างเนื่องจากเกิดกระบวนการไฮโดรไลซิสของกรดสามารถใช้ได้ทั้งบนผ้าฝ้ายบริสุทธิ์และผ้าที่ผสมเส้นใยสังเคราะห์ปริมาณน้อยๆ

ฟอสเฟต-ฟอสฟาเนตเอสเทอร์ (phosphate – phosphonate ester) ร่วมกับเรซินกันยับ สารหน่วงไฟชนิดนี้มีชื่อทางการค้าว่า Fyrol 51 และใช้สำหรับโพลีเอสเตอร์และอะคริลิก ก่อนจะถูกทำให้บริสุทธิ์และเปลี่ยนชื่อเป็น Fyroltex HP กระบวนการตกแต่งของสารชนิดนี้ไม่ทำให้ผ้าสูญเสียความสวยงามเมื่อเทียบกับสารอื่นๆ ใช้กับผ้าฝ้ายบริสุทธิ์และผ้าผสมเพื่องานพรม มีความคงทนในการซักล้างสูงมาก

กรดพอลิคาร์บอกซิลิก (polycarboxylic acid) สามารถใช้กับพรมหรือเครื่องนุ่งห่มด้วยวิธีจุ่มอัด/อบแห้ง/ผนึกด้วยตัวเร่งต่างๆกัน กระบวนการนี้ปราศจากฟอร์มัลดีไฮด์ ผ้าที่ได้มีความคงทนในการซักล้าง ดูแลรักษาง่าย แต่ความเป็นกรดของสารอาจมีผลต่อเฉดสีของผ้าได้ [6]

นอกจากการเติมแต่งด้วยสารหน่วงไฟระบบต่างๆแล้ว ยังมีพอลิเมอร์ที่สามารถทนไฟได้โดยไม่ต้องเติมสารเป็นพิษลงไป เช่น

1) **มอดอะคริลิก (Modacrylic)** เป็นโคพอลิเมอร์ที่เกิดจากอะคริโลไนไตรล์ (acrylonitrile, -CH₂CH(CN)-) อย่างน้อย 35 % รวมกับมอนอเมอร์ชนิดอื่น เช่น ไวนิลคลอไรด์ ไวนิลิดีนคลอไรด์ ไวนิลโบริไมด์ เป็นต้น นอกจากนั้นยังเติมแอนติโมนีไตรออกไซด์ลงไปในช่วงขั้นตอนการปั่นแห้งเพื่อเพิ่มความทนไฟ ปัจจุบัน

เส้นใยชนิดนี้ถูกใช้งานน้อยมากและในอนาคตอาจหมดความสำคัญเนื่องจากยังไม่ทราบผลกระทบจากการมีธาตุฮาโลเจนในโครงสร้าง

2) **ไวซิล (Visil)** เป็นเส้นใยเซลลูโลสสังเคราะห์ที่มีการเติมซิลิกาเข้าไป มีความทนไฟถาวรเนื่องจากมีสารเชิงซ้อนกรดพอลิซิลิซิก (polysilicic acid) อยู่ถึง 30 – 33 เปอร์เซ็นต์ เส้นใยชนิดนี้สามารถใช้งานเดี่ยวๆ หรือผสมกับเส้นใยชนิดอื่น สามารถผสมกับฝ้ายและใยขนสัตว์ โดยเส้นใยไม่มีการหลอมหรือไหลเมื่อสัมผัสกับความร้อน ไม่ปลดปล่อยควันพิษ สามารถย่อยสลายได้โดยธรรมชาติ จึงถือว่าเป็นเส้นใยที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

3) **เลนซิง (Lenzing)** เป็นเส้นใยเซลลูโลสสังเคราะห์ที่เติมฟอสฟอรัสลงไป ตัวเส้นใยทำจากเยื่อไม้ที่เติมฟอสฟอรัสลงไประหว่างกระบวนการผลิตคล้ายกับระบบ Proban และ Pyrovatex เมื่อถูกเผาเลนซิงจะให้ถ่านที่ช่วยลดการเผาไหม้ นอกจากนั้นยังมีความสามารถเป็นฉนวนความร้อน และมีข้อดีกว่าระบบที่ใช้สารตกแต่งคือสามารถผสมกับเส้นใยสังเคราะห์อื่นได้ดี

4) **พอลิเอสเตอร์ (polyester)** พอลิเอสเตอร์กันไฟที่ใช้งานทางการค้ามีเพียงชนิดเดียวคือ Trevira CS (Trevira GmbH) แม้จะมีความพยายามในการสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ ขึ้นมากก็ตาม เส้นใยชนิดนี้เป็นโคพอลิเมอร์ที่มีมอนอเมอร์คือสารประกอบออร์แกโนฟอสฟอรัส (organophosphorus) เช่น กรดฟอสฟินิก เทรวิรา มีสมบัติเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ไม่ปลดปล่อยก๊าซพิษ ไม่มีสารตั้งต้นที่เป็นพิษ และมีค่าใช้จ่ายในการทำความสะดวกต่ำ [6]

ตัวอย่างสารหน่วงไฟที่ใช้ตกแต่งบนผ้าฝ้าย

แอมโมเนียมฟอสเฟต (Ammonium phosphate)

ถูกค้นพบความสามารถในการหน่วงไฟเมื่อปี ค.ศ. 1821 และยังคงใช้กับผ้าฝ้ายมาจนถึงปัจจุบัน สารชนิดนี้เป็นสารหน่วงไฟประเภทไม่คงทน กระบวนการหน่วงไฟที่เกิดขึ้นคือ เมื่อเส้นใยได้รับความร้อน แอมโมเนียมฟอสเฟตจะกลายเป็นกรดฟอสฟอริกและกระตุ้นให้เส้นใยเกิดการสลายตัวกลายเป็นถ่าน ปริมาณแอมโมเนียมฟอสเฟตที่ใช้งานอยู่ที่ 1-2 % ของปริมาณฟอสเฟตที่มีอยู่ ในการใช้งานมักเติมยูเรียลงไปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหน่วงไฟจากการเสริมกันของฟอสฟอรัสและไนโตรเจน อาจเติมแอมโมเนียมโบรไมด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการยับยั้งการเผาไหม้ก็ได้

แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (Ammonium polyphosphate, APP)

เป็นเกลือแอมโมเนียมของกรดฟอสฟอริกที่มีกิ่ง สังเคราะห์จากปฏิกิริยาระหว่างกรดฟอสฟอริกและแอมโมเนีย สารหน่วงไฟชนิดนี้ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายตั้งแต่ต้นทศวรรษ 1960 จนมาถึงปัจจุบัน

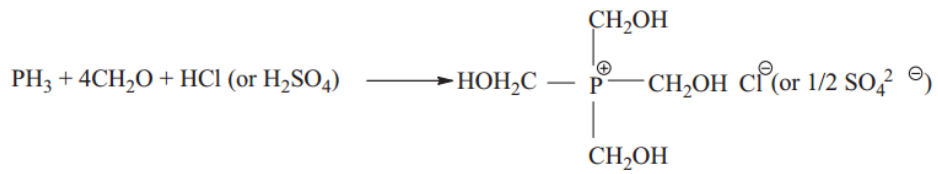
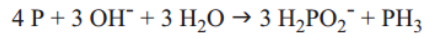
APP จะสลายตัวที่อุณหภูมิสูงได้กรดฟอสฟอริกและแอมโมเนีย จากนั้นจะเกิดการเติมฟอสฟอรัสเข้าไปที่เส้นใยฝ้าย ซึ่งอาจจะเข้าไปสร้างพันธะโดยตรงที่หมู่ไฮดรอกซิลของฝ้ายโดยไม่จำเป็นต้องสลายพันธะกับแอมโมเนียมาก่อน กลไกการหน่วงไฟของ APP เกิดที่สถานะควบแน่นและสารชนิดนี้ถูกรายงานว่าไม่มีความเป็นพิษ

APP ที่สังเคราะห์เพื่อขายทางการค้าจะมีค่าอันดับการพอลิเมอไรเซชัน (degree of polymerization) ต่างกันตามชนิด APP ที่มีอันดับการพอลิเมอไรเซชันต่ำจะละลายน้ำได้ดีและใช้งานในรูปแบบของสารหน่วงไฟไม่คงทนสำหรับผ้าฝ้ายโดยฝ้ายยังคงมีผิวสัมผัสที่ดี นอกจากนี้ยังมีการเติมแอมโมเนียลงไปให้ APP ด้วย เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและยังช่วยลดการถูกทำลายของผิวผ้าจากกรดที่เกิดระหว่างกระบวนการไหม้อีกด้วย APP ที่มีอันดับการพอลิเมอไรเซชันมากกว่า 1000 ขึ้นไปจะอยู่ในรูปผง ละลายน้ำได้น้อย (<0.1 g/100 mL) นำไปใช้งานแบบคงทนปานกลางบนผ้าฝ้ายหรือใช้บนอะคริลิก หรือใช้โดยมีเมลามีน-ฟอร์มัลดีไฮด์เป็นตัวเชื่อม

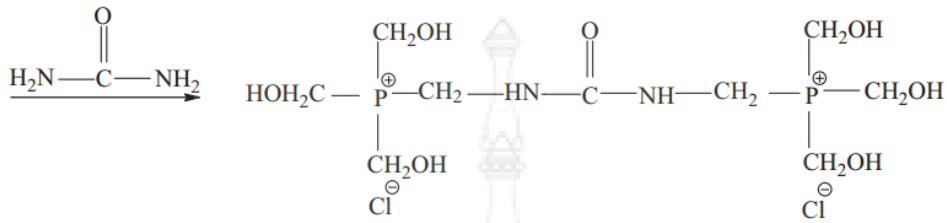
Tetra (hydroxymethyl) phosphonium salt (THPX)/urea/ammonia

