

บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์

2.1 ฝ้าย (Cotton)

ฝ้ายเป็นเส้นใยธรรมชาติที่ได้จากพืช สามารถเพาะปลูกได้เกือบทั่วทุกแห่งในโลกยกเว้นบางประเทศที่มีอากาศหนาว เนื่องจากฝ้ายจะไม่เจริญเติบโตในอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 21 องศาเซลเซียส [9] เส้นใยฝ้ายนั้นได้มาจากบริเวณส่วนขนที่ติดรอบเมล็ด โดยการนำเมล็ดฝ้าย (สมอฝ้าย) มาผ่านกระบวนการหีบฝ้ายเพื่อแยกเส้นใยและเมล็ดออกจากกัน จะได้ส่วนที่เป็นเส้นใยหรือเป็นขนที่มีลักษณะเป็นปุย ซึ่งจะต้องมีความยาวที่เหมาะสม จากนั้นจะนำไปอัดเป็นเบล (bale) เพื่อนำไปผ่านกระบวนการปั่นด้ายและผลิตเป็นเส้นด้ายฝ้ายต่อไป ส่วนผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการหีบฝ้าย ได้แก่ ใยสั้น (cotton lint) ซึ่งเป็นเส้นใยที่ติดกับเมล็ดหลังการหีบฝ้ายก็จะนำไปผลิตเส้นใยเรยอนและเส้นใยแอซิเตท เปลือกฝ้าย (hulls) เป็นเปลือกนอกสุดของเมล็ดฝ้ายซึ่งมีไนโตรเจนสูง นำไปหมักทำปุ๋ย และใช้เป็นอาหารสัตว์ ส่วนเมล็ดด้านใน (inner seed) มีน้ำมันเป็นส่วนประกอบใช้ทำส่วนผสมของยา อาหาร และเครื่องสำอาง [10] ด้วยความที่ฝ้ายสามารถเจริญเติบโตได้ในหลายพื้นที่ของโลก ทำให้พันธุ์ฝ้ายมีความแตกต่างกันอย่างมาก เนื่องจากสภาพภูมิอากาศ อาหารในดิน รวมทั้งศัตรูพืช โดยคุณภาพของเส้นใยฝ้ายขึ้นกับความยาว ความยาว ความละเอียดตลอดจนความแข็งแรง โดยปกติเส้นใยยาวมากยิ่งมีความละเอียดและมีความแข็งแรงสูง [9]

2.1.1 โครงสร้างทางกายภาพ

ฝ้ายเป็นเส้นใยสั้นที่มีลักษณะภายนอกหยาบและค่อนข้างแบน บางช่วงเกลียวบิดตัวในทิศทางต่างกัน ส่วนลักษณะภาคตัดขวางคล้ายเม็ดถั่วที่มีช่องตรงกลางกลวง ดังแสดงในรูปที่ 2.1

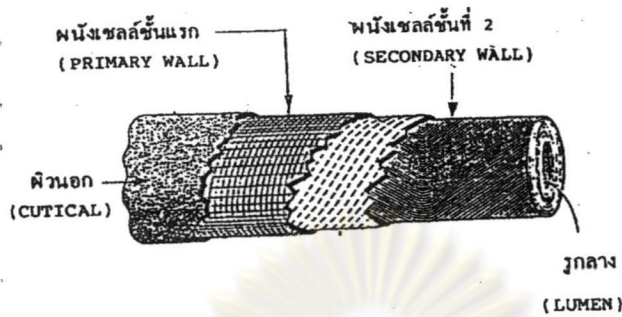


รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางกายภาพของเส้นใยฝ้ายตามภาคตัดขวางและตามความยาว
(a) ภาพวาดภาคตัดขวาง (b) ภาพวาดตามความยาว [9]

2.1.1.1 การเจริญเติบโตของเส้นใยฝ้าย

ภาคตัดขวางของฝ้ายระยะแรกมีลักษณะเป็นรูปตัวยู (U) ผนังเซลล์จะบางขณะที่ยังอ่อนอยู่ เมื่อเส้นใยมีอายุมากขึ้นผนังจะเริ่มหนาและมีลักษณะเป็นรูปถั่วมากขึ้น รุกกลางที่เป็นท่อส่งน้ำ (lumen) จะหดเล็กลง ผิวนอก (cuticle) ครอบคลุมด้วยฟิล์มไขมันเคลือบอยู่ ผนังชั้นแรก (primary wall) เป็นผนังบางที่เกิดขึ้นก่อน ท่อส่งน้ำตรงกลางใหญ่คล้ายท่อกลวง ต่อมาเมื่อฝ้ายเจริญเติบโตมากขึ้น ผนังชั้นแรกจะหนาเพิ่มขึ้นขยายจากผิวเข้าสู่ส่วนกลางเป็นชั้นๆ คล้ายวงปีในลำต้น ทำให้ท่อส่งน้ำส่วนกลางถูกเบียดเล็กลง เปลือกที่หนาที่เพิ่มขึ้นรวมเรียกว่าผนังชั้นที่สอง (secondary wall) แต่แต่ละชั้นที่เจริญเติบโตประกอบไปด้วยเส้นใยละเอียดที่เกิดจากการเรียงต่อกันของสายโซ่โมเลกุลเซลลูโลส และในบางครั้งมีทิศทางการเรียงที่สลับสวนทางกัน ทำให้เกิดเกลียวฝ้ายขึ้นตามความยาวของเส้นใย [9] ดังแสดงในรูปที่ 2.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



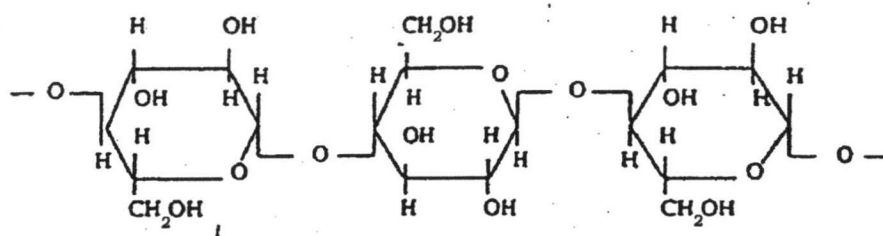
รูปที่ 2.2 การเจริญเติบโตของเส้นใยฝ้าย [9]

2.1.1.2 การบิดเป็นเกลียวของฝ้าย (convolution)

เกลียวฝ้าย หรือการบิดตัวคล้ายริบบิ้นที่เกิดขึ้น เป็นลักษณะที่แสดงถึงการเจริญเติบโตตามธรรมชาติอย่างเต็มที่ของฝ้าย เมื่อปุยฝ้ายเปิดออกเส้นใยที่แห้งตัวลง ส่งผลให้รูปร่างตรงกลางหดตัว ทำให้ผนังของเส้นใยมีการบิดเปลี่ยนทิศทาง เกิดการบิดงอ ทำให้เส้นใยฝ้ายมีความสามารถในการเกาะเกี่ยวกัน บั่นเป็นเส้นด้ายได้ง่าย และมีความสามารถในการยืดตัวสูง

2.1.2 โครงสร้างทางเคมี

ฝ้ายจัดเป็นเส้นใยประเภทเซลลูโลส ที่มีองค์ประกอบทางเคมี ประกอบด้วยธาตุหลักคือ คาร์บอน 44.4 % ไฮโดรเจน 6.2 % และออกซิเจน 49.4 % มีโครงสร้างประกอบด้วยหน่วยขั้นพื้นฐานซึ่งเรียกว่า anhydro-D-glucose ($C_6H_{10}O_5$) ต่อกันเป็นสายโซ่โมเลกุลยาว ซึ่งในแต่ละหน่วยของกลูโคสประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลทั้งหมด 3 หมู่ด้วยกัน (เป็น primary group 1 หมู่ และ secondary group 2 หมู่) เหมือนกับโครงสร้างของน้ำตาลทั่วไป แต่เนื่องจากโมเลกุลต่อกันยาวเป็นสายโซ่ทำให้ไม่ละลายน้ำ ในกรณีของฝ้ายมีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 100,000 ไปจนถึง 1-2 ล้าน น้ำหนักโมเลกุลนี้โดยทั่วไปมักคำนวณในลักษณะของค่าเฉลี่ยหน่วยย่อยที่เป็นกลูโคสแล้วคูณด้วยจำนวนหน่วยย่อยที่ซ้ำกัน ทำให้เขียนสูตรทางเคมีได้เป็น $(C_6H_{10}O_5)_n$ โดย n คือค่าระดับขั้นของการเกิดพอลิเมอร์และฝ้ายมีชื่อเรียกทางเคมีคือ poly(1,4- β -D-anhydroglucopyranose) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลเซลลูโลส [12]

ลักษณะโครงสร้างทางเคมีนี้ทำให้ฝ้ายมีความแข็งแรงสูง ส่วนโครงสร้างบริเวณบริเวณที่เป็นการต่อกันของธาตุ -C-O-C จะเป็นบริเวณที่ถูกทำลายได้ด้วยการเกิดออกซิเดชันหรือจากการถูกทำลายด้วยสภาพภูมิอากาศ ทำให้โมเลกุลขาดลงกลายเป็นส่วนเล็กๆ ล้างน้ำตาล และกลายเป็นอาหารของพืชและสัตว์ต่อไป [9]

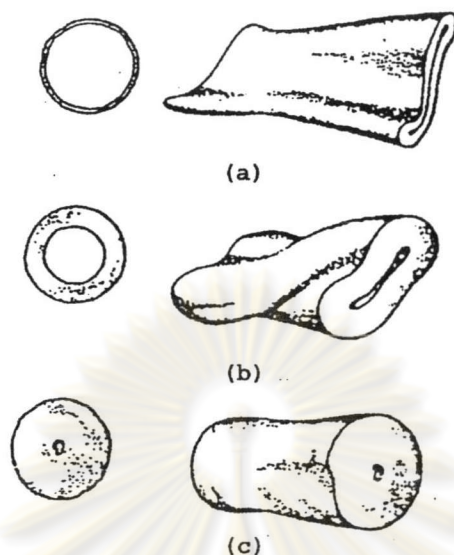
2.1.2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของเส้นใยฝ้าย [10]

- เซลลูโลส	94.0 %
- โปรตีน	1.3 %
- สารเพกติน	1.2 %
- ขี้ผึ้ง (wax)	0.6 %
- เถ้า (ash)	1.2 %

2.1.3 สมบัติทางกายภาพ

2.1.3.1 ลักษณะภายนอก ฝ้ายปกติมีสีขาวครีม บางชนิดอาจพบเป็นสีน้ำตาลหรือเทา ผิวของเส้นใยไม่เรียบและทึบแสง มีความมันน้อย

2.1.3.2 ความสมบูรณ์ของฝ้ายแบ่งเป็น 3 ระดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ความสมบูรณ์ของเส้นใยฝ้าย (a) เส้นใยไม่สมบูรณ์ (b) เส้นใยสมบูรณ์ที่เกิดเกลียวฝ้าย (c) เส้นใยแก่เกินไป [10]

- เส้นใยฝ้ายสมบูรณ์ยังไม่เต็มที่ (immature fiber) ไม่มีการบิดตัวของเซลล์แต่จะมีลักษณะเป็นแถบแบน
- เส้นใยฝ้ายเติบโตเต็มที่ (mature fiber) มีการบิดทำมุม 20-30 องศา กับแนวแกนเส้นใย
- เส้นใยฝ้ายแก่เกินไป ไม่มีการบิดตัว เส้นใยค่อนข้างกลมคล้ายฝ้ายที่ผ่านการชุบมัน แต่ไม่เงามัน

2.1.3.3 ความยาวเส้นใย เส้นใยสั้นมีความยาวต่ำกว่า 25 มิลลิเมตร เส้นใยปานกลางมีความยาว 25-28 มิลลิเมตร เส้นใยยาวมีความยาว 29-32 มิลลิเมตร เส้นใยยาวพิเศษมีความยาวสูงกว่า 32 มิลลิเมตร

2.1.3.4 ความสามารถในการยีดตัวประมาณ 3-7 %

2.1.3.5 ความสามารถในการดูดซึมน้ำความชื้นประมาณ 8.5 %

2.1.3.6 ความถ่วงจำเพาะ 1.5

2.1.3.7 ความสามารถในการคืนตัวจากแรงอัดได้น้อย เกิดการยุบได้ง่าย

2.1.3.8 ความสามารถในการทนความร้อน สามารถใช้อุณหภูมิในการรีดได้ถึง 400 องศาเซลเซียส

2.1.3.9 ความแข็งแรง เส้นใยมีความแข็งแรงปานกลาง ความทนแรงดึง ณ จุดขาดมีค่าประมาณ 3-5 กรัมต่อดีเนียร์ แต่เมื่อเปียกน้ำจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 10-20 %

2.1.4 สมบัติทางเคมี

2.1.4.1 ความทนกรด ทนต่อกรดอินทรีย์ที่ระเหยได้ง่าย เช่น กรดแอซิดิก แต่จะไม่ทนกรดอนินทรีย์ที่เข้มข้น เช่น กรดซัลฟูริก กรดไฮโดรคลอริก

2.1.4.2 มีความสามารถในการทนสารละลายอินทรีย์ จึงสามารถซักแห้งได้ และทนสารละลายต่างได้ดี แต่จะไม่ทนสารซักฟอกประเภทออกซิไดส์ที่แก่ เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรท์ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ซึ่งจะทำให้ฝ้ายเกิดปฏิกิริยาเคมีเป็นออกซีเซลลูโลส ฝ้ายจะขาดง่ายเมื่อเปียก และมีสีเหลือง

