

บทที่ 2

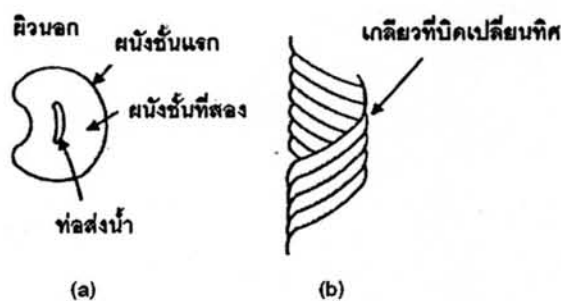
วารสารปริทรรศน์

2.1 ฝ้าย (Cotton)

ฝ้ายเป็นเส้นใยธรรมชาติที่ได้จากพืช สามารถเพาะปลูกได้เกือบทั่วทุกแห่งในโลกยกเว้นบางประเทศที่มีอากาศหนาว เนื่องจากฝ้ายจะไม่เจริญเติบโตในอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 21 องศาเซลเซียส [6] เส้นใยฝ้ายนั้นได้มาจากบริเวณส่วนขนที่ติดรอบเมล็ด โดยการนำเมล็ดฝ้าย (สมอฝ้าย) มาผ่านกระบวนการทึบฝ้ายเพื่อแยกเส้นใยและเมล็ดออกจากกัน จะได้ส่วนที่เป็นเส้นใยหรือขนที่มีลักษณะเป็นปุย ซึ่งจะต้องมีความยาวที่เหมาะสม จากนั้นจะนำไปอัดเป็นเบล (bale) เพื่อนำไปผ่านกระบวนการปั่นด้ายและผลิตเป็นเส้นด้ายฝ้ายต่อไป ส่วนผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการทึบฝ้าย ได้แก่ ใยสั้น (cotton lint) ซึ่งเป็นเส้นใยที่ติดกับเมล็ดหลังการทึบฝ้ายก็จะนำไปผลิตเส้นใยเรยอนและเส้นใยอะซิเตต เปลือกฝ้าย (hulls) เป็นเปลือกนอกสุดของเมล็ดฝ้ายซึ่งมีไนโตรเจนสูง นำไปหมักทำปุ๋ยและใช้เป็นอาหารสัตว์ ส่วนเมล็ดด้านใน (inner seed) มีน้ำมันเป็นส่วนประกอบใช้ทำส่วนผสมของยา อาหาร และเครื่องสำอาง [7] ด้วยความที่ฝ้ายสามารถเจริญเติบโตได้ในหลายพื้นที่ของโลก ทำให้พันธุ์ฝ้ายมีความแตกต่างกันอย่างมาก เนื่องจากสภาพภูมิอากาศ อาหารในดิน รวมทั้งศัตรูพืช โดยคุณภาพของเส้นใยฝ้ายขึ้นกับความยาว ความยาว ความละเอียดตลอดจนความแข็งแรง โดยปกติเส้นใยยิ่งยาวมากยิ่งมีความละเอียดและมีความแข็งแรงสูง [6]

2.1.1 โครงสร้างทางกายภาพ

ฝ้ายเป็นเส้นใยสั้นที่มีลักษณะภายนอกหยาบและค่อนข้างแบน บางช่วงเกลียวบิดตัวในทิศทางต่างกัน ส่วนลักษณะภาคตัดขวางคล้ายเมล็ดถั่วที่มีช่องตรงกลางกลวง ดังแสดงในรูปที่ 2.1



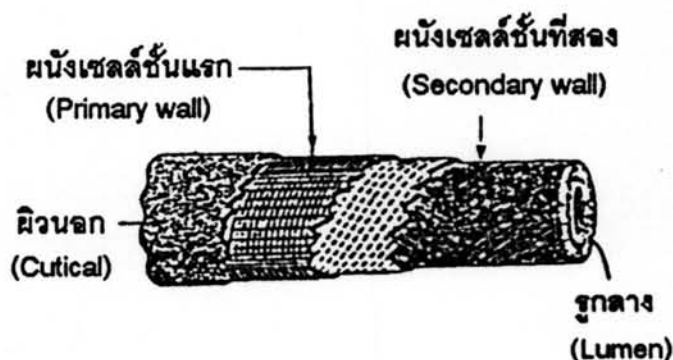
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางกายภาพของเส้นใยฝ้ายตามภาคตัดขวางและตามความยาว

(a) ภาพวาดภาคตัดขวาง

(b) ภาพวาดตามความยาว [6]

2.1.1.1 การเจริญเติบโตของเส้นใยฝ้าย

ภาคตัดขวางของฝ้ายระยะแรกมีลักษณะเป็นรูปตัวยู (U) ผนังเซลล์จะบางขณะที่ยังอ่อนอยู่ เมื่อเส้นใยมีอายุมากขึ้นผนังจะเริ่มหนาและมีลักษณะเป็นรูปถั่วมากขึ้น รุกกลางที่เป็นท่อส่งน้ำ (lumen) จะหดเล็กลง ผิววนอก (cuticle) ครอบคลุมมีฟิล์มมันเคลือบอยู่ ผนังชั้นแรก (primary wall) เป็นผนังบางที่เกิดขึ้นก่อน ท่อส่งน้ำตรงกลางใหญ่คล้ายท่อกลวง ต่อมาเมื่อฝ้ายเจริญเติบโตมากขึ้น ผนังชั้นแรกจะหนาเพิ่มขึ้นขยายจากผิวเข้าสู่ส่วนกลางเป็นชั้นๆ คล้ายวงปีในลำต้น ทำให้ท่อส่งน้ำส่วนกลางถูกบีบดเล็กลง เปลือกที่หนาเพิ่มขึ้นรวมเรียกเป็นผนังชั้นที่สอง (secondary wall) แต่ละชั้นที่เจริญเติบโตประกอบไปด้วยเส้นใยละเอียดที่เกิดจากการเรียงต่อกันของสายโซ่โมเลกุลเซลลูโลส และในบางครั้งมีทิศทางที่สลับสวนทางกัน ทำให้เกิดเกลียวฝ้ายขึ้นตามความยาวของเส้นใย [6] ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การเจริญเติบโตของเส้นใยฝ้าย [6]

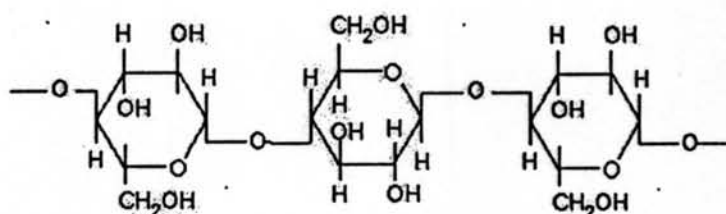
2.1.1.2 การบิดเป็นเกลียวของฝ้าย (Convolution)

เกลียวฝ้ายหรือการบิดตัวคล้ายริบบิ้นที่เกิดขึ้น เป็นลักษณะที่แสดงถึงการเจริญเติบโตตามธรรมชาติอย่างเต็มที่ของฝ้าย เมื่อปุยฝ้ายเปิดออกเส้นใยที่แห้งตัวลง ส่งผลให้ รุกส่งน้ำตรงกลางหดตัว ทำให้ผนังของเส้นใยมีการบิดเปลี่ยนทิศทาง เกิดการบิดงอ ทำให้เส้นใย ฝ้ายมีความสามารถในการเกาะเกี่ยวกัน เป็นเป็นเส้นด้ายได้ง่าย และมีความสามารถในการยืดตัว สูง

2.1.2 โครงสร้างทางเคมี

ฝ้ายจัดเป็นเส้นใยประเภทเซลลูโลสที่มีองค์ประกอบทางเคมี ประกอบด้วยธาตุหลัก คือ คาร์บอน 44.4% ไฮโดรเจน 6.2% และออกซิเจน 49.4% มีโครงสร้างประกอบด้วยหน่วย ชั้นพื้นฐานซึ่งเรียกว่า anhydro-D-glucose ($C_6H_{10}O_5$) ต่อกันเป็นสายโซ่โมเลกุลยาว ซึ่งในแต่ละ หน่วยของกลูโคสประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลทั้งหมด 3 หมู่ด้วยกัน (เป็น primary group 1 หมู่ และ secondary group 2 หมู่) เหมือนกับโครงสร้างของน้ำตาลทั่วไป แต่เนื่องจากโมเลกุลต่อกัน

ยาวเป็นสายโซ่ทำให้ไม่ละลายน้ำ ในกรณีของฝ้ายมีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 100,000 ไปจนถึง 1-2 ล้าน น้ำหนักโมเลกุลนี้โดยทั่วไปมักคำนวณในลักษณะของค่าเฉลี่ยหน่วยย่อยที่เป็นกลูโคสแล้วคูณด้วยจำนวนหน่วยที่ซ้ำกัน ทำให้เขียนสูตรทางเคมีได้เป็น $(C_6H_{10}O_5)_n$ โดย n คือ ค่าระดับชั้นของการเกิดพอลิเมอร์และฝ้ายมีชื่อเรียกทางเคมีคือ poly(1,4-β-D-anhydroglucopyranose) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลเซลลูโลส

ลักษณะโครงสร้างทางเคมีนั้นทำให้ฝ้ายมีความแข็งแรงสูง ส่วนโครงสร้างบริเวณที่เป็นการต่อกันของธาตุ -C-O-C- จะเป็นบริเวณที่ถูกทำลายได้ด้วยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือจากการถูกทำลายด้วยสภาพภูมิอากาศ ทำให้โมเลกุลขาดลงกลายเป็นส่วนเล็กๆ คล้ายน้ำตาลและกลายเป็นอาหารของพืชและสัตว์ต่อไป [6]

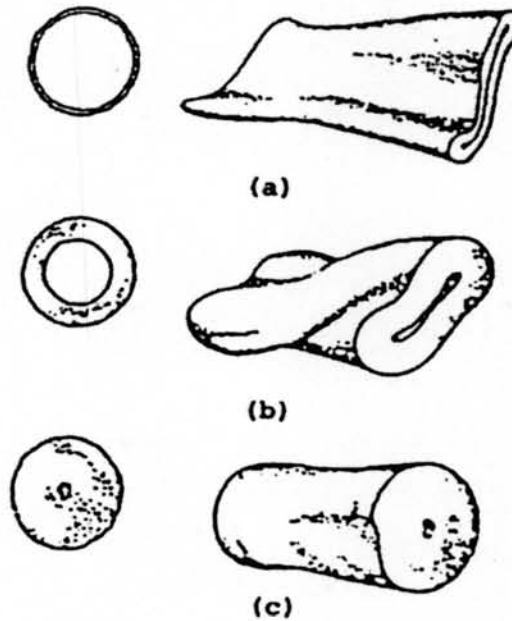
2.1.2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของเส้นใยฝ้าย [7]

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

2.1.3 สมบัติทางกายภาพ

(1) ลักษณะภายนอก ฝ้ายปกติมีสีขาวครีม บางชนิดอาจพบเป็นสีน้ำตาลหรือเทา ผิวของเส้นใยไม่เรียบและทึบแสง มีความมันน้อย

(2) ความสมบูรณ์ของฝ้ายแบ่งเป็น 3 ระดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ความสมบูรณ์ของเส้นใยฝ้าย (a) เส้นใยไม่สมบูรณ์ (b) เส้นใยสมบูรณ์ที่เกิดเกลียวฝ้าย (c) เส้นใยแก่เกินไป [7]

- เส้นใยฝ้ายสมบูรณ์ยังไม่เต็มที่ (immature fiber) ไม่มีการบิดตัวของเซลล์ แต่จะมีลักษณะเป็นแถบแบน
- เส้นใยฝ้ายเติบโตเต็มที่ (mature fiber) มีการบิดทำมุม 20-30 องศากับแนวแกนเส้นใย
- เส้นใยฝ้ายแก่เกินไป ไม่มีการบิดตัว เส้นใยค่อนข้างกลมคล้ายฝ้ายที่ผ่านการชุบมัน แต่ไม่เงามัน

(3) ความยาวเส้นใย เส้นใยสั้นมีความยาวต่ำกว่า 25 มิลลิเมตร เส้นใยปานกลางมีความยาว 25-28 มิลลิเมตร เส้นใยยาวมีความยาว 29-32 มิลลิเมตร เส้นใยยาวพิเศษมีความยาวสูงกว่า 32 มิลลิเมตร

- (4) ความสามารถในการยืดตัวประมาณ 3-7%
- (5) ความสามารถในการดูดซึมความชื้นประมาณ 8.5%
- (6) ความตึงจำเพาะ 1.5
- (7) ความสามารถในการคืนตัวจากแรงอัดได้น้อย เกิดการยับได้ง่าย
- (8) ความสามารถในการทนความร้อน สามารถใช้อุณหภูมิในการรีดได้ถึง 400

องศาเซลเซียส

- (9) ความแข็งแรง เส้นใยมีความแข็งแรงปานกลาง ความทนแรงดึง ณ จุดขาด มีค่าประมาณ 3-5 กรัมต่อดีเนียร์ แต่เมื่อเปียกน้ำจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 10-20%

2.1.4 สมบัติทางเคมี

- (1) ความทนกรด ทนต่อกรดอินทรีย์ที่ระเหยได้ง่าย เช่น กรดแอซิดิก แต่จะไม่ทนกรดอนินทรีย์ที่เข้มข้นเช่น กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก

- (2) มีความสามารถในการทนสารละลายอินทรีย์ จึงสามารถซักแห้งได้ และทนสารละลายต่างได้ดี แต่จะไม่ทนสารซักฟอกประเภทออกซิไดส์ที่แก่ เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรท์ โฟแทลเจียสเปอร์แมงกานีส ซึ่งจะทำให้ฝ้ายเกิดปฏิกิริยาเคมีเป็นออกซีเซลลูโลส ฝ้ายจะขาดง่าย เมื่อเปียก และมีสีเหลือง