สารหน่วงไฟในกลุ่ม THPX มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมและผลิตออกจำหน่ายทางการค้าสำหรับตกแต่งผ้าฝ้ายมานานกว่า 50 ปี คิดค้นโดย Albright & Wilson โดยเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างฟอร์มัลดีไฮด์และฟอสไฟนในสภาวะกรด โดยฟอสไฟนได้มาจากปฏิกิริยาการผลิตโซเดียมไฮโปฟอสไฟต์จากฟอสฟอรัสและโซเดียมไฮดรอกไซด์ THPX ละลายน้ำได้และมีการผลิตออกมาในระบบต่างดังแสดงในรูปที่ 5

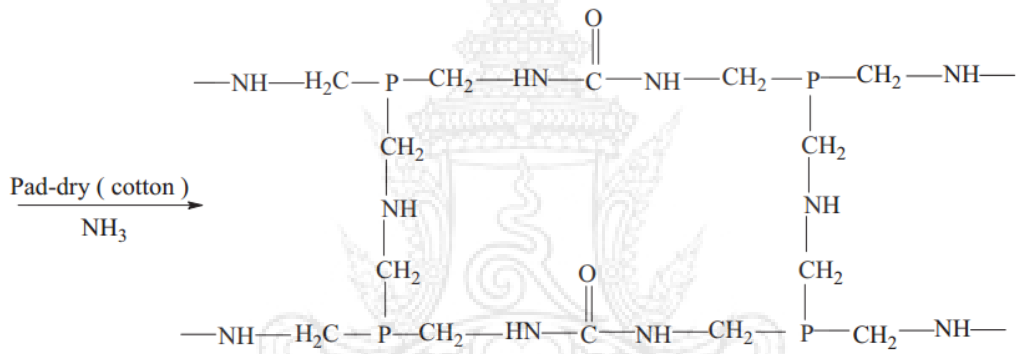
สารหน่วงไฟกลุ่มนี้มีความคงทนในการซักล้าง และถือว่ามีค่าคงทนมากที่สุดเมื่อเทียบกับสารหน่วงไฟชนิดอื่น ระบบโปรแบนเกิดผ่านสภาวะที่เป็นเบสเล็กน้อยจึงไม่มีปัญหาเส้นใยฝ้ายย่อยสลายจากการทำปฏิกิริยากับกรด การครอสลิงก์ที่เกิดขึ้นจะเกิดระหว่าง THPX ยูเรียและแอมโมเนีย ไม่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างเซลลูโลสเลย ผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งจากโปรแบนจึงมีสมบัติไม่เปลี่ยนแปลงและความแข็งแรงตามปกติ ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารประเภทโปรแบนถูกผลิตออกจำหน่ายอย่างแพร่หลาย สามารถใช้ในฝ้ายบริสุทธิ์และฝ้ายผสมที่มีฝ้ายเป็นองค์ประกอบหลักได้ เช่น ใช้ในเส้นใยผสมระหว่างฝ้าย 88 % กับไนลอน 12 % หรือใช้ในใยผสมระหว่างฝ้ายกับพอลิเอสเตอร์



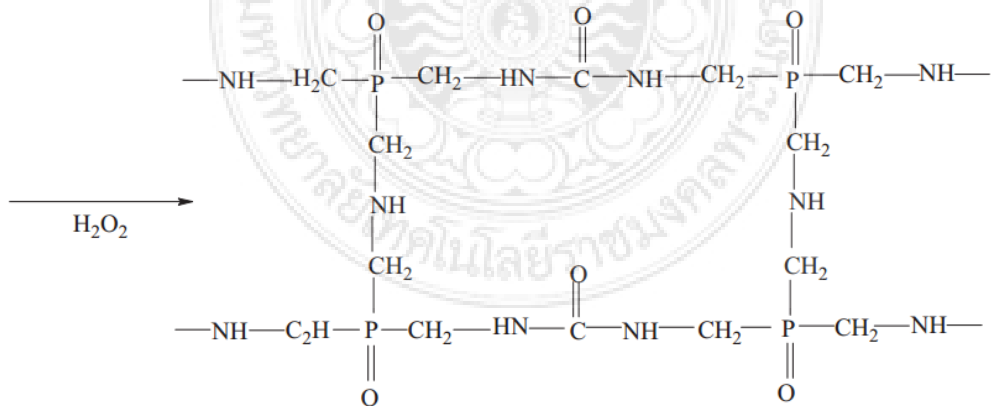
THPC (or THPS)



THPC/Urea Precondensate



Crosslinked Poly(phosphine)



Crosslinked Poly(phosphine oxide)

รูปที่ 5 ตัวอย่างขั้นตอนการสังเคราะห์ระบบสารหน่วงไฟกลุ่มTHPX (Proban) บนผ้าฝ้าย (Yang, 2013)

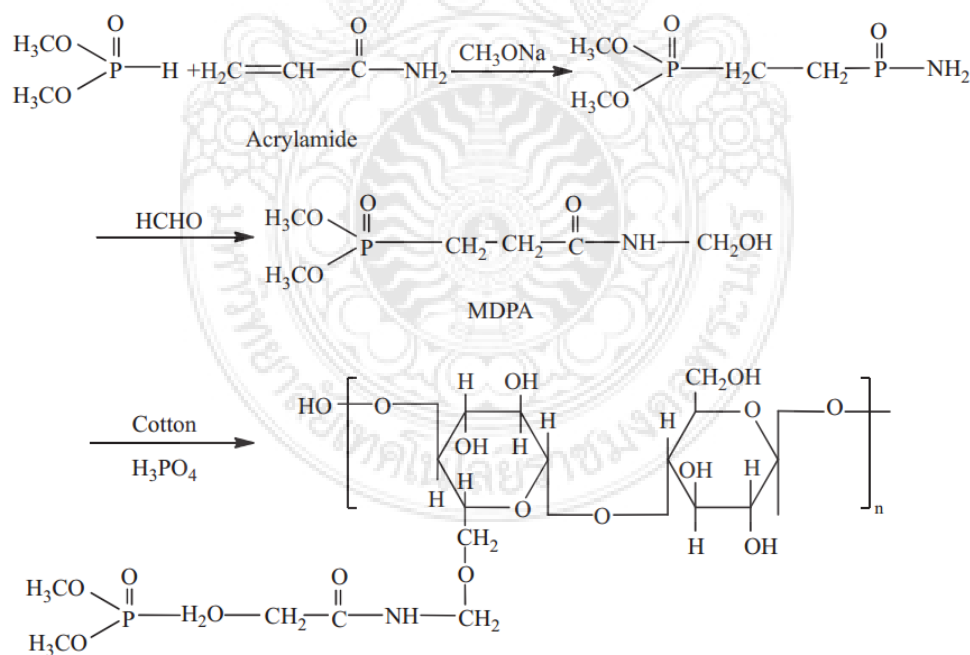
ระบบสารหน่วงไฟ THPX ยูเรียและแอมโมเนียยังสามารถทำงานร่วมกับสารหน่วงไฟชนิดอื่น เช่น ใช้ร่วมกับ cyclic methylphosphonate ester หรือกับ hexabromocyclodecane

ข้อจำกัดของระบบนี้คือจำเป็นต้องใช้อ่างไนโตรเจนชนิดพิเศษซึ่งไม่มีในโรงงานสิ่งทอทั่วไป จึงมีความพยายามที่จะเปลี่ยนจากการใช้ก๊าซแอมโมเนียเป็นแอมโมเนียเหลว ซึ่งสามารถทำได้และได้ผ้าที่มีความคงทนของสมบัติหน่วงไฟแม้จะมีความหนาเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีการใช้ระบบ THPOH ยูเรียและเมลามีนร่วมกับกระบวนการจุ่มอัด/อบแห้ง/ผึ่ง เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ทั้งความคงทนในการยัดติดและความสามารถกันยับ [7]

ฟอสฟาโนเอไมด์ (Phosphanoamide)

สารหน่วงไฟบนผ้าฝ้ายที่สำคัญทางการค้าอีกชนิดคือ Pyrovatex ผลิตโดยบริษัท Ciba (Huntsman ในปัจจุบัน) เป็นสารตกแต่งชนิดคงทนมีสาระสำคัญได้แก่ phosphonic acid, (3-[[hydroxymethyl] amino]-3-oxopropyl) - dimethyl ester หรือเรียกอีกอย่างว่า N-methylol dimethyl phosphano proprionamide (MDPA) กระบวนการตกแต่งทำได้โดยใช้ dimethylphosphite ทำปฏิกิริยากับ acrylamide ได้สาร dimethylphosphanoproprionamide ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อกับฟอร์มัลดีไฮด์ได้ MDPA