2.1.4.3 มีความสามารถในการรับสีย้อมได้หลายชนิด

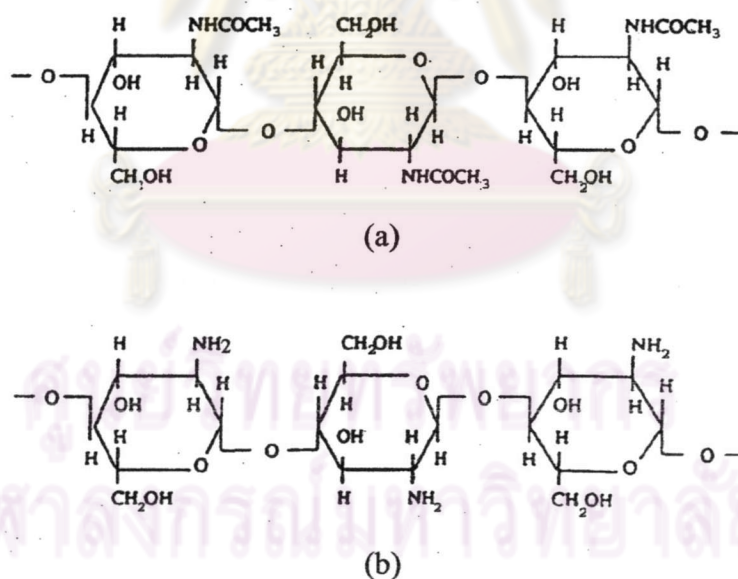
2.1.4.4 แสงแดดจะทำให้ฝ้ายมีสีเหลือง และคุณภาพเสื่อมลง

2.1.4.5 การติดไฟ จะติดไฟได้ง่ายและลุกไหม้อย่างรวดเร็ว มีกลิ่นคล้ายกระดาษไหม้ และมีเถ้าเบานุ่มละมีสีเทา

2.1.4.6 ราและแมลง เกิดราได้ง่าย เนื่องจากแบ่งที่ตกค้างจากการลงแป้ง ซึ่งแก้ไขได้โดยทำการตกแต่งสำเร็จผ้าฝ้ายภายหลัง

2.2 ไคโทซาน (Chitosan)

ไคตินและไคโทซาน จัดเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีโมเลกุลใหญ่ยาว มีสูตรโครงสร้างคล้ายเซลลูโลส แต่สูตรโครงสร้างของไคตินต่างจากเซลลูโลสที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่สองเป็นหมู่อะเซทาไมด์ (NH-CO-CH₃) แทนที่จะเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ส่วนไคโทซานเป็นอนุพันธ์ของไคติน ซึ่งไคตินมีมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส โดยจะพบในโครงสร้างเปลือกนอกของสัตว์จำพวกกุ้ง ปู และแกนหมึก ไคโทซาน คือไคตินในรูปที่มีปริมาณหมู่อะซิทิล (CO-CH₃) ต่ำ ที่เกิดจากปฏิกิริยาการกำจัดหมู่อะซิทิล (deacetylation) ของไคตินด้วยสารละลายต่างเข้มข้น [8,13] ทำให้หมู่อะเซทาไมด์ที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่สองในวงแหวนไพราโนสของไคตินถูกเปลี่ยนเป็นหมู่อะมิโน ซึ่งการดึงเอาหมู่อะซิทิลออกจากไคตินนั้น สามารถดึงออกได้เพียงบางส่วนหรือเกือบทั้งหมด ซึ่งทำให้สมบัติบางประการของไคตินเปลี่ยนแปลงไป เหนือที่เป็นที่เข้าใจในกลุ่มนักวิจัยคือในกรณีที่สายโซ่มีหน่วยของไคโทซานเกินกว่า 70-75 % ขึ้นไปเราจะเรียกสายโซ่พอลิเมอร์นี้ว่าไคโทซาน [7,8] ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของไคตินและไคโทซาน (a) โครงสร้างทางเคมีของไคติน
(b) โครงสร้างทางเคมีของไคโทซาน [12]

2.2.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไคตินและไคโทซาน [13,14]

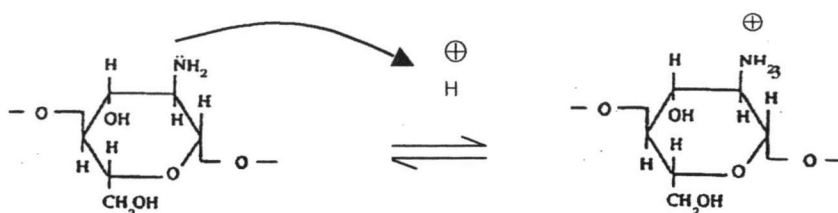
2.2.1.1 การละลาย (solubility) ไคโทซานไม่ละลายในน้ำ ต่างและตัวทำละลายอินทรีย์ (organic solvent) แต่สามารถละลายได้ในสารละลายที่เป็นกรดอินทรีย์เกือบทุกชนิดที่มี pH น้อยกว่า 6 กรดแอสติก และกรดฟอร์มิกเป็นกรดที่นิยมในการใช้ละลายไคโทซาน กรดอินทรีย์บางชนิด เช่นกรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก กรดเปอร์คลอริก และกรดฟอสฟอริก สามารถละลายไคโทซานได้เช่นกันแต่ต้องทำภายใต้การกวนที่อุณหภูมิสูงปานกลาง อย่างไรก็ตามบางครั้งอาจมีตะกอนขาวคล้ายเจลเกิดขึ้น

2.2.1.2 น้ำหนักโมเลกุล (molecular weight) ไคโทซานจะมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 100,000 – 1,200,000 ขึ้นอยู่กับขั้นตอนในการผลิต

2.2.1.3 ความหนืด (viscosity) ความหนืดของสารละลายไคโทซานขึ้นอยู่กับระดับการกำจัดหมู่อะซิทิล (degree of deacetylation) น้ำหนักโมเลกุล ความเข้มข้น ionic strength ความเป็นกรดและด่าง และอุณหภูมิ

2.2.1.4 ความสามารถในการเป็นตัวตกตะกอน (coagulating ability) ไคโทซานเป็นตัวสร้างตะกอนและตัวตกตะกอน (flocculant and coagulating agent) ที่ดี เนื่องจากการมีหมู่อะมิโนจำนวนมากที่สามารถแตกตัวเป็นประจุบวก และจับกับสารที่มีประจุลบได้

2.2.1.5 การจัดเรียงตัวของโมเลกุล เนื่องจากโครงสร้างไคโทซานประกอบด้วยหมู่เอมีนอิสระ และเป็น primary amine ที่มีคู่อิเล็กตรอนว่างอยู่ จึงทำให้ไคโทซานมีสมบัติเป็นด่างอ่อนสามารถรับโปรตอนในสารละลายกรดเกิดเป็น $-NH_3^+$ (cationic amino) ซึ่งเป็นพอลิ อิเล็กโทรไลต์ประเภทบวก (cationic polyelectrolyte) ส่งผลให้ไคโทซานเกิดการละลาย [15] ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การเกิดปฏิกิริยาในภาวะสารละลายที่เป็นกรดของไคโทซาน [15]

2.2.1.6 การเสื่อมสลาย (degradation)

2.2.1.6.1 การเสื่อมสลายโดยกรด (acid hydrolysis) ของไคโทซานเป็นแบบสุ่ม ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือโพลิโกเมอร์ขนาดต่างๆ และโมโนเมอร์ ขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ เช่นชนิดของกรด เวลา อุณหภูมิ เป็นต้น ส่วนไคตินจะสามารถต้านทานการเสื่อมสลายโดยกรดได้ดีกว่าไคโทซาน

2.2.1.6.2 การเสื่อมสลายโดยด่าง (alkaline degradation) จะเริ่มจากปลายสุดของสายโซ่โมเลกุล เรียกอีกอย่างว่า peeling reaction

2.2.1.6.3 การเสื่อมสลายโดยการสั่นเครื่องเสียง (degradation by sonication) หากทำควบคู่กับการใช้กรดจะมีผลให้ได้โพลิโกเมอร์ที่มีขนาดใกล้เคียงกว่าใช้กรดอย่างเดียว

2.2.1.6.4 การเสื่อมสลายโดยเอนไซม์ (enzymatic degradation) เอนไซม์ที่ช่วยย่อยสลายไคติน-ไคโทซาน ได้แก่ ไคทิเนส ไคโทซานเนส และไลโซไซม์

2.2.1.6.5 การเสื่อมสลายโดยความร้อน (thermal degradation) ความร้อนจากเตาอบซึ่งเป็นความร้อนแบบแห้ง (dry heat) ที่อุณหภูมิน้อยกว่าหรือเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส มีผลทำให้สายโซ่โมเลกุลมีความยืดหยุ่นมากขึ้น (Tg ลดลง) ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น ส่วนความร้อนแบบแห้งที่อุณหภูมิสูง มีผลทำให้ไคโทซานเกิดสีเหลืองจนถึงสีน้ำตาล ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและระยะเวลา ที่อุณหภูมิสูงกว่าหรือเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส ความสามารถในการละลายของไคโทซานจะลดลง ส่วนการอบผึ่งโดยใช้ไอน้ำร้อนอิ่มตัว (saturated steam) ไคโทซานจะไม่สามารถการละลายหลังจากการอบที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงและหลังการอบที่อุณหภูมิสูงกว่าหรือเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

2.2.1.7 ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยา ไคโทซานประกอบด้วย 3 หมู่ฟังก์ชันที่มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยา คือ หมู่อะมิโนที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 primary alcohol ($-CH_2OH$) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 และ secondary alcohol ($-CHOH$) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3

2.2.2 ประโยชน์ของไคทิน-ไคโทซานและแนวทางการประยุกต์ใช้ในอนาคต [7,8,15]

2.2.2.1 ทางด้านการบำบัดน้ำเสีย

- สกัดไอออนโลหะออก
- ตกตะกอนสารประเภทโปรตีน สีย้อมผ้า และกรดอะมิโน
- ใช้เป็นตัวกรองแทนกระดาษกรอง

2.2.2.2 ทางด้านการผลิตเยื่อและกระดาษ

- ปรับผิวหน้ากระดาษ
- ผลิตกระดาษอัดรูป
- ผลิตกระดาษสำเนาแบบใช้ผงคาร์บอน

2.2.2.3 ทางด้านการแพทย์และเภสัชกรรม

- ใช้รักษาเหงือกและฟัน
- ใช้ผลิตพลาสติกอิมพัลส ฟองน้ำ
- ใช้รักษาและเสริมสร้างสุขภาพของกระดูกอ่อน เช่น ใช้ทำเส้นเลือด

เทียม ใช้เป็นสารหล่อลื่นในเยื่อปาก ใช้ควบคุมคอเลสเตอรอล ช่วยให้เลือดแข็งตัวเร็วขึ้น ช่วยในการยับยั้งเนื้องอก ใช้เป็นไหมเย็บแผล ยับยั้งการเกิดคราบจุลินทรีย์ที่ฟัน ใช้เป็นหนังเทียมในการใช้รักษาผิว และแผลที่เกิดจากไฟไหม้ น้ำร้อนลวก ใช้เป็นน้ำตาเทียมหรือน้ำตาสำหรับซอฟต์แวร์คอนแทคเลนส์ ใช้ควบคุมการปลดปล่อยฤทธิ์ยา เยียวยาโรคทางกระดูก และใช้เป็นอาหารเสริม ไขมันและน้ำหนก

2.2.2.4 การผลิตเครื่องสำอาง เนื่องจากไคโทซานมีคุณสมบัติในการอุ้มน้ำ และต่อต้านจุลินทรีย์จึงใช้เป็นสารเติมแต่งให้ความชุ่มชื้น และทำให้ความหอมติดทนนาน เนื้อของเครื่องสำอางละเอียดเนียนปราศจากการแยกชั้น ดังนั้นจึงใช้เป็นสารพื้นฐานของเครื่องสำอาง

หลายประเภท เช่น แป้งแต่งหน้า น้ำหอม ผงขัดเล็บ ครีมหรือโลชั่นบำรุงผิวและกันแดด ใช้เป็นผสมในแชมพูบำรุงเส้นผม เจลล้างหน้า ยาสีฟัน เป็นต้น

2.2.2.5 ทางด้านการเกษตร

- ใช้ในการเคลือบเมล็ดพันธุ์เพื่อการเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์และกันแมลง
- ใช้ในการเคลือบใบเพื่อต้านทานต่อโรคและแมลง
- ใช้ในการควบคุมระบบการปล่อยสารเกษตร

2.2.2.6 ทางด้านอาหาร

- ใช้เป็นสารกันบูดเพราะมีประจุบวก จึงมีสามารถต้านแบคทีเรียและรา
- ใช้เป็นสารปรุงแต่งอาหารคงรูปและสี
- ใช้เป็นสารเคลือบอาหาร และผัก ผลไม้

2.2.2.7 ทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพ

- ใช้เป็นสารห่อหุ้มเอนไซม์และเซลล์ด้วยเทคนิคอิมโมบิไลเซชัน
- ใช้เป็นตัวแยกโดยวิธีโครมาโตกราฟี
- ใช้เป็นการทำชีวไฟฟ้าทางชีวภาพ เพื่อการวิเคราะห์และตรวจสอบสาร
- ใช้เป็นแผ่นเยื่อบางในการแยกโปรตีน
- ใช้ขึ้นรูปจุลินทรีย์เป็นเม็ด สำหรับกำจัดน้ำเสีย
- ใช้เป็นสารช่วยทำปฏิกิริยาการเคลือบผิวแผ่นพอลิเอสเตอร์ ด้วยโลหะ

ในการผลิตวัสดุป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

2.3 การจำแนกประเภทของการตกแต่งสำเร็จสิ่งทอ [16]

การตกแต่งสำเร็จสิ่งทอ (textile finishing) เป็นกระบวนการหนึ่งซึ่งมักกระทำเป็นขั้นตอนสุดท้ายต่อการเตรียมและการให้สีสิ่งทอ โดยมีจุดมุ่งหมายที่จะเปลี่ยนแปลงปรับปรุง หรือเพิ่มเติมสมบัติบางอย่างให้กับผลิตภัณฑ์สิ่งทอ เพื่อให้สิ่งทอมีสมบัติการใช้งานดีขึ้น หรือเป็นที่พอใจของผู้ใช้มากขึ้น ดังจะเห็นได้ว่านับตั้งแต่สมัยโบราณ มนุษย์เราก็รู้จักการลงแป้งเพื่อทำให้ผ้ามีความคงรูปดีขึ้น มีการลงความเพื่อให้ผ้าดูขาวขึ้น เป็นต้น ในปัจจุบันสังคมมีความเจริญมากขึ้น