- (3) มีความสามารถในการรับสีย้อมได้หลายชนิด
- (4) แสงแดดจะทำให้ฝ้ายมีสีเหลือง และคุณภาพเสื่อมลง
- (5) การติดไฟ จะติดไฟได้ง่ายและลุกไหม้อย่างรวดเร็ว มีกลิ่นคล้ายกระดาษไหม้ และมีเถ้าเบาฟูมสีเทา
- (6) เกิดราได้ง่าย เนื่องจากแป้งที่ตกค้างจากการลงแป้ง ซึ่งแก้ไขได้โดยทำการตกแต่งสำเร็จผ้าฝ้ายภายหลัง

2.2 การจำแนกประเภทของการตกแต่งสำเร็จสิ่งทอ [8]

การตกแต่งสำเร็จสิ่งทอ (textile finishing) เป็นกระบวนการหนึ่งซึ่งมักกระทำเป็นขั้นตอนสุดท้ายต่อจากการเตรียมและการให้สีสิ่งทอ โดยมีจุดมุ่งหมายที่จะเปลี่ยนแปลงปรับปรุงหรือเพิ่มเติมสมบัติบางอย่างให้กับผลิตภัณฑ์สิ่งทอ เพื่อให้สิ่งทอมีสมบัติการใช้งานดีขึ้นหรือเป็นที่พอใจของผู้ใช้มากขึ้น ดังจะเห็นได้ว่านับตั้งแต่สมัยโบราณ มนุษย์เราก็รู้จักการลงแป้งเพื่อทำให้ผ้ามีความคงรูปดีขึ้น มีการลงครามเพื่อให้ผ้าดูขาวขึ้นเป็นต้น ในปัจจุบันสังคมมีความเจริญมากขึ้น ระดับคุณภาพที่ต้องการจากสิ่งของที่ใช้ก็สูงมากขึ้นด้วย จึงทำให้มีการพัฒนากรรมวิธีการตกแต่งสำเร็จสิ่งทอประเภทใหม่ๆ เพิ่มมากขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการ การค้นพบใยสังเคราะห์ก็เป็นแรงกระตุ้นที่สำคัญของการพัฒนาการตกแต่งสำเร็จสิ่งทอ เนื่องจากเส้นใยสังเคราะห์มีสมบัติบางอย่างที่ดีกว่าเส้นใยที่ได้จากธรรมชาติ การเปรียบเทียบกันนี้ทำให้เกิดความพยายามที่จะหาวิธีปรับปรุงสมบัติในส่วนด้อยของเส้นใยฝ้ายให้ดีขึ้น เช่น การตกแต่งสำเร็จผ้าฝ้ายให้มีสมบัติหนองไฟ เนื่องจากผ้าฝ้ายสามารถลุกติดไฟได้ง่ายและเกิดการลุกลามได้อย่างรวดเร็ว และเส้นใยชนิดนี้สามารถลุกติดไฟได้ในบรรยากาศที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำกว่าปริมาณออกซิเจนที่มีในบรรยากาศปกติ การตกแต่งกันยับ การตกแต่งให้นุ่ม และการตกแต่งเพื่อลดไฟฟ้าสถิต เป็นต้น การพัฒนาด้านการตกแต่งสำเร็จสิ่งทอที่กล่าวข้างต้นนี้ ทำให้เกิดวิธีการในการตกแต่งขึ้นมากมาย ซึ่งสามารถจำแนกออกได้ตามประเภทต่างๆ ดังนี้

2.2.1 การจำแนกประเภทตามวิธีการตกแต่งสำเร็จ

2.2.1.1 การตกแต่งสำเร็จด้วยวิธีทางเชิงกล หมายถึงการตกแต่งสำเร็จที่อาศัยเครื่องจักรกลในการตกแต่ง เช่น การตกแต่งให้มันเงาด้วยการอัดรีด การตกแต่งกันการหดตัว การตกแต่งให้ขึ้นขน เป็นต้น

2.2.1.2 การตกแต่งสำเร็จด้วยวิธีทางเคมี หมายถึงการตกแต่งสำเร็จที่อาศัยการเติมสารเคมีที่เหมาะสมเข้าไปในเส้นใย หรือทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกับโมเลกุลของเส้นใย เช่น การตกแต่งกันยับ การตกแต่งหนองไฟ การตกแต่งให้นุ่ม การตกแต่งให้ขาว เป็นต้น ในบางครั้งเพื่อให้ได้ผลการตกแต่งสูงสุดอาจมีการใช้ทั้งวิธีทางเชิงกลและวิธีทางเคมีร่วมกัน เช่น ในการตกแต่งให้มันเงาด้วยการอัดรีดนั้นถ้ามีการเติมสารเคมีพวกซีผึ้งเข้าไปเพื่อเพิ่มเนื้อแก่ผ้าก่อนทำการอัดรีด ก็จะทำให้ผ้ามีความมันเงามากยิ่งขึ้น

2.2.2 การจำแนกประเภทตามวัตถุประสงค์ของการตกแต่งสำเร็จ

- (1) การตกแต่งสำเร็จเพื่อเปลี่ยนแปลงสัมผัส
 - การตกแต่งให้นุ่ม
 - การตกแต่งให้ลดน้ำหนักผ้า
- (2) การตกแต่งสำเร็จเพื่อเปลี่ยนแปลงลักษณะภายนอก
 - การตกแต่งให้ขาว
 - การตกแต่งให้มันเงาด้วยการอัดรีด
 - การทำให้เกิดลวดลายโดยใช้สารเคมี
- (3) การตกแต่งสำเร็จเพื่อให้ง่ายต่อการดูแลรักษา
 - การตกแต่งกันยับ
 - การตกแต่งกันการหดตัว
- (4) การตกแต่งสำเร็จเพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการใช้
 - การตกแต่งหน่วงไฟ
- (5) การตกแต่งสำเร็จเพื่อป้องกันผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมภายนอก
 - การตกแต่งให้ขึ้นขน
 - การตกแต่งกันน้ำ
- (6) การตกแต่งสำเร็จเพื่อให้เกิดความสบายในการสวมใส่
 - การตกแต่งเพื่อลดไฟฟ้าสถิต

2.3 การตกแต่งหน่วงไฟผ้าฝ้าย

ผ้ามีสมบัติการทนไฟต่างกัน 3 ระดับคือ ผ้าที่ทนไฟแบบกันไฟ (fire proof fabric) จะไม่ลุกไหม้และไม่เสียหาย ซึ่งได้แก่ ผ้าใยหิน ผ้าที่มีสมบัติทนไฟแบบต้านไฟ (flame resistant fabric) จะสามารถทนหรือไม่เกิดการลุกไหม้เมื่อได้รับความร้อนสูงถึง 600 องศาเซลเซียส โดยจะยังคงรูปร่างอยู่ เช่น ผ้าที่ทำจากเส้นใยนอเมกซ์ และเส้นใยเคฟลาร์ ส่วนผ้าที่มีสมบัติด้านการลุกไหม้แบบหน่วงไฟ (flame retardant fabric) จะมีการลุกติดไฟได้แต่เกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่าปกติ และเกิดในระยะสั้นๆ หรือลุกแดงโดยไม่มีเปลวไฟ เมื่อไม่มีการลุกไหม้ที่อุณหภูมิสูงก็ จะไม่เกิดความร้อนที่จะทำให้เกิดการสลายตัวแล้วลุกไหม้ต่อไป ซึ่งผ้าที่มีสมบัติด้านการลุกไหม้แบบหน่วงไฟนี้ทำได้โดยการตกแต่งผ้าด้วยสารเคมีชนิดต่างๆ

ผ้าฝ้ายมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบสามารถลุกติดไฟได้ง่าย และเกิดการลุกลามได้อย่างรวดเร็ว ประกอบกับเส้นใยชนิดนี้สามารถลุกติดไฟได้ในบรรยากาศที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำกว่าปริมาณออกซิเจนที่มีในบรรยากาศปกติ หรือที่เรียกว่าค่า LOI (limiting oxygen index) เพราะบรรยากาศปกติมีปริมาณออกซิเจนประมาณ 21% ดังนั้นวัสดุสิ่งทอที่มีค่า LOI ต่ำกว่า 21% จะติดไฟได้ง่าย สำหรับวัสดุสิ่งทอที่มีค่า LOI สูงกว่า 26% แสดงถึงวัสดุสิ่งทอนั้นติดไฟได้ยาก

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าเส้นใยฝ้าย ซึ่งเป็นเส้นใยที่มีการบริโภคสูงนั้นมีอุณหภูมิการสลายตัว อุณหภูมิการติดไฟ และค่า LOI ต่ำกว่าผ้าชนิดอื่น ดังนั้นเส้นใยฝ้ายจึงเป็นเส้นใยที่นิยมนำมาตกแต่งห่วงโซ่ไฟมากที่สุดเพื่อปรับปรุงสมบัติการติดไฟและการลุกลามของเปลวไฟของผ้าฝ้ายให้ช้าลง และเพื่อให้การตกแต่งห่วงโซ่ไฟมีประสิทธิภาพ ควรเข้าใจพื้นฐานของการลุกติดไฟ กลไกการสลายตัวของผ้าฝ้าย และกระบวนการเผาไหม้ที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบสมบัติในด้านความคงทนต่อความร้อนของเส้นใยชนิดต่างๆ [8]

ชนิดของเส้นใย	อุณหภูมิการสลายตัว (T_p , °C)	อุณหภูมิการติดไฟ (T_c , °C)	LOI (%)
ฝ้าย	230	350	18.4
ไตรอะซิเตต	305	540	18.4
วิสโคสเรยอน	350	420	18.9
พอลิเอสเทอร์	447	480	21.0
ไนลอน 6	431	450	21.5
ไนลอน 6,6	403	530	23.0
ขนสัตว์	245	600	25.0
นอเมกซ์	410	500	28.0-30.0
เคพลาร์	590	550	29.0

2.3.1 ปัจจัยที่ทำให้เกิดอัคคีภัย

โดยทั่วไปอัคคีภัยเกิดขึ้นมาจาก 4 ปัจจัย ดังต่อไปนี้

(1) เชื้อเพลิง คือ สิ่งที่สามารถทำให้เกิดการลุกติดไฟได้ มีทั้งของแข็ง ได้แก่ เสื้อผ้า กระดาษ พลาสติก ของเหลว ได้แก่ น้ำมัน แอลกอฮอล์ และแก๊ส ได้แก่ มีเทน อะเซทิลีน

(2) ความร้อน คือ สิ่งที่จะทำให้เชื้อเพลิงมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงจุดติดไฟ (ignition point) ซึ่งเชื้อเพลิงแต่ละชนิดก็จะมีจุดติดไฟแตกต่างกัน เช่น เชื้อเพลิงที่อยู่ในรูปแก๊ส มักมีจุดติดไฟที่ต่ำกว่าเชื้อเพลิงที่อยู่ในรูปของแข็ง

(3) ออกซิเจน เป็นแก๊สที่ช่วยทำให้การเผาไหม้เกิดง่ายขึ้น

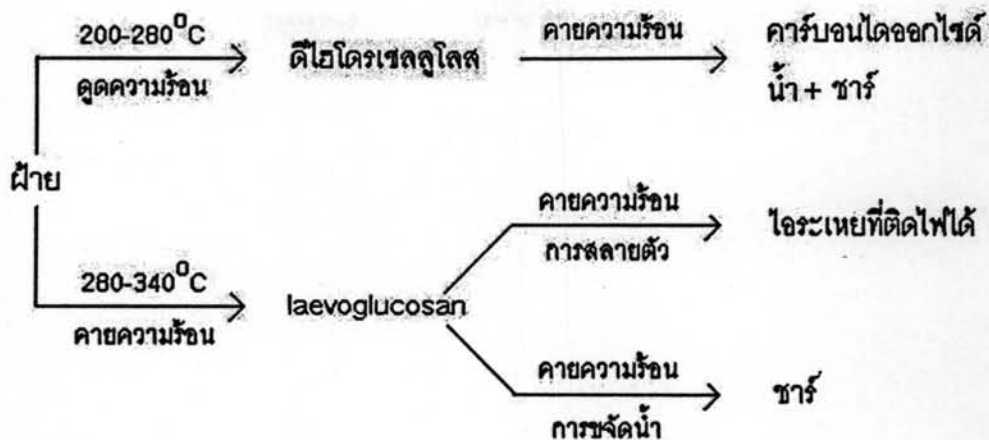
(4) ปฏิกิริยาลูกโซ่ เป็นปฏิกิริยาที่ช่วยขยายผลของการลุกไหม้ให้มีขนาดใหญ่ และต่อเนื่อง

2.3.2 กระบวนการเผาไหม้ของฝ้าย [8,9]

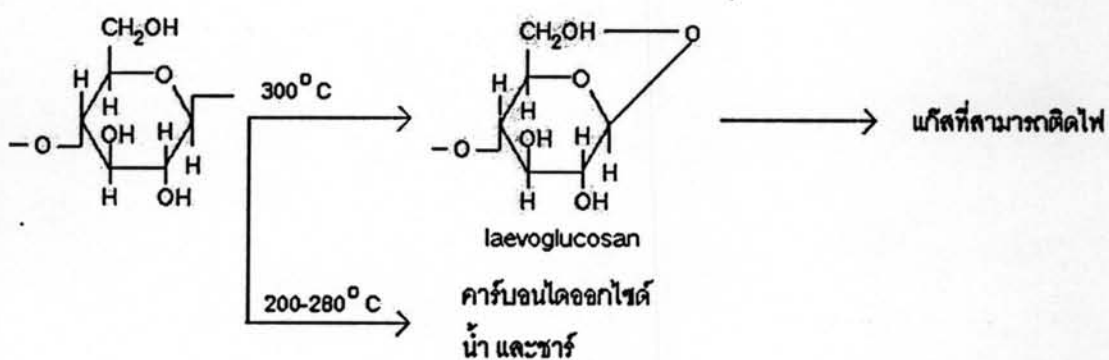
กระบวนการเผาไหม้ของฝ้ายที่แสดงในรูปที่ 2.5 แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

2.3.2.1 กลไกการสลายตัวของฝ้ายด้วยความร้อน (pyrolysis)