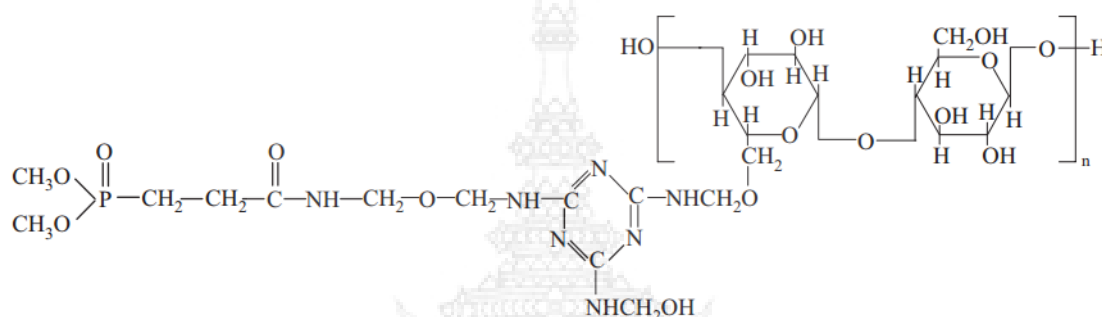
MDPA เป็นสารที่เสถียร ละลายน้ำได้ แต่มีฟอร์มัลดีไฮด์เจือปน หมูเมทิลอลใน MDPA สามารถทำพันธะกับเส้นใยฝ้ายได้โดยตรงดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 การสังเคราะห์ MDPA และการเกิดพันธะกับผ้าฝ้ายของ MDPA (Yang, 2013)

โดยปกติแล้วมีการใช้ trimethylolmalamine (TMM) เป็นสารตั้งต้นร่วมในการทำปฏิกิริยากับฝ้าย โดย TMM ทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมระหว่างฝ้ายและ MDPA ดังแสดงในรูปที่ 7 การทดลองแสดงว่า การเติม TMM ช่วยให้อัตราการจับกันของ MDPA และฝ้ายเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังสามารถทดแทน MDPA ด้วยวิธีจุ่มอัด/อบแห้ง/ผนึกโดยใช้กรดฟอสฟอริกที่มีความเข้มข้นน้อยๆเป็นตัวเร่งได้

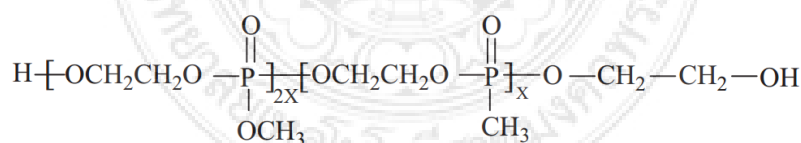
ในกระบวนการตกแต่งด้วยไฟโรวาเท็กซ์ยังมีปัญหาเรื่องการปลดปล่อยฟอร์มัลดีไฮด์ซึ่งแก้ไขได้ด้วยการปรับปรุงกระบวนการตกแต่ง โดยใช้ Na_2CO_3 ในการสะเทินกรดที่เกิดขึ้น จากนั้นตามด้วยการล้างหลายๆครั้ง เมื่อทำอย่างระมัดระวังจะได้สารที่สูญเสียความแข็งแรงน้อยมาก [7]



รูปที่ 7 การสร้างพันธะของ MDPA กับฝ้ายผ่าน TMM (Yang, 2013)

Hydroxyl-functional phosphorus-containing oligomers (HFPO)

เริ่มแรก HFPO ถูกใช้เพื่อเพิ่มความหน่วงไฟในกระดาษกรองในงานกรองอากาศรถยนต์ ต่อมาเมื่อราวปีค.ศ. 2000 ได้นำมาประยุกต์ใช้กับผ้าฝ้าย สารชนิดนี้คือโอลิโกเมอร์แอลกอฮอล์ที่ว่องไวมีหน่วยเล็กคือ methylphosphonate และ methylphosphate ที่ประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซีที่ปลายสายสองหมู่ ดังแสดงในรูปที่ 8

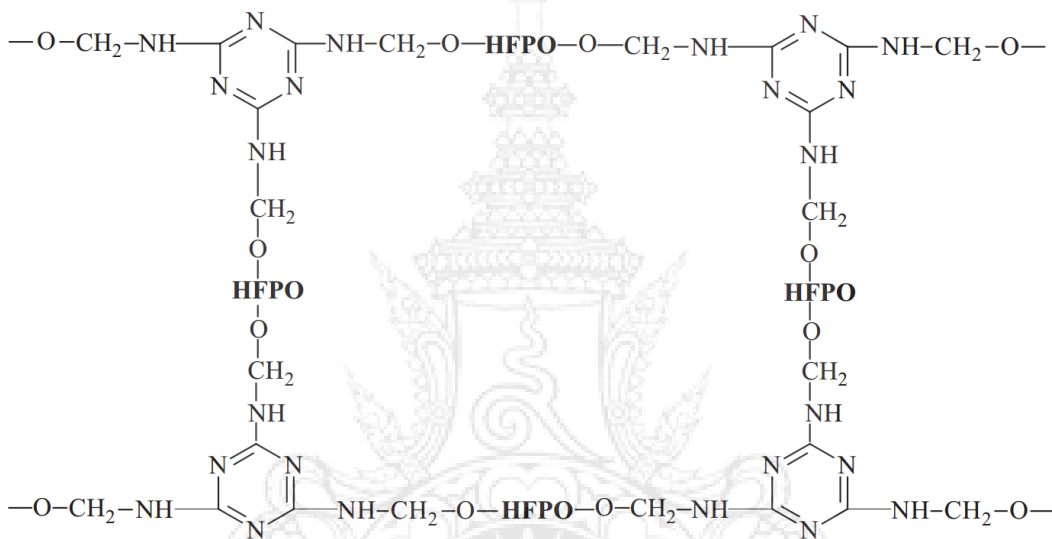


รูปที่ 8 โครงสร้างของ HFPO

HFPO ไม่มีหมู่ที่สามารถทำพันธะโดยตรงกับฝ้ายได้จึงต้องเติมสารอื่นลงไปช่วยประสาน สารที่นิยมใช้มีสองชนิดได้แก่ TMM และ dimethyldihydroxyethyleneurea (DMDHEU) ซึ่งเป็นสารกลุ่มฟอร์มัลดีไฮด์ทั้งคู่ จากการศึกษาพบว่า เมื่อใช้ DMDHEU เป็นตัวเชื่อม ผ้าที่ได้จะยึดติดกับ HFPO ได้คงทนกว่าเนื่องจากเกิดครอสลิงค์ได้ดีกว่า นอกจากนี้ยังให้ความสามารถกันยับสูงกว่า แต่ก็สูญเสียความแข็งแรงไปมากกว่าเช่นกัน

ในการใช้งาน TMM นั้นพบว่าทำให้เกิดการทำงานเสริมกันระหว่างไนโตรเจนใน TMM และฟอสฟอรัสใน HFPO เมื่อเทียบประสิทธิภาพระหว่าง HFPO และ MDPA พบว่าทั้งคู่มีความคงทนในการซักล้างใกล้เคียงกัน แต่เมื่อผ่านการซักล้างไป 30 ครั้ง MDPA จะมีเปอร์เซ็นต์สารหน่วงไฟเหลืออยู่มากกว่า

สารช่วยให้เกิดครอสลิงค์ชนิดที่ไม่ใช่พอร์มัลดีไฮด์ได้แก่ 1,2,3,4-butanetetracarboxylic acid (BTCA) แต่เมื่อใช้ตกแต่งบนผ้าฝ้ายแล้วหมู่คาร์บอกซีอิสระใน BTCA จะจับกับโลหะแคลเซียมในน้ำประปาเกิดเกลือที่ไม่ละลายน้ำ ทำให้ประสิทธิภาพของ HFPO ลดลงไปเมื่อซักล้าง จึงมีความพยายามเติมสาร triethanolamine (TEA) เพื่อจับกับหมู่คาร์บอกซีอิสระ นอกจากให้ผลที่ดีเรื่องความคงทนของการยัดติดแล้ว TEA ยังมีไนโตรเจนที่ส่งผลเพิ่มประสิทธิภาพการหน่วงไฟอีกด้วย [7]



รูปที่ 9 โครงสร้างครอสลิงค์ระหว่าง BTCA/HFPO/TEA (Yang, 2013)

การยัดติดสารหน่วงไฟ

กระบวนการยัดติดสารหน่วงไฟเกิดขึ้นได้หลายแบบ วิธีที่นิยมใช้สำหรับสิ่งทอได้แก่การเคลือบที่พื้นผิวของสิ่งทอ อาจด้วยการพ่นสเปรย์ การทาด้วยแปรง การกลิ้งด้วยโรลเลอร์ หรือการจุ่มสิ่งทอลงในสารหน่วงไฟตามด้วยขั้นตอนการทำให้แห้งแล้วกำจัดตัวทำละลาย กระบวนการเหล่านี้ประกอบด้วยหลายขั้นที่ต้องใช้พลังงานและสารเคมีจำนวนมาก จึงมีความกังวลต่อความเป็นพิษที่อาจมีต่อสิ่งแวดล้อม ปัญหาของการเคลือบสารหน่วงไฟได้แก่การคลายตัวของสารยัดติดเมื่อใช้ความร้อนซ้ำๆ ทำให้การยัดติดเป็นไปอย่างจำกัด มีความพยายามพัฒนาวิธีการยัดติดใหม่ขึ้นมาดังนี้

1) Ultraviolet curing Technology

เป็นวิธีที่ใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมมากขึ้น วิธีนี้มีข้อดีคือ สามารถยัดติดได้ทันที ใช้พลังงานต่ำ ลดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม มีความเสถียรทางเคมี ปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยง่ายจำนวนน้อย และ

สามารถใช้งานในสถานะที่หลากหลาย วิธีการทำได้โดยใช้สารหน่วงไฟ เช่น โบรอน ฟอสฟอรัส ซิลิกอน ลงไปในเครื่องฉีกอลตราไวโอเลต เพียงเท่านั้นก็ได้ผ้าที่เคลือบด้วยสารหน่วงไฟที่ต้องการ