ระดับคุณภาพที่ต้องการจากสิ่งของที่ใช้ก็สูงมากขึ้นด้วย จึงทำให้มีการพัฒนากรรมวิธีการตกแต่งสำเร็จสิ่งทอประเภทใหม่ๆเพิ่มมากขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการ การค้นพบใยสังเคราะห์ก็เป็นแรงกระตุ้นหนึ่งที่สำคัญของการพัฒนาการตกแต่งสำเร็จสิ่งทอ เนื่องจากใยสังเคราะห์มีสมบัติบางอย่างที่ดีกว่าเส้นใยที่ได้จากธรรมชาติ การเปรียบเทียบกันนี้ทำให้เกิดความพยายามที่จะหาวิธีปรับปรุงสมบัติในส่วนด้อยของเส้นใยฝ้ายให้ดีขึ้น เช่น การตกแต่งสำเร็จผ้าฝ้ายให้มีสมบัติในการทอแห้ง เนื่องจากผ้าฝ้ายสามารถลวกตีไฟได้ง่าย และเกิดการลวกลามได้อย่างรวดเร็ว และเส้นใยชนิดนี้สามารถลวกตีไฟได้ในบรรยากาศที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำกว่าปริมาณออกซิเจนที่มีในบรรยากาศปกติ การตกแต่งกันยับ การตกแต่งให้นุ่ม และการตกแต่งเพื่อลดไฟฟ้าสถิต เป็นต้น การพัฒนาด้านการตกแต่งสำเร็จสิ่งทอที่กล่าวข้างต้นนี้ ทำให้เกิดวิธีการในการตกแต่งขึ้นมากมาย ซึ่งสามารถจำแนกออกได้ตามประเภทต่างๆดังนี้

2.3.1 การจำแนกประเภทตามวิธีการตกแต่งสำเร็จ

2.3.1.1 การตกแต่งสำเร็จด้วยวิธีทางเชิงกล หมายถึง การตกแต่งสำเร็จที่อาศัยเครื่องจักรกลในการตกแต่ง เช่น การตกแต่งให้มันเงาด้วยการอัดรีด การตกแต่งกันการหดตัว การตกแต่งให้ขึ้นขน เป็นต้น

2.3.1.2 การตกแต่งสำเร็จด้วยวิธีทางเคมี หมายถึง การตกแต่งสำเร็จที่อาศัยการเติมสารเคมีที่เหมาะสมเข้าไปในเส้นใย หรือทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกับโมเลกุลของเส้นใย เช่น การตกแต่งกันยับ การตกแต่งทอแห้ง การตกแต่งให้นุ่ม การตกแต่งให้ขาว เป็นต้น ในบางครั้งเพื่อให้ได้ผลการตกแต่งสูงสุดอาจมีการใช้ทั้งวิธีทางเชิงกลและวิธีทางเคมีร่วมกัน เช่น ในการตกแต่งให้มันเงาด้วยการอัดรีดนั้นถ้ามีการเติมสารเคมีพวกซีฟี่งเข้าไปเพื่อเพิ่มเนื้อแก่ผ้าก่อนทำการอัดรีด ก็จะทำให้ผ้ามีความมันเงามากยิ่งขึ้น

2.3.2 การจำแนกประเภทตามวัตถุประสงค์ของการตกแต่งสำเร็จ

2.3.2.1 การตกแต่งสำเร็จเพื่อเปลี่ยนแปลงสัมผัส

- การตกแต่งให้นุ่ม
- การตกแต่งให้ลดน้ำหนักผ้า

2.3.2.2 การตกแต่งสำเร็จเพื่อเปลี่ยนแปลงลักษณะภายนอก

- การตกแต่งให้ขาว
- การตกแต่งให้มันเงาด้วยการขัดรีด
- การทำให้เกิดลวดลายโดยใช้สารเคมี

2.3.2.3 การตกแต่งสำเร็จเพื่อให้ง่ายต่อการดูแลรักษา

- การตกแต่งกันยับ
- การตกแต่งกันการหดตัว

2.3.2.4 การตกแต่งสำเร็จเพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการใช้

- การตกแต่งหน่วงไฟ

2.3.2.5 การตกแต่งสำเร็จเพื่อป้องกันผลกระทบจากภาวะแวดล้อมภายนอก

- การตกแต่งให้ขึ้นขน
- การตกแต่งกันน้ำ

2.3.2.6 การตกแต่งสำเร็จเพื่อให้เกิดความสบายในการสวมใส่

- การตกแต่งเพื่อลดไฟฟ้าสถิต

2.4 การตกแต่งหน่วงไฟผ้าฝ้าย

ผ้ามีสมบัติการทนไฟต่างกัน 3 ระดับ คือ ผ้าที่ทนไฟแบบกันไฟ (fire proof fabric) จะไม่ลุกไหม้และไม่เสียหาย ซึ่งได้แก่ผ้าใยหิน ผ้าที่มีสมบัติทนไฟแบบต้านไฟ (flame resistant fabric) จะสามารถทน หรือไม่เกิดการลุกไหม้เมื่อได้รับความร้อนสูงถึง 600 องศาเซลเซียส โดยจะยังคงรูปร่างอยู่ เช่น ผ้าที่ทำจากเส้นใย นอเมกซ์ และเคพลาร์ ส่วนผ้าที่มีสมบัติด้านการลุกไหม้แบบหน่วงไฟ (flame retardant fabric) จะมีการลุกติดไฟได้แต่เกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่าปกติ และเกิดในระยะสั้นๆ หรือลุกแดงโดยไม่มีเปลวไฟ เมื่อไม่มีการลุกไหม้ที่อุณหภูมิสูงก็จะไม่เกิดความร้อนที่จะทำให้เกิดการสลายตัวแล้วลุกไหม้ต่อไป ซึ่งผ้าที่มีสมบัติด้านการลุกไหม้แบบหน่วงไฟนี้ทำได้โดยการตกแต่งผ้านั้นด้วยสารเคมีชนิดต่างๆ

ผ้าฝ้ายมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ สามารถลุกติดไฟได้ง่าย และเกิดการลุกลามได้อย่างรวดเร็ว ประกอบกับเส้นใยชนิดนี้สามารถลุกติดไฟได้ในบรรยากาศที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำกว่าปริมาณออกซิเจนที่มีในบรรยากาศปกติ หรือที่เรียกว่าค่า LOI (limiting oxygen index) เพราะบรรยากาศปกติมีปริมาณออกซิเจนประมาณ 21% ดังนั้นวัสดุสิ่งทอที่มีค่า LOI ต่ำกว่า 21% จะสามารถติดไฟได้ง่าย สำหรับวัสดุสิ่งทอที่มีค่า LOI สูงกว่า 26 % แสดงถึงวัสดุสิ่งทอนั้นสามารถติดไฟได้ยาก

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบสมบัติในด้านความคงทนต่อความร้อนของเส้นใยชนิดต่างๆ [16]

ชนิดของเส้นใย	อุณหภูมิการสลายตัว T_p ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิการติดไฟ T_c ($^{\circ}\text{C}$)	LOI (%)
ฝ้าย	230	350	18.4
ไตรแอซิเตท	305	540	18.4
วิสโคสเรยอน	350	420	18.9
พอลิเอสเตอร์	447	480	21
ไนลอน 6	431	450	21.5
ไนลอน 6,6	403	530	23
ขนสัตว์	245	600	25
นอเมกซ์	410	500	28-30
เคฟลาร์	590	550	29

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าเส้นใยฝ้าย ซึ่งเป็นเส้นใยที่มีการบริโภคสูง นั้นมีอุณหภูมิการสลายตัว อุณหภูมิการติดไฟ และค่า LOI ต่ำกว่าผ้าชนิดอื่น ดังนั้นเส้นใยฝ้ายจึงเป็นเส้นใยที่นิยมนำมาตกแต่งหน่วงไฟมากที่สุดเพื่อปรับปรุงสมบัติการติดไฟและการลุกลามของเปลวไฟของผ้าฝ้ายให้ช้าลง และเพื่อให้การตกแต่งหน่วงไฟมีประสิทธิภาพควรเข้าใจพื้นฐานของการลุกติดไฟ กลไกการสลายตัวของผ้าฝ้าย และกระบวนการเผาไหม้ที่เกิดขึ้น

2.4.1 ปัจจัยที่ทำให้เกิดเพลิงไหม้โดยทั่วไปเกิดจาก 4 ปัจจัย ดังต่อไปนี้

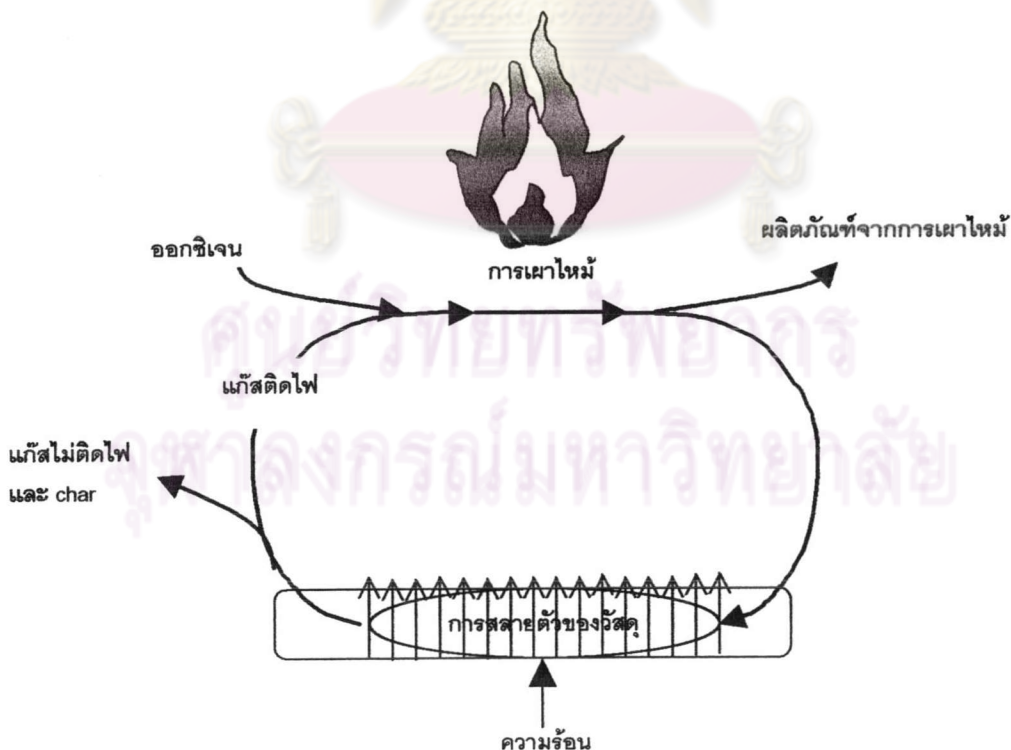
2.4.1.1 เชื้อเพลิง คือ สิ่งที่สามารถทำให้เกิดการลุกติดไฟได้ มีทั้งของแข็ง ได้แก่ เลื้อผ้า กระดาษ พลาสติก ของเหลว ได้แก่ น้ำมัน แอลกอฮอล์ และแก๊ส ได้แก่ มีเทน อะเซทิลีน

2.4.1.2 ความร้อน คือ สิ่งที่จะทำให้เชื้อเพลิงมีอุณหภูมิสูงขึ้น จนถึงจุดติดไฟ (ignition point) ซึ่งเชื้อเพลิงแต่ละชนิดก็จะมีจุดติดไฟแตกต่างกัน เช่น เชื้อเพลิงที่อยู่ในรูปแก๊สมักมีจุดติดไฟที่ต่ำกว่าเชื้อเพลิงที่อยู่ในรูปของแข็ง

2.4.1.3 ออกซิเจน เป็นแก๊สที่ช่วยทำให้การเผาไหม้เกิดงายขึ้น

2.4.1.4 ปฏิกิริยาลูกโซ่ เป็นปฏิกิริยาที่ช่วยขยายผลของการลุกไหม้ให้มีขนาดใหญ่และต่อเนื่อง

2.4.2 กระบวนการเผาไหม้ของเซลล์โลส [16,17]



รูปที่ 2.7 วงจรการเผาไหม้ของเซลล์โลส [18]

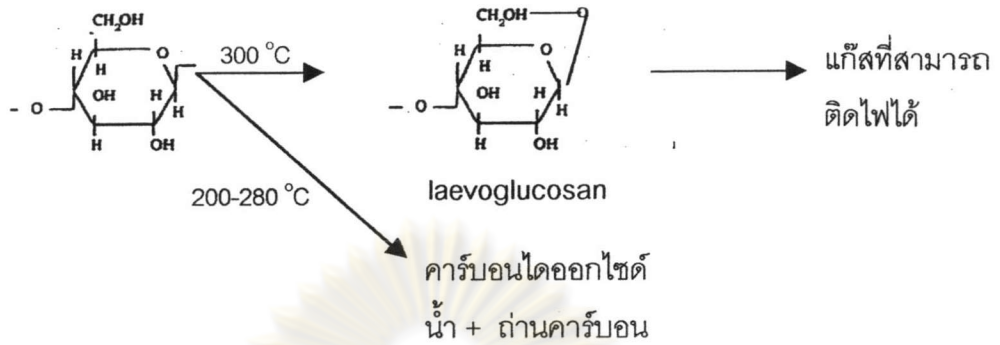
กระบวนการเผาไหม้ของเซลลูโลสแสดงดังรูปที่ 2.7 ซึ่งจะเกิดผ่าน 3 ขั้นตอนดังนี้

2.4.2.1 กลไกการสลายตัวของเซลลูโลสด้วยความร้อน (pyrolysis)