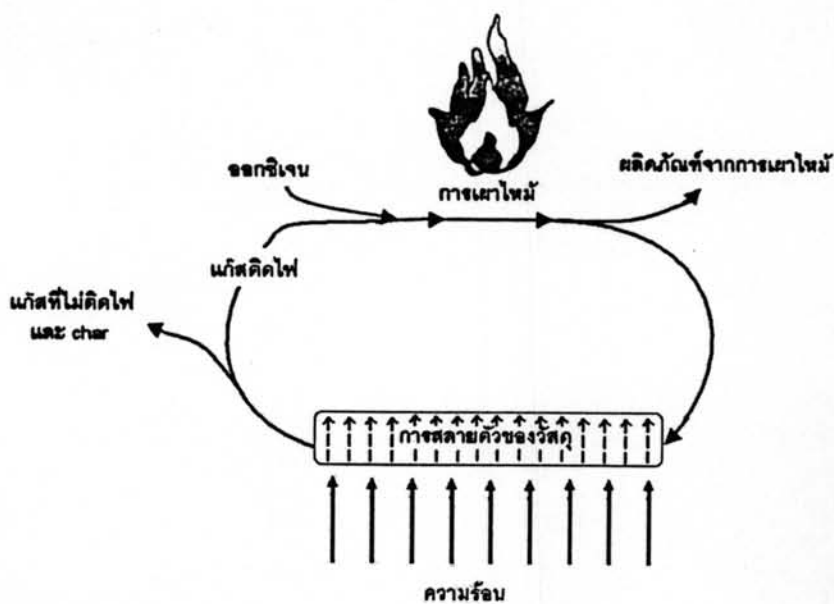
การสลายตัวของฝ้ายจะเกิดผ่านปฏิกิริยา 2 ประเภท ประเภทแรกคือ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส หรือประมาณ 200-280 องศาเซลเซียส เมื่อฝ้ายได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิการสลายตัวประมาณ 230 องศาเซลเซียสจะเกิดการสลายตัวอย่างช้าๆ ไปสู่ผิวหน้าของฝ้าย ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (endothermic reaction) ทำให้สายโซ่โมเลกุลของฝ้ายบางส่วนจะเกิดการเชื่อมขวางกัน และเกิดการขจัดน้ำออกจากโมเลกุล ฝ้ายที่ปล่อยน้ำออกจากโมเลกุลจะสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนกลายเป็นถ่านคาร์บอน หรือชาร์ (char) คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ประเภทที่สองคือ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียสหรือประมาณ 280-340 องศาเซลเซียส ก็จะมีการสลายตัวอย่างรวดเร็วไปสู่ผิวหน้าของฝ้าย เป็นน้ำมันดิน (tar) ซึ่งอยู่ในรูป laevoglucosan (1,6-β-D-anhydroglucopyranose) เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเป็นสารกึ่งของแข็งของเหลว ซึ่งการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงนี้จะให้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สชนิดต่างๆ ทั้งที่ติดไฟและไม่ติดไฟ เช่น เอทิลีน มีเทน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ นอกจากนี้ยังมีของเหลวที่ระเหยและติดไฟได้ง่าย เช่น แอลกอฮอล์ อัลดีไฮด์ และคีโตน เป็นต้น จากนั้นฝ้ายก็จะขจัดน้ำออกไปจนเหลือแต่ชาร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และการสลายตัวอย่างรวดเร็วกลายเป็น laevoglucosan แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 เส้นทางการสลายตัวของฝ้าย [10]



รูปที่ 2.6 การสลายตัวของฝ้ายไปเป็น laevoglucosan [11]



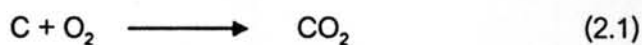
รูปที่ 2.7 วงจรการเผาไหม้ของฝ้าย [12]

2.3.2.2 การลุกเป็นเปลวไฟ (flaming)

เมื่อฝ้ายเกิดการสลายตัวแล้ว ทำให้ได้สารที่ติดไฟได้ง่าย ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายตัวนี้จะแพร่ไปสู่ผิวหน้าของวัสดุ แล้วทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ เกิดการลุกเป็นเปลวไฟ โดยส่วนใหญ่การลุกไหม้จะเกิดจากการลุกไหม้ของแก๊สและของเหลวที่ติดไฟได้ง่าย ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการคายความร้อน (exothermic reaction) ทำให้ความร้อนบางส่วนถูกส่งกลับไปยังวัสดุ วัสดุนั้นก็จะเกิดการสลายตัวและลุกไหม้ต่อไป ทำให้การเผาไหม้ดำเนินไปเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ ดังแสดงในรูปที่ 2.5

2.3.2.3 การคุแดง (glowing)

เมื่อเปลวไฟดับ สารที่เหลือจากการลุกไหม้จากเปลวไฟจะคุแดงต่อไป โดยคาร์บอนที่อยู่ในสารที่เหลือนี้จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2



โดยปกติการเกิดปฏิกิริยาแรกจะปล่อยความร้อนออกมามากกว่าปฏิกิริยาที่สองถึง 4 เท่า ซึ่งความร้อนที่ปล่อยออกมามีมากพอที่จะทำให้การคุแดงดำเนินต่อไปจนเหลือแต่เถ้า [9,11]

2.3.3 ประเภทของสารหน่วงไฟ

สารหน่วงไฟมีมากมายหลายประเภท ซึ่งการจำแนกประเภทของสารหน่วงไฟนี้ช่วยให้เข้าใจความสามารถในการทำงานของสารหน่วงไฟ ทำให้สามารถเลือกใช้สารหน่วงไฟได้ตรงกับวัตถุประสงค์ที่ต้องการ ซึ่งสารหน่วงไฟสามารถจำแนกได้จากความคงทน จากวิธีการที่ใช้ร่วมกับวัสดุ จากกลไกการหน่วงไฟ และจากองค์ประกอบทางเคมี ดังต่อไปนี้

2.3.3.1 สารหน่วงไฟที่จำแนกได้จากความคงทน

(1) สารหน่วงไฟประเภทไม่คงทน (nondurable flame retardants) สารหน่วงไฟประเภทนี้ได้แก่ กรดอนินทรีย์ ซึ่งไม่คงทนต่อการซักล้าง สามารถถูกชะล้างออกไปได้ด้วยน้ำ เหนือ ตัวอย่างของกรดอนินทรีย์ เช่น กรดบอริก กรดฟอสฟอริก และซิงค์คลอไรด์ หรือเบส เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมคาร์บอเนต แต่เนื่องจากกรดและเบสทำให้เกิดปัญหาการกัดกร่อน ดังนั้นจึงนิยมใช้ในรูปที่เป็นเกลือมากกว่า เช่น แอมโมเนียมฟอสเฟต ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต ยูเรียฟอสเฟต และแอมโมเนียมซัลฟาเมต ซึ่งรู้จักภายใต้ชื่อทางการค้าของ Amgard CD (แอมโมเนียมฟอสเฟต และแอมโมเนียมโบรไมด์) และ Amgard TR (แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต)

ซึ่งเกลือเหล่านี้เมื่อได้รับความร้อนจะสลายตัวเป็นแก๊สแอมโมเนีย กรดฟอสฟอริก หรือ กรดพอลิฟอสฟอริก เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น กรดฟอสฟอริกจะขจัดน้ำออกกลายเป็น กรดเมตาไฟโรฟอสฟอริกที่มีลักษณะเป็นของเหลวหนืด ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อากาศหรือ ออกซิเจนสัมผัสกับเส้นใย ทำให้เส้นใยไม่เกิดการเผาไหม้ รวมทั้งยังทำหน้าที่เป็นกรดลิวอิส (Lewis acid) ที่ทำให้เส้นใยสลายตัวเกิดซาร์เพิ่มขึ้น สารหน่วงไฟประเภทนี้เหมาะที่จะใช้ตกแต่ง ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องผ่านการซักล้าง เช่น ผ้าประเภทใช้แล้วทิ้ง ฉนวน กระดาษ จอภาพยนตร์ แผ่นกันผนัง และบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น

(2) สารหน่วงไฟประเภทกึ่งคงทน (semidurable flame retardants) สารหน่วงไฟประเภทนี้ได้แก่ เกลือของกรดอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ เช่น เกลือฟอสเฟตหรือเกลือ บอเรตของโลหะดีบุก สังกะสี อะลูมิเนียม หรือแอสแตนเนต ทั้งเสตต อะลูมิเนต รวมทั้งเกลือไอออนของ พอลิฟอสเฟตน้ำหนักโมเลกุลสูง เมื่อทำการยัดติดสารเหล่านี้ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดการฟอสฟอริเลชันของเซลลูโลส ซึ่งในกระบวนการตกแต่งจะแช่ผ้าให้อิ่มตัว ในสารละลายอย่างแรกที่เป็นเกลือของสารหน่วงไฟ และนำไปทำให้ตกตะกอนในสารละลายอย่างที่สอง สารหน่วงไฟประเภทนี้มีความคงทนต่อการซักล้าง 20 ครั้ง ดังนั้นจึงเหมาะที่จะใช้ตกแต่ง ผลิตภัณฑ์ที่ไม่จำเป็นต้องผ่านการซักล้างบ่อย เช่น ผลิตภัณฑ์ผ้าฟูก เคหะสิ่งทอ เบาะหุ้มเฟอร์นิเจอร์ และพรม เป็นต้น

(3) สารหน่วงไฟประเภทมีความคงทนสูง (durable flame retardants) สารหน่วงไฟประเภทนี้ มีฟอสฟอรัสหรือแฮโลเจนเป็นองค์ประกอบ หรือเป็นสารประกอบประเภท ออแกโนฟอสฟอรัส (organophosphorus compounds) ซึ่งรู้จักกันดีคือ เอ็นไฮดรอกซีเมทิล (ไดเมทิลฟอสฟอโน)ไพโรทีโนเอไมด์ เช่น Pyrovatex CP และเททราคิส (ไฮดรอกซีเมทิล)ฟอสฟอ-เนียมคลอไรด์ (THPC) เช่น Proban CC สารหน่วงไฟประเภทนี้มีความคงทนต่อการซักล้าง 50 ครั้งหรือมากกว่า ดังนั้นจึงเหมาะที่จะใช้ตกแต่งผลิตภัณฑ์ที่จำเป็นต้องผ่านการซักล้างบ่อย เช่น ผลิตภัณฑ์เสื้อผ้า เป็นต้น [2,9]

2.3.3.2 สารหน่วงไฟที่จำแนกได้จากวิธีการที่ใช้ร่วมกับวัสดุ

(1) สารหน่วงไฟเชิงเติม (additive flame retardants) สารหน่วงไฟชนิดนี้เป็นลักษณะของสารเติมแต่ง (additives) โดยสารหน่วงไฟจะเคลือบอยู่บนบริเวณผิวหน้าวัสดุ ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีต่อกัน ตัวอย่างเช่น เกลืออินทรีย์ เช่น โซเดียมคลอไรด์ แคลเซียมคลอไรด์ แอนติโมนีคลอไรด์ โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ซิงค์คลอไรด์ แอมโมเนียมคลอไรด์ แอมโมเนียมคาร์บอเนต แอมโมเนียมฟอสเฟต เป็นต้น ซึ่งโดยปกติแล้วเกลืออินทรีย์เหล่านี้จะเกิด

การสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำ และช่วยเพิ่มชาร์จากการเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการดีไฮเดรชันแต่ สารหน่วงไฟเชิงเติมนี้มีข้อเสียคือ สามารถเกิดการระเหยหรือแยกตัวออกจากวัสดุได้ง่ายกว่า สารหน่วงไฟเชิงปฏิกิริยา เมื่อเวลาผ่านไปสมบัติการหน่วงไฟจะค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ อาจแก้ปัญหาได้โดยการใช้สารหน่วงไฟที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ขึ้น

(2) สารหน่วงไฟเชิงปฏิกิริยา (reactive flame retardants) สารหน่วงไฟชนิดนี้จะทำปฏิกิริยากับวัสดุที่ต้องการตกแต่งหน่วงไฟ โดยนำสารหน่วงไฟมาทำปฏิกิริยากับเซลลูโลส เพื่อให้เซลลูโลสมีหมู่ฟังก์ชันที่ทำหน้าที่หน่วงการติดไฟบนสายโซ่โมเลกุลโดยตรง ซึ่งการทำปฏิกิริยาของเซลลูโลสกับสารเคมีชนิดต่างๆ จะทำให้ขนาดของสายโซ่โมเลกุลและหมู่ไฮดรอกซิลที่่องไวในการเกิดปฏิกิริยาที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ตำแหน่งที่ 3 และตำแหน่งที่ 6 ของหน่วยซ้ำของกลูโคไพราโนส เกิดการแตกของพันธะไฮโดรเจนระหว่างไฮดรอกซิลเซลลูโลสออก แล้วเกิดปฏิกิริยากับอะลิฟาติกไฮดรอกซิล ซึ่งทำได้โดยการเอสเทอร์ไฟด้วยสารเคมีที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับเซลลูโลสได้ซึ่งจะให้อนุพันธ์ของเซลลูโลส ตัวอย่างการเกิดเอสเทอร์ฟิเคชัน เช่น การไนเตรชัน อะซิทิลเลชัน ฟอสฟอริเลชัน และซัลเฟชัน สารหน่วงไฟเชิงปฏิกิริยานี้จะทำให้วัสดุมีสมบัติหน่วงไฟที่คงทน เกิดการระเหย หรือแยกตัวออกจากวัสดุได้ยากแต่จะมีต้นทุนสูงในส่วนของราคาสารหน่วงไฟ และเครื่องมือเพิ่มเติมที่ต้องใช้ในกระบวนการเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาดังกล่าว ตัวอย่างสารหน่วงไฟเชิงปฏิกิริยาประเภทมีความคงทนสูง ได้แก่ Pyrovatex, Proban (THPC และ ยูเรีย) เป็นต้น [9]