2) Plasma Technology

เป็นวิธีการเลือกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม วิธีนี้ทำให้สารหน่วงไฟเกาะหรือทำพันธะกับพื้นผิวของสิ่งทอที่เข้ามาสัมผัสกับพลาสมา แม้จะใช้พลาสมาความดันต่ำก็สามารถสร้างเส้นใยที่ยึดติดกับสารหน่วงไฟชนิดคงทนได้ วิธีนี้มีค่าใช้จ่ายสูงและต้องใช้เครื่องสุญญากาศ

3) Physical and chemical vapor deposition

Physical vapor deposition (PVD) และ Chemical vapor deposition (CVD) ถูกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงวัสดุสิ่งทออย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและความยืดหยุ่นในการใช้งานกับวัสดุที่หลากหลาย การเคลือบแบบฉีดย่นเป็นอีกวิธีที่นำเทคนิค PVD มาใช้ โดยสามารถใช้กับวัสดุชนิดต่างๆ ทั้งผ้า เส้นใยนาโน หรือแม้แต่พลาสติก ส่วนเทคนิค CVD ถูกนำมาใช้ร่วมกับเทคนิคพลาสมาเพื่อการเคลือบในลักษณะแผ่นฟิล์ม

4) Sol-gel process

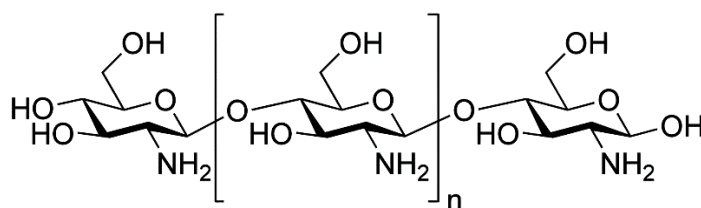
เป็นเทคนิคทางเคมีแบบเปียกสำหรับการเคลือบสารหน่วงไฟบนผ้าที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม วิธีนี้เดิมใช้เพื่อสร้างโครงสร้างพอลิเมอร์ร่วมของวัสดุคอมพอสิตของสารอินทรีย์และอนินทรีย์ ซึ่งช่วยให้ได้ข้อดีทั้งจากสารอินทรีย์และอนินทรีย์ในการใช้งาน

5) Layer-by-layer assembly approach

วิธีนี้มีค่าใช้จ่ายต่ำและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม วิธีการทำโดยแช่หรือฉีดย่นสารละลายพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุตรงข้ามไปบนผิวผ้าเพื่อทำให้พื้นผิวเกิดการแยกชั้นของประจุ จากนั้นจึงเคลือบสารหน่วงไฟลงไปหลายๆชั้น ซึ่งสารหน่วงไฟอาจทำพันธะไฮโดรเจนกับพื้นผิวผ้าหรือเกิดพันธะโควาเลนต์ต่อกัน [8]

2.4 ไคโตซาน

ไคโตซาน (Chitosan) คืออนุพันธ์ของไคติน (Chitin) ที่ถูกดึงหมู่อะซีทิล (Acetyl group) ออกโดยปฏิกิริยา deacetylation ได้โครงสร้างที่เรียกว่ากลูโคซามีน (Glucosamine) ที่สามารถละลายได้ดีในกรดอินทรีย์ ไคโตซานมีโครงสร้างคล้ายเซลลูโลส โดยแตกต่างที่หมู่แทนที่ในเซลลูโลสเป็นหมู่ไฮดรอกซี (-OH) ส่วนในไคโตซานเป็นหมู่อะมิโน (-NH₂)



รูปที่ 10 โครงสร้างของไคโตซาน

โคโตซานสกัดได้จากเปลือกกุ้ง ปู ปลาหมึก ได้เป็นผงโคโตซานที่มีส่วนผสมของน้ำตาล N-Acetyl-D-Glucosamine และ Glucosamine อยู่ในสายเดียวกัน จากนั้นทำการดึงหมู่อะซีทิลโดยระดับการดึงจะมีผลต่อคุณสมบัติของโคโตซานที่ได้ นอกจากนี้ตัวแปรอื่นที่มีผลต่อสมบัติได้แก่น้ำหนักโมเลกุล ยังมีน้ำหนักโมเลกุลสูงหมายถึงความยาวของสายโซ่ยาว สารละลายมีความหนืดมากกว่าโคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

โคโตซานละลายในกรดอินทรีย์ เช่น กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก กรดแลคติก กรดไพรูวิก กรดมาลิก กรดทาทริก และกรดซิตริก สามารถละลายในกรดอินทรีย์ เช่น กรดไนตริก กรดไฮโปคลอริก กรดไฮโดรคลอริกเจือจาง (เข้มข้นน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1%) ละลายเล็กน้อยในกรดฟอสฟอริกเจือจาง (เข้มข้นน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.5%) แต่ไม่ละลายในกรดซัลฟิวริก ส่วนสารละลายอินทรีย์นั้นไม่สามารถละลายโคโตซานได้ ยกเว้นสารละลายพอลิแอลกอฮอล์ที่มีสภาพเป็นกรด เช่น สารผสมของกลีเซอรอลและน้ำ (3 : 1)

โคโตซานเป็นไบโอพอลิเมอร์ที่พบได้ในธรรมชาติ เป็นวัสดุชีวภาพสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ไม่ก่อให้เกิดอาการแพ้และไม่เป็นพิษต่อพืชและสัตว์ โคโตซานถูกนำมาใช้งานในด้านต่างๆ ดังนี้

- 1) **ด้านการเกษตร** สามารถใช้ผสมกับดินเพื่อปรับสภาพ ช่วยให้ดินยึดเกาะกันได้ดี การระเหยของน้ำลดลง ควบคุมการปลดปล่อยแร่ธาตุในดิน ช่วยเร่งอัตราการเจริญเติบโต เพิ่มปริมาณจุลินทรีย์ในดิน ใช้ในการเก็บรักษาผลผลิตทางการเกษตร หรือใช้ผลิตกระถางและถุงที่สามารถย่อยสลายได้
- 2) **ด้านอุตสาหกรรมอาหาร** เนื่องจากมีความสามารถผนการยับยั้งจุลชีพและไม่เป็นพิษ โคโตซานจึงสามารถนำมาบริโภคเป็นอาหารเสริมและอาหารควบคุมน้ำหนักและคอเลสเตอรอล ใช้ในกระบวนการผลิตอาหารและใช้เพื่อถนอมอาหาร
- 3) **ใช้บำบัดน้ำเสีย** โดยโคโตซานสามารถตกตะกอนแขวนลอยที่มาจากอุตสาหกรรมอาหารได้ นอกจากนี้ยังสามารถจับไอออนโลหะได้ เช่น ไอออนปรอท ทองแดง ตะกั่ว แคดเมียม เป็นต้น
- 4) **ใช้เป็นส่วนประกอบในเครื่องสำอาง** ช่วยรักษาความชุ่มชื้นและความยืดหยุ่นของผิวหนังและเส้นผม ลดอาการระคายเคืองและคันศีรษะ เพิ่มความเงางามให้เส้นผม
- 5) **ด้านเส้นใยและสิ่งทอ** ใช้ผลิตเส้นใยและเส้นด้าย ผ่านอนุพเวิน ผ้าปิดแผล ไหมละลาย
- 6) **ด้านการแพทย์และเภสัชกรรม** ใช้เป็นวัสดุทดแทนกระดูกเนื่องจากไม่เป็นพิษต่อร่างกาย เป็นวัสดุปิดบาดแผล กระตุ้นการสร้างเซลล์ใหม่ ป้องกันการติดเชื้อของแผล เป็นสารป้องกันการจับตัวเป็นก้อนของเลือด
- 7) **ใช้ดูดซับน้ำมันที่ตกค้างอยู่ในน้ำเสีย** โดยใช้โคโตซานแบบผงจะมีประสิทธิภาพสูงที่สุด สามารถนำมาใช้เพื่อดูดซับน้ำมันจากโรงงานอุตสาหกรรมได้ [9]

2.5 วิธีทดสอบการติดไฟ

คุณสมบัติการติดไฟของพอลิเมอร์สามารถแสดงได้ด้วยความสามารถในการติดไฟ การขยายของเปลวไฟและความร้อนที่ปลดปล่อยออกมา โดยใช้วิธีดังต่อไปนี้

การวิเคราะห์ความร้อน (Thermal Analysis) วัดโดยวิธีการ Thermal Gravimetric Analysis (TGA), Differential Thermal Analysis (DTA) และ Differential Scanning Calorimeter (DSC) ซึ่งให้ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับกลไกการไฟโรไลซิสและการเผาไหม้

การวัดการขยายของเปลวไฟ (Flame spread) ทำได้โดยการทดสอบเผาสารตัวอย่าง จากนั้นวัดค่าการขยายตัวของเปลวไฟ การติดไฟ และความร้อนที่ใช้เพื่อให้คงสภาพการติดไฟ

ค่าดัชนีออกซิเจน (Oxygen index) หาโดยวัดค่าความเข้มข้นออกซิเจนต่ำสุดในก๊าซผสมระหว่างออกซิเจนและไนโตรเจนเพื่อหาความเข้มข้นที่เพียงพอต่อการเผาไหม้ของตัวอย่าง วิธีนี้สามารถใช้หากลไกการหน่วงไฟที่สถานะก๊าซได้

อัตราการปลดปล่อยความร้อนระหว่างเผาไหม้ (Heat release rate, HRR) บอถึงความสามารถในการเผาไหม้ของวัสดุ ยิ่งปลดปล่อยความร้อนมากก็ยิ่งเผาไหม้มาก สารหน่วงไฟจะลดค่านี้ทำให้การเผาไหม้ลดน้อยลง การวัดสามารถวัดไปพร้อมกับวัดค่า mass loss rate, effective heat of combustion, total heat released, specific extinction area, time to sustained ignition และ CO/CO₂ formation ด้วยวิธีโคนแคลอริมิเตอร์ (Cone calorimeter)

ความเป็นพิษ (Toxicity) อาศัยการวิเคราะห์เขม่าจากการเผาไหม้ โดยใช้การวิเคราะห์ cone calorimeter ร่วมกับ FTIR [10]

การทดสอบความสามารถในการต้านไฟบนผืนผ้า (16 CFR Part 1610: The flammability of Clothing Textiles) ใช้ทดสอบเพื่อหาความสามารถในการติดไฟของผลิตภัณฑ์สิ่งทอที่ใช้สำหรับทำเสื้อผ้า โดยแบ่งระดับการติดไฟเป็น 3 คลาสตามผลการทดสอบ โดยสรุปจากกลุ่มของผลที่ได้จากตัวอย่างทั้งก่อนและหลังซัก (ในบางกรณีที่ต้องทำทั้งสองชนิด) [11]

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Don และพวก (2001) ได้ทำการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ระหว่างพอลิเมทิลเมทาอะคริเลท (poly (methyl metacrylate), PMMA) และโคโตซานพบว่าเมื่อมีโคโตซานอยู่ในโมเลกุล พอลิเมอร์ที่ได้มีคุณสมบัติทางความร้อนดีขึ้น ค่า T_g สูงขึ้นและมีหมู่เอมิโนเพิ่มขึ้นตามปริมาณโคโตซานที่เติมเข้าไป [12]

Xiao และพวก (2011) ทำการเตรียมเส้นใยผสมระหว่างเซลลูโลสและไคโตซานด้วยวิธีการละลายในตัวทำละลาย ionic liquid (LI) ที่ต่างกัน จากนั้นนำสารละลายมาผสมกันจะได้เส้นใยและเมมเบรนผสม เมื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติพบว่า เส้นใยผสมสามารถทนความร้อนได้ดีขึ้น โดยมีอุณหภูมิการสลายตัวเพิ่มจาก 220 องศาเซลเซียสของไคโตซานปกติเป็น 258 องศาเซลเซียส [13]

Hu และพวก (2012) ทำการสังเคราะห์สารหน่วงไฟจากไคโตซานและฟอสฟอรัส (phosphorus pentoxide) จากนั้นศึกษาพฤติกรรมของการเผาไหม้เมื่อใช้งานบนอีพอกซีอะคริเลท (epoxy acrylate) โดยในกระบวนการยึดติดมีการใช้อะคริเลทเพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ของสารหน่วงไฟกับอีพอกซีอะคริเลท ผลที่ได้พบพอลิเมอร์ที่ผ่านการตกแต่งมีค่า limited oxygen index (LOI) สูงขึ้นจาก 21 เป็น 26 และยังมีค่าอัตราการปลดปล่อยความร้อนต่ำลง โดยค่า peak heat release rate (PHRR) ต่ำลง 56 % ส่วนค่า total heat release (THR) ต่ำลง 50 % ช่วยเพิ่มการเกิดถ่านจากการเผาไหม้ ทำให้อีพอกซีอะคริเลทมีความเสถียรที่อุณหภูมิสูงมากขึ้น ปลดปล่อยก๊าซที่ระเหยได้ลดลง จึงสรุปได้ว่าสารหน่วงไฟชนิดไคโตซานและฟอสฟอรัสสามารถเพิ่มความสามารถในการหน่วงไฟให้กับอีพอกซีอะคริเลทได้ [14] นอกจากนี้ในปีเดียวกัน Hu และพวกยังได้สังเคราะห์สารหน่วงไฟจากไคโตซาน, ฟอสฟอรัสและนิกเกิลในโครงสร้างและนำมาตกแต่งบนพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ซึ่งผลที่ได้พบว่าสามารถเพิ่มความหน่วงไฟได้เช่นกัน [15]

Carosio และพวก (2012) ทำการสังเคราะห์สารหน่วงไฟชั้น 2 ระบบได้แก่ ระบบแอมโมเนียมฟอสเฟต (Ammonium polyphosphate, APP) กับไคโตซาน และระบบ APP กับซิลิกา โดยระบบที่สังเคราะห์ได้มีกลไกคล้ายระบบสารหน่วงไฟแบบ intumescent มี APP เป็นตัวให้กรด และไคโตซานเป็นตัวทำให้เกิดถ่านและโฟมอันมีผลช่วยเพิ่มคุณสมบัติการหน่วงไฟเมื่อทดลองตกแต่งลงบนเส้นใยผสมระหว่างฝ้ายและพอลิเอสเตอร์ด้วยวิธี layer by layer [16]

Shao และพวก (2014) สังเคราะห์สารหน่วงไฟกลุ่ม APP กับเอทิลีนไดเอมีน (ethylenediamine) เมื่อทดสอบคุณสมบัติเมื่อใช้งานบนเส้นใยพรอพิลีนพบว่าสารหน่วงไฟดีขึ้นจากเมื่อใช้เฉพาะ APP เกิดถ่านมากขึ้น ดังนั้นพันธะ P-N-C จึงมีส่วนช่วยในกระบวนการหน่วงไฟ [17]

Xiao และพวก (2014) เตรียมสารหน่วงไฟระบบ intumescent จากไคโตซาน, ยูเรียและ phosphonic acid melamine salt โดยยูเรียช่วยให้ไคโตซานละลายน้ำได้มากขึ้น สารที่สังเคราะห์ได้เมื่อนำไปใช้งานบนพอลิพรอพิลีนและทดสอบค่า LOI และการเผาไหม้ตามยาว พบว่าค่า LOI เพิ่มขึ้น มีถ่านเยอะขึ้น การหน่วงไฟดีขึ้น อย่างไรก็ตามผ้าพอลิพรอพิลีนที่ผ่านการตกแต่งมีความแข็งแรงลดลง [18]

Pan และพวก (2014) ทำการสังเคราะห์สารหน่วงไฟที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยปฏิกิริยาระหว่างเซลลูโลสที่เติมหมู่ฟอสฟอรัสและแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) โดยเซลลูโลสถูกเติมฟอสฟอรัสจากการด

พอสฟอริกภายใต้สภาวะแอมโมเนียเหลวจากนั้นจึงนำมาผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) แล้วทำเมมเบรนผสมที่มีความหนาประมาณ 0.4 – 0.6 mm ออกมา เมื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติการติดไฟพบว่าค่า LOI เพิ่มขึ้นในทุกความเข้มข้นของสารหน่วงไฟที่ใช้ การปลดปล่อยความร้อนในการเผาไหม้ก็ลดลง [19]

Chen และพวก (2015) ได้ตกแต่งผ้าฝ้ายด้วยสารหน่วงไฟระบบ intumescent และทำให้พื้นผิวไม่ชอบน้ำเพื่อคุณสมบัติที่ดีในการทำความสะอาดตัวเอง การตกแต่งทำโดยการจุ่มแช่เพื่อเคลือบสาร 3 ชั้นอันประกอบด้วย branched poly(ethyleneimine) (bPEI), ammonium polyphosphate (APP) และ fluorinated-decyl polyhedral oligomeric silsesquioxane (F-POSS) ผ้าฝ้ายที่ได้เมื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติพบว่า ผ้ามีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำตามคุณสมบัติของสารที่เคลือบชั้นนอกสุดคือ F-POSS เมื่อทดสอบความเผาไหม้เปรียบเทียบกับผ้าที่ยังไม่ตกแต่งพบว่า ผ้าฝ้ายที่ยังไม่ตกแต่งจะไหม้หมดภายใน 14 วินาที ส่วนผ้าที่ผ่านการตกแต่งจะหยุดเผาไหม้หลัง 4 วินาที และมีถ่านสีดำเกิดขึ้น แสดงว่าวิธีการตกแต่งนี้สามารถเพิ่มความหน่วงไฟให้กับผ้าฝ้ายได้ นอกจากนี้ผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งยังมีความทนทานเพิ่มขึ้นด้วย [20]

Yang และพวก (2015) ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์สารหน่วงไฟกลุ่มแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (ammonium polyphosphate, APP) เพื่อใช้เคลือบระดับนาโนบนโพลีเมลามีน สารที่ใช้ในการสังเคราะห์ได้แก่โคโตซานที่มีประจุบวกและ APP ที่มีประจุบวก ทำการตกแต่งบนโพลีเมลามีนด้วยวิธี layer by layer และทดสอบความเสถียรทางความร้อนด้วยวิธี TGA พบว่าโพลีที่ผ่านการตกแต่งทั้ง 1 และ 2 ชั้น มีอุณหภูมิสลายตัวสูงกว่าโพลีที่ไม่ผ่านการตกแต่ง ค่า LOI เพิ่มขึ้น อัตราการปลดปล่อยความร้อนลดลง [21]