การสลายตัวของเซลลูโลสจะเกิดผ่านปฏิกิริยา 2 ประเภท ประเภทแรกคือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส หรือประมาณ 200-280 องศาเซลเซียส เมื่อเส้นใยเซลลูโลสได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิการสลายตัวประมาณ 230 องศาเซลเซียส จะเกิดการสลายตัวอย่างช้าๆ ไปสู่ผิวหน้าของฝ้าย ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (endothermic reaction) ทำให้สายโซ่โมเลกุลของเซลลูโลสบางส่วนจะเกิดการเชื่อมขวางกัน และเกิดการขจัดน้ำออกจากโมเลกุล เซลลูโลสที่ปล่อยน้ำออกจากโมเลกุลจะสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนกลายเป็นถ่านคาร์บอน (char) คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ประเภทที่สองคือ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส หรือประมาณ 280-340 องศาเซลเซียส ก็จะมีการสลายตัวอย่างรวดเร็วไปสู่ผิวหน้าของฝ้ายเป็นน้ำมันดิน (tar) ซึ่งอยู่ในรูป laevoglucosan (1,6 anhydro- β -D-glucopyranose) เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเป็นสารกึ่งของแข็งของเหลว ซึ่งการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงนี้จะให้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สชนิดต่างๆทั้งที่ติดไฟและไม่ติดไฟ เช่น เอทิลีน มีเทน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ นอกจากนี้ยังมีของเหลวที่ระเหยและติดไฟได้ง่าย เช่น แอลกอฮอล์ แอลดีไฮด์ และคีโตน เป็นต้น จากนั้นฝ้ายก็จะขจัดน้ำออกไปจนเหลือแต่ถ่านคาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และ การสลายตัวอย่างรวดเร็วไปเป็นน้ำมันดิน (tar) ซึ่งอยู่ในรูป laevoglucosan แสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 เส้นทางการสลายตัวของเซลลูโลส [19]



รูปที่ 2.9 การสลายตัวของเซลลูโลสไปเป็น laevoglucosan [20]

2.4.2.2 การลุกเป็นเปลวไฟ (flaming)

เมื่อเซลลูโลสเกิดการสลายตัวแล้ว ทำให้ได้สารที่ติดไฟได้ง่าย ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายตัวนี้จะแพร่ไปสู่ผิวหน้าของวัสดุ แล้วทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ เกิดการลุกเป็นเปลวไฟ โดยส่วนใหญ่การลุกไหม้จะเกิดจากการลุกไหม้ของแก๊สและของเหลวที่ติดไฟได้ง่าย ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการคายความร้อน (exothermic reaction) ทำให้ความร้อนบางส่วนถูกส่งกลับไปยังวัสดุ วัสดุนั้นก็จะเกิดการสลายตัวและลุกไหม้ต่อไป ทำให้การเผาไหม้ดำเนินไปเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ ดังแสดงในรูปที่ 2.7

2.4.2.3 การคุแดง (glowing)

เมื่อเปลวไฟดับ สารที่เหลือจากการลุกไหม้จากเปลวไฟจะคุแดงต่อไป โดยคาร์บอนที่อยู่ในสารที่เหลือนี้จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2



โดยปกติการเกิดปฏิกิริยาแรกจะปล่อยความร้อนออกมามากกว่าปฏิกิริยาที่สองถึง 4 เท่า ซึ่งความร้อนที่ปล่อยออกมามีมากพอที่จะทำให้การคุแดงดำเนินต่อไปจนเหลือแต่เถ้า [17,19]

2.4.3 ประเภทของสารหน่วงไฟ

สารหน่วงไฟมีมากมายหลายประเภท ซึ่งการจำแนกประเภทของสารหน่วงไฟนี้ช่วยให้เข้าใจสามารถในการทำงานของสารหน่วงไฟ ทำให้สามารถเลือกใช้สารหน่วงไฟตรงกับวัตถุประสงค์ที่ต้องการ ซึ่งสารหน่วงไฟสามารถจำแนกได้จากความคงทน วิธีการที่ใช้ร่วมกับวัสดุกลไกการหน่วงไฟ และองค์ประกอบทางเคมี ดังต่อไปนี้

2.4.3.1 สารหน่วงไฟที่จำแนกได้จากความคงทน

2.4.3.1.1 สารหน่วงไฟประเภทไม่คงทน (nondurable flame retardants) สารหน่วงไฟประเภทนี้ได้แก่ กรดอนินทรีน ซึ่งไม่คงทนต่อการซักล้าง สามารถถูกชะล้างออกไปได้ด้วยน้ำ เหนือ ตัวอย่างของกรดอนินทรีน เช่น กรดบอริก กรดฟอสฟอริก และซิงค์คลอไรด์ หรือเบส เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมคาร์บอเนต แต่เนื่องจากกรดและเบสทำให้เกิดปัญหาการกัดกร่อน ดังนั้นจึงนิยมใช้ในรูปที่เป็นเกลือมากกว่า เช่น แอมโมเนียมฟอสเฟต ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต ยูเรียฟอสเฟต และแอมโมเนียมซัลฟาเมต ซึ่งรู้จักภายใต้ชื่อทางการค้าของ Amgard CD (แอมโมเนียมฟอสเฟต และแอมโมเนียมโบรไมด์) และ Amgard TR (แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต) ซึ่งเกลือเหล่านี้เมื่อได้รับความร้อนจะสลายตัวเป็นแอมโมเนีย กรดฟอสฟอริก หรือพอลิฟอสฟอริก เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น กรดฟอสฟอริกจะขจัดน้ำออกกลายเป็นกรดเมตาไฟโรฟอสฟอริกที่มีลักษณะเป็นของเหลวหนืด ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อากาศหรือออกซิเจนสัมผัสกับเส้นใย ทำให้เส้นใยไม่เกิดการเผาไหม้ รวมทั้งยังทำหน้าที่เป็นกรดลิวอิส (Lewis acid) ที่ทำให้เส้นใยสลายตัวเกิดถ่านคาร์บอนเพิ่มขึ้น สารหน่วงไฟประเภทนี้เหมาะที่จะใช้ตกแต่งผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องผ่านการซักล้าง เช่น ผ้าประเภทใช้แล้วทิ้งเลย ฉนวน กระดาษ จอภาพยนตร์ แผ่นกันผนัง และบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น

2.4.3.1.2 สารหน่วงไฟประเภทกึ่งคงทน (semidurable flame retardants) สารหน่วงไฟประเภทนี้ได้แก่ เกลือของกรดอนินทรีนที่ไม่ละลายน้ำ เช่น เกลือฟอสเฟตหรือเกลือบอเรตของโลหะดีบุก สังกะสี อะลูมิเนียม หรือแอสแตนเนต ทั้งแอสแตน อะลูมิเนต รวมทั้งเกลือที่มีไอออนของพอลิฟอสเฟตน้ำหนักโมเลกุลสูง เมื่อทำการยึดติดสารเหล่านี้ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดการฟอสฟอริเซชันของเซลลูโลส ซึ่งในกระบวนการตกแต่งจะแช่ผ้าให้อิ่มตัวในสารละลายอย่างแรกที่เป็นเกลือของสารหน่วงไฟ และนำไปทำให้ตกตะกอนในสารละลายอย่างที่สอง สารหน่วงไฟประเภทนี้มีความคงทนต่อการซักล้าง 20 ครั้ง ดังนั้นจึงเหมาะที่จะใช้ตกแต่งผลิตภัณฑ์ที่ไม่จำเป็นต้องผ่านการซักล้างบ่อย เช่น ผลิตภัณฑ์ผ้าปูที่นอน เบาะหุ้มเฟอร์นิเจอร์ และพรม เป็นต้น

2.4.3.1.3 สารหน่วงไฟประเภทมีความคงทนสูง (durable flame retardants) สารหน่วงไฟประเภทนี้มีฟอสฟอรัส หรือฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ หรือเป็นสารประกอบประเภทออกแกโนฟอสฟอรัส (organophosphorus compounds) ซึ่งรู้จักกันดี คือ เอ็นไฮดรอกซีเมทิล(ไดเมทิลฟอสฟอโน)ไพโรพินเอไมด์ เช่น Pyrovatex CP และเททราคิส(ไฮดรอกซีเมทิล) ฟอสฟอเนียมคลอไรด์ (THPC) เช่น Proban CC สารหน่วงไฟประเภทนี้มีความคงทนต่อการซักล้าง 50 ครั้งหรือมากกว่า ดังนั้นจึงเหมาะที่จะใช้ตกแต่งผลิตภัณฑ์ที่จำเป็นต้องผ่านการซักล้างบ่อย เช่น ผลิตภัณฑ์เสื้อผ้า เป็นต้น [2,17]

2.4.3.2 สารหน่วงไฟที่จำแนกได้จากวิธีการที่ใช้ร่วมกับวัสดุ

2.4.3.2.1 สารหน่วงไฟเชิงเติม (additive flame retardants) สารหน่วงไฟชนิดนี้เป็นลักษณะของสารเติมแต่ง (additives) โดยสารหน่วงไฟจะเคลือบอยู่บนบริเวณผิวหน้าวัสดุ ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีต่อกัน ตัวอย่างเช่น เกลืออนินทรีย์ เช่น โซเดียมคลอไรด์ แคลเซียมคลอไรด์ แอนติโมนีคลอไรด์ โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ซิงค์คลอไรด์ แอมโมเนียมคลอไรด์ แอมโมเนียมคาร์บอเนต แอมโมเนียมฟอสเฟต เป็นต้น ซึ่งโดยปกติแล้วเกลืออนินทรีย์เหล่านี้ จะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำ และช่วยเพิ่มถ่านคาร์บอนจากการเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการดีไฮเดรชัน แต่สารหน่วงไฟเชิงเติมนี้มีข้อเสียคือ สามารถเกิดการระเหย หรือแยกตัวออกจากวัสดุได้ง่ายกว่า สารหน่วงไฟเชิงปฏิกิริยา เมื่อเวลาผ่านไปสมบัติการหน่วงไฟจะค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ อาจแก้ปัญหาได้โดยการใช้สารหน่วงไฟที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ขึ้น

2.4.3.2.2 สารหน่วงไฟเชิงปฏิกิริยา (reactive flame retardants) สารหน่วงไฟชนิดนี้จะทำปฏิกิริยากับวัสดุที่ต้องการตกแต่งหน่วงไฟ โดยนำสารหน่วงไฟมาทำปฏิกิริยากับเซลลูโลส เพื่อให้เซลลูโลสมีหมู่ฟังก์ชันที่ทำหน้าที่หน่วงการติดไฟบนสายโซ่โมเลกุลโดยตรง ซึ่งการทำปฏิกิริยาของเซลลูโลสกับสารเคมีชนิดต่างๆ จะทำให้ขนาดของสายโซ่โมเลกุล และหมู่ไฮดรอกซีที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ตำแหน่งที่ 3 และตำแหน่งที่ 6 ของหน่วยซ้ำของกลูโคไพราโนส เกิดการแตกของพันธะไฮโดรเจนระหว่างไฮดรอกซีเซลลูโลสออกแล้วเกิดปฏิกิริยากับอะลิฟาติกไฮดรอกซี ซึ่งทำได้โดยการเอสเทอร์ไฟต์ด้วยสารเคมีที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับเซลลูโลสได้ ซึ่งจะให้อนุพันธ์ของเซลลูโลส ตัวอย่างการเกิดเอสเทอร์ไฟเคชัน เช่น การไนเตรชัน อะซิทิลเลชัน ฟอสฟอริเลชัน และซัลเฟชัน สารหน่วงไฟเชิงปฏิกิริยานี้จะทำให้วัสดุมีสมบัติการหน่วงไฟที่คงทน เกิดการระเหย หรือแยกตัวออกจากวัสดุได้ยากแต่จะมีต้นทุนสูงในส่วนของราคาสารหน่วงไฟ และเครื่องมือเพิ่มเติมที่ต้องใช้ในกระบวนการเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาดังกล่าว

ตัวอย่างสารหน่วงไฟเชิงปฏิกิริยาประเภทมีความคงทนสูง ได้แก่ Pyrovatex , Proban (THPC และยูเรีย) เป็นต้น [17]

2.4.3.3 สารหน่วงไฟที่จำแนกจากกลไกการหน่วงไฟ

การทำงานของสารหน่วงไฟจะไปขัดขวางวงจรของการเผาไหม้ ที่แสดงในรูป 2.7 ไม่ให้ดำเนินต่อไปได้อย่างต่อเนื่อง เพื่อให้เปลวไฟลุกลามช้าลงแล้วดับในที่สุด สามารถจำแนกสารหน่วงไฟได้จากกลไกการหน่วงไฟ ดังนี้

2.4.3.3.1 การขัดขวางทางกายภาพ ประกอบไปด้วย

- การทำให้ระบบเย็นตัวลง เนื่องจากการสลายตัวของสารหน่วงไฟเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ซึ่งใช้ความร้อนบางส่วนไปทำให้เกิดการหลอม หรือระเหิด ทำให้พลังงานที่ถูกปล่อยออกมาจากปฏิกิริยาการเผาไหม้มีค่าลดลง เส้นใยได้รับความร้อนน้อยลง ระบบจึงมีพลังงานไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้แบบสายไฟได้ หรือสารหน่วงไฟสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน เกิดน้ำระเหยออกมา ทำให้พื้นผิววัสดุเย็นลง ตัวอย่างของสารหน่วงไฟในกลุ่มนี้ เช่น อะลูมินาไตรไฮเดรต แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น

- การทำให้เกิดชั้นเคลือบบนพื้นผิววัสดุ สารหน่วงไฟในกลุ่มนี้รวมถึงเกลืออนินทรีย์ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เมื่อเส้นใยได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิการเผาไหม้ จะทำให้สารหน่วงไฟเกิดการหลอมละลายมาปกคลุมบริเวณผิวหน้าของเส้นใย ซึ่งจะช่วยป้องกันไม่ให้แก๊สออกซิเจนมาสัมผัสกับเส้นใย และกักขังไอระเหยที่สามารถถูกติดไฟที่เกิดจากการสลายตัวของเส้นใยไปสู่ผิวหน้าของเส้นใย ทำให้เส้นใยไม่เกิดการเผาไหม้ นอกจากนี้ยังช่วยลดการถ่ายเทความร้อนจากจุดที่เกิดการติดไฟไปยังจุดอื่นๆ ทำให้เปลวไฟไม่เกิดการลุกลามต่อ ซึ่งการเคลือบของสารบนผิวหน้าเส้นใยนี้จะต้องเสถียรจนถึงอุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส ตัวอย่างของสารหน่วงไฟในกลุ่มนี้ เช่น บอริก-บอแรกซ์ ซิลิเกต ฟอสเฟต และพอลิฟอสเฟต