2.3.3.3 สารหน่วงไฟที่จำแนกจากกลไกการหน่วงไฟ

การทำงานของสารหน่วงไฟจะไปขัดขวางวงจรของการเผาไหม้ แสดงในรูปที่ 2.5 ไม่ให้ดำเนินต่อไปได้อย่างต่อเนื่อง เพื่อทำให้เปลวไฟลุกไหม้ช้าลงแล้วดับในที่สุด สามารถจำแนกสารหน่วงไฟได้จากกลไกการหน่วงไฟ ดังนี้

(1) การขัดขวางทางกายภาพประกอบด้วย

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

- การทำให้เกิดชั้นเคลือบบนพื้นผิววัสดุ สารหน่วงไฟในกลุ่มนี้ รวมถึงเกลืออนินทรีย์ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เมื่อเส้นใยได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิการเผาไหม้จะทำให้สารหน่วงไฟเกิดการหลอมละลายมาปกคลุมบริเวณผิวหน้าของเส้นใย ซึ่งจะช่วยป้องกันไม่ให้แก๊สออกซิเจนมาสัมผัสกับเส้นใย และกักขังไอระเหยที่สามารรถลุกติดไฟที่เกิดจากการสลายตัวของเส้นใยไปสู่ผิวหน้าของเส้นใย ทำให้เส้นใยไม่เกิดการเผาไหม้ นอกจากนี้ยังช่วยลดการถ่ายเทความร้อนจากจุดที่เกิดการติดไฟไปยังจุดอื่นๆ ทำให้เปลวไฟไม่เกิดการลุกลามต่อ ซึ่งการเคลือบของสารบนผิวหน้าเส้นใยนี้จะต้องเสถียรจนถึงอุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส ตัวอย่างของสารหน่วงไฟในกลุ่มนี้เช่น บอริก-บอแรกซ์ ซิลิเกต ฟอสเฟต และพอลิฟอสเฟต

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

(2) การขัดขวางทางเคมี ประกอบด้วย

- วัฏภาคแก๊ส (gas phase หรือ vapor phase) สารหน่วงไฟในกลุ่มนี้เมื่อโดนความร้อนจะเกิดอนุมูลอิสระที่สามารถไปจับกับอนุมูลอิสระที่เกิดจากการเผาไหม้ของเส้นใยได้ เช่น H^{\bullet} และ HO^{\bullet} กลายเป็นแก๊สซึ่งทำให้ปฏิกิริยาการขยายตัวของสายโซ่อนุมูลอิสระสิ้นสุดลง (free radical chain propagation) การลุกไหม้ก็จะสิ้นสุดลง ตัวอย่างของสารหน่วงไฟในกลุ่มนี้ เช่น สารประกอบแฮโลเจน และการทำงานของสารหน่วงไฟที่เป็นสารประกอบแฮโลเจนและแอนติโมนีออกไซด์

- วัฏภาคของแข็ง (solid phase หรือ condensed phase) สารหน่วงไฟในกลุ่มนี้ทำหน้าที่เร่งให้เส้นใยเกิดการสลายตัวเร็วขึ้นเป็นแก๊สที่ไม่ติดไฟหรือชาร์เพื่อให้ส่วนที่มีการลุกติดไฟกับส่วนที่ยังไม่ลุกติดไฟแยกห่างออกจากกันมากขึ้น และในที่สุดไฟก็ไม่สามารถลุกลามไปถึงส่วนนั้นได้ อีกทางหนึ่งจะก่อให้เกิดชาร์ โดยเร่งให้วัสดุทำปฏิกิริยากับกรดลิวอิสผ่านคาร์บอนเนียมไอออน เกิดการดีไฮเดรชันของเส้นใยแล้วเกิดการเชื่อมโยงกันเป็นร่างแห และเจ้าชาร์นี้จะช่วยในการหน่วงไฟโดยการเกิดขึ้นเป็นชั้นชาร์มาเคลือบเส้นใยไว้ ผิวหน้า

วัสดุจะไม่สัมผัสกับความร้อน ตัวอย่างของสารหน่วงไฟในกลุ่มนี้ เช่น สารประกอบฟอสฟอรัส และ การทำงานของสารหน่วงไฟที่เป็นสารประกอบฟอสฟอรัสและไนโตรเจน [3,19,12]

2.3.3.4 สารหน่วงไฟจำแนกจากองค์ประกอบทางเคมี

ความหลากหลายในหมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่มีอยู่ในโครงสร้างของ สารหน่วงไฟชนิดต่างๆ ทำให้สารหน่วงไฟแต่ละชนิดมีสมบัติเฉพาะตัว อีกทั้งสมบัติของ สารหน่วงไฟอาจเปลี่ยนไปตามชนิดของวัสดุที่นำไปผสม อย่างไรก็ตามสามารถจำแนก สารหน่วงไฟตามองค์ประกอบทางเคมีได้ดังนี้

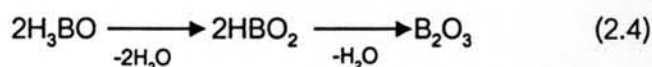
(1) สารหน่วงไฟประเภทโลหะไฮดรอกไซด์ [3,11,13]

สารหน่วงไฟประเภทนี้ที่นิยมใช้ ได้แก่ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากหาซื้อได้ง่าย ราคาถูก และไม่เป็นพิษ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ตกแต่งหน่วงไฟในการเคลือบ สิ่งทอหรือผสมลงไปในพลาสติก เมื่อสารหน่วงไฟชนิดนี้ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 180-200 องศาเซลเซียส อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จะเกิดการแตกตัว ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะ ดูดความร้อนบางส่วนไปใช้ในการขจัดน้ำออกเกิดเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ แสดงดังสมการที่ 2.3 ซึ่งไอน้ำที่เกิดขึ้นนี้จะไปเจือจางแก๊สที่ติดไฟได้ง่าย และช่วยป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าใกล้พื้นผิว ของวัสดุ ส่วนการเกิดอะลูมิเนียมออกไซด์จะช่วยทำให้เกิดขารซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกัน ความร้อนให้แก่พื้นผิวของวัสดุ และมีสมบัติในการลดควันที่เกิดจากการเผาไหม้



(2) สารหน่วงไฟประเภทที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบ [10,13]

สารประกอบโบรอน เช่น กรดบอริกจะดูดความร้อนที่อุณหภูมิ ประมาณ 130-200 และ 260-270 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการสลายน้ำออกเกิดเป็นบอริกออกไซด์ ดังแสดงในสมการที่ 2.4 ซึ่งอยู่ในรูปของการหลอมที่อุณหภูมิประมาณ 325 องศาเซลเซียส และ ไหลปกคลุมทั่วพื้นผิววัสดุที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งช่วยป้องกันเปลวไฟและ การสัมผัสกับแก๊สออกซิเจน

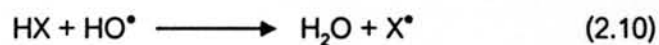
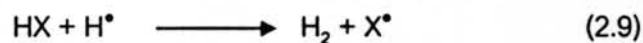
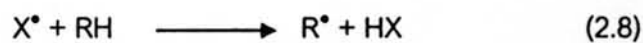


(3) สารหน่วงไฟประเภทที่มีแฮโลเจนเป็นองค์ประกอบ [11,13]

แฮโลเจนนั้นประกอบด้วยธาตุ 4 ตัวด้วยกัน ได้แก่ ฟลูออรีน คลอรีน โบรมีน และไอโอดีน แต่ที่นิยมใช้เป็นสารหน่วงไฟคือ คลอรีน และโบรมีน เนื่องจากในกรณีของฟลูออรีนนั้น พันธะที่เกิดขึ้นกับคาร์บอนนั้นแข็งแรงเกินไปจึงไม่สามารถแตกตัวแล้วทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระได้ ส่วนในกรณีของไอโอดีน พันธะที่เกิดขึ้นกับคาร์บอนนั้นอ่อนแอเกินไปทำให้แตกตัวอย่างรวดเร็วด้วยพลังงานเพียงเล็กน้อย เช่น การโดนแสง และยังส่งผลให้สมบัติในการหน่วงไฟสูญเสียไป สารหน่วงไฟประเภทแฮโลเจนนี้สามารถปลดปล่อยอนุมูลอิสระของธาตุแฮโลเจนไอออนเข้าสู่บริเวณที่เกิดการลุกไหม้ โดยบริเวณนี้จะมีอนุมูลอิสระของธาตุไฮโดรเจนและอนุมูลอิสระอื่นๆ ที่เป็นผลมาจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ ดังแสดงในสมการที่ 2.5 และ 2.6



เมื่ออนุมูลอิสระของธาตุไฮโดรเจนนี้มาพบกับอนุมูลอิสระของธาตุแฮโลเจน จะทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนเฮไลด์ (HCl หรือ HBr) มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ลดลง ดังนั้นสารประกอบแฮโลเจนสามารถเรียกได้ว่าเป็นตัวดักจับอนุมูลอิสระ (free radical scavengers) ทำให้สามารถลดอัตราการลุกลามของการเผาไหม้ได้ แสดงดังสมการที่ 2.7 ถึง 2.10



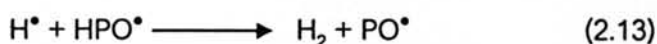
โดยที่ RX คือ สารหน่วงไฟที่มีแฮโลเจนเป็นองค์ประกอบเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ X (คือ Cl หรือ Br) จากนั้นอนุมูลอิสระ X ทำปฏิกิริยากับสารพอลิเมอร์ RH เช่น เซลลูโลสเกิดเป็นแก๊สไฮโดรเจนเฮไลด์ (HCl หรือ HBr) ซึ่งสามารถจับกับอนุมูลอิสระ H[•] และ HO[•]

ถ้าเปรียบเทียบสารหน่วงไฟที่มีโบรมีนและคลอรีนเป็นองค์ประกอบ สารหน่วงไฟที่มีโบรมีนเป็นองค์ประกอบจะมีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ สารหน่วงไฟที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ เนื่องจากโบรมีนจับกับคาร์บอนด้วยพันธะที่อ่อนแอกว่า ทำให้เมื่อถึงอุณหภูมิที่เกิดการแตกตัว สารหน่วงไฟที่มีโบรมีนเป็นองค์ประกอบจะสลายตัวเกิดเป็นไฮโดรเจนโบรมได์ (HBr) ในปริมาณความเข้มข้นที่สูง สารหน่วงไฟประเภทนี้ที่นิยมใช้คือโบรมิเนตอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (brominated aromatic hydrocarbon) ซึ่งจะมีประสิทธิภาพดี

เมื่อวงแหวนอะโรมาติกถูกแทนที่ทุกตำแหน่ง เช่น เดคาโบรโมไดฟีนิลออกไซด์ (decabromodiphenyloxide) แต่ในบางกรณีที่ต้องการความคงทนต่อแสง สารหน่วงไฟที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบจะให้ประสิทธิภาพมากกว่า เนื่องจากส่วนหน่วงไฟที่มีโบรมีนเป็นองค์ประกอบสามารถสลายตัวได้เมื่อถูกแสง สารหน่วงไฟประเภทนี้ที่นิยมใช้คือ คลอรีเนตพาราฟิน (chlorinated paraffin) ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ถูกนำมาทำปฏิกิริยากับคลอรีน เพื่อให้มีธาตุคลอรีนเป็นองค์ประกอบในโมเลกุล โดยมีส่วนประกอบของคลอรีนอยู่ประมาณ 30-70% โดยน้ำหนัก สารหน่วงไฟชนิดนี้ยังช่วยปรับปรุงสมบัติของเรซินที่ถูกนำไปผสมให้พลาสติกใสตัวมากขึ้น อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ที่ตกแต่งด้วยสารหน่วงไฟประเภทนี้เมื่อเกิดการลุกไหม้ จะให้ควันพิษที่เป็นอันตราย และเป็นสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งได้ โดยเฉพาะสารหน่วงไฟที่มีโบรมีนเป็นองค์ประกอบ จึงมีการห้ามตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารหน่วงไฟชนิดนี้

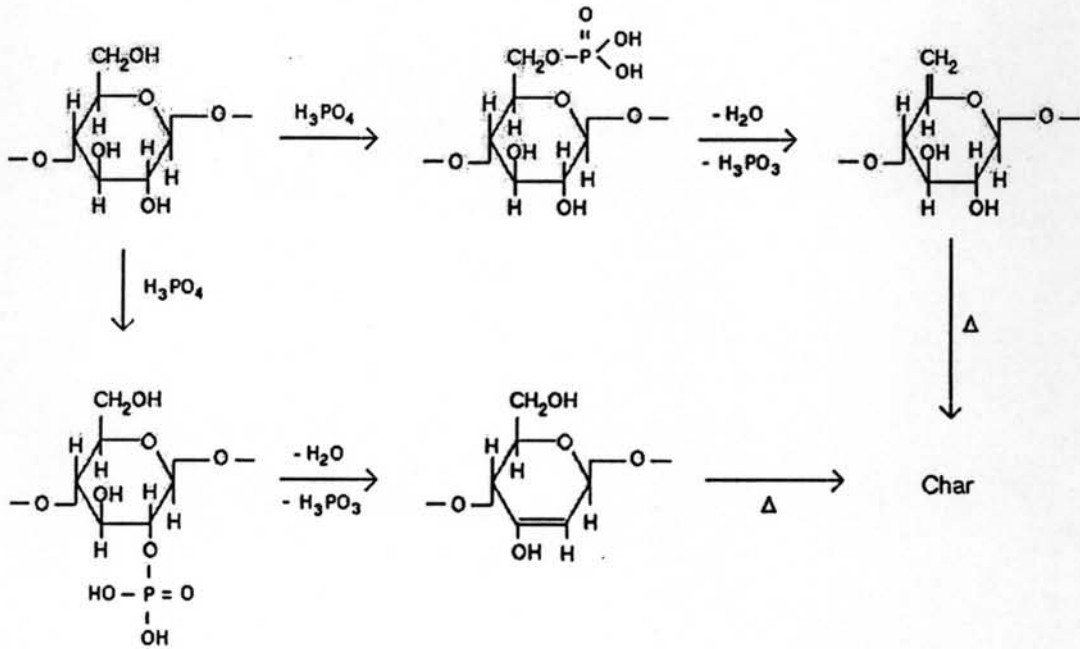
(4) สารหน่วงไฟประเภทที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ

สารหน่วงไฟประเภทนี้มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟกับวัสดุที่มีปริมาณออกซิเจนสูง เช่น เซลลูโลส อนุพันธ์ของเซลลูโลส และพลาสติกที่มีองค์ประกอบของออกซิเจน สารหน่วงไฟประเภทนี้มีทั้งในรูปสารประกอบอินทรีย์ อนินทรีย์ และธาตุ (ฟอสฟอรัสแดง) เช่น ฟอสฟีน ฟอสฟีนออกไซด์ สารประกอบฟอสฟอเนียม ฟอสฟอเนต ฟอสไฟต์ และฟอสเฟต สามารถหน่วงไฟได้ทั้ง vapor phase และ condensed phase ซึ่งสารหน่วงไฟประเภทนี้จะทำปฏิกิริยาใน vapor phase ระเหยกลายเป็นไอ เกิดในรูปอนุมูลอิสระ PO^{\bullet} แล้วเข้าขัดขวางการลุกไหม้โดยการจับอนุมูลอิสระที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา (H^{\bullet} และ HO^{\bullet}) ดังสมการที่ 2.11 ถึง 2.14

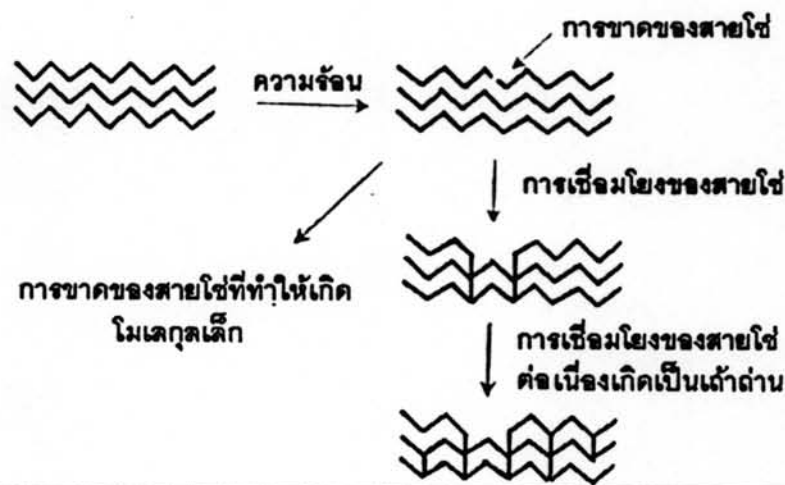


ส่วนใน condensed phase สารหน่วงไฟประเภทนี้ได้รับความร้อน จะเกิดการสลายตัวไปเป็นกรดฟอสฟอริก หรือกรดพอลิฟอสฟอริก ซึ่งกรดที่เกิดขึ้นนี้จะไปเอสเทอร์ฟายหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลส เกิดชั้นของเลวหนืดปกคลุมผิวของวัสดุเพื่อป้องกันไม่ให้เปลวไฟและแก๊สออกซิเจนสัมผัสกับเซลลูโลส และกรดที่เกิดขึ้นยังเป็นตัวทำให้เกิดการขจัดน้ำ (dehydrating agent) โดยการทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลคาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของ

แอนไฮโดรกลูโคส เพื่อสร้างชั้นของชาร์และไอน้ำที่เกิดขึ้นจะช่วยเจือจางแก๊สที่ติดไฟได้ง่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และ 2.9



รูปที่ 2.8 การฟอสฟอริเลชันของเซลลูโลส [14,15]



รูปที่ 2.9 การเกิดชาร์ [16,17]

ตัวอย่างของสารประกอบของสารหน่วงไฟประเภทนี้ ได้แก่ ฟอสเฟตเอสเทอร์ ซึ่งโครงสร้างของโมเลกุลประกอบด้วยฟอสเฟตเป็นหลัก แล้วเกิดพันธะกับ หมู่อัลคิลหรือเอริล สารหน่วงไฟที่มีฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบที่ใช้กันโดยทั่วไปคือ ไอโซโพรพิลไตรฟีนิลฟอสเฟต (isopropyltriphenylphosphate) อัลคิลไดเอริลฟอสเฟต (alkyl diarylphosphate)

และกรดฟอสฟอริก โดยไฮโซโทรฟิลไตรฟีนิลฟอสเฟต และอัลคิลไดเอริลฟอสเฟตที่มีสมบัติเป็นพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) จึงนิยมใช้ในการตกแต่งหน่วงไฟพอลิไวนิลคลอไรด์ ในขณะที่กรดฟอสฟอริกนิยมใช้ตกแต่งหน่วงไฟในวัสดุจำพวกเซลลูโลส แต่เนื่องจากกรดฟอสฟอริกมีการกัดกร่อนสูง จึงนิยมใช้ในรูปแบบที่เป็นเกลือ เช่น แอมโมเนียมฟอสเฟต ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต อย่างไรก็ตาม กรดฟอสฟอริกและสารที่เป็นเกลือสามารถละลายน้ำได้ง่าย จึงไม่คงทนต่อการใช้งานที่ต้องผ่านการซักล้าง [11,13,14]

(5) สารหน่วงไฟประเภทที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ [9]

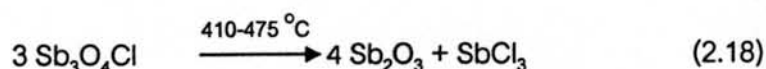
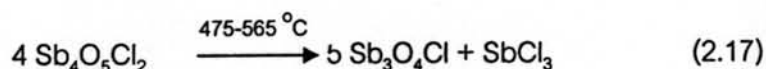
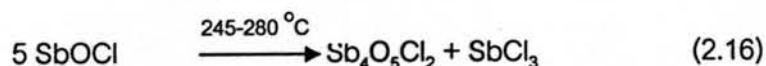
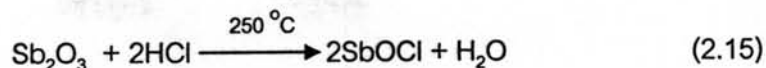
สารหน่วงไฟประเภทนี้ได้แก่ เมลามีน เมลามีนไซยานูเรต เมทิลอล-เมลามีน สารประกอบกัวนิติน ยูเรีย ไซยานาไดเอไมด์ เป็นต้น โดยสารหน่วงไฟประเภทนี้ทำหน้าที่ในรูปของการเกิดอินทูเมสเซนส์ (intumescent) ซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดการพองตัวเป็นชั้นของสารที่มีลักษณะคล้ายโฟมที่ทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันความร้อนและการสัมผัสกับออกซิเจนให้แก่วัสดุ

2.3.4 ระบบการหน่วงไฟที่มีการเสริมกัน (Synergisms) [12]

Synergisms เป็นระบบการหน่วงไฟที่มีการนำสารที่มีองค์ประกอบ 2 ชนิดที่แตกต่างกันมาใช้ร่วมกัน แล้วส่งผลให้มีสมบัติในการหน่วงไฟที่เสริมกัน กล่าวคือมีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟมากกว่าการใช้สารเพียงตัวเดียว โดยส่วนใหญ่สารหน่วงไฟที่นำมาใช้ร่วมกันในปัจจุบันมีดังนี้

2.3.4.1 แฮโลเจนและแอนติโมนี [11,13]

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



2.3.4.2 ฟอสฟอรัสและแฮโลเจน [10]

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

2.3.4.3 ฟอสฟอรัสและไนโตรเจน

สารประกอบไนโตรเจนหากนำมาใช้เพียงชนิดเดียว จะไม่มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดี หรืออาจจะต้องใช้มากถึง 17% จึงจะช่วยให้เซลลูโลสมีความสามารถในการหน่วงไฟได้ปานกลาง ดังนั้นจึงมีการนำสารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสและไนโตรเจนมาใช้ร่วมกัน เนื่องจากสารประกอบไนโตรเจนทำหน้าที่เป็นนิวคลีโอไฟล์ ซึ่งทำให้เกิดการสร้างพันธะของสารประกอบฟอสฟอรัสกับสารประกอบไนโตรเจน และเมื่อเกิดการสลายตัวของสารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบไปเป็นกรดฟอสฟอริกแล้ว จะช่วยให้กรดฟอสฟอริกทำปฏิกิริยาฟอสฟอริเลชันกับเซลลูโลสได้ง่ายขึ้น เนื่องจากช่วยเพิ่มสภาพความเป็นบวก (electrophilicity) ของฟอสฟอรัส ซึ่งจะสามารถดีไฮเดรตเซลลูโลสสร้างชั้นชาร์ และสามารถปลดปล่อยแก๊สไนโตรเจนและแอมโมเนียมาเจือจางแก๊สที่ติดไฟ [9,11,12,18,19]

ในการปรับปรุงสมบัติของผ้าฝ้าย โดยใช้สารประกอบฟอสฟอรัสและสารประกอบไนโตรเจนทำได้ 5 วิธี ดังนี้คือ

- (1) สารประกอบฟอสฟอรัสและสารประกอบไนโตรเจนถูกเติมลงไปโดยไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีกับผ้าฝ้าย
- (2) สารประกอบฟอสฟอรัสเกิดปฏิกิริยาฟอสฟอริเลชัน หลังจากนั้นเติมสารประกอบไนโตรเจนลงไปโดยไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีกับผ้าฝ้าย
- (3) สารประกอบฟอสฟอรัสถูกเติมลงไปโดยไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีกับผ้าฝ้าย ส่วนสารประกอบไนโตรเจนเกิดการกราฟท์กับสายโซ่เซลลูโลส
- (4) ผ้าฝ้ายเกิดการกราฟท์ด้วยสารประกอบไนโตรเจน แล้วจึงเกิดการฟอสฟอริเลชัน
- (5) ผ้าฝ้ายเกิดปฏิกิริยาเคมีกับทั้งสารประกอบฟอสฟอรัสและสารประกอบไนโตรเจน

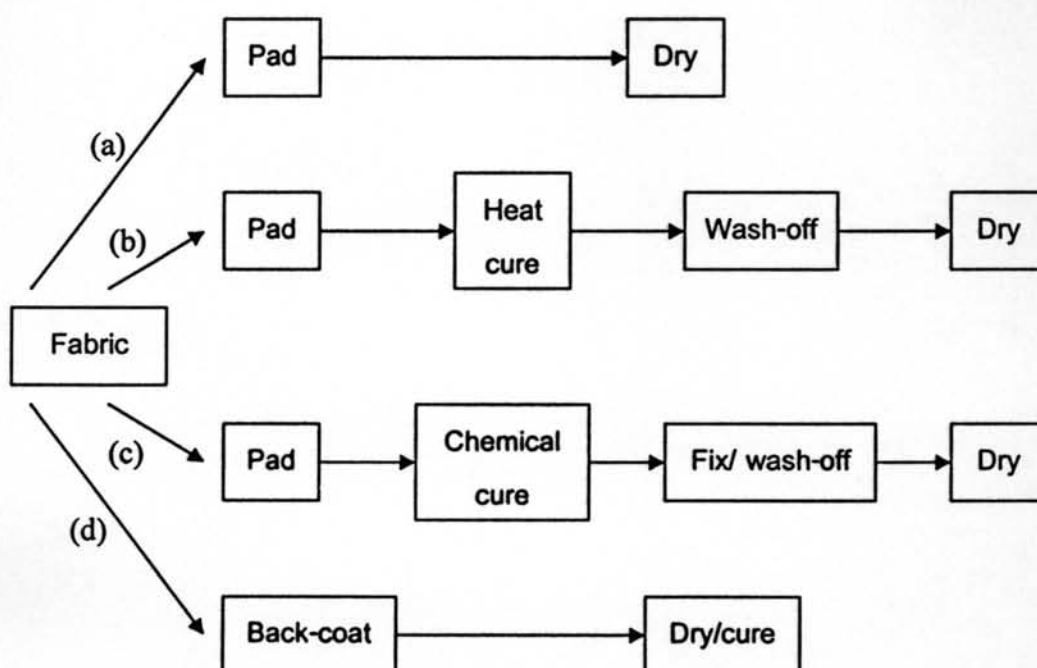
2.3.5 กระบวนการตกแต่งหน่วงไฟ [8,10]

กระบวนการพื้นฐานสำหรับการตกแต่งหน่วงไฟสิ่งทอโดยเฉพาะผ้าทอเปิดหน้าผ้า (open-width woven fabrics) มี 4 วิธีดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งแต่ละวิธีมีรายละเอียดดังนี้

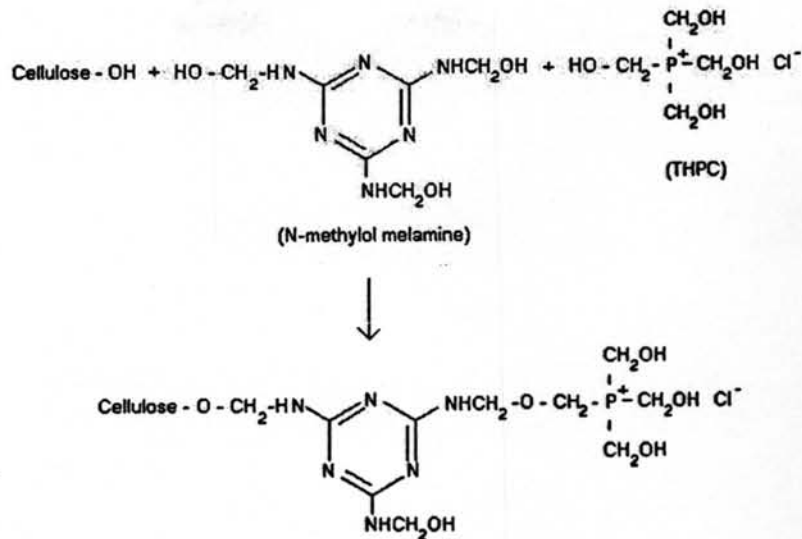
(a) เป็นกระบวนการที่นิยมใช้ตกแต่งหน่วงไฟผ้าทอด้วยสารตกแต่งหน่วงไฟประเภทที่ไม่ทนต่อการซักล้างหรือสารตกแต่งหน่วงไฟที่ละลายน้ำได้ เช่น แอมโมเนียมฟอสเฟต โดยทำการจุ่มอัดผ้าด้วย % pick up ที่เหมาะสมจากนั้นนำไปอบให้แห้ง ซึ่งสารหน่วงไฟที่ตกแต่งด้วยวิธีนี้จะเคลือบอยู่บนผิวหน้าของผืนผ้า