Pan และพวก (2015) ทดสอบการตกแต่งสารหน่วงไฟด้วยวิธี layer by layer บนผ้าฝ้ายที่สังเคราะห์จากไคตินและโคโตซานร่วมกับพอสฟอรัส ขั้นตอนการสังเคราะห์เริ่มจากสังเคราะห์ phosphorylated chitin (PT) จากนั้นจึงนำไปเคลือบบนพื้นผิวของผ้าฝ้ายด้วยวิธีการจุ่มแช่หลายๆครั้ง เมื่อนำผ้าที่ตกแต่งแล้วมาทดสอบหาลักษณะทางโครงสร้างพบว่ามีชั้นของการเคลือบมากก็ยังมีอัตราส่วนระหว่าง P/C และ P/O มาก และจากการทดสอบทางความร้อนและการเผาไหม้พบว่า ผ้ามีอัตราการปลดปล่อยความร้อนลดลง มีความเสถียรทางความร้อนมากขึ้น ระบายให้ก๊าซเมื่อเผาไหม้น้อยลง [22]

Fang และพวก (2015) สังเคราะห์สารหน่วงไฟระบบ intumescent โดยใช้โคโตซานและ APP เพื่อใช้งานบนผ้าฝ้ายด้วยวิธี layer-by-layer วิธีการเตรียมผ้าทำได้โดยการจุ่มลงในสารละลายสารละลายโคโตซาน สลับกับการจุ่มลงในสารละลาย APP จนได้สารละลายที่มีจำนวนชั้นตามต้องการ จากนั้นนำผ้าที่ได้ไปทดสอบคุณสมบัติทางความร้อน พบว่ามีความเสถียรทางความร้อนดีขึ้น ระยะเวลาเผาไหม้ลดลงเมื่อมีชั้นมากขึ้น เกิดถ่านมากขึ้นตามจำนวนชั้นที่เพิ่ม การปลดปล่อยความร้อนจากการเผาไหม้ลดลงตามจำนวนชั้น [23]

บทที่ 3

การทดลอง

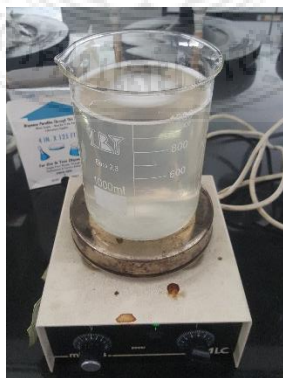
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

1. ไคโตซาน ชนิดน้ำหนักโมเลกุลปานกลาง (75-85 % deacetylated, ความหนืด 200 – 800 cP) จากบริษัท Sigma – Aldrich
2. ยูเรีย เกรดวิเคราะห์
3. โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตไดไฮเดรต ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Sigma – Aldrich
4. กรดอะซิติก (CH_3COOH) เกรดวิเคราะห์
5. กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เกรดวิเคราะห์
6. แอมโมเนีย (NH_3) เกรดวิเคราะห์
7. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดวิเคราะห์
8. เอทานอล ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) เกรดวิเคราะห์
9. อะซีโตน (CH_3COH) เกรดวิเคราะห์
10. ผ้าฟ้ายทอมือสีขาว

3.2 การสังเคราะห์สารหน่วงไฟ

3.2.1 วิธีที่ 1

ละลายไคโตซาน 2 กรัม ในกรดอะซิติก 9 % v/v 200 มิลลิลิตร ให้ความร้อน 70 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งคนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นเติม $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 2.6 กรัม และปล่อยให้ทำปฏิกิริยาต่อไปอีก 2 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น หยุดปฏิกิริยาด้วยเอทานอลจะได้สารที่ลักษณะเป็นผงสีขาวตกตะกอนออกมาทันที กรองตะกอนที่ได้ ล้างตะกอนด้วยเอทานอล และอะซีโตนตามลำดับ



รูปที่ 11 ขั้นตอนการละลายไคโตซานในสารละลายกรดอะซิติกในวิธีที่ 1



รูปที่ 12 สารที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีที่ 1 มีลักษณะเป็นผงสีขาว

3.2.2 วิธีที่ 2

ละลายโคโตซาน 2 กรัมในสารละลายยูเรียเข้มข้น 1 % w/v จำนวน 200 มิลลิลิตร เติม $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 2.6 กรัมลงในคราวเดียวกัน ให้ความร้อนที่ 70 องศาเซลเซียสพร้อมคนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสต่อจนสารละลายระเหยไปจนหมด จะได้สารใสสีน้ำตาล ล้างด้วยเอทานอลและอะซีโตน



รูปที่ 13 ลักษณะของสารที่เตรียมจากวิธีที่ 1 (ขวา) และวิธีที่ 2 (ซ้าย)

3.2.3 วิธีที่ 3

ละลายโคโตซาน 2 กรัมในสารละลายกรดอะซีติก 3% v/v 200 มิลลิลิตร ให้ความร้อน 70 องศาเซลเซียสพร้อมทั้งคนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นเติม $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 2.6 กรัม ตั้งทิ้งให้เกิดปฏิกิริยาต่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นเติมยูเรีย 1 กรัมและปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาต่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำสารละลายที่ได้มาอบจนตัวทำละลายระเหยจะได้สารเหนียวสีขาวขุ่น ล้างด้วยเอทานอลและอะซีโตน



รูปที่ 14 ลักษณะของสารที่สังเคราะห์ได้จากวิธีที่ 3

3.3 การหาเอกลักษณ์ของสาร

ตรวจหาเอกลักษณ์ของสารด้วยวิธี H-NMR ใช้ตัวทำละลายคือ D_2O โดยส่งสารตัวอย่างทำการตรวจวิเคราะห์ที่คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาเขตพญาไท

3.4 การตกแต่งสารหนองไฟลงบนผ้าฝ้าย

3.4.1 วิธีที่ 1 ใส่ผ้าที่ต้องการทดสอบระหว่างการเตรียมสาร โดยใส่หลังจากเติม $NaH_2PO_4 \cdot 2H_2O$ ลงไปแล้ว 1 ชั่วโมง จากนั้นอีก 1 ชั่วโมงจึงนำผ้าขึ้น ล้างผ้าด้วยเอทานอลและอะซิโตน แล้วผึ่งให้แห้ง

3.4.2 วิธีที่ 2 ใส่ผ้าหลังจากที่ปล่อยให้สารทั้งหมดทำปฏิกิริยาไปแล้ว 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นอีก 1 ชั่วโมงจึงนำผ้าขึ้น ล้างด้วยเอทานอลและอะซิโตนแล้วผึ่งให้แห้ง

3.4.3 วิธีที่ 3 ใส่ผ้าในชั้นก่อนเติมยูเรีย เมื่อเติมยูเรียแล้วทิ้งให้เกิดปฏิกิริยาต่อไปจนครบกำหนด นำผ้าขึ้นและล้างด้วยเอทานอลและอะซิโตน ผึ่งให้แห้ง

3.5 การทดสอบความสามารถในการต้านไฟบนผืนผ้า [11]

1. ตัดชิ้นทดสอบขนาด 2×6 นิ้ว ให้ด้านยาวขนานขนานตามความยาวผ้า 1 ชั้น และให้ด้านกว้างขนาดความยาวผ้าอีก 1 ชั้น จากนั้นทดสอบหาด้านที่ให้ความเร็วในการเผาไหม้มากกว่า จากการทดสอบได้ผลว่าใช้ทิศตามแนวขวาง

2. ตัดชิ้นทดสอบตามแนวขวางของผ้าที่ยังไม่ตกแต่ง และผ้าที่ตกแต่งด้วยวิธีที่ 1, 2 และ 3 อย่างละ 5 ชิ้น

3. ทำการทดสอบเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ของตัวอย่างทั้งหมด

บทที่ 4

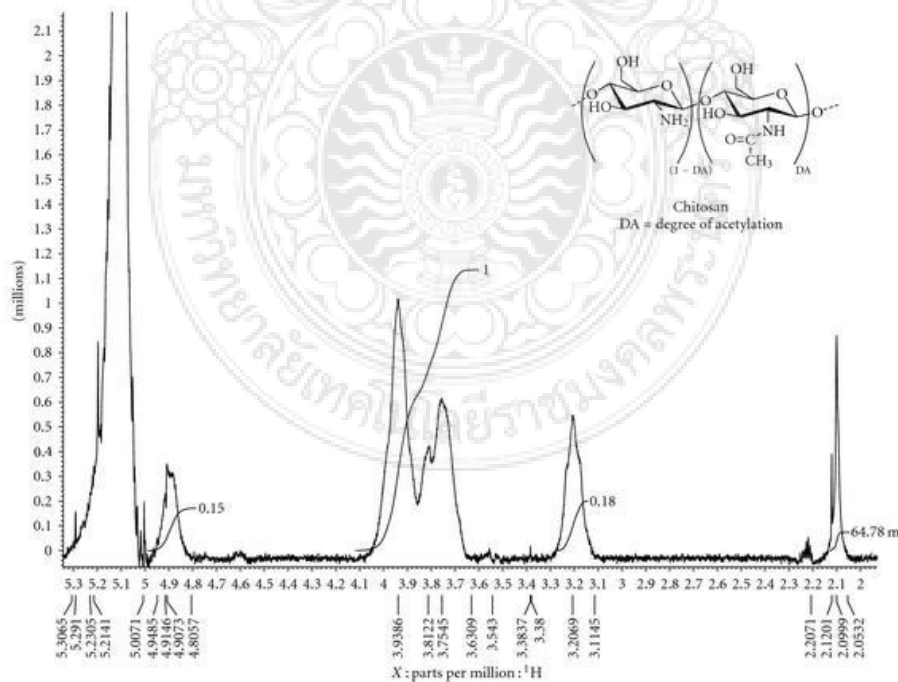
ผลการทดลองและการวิเคราะห์

4.1 โครงสร้างของสารที่สังเคราะห์ได้

จากผลการวิเคราะห์ H-NMR ของสารที่เตรียมจากวิธีทั้ง 3 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของไคโตซานแล้วพบว่า สารทั้ง 3 ชนิดให้สเปกตรัมที่ต่างออกไปดังนี้