- การปลดปล่อยแก๊สที่ไม่ติดไฟ สารหน่วงไฟในกลุ่มนี้เมื่อติดไฟแล้วจะสลายตัวให้แก๊สที่ติดไฟยาก หรือไม่ติดไฟ เช่น แก๊สไนโตรเจน แก๊สแอมโมเนีย แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แก๊สไฮโดรเจนคลอไรด์ และไอน้ำ เป็นต้น จะทำให้แก๊สไฮโดรคาร์บอนที่เกิดจากการสลายตัวของเส้นใยซึ่งเป็นแก๊สที่ติดไฟได้ง่ายเจือจางลงจนมีความเข้มข้นต่ำกว่าจุดที่ติดไฟได้ และทำให้ปริมาณออกซิเจนภายในเส้นใยลดลง เส้นใยไม่สามารถเกิดการเผาไหม้ต่อไปได้ ตัวอย่างของสารหน่วงไฟในกลุ่มนี้ เช่น โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมโบคาร์บอเนต แอมโมเนียมเฮไลด์ ซิงค์คลอไรด์ แคลเซียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต อะลูมิเนียมซัลเฟต แอมโมเนียมซัลฟาเมต และฟอสเฟต เป็นต้น

2.4.3.3.2 การขัดขวางทางเคมี ประกอบไปด้วย

- วัฏภาคแก๊ส (gas phase หรือ vapor phase) สารหน่วงไฟในกลุ่มนี้เมื่อโดนความร้อนจะเกิดอนุมูลอิสระที่สามารถไปจับกับอนุมูลอิสระที่เกิดจากการเผาไหม้ของเส้นใยได้ เช่น H^\bullet , OH^\bullet กลายเป็นแก๊สซึ่งทำให้ปฏิกิริยาการขยายตัวของสายโซ่อนุมูลอิสระสิ้นสุดลง (free-radical chain propagation) การลุกไหม้ก็จะสิ้นสุดลง ตัวอย่างของสารหน่วงไฟในกลุ่มนี้ เช่น สารประกอบฮาโลเจน และการทำงานของสารหน่วงไฟที่เป็นสารประกอบฮาโลเจน และแอนติโมนีออกไซด์

- วัฏภาคของแข็ง (solid phase หรือ condensed phase) สารหน่วงไฟในกลุ่มนี้ทำหน้าที่เร่งให้เส้นใยเกิดการสลายเร็วขึ้นเป็นแก๊สที่ไม่ติดไฟหรือถ่านคาร์บอน เพื่อให้ส่วนที่มีการลุกติดไฟกับส่วนที่ยังไม่ลุกติดไฟแยกห่างออกจากกันมากขึ้น และในที่สุด ไฟก็ไม่สามารถลุกลามไปถึงส่วนนั้นได้ อีกทางหนึ่งจะก่อให้เกิดถ่านคาร์บอน โดยเร่งให้วัสดุทำปฏิกิริยากับกรดลิวอิสผ่านคาร์บอนเนียม ไอออนเกิดการดีไฮเดรชันของเส้นใยแล้วเกิดการเชื่อมโยงกันเป็นร่างแห และถ่านคาร์บอนนี้ จะช่วยในการหน่วงไฟโดยการเกิดขึ้นเป็นชั้นถ่านคาร์บอนมาเคลือบเส้นใยไว้ ผิวหน้าวัสดุจะไม่สัมผัสกับความร้อน ตัวอย่างของสารหน่วงไฟในกลุ่มนี้ เช่น สารประกอบฟอสฟอรัส และการทำงานของสารหน่วงไฟที่เป็นสารประกอบฟอสฟอรัส และไนโตรเจน [3,17,20]

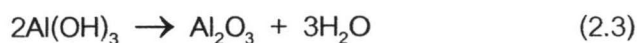
2.4.3.4 สารหน่วงไฟจำแนกจากองค์ประกอบทางเคมี

ความหลากหลายในหมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่มีอยู่ในโครงสร้างของสารหน่วงไฟชนิดต่างๆ ทำให้สารหน่วงไฟแต่ละชนิดมีสมบัติเฉพาะตัว อีกทั้งสมบัติของสารหน่วงไฟอาจเปลี่ยนไปตามชนิดของวัสดุที่นำไปผสม อย่างไรก็ตามสามารถจำแนกสารหน่วงไฟตามองค์ประกอบทางเคมีได้ดังนี้

2.4.3.4.1 สารหน่วงไฟประเภทโลหะไฮดรอกไซด์ [3,19,21]

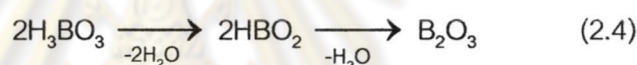
สารหน่วงไฟประเภทนี้ ที่นิยมใช้ ได้แก่ อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากหาซื้อได้ง่าย ราคาถูก และไม่เป็นพิษ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ตกแต่งหน่วงไฟในการเคลือบสิ่งทอ หรือผสมลงไปในพลาสติก เมื่อสารหน่วงไฟชนิดนี้ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 180-200 องศาเซลเซียส อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จะเกิดการแตกตัว ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะดูดความร้อนบางส่วนไปใช้ในการสลายน้ำออก เกิดเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ แสดงดังสมการที่ 2.3 ซึ่งไอน้ำที่เกิดขึ้นนี้จะไปเจือจางแก๊สที่ติดไฟได้ง่าย และยังช่วยป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าใกล้พื้นผิวของวัสดุ

ส่วนการเกิดอลูมิเนียมออกไซด์ ช่วยทำให้เกิด char ซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันความร้อนให้แก่พื้นผิวของวัสดุ และมีสมบัติในการลดควันที่เกิดจากการเผาไหม้



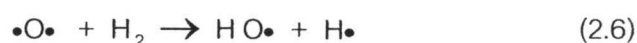
2.4.3.4.2 สารหน่วงไฟประเภทที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบ [18,21]

สารประกอบโบรอน เช่น กรดบอริกจะดูดความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 130-200 และ 260-270 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการสลายน้ำออก เกิดเป็นบอริกออกไซด์ ดังแสดงในสมการที่ 2.4 ซึ่งอยู่ในรูปของการหลอมที่อุณหภูมิประมาณ 325 องศาเซลเซียส และไหลปกคลุมทั่วพื้นผิววัสดุที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งช่วยป้องกันเปลวไฟและการสัมผัสกับออกซิเจน



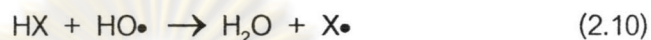
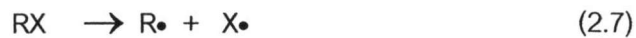
2.4.3.4.3 สารหน่วงไฟประเภทที่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ [19,21]

ฮาโลเจนนั้นประกอบด้วยธาตุ 4 ตัวด้วยกัน ได้แก่ ฟลูออรีน คลอรีน โบรมีน และไอโอดีน แต่ที่นิยมใช้เป็นสารหน่วงไฟ คือ คลอรีน และโบรมีน เนื่องจากในกรณีของฟลูออรีนนั้น พันธะที่เกิดขึ้นกับคาร์บอนนั้นแข็งแรงเกินไป จึงไม่สามารถแตกตัวแล้วทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระได้ ส่วนในกรณีของไอโอดีน พันธะที่เกิดขึ้นกับคาร์บอนนั้นอ่อนเกินไป ทำให้แตกตัวอย่างรวดเร็วด้วยพลังงานเพียงเล็กน้อย เช่นการโดนแสง และยังส่งผลให้สมบัติในการหน่วงไฟสูญเสียไป สารหน่วงไฟประเภทฮาโลเจนนี้ สามารถปลดปล่อยอนุมูลอิสระของธาตุฮาโลเจนไอออนเข้าสู่บริเวณที่เกิดการลุกไหม้ โดยบริเวณนี้จะมีอนุมูลอิสระของธาตุไฮโดรเจนและอนุมูลอิสระอื่นๆ ที่เป็นผลมาจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ ดังแสดงในสมการที่ 2.5 และ 2.6



เมื่ออนุมูลอิสระของธาตุไฮโดรเจนนี้มาพบกับอนุมูลอิสระของธาตุฮาโลเจน จะทำให้เกิดเป็นแก๊สไฮโดรเจนเฮไลด์ (HCl หรือ HBr) มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ลดลง ดังนั้นสารประกอบ

ฮาโลเจนสามารถเรียกได้ว่าเป็นตัวดักจับอนุมูลอิสระ (free radical scavengers) ทำให้สามารถลดอัตราการลุกลามของการเผาไหม้ได้ แสดงดังสมการที่ 2.7 ถึง 2.10



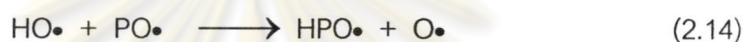
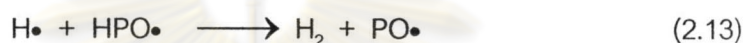
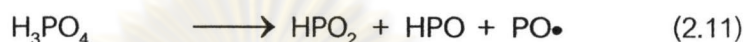
โดยที่ RX คือ สารหน่วงไฟที่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ เกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ X (คือ Cl หรือ Br) จากนั้นอนุมูลอิสระ X ทำปฏิกิริยากับสารพอลิเมอร์ RH เช่น เซลลูโลส เกิดเป็นแก๊สไฮโดรเจนเฮไลด์ (HCl หรือ HBr) ซึ่งสามารถจับกับอนุมูลอิสระ H \cdot และ HO \cdot

ถ้าเปรียบเทียบ สารหน่วงไฟที่มีโบรมีนและคลอรีนเป็นองค์ประกอบ สารหน่วงไฟที่มีโบรมีนเป็นองค์ประกอบจะมีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟสูงที่สุด รองลงมาได้แก่สารหน่วงไฟที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ เนื่องจากโบรมีนจับกับคาร์บอนด้วยพันธะที่อ่อนกว่า ทำให้เมื่อถึงอุณหภูมิที่เกิดการแตกตัว สารหน่วงไฟที่มีโบรมีนเป็นองค์ประกอบ จะสลายตัวเกิดเป็นไฮโดรเจนโบรไมด์ (HBr) ในปริมาณความเข้มข้นที่สูง สารหน่วงไฟประเภทนี้ที่นิยมใช้คือ โบรมิเนตอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (brominated aromatic hydrocarbon) ซึ่งจะมีประสิทธิภาพดีเมื่อวงแหวนอะโรมาติกถูกแทนที่ทุกตำแหน่งเช่น เดคาโบรโมไดฟีนิลออกไซด์ (decabromodiphenyloxide) แต่ในบางกรณีที่ต้องการความคงทนต่อแสง สารหน่วงไฟที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบจะให้ประสิทธิภาพมากกว่า เนื่องจากสารหน่วงไฟที่มีโบรมีนเป็นองค์ประกอบสามารถสลายตัวได้เมื่อถูกแสง สารหน่วงไฟประเภทนี้ที่นิยมใช้คือ คลอรีเนตพาราฟิน (chlorinated paraffin) ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ถูกนำมาทำปฏิกิริยากับคลอรีน เพื่อให้มีธาตุคลอรีนเป็นองค์ประกอบในโมเลกุล โดยมีส่วนประกอบของคลอรีนอยู่ประมาณ 30-70 % โดยน้ำหนัก สารหน่วงไฟชนิดนี้ยังช่วยปรับปรุงสมบัติของเรซินที่ถูกนำไปผสมให้พลาสติกแข็งมากขึ้น อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ที่ตกแต่งด้วยสารหน่วงไฟประเภทนี้เมื่อเกิดการลุกไหม้ จะให้ควันพิษที่เป็นอันตราย และเป็นสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งได้ โดยเฉพาะสารหน่วงไฟที่มีโบรมีนเป็นองค์ประกอบ จึงมีการห้ามตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารหน่วงไฟชนิดนี้

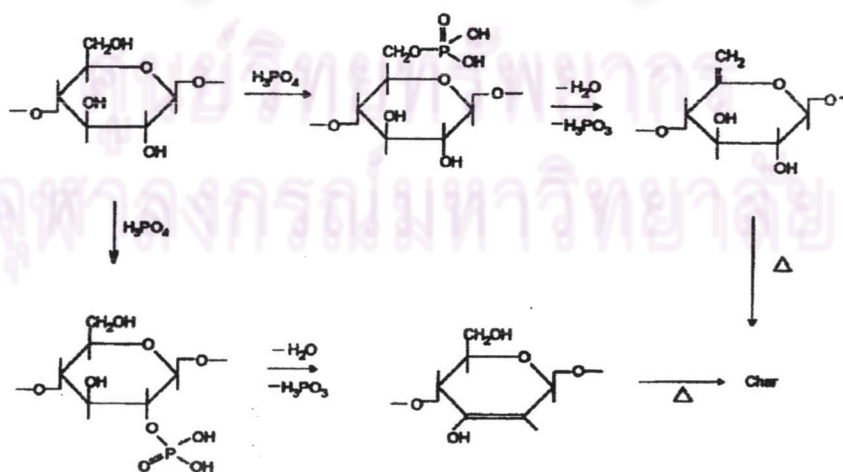
2.4.3.4.4 สารหน่วงไฟประเภทที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ

สารหน่วงไฟประเภทนี้มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟกับวัสดุที่มีปริมาณออกซิเจนสูง เช่น เซลลูโลส อนุพันธ์ของเซลลูโลส และพลาสติกที่มีองค์ประกอบของ