(b) กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ใช้ทั่วไปในการตกแต่งกันยับหรือตกแต่งสิ่งทอที่ต้องการผ่านการผืนด้วยความร้อน (heat-cure) มักใช้ในการตกแต่งหน่วงไฟผ้าฝ้ายด้วยสารตกแต่งหน่วงไฟที่มีสารประกอบฟอสฟอไรต์ เช่น Pyrovatex (Ciba) Antiblaze TFRI (Albright and Wilson) เนื่องจากกระบวนการนี้จำเป็นต้องใช้กรด เช่นกรดฟอสฟอริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นเมื่อทำการจุ่มอัดและผืนด้วยความร้อนแล้วมักจะนำมาทำการซักล้างในน้ำซักที่มีสารละลายด่างเพื่อทำการสะเทิน (wash-off) จากนั้นจึงไปทำให้แห้ง

สำหรับการตกแต่งห่วงไฟที่มีเพียงการจุ่มอัดและอบผนึกด้วยความร้อนเท่านั้น โดยไม่ผ่านขั้นตอนการซักล้าง (wash-off) สามารถนำมาใช้ตกแต่งห่วงไฟสิ่งทอได้เช่นกัน และทำให้ความสามารถในการห่วงไฟของสิ่งทออยู่ในระดับที่กึ่งคงทนต่อการซักล้าง โดยในขั้นตอนการอบผนึกจะทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างสารตกแต่งห่วงไฟกับเส้นใยเซลลูโลส เช่น การตกแต่งด้วยสารห่วงไฟแอมโมเนียมฟอสเฟต โดยทำการอบผนึกที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาฟอสฟอริเลชันกับเส้นใยเซลลูโลส และการนำ THPC มาผนึกติดกับเส้นใยเซลลูโลสโดย N-methylol melamine เป็นตัวเชื่อมขวางเกิดเป็นสารประกอบ ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 กระบวนการตกแต่งห่วงไฟผ้าทอแบบเปิดหน้าผ้า



รูปที่ 2.11 การทำปฏิกิริยาของ THPC กับเส้นใยเซลลูโลสโดยมี N-methylol melamine เป็นสารเชื่อมขวาง

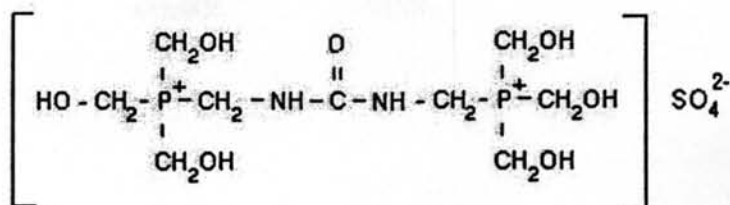
วิธีการตกแต่งประกอบด้วยการจุ่มอัดผ้าด้วยสารตกแต่งห่วงไฟ และสารเชื่อมขวางในอัตราส่วนที่เหมาะสมแล้วอบให้แห้ง จากนั้นผนึ่งด้วยความร้อนสูง แต่การตกแต่งด้วยวิธีนี้มีข้อเสียหลายประการคือ

(1) ทำให้สมบัติการดูดความชื้นของผ้าเสียไป เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นกับเส้นใยเซลลูโลส เป็นการทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลส

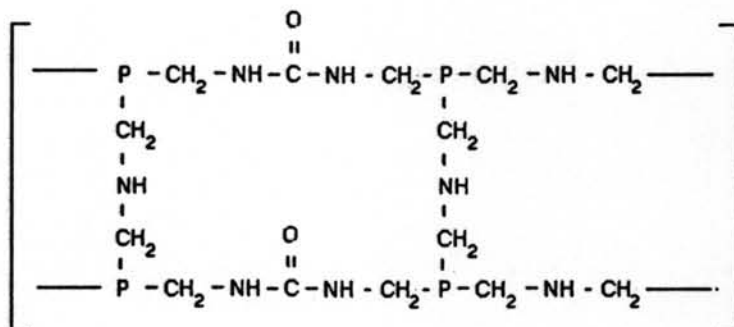
(2) ทำให้ความแข็งแรงของผ้าลดลง

(3) ผ้ามีสมบัติที่แข็งกระด้างขึ้น

(c) เป็นกระบวนการตกแต่งห่วงไฟที่ใช้สารห่วงไฟ Proban ที่มีองค์ประกอบของ THPC (THPC-based Proban process) ต้องผ่านการผนึ่งด้วยแก๊สแอมโมเนียเพื่อให้สารห่วงไฟเกิดการพอลิเมอไรซ์อยู่ภายในช่องว่างของเส้นใย โดยมีสูตรเคมีแสดงดังรูปที่ 2.12 และ 2.13 ซึ่งการตกแต่งห่วงไฟด้วยวิธีใหม่นี้ผ้าจะไม่สูญเสียสมบัติด้านความแข็งแรง การล้มน้ และ การดูดซึมความชื้น เนื่องจากการตกแต่งห่วงไฟด้วยเทคนิคใหม่นี้ ไม่มีการทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลส



รูปที่ 2.12 สูตรเคมีของ THPC ที่ผ่านการทำปฏิกิริยากับยูเรีย



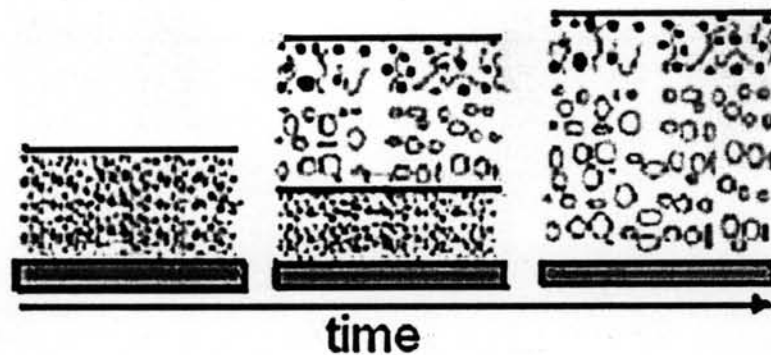
รูปที่ 2.13 สูตรเคมีของสารพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่ที่เกิดจากการอบผนึกด้วยแอมโมเนียที่ความร้อนสูง

จากนั้นนำมาผ่านการผนึกแบบออกซิไดซ์ (oxidative fixing process) เพื่อเพิ่มความคงตัว และเพิ่มความคงทนต่อการซักล้างต่อสิ่งทอที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ แล้วจึงนำไปผ่านการซักล้างและการทำให้แห้ง

(d) กระบวนการนี้มีส่วนประกอบของเรซินที่ทำหน้าที่เป็นสารยึดติดกับสารหน่วงไฟ จากนั้นใช้ยางปาดเคลือบส่วนผสมดังกล่าวที่ด้านในของผืนผ้า จึงเรียกว่า back-coat การตกแต่งหน่วงไฟด้วยวิธีนี้จะทำให้ผิวด้านนอกยังคงมีความสวยงาม มีสัมผัสที่ดีในขณะที่ผิวด้านในของผ้าจะมีสมบัติหน่วงไฟ กระบวนการนี้มักจะใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการให้มีความสวยงามของผิวด้านหน้าเป็นสำคัญ เช่น ผ้าที่ใช้บุเฟอร์นิเจอร์ และผ้าปูโต๊ะ เป็นต้น ตัวอย่างของการตกแต่งหน่วงไฟด้วยวิธีนี้คือการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวอินทูลูเมสเซนส์

2.4 สารเคลือบผิวอินทนูเมสเซนต์ [20]

สารเคลือบผิวอินทนูเมสเซนต์ ได้เริ่มนำมาใช้ในการห่อหุ้มไฟสำหรับวัสดุที่เป็นไม้เมื่อประมาณ 30 ปีที่แล้ว โดยคำว่า "intumescent" มาจากคำศัพท์ภาษาละตินว่า "intumescere" ที่แปลว่า "พองขึ้น" ระบบห่อหุ้มไฟอินทนูเมสเซนต์ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้สำหรับโครงสร้างไม้และโครงสร้างเหล็กเป็นหลัก แต่ปัจจุบันระบบนี้ได้ขยายมาสู่วัสดุสิ่งทอโดยเฉพาะวัสดุสิ่งทอประเภทเฟอร์นิเจอร์ โดยมีจุดประสงค์สำคัญคือ ลดการเกิดการติดไฟและลดอัตราการแพร่กระจายของเปลวไฟ ระบบห่อหุ้มไฟอินทนูเมสเซนต์เป็นการรวมกับระหว่างเทคโนโลยีของการห่อหุ้มไฟและเทคโนโลยีของการเกิดโฟมเข้าด้วยกัน กล่าวคือภายใต้ความร้อนที่เกิดขึ้นจากอัคคีภัย สารเคลือบผิวอินทนูเมสเซนต์จะหลอมเหลวแล้วเกิดพองอากาศ มีการขยายตัวสูงถึงประมาณ 100 เท่าของปริมาตรเดิม และก่อตัวเป็นชั้นโฟมหรือชั้นวัสดุที่มีรูพรุนซึ่งทำหน้าที่เสมือนฉนวนกันความร้อนภายในรูพรุนของโฟมที่พองตัวขึ้นนี้จะมีแก๊สไม่ติดไฟแทรกอยู่ ทำหน้าที่ป้องกันการไหลผ่านของออกซิเจนส่งผลให้วัสดุไม่เกิดการเผาไหม้หรือเกิดซ้ำลง ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การห่อหุ้มไฟด้วยสารเคลือบผิวอินทนูเมสเซนต์ [21]

2.5 องค์ประกอบหลักของสารเคลือบผิวอินทนูเมสเซนต์ [22, 23]

องค์ประกอบหลักของสารเคลือบผิวอินทนูเมสเซนต์มี 4 องค์ประกอบ ได้แก่

2.5.1 แหล่งคาร์บอน ทำหน้าที่ช่วยในการเกิดชาร์

2.5.2 แหล่งกรด ทำหน้าที่เป็นสารเร่งให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่จำเป็น เช่น ปฏิกิริยาการขจัดน้ำ (dehydration)

2.5.3 สารฟู ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแก๊สที่ไม่ติดไฟและทำหน้าที่สำหรับการเกิดการพองตัวเป็นชั้นโฟม

2.5.4 **สารยัดหรือเรซิน** ทำหน้าที่เป็นสารช่วยยัดระหว่างชั้นชาร์กับวัสดุโดยภายใต้ความร้อนจากอค์คิภัยสารยัดจะเกิดการละลายและยัดจับแก๊สที่ขยายตัวเป็นมวลที่มีความเหนียวและจับตัวเป็นชั้นโฟมคาร์บอนซึ่งจะเป็นฉนวนกันความร้อน

ตัวอย่างส่วนประกอบของสารเคลือบผิวอินทนูเมสเซนส์แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างของส่วนประกอบของสารเคลือบผิวอินทนูเมสเซนส์

Carbonific compounds	Acid sources	Spumific compounds	Binders
Polyhydric compounds:	Dehydrating agents:	-Melamine	-Phenol
-Pentaerythritol	-monoammonium phosphate	-Urea	formaldehyde
-Dipentaerythritol	-diammonium phosphate	-Chlorinated paraffin	-Urea
-Tripentaerythritol	-ammonium polyphosphate	-Guanidine	formaldehyde
-Sorbitol		-Glycine	-Polyvinyl acetate
-Starch			latex
-Dextrin			-Polyacrylates
			-Silicates

นอกจากนี้ ยังมีการใส่สารเติมแต่งบางชนิดลงไปด้วย เพื่อปรับปรุงสมบัติบางอย่างหรือช่วยให้กระบวนการผลิตทำได้ง่ายขึ้น ตัวอย่างของสารเติมแต่ง ได้แก่ อิมัลซิฟายเออร์ (emulsifiers) สารกันการเกิดฟอง (defoamers) เป็นต้น

2.6 หลักการเลือกองค์ประกอบของสารเคลือบผิวอินทนูเมสเซนส์ [22, 23]

2.6.1 แหล่งคาร์บอน

แหล่งคาร์บอนมักนิยมใช้พวกแป้งและพอลิแอลเช่น เพนตะเอริโทรลซึ่งประสิทธิภาพของแหล่งคาร์บอนขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนและจำนวนตำแหน่งไฮดรอกซิลที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา โดยปริมาณคาร์บอนเป็นตัวกำหนดปริมาณชาร์ ในขณะที่ปริมาณไฮดรอกซิลเป็นตัวกำหนดอัตราการขจัดน้ำและอัตราการเกิดโฟม นอกจากนี้แหล่งคาร์บอนหรือพอลิแอลต้องทำปฏิกิริยาการขจัดน้ำกับตัวเร่งที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการสลายตัวของมันหรืออุณหภูมิการสลายตัวของ substrate

2.6.2 แหล่งกรด

แหล่งกรดส่วนมากเป็นพวกฟอสเฟตซัลเฟอร์ และโบรอน โดยกรดที่ใช้ต้องมีความสามารถในการขจัดน้ำจากสารประกอบที่มีปริมาณคาร์บอนและหมู่ไฮดรอกซิลสูงได้ดี

2.6.3 สารฟู

สารฟูที่ดีต้องมีอุณหภูมิการสลายตัวที่เหมาะสมและให้แก๊สในปริมาณมาก ซึ่งการฟูควรเกิดขึ้นหลังการหลอมเหลวแต่ก่อนการเกิดเจล