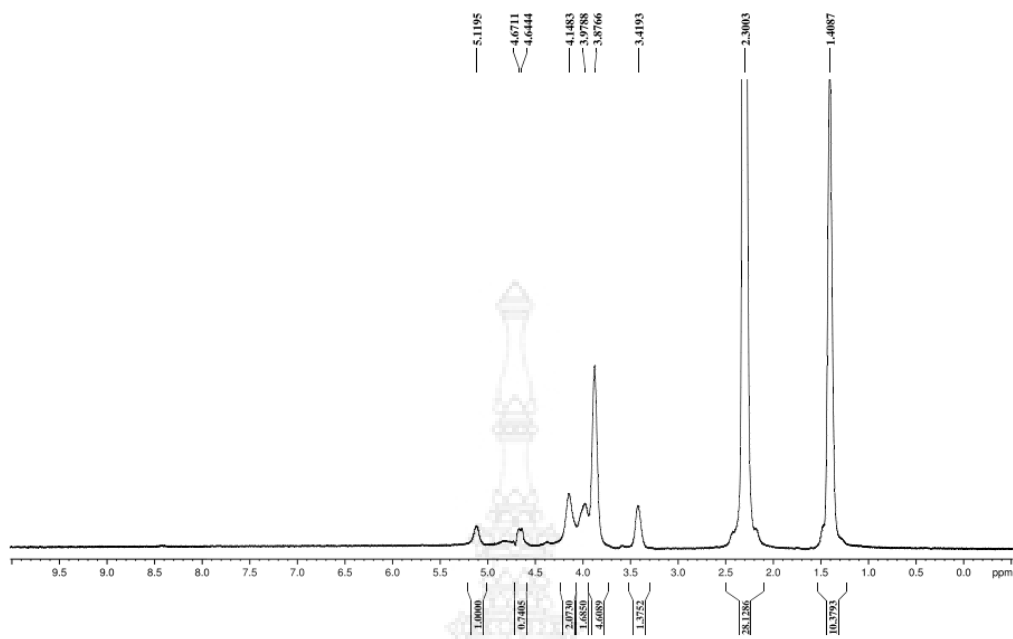
พิจารณา H NMR spectrum ของสารที่ 1 พบว่า มีชุดสัญญาณทั้งหมด 3 ชุดคือที่ตำแหน่งประมาณ 1.4, 2.3 และพีกเล็กๆระหว่างช่วง 3.4 – 4.1 ppm เนื่องจากพีกในสองตำแหน่งแรกเป็นพีกเดี่ยวซึ่งแสดงถึงหมู่ -CH หรือ -OH ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นพีกของ -OH และยังคงมีหมู่ -NH₂ จากพีกที่ช่วง 3.4-4.1 ppm ส่วนสารที่ 2 มีสเปกตรัมใกล้เคียงกับไคโตซานมาก ความแตกต่างมีเพียงการเลื่อนพีกที่ประมาณ 2 ppm ให้ต่ำลงเท่านั้น จึงคาดว่าสารจากวิธีที่ 2 น่าจะเป็นไคโตซานเช่นเดิม สำหรับสารชนิดที่ 3 มีความเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างมากที่สุด สังเกตจากพีกที่เพิ่มมาที่ตำแหน่ง 8.6 ppm ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นพีกของพันธะคู่ที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง

อย่างไรก็ตามเนื่องจาก H NMR ไม่สามารถบอกถึงพันธะของฟอสฟอรัสได้เช่น P-O หรือ P=O ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ด้วยวิธี IR spectroscopy เพิ่มเติม

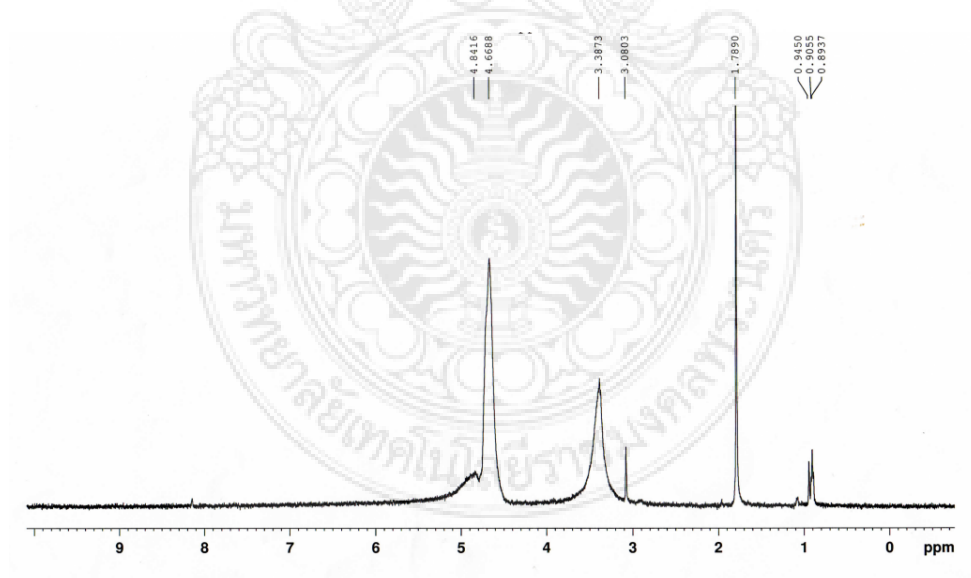


รูปที่ 15 H NMR ของ Chitosan

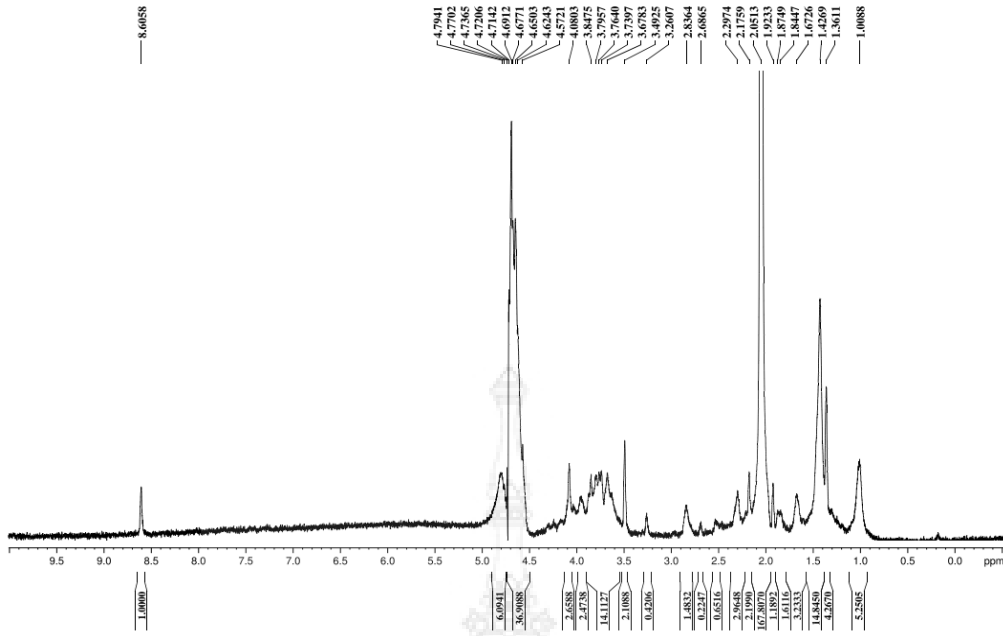
(ที่มา: <https://www.hindawi.com/journals/ijcc/2011/460381/fig1/>)



รูปที่ 16 ^1H NMR ของสารที่สังเคราะห์ด้วยวิธีที่ 1



รูปที่ 17 ^1H NMR ของสารที่สังเคราะห์ด้วยวิธีที่ 2



รูปที่ 18 ^1H NMR ของสารที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธีที่ 3

4.2 ผลการทดสอบความสามารถในการต้านไฟบนผืนผ้า

4.2.1 ลักษณะของผ้าที่ผ่านการตกแต่งด้วยสารหน่วงไฟ

ผ้าที่ได้จากวิธีที่ 1 มีสีเปลี่ยนไปอย่างชัดเจน คือมีสีออกเหลือง ในขณะที่วิธีอื่นๆยังได้ผ้าที่มีสีคงเดิม ส่วนผิวสัมผัสของผ้าทั้ง 3 วิธีมีความแข็งกว่าผ้าฝ้ายปกติ

ผ้าฝ้ายปกติ	ผ้าฝ้ายจากวิธีที่ 1	ผ้าฝ้ายจากวิธีที่ 2	ผ้าฝ้ายจากวิธีที่ 3

รูปที่ 19 แสดงลักษณะของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งด้วยวิธีต่างๆ

4.2.2 การทดสอบความต้านไฟบนผืนผ้า

จากการทดสอบระยะเวลาที่ใช้เผาผ้าฝ้ายที่ตกแต่งทั้งสามวิธีเปรียบเทียบกับผ้าที่ไม่ผ่านการตกแต่ง พบว่า ผ้าฝ้ายปกติใช้เวลาประมาณ 14 วินาทีในการเผาไหม้จนหมด ส่วนผ้าที่ตกแต่งด้วยสารหน่วงไฟทั้งสามวิธีใช้เวลานานกว่านั้น เป็น 21, 18 และ 20 วินาทีตามลำดับ ส่วนเก้าอี้ที่เหลือหลังการเผาไหม้พบว่า ผ้า

ฝ้ายปกติจะได้เส้นสีเทาอยู่ ส่วนผ้าที่ผ่านการตกแต่งจะได้เส้นสีดำคงรูป โดยการตกแต่งวิธีที่ 1 ทำให้ได้เส้นที่ยังคงรูปมากที่สุด

ตารางที่ 2 แสดงเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ชิ้นตัวอย่าง

ชนิดผ้า	ระยะเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้จนหมด (วินาที)					
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
ฝ้ายปกติ	14.61	14.56	13.89	16.54	14.28	14.776
ฝ้ายจากวิธีที่ 1	21.14	22.54	19.61	19.87	22.54	21.14
ฝ้ายจากวิธีที่ 2	18.84	17.86	19.24	18.12	19.31	18.674
ฝ้ายจากวิธีที่ 3	20.55	19.24	21.54	19.25	22.01	20.518



รูปที่ 20 แสดงลักษณะหลังเผาไหม้ของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยวิธีต่างๆ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อสังเคราะห์สารหน่วงไฟที่เป็นมิตรกับธรรมชาติสำหรับใช้งานบนผ้าฝ้าย หลังทดลองสังเคราะห์สารด้วยวิธีที่ต่างกัน 3 วิธีและนำมาใช้งานบนผ้าฝ้าย พบว่าสารที่ 1 ให้ผลเพิ่มเวลาในการเผาไหม้มากที่สุดคือ 21 วินาที มากกว่าผ้าฝ้ายปกติถึง 7 วินาที อย่างไรก็ตามสารที่ 1 ทำให้สีของผ้าฝ้ายเปลี่ยนไปและมีเนื้อสัมผัสที่แข็ง ซึ่งอาจเพราะใช้ความเข้มข้นของกรดอะซีติกในปริมาณสูงกว่าสารอื่นๆ ส่วนสารชนิดที่ 2 ให้ผลเพิ่มระยะเวลาการเผาไหม้ไม่มากนัก และสารชนิดที่ 3 ให้ผลใกล้เคียงกับสารชนิดที่ 1 โดยยังให้สีของผ้าที่ยังใกล้เคียงกับผ้าฝ้ายเริ่มต้น

สารหน่วงไฟที่ได้มีหมู่อะมิโนซึ่งได้มาจากไคโตซานแต่ยังไม่สามารถระบุหมู่ของฟอสฟอรัสได้เนื่องจากจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์เพิ่มเติม นอกจากนี้ยังต้องหาโครงสร้างที่เกิดขึ้นหลังจากตกแต่งใช้งานบนผ้าฝ้ายแล้ว

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทดลองหาสารหน่วงไฟที่เหมาะสมควรจะเป็นการทดลองเพื่อหาระบบสารหน่วงไฟที่เหมาะสมและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม กระบวนการในการตกแต่งง่ายและไม่เกิดสารพิษระหว่างกระบวนการผลิต หลังจากนั้นจะปรับการวิจัยเป็นการหาระบบสารหน่วงไฟที่ใช้ไคโตซานเป็นพื้นฐานร่วมกับสารอื่นๆ ที่ไม่มีรายงานความเป็นพิษต่อไป

บรรณานุกรม

- [1] เข็มชัย เหมะจันทร์ (2541), ผศ.ดร. เส้นใย. **คู่มือวิชาการสิ่งทอ**. ทีทีเอสไอจำกัด
- [2] Price, D. and A. R. Horrocks (2013), Combustion processes of textiles fibres in Selcen F. K. (ed) **Handbook of fire resistant textiles**. Woodhead Publishing.
- [3] Price, D., Anthony, G. and P. Carty (2001), Introduction: polymer combustion, condensed phased pyrolysis and smoke formation in Price, D. and A.R. Horrocks (eds) **Fire retardant materials**. Woodhead Publishing.
- [4] Lewin, M and E. D. Weil (2001), Mechanism and modes of action in flame retardancy of polymers in Price, D. and A.R. Horrocks (eds) **Fire retardant materials**. Woodhead Publishing.
- [5] Venier, M, Salamova, A. and R. A. Hiltes (2015), Halogenated flame retardants in the Great lakes environment, **Account of Chemical Research**, Vol. 48, p. 1853 – 1861
- [6] Wakelyn, P. J. (2008), Environmentally friendly flame resistant textiles in Price, D. and A.R. Horrocks (eds) **Advances in fire retardant materials**. Woodhead Publishing.
- [7] Yang, C. Q. (2013), **Flame resistant cotton in Selcen F. K. (ed) Handbook of fire resistant textiles**. Woodhead Publishing.
- [8] Liang, S., Neisius, N.M. and S. Gaan (2013), Recent developments in flame retardant polymeric coating, **Progress in Organic Coatings**, Vol. 76, p. 1642-1665
- [9] สุธิดา คงทอง, (2552). ไคติน-ไคโตซาน, **วารสารวิชาการอุตสาหกรรมศึกษา**, ปีที่ 3, ฉบับที่ 1, หน้า 1-7
- [10] Kozłowski, R. and M. W. Praybylak (2001), Natural polymers, wood and lignocellulosic materials in Price, D. and A.R. Horrocks (eds) **Fire retardant materials**. Woodhead Publishing.
- [11] รัตนพล มงคลรัตนสิทธ์, ผศ.ดร. (ไม่มีวันที่), การทดสอบความสามารถในการต้านไฟบนผืนผ้า, **เอกสารประกอบการสอน**, คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่น, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

- [12] Don, T. M., Hsu, S. C. and W. Y. Chiu (2001), Structure of thermal properties of chitosan-modified poly(methyl methacrylate), **Journal of Polymer Science: Part A: Polymer Chemistry**, Vol.39, p. 1646-1655
- [13] Xiao, W. et al (2011), Dissolution and blending of chitosan using 1,3-dimethylimidazolium chloride and 1-H-3-methylimidazolium chloride binary ionic liquid solvent, **Carbohydrate Polymers**, Vol. 83, p. 233-238
- [14] Hu, S et al (2012), Properties and combustion behaviors of flame retarded epoxy acrylate with chitosan based flame retardant containing phosphorus and acrylate structure, **Journal of Analytical and applied pyrolysis**, Vol. 97, p. 109-115
- [14] Hu, S. et al (2012), Thermal properties and combustion behaviors of chitosan based flame retardant combining phosphorus and Nickel, **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Vol. 51, p. 3663-3669
- [15] Carosio, F., Alongi, J. and G. Malucelli (2012), Layer by layer ammonium poly phosphate-based coating for flame retardancy of polyester-cotton blends, **Carbohydrate Polymers**, Vol. 88, p. 1460-1469
- [16] Shao, Z. B. et al (2014), Flame retardation of polypropylene via a novel intumescent flame retardant: ethylenediamine-modified ammonium polyphosphate, **Polymer Degradation and Stability**, Vol. 106, p. 88-96
- [17] Xiao, Y. et al (2014), Preparation of chitosan-based flame retardant synergist and its application in flame-retardant polypropylene, **Journal of Applied Polymer Science**, Vol. 131, Issue. 19
- [18] Pan, H. et al (2014), Preparation of a novel biobased flame retardant containing phosphorus and nitrogen and its performance on the flame retardancy and thermal stability of poly(vinyl alcohol), **Polymer Degradation and Stability**, Vol.106, p. 47-53
- [19] Chen, S. et al (2015), Intumescent flame-retardant and self-healing superhydrophobic coatings on cotton fabrics, **ACS Nano**, Vol. 9, No. 4, p. 4070-4076

- [20] Yang, J. C. et al (2015) Ammonium polyphosphate-based nanocoating for melamine foam towards high flame retardancy and anti-shrinkage in fire, **Polymer**, Vol. 66, p. 86-93
- [21] Pan, H. et al (2015), Formation of self-extinguishing flame retardant biobased coating on cotton fabrics via layer-by-layer assembly of chitin derivatives, **Carbohydrate Polymers**, Vol. 115, p. 516-524
- [22] Fang, F. et al (2015), Intumescent flame retardant coatings on cotton fabric of chitosan and ammonium polyphosphate via layer-by-layer assembly, **Surface & Coating Technology**, Vol. 262, p. 9-14



ภาคผนวก



ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ – นามสกุล น.ส. จิตราวรรณ ไวสาหลง
Miss Jittrawan Vaisalong
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 1440300090565
3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์
4. หน่วยงานที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ e-mail
สาขาวิชาเทคโนโลยีเคมีสิ่งทอ
คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่น
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
เลขที่ 517 ถนนนครสวรรค์ เขตดุสิต จังหวัด กรุงเทพมหานคร
โทรศัพท์ 02-6299152-7 ต่อ 3061 โทรศัพท์มือถือ 096-3707971
e-mail: jittrawan.v@rmutp.ac.th

5. ประวัติการศึกษา

ระดับปริญญา	คุณวุฒิ/สาขาวิชา	สถาบันอุดมศึกษา	ปีที่สำเร็จ
ปริญญาตรี	วท.บ. เคมี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	2552
ปริญญาโท	M.Sc. Advanced Materials	University of Bolton	2557

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

-

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ

-

7.2 การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัย

-