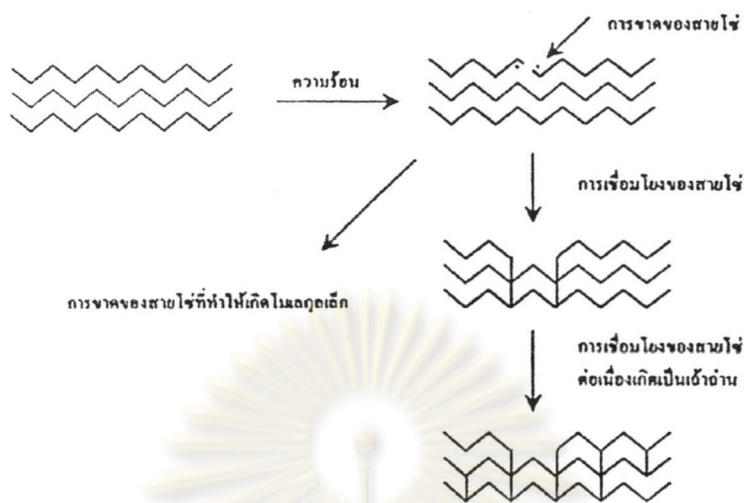
ออกซิเจน สารหน่วงไฟประเภทนี้มีทั้งในรูปสารประกอบอินทรีย์ อนินทรีย์ และธาตุ (ฟอสฟอรัสแดง) เช่น ฟอสฟีน ฟอสฟีนออกไซด์ สารประกอบฟอสฟอเนียม ฟอสฟอเนต ฟอสไฟต์ และฟอสเฟต สามารถหน่วงไฟได้ทั้ง vapor phase และ condensed phase ซึ่งสารหน่วงไฟประเภทนี้จะทำปฏิกิริยาใน vapor phase ระเหยกลายเป็นไอ เกิดในรูปอนุมูลอิสระ PO แล้วเข้าขัดขวางการลุกไหม้โดยการจับอนุมูลอิสระที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา (H• และ HO•) ดังสมการที่ 2.11 ถึง 2.14



ส่วนใน condensed phase สารหน่วงไฟประเภทนี้ได้รับความร้อนจะเกิดการสลายตัวไปเป็นกรดฟอสฟอริก หรือกรดพอลิฟอสฟอริก ซึ่งกรดที่เกิดขึ้นนี้จะไปเอสเทอร์ริฟายหมู่คาร์บอกซิลของเซลลูโลส เกิดชั้นของเหลวหนืดปกคลุมผิวของวัสดุเพื่อป้องกันไม่ให้เปลวไฟและแก๊สออกซิเจนสัมผัสกับเซลลูโลส และกรดที่เกิดขึ้นนี้ยังเป็นตัวทำให้เกิดการสลายน้ำ (dehydrating agent) โดยทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซีคาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของแอนไฮโดรกลูโคส เพื่อสร้างชั้นของ char และไอน้ำที่เกิดขึ้นจะช่วยเจือจางแก๊สที่ติดไฟได้ง่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.10 และ 2.11



รูปที่ 2.10 การฟอสฟอริเลชันของเซลลูโลส [22,23]



รูปที่ 2.11 การเชื่อมโยงของการเกิด char [24,25]

ตัวอย่างของสารประกอบของสารหน่วงไฟประเภทนี้ ได้แก่ ฟอสเฟตเอสเทอร์ซึ่งโครงสร้างของโมเลกุลประกอบด้วยฟอสเฟตเป็นหลัก แล้วเกิดพันธะกับหมู่ อัลคิล หรือเอริล สารหน่วงไฟที่มีฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบที่ใช้กันโดยทั่วไปคือ ไอโซโพรพิลไตรฟีนิลฟอสเฟต (isopropyltriphenylphosphate) อัลคิลไดเอริลฟอสเฟต (alkyldiarylphosphate) ซึ่งมีสมบัติเป็นพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) นิยมใช้ในการตกแต่งหน่วงไฟพอลิไวนิลคลอไรด์ และ กรดฟอสฟอริก แต่เนื่องจากกรดฟอสฟอริก มีการกัดกร่อนสูง จึงนิยมใช้ในรูปแบบที่เป็นเกลือ เช่น แอมโมเนียมฟอสเฟต ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต เกลือทั้งสองชนิดนี้นิยมใช้ตกแต่งหน่วงไฟในวัสดุจำพวกเซลลูโลส อย่างไรก็ตาม กรดฟอสฟอริก และสารที่เป็นเกลือสามารถละลายน้ำได้ง่าย จึงไม่คงทนต่อการใช้งานที่ต้องผ่านการซักล้าง [19,21,22]

2.4.3.4.5 สารหน่วงไฟประเภทที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ [17]

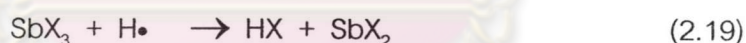
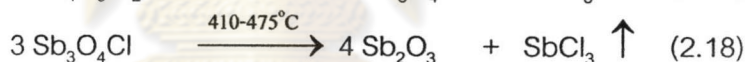
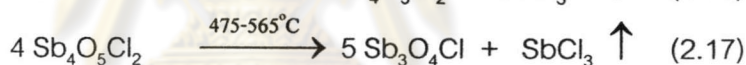
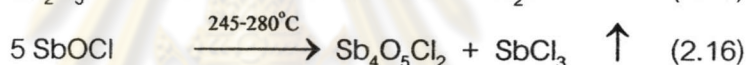
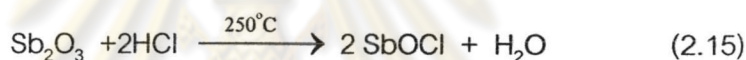
สารหน่วงไฟประเภทนี้ได้แก่ เมลามีน เมลามีนไซยานูเรต เมทิลอลเมลามีน สารประกอบกัวนิดีน ยูเรีย ไซยานาไดเอไมด์ เป็นต้น ซึ่งสารหน่วงไฟประเภทนี้ทำหน้าที่ในรูปของการเกิดอินทนูเมสเซนส์ (intumescent) เป็นลักษณะที่เกิดการพองตัวเป็นชั้นของ char ที่มีลักษณะคล้ายโฟม ทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันความร้อนและการสัมผัสกับออกซิเจนให้แก่วัสดุ

2.4.4 ระบบการหน่วงไฟที่มีการเสริมกัน (Synergisms) [18]

Synergisms เป็นระบบการหน่วงไฟที่มีการนำสารที่มีองค์ประกอบ 2 ชนิดที่แตกต่างกันมาใช้ร่วมกัน แล้วส่งผลให้มีสมบัติในการหน่วงไฟที่เสริมกัน กล่าวคือมีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟมากกว่าการใช้สารเพียงตัวเดียว โดยส่วนใหญ่สารหน่วงไฟที่นำมาใช้ร่วมกันในปัจจุบันมีดังนี้

2.4.4.1 ฮาโลเจนและแอนติโมนี [19,21]

การนำเกลือของโลหะ เช่น แอนติโมนีไตรออกไซด์ (Sb_2O_3) เป็นสารเสริมการหน่วงไฟกับสารหน่วงไฟที่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ โดยแอนติโมนีไตรออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเฮไลด์ เกิดเป็นแอนติโมนีไตรเฮไลด์ (SbX_3) และน้ำ ตัวอย่างดังสมการที่ 2.15 ถึง 2.18 ซึ่งแอนติโมนีไตรเฮไลด์ เกิดผ่านแอนติโมนีออกซีเฮไลด์ ซึ่งแอนติโมนีไตรเฮไลด์จะดักจับอนุมูลอิสระที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ เช่นเดียวกับ HCl หรือ HBr ดังสมการที่ 2.19 ถึง 2.21



2.4.4.2 ฟอสฟอรัสและฮาโลเจน [19]

การทำงานร่วมกันของสารสองชนิดนี้จะอยู่ในรูปฟอสฟอรัสเฮไลด์ และฟอสฟอรัสออกซีเฮไลด์ ซึ่งจะทำหน้าที่ดักจับอนุมูลอิสระเพื่อหยุดการขยายตัวของกระบวนการเผาไหม้ เช่น สารประกอบไวนิลโบรโมฟอสเฟต นิยมใช้ในเทอร์โมพลาสติก ถึงแม้ว่าสารสองชนิดนี้มีการทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพ แต่ก็พบปัญหาความเป็นพิษของสารประกอบฮาโลเจน เช่น ทริส-2,3-ไดโบรโมโพรพิลฟอสเฟต ทริส(ไดโคลอโรโพรพิล)ฟอสเฟต ทริส(2-ไดโคลอโรเอทิล)ฟอสเฟต

2.4.4.3 ฟอสฟอรัสและไนโตรเจน

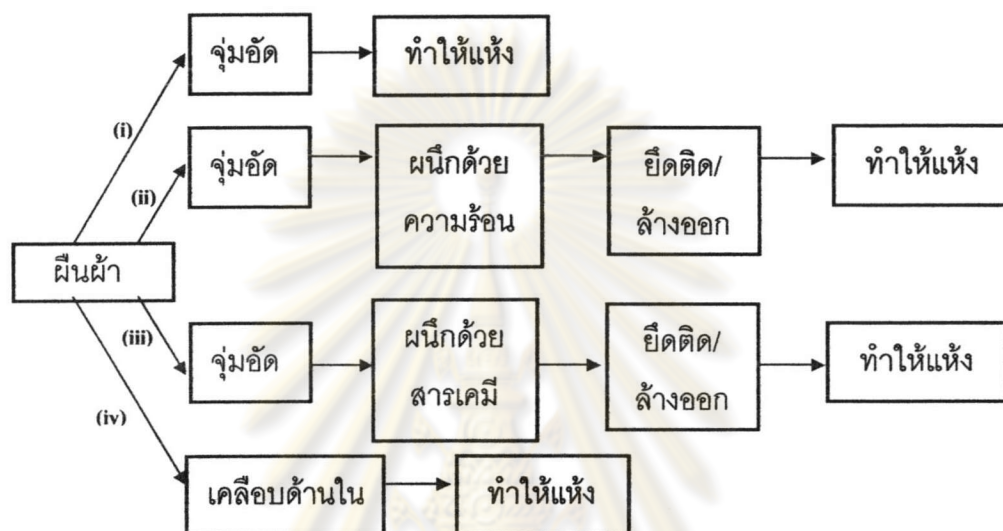
สารประกอบไนโตรเจนหากนำมาใช้เพียงชนิดเดียว จะไม่มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดี หรืออาจจะต้องใช้มากถึง 17 % จึงจะช่วยให้เซลล์โกลมีความสามารถในการหน่วงไฟได้ปานกลาง ดังนั้นจึงมีการนำสารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสและไนโตรเจนมาใช้ร่วมกัน เนื่องจากสารประกอบไนโตรเจนทำหน้าที่เป็นนิวคลีโอไฟล์ ซึ่งทำให้เกิดการสร้างพันธะของสารประกอบฟอสฟอรัสกับสารประกอบไนโตรเจน และเมื่อเกิดการสลายตัวของสารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ ไปเป็นกรดฟอสฟอริกแล้ว จะช่วยให้กรดฟอสฟอริกทำปฏิกิริยาฟอสฟอริเลชันกับเซลล์โกลได้ง่ายขึ้น เนื่องจากช่วยเพิ่มสภาพความเป็นบวก (electrophilicity) ของฟอสฟอรัส ซึ่งจะสามารถดีไฮเดรตเซลล์โกลสร้างชั้น char และสามารถปลดปล่อยแก๊สไนโตรเจนและแอมโมเนียมาเจือจางแก๊สที่ติดไฟ [17,19,20,26,27]

ในการปรับปรุงสมบัติหน่วงไฟผ้าฝ้าย โดยใช้สารประกอบฟอสฟอรัสและสารประกอบไนโตรเจนทำได้ 5 วิธี ดังนี้คือ 1. สารประกอบฟอสฟอรัสและสารประกอบไนโตรเจนถูกเติมลงไปโดยไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีกับผ้าฝ้าย 2. สารประกอบฟอสฟอรัสเกิดปฏิกิริยาฟอสฟอริเลชัน หลังจากนั้นเติมสารประกอบไนโตรเจนลงไปโดยไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีกับผ้าฝ้าย 3. สารประกอบฟอสฟอรัสถูกเติมลงไปโดยไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีกับผ้าฝ้าย ส่วนสารประกอบไนโตรเจนเกิดการกราฟท์กับสายโซ่เซลล์โกล 4. ผ้าฝ้ายเกิดการกราฟท์ด้วยสารประกอบไนโตรเจน แล้วจึงเกิดการฟอสฟอริเลชัน 5. ผ้าฝ้ายเกิดปฏิกิริยาเคมีกับทั้งสารประกอบฟอสฟอรัสและสารประกอบไนโตรเจน

ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4.5 กระบวนการตกแต่งสารหน่วงไฟ [16,18]

กระบวนการพื้นฐานสำหรับการตกแต่งหน่วงไฟสิ่งทอโดยเฉพาะผ้าทอเปิดหน้าผ้า (open-width woven fabrics) มี 4 วิธีดังแสดงในรูปที่ 2.12

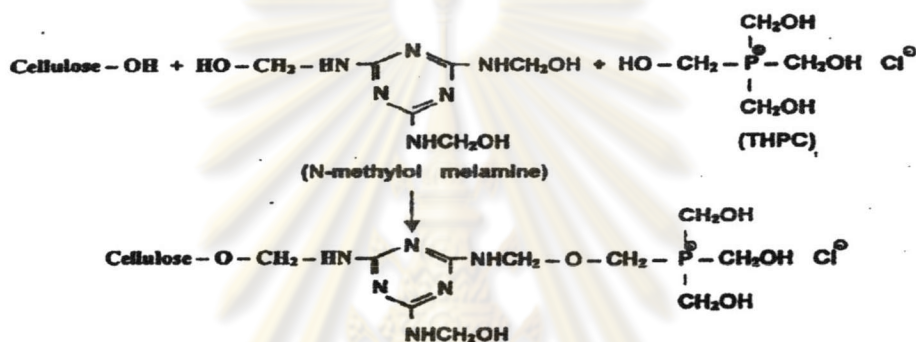


รูปที่ 2.12 กระบวนการตกแต่งหน่วงไฟผ้าทอแบบเปิดหน้าผ้า

(i) กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่นิยมใช้ตกแต่งหน่วงไฟผ้าทอด้วยสารตกแต่งหน่วงไฟประเภทที่ไม่คงทนต่อการซักล้างหรือสารตกแต่งหน่วงไฟที่ละลายน้ำได้เช่น แอมโมเนียมฟอสเฟต โดยทำการจุ่มอัดผ้าด้วย % pick up ที่เหมาะสมจากนั้นนำไปอบให้แห้ง ซึ่งสารหน่วงไฟที่ตกแต่งด้วยวิธีนี้จะเคลือบอยู่บนผิวหน้าของผืนผ้า