2.6.4 สารยึดหรือเรซิน

สารยึดหรือเรซินทำหน้าที่เป็นสารช่วยยึดระหว่างชั้นของซาร์กับวัสดุ โดยภายใต้ความร้อนจากอค์คีย์สารยึดจะเกิดการหลอมละลาย และยึดจับกับแก๊สที่ขยายตัวเกิดสารที่มีความเหนียว และจับตัวเป็นชั้นฟิล์มของคาร์บอนซึ่งจะเป็นฉนวนกันความร้อน เราสมควรใช้สารยึดในปริมาณที่น้อยที่สุด เพราะสารยึดจะลดการทนนํ้า และลดความทนการกัดกร่อน

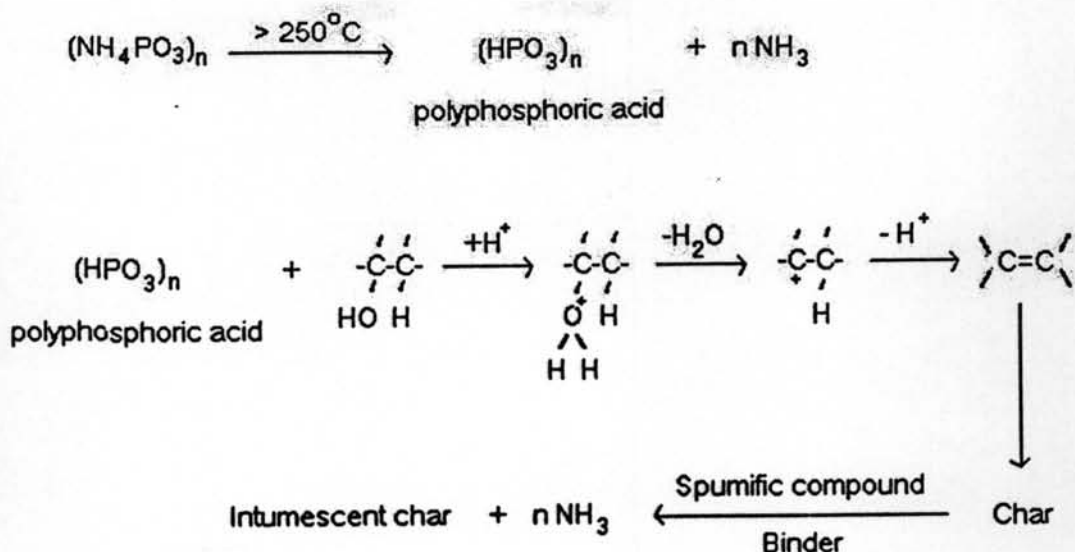
สำหรับงานวิจัยนี้

- ใช้แป้ง เพนตะเอริโทรทอล และไดเพนตะเอริโทรทอลเป็นแหล่งคาร์บอน
- ใช้ แอมโมเนียมฟอสเฟต และแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตเป็นแหล่งกรด
- ใช้ผงเมลามีน และเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เรซินเป็นสารฟู
- ใช้อะคริลิกเรซิน (100% อะคริลิกอิมัลชัน และอะคริลิกโคพอลิเมอร์) และเอทิลีน-ไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์เป็นสารยึด

2.7 กลไกการหน่วงไฟของสารเคลือบผิวอินทูเมสเซนต์ [20, 22]

กลไกการหน่วงไฟของสารเคลือบผิวอินทูเมสเซนต์ เมื่อวัสดุได้รับความร้อนสามารถเกิดปฏิกิริยาต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 2.15

สารประกอบที่มีสมบัติเป็นกรด เช่น dehydrating agents เกิดการสลายตัวกลายเป็นกรด และแก๊สที่ไม่ติดไฟ เช่น แก๊สแอมโมเนีย ดังสมการเคมี ดังนี้



รูปที่ 2.15 กลไกการหน่วงไฟของสารเคลือบผิวอินทูเมสเซนส์

จากนั้นกรดฟอสฟอริกที่เกิดขึ้นจะทำหน้าที่เป็นสารเร่งปฏิกิริยาขจัดน้ำตรงหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งมีอยู่ปริมาณมากของแหล่งคาร์บอน ส่งผลให้ปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลลดลงและเกิดการสร้างชั้นชาร์ขึ้นที่พื้นผิวของวัสดุที่เคลือบขณะที่เกิดอัคคีภัย โดยชั้นของชาร์ทำหน้าที่ต้านทานไฟโดยป้องกันการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและลดการนำความร้อน ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญสำหรับการติดไฟของเนื้อวัสดุที่ถูกเคลือบอยู่ภายใน นอกจากนี้ยังป้องกันไม่ให้สารซึ่งเป็นองค์ประกอบของวัสดุภายในเปลี่ยนแปลงสภาพกลายเป็นแก๊สที่ติดไฟได้

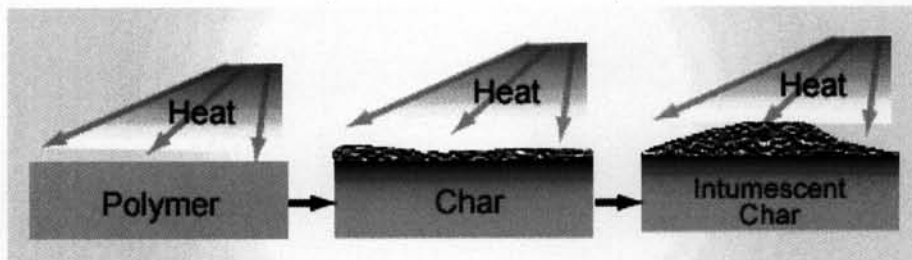
ในกรณีที่แหล่งคาร์บอนที่ใช้มีปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลสูง ปฏิกิริยาการเกิดชาร์จะเป็นดังนี้ โดยชั้นแรกสารซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นองค์ประกอบเกิดปฏิกิริยาการขจัดน้ำ พันธะคู่เหล่านี้ถูกเปลี่ยนแปลงโดยปฏิกิริยาแรดิคัล (radical reaction) ให้กลายเป็นชั้นของชาร์ ในขณะที่เดียวกันสารฟู เช่น เมลามีน เมื่อได้รับความร้อนจะกลายเป็นไอและสลายตัวให้แก๊สไม่ติดไฟ ซึ่งมีผลทำให้ชั้นของชาร์เกิดการพองตัว และสารยึดซึ่งเกิดการหลอมตัวเนื่องจากความร้อนจะละลายและยึดจับแก๊สที่ขยายตัวเป็นมวลที่มีความเหนียว และจับตัวเป็นชั้นโฟมคาร์บอนซึ่งจะเป็นฉนวนกันความร้อน

อย่างไรก็ตาม กระบวนการทางเคมีในการเกิดการพองตัวของสารเคลือบผิวอินทูเมสเซนส์ขึ้นอยู่กับชนิดของส่วนประกอบที่นำมาผสมและสัดส่วนของส่วนประกอบแต่ละส่วน ดังนั้นการเลือกส่วนประกอบควรศึกษากระบวนการทางเคมีในแต่ละขั้นตอนของการเกิดขึ้นโฟม ซึ่ง

ทำหน้าที่เป็นฉนวนกันความร้อน รวมถึงการศึกษาสมบัติของวัสดุอินทนูเมสเซนส์ภายใต้อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง

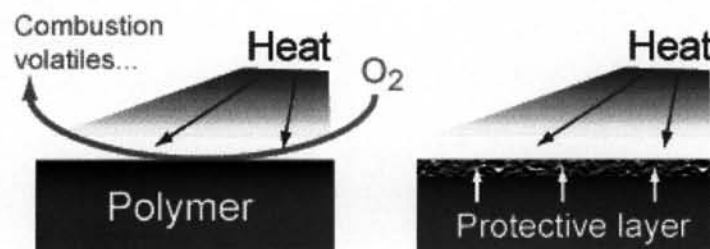
2.8 การเกิดถ่านคาร์บอน (ชาร์) และ Intumescent char [24]

ชาร์เกิดจากกระบวนการสลายตัวเนื่องจากความร้อน ซึ่งมีบทบาทอย่างมากในการหน่วงไฟ การเกิดขึ้นของชาร์มีความสำคัญต่อการสลายตัว เพราะการเกิดชาร์จะไปลดการเกิดแก๊สไวไฟ (flammable gas) อีกนัยหนึ่ง การเกิดชาร์จะไปจำกัดปริมาณของเชื้อเพลิงนั่นเอง หน้าที่ของชาร์คือ ชาร์จะเกิดเป็นชั้นของฉนวนยึดติดกับผิวหน้าของพอลิเมอร์ และเนื่องจากชาร์เกิดการสลายตัวได้ยากกว่าพอลิเมอร์จึงทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้พอลิเมอร์สัมผัสกับเปลวไฟ ดังนั้นการสลายตัวจึงเกิดได้ยากขึ้น การเกิดชาร์และอินทนูเมสเซนส์ชาร์แสดงได้ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การเกิดชาร์และ Intumescent char

เมื่อเกิดชาร์ขึ้นแล้ว ชาร์จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ออกซิเจนแพร่ผ่านเข้าไปยังพื้นผิวที่ถูกเคลือบได้ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การเกิด Protective layer เมื่อสารเคลือบผิวอินทนูเมสเซนส์ได้รับความร้อน

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี ค.ศ. 1996 Horrocks และคณะ [25] ได้ศึกษาการเกิดซาร์ในเส้นใยเซลลูโลสที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวอินทนูเมสเซนส์ที่ประกอบด้วย แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต ผงเมลามีน และเพนตะเอริโทรทอลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเส้นใยสามารถทนต่อเปลวไฟและความร้อนได้สูง เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นซาร์สามารถต้านอากาศและความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงถึง 1200 องศาเซลเซียสได้ จึงสามารถป้องกันเส้นใยเซลลูโลสได้ จากผลการทดลองพบว่าโครงสร้างซาร์ที่เกิดขึ้นใหม่นั้นเกิดจากการที่ซาร์ของเส้นใยเซลลูโลสที่ผ่านการทอหว่งไฟทำปฏิกิริยากับซาร์ของสารเคลือบผิวอินทนูเมสเซนส์กลายเป็นฉนวนความร้อนป้องกันไม่ให้อากาศผ่านเข้าไปยังพื้นผิวของวัสดุทำให้ไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง

นอกจากนี้ Horrocks และคณะ [26] ได้วิเคราะห์ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวในอากาศที่อุณหภูมิ 300-1200 องศาเซลเซียสของผ้าฝ้ายที่ผ่านและไม่ผ่านการตกแต่งหว่งไฟด้วยเทคนิค FTIR พบว่าที่อุณหภูมิการสลายตัวต่ำ (300-450 องศาเซลเซียส) ผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหว่งไฟจะปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิสูงขึ้น (450-800 องศาเซลเซียส) พบว่าปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงค่าสูงสุด เนื่องจากผ้าฝ้ายมีการสลายตัวเพิ่มขึ้น แต่ที่อุณหภูมิสูงขึ้นอีก (800-1200 องศาเซลเซียส) พบว่าแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดจากการสลายตัวของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหว่งไฟกลับมีปริมาณลดลง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ในขณะที่ผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการตกแต่งหว่งไฟยังสลายตัวให้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมาอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น

ในปีเดียวกัน Horrocks ยังได้ศึกษาสิ่งทอที่สามารถทนความร้อนและเปลวไฟได้ [27] ซึ่งแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นเส้นใยธรรมชาติได้แก่ เส้นใยเซลลูโลส เส้นใยขนสัตว์ และเส้นใยประดิษฐ์ที่มีขายทั่วไปตามท้องตลาดที่ทนความร้อนและเปลวไฟได้ปานกลางถึงสูง และส่วนที่ 2 เป็นเส้นใยอะโรมาติกและเส้นใยที่สามารถเกิดซาร์ได้ มีสมบัติเชิงกลที่ยืดหยุ่นและมีความเป็นฉนวนความร้อนที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับเส้นใยส่วนแรก อย่างไรก็ตามเส้นใยในส่วนที่ 2 นี้จะมีราคาแพง ขึ้นรูปได้ยาก และส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากนำกลับมาใช้ใหม่ได้ยาก ในขณะที่เส้นใยประดิษฐ์ชนิดเทอร์โมพลาสติกเช่น เส้นใยพอลิเอสเตอร์ เส้นใยพอลิฟอสฟีน และเส้นใยพอลิอะรามิด เมื่อผ่านการตกแต่งหว่งไฟโดยการตัดแปรหรือการเติมสารเติมแต่งลงไป ในกระบวนการพอลิเมอไรเซชันและ/หรือขั้นตอนการอัดรีดเป็นเส้นใย จะเกิดการหลอมและ/หรือ

เกิดเป็นรูเมื่อได้รับเปลวไฟ ทำให้สามารถนำเส้นใยเหล่านี้ใช้เป็นสิ่งทอกันไฟได้เนื่องจากสามารถเกิดขารได้ ดังนั้นจึงต้องศึกษากลไกและหน้าที่ของขารจากการที่สิ่งทอระบบอินทนูเมสเซนต์ได้รับความร้อนและเปลวไฟ ซึ่งปัจจุบันนี้มีการพัฒนาโดยใช้เส้นใยที่สามารถเกิดขารได้และสารเคลือบผิวอินทนูเมสเซนต์เข้าด้วยกัน จึงทำให้เส้นใยมีความแข็งแรง สามารถต้านความร้อนและเปลวไฟได้เมื่อเทียบกับขารแบบเดิม นอกจากนี้ยังทำให้สิ่งทอมีประสิทธิภาพในการต้านความร้อนมากกว่าเดิม มีราคาถูก และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

ต่อมา Kandola และ Horrocks [15] พบว่าเส้นใยที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการสลายตัวที่แตกต่างจากเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารที่สามารถเกิดขารได้เช่น สารที่ให้กรดลูอิสในเส้นใยเซลลูโลส สารเคลือบผิวอินทนูเมสเซนต์ที่กระจายตัวอยู่ในเส้นใยจะทำปฏิกิริยากันและกลายเป็นโครงสร้างของขารซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการทนความร้อนและเปลวไฟ การใช้สารเคลือบผิวอินทนูเมสเซนต์ร่วมกับเส้นใยจะทำให้เกิดขารโดยกลไกทางเคมีและกายภาพใน semi-liquid intermediate phase เช่น เส้นใยวิสโคส (Visil หรือ Kemira ซึ่งเป็นเส้นใยวิสโคสที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟของบริษัท Lenzing จำกัด) เมื่อได้รับความร้อนจะให้พอลิแอซิด (polyacid) ออกมา นอกจากนี้ระบบอินทนูเมสเซนต์ที่มีแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตก็จะเกิดขารขึ้นในลักษณะเดียวกัน และจากการศึกษาโครงสร้างของขารเบื้องต้นโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนั้น แสดงให้เห็นว่ามีปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้น

Horacek และ Grabner [28] แสดงให้เห็นว่าการใช้สารหน่วงไฟที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบมีข้อดีเนื่องจากการใช้สารหน่วงไฟดังกล่าวไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งตัวอย่างของสารหน่วงไฟประเภทนี้ได้แก่ เมลามีนที่ใช้ในโฟมยืดหยุ่นพอลิยูรีเทน เมลามีน-ไซยานูเรตที่ใช้ในไมล่อน เมลามีนฟอสเฟตที่ใช้ในพอลิโอลิฟิน เมลามีนและเมลามีนฟอสเฟตหรือไดไซยาไดเอไมด์ที่ใช้ในสีทนไฟ กัวนิตินฟอสเฟตที่ใช้ในสิ่งทอ และกัวนิตินซัลฟาเมตที่ใช้ในกระดาษวอลล์เปเปอร์ โดยสารหน่วงไฟประเภทนี้ไม่เป็นพิษ และเมื่อติดไฟจะไม่มีกรดไดออกซินและกรดที่มีแฮโลเจนเป็นองค์ประกอบปลดปล่อยออกมา นอกจากนี้ยังมีค่าน้อยด้วย ข้อดีอีกประการหนึ่งของสารหน่วงไฟประเภทนี้คือ สามารถนำกลับมารีไซเคิลได้และเมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการหน่วงไฟระหว่างสารประกอบไนโตรเจนและไฮดรอกไซด์ของโลหะ (เช่น อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์) พบว่าสารประกอบไนโตรเจนมีประสิทธิภาพสูงกว่า

ต่อมา Hastings [29] ได้เตรียมสารเคลือบผิวอินทนูเมสเซนส์ที่ประกอบด้วยเมลามีนหรือยูเรีย (สารฟู) ไดเพนตะเอริโทรทอล (แหล่งคาร์บอน) แอมโมเนียมฟอสเฟตหรือแอมโมเนียม-พอลิฟอสเฟต (แหล่งกรด) ไวนิลอะซิเตตเรซิน หรืออะคริลิกเรซิน (สารยึด) และวัสดุทนไฟที่มีรูปร่างเป็นเส้นใยสั้น และ/หรือเส้นใยยาว ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นสีทาบ้านหรือเคลือบผ้าได้ โดยวัสดุทนไฟที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 40-55 ส่วนโดยน้ำหนัก ซิลิกอนไดออกไซด์ 40-55 ส่วนโดยน้ำหนัก และสารตัวโดดตัวหนึ่งระหว่างเพอริกออกไซด์ไทเทเนียมไดออกไซด์ โปแทสเซียมออกไซด์ โซเดียมออกไซด์ หรือเซอร์โคเนียมออกไซด์ 0.1-5.0 ส่วนโดยน้ำหนัก

ปี ค.ศ. 1999 Kandola และคณะ [30] ได้แสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่ทำให้ได้ขาร์ที่สามารถหน่วงไฟได้ดีมี 3 ประการ คือประการแรกขาร์ที่เกิดขึ้นต้องมีการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางกันเพื่อลดการเกิดการแตกหักจากการเผาไหม้เมื่อได้รับความร้อน ประการที่สองคือ ขาร์ต้องทำหน้าที่เป็นฉนวนความร้อนได้ เพื่อไม่ให้วัสดุได้รับความร้อนและเปลวไฟ และประการสุดท้ายคือ พื้นผิวของขาร์จะต้องสามารถป้องกันไม่ให้แก๊สต่างๆ อันเป็นเหตุให้วัสดุเกิดการสลายตัวแพร่ผ่านเข้าสู่วัสดุได้

ปี ค.ศ. 2001 เสริมรัฐ เหล่าธรรมทัศน์ และศานติ กุลสิริสวัสดิ์ [31] ได้ศึกษาการตกแต่งหน่วงไฟผ้าฝ้ายด้วยกรดฟอสฟอริกโดยใช้วิธีการจุ่มอัด พบว่าผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วยกรดฟอสฟอริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 มีสมบัติหน่วงไฟที่ดี คือสามารถดับไฟได้เองเมื่อนำแหล่งต้นไฟออก รวมถึงยังคงมีความทนแรงดึงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ แต่มีข้อเสียคือผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟหลังการซักล้างมีความสามารถในการหน่วงไฟลดลงมาก เนื่องจากกรดฟอสฟอริกนี้สามารถละลายน้ำได้ดีในระหว่างการซักล้าง นอกจากนี้ผ้าฝ้ายยังมีแนวโน้มที่จะเป็นสีเหลืองเมื่อใช้กรดฟอสฟอริกเพิ่มมากขึ้น

ปี ค.ศ. 2002 ชูติมา อนันท์ชรินทร์ และคณะ [20] ได้ศึกษาการตกแต่งหน่วงไฟผ้าฝ้ายด้วยแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตในระบบอินทนูเมสเซนส์โดยนำผ้าฝ้ายมาตกแต่งด้วยสารเคลือบผิวที่มีการแปรปริมาณเมลามีนเรซิน เพนตะเอริโทรทอล และอะคริลิกเรซิน จากการวิจัยพบว่าผ้าฝ้ายที่ผ่านการเคลือบผิวนี้มีสมบัติหน่วงไฟที่ดีกว่าผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว มีความคงทนต่อการซักล้างที่ดีรวมถึงความทนแรงดึงไม่ลดลง โดยสูตรที่ทำให้ผ้าฝ้ายมีความสามารถในการหน่วงไฟและคงทนต่อการซักล้างได้ดีที่สุดรวมถึงไม่สูญเสียความแข็งแรงคือ สูตรที่ประกอบด้วยเมลามีนเรซิน 20 ส่วนโดยน้ำหนัก เพนตะเอริโทรทอล 5 ส่วนโดยน้ำหนัก และอะคริลิกเรซิน 20 ส่วนโดยน้ำหนัก

ในปีเดียวกัน Drevelle และคณะ [32] ศึกษาการเคลือบผิวบนผ้าที่เป็นผ้าทอหรือผ้าไม่ทอด้วยสารเคลือบผิวอินทูลูเมสเซนส์ที่มีอะคริลิกเรซินเป็นทั้งแหล่งคาร์บอนและสารยึด และแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตเป็นแหล่งกรด พบว่าการใช้อะคริลิกเรซินเพียงอย่างเดียวทำให้ผ้ามีเสถียรภาพทางความร้อนลดลง แต่เมื่อใช้แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตร่วมกับอะคริลิกเรซินจะทำให้ผ้ามีสมบัติทนวงไฟดีขึ้นเนื่องจากมีขาร์เพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิสูง

ต่อมา อรวิภา ไชยรัตนตรัย [5] ศึกษาการตกแต่งวงจรไฟผ้าฝ้ายด้วยแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตในระบบอินทูลูเมสเซนส์ โดยนำผ้าฝ้ายมาตกแต่งด้วยสารเคลือบผิวที่มีการแปรปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต 3, 5 และ 10%, เมลามีน 10, 15, 20 และ 25% และเอทิลีน-ไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ 10, 15, 20 และ 25% และแบ่ง จากนั้นนำผ้าฝ้ายที่ผ่านการเคลือบแล้วเพียง 1 ด้านมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที และอบผืนอีกด้วยความร้อนแห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นนำไปทำการศึกษาพฤติกรรมและอัตราเร็วในการลุกลามของเปลวไฟแนว 45 องศา ทั้งก่อนและหลังการซัก 10 ครั้ง พบว่าผ้าฝ้ายที่ผ่านการเคลือบด้วยสารเคลือบผิวอินทูลูเมสเซนส์มีพฤติกรรมการลุกไหม้แตกต่างจากผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการตกแต่งวงจรไฟ โดยผ้าฝ้ายจะติดไฟยากกว่า และเมื่อนำแหล่งต้นไฟออก เปลวไฟก็จะดับทันทีหรือเปลวไฟสามารถดับได้เอง นอกจากนี้ผ้าฝ้ายยังคงสมบัติทนวงไฟที่ดีที่มีความคงทนต่อการซักล้าง สูตรสารเคลือบผิวที่มีปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต 10% เมลามีน 15-25% และ เอทิลีน-ไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ 15-25% เป็นสูตรที่ดีที่สุดที่ทำให้ผ้าฝ้ายมีความสามารถในการทนวงไฟและทนต่อการซักล้าง

ปี ค.ศ. 2005 Giraud [33] ได้ศึกษาการใช้ไมโครเ็นแคปซูลชัน (microencapsulation) 2 กลุ่มคือ กลุ่มแรกเป็นการใช้ไโดแอมโมเนียมไฮโดรเจนพอสเฟตร่วมกับการใช้พอลิเอเทอร์-พอลิยูรีเทนเป็นเปลือกหุ้มด้านนอก และกลุ่มที่ 2 เป็นการใช้ไโดแอมโมเนียมไฮโดรเจนพอสเฟตร่วมกับการใช้พอลิเอสเทอร์-พอลิยูรีเทนเป็นเปลือกหุ้มด้านนอก ซึ่งสารทั้งสองกลุ่มเป็นสารทนวงไฟทางการค้าที่ใช้เคลือบสิ่งทอ ซึ่งข้อดีของการใช้การทนวงไฟกลุ่มนี้สำหรับสิ่งทอคือ ทำให้สามารถเข้ากับเนื้อของพอลิเมอร์ได้ดีทำให้มีประสิทธิภาพการทนวงไฟสูง

ในปีเดียวกัน Balabanovich [34] ศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของสารเคลือบผิวอินทูลูเมสเซนส์ที่ใช้เพนตะเอริโทรทอลพอสเฟต (PEPA) และใช้เพนตะเอริโทรทอลพอสเฟตร่วมกับเมลามีนพอสเฟต (PEPAMP) ด้วยเทคนิค TGA, TOF MS และ FTIR พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อนของ PEPA และ PEPAMP ทั้งส่วนที่เป็นของแข็งและแก๊สที่ระเหยได้สามารถทำให้เกิดขาร์ได้ อย่างไรก็ตามขาร์ของ PEPAMP จะมีความเสถียรน้อยกว่าเนื่องจาก

สามารถเกิด thermo-oxidative decomposition นอกจากนี้เมื่อ PEPA สลายตัวจะปล่อยกรดฟอสฟอริกออกมาตามด้วยการเกิดซาร์ ในขณะที่ PEPAMP จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างเพนตะเอริไทรทอลฟอสเฟตและเมลามีนฟอสเฟตแล้วปล่อยความร้อนออกมา อีกทั้งยังได้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการควบแน่นของเมลามีนและผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสอีกด้วย ซึ่งปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสที่เกิดขึ้นจะเป็นเหตุให้วงแหวนเมลามีนเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งทำให้เกิดแก๊สยูเรีย แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สแอมโมเนียขึ้น

นอกจากนี้ในปีเดียวกัน สิริรัตน์ จารุจินดา และคณะ [35] ได้ทำการปรับปรุงผ้าฝ้ายเพื่อให้มีสมบัติทนวงไฟที่คงทนต่อการซักล้างดีขึ้น โดยใช้สารประกอบโซเดียมพอลิฟอสเฟตร่วมกับไคโตซาน โดยทำการจุ่มอัดผ้าฝ้ายด้วยสารประกอบโซเดียมพอลิฟอสเฟตและอบด้วยความร้อนก่อน จากนั้นจึงนำไปจุ่มอัดอีกครั้งด้วยสารละลายไคโตซาน หลังการอบให้ความร้อนไคโตซานจะเกิดเป็นชั้นฟิล์มเคลือบผิวผ้า และเมื่อนำผ้าฝ้ายไปผ่านการซักล้างและตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นนี้สามารถเก็บกักสารประกอบฟอสเฟตที่ละลายน้ำให้คงอยู่ภายในเส้นใยฝ้าย นอกจากนี้ยังพบว่าผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งทนวงไฟด้วยสารประกอบโซเดียมพอลิฟอสเฟตร่วมกับไคโตซาน เมื่อนำมาผ่านการซักล้างจะมีอัตราเร็วในการลุกลามของเปลวไฟลดลงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการซักล้าง

สำหรับโครงการวิจัยนี้เป็นการหาสูตรสารเคลือบผิวอินทูเมสเซนส์ที่คงทนต่อการซักล้างสำหรับปรับปรุงสมบัติทนวงไฟของผ้าฝ้ายโดยทำการแปรชนิดและปริมาณขององค์ประกอบหลักของสารเคลือบผิวดังนี้

แหล่งคาร์บอน: ใช้แป้ง เพนตะเอริไทรทอล และไดเพนตะเอริไทรทอล

แหล่งกรด: ใช้แอมโมเนียมฟอสเฟต และแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต

สารฟู: ใช้ผงเมลามีน และเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน

สารยึด: ใช้อะคริลิกเรซิน (100% อะคริลิกอิมัลชัน และอะคริลิกโคพอลิเมอร์) และเอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์

จากนั้นนำผ้าฝ้ายที่ผ่านและไม่ผ่านการเคลือบทั้งก่อนและหลังการซักล้างมาทดสอบหาพฤติกรรมและอัตราเร็วในการลุกลามของเปลวไฟแนว 45 องศา ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของผ้าฝ้ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด วิเคราะห์สมบัติความร้อนด้วยเทคนิค TGA และศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสีของผ้าฝ้ายภายหลังการเคลือบ