(ii) กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ใช้ทั่วไปในการตกแต่งกันยับ หรือตกแต่งสิ่งทอที่ต้องผ่านการอบผึ่งด้วยความร้อน (heat-cure) มักใช้ในการตกแต่งหน่วงไฟผ้าฝ้ายด้วยสารหน่วงไฟที่มีสารประกอบ phosphonamide เช่น Pyrovatex (Ciba), Antiblaze TFRI (Albright and Wilson) เนื่องจากกระบวนการนี้จำเป็นต้องใช้กรดเช่นกรดฟอสฟอริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นเมื่อทำการจุ่มอัดและอบผึ่งด้วยความร้อนแล้วมักจะนำมาทำการซักล้างในน้ำซักที่มีสารละลายต่างเพื่อทำการสะเทิน (wash-off) จากนั้นจึงไปทำให้แห้ง

สำหรับการตกแต่งห่วงไฟที่มีเพียงการจุ่มอัดและอบผนึกด้วยความร้อนเท่านั้น โดยไม่ผ่านขั้นตอนการซักล้าง (wash-off) สามารถนำมาใช้ตกแต่งห่วงไฟได้เช่นกันและทำให้ความสามารถในการห่วงไฟของสิ่งทออยู่ในระดับที่กึ่งคงทนต่อการซักล้าง โดยในขั้นตอนการอบผนึก จะทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างสารตกแต่งห่วงไฟกับเส้นใยเซลลูโลส เช่นการตกแต่งด้วยสารห่วงไฟแอมโมเนียมฟอสเฟต โดยทำการอบผนึก ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยา phosphorylation กับเส้นใยเซลลูโลส และการนำ THPC มาผนึกติดกับเส้นใยเซลลูโลส โดย N-methylol melamine เป็นตัวเชื่อมขวางเกิดเป็นสารประกอบดังรูปที่ 2.13



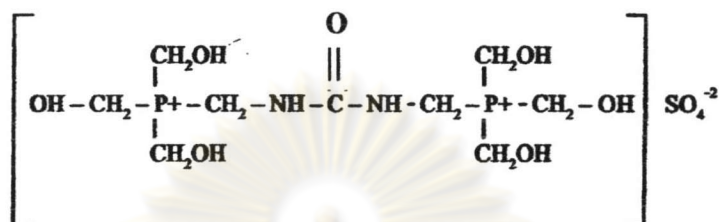
รูปที่ 2.13 การทำปฏิกิริยาของ THPC กับเส้นใยเซลลูโลสโดยมี N-methylol melamine เป็นสารเชื่อมขวาง

วิธีการตกแต่งประกอบด้วยการจุ่มอัดผ้าด้วยสารตกแต่งห่วงไฟ และสารเชื่อมขวางในอัตราส่วนที่เหมาะสม แล้วอบให้แห้ง จากนั้นผนึกด้วยความร้อนสูง แต่การตกแต่งด้วยวิธีนี้มีข้อเสียหลายประการ คือ

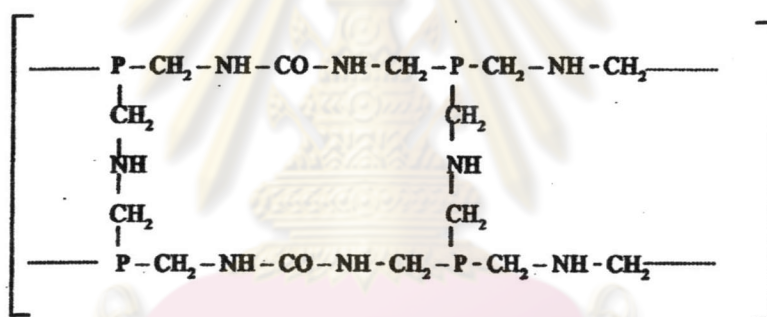
1. ทำให้สมบัติการดูดความชื้นของผ้าเสียไป เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นกับเส้นใยเซลลูโลส เป็นการทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลส
2. ทำให้ความแข็งแรงของผ้าลดลง
3. ผ้ามีสมบัติที่แข็งกระด้างขึ้น

(iii) กระบวนการนี้เป็นกระบวนการตกแต่งห่วงไฟที่ใช้สารห่วงไฟ Proban ที่มีองค์ประกอบของ THPC (THPC-based Proban process) ต้องผ่านการอบผนึก ด้วยแก๊สแอมโมเนีย เพื่อให้สารห่วงไฟเกิดการพอลิเมอไรส์อยู่ภายในช่องว่างของเส้นใย โดยมีสูตรเคมี แสดงดังรูปที่

2.14 และรูปที่ 2.15 ซึ่งการตกแต่งห่วงไฟด้วยวิธีใหม่นี้ผ้าจะไม่สูญเสียสมบัติด้านความแข็งแรง การสัมผัส และการดูดซึมความชื้น เนื่องจากการตกแต่งห่วงไฟด้วยเทคนิคใหม่นี้ ไม่มีการทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลส



รูปที่ 2.14 สูตรเคมีของ THPC ที่ผ่านการทำปฏิกิริยากับยูเรีย



รูปที่ 2.15 สูตรเคมีของสารพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่ที่เกิดจากการอบผนึกด้วยแอมโมเนียที่ความร้อนสูง

จากนั้นนำมาผ่านการผนึกแบบออกซิไดซ์ (oxidative fixing process) เพื่อเพิ่มความคงตัวและเพิ่มความคงทนต่อการซักล้างต่อสิ่งทอที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟ แล้วจึงนำไปผ่านการซักล้างและการทำให้แห้ง

(iv) กระบวนการนี้จะมีส่วนประกอบของเรซินที่ทำหน้าที่เป็นสารยึดติดกับสารห่วงไฟ จากนั้นใช้ยางพาดเคลือบส่วนผสมดังกล่าวที่ด้านในของผืนผ้าโดยจึงเรียกว่า back-coat การตกแต่งห่วงไฟด้วยวิธีนี้จะทำให้ผิวด้านนอกยังคงมีความสวยงาม มีสัมผัสที่ดีในขณะที่ผิวด้านใน

ของผ้าจะมีสมบัติห่วงไฟ กระบวนการนี้มักจะใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการให้มีความสวยงามของผิวหน้าเป็นสำคัญ เช่นผ้าที่ใช้บุเฟอร์นิเจอร์ และ ผ้ามาน เป็นต้น

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 สารห่วงไฟประเภทฟอสฟอรัส

K. Katsuura และ N. Inagaki [28] ทำการศึกษาการสลายตัวด้วยความร้อนของสารห่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ พบว่าในระหว่างการสลายตัวด้วยความร้อน ฟอสฟอรัสสามารถเอสเตอร์ฟายด์เซลลูโลส เกิดพันธะเอสเทอร์กับสายโซ่เซลลูโลส หมู่เอสเทอร์จะทำให้สายโซ่เซลลูโลสสิ้นสุดลงเกิดเป็นพันธะคู่สลับเดี่ยว จึงมีอิเล็กตรอนหนาแน่นในหมู่ฟอสฟอรัสส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการห่วงไฟเพิ่มขึ้น และเปลวไฟสามารถดับไฟได้ด้วยตัวเอง ซึ่งสารที่ใช้ในการตกแต่งห่วงไฟคือ THPC, Ammonium dihydrogen phosphate, Sodium dihydrogen phosphate, Triphenylphosphate, Triphenylphosphonate, Triphenylphosphine, Tris (2,4-dichlorophenylphosphate)

R. Aenishanslin และคณะ [29] ศึกษาผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วยสารเคมีที่มีความทนทานต่อการซักล้างชนิดต่างๆ คือ สารประกอบ Tris(aziridinyl)phosphine oxide (APO) และ Tetrakis(hydroxymethyl)-phosphonium chloride (THPC) มีความคงทนต่อการซักล้างและการซักแห้ง เนื่องจากไม่มีความว่องไวต่อน้ำยาซักแห้ง ส่วนสมบัติความทนแรงดึง การทนต่อแรงฉีกขาด และการทนต่อการขีดถู พบว่ามีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และไม่ทำลายผิวสัมผัสของผืนผ้า

Ebdon และคณะ [19] ได้นำกรดฟอสฟอริกมาตกแต่งห่วงไฟทั้งด้านพลาสติก กระดาษ และสิ่งทอ โดยทำการศึกษาความสามารถในการห่วงไฟของพลาสติก โดยการฟอสฟอริเลชันของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และพอลิ(เอทิลีน-โค-ไวนิลแอลกอฮอล์) ด้วย H_3PO_3 และ H_3PO_4 พบว่าความสามารถในการติดไฟลดลง เนื่องจากมีค่า LOI เพิ่มขึ้น และยังคงมีปริมาณของฟอสฟอรัส 50 % ในการเกิด char โดยทำให้เกิดการขจัดน้ำออก เกิดการเชื่อมขวางขึ้น ซึ่งเกี่ยวข้องกับกลไกแบบ condensed phase และ vapor phase

Y.C. Su, I.C. Wang และ H.T. Chen [30] ศึกษาความสามารถในการหน่วงไฟของกระดาษโดยใช้ H_3PO_4 พบว่ากระดาษที่มีปริมาณของกรดฟอสฟอริกสูงจะสามารถหน่วงไฟได้ดี แต่ในขณะเดียวกันจะทำให้ความแข็งแรงของกระดาษลดลง

ศานติ กุลสิริสวัสดิ์ และ เสริมรัฐ เหล่าธรรมทัศน์ [31] ศึกษาพฤติกรรมการหน่วงไฟของผ้าฝ้าย โดยทำการตกแต่งหน่วงไฟผ้าฝ้ายด้วย H_3PO_4 พบว่าการใช้ H_3PO_4 ตั้งแต่ 3-20 % ขึ้นไป ทำให้ผ้าฝ้ายมีความสามารถในการหน่วงไฟที่ดี โดยมีค่า LOI สูงขึ้นตั้งแต่ 24-47 % ไม่เกิดการลุกลามของเปลวไฟ ปริมาณของ H_3PO_4 20 % ทำให้ความทนต่อแรงดึงลดต่ำลงมาก แต่ถ้าใช้ในปริมาณ 3 % จะทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงลดลงไปครึ่งหนึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ อีกทั้งเมื่อผ่านการซักล้าง จะทำให้ความสามารถในการหน่วงไฟหมดไป

2.5.2 สารหน่วงไฟที่มีการเสริมกันประเภทฟอสฟอรัสและไนโตรเจน

G.C. Tesoro, S.B. Sello และ J.J. Willard [32] ศึกษากระบวนการเสริมกันของไนโตรเจน และฟอสฟอรัสที่ใช้เป็นสารหน่วงไฟของเซลลูโลส โดยนำผ้าฝ้ายและผ้าเรยอนมาตกแต่งหน่วงไฟด้วย N-hydroxymethyl-3-(dialkylphosphono)propionamide (NMPA) และ tris(hydroxymethyl)melamine (TMM) พบว่าระบบดังกล่าวสามารถหน่วงไฟได้ดีเมื่อปริมาณการใช้ฟอสฟอรัสต่ำประมาณ 0.8 % และ 1 % ในกรณีของผ้าฝ้ายและผ้าเรยอนตามลำดับ สามารถปรับปรุงความยาว char ให้มีความยาว char น้อยกว่า 5 นิ้ว ส่วนในการทดสอบการลุกลามของเปลวไฟในแนวตั้งพบว่าไม่เกิดการลุกลามของเปลวไฟ และเมื่อมีการใช้สารในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความแข็งแรงของผืนผ้าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ในงานวิจัยยังศึกษากระบวนการใช้ N-hydroxymethyl-3-[bis(2- chloroethyl)phosphono]propionamide (NMCPA) และ N-hydroxymethyl-3-[bis(2- bromoethyl) phosphono]propionamide (NMBPA) ใช้ร่วมกับ tris(hydroxymethyl)melamine (TMM) อีกด้วย ซึ่งให้ผลในการหน่วงไฟเช่นเดียวกัน

J.J. Willard และ R.E. Wondra [33] ใช้เทคนิค LOI วัดความสามารถในการลุกติดไฟของผ้าฝ้ายเชิงปริมาณในการศึกษาผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วย Pyrovatex/TMM, Tetrakis(hydroxymethyl)-phosphoniumchloride (THPC)/TMM/Urea, trakis(hydroxymethyl)-phosphonium hydroxide (THPOH) /TMM/Urea, Tris(aziridiny)phosphine oxide (APO), Pyroset CP, Pyroset DO พบว่าค่า LOI เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรง เมื่อเพิ่มปริมาณของสาร

ประกอบฟอสฟอรัส โดยให้อัตราส่วนฟอสฟอรัสต่อไนโตรเจนคงที่ ยกเว้นในกรณีของ APO ส่วนในกรณีของ Pyrovatex/TMM และ Pyroset CP ค่า LOI เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรง เมื่อเพิ่มปริมาณของสารประกอบไนโตรเจน โดยที่ให้ปริมาณสารประกอบฟอสฟอรัสคงที่

H.B. Pandya และ M.M. Bhangwat [34] ศึกษากลไกหน่วงไฟของผ้าฝ้ายโดยใช้สาร N,N'N''-Triethyl phosphotriamide และ ethyl,N,N' diethyl phosphorodiamidate พบว่าที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส สารประกอบดังกล่าวไม่สามารถเกิดฟอสฟอริเลชันกับเซลลูโลสได้ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากกว่า 200 องศาเซลเซียส จะพบว่าสารประกอบนี้มีความสามารถในการหน่วงไฟ โดยขั้นตอนแรกจะเกิดสารมัธยันตร์ (intermediate) ที่มีหมู่ $-P=N$ ซึ่งเกิดจากการสูญเสียโมเลกุลของเอมีนออกจากสารประกอบดังกล่าวที่อุณหภูมิมากกว่า 200 องศาเซลเซียส และในขั้นตอนที่สอง เซลลูโลสจะเกิดการเชื่อมกับพันธะ $P=N$ ของสารมัธยันตร์แล้วเกิดเป็นฟอสฟอริลเซลลูโลส ซึ่งฟอสฟอริลเซลลูโลส สามารถเกิดการสลายน้ำเพื่อสร้างชั้น char

D. Price, A.R. Horrocks และ M. Akalin [35] ใช้เทคนิค DTA และ EGA เพื่อศึกษาผลของสารหน่วงไฟที่มีการปล่อยแก๊สจากการสลายตัวด้วยความร้อนของเซลลูโลส พบว่าระบบที่มีสารหน่วงไฟที่ใช้ทางการค้า ได้แก่ Proban 210, Amgard TR (ammonium polyphosphate), Amgard CD (ammonium bromide) ซึ่งมีฟอสฟอรัสและไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ จะทำให้ผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟเกิดการสลายตัวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่ำลงประมาณ 188-200 องศาเซลเซียส จากการทดสอบพบว่าจะมีน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น แต่ไม่พบแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

C.F. Cullis, M.M. Hirschler และ R.G. Madden [36] ศึกษาผลของฟอสฟอรัสที่มีต่อการเผาไหม้เซลลูโลส ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วยฟอสฟอรัส ได้แก่ Triolyl phosphate, Diethyl methyl phosphonate, Triphenyl phosphite, Triphenyl phosphine, Triphenyl phosphine oxide และ Red phosphorus ซึ่งใช้และไม่ใช้ร่วมกับ Melamine โดยการฟอสฟอริเลชันโดยตรง และการเติมสารประกอบฟอสฟอรัสลงไปในปริมาณที่ต่างกันจนถึง 98.6 % โดยศึกษาการสลายตัวด้วยความร้อน และความสามารถในการติดไฟของผ้า พบว่าการฟอสฟอริเลชันทำให้การหน่วงไฟมีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้สารเติมลงไป ได้ค่า LOI 31.8 % และเมื่อใช้ร่วมกับระบบของเมลามีนจะทำให้ค่า LOI เพิ่มขึ้นเป็น 35 %

R.K. Basak และคณะ [37] ศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของผ้าปอกระเจาที่มีการตกแต่งห่วงไฟด้วย Diammonium hydrogen phosphate (DAP) และ urea ในอัตราส่วน 1:2 โดยใช้การวิเคราะห์ DSC และ TGA ในบรรยากาศไนโตรเจน และอากาศ พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวด้วยความร้อนของผืนผ้าที่ตกแต่งด้วยสารห่วงไฟ จะค่อยๆลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณสารห่วงไฟ ส่วนการสูญเสียน้ำหนักจะลดลงภายหลังการสลายตัวด้วยความร้อน และมีปริมาณสิ่งที่เหลืออยู่ (residues) ค่อนข้างมากหลังจากการเผาไหม้เรียบร้อยแล้วที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบว่าค่า LOI เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารห่วงไฟ ความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารห่วงไฟในระบบนี้ คือ 30 %

S. Nakanishi, J. Morikawa และ T. Hashimoto [38] ศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวด้วยความร้อนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารห่วงไฟที่มีสารประกอบที่มีธาตุต่างกัน ได้แก่ NH_2CONH_2 , Na_2HPO_4 , $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, $\text{NH}_4\text{OH}/\text{H}_3\text{PO}_4$, $\text{NH}_4\text{OH}/\text{HCl}$ หรือ HBr , Na_2SO_4 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, CaCl_2 , NH_4Cl และ NH_4Br ค่า Ea หาได้จากกระบวนการการสลายตัวด้วยความร้อน ณ อุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้น อุณหภูมิที่มีการสลายตัวมากที่สุด อุณหภูมิการวaporize ซึ่งค่า Ea ของตัวอย่างที่มีสารห่วงไฟจะมีค่าต่ำ ส่วนตัวอย่างที่ไม่มีการตกแต่งห่วงไฟจะมีค่า Ea สูงในทุกๆขั้นของการสลายตัว จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างที่มีสารห่วงไฟจะเกิดการสลายตัวได้ง่ายกว่า คือเกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งผลดังกล่าวสนับสนุนงานวิจัยต่างๆที่ผ่านมา

S. Nakanishi, F. Masuko และ T. Hashimoto [39] ศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวด้วยความร้อนของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟด้วยสารห่วงไฟที่คงทนต่อการซักล้าง ได้แก่ N-methylol dialkyl phosphonopropionamide (Pyrovatex CP) และอบผนึกด้วยความร้อน โดยใช้ร่วมกับ Hexamethylol melamine orthophosphoric acid urea และ ammonium chloride และ Tetrakis(hydroxymethyl)-phosphonium sulfate (THPS) ฟรีคอนเดนเซตโดยใช้แอมโมเนียเป็นสารบ่มซึ่งเป็นวิธีการตกแต่งสำเร็จแบบ Proban โดยนำมาใช้ร่วมกับ Trimethylol melamine โดยมี aminoethyl propanol เป็นสารเร่ง และใช้ Triethanolamine เป็นสารควบคุม pH ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้เทคนิค TGA เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวด้วยความร้อน และเพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น (Ea) ที่เกิดขึ้น พบว่ากราฟ TGA ของชิ้นตัวอย่างที่ตกแต่งสำเร็จแบบ Proban จะมีอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้นลดลงมาก ทำให้กราฟมีความชัน ส่วนชิ้นตัวอย่างที่เป็น THPS กราฟจะมีอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้นต่ำลงเล็กน้อย และกราฟมีความชันคล้ายกับชิ้นตัวอย่างที่ตกแต่งสำเร็จแบบ Proban ในขณะที่ Pyrovatex CP พบว่ากราฟจะมีการเลื่อนลง

คล้ายกันแต่มีลักษณะค่อยๆขึ้น จากค่า E_a และอัตราส่วนที่เหลือที่สังเกตจากกราฟของตัวอย่างที่ตกแต่งสำเร็จแบบ Proban มีพันธะ C-N ในปริมาณมาก มีค่า E_a สูงที่สุด และเกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ Pyrovatex CP มีพันธะเอทิลีนในปริมาณมาก มีค่า E_a ต่ำที่สุด และค่อยๆเกิดการสลายตัวของเมลามีนที่เกิดการเชื่อมขวาง และเมื่อให้ความร้อนจนถึงจุดวาบไฟ และ 600 องศาเซลเซียส พบว่าเปลวไฟสามารถดับได้เอง (self extinguishability) หลังจากการนำแหล่งต้นไฟออก

A. Hebeish, A. Waly และ A.M. Abou-Okeil [40] ศึกษาสารหน่วงไฟที่ใช้กับผ้าฝ้าย โดยทำการสังเคราะห์ Hexahydroxymethylamido Cyclotriphosphatriazatriene (HHMAPT) ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบที่สามารถละลายน้ำได้ โดยทำปฏิกิริยากับฟอรัมาลดีไฮด์ ซึ่ง HHMAPT มีฟอสฟอรัสและไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบในปริมาณมาก เนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันหลายหมู่ทำให้สามารถทำปฏิกิริยากับตัวมันเองเกิดเป็นพอลิเมอร์ได้ และสารประกอบนี้จะทำปฏิกิริยากับเซลลูโลส คล้ายกับ N-methylol HHMAPT สามารถเป็นสารหน่วงไฟได้ทั้งภาวะที่มีและไม่มี methyloled melamine (EMM) และได้มีการศึกษาถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อปฏิกิริยาเหล่านี้ และผลต่อสมบัติต่างๆของผืนผ้า ซึ่งพบว่า 1) % P และ N และความทนทานต่อการยับเพิ่มขึ้น (crease recovery) เมื่อเวลาและอุณหภูมิในการอบผืนสูงขึ้น 2) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดคือ NH_4Cl ซึ่ง % P และ N เพิ่มขึ้น เมื่อใช้ NH_4Cl ในช่วง 5-12.5 กรัมต่อลิตร 3) ความเข้มข้นของ HHMAPT และ EMM ที่สูงขึ้นจะส่งผลต่อ % P และ N และความทนทานต่อการยับ 4) ผืนผ้าที่ตกแต่งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ที่ไม่มี EMM จะทำให้สารหน่วงไฟมีความคงทนต่อการซักล้าง แต่ถ้าในการตกแต่งที่มี EMM จะไม่ต้องคำนึงถึงอุณหภูมิในการอบผืน โดยสารหน่วงไฟจะมีความคงทนต่อการซักล้าง เมื่อตกแต่งด้วย HHMAPT สูงกว่า 60 กรัมต่อลิตร และใช้ NH_4Cl สูงกว่า 7.5 กรัมต่อลิตร ซึ่งตัวอย่างจะสูญเสียความทนแรงดึงไปประมาณ 20 % ซึ่งเป็นที่ยอมรับได้ อย่างไรก็ตามสามารถปรับปรุงความทนทานต่อการยับ

A.R. Horrocks และคณะ [41] ศึกษาประสิทธิภาพของสารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ โดยทำการตกแต่งเคลือบผิวด้านในด้านเดียว (back-coating) โดยนำเรซินที่มีฟอสฟอรัสมาทำการตกแต่งผ้าฝ้าย และผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ (35:65) โดยทุกสูตรสามารถเพิ่มค่า LOI ให้สูงขึ้น แต่จะมีเพียงระบบที่มี ammonium polyphosphate และ cyclic

phosphate สามารถผ่านการทดสอบการเผาไหม้ด้วยแก๊สชีวเทนจากท่อแก๊สได้ มีปริมาณ char มากขึ้น จากการทดสอบ TGA พบว่าขึ้นตัวอย่างเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า 250 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเกิดพอลิฟอสฟอริก ซึ่งทำให้เซลล์ลูโลสเกิดการสลายน้ำเพื่อสร้างชั้น char แสดงให้เห็นว่ามีความสามารถในการหน่วงไฟ

B.K. Kandola และ A.R. Horrocks [23] ศึกษาการทำงานของ ammonium polyphosphate (APP) พบว่าซึ่งสามารถเกิด char ได้ทั้งทางกายภาพ และทางเคมี จากการวิเคราะห์ DSC และ TGA พบว่าในการสลายตัวของ APP จะเกิดการหด ซึ่งส่งผลให้มีปริมาณ char เพิ่มขึ้น และ char ที่เกิดจากเซลล์ลูโลสประกอบด้วยการจัดเรียงของสายโซ่ที่ถูกคาร์บอนไนซ์ ซึ่งจะเกิดพันธะคู่สลับเดี่ยว และเกิดพันธะ P-O และ พันธะ C-O-P ซึ่งโครงสร้างของ char นี้ช่วยเพิ่มความต้านทานความร้อน

S. Nakanishi และ F. Masuko [42] ทำการวิเคราะห์แก๊สที่เกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิต่างกัน เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมในการเกิดแก๊สในกระบวนการการสลายตัวด้วยความร้อนของผ้าฝ้าย โดยทำการตกแต่งผ้าฝ้ายด้วยสารประกอบที่มีฟอสฟอรัส และ/หรือ ไนโตรเจน และฮาโลเจน ในภาวะที่มีและไม่มีไนโตรเจน จะทำการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วย TGA และแก๊สที่สลายตัวในช่วงอุณหภูมิต่างกันบนกราฟ TGA จะถูกวิเคราะห์ด้วย GC และ MS ซึ่งพบว่าตัวอย่างที่มีสารหน่วงไฟจะมีจำนวน และปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ และจำนวนแก๊สของตัวอย่างที่มีสารหน่วงไฟจะลดลงที่อุณหภูมิสูงขึ้น และไม่พบแก๊สใดเลยที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และตัวอย่างตกแต่งด้วย $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, CaCl_2 , NH_4Cl และ NH_4Br 20 % จะมีค่า LOI สูงกว่า 28 % เกิดจำนวน และปริมาณแก๊สต่ำ ซึ่งตัวอย่างที่ใช้ระบบฟอสฟอรัส และ ไนโตรเจนร่วมกัน จะทำให้มีค่า LOI สูงที่สุด และเกิดจำนวน และปริมาณแก๊สต่ำที่สุด และยังพบว่าการทำงานร่วมกันของฟอสฟอรัส และ ไนโตรเจน ให้ผลดีกว่าฮาโลเจนและไนโตรเจน

J.Z. Xu และคณะ [43] ศึกษาการสลายตัวด้วยความร้อนในอากาศของผ้าป่านที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัส ไนโตรเจน เป็นองค์ประกอบ ได้แก่ Na_3PO_4 / Na_2CO_3 , $(\text{NH}_2)_2(\text{CN})_2/(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, $\text{NH}_2\text{CONH}_2/\text{Na}_2\text{HPO}_4$ โดยใช้เทคนิค DTA และ TGA ในช่วงอุณหภูมิห้องจนถึง 600 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่า LOI และปริมาณ char สูง แสดงถึงความสามารถในการหน่วงไฟเพิ่มขึ้น โดยฟอสฟอรัสมีผลต่อการเกิดสารประกอบของ char โดย

การสลายตัวขั้นที่สองจะมีอุณหภูมิต่ำลง และไนโตรเจนจะช่วยให้เกิดการดีฟอสฟอริเลชัน และเป็นตัวเร่งกรดให้เกิดการสลายน้ำเพื่อสร้าง char ให้มากขึ้น ดังนั้นผ้าที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ

- 1) เกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำลง
- 2) อุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวมากที่สุดต่ำลง
- 3) เกิด char มากขึ้น
- 4) ลดความสามารถในการเผาไหม้โดยมีค่า E_a ลดลง

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น แสดงให้เห็นว่าฟอสฟอรัสและไนโตรเจนมีการเสริมกัน (synergism) ในการหน่วงไฟของผ้าฝ้าย อย่างไรก็ตามพบว่ามีรายงานการวิจัยบางฉบับที่แสดงให้เห็นว่าฟอสฟอรัสและไนโตรเจนมีการต้านกัน (antagonisms) ในการหน่วงไฟของผ้าฝ้าย ดังเช่นงานวิจัยของ D. Davies และ A.R. Horrocks [44] ทำการตกแต่งหน่วงไฟผ้าฝ้ายด้วย Sodium dihydrogen phosphate ที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ และ urea-formaldehyde condensated ซึ่งมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ พบว่าค่า LOI จะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตรงเมื่อใช้ปริมาณฟอสฟอรัสต่ำสุด 2% แต่เมื่อใช้ปริมาณฟอสฟอรัสสูงขึ้นมากกว่า 6% และมีการใช้ไนโตรเจนร่วมในการตกแต่งจะทำให้ค่า LOI ลดลง ประสิทธิภาพในการหน่วงไฟลดลง

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย