

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฝ้าย

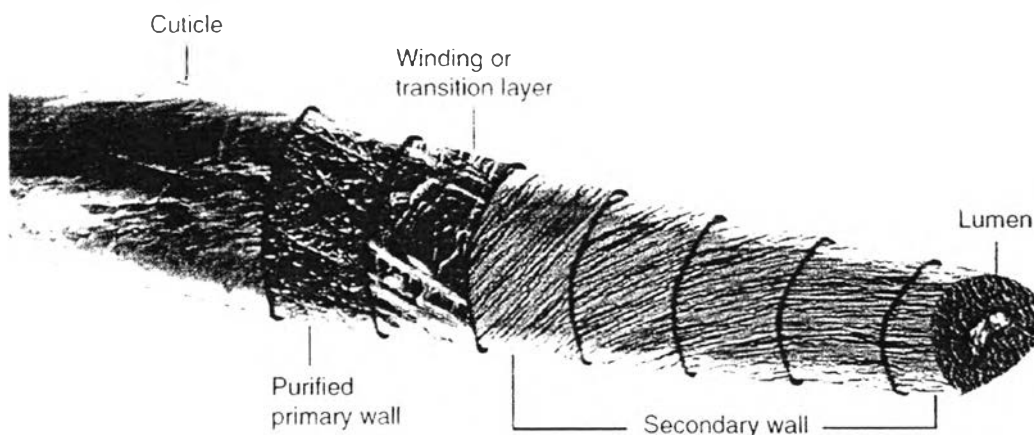
ฝ้าย (cotton) เป็นเส้นใยที่ได้จากธรรมชาติที่สำคัญและเป็นที่ยอมรับอย่างมากในการนำมาใช้งาน ทั่วโลกมีการใช้งานเส้นใยฝ้ายถึงร้อยละ 40 ของเส้นใยทั้งหมด ซึ่งส่วนมากนั้นเส้นใยฝ้ายจะถูกทักทอเป็นผ้าและนำมาใช้ในการผลิตเครื่องแต่งกาย เนื่องจากผ้าฝ้ายจะให้ความรู้สึกสบายเมื่อสวมใส่ มีสัมผัสของเนื้อผ้านุ่มเนียน ระบายอากาศได้ดี และไม่อมเหงื่อ นอกจากนี้แล้วผ้าฝ้ายยังถูกนำไปใช้เป็นอุปกรณ์ตกแต่งภายในบ้านและผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมต่างๆ อีกด้วย

ฝ้ายเป็นพืชที่อยู่ในตระกูล *Gossypium* และมีอยู่ 4 สายพันธุ์หลักที่สำคัญคือ *Hirsutum*, *Barbadense*, *Aboveum* และ *Herbaceum* การปลูกฝ้ายแพร่กระจายเป็นครั้งแรกจากประเทศอินเดียไปยังประเทศอียิปต์ จีนและแปซิฟิกใต้ ซึ่งในปัจจุบันแหล่งเพาะปลูกฝ้ายขนาดใหญ่ตั้งอยู่ทางตอนเหนือของอเมริกา [13] สำหรับเส้นใยหรือปุยฝ้ายที่นำมาทอเป็นผ้าฝ้ายนั้นคือเซลล์ผิวของเปลือกเมล็ดซึ่งมีรูปร่างยาวเหมือนเส้นผม เมื่อปุยฝ้ายผ่านการแยกออกจากเมล็ดและได้รับการทำความสะอาดแล้วก็นำมาปั่นให้เป็นเส้นด้ายเพื่อใช้ทอเป็นผ้าฝ้าย [14] ซึ่งการบ่งบอกถึงคุณภาพของเส้นใยฝ้ายโดยส่วนมากมักจะดูจากความยาวของเส้นใยเป็นหลัก เส้นใยฝ้ายที่มีคุณภาพสูงนั้นเป็นเส้นใยฝ้ายจากอียิปต์ซึ่งมีความยาวอยู่ระหว่าง 25-65 มิลลิเมตร ส่วนเส้นใยฝ้ายทั่วไปจะมีขนาดความยาวอยู่ระหว่าง 13-33 มิลลิเมตรซึ่งมาจากอเมริกา และสุดท้ายเส้นใยฝ้ายขนาดสั้นมีความยาวอยู่ระหว่าง 10-25 มิลลิเมตรพบได้ในประเทศแถบเอเชีย [15]

สำหรับโครงสร้างของเส้นใยฝ้ายแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก คือ

- Cuticle เป็นผิวชั้นนอกสุดของเส้นใยฝ้ายซึ่งประกอบไปด้วยเซลลูโลส (cellulose) และ ซัลฟิโนนที่ทำหน้าที่ในการปกป้องเส้นใย
- Primary wall เป็นชั้นที่อยู่ถัดจากชั้น cuticle ประกอบด้วยเซลลูโลสที่เป็นร่างแหและมีเพคติน (pectin) รวมอยู่ด้วย เซลลูโลสที่มีลักษณะเป็นร่างแหนี้เป็นส่วนสำคัญต่อความแข็งแรงของเส้นใยฝ้ายอย่างมาก
- Secondary wall จะอยู่ระหว่างชั้น primary wall และ lumen ประกอบด้วยเซลลูโลสบริสุทธิ์ ซึ่งมีน้ำหนักประมาณร้อยละ 90 ของน้ำหนักเส้นใยและมีความหนาประมาณ 100 นาโนเมตร
- Lumen มีลักษณะเป็นท่อกลางตามความยาวของเส้นใยซึ่งเป็นส่วนที่อยู่ในสุดของเส้นใยฝ้าย ประกอบด้วยโปรตีน เม็ดสีและแร่ธาตุที่อยู่บนผนัง [16]

โครงสร้างของเส้นใยฝ้ายนั้นได้แสดงไว้ใน ภาพที่ 2.1 และองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยฝ้ายจะแสดงใน ตารางที่ 2.1

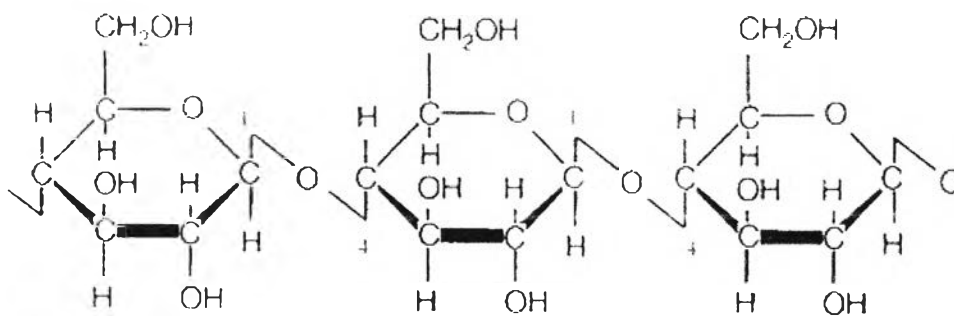


ภาพที่ 2. 1 โครงสร้างของใยฝ้าย [13]

ตารางที่ 2. 1 องค์ประกอบทางเคมีของใยฝ้าย [13]

ส่วนประกอบ	องค์ประกอบ (% น้ำหนักขณะแห้ง)	
	% โดยทั่วไป	% แบบเป็นช่วง
Cellulose	95.0	88.0-96.0
Protein (%N x 6.25)	1.3	1.1-1.9
Pectic substances	0.9	0.7-1.2
Ash	1.2	0.7-1.6
Wax	0.6	0.4-1.0
Total sugars	0.3	0.1-1.0
Organic acids	0.8	0.5-1.0
Pigment	ปริมาณน้อย	-
Other	1.4	-

จากตารางองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยฝ้ายจะเห็นได้ว่าในเส้นใยฝ้ายนั้นจะมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักถึงร้อยละ 95 โดยที่เซลลูโลสนั้นเป็นโมเลกุลของสารประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ที่ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส (glucose) ต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic bond) ที่ตำแหน่งบีต้า-1,4 (β -1,4) ดังแสดงใน ภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2. 2 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส

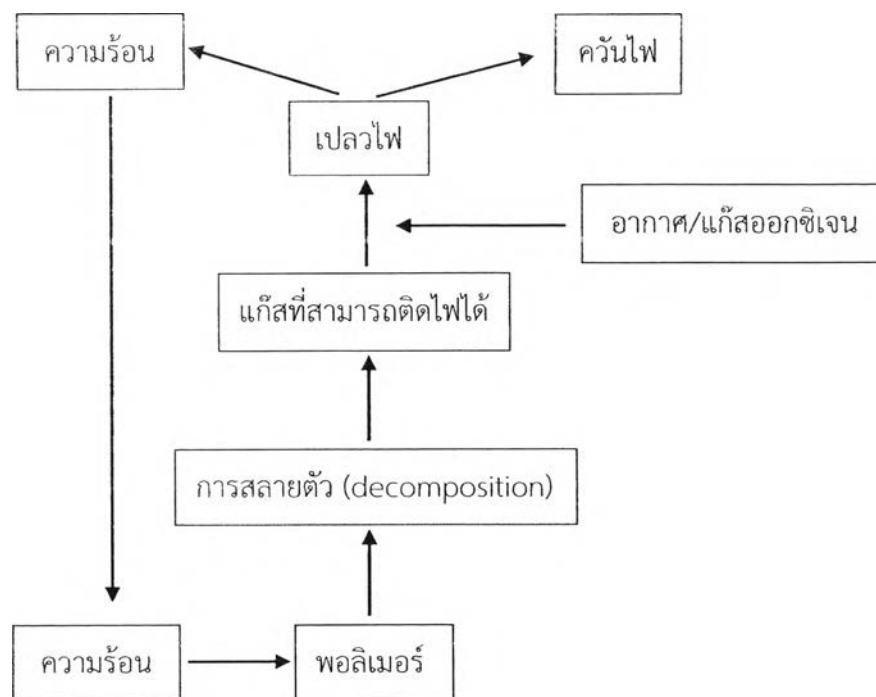
สำหรับสมบัติโดยทั่วไปของเส้นใยฝ้ายนั้นเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรง มีความเป็นผลึกสูง เนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl) อยู่ในโครงสร้างจึงทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่ขึ้น และความแข็งแรงของเส้นใยจะเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 20 เมื่อเส้นใยนั้นเปียก นอกจากนี้เส้นใยฝ้ายยังสามารถดูดความชื้นและกักเก็บอากาศได้ดีอีกด้วย แต่ข้อเสียคือมีความยืดหยุ่นต่ำและยับได้ง่าย นอกจากนี้ยังไม่ทนต่อสภาพที่เป็นกรดเพราะกรดทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส (hydrolysis) ที่พันธะไกลโคซิดิกและทำให้เส้นใยถูกทำลาย

จากสมบัติต่างๆ ของผ้าฝ้ายที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้นทำให้ผ้าฝ้ายนั้นถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวาง แต่ปัญหาที่สำคัญอย่างมากของการนำเอาผ้าฝ้ายไปใช้เป็นอุปกรณ์ตกแต่งภายในบ้านคือ ผ้าฝ้ายสามารถติดไฟได้ง่าย ซึ่งถ้าหากเกิดประกายไฟจากอุบัติเหตุภายในบ้านอาจนำไปสู่การเกิดเป็นอัคคีภัยร้ายแรงได้ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงสมบัติการหน่วงไฟของผ้าฝ้ายให้ดีขึ้นก่อนการนำมาใช้งาน

2.2 การเผาไหม้ของวัสดุสิ่งทอ

วัสดุสิ่งทอโดยทั่วไปเมื่อได้รับความร้อนจากแหล่งกำเนิดหรือเปลวไฟจะเกิดการสลายตัวและกลายเป็นแก๊สที่ติดไฟได้ง่าย เรียกกระบวนการนี้ว่าไพโรลิซิส (pyrolysis) จากนั้นแก๊สที่ติดไฟได้ง่ายดังกล่าวจะไปผสมกับแก๊สออกซิเจนในอากาศที่อัตราส่วนและอุณหภูมิที่เหมาะสม ซึ่งจะทำให้เกิดการติดไฟขึ้น เรียกกระบวนการทั้งหมดนี้ว่ากระบวนการเผาไหม้ (combustion) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้ก็จะกลายเป็นควันไฟและความร้อน โดยความร้อนที่เกิดขึ้นก็จะทำให้วัสดุสิ่งทอมีอุณหภูมิสูงขึ้นและเกิดการสลายตัวต่อไปเป็นวงจรเช่นเดิม [17] ดังใน ภาพที่ 2.3

จากกระบวนการดังกล่าวจะเห็นได้ว่าองค์ประกอบที่ทำให้วัสดุเกิดการเผาไหม้มีอยู่ 3 องค์ประกอบด้วยกัน อย่างแรกคือเชื้อเพลิง (fuel) ซึ่งในที่นี้เป็นแก๊สที่ติดไฟได้ง่าย อย่างที่สองคือแก๊สออกซิเจนที่มีอยู่ในอากาศทั่วไป และสุดท้ายคือความร้อนที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้หรือแหล่งให้ความร้อนอื่นๆ หากขาดองค์ประกอบอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหากองค์ประกอบทั้งสามอย่างประกอบกันในอัตราส่วนที่ไม่เหมาะสมแล้วกระบวนการเผาไหม้ก็จะบรรเทาลงหรือหยุดไป



ภาพที่ 2. 3 กระบวนการเผาไหม้ของวัสดุ [17]

2.3 การหน่วงไฟ

การหน่วงไฟเป็นการทำให้วัสดุที่ติดไฟมีอัตราการเผาไหม้ที่ช้าลงรวมไปถึงการดับไฟได้ด้วยตนเอง ซึ่งการหน่วงไฟนั้นทำได้โดยการเติมสารหน่วงไฟที่ทำหน้าที่ในการลดหรือขัดขวางวงจรของการเผาไหม้ไม่ให้ดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่อง

2.3.1 กลไกการหน่วงไฟ [18]

กลไกการหน่วงไฟสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ ได้แก่ กลไกการหน่วงไฟโดยการขัดขวางทางกายภาพและทางเคมีซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารหน่วงไฟ

2.3.1.1 การขัดขวางทางกายภาพ

สามารถแบ่งออกได้เป็นกลไกหลัก 3 กลไก คือ

- การทำให้ระบบเย็นตัวลงด้วยสารหน่วงไฟที่ดูดความร้อน กลไกนี้เริ่มจากการที่สารหน่วงไฟดูดเอาความร้อนเข้าไปเพื่อใช้ในการสลายตัวของสารหน่วงไฟ ซึ่งทำให้วัสดุได้รับความร้อนน้อยลงจนระบบมีพลังงานไม่เพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้ และนอกจากนี้การสลายตัวของสารหน่วงไฟยังให้น้ำออกมาซึ่งจะช่วยลดความร้อนให้กับผิวของวัสดุได้อีกทางหนึ่งด้วย

- การเคลือบบนผิวของวัสดุ กลไกนี้จะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุได้รับความร้อนจนกระทั่งสารหน่วงไฟเกิดการหลอมละลาย (melt) และออกมาปกคลุมบริเวณผิวหน้าของวัสดุซึ่งสารหน่วงไฟที่ปกคลุมผิวนั้นจะช่วยกักขังแก๊สที่ติดไฟได้ง่ายที่เกิดจากการสลายตัวของวัสดุไม่ให้ออกไปยังกระบวนการเผาไหม้ นอกจากนี้ยังเป็นการป้องกันไม่ให้วัสดุไปสัมผัสกับความชื้นและป้องกันไม่ให้แก๊สออกซิเจนสามารถผ่านเข้าไปทำให้ปฏิกิริยากับแก๊สที่ติดไฟได้อีกด้วย

- การปลดปล่อยแก๊สที่ไม่ติดไฟ กลไกนี้จะเกิดขึ้นจากการที่สารหน่วงไฟนั้นได้รับความร้อนและเกิดการสลายตัวให้แก๊สที่ติดไฟยากหรือไม่ติดไฟ เช่น แก๊สไนโตรเจน แก๊สแอมโมเนีย แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สไฮโดรเจนคลอไรด์ และไอน้ำ เป็นต้น ส่งผลให้อัตราส่วนของแก๊สที่ติดไฟได้กับแก๊สออกซิเจนเจือจางลงจนไม่เหมาะสมจะทำให้เกิดกระบวนการเผาไหม้ขึ้น

2.3.1.2 การขัดขวางทางเคมี

แบ่งได้จากการทำงานของสารหน่วงไฟในวัฏภาคทั้ง 2 คือ

- วัฏภาคแก๊ส (gas phase) เมื่อสารหน่วงไฟได้รับความร้อนจะเกิดเป็นอนุโมลอิสระที่สามารถจับกับอนุโมลอิสระที่เกิดจากการเผาไหม้ของวัสดุ และกลายเป็นแก๊สอื่นซึ่งทำให้ปฏิกิริยาลูกโซ่ของกระบวนการเผาไหม้สิ้นสุดลง

- วัฏภาคของแข็ง (condensed phase) สารหน่วงไฟจะทำหน้าที่เร่งให้วัสดุเกิดการสลายตัวเร็วขึ้นโดยทำปฏิกิริยากับกรด เกิดการขจัดน้ำและกลายเป็นถ่านคาร์บอนมาเคลือบพื้นผิวของวัสดุ ซึ่งจะทำหน้าที่แยกวัสดุให้ห่างจากเปลวไฟและความร้อนจนไม่สามารถส่งไปถึงวัสดุได้

2.3.2 สารหน่วงไฟ

สารหน่วงไฟเป็นสารที่เติมลงไปเพื่อทำหน้าที่ในการหน่วงไฟให้กับวัสดุ โดยสามารถจำแนกประเภทของสารหน่วงไฟได้จากองค์ประกอบที่มีอยู่ในโครงสร้าง ซึ่งสารหน่วงไฟแต่ละชนิดก็จะมีกลไกการหน่วงไฟที่แตกต่างกันด้วย

2.3.2.1 สารหน่วงไฟที่มีเฮโลเจนเป็นองค์ประกอบ [19]

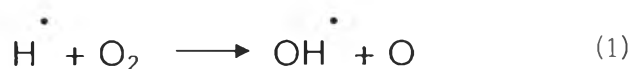
สารหน่วงไฟที่มีเฮโลเจนเป็นองค์ประกอบเป็นสารหน่วงไฟที่มีประสิทธิภาพที่สุดในปัจจุบัน สำหรับประสิทธิภาพในการหน่วงไฟนั้นก็จะขึ้นอยู่กับชนิดของเฮโลเจนที่เป็นองค์ประกอบในสารหน่วงไฟ เนื่องจากกลไกการหน่วงไฟของสารหน่วงไฟประเภทนี้จะสัมพันธ์กับพลังงานที่ใช้ในการแตกออกของพันธะคาร์บอน-เฮโลเจนนั่นเอง พลังการแตกตัวนั้นจะแสดงดัง ตารางที่ 2.2

กลไกการหน่วงไฟของสารหน่วงไฟที่มีเฮโลเจนเป็นองค์ประกอบจะเป็นการขัดขวางทางเคมีในวัฏภาคแก๊สซึ่งเกิดจากการสลายตัวของสารหน่วงไฟให้สารที่ทำหน้าที่ในการดักจับอนุโมลอิสระที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเผาไหม้ เนื่องจากอนุโมลอิสระเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาต่อและให้พลังงานความร้อนสูงออกมา ซึ่งพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ต่อไป

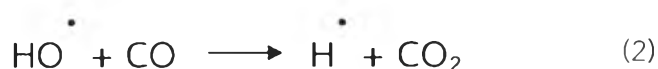
ตารางที่ 2. 2 พลังงานที่ใช้ในการแตกออกของพันธะคาร์บอน-เฮโลเจน [19]

พันธะ	พลังงานพันธะ (kJ/mol)	อุณหภูมิที่เกิดการสลายตัว (°C)
C _{aliph} -F	443-450	>500
C _{arom} -Cl	419	>500
C _{aliph} -Cl	339-352	370-380
C _{benzine} -Br	214	150
C _{aliph} -Br	285-293	290
C _{arom} -Br	335	360
C _{aliph} -I	222-235	180

การทำปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระกับออกซิเจนในกระบวนการเผาไหม้

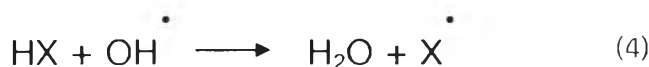
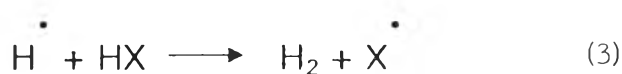


จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอนมอนอกไซด์กับอนุมูลอิสระของไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนที่ให้พลังงานความร้อนสูง



เนื่องจากสองปฏิกิริยาข้างต้นมีผลต่อกระบวนการเผาไหม้เป็นอย่างมาก ดังนั้นการจะห่วงไฟให้ได้ประสิทธิภาพในวัฏภาคแก๊สนั้นจำเป็นต้องหยุดปฏิกิริยาใดปฏิกิริยาหนึ่งหรือทั้งสองปฏิกิริยาให้ได้

กลไกการห่วงไฟจะเริ่มจากสารห่วงไฟที่มีเฮโลเจนเป็นองค์ประกอบไปจับกับอนุมูลอิสระของไฮโดรเจนได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สไฮโดรเจนและอนุมูลอิสระของเฮโลเจน และจะเกิดปฏิกิริยาเช่นเดียวกันกับกรณีของอนุมูลอิสระไฮดรอกไซด์แต่จะได้น้ำออกมาแทน ตามสมการที่ (3) และ (4)



ส่วนอนุมูลอิสระของเฮโลเจนที่เกิดขึ้นก็จะไปทำปฏิกิริยากับแก๊สที่ระเหยออกมาจากวัสดุและเกิดเป็นแก๊สไฮโดรเจนเฮไลด์กลับมาอีกครั้งเพื่อใช้ในการห่วงโซ่ต่อไปดังสมการที่ (5)



นอกจากนี้ยังมีการนำเอาแอนติโมนีออกไซด์ (Sb_2O_3) มาทำหน้าที่เป็นสารช่วยเสริมการห่วงโซ่ (synergist) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสารห่วงโซ่ที่มีเฮโลเจนเป็นองค์ประกอบให้ดียิ่งขึ้น โดยแอนติโมนีออกไซด์นั้นจะไปเร่งการแตกตัวของสารห่วงโซ่ที่มีเฮโลเจนเป็นองค์ประกอบกลายเป็นแอนติโมนีเฮไลด์ซึ่งจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดอนุมูลอิสระไฮโดรเจนและอนุมูลอิสระไฮดรอกไซด์ที่ดียิ่งขึ้น

2.3.2.2 สารห่วงโซ่ที่เป็นสารอนินทรีย์ [20]

สารห่วงโซ่ประเภทนี้เป็นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางเนื่องจากเป็นสารห่วงโซ่ที่มีราคาถูก มีความเป็นพิษต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับสารห่วงโซ่ที่มีเฮโลเจนและฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ และนอกจากจะมีสมบัติในการห่วงโซ่แล้วสารห่วงโซ่ประเภทนี้ยังมีสมบัติในการลดควันที่เกิดจากการเผาไหม้อีกด้วย อย่างไรก็ตามสารห่วงโซ่ประเภทนี้ก็ยังมีข้อด้อยในการใช้งานเนื่องจากเป็นสารห่วงโซ่ที่มีความคงทนต่ำและต้องใช้สารห่วงโซ่ในปริมาณสูง (ประมาณร้อยละ 40-60 โดยน้ำหนัก) จึงจะทำให้ได้ประสิทธิภาพการห่วงโซ่ที่สูง ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการขึ้นรูปและสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ได้ ตัวอย่างสารห่วงโซ่ที่เป็นสารอนินทรีย์นี้ ได้แก่ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) และสารประกอบโบรอน เป็นต้น

กลไกการห่วงโซ่ของสารห่วงโซ่ประเภทนี้ เริ่มจากการดูดความร้อนเข้าไปเพื่อใช้ในการสลายตัวจึงทำให้วัสดุได้รับความร้อนน้อยลง และปฏิกิริยาการสลายตัวนั้นก็就会ให้น้ำออกมาเจือจางแก๊สที่ติดไฟได้ในกระบวนการเผาไหม้อีกด้วย สำหรับการใช้งานสารห่วงโซ่ประเภทนี้ยังจะต้องพิจารณาถึงความร้อนที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปของพอลิเมอร์เนื่องจากอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์มีความเสถียรทางความร้อนที่ต่ำ (180-200 องศาเซลเซียส) จึงเหมาะกับการใช้ในพอลิเมอร์ที่มีการขึ้นรูปที่อุณหภูมิไม่เกิน 200 องศาเซลเซียส ส่วนการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิสูงนั้นมักจะใช้แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีความเสถียรทางความร้อนสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส

2.3.2.3 สารหน่วงไฟที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ [21]

กลไกการหน่วงไฟของสารหน่วงไฟที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบนั้นจะเกิดจากการสลายตัวให้แก๊สที่ไม่ติดไฟเช่น แก๊สแอมโมเนีย (NH₃) และแก๊สไนโตรเจน (N₂) ซึ่งจะทำหน้าที่เจือจางแก๊สที่ติดไฟได้ทำให้อัตราส่วนนั้นไม่เหมาะสมกับการติดไฟ นอกจากนั้นยังสามารถเกิดการเชื่อมขวางกับวัสดุในวัฏภาคของแข็งซึ่งจะทำให้วัสดุเสถียรที่อุณหภูมิสูงอีกด้วย ตัวอย่างของสารหน่วงไฟประเภทนี้ได้แก่ สารประกอบของเมลามีน เช่น เมลามีน (melamine) และ เมลามีนไซยานูเรต (melamine cyanurate) ซึ่งส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้ในการหน่วงไฟให้กับโพลีเอทิลีน (polyurethane foam) และพอลิเอไมด์ (polyamide)

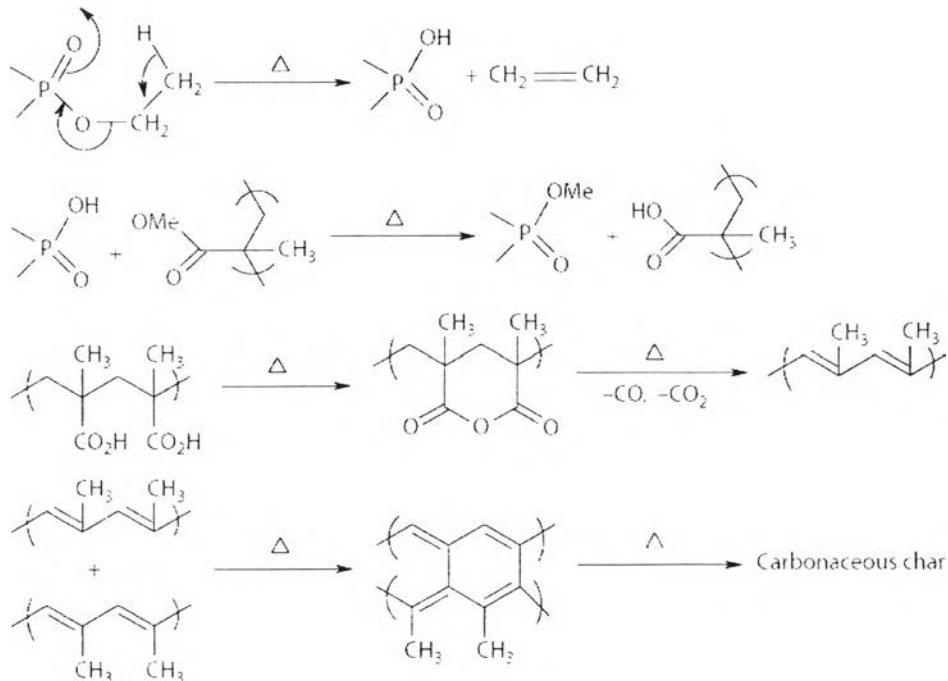
2.3.2.4 สารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ [10]

ในปัจจุบันสารหน่วงไฟประเภทนี้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมเพื่อใช้แทนสารหน่วงไฟที่มีเฮโลเจนเป็นองค์ประกอบซึ่งปลดปล่อยแก๊สไฮโดรเจนเฮไลด์ที่เป็นพิษออกมาสำหรับสารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายจำพวก ได้แก่ ฟอสฟอรัสแดง สารประกอบฟอสเฟต สารประกอบออร์แกโนฟอสฟอรัส และสารประกอบคลอโรฟอสฟอรัส สารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบนั้นมีกลไกการหน่วงไฟในวัฏภาคของแข็งหรือวัฏภาคแก๊สหรือสามารถที่จะหน่วงไฟได้ทั้งในสองวัฏภาค ซึ่งกลไกที่เกิดขึ้นจะเกี่ยวข้องกับลักษณะโครงสร้างของพอลิเมอร์ รวมไปถึงสถานะและองค์ประกอบของสารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบด้วย สำหรับกลไกการหน่วงไฟในวัฏภาคของแก๊สนั้นจะเกิดจากสารกลุ่มไตรฟีนิลฟอสฟีนออกไซด์ (triphenyl phosphine oxide) และไตรฟีนิลฟอสเฟต (triphenyl phosphate) เกิดการสลายตัวของสารหน่วงไฟและเกิดเป็นอนุมูลอิสระที่ไปทำหน้าที่จับอนุมูลอิสระของไฮโดรเจนและก่อให้เกิดอนุมูลอิสระของออกซิเจนออกมาแทนที่ จึงเป็นการลดปริมาณของอนุมูลอิสระที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้เช่นอนุมูลอิสระไฮโดรเจน ซึ่งกลไกจะเป็นไปตามสมการที่ 6-11





กลไกการหน่วงไฟในวัสดุภาคของแข็งนั้นส่วนใหญ่จะเกิดจากสารพวกกรดฟอสฟอริก (phosphoric acid) และพวกเอสเทอร์ของฟอสฟอรัสที่มีพันธะ P-O-C สารที่เกิดจากการสลายตัวของสารหน่วงไฟนี้ส่วนใหญ่จะถูกใช้ในการหน่วงไฟของเซลลูโลสโดยจะเกิดปฏิกิริยาฟอสไฟริเลชัน (phosphorylation) ที่หมู่ไฮดรอกซิลของคาร์บอนตัวที่ 6 จากนั้นเกิดการคายน้ำ (dehydration) ที่ผิวของเซลลูโลสและนำไปสู่การเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเป็นถ่านคาร์บอนปกคลุมพื้นผิวของวัสดุซึ่งจะทำหน้าที่แยกวัสดุให้ห่างจากเปลวไฟและความร้อนจนไม่สามารถส่งไปถึงวัสดุได้ นอกจากนี้ยังถูกนำไปใช้หน่วงไฟในพอลิเมอร์ที่มีออกซิเจนในโครงสร้างดังเช่น ในกรณีของโคพอลิเมอร์ของเมทาคริเลต (methacrylate) กับเอสเทอร์ของฟอสฟอรัส ดังใน ภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 กลไกการหน่วงไฟของสารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบในโคพอลิเมอร์ของเมทาคริเลต [10]

สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพในการหน่วงไฟให้กับสารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบนั้นสามารถทำได้โดยการเติมไนโตรเจนลงไปโครงสร้างซึ่งจะก่อให้เกิดการทำงาน

ร่วมกันของฟอสฟอรัสและไนโตรเจน โดยการมีพันธะ P-N ในโครงสร้างจะทำให้ได้ประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่สูงกว่าการมีพันธะ P-C และ P-O เนื่องจากความเป็นนิวคลีโอฟิลิก (nucleophilic) ที่สูงกว่าจึงช่วยให้เกิดปฏิกิริยาฟอสฟรีเลชันกับหมู่ไฮดรอกซิลได้ดีขึ้นและนำไปสู่การเกิดเป็นถ่านคาร์บอนในปริมาณที่มากขึ้นอีกด้วย

2.3.2.5 สารหน่วงไฟประเภทอินทุมেসเซนต์ [22]

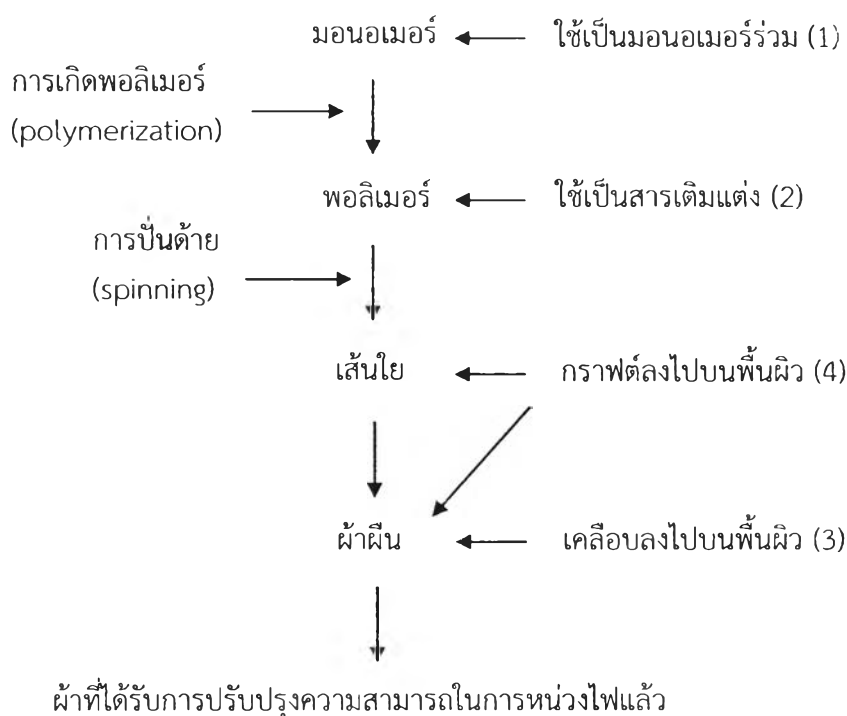
คำว่า อินทุมেসเซนต์ (intumescent) มาจากภาษาลาตินซึ่งมีความหมายว่าการบวมขึ้น และจะใช้คำนี้กับสารหน่วงไฟบางประเภทที่ได้รับความร้อนแล้วจะเกิดการบวมตัวและขยายตัวของโฟมถ่านคาร์บอนขึ้นมาปกคลุมพื้นผิวของวัสดุเอาไว้ โฟมถ่านคาร์บอนนี้จะทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันการสัมผัสกันระหว่างความร้อนกับวัสดุและยังทำหน้าที่ป้องกันการส่งผ่านของแก๊สที่ติดไฟไม่ให้ออกไปสู่กระบวนการเผาไหม้อีกด้วย สำหรับองค์ประกอบของสารหน่วงไฟอินทุมেসเซนต์จะประกอบไปด้วยสามองค์ประกอบหลัก คือ สารที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดกรด (acid source) สารที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดถ่านคาร์บอน (carbonization agent) และสารที่ทำให้เกิดฟอง (blowing agent) ซึ่งได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2. 3 ตัวอย่างองค์ประกอบของสารหน่วงไฟอินทุมেসเซนต์ [22]

(ก) แหล่งกำเนิดกรด	(ข) แหล่งกำเนิดถ่านคาร์บอน
กรดอนินทรีย์ (inorganic acid)	แป้ง (starch)
ฟอสฟอริก (phosphoric)	เดกซ์ทริน (dextrins)
ซัลฟิวริก (sulfuric)	ซอร์บิทอล (sorbitol)
โบริก (boric)	เพนตะอิริไทรตอล (pentaerythritol)
เกลือแอมโมเนียม (ammonium salts)	ฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน (phenol-formaldehyde resins)
ฟอสเฟต (phosphates)	เมธิลอลเมลามีน (methylol melamine)
พอลิฟอสเฟต (polyphosphates)	ถ่านคาร์บอนที่ได้จากพอลิเมอร์
โบเรต (borates)	(ค) สารที่ทำให้เกิดฟอง
พอลิโบเรต (polyborates)	ยูเรีย (urea)
ซัลเฟต (sulfates)	ยูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน (urea-formaldehyde resin)
เฮไลด์ (halides)	ไดไซยานไดอะไมด์ (dicyandiamide)
เมลามีนฟอสเฟต (melamine phosphate)	เมลามีน (melamine)
สารประกอบออร์แกโนฟอสฟอรัส (organophosphorus compounds)	
ไตรครีซิลฟอสเฟต (tricresyl phosphate)	
อัลคิล ฟอสเฟต (alkyl phosphates)	
เฮโลอัลคิล ฟอสเฟต (haloalkyl phosphates)	

2.3.3 การใช้สารหน่วงไฟในเส้นใย

การเติมสารหน่วงไฟลงไปเพื่อทำหน้าที่หน่วงไฟให้กับเส้นใยนั้นอาจแบ่งออกเป็น 4 แบบหลัก ดังแสดงใน ภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2. 5 แผนภูมิแสดงวิธีการเติมสารหน่วงไฟลงในเส้นใย [6]

- วิธีแรกจะเป็นการใช้สารหน่วงไฟเป็นมอนอเมอร์ร่วม (co-monomer) โดยจะผสมมอนอเมอร์สารหน่วงไฟลงในมอนอเมอร์ของเส้นใย แล้วจึงค่อยทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันออกมาเป็นพอลิเมอร์ร่วมและปั่น (spin) ออกมาเป็นเส้นใยเพื่อทำเป็นผ้าต่อไป ซึ่งการทำเช่นนี้จะมีข้อดีคือสารหน่วงไฟที่ได้มีความคงทนและสามารถเข้ากันได้ดีกับเส้นใย แต่ข้อเสียหลักของวิธีที่กล่าวมาคือทำให้สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของเส้นใยนั้นเปลี่ยนแปลงไป

- วิธีที่สองคือการเติมสารหน่วงไฟลงไปเพื่อทำหน้าที่เป็นสารเติมแต่ง (additive) ในพอลิเมอร์แล้วจึงปั่นออกมาเป็นเส้นใย ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายต่อการผลิตในกระบวนการอุตสาหกรรม แต่มีข้อจำกัดในหลายด้านทั้งเรื่องของความคงทนต่อการซักล้างที่ต่ำและข้อจำกัดด้านปริมาณของสารหน่วงไฟที่เติมลงไป เนื่องจากจะทำให้การขึ้นรูปเป็นเส้นใยทำได้ยากและยังส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลของผ้าเปลี่ยนไปอีกด้วย

- วิธีที่สามคือการเพิ่มสมบัติการหน่วงไฟของผ้าที่ถูกถักทอเป็นผ้าผืนแล้วโดยใช้เทคนิคที่เรียกว่า การจุ่มอัด-อบแห้ง-ผืน (pad-dry-cure) ซึ่งจะนำเอาผ้าผืนไปจุ่มลงในสารละลาย

ที่มีสารหน่วงไฟอยู่ แล้วจากนั้นบีบอัดผ่านลูกกลิ้งและสุดท้ายจึงให้ความร้อนเพื่อเคลือบสารหน่วงไฟลงไปในพื้นผิวของผ้า

- และวิธีสุดท้ายเป็นการทำให้เกิดพันธะโคเวเลนต์ผ่านปฏิกิริยากราฟต์ระหว่างสารหน่วงไฟกับเส้นใยหรือผ้าที่ขึ้นรูปเรียบร้อยแล้ว ซึ่งจะมีข้อดีคือทำให้สารหน่วงไฟนั้นมีความคงทนต่อการใช้งานและการซักล้าง และนอกจากนี้ยังไม่ทำให้สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของผ้าเปลี่ยนแปลงไปมากนัก [6]

ดังนั้นวิธีการกราฟต์สารหน่วงไฟลงไปในเส้นใยหรือผ้าจึงมีความน่าสนใจเป็นอย่างมาก ซึ่งการจะทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์ขึ้นนั้นก็จะมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ไม่ว่าจะเป็นการฉายแสงยูวี [1, 2] การฉายรังสีแกมมา [3-5] และการอาบพลาสมา [6-9] โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเหล่านี้จะไปทำหน้าที่ในการเหนี่ยวนำให้เกิดการสร้างพันธะโคเวเลนต์ระหว่างสารหน่วงไฟกับพื้นผิวของเส้นใยขึ้นมา

2.4 พลาสมา

2.4.1 คำจำกัดความของพลาสมา

พลาสมา (plasma) จัดได้ว่าเป็นสถานะที่ 4 ของสสาร พลาสมาประกอบด้วยอนุภาคมูลีอิสระ อนุภาคที่มีประจุทั้งประจุบวกและประจุลบในอัตราส่วนที่ทำให้ประจรรวมเป็นศูนย์ และการอยู่รวมกันของอนุภาคเหล่านี้เป็นแบบประหนึ่งเป็นกลาง พลาสมานั้นสามารถเกิดได้โดยการให้สนามไฟฟ้าแก๊สที่เป็นกลาง เมื่อพลังงานมากพอจะทำให้ไอเล็กตรอนอิสระชนกับอะตอมและทำให้เกิดการหลุดออกของอิเล็กตรอนกระบวนการนี้เรียกว่ากระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจนทำให้มีการเพิ่มขึ้นของจำนวนอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาอย่างมากและกลายเป็นพลาสมาในที่สุด [23]

โดยทั่วไปแล้วพลาสมาจะมีอยู่สองประเภทหลักซึ่งจะแบ่งโดยอุณหภูมิของพลาสมาที่เกิดขึ้น คือ พลาสมาอุณหภูมิสูง (thermal plasma หรือ hot plasma) และพลาสมาอุณหภูมิต่ำ (non-thermal plasma หรือ cold plasma) สำหรับพลาสมาอุณหภูมิสูงนั้นจะเป็นพลาสมาที่มีความดันของแก๊สในระบบใกล้เคียงกับความดันบรรยากาศ มีการชนกันของอิเล็กตรอนอิสระกับอะตอมเป็นจำนวนมากจึงเกิดการแตกตัวเป็นไอออนจำนวนมากตามไปด้วย เป็นผลทำให้อุณหภูมิของพลาสมามีอุณหภูมิต่างกันหลายพันองศา พลาสมาชนิดนี้จึงเหมาะกับการนำไปใช้งานด้านการตัดและการเชื่อม ในขณะที่พลาสมาอุณหภูมิต่ำนั้นมีความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศและมีอุณหภูมิของพลาสมาที่ต่ำกว่าพลาสมาอุณหภูมิสูงมาก เนื่องจากปริมาณแก๊สที่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนมีจำนวนน้อย ดังนั้นจึงทำให้พลาสมาอุณหภูมิต่ำเหมาะกับการใช้งานด้านการดัดแปรพื้นผิวของวัสดุมากกว่าพลาสมาอุณหภูมิสูง [24] โดยพลาสมาอุณหภูมิต่ำนี้มีแหล่งกำเนิดพลาสมาหลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (direct current, DC) [25, 26] แหล่งกำเนิดที่เป็นคลื่นไมโครเวฟ (microwave) ที่มีความถี่ 915 MHz ถึง 2.45 GHz [27, 28] และแหล่งกำเนิดที่เป็นคลื่นความถี่วิทยุ (radio frequency) ที่มีความถี่ 13.56 ถึง 27.12 MHz [9, 29]

2.4.2 การดัดแปรพื้นผิวของวัสดุสิ่งทอโดยพลาสมา

การดัดแปรพื้นผิวของวัสดุสิ่งทอโดยการใช้พลาสมาอุณหภูมิต่ำกำลังได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา เหตุผลก็คือ พลาสมาอุณหภูมิต่ำนั้นสามารถปรับปรุงสมบัติของพื้นผิววัสดุสิ่งทอโดยไม่ทำให้สมบัติโดยรวมของวัสดุเปลี่ยนไปมากนัก สามารถใช้งานได้หลากหลายขึ้นอยู่กับแก๊สที่เลือกใช้ในกระบวนการอาบพลาสมา และยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเนื่องจากกระบวนการอาบพลาสมาทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเสียหรือเป็นพิษในจำนวนน้อย นอกจากนี้กระบวนการอาบพลาสมายังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมจริงได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามวิธีการอาบพลาสมาอุณหภูมิต่ำนั้นยังมีข้อจำกัดก็จะต้องทำในสภาวะความดันต่ำนั่นเอง

สำหรับการปรับเปลี่ยนสมบัติของวัสดุสิ่งทอโดยการใช้พลาสมานั้นชนิดของแก๊สที่ใช้ในกระบวนการอาบพลาสมาจะเป็นตัวกำหนดสมบัติที่เกิดขึ้นหลังผ่านกระบวนการอาบพลาสมา ตัวอย่างเช่น การอาบพลาสมาของแก๊สไนโตรเจน แก๊สออกซิเจนและอากาศ จะทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันที่มีสมบัติความชอบน้ำ (hydrophilicity) [30-32] ส่วนการอาบพลาสมาของแก๊สเตตระฟลูออโรมีเทน (CF_4) แก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6) นั้นจะทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำขึ้น (hydrophobicity) [29, 33, 34] ในขณะที่การอาบพลาสมาด้วยแก๊สเฉื่อยจำพวกอาร์กอนและฮีเลียม จะทำให้เกิดการแตกออกของพันธะบนพื้นผิววัสดุสิ่งทอซึ่งส่งผลให้เกิดการทำความสะอาดผิว (cleaning) การกัดผิว (etching) [35] และนอกจากนี้ยังทำให้เกิดการพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) และการกราฟต์ (grafting) ลงบนพื้นผิวของวัสดุสิ่งทออีกด้วย [6-9]

2.5 เทคนิคการวิเคราะห์ผ้า

เทคนิคที่ใช้ในการพิสูจน์เอกลักษณ์และยืนยันถึงการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิว รวมไปถึงเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อนของผ้าจะถูกแสดงดังต่อไปนี้

2.5.1 เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

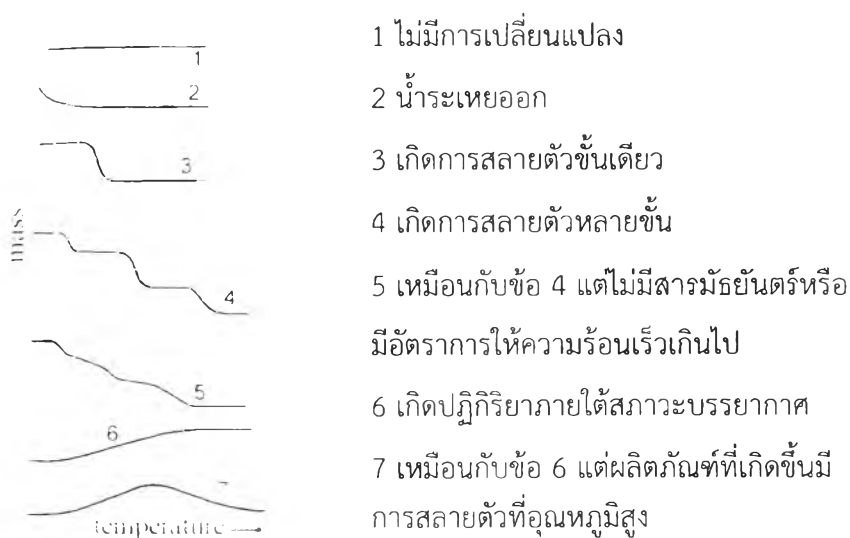
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสง และเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุในระดับจุลภาค โดยจะใช้ลำอิเล็กตรอนฉายลงไปบนวัสดุและเกิดอันตรกิริยาระหว่างวัสดุกับลำอิเล็กตรอนแล้วให้อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) อิเล็กตรอนที่เกิดการกระเจิงกลับ (back-scattered electron) และรังสีเอ็กซ์ (X-ray) ซึ่งจะถูกรวบรวมและแสดงออกมาเป็นข้อมูลภาพของโครงสร้างพื้นผิวของวัสดุ ดังนั้นเทคนิคนี้จึงถูกนำมาใช้เพื่อการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของลักษณะพื้นฐานบนพื้นผิวของผ้าฝ้ายที่เกิดขึ้นหลังจากผ่านการกราฟต์ด้วยสารหน่วงไฟ และนอกจากนี้ยังใช้เพื่อศึกษาลักษณะพื้นฐานถ่านคาร์บอนที่เกิดขึ้นของผ้าฝ้ายก่อนและหลังการกราฟต์ด้วยสารหน่วงไฟหลังจากผ่านการทดสอบทางความร้อน

2.5.2 เทคนิคแอทเทนนูเอเตดโททัลรีเฟล็กชันฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

เทคนิคแอทเทนนูเอเตดโททัลรีเฟล็กชันฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Attenuated total reflectance fourier transform infrared spectroscopy, ATR-FTIR) ถูกใช้อย่างกว้างขวางในการวิเคราะห์พื้นผิวของวัสดุที่ยากต่อการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแบบส่องผ่าน (transmission) โดยจะให้รังสีอินฟราเรดเดินทางผ่านผลึก ThBr หรือ AgCl ที่มีค่าดัชนีการหักเหแสง (refractive index) มากกว่าวัสดุ รังสีอินฟราเรดนั้นจะทะลุเข้าไปยังผิวของวัสดุไม่เกิน 2 ไมครอน จากนั้นจะเกิดการสะท้อนกลับไปยังอุปกรณ์ตรวจวัดและจะมีรังสีอินฟราเรดบางส่วนถูกดูดกลืนเอาไว้ การดูดกลืนคลื่นรังสีอินฟราเรดที่เลขคลื่นต่างๆ จะตรงกับค่าของการสั่นของพันธะแต่ละชนิด ซึ่งจะสามารถบ่งบอกชนิดของหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในโครงสร้างของวัสดุได้ เทคนิคนี้จึงถูกใช้ในการยืนยันหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างทางเคมีของสารหน่วงไฟที่กราฟต์ลงบนพื้นผิวของผ้าฝ้าย

2.5.3 เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกอนาลิซิส

เทอร์โมกราวิเมตริกอนาลิซิส (Thermogravimetric analysis, TGA) เทคนิคนี้เป็นการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของวัสดุ โดยอาศัยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวและความละเอียดสูงต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในสภาวะที่กำหนด ซึ่งข้อมูลของน้ำหนักวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นสามารถบอกได้ถึงพฤติกรรมและขั้นตอนของการสลายตัวของวัสดุที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงใน ภาพที่ 2.6 และนอกจากนี้ยังทำให้ทราบถึงความเสถียรต่อความร้อนของวัสดุโดยดูจากน้ำหนักที่เหลือสุดท้ายของวัสดุที่อุณหภูมิสูงอีกด้วย ดังนั้นเทคนิคนี้จึงถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาขั้นตอนการสลายตัวและความเสถียรทางความร้อนที่อุณหภูมิสูงของผ้าฝ้ายที่ผ่านการกราฟต์ด้วยสารหน่วงไฟ



ภาพที่ 2. 6 แสดงพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของวัสดุที่เกิดขึ้นจากเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกอนาลิซิส [36]

2.5.4 การทดสอบสมบัติการหน่วงไฟด้วยเทคนิค Limiting oxygen index

Limiting oxygen index (LOI) คือ ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนที่น้อยที่สุด ซึ่งสามารถทำให้วัสดุเกิดการลุกไหม้อย่างต่อเนื่อง โดยค่า LOI จะคำนวณจากอัตราส่วนการผสมกันของ แก๊สออกซิเจนและแก๊สไนโตรเจน

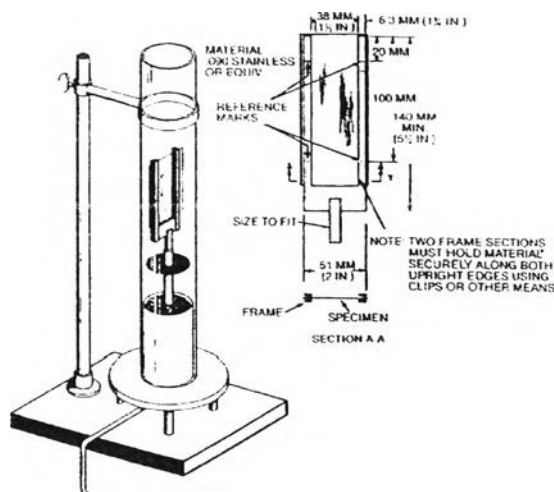
$$LOI(\%) = \frac{[O_2]}{[N_2] - [O_2]} \times 100$$

ซึ่งในสภาวะบรรยากาศปกติจะมีปริมาณของแก๊สออกซิเจนอยู่ประมาณร้อยละ 21 ดังนั้น วัสดุที่มีค่า LOI ต่ำกว่า 21% จึงสามารถติดไฟได้ง่ายในสภาวะบรรยากาศปกตินี้ ส่วนวัสดุที่มีค่า LOI สูงกว่า 21% จะติดไฟได้ยากขึ้นหรือติดไฟได้ช้า แต่ถ้าหากวัสดุนั้นมีค่า LOI มากกว่า 100% แล้วจะ บอกได้ว่าวัสดุนั้นไม่สามารถติดไฟได้ ดังนั้นค่า LOI จึงถูกใช้เพื่อยืนยันความสามารถในการหน่วงไฟ ที่ดีขึ้นของผ้าฝ้ายที่ผ่านการปรับปรุงด้วยวิธีการกราฟต์สารหน่วงไฟลงไปในพื้นผิว

ตารางที่ 2. 4 ตัวอย่างค่า LOI ของเส้นใยต่างๆ [18]

ชนิดของเส้นใย	ค่า LOI (%)
ฝ้าย (cotton)	18.4
เรยอน (rayon)	18.9
ขนสัตว์ (wool)	25
พอลิเอสเตอร์ (polyester)	20-21
ไนลอน 6 (nylon 6)	20-21.5
ไนลอน 6,6 (nylon6.6)	20-21.5
อะคริลิก (acrylic)	18.2
มอดาคริลิก (modacrylic)	29-30
นอเมกซ์ (NOMEX)	29-30
เคฟลาร์ (KEVLAR)	29

สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบค่า LOI จะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ระบบวัดแก๊สและ คอลัมน์ที่ใช้สำหรับการทดสอบ ซึ่งถูกแสดงใน ภาพที่ 2.7 โดยการทดสอบนั้นเริ่มจากแก๊สออกซิเจน ถูกผสมกับแก๊สไนโตรเจนในอัตราส่วนตามที่ต้องการก่อนจะถูกส่งไปยังฐานของคอลัมน์ที่มีตัวอย่าง วางในแนวตั้งของศูนย์กลางคอลัมน์และจากนั้นไฟจะถูกจุดที่ด้านบนของตัวอย่างเพื่อดูการติดไฟของ วัสดุในแต่ละอัตราส่วน



ภาพที่ 2. 7 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบค่า LOI [37]

2.5.5 เทคนิคอิเล็กตรอนโพรบไมโครอนาลิซิส

เทคนิคอิเล็กตรอนโพรบไมโครอนาลิซิส (Electron probe microanalysis, EPMA) สามารถวิเคราะห์ธาตุได้ทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพซึ่งจะอาศัยหลักการเดียวกันกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แต่จะเป็นการตรวจจับสัญญาณของรังสีเอกซ์ที่คายออกมาเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอมซึ่งจะมีความเฉพาะเจาะจงในแต่ละธาตุ ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเทคนิคนี้มาใช้ในการตรวจสอบและยืนยันปริมาณฟอสฟอรัสที่ติดอยู่บนพื้นผิวของผ้าฝ้ายหลังจากผ่านการกราฟต์ด้วยสารหน่วงไฟ

2.5.6 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง

การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) เป็นการทดสอบสมบัติเชิงกลพื้นฐานของวัสดุชนิดต่างๆ แบบหนึ่งที่ยอมรับใช้กันโดยทั่วไป ในการทดสอบจะให้แรงดึงกระทำต่อชิ้นตัวอย่างอย่างช้าๆ จนทำให้ชิ้นตัวอย่างตกอยู่ในสภาวะการยืดและเกิดการเสียรูปหรือให้แรงดึงไปจนกระทั่งชิ้นตัวอย่างนั้นขาดลง ในงานวิจัยนี้จึงได้นำการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงมาใช้เพื่อศึกษาถึงสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงไปของผ้าฝ้ายหลังจากผ่านการกราฟต์ด้วยสารหน่วงไฟ

2.6 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

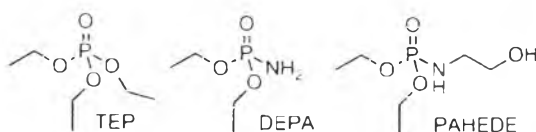
จากที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้นว่าสารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบนั้นมักถูกนำมาใช้ในการหน่วงไฟให้กับเซลลูโลส เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดีและยังไม่ก่อให้เกิดแก๊สที่เป็นพิษหลังจากเกิดการเผาไหม้ จึงมีกลุ่มผู้วิจัยหลากหลายกลุ่มพยายามปรับปรุงสารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบนั้นให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น โดยการเพิ่มไนโตรเจนในโครงสร้างของสารหน่วงไฟ

Gaan และคณะ [11] ได้ศึกษาการทำงานร่วมกันของฟอสฟอรัสและไนโตรเจนในไตรบิวทิลฟอสเฟต (tributyl phosphate) โดยการใส่สารเติมแต่งที่มีไนโตรเจนอยู่ในโครงสร้าง เช่น ยูเรีย (urea), กัวนิติน คาร์บอเนต (guanidine carbonate) และเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ (melamine formaldehyde) ผลที่ได้พบว่า การเติมยูเรียและกัวนิติน คาร์บอเนต นั้นจะช่วยให้ความสามารถในการหน่วงไฟของไตรบิวทิลฟอสเฟตมีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยเมื่อเพิ่มปริมาณของสารเติมแต่งที่มีไนโตรเจนให้มากขึ้นจะส่งผลให้ค่า LOI มีค่าสูงตามไปด้วย ดังใน ตารางที่ 2.5 ในขณะที่การเติมเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์นั้นแม้จะเพิ่มปริมาณสารให้มากขึ้นค่า LOI ก็ยังไม่เพิ่มขึ้นให้เห็นได้ชัดเจนนัก ทั้งนี้เนื่องจากเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เมื่อเกิดการสลายตัวจะให้เมทานอลซึ่งทำหน้าที่เป็นแก๊สเชื้อเพลิงให้แก่กระบวนการเผาไหม้ จึงส่งผลให้การเติมเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ไม่ช่วยให้ประสิทธิภาพในการหน่วงไฟของสารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบเพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 2. 5 แสดงค่า LOI ของผ้าฝ้ายที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารหน่วงไฟที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนและให้ปริมาณของฟอสฟอรัสคงที่ [11]

ปริมาณของฟอสฟอรัสต่อ ไนโตรเจนบนผ้าฝ้าย (%)	ยูเรีย	กัวนิติน คาร์บอเนต	เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์
	LOI	LOI	LOI
2:0.9	25.3	25.3	25.5
2:7.2	27.5	27.5	26.0

ต่อมาในปี 2009 Gaan และคณะ [12] ยังได้ทำการเปรียบเทียบหมู่แทนที่ของอะตอมไนโตรเจนในโครงสร้างของสารหน่วงไฟฟอสโฟรามิเดต (phosphoramidate) ต่อความสามารถในการหน่วงไฟของผ้าฝ้าย ผลที่ได้พบว่า ไดเอทิลฟอสโฟรามิเดต (diethyl phosphoramidate, DEPA) ที่ไม่มีหมู่แทนที่บนอะตอมไนโตรเจน และ N(2-ไฮดรอกซี เอทิล) ไดเอทิลเอสเทอร์ (N(2-hydroxy ethyl) diethylester, PAHEDE) ที่มีหมู่แทนที่บนอะตอมไนโตรเจนเป็นแอลคิล (alkyl) ที่มีหมู่ฟังก์ชันปลายสายเป็นหมู่ไฮดรอกซิลมีความสามารถในการหน่วงไฟที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับหมู่แทนที่บนอะตอมไนโตรเจนตัวอื่น (มีค่า LOI เป็น 30.3% และ 29.8% ตามลำดับ) และนอกจากนี้สารหน่วงไฟฟอสโฟรามิเดตทุกตัวยังให้ประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดีกว่า ไตรเอทิลฟอสเฟต (triethyl phosphate, TEP) ที่ไม่มีไนโตรเจนอะตอมในโครงสร้าง (มีค่า LOI เป็น 26.3%) ทั้งนี้เนื่องมาจากการมีพันธะ P-N อยู่ในโครงสร้างจะส่งผลให้ความเป็นนิวคลีโอฟิลิกของสารหน่วงไฟเพิ่มขึ้นทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาการคายน้ำและการสลายตัวเป็นถ่านคาร์บอนได้มากขึ้น

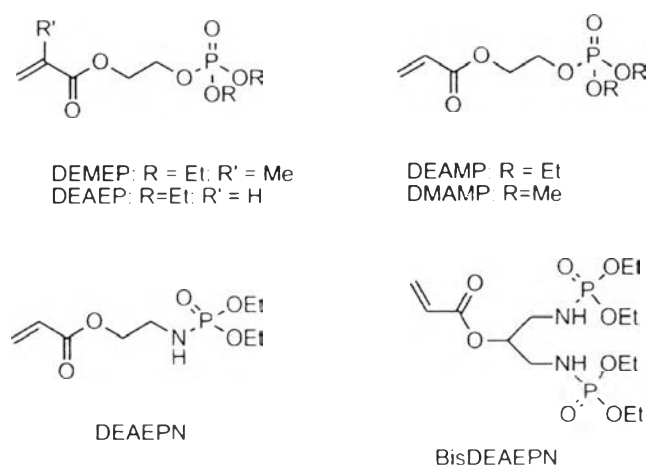


เลขหมู่..... ๐๖-๒๕๕๖
 เลขทะเบียน..... ๗๒๒๕
 วันเดือนปี ๑๖ มิ.ย. ๒๕๕๑

ภาพที่ 2. 8 โครงสร้างเคมีของมอนอเมอร์สารหน่วงไฟในงานวิจัยของ Gaan และคณะ [12]

ในขณะที่งานวิจัยของ Nguyen และคณะ [38] ได้ทำการเปรียบเทียบผลของหมู่แอลคิลที่อยู่บนอะตอมของออกซิเจนในโครงสร้างสารหน่วงไฟฟอสโฟราไมเดตต่อความสามารถในการหน่วงไฟของผ้าฝ้าย ซึ่งในการทดลองนั้นพบว่าไดเมทิล-3-ไฮดรอกซีโพรพิลฟอสโฟราไมเดต (dimethyl-3-hydroxypropylphosphoramidate, MHP) ที่มีหมู่แอลคิลเป็นหมู่เมทิล (methyl) มีอัตราการลามของเปลวไฟ (flame spread) ที่ช้ากว่า ให้ค่า LOI และยังให้ปริมาณถ่านคาร์บอนหลังจากทดสอบการสลายตัวทางความร้อน (thermogravimetric analysis) ที่สูงกว่าโดยมีค่า LOI เป็น 37.2% และปริมาณถ่านคาร์บอนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็น 35.36% ในขณะที่ไดเอทิล-3-ไฮดรอกซีโพรพิลฟอสโฟราไมเดต (diethyl 3-hydroxypropyl phosphoramidate, EHP) ที่มีหมู่แอลคิลเป็นหมู่เอทิล (ethyl) มีค่า LOI เป็น 33.4% และปริมาณถ่านคาร์บอนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็น 31% เนื่องจากหมู่เมทิลมีขนาดเล็กมีความกะทัดรัดน้อยจึงทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสสามารถเกิดปฏิกิริยาฟอสโฟไรเลชันกับสารหน่วงไฟได้ง่ายกว่า

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Tsafack และ Levalois-Grqtmacher [7] ซึ่งได้ศึกษาความสามารถในการหน่วงไฟของอะคริเลต (acrylate) ที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ 4 ชนิด คือ ไดเอทิล(อะคริโลอิลเอทิล)ฟอสเฟต (diethyl(acryloyloxyethyl)phosphate, DEAEP), ไดเอทิล-2-(เมทาคริโลอิลเอทิล)ฟอสเฟต (diethyl-2-(methacryloyloxyethyl)phosphate, DEMEP), ไดเอทิล(อะคริโลอิลเมทิล)ฟอสโฟเนต (diethyl(acryloyloxymethyl)phosphonate, DEAMP) และไดเมทิล(อะคริโลอิลออกซีเมทิล)ฟอสโฟเนต (dimethyl(acryloyloxymethyl)phosphonate, DMAMP) และนอกจากนี้ยังมีสารหน่วงไฟฟอสโฟราไมเดตอีก 2 ชนิด คือ ไดเอทิล(อะคริโลอิลออกซีเอทิล)ฟอสโฟราไมเดต (diethyl(acryloyloxyethyl)phosphoramidate, DEAEPN) และอะคริโลอิลออกซี-1,3-บิส(ไดเอทิล ฟอสโฟราไมเดต)โพรเพน (acryloyloxy-1,3-bis(diethyl phosphoramidate)propan, BisDEAEPN) ดังแสดงใน ภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2. 9 โครงสร้างเคมีของมอนอเมอร์สารหน่วงไฟที่ถูกกราฟต์ลงไปกับพื้นผิวของผ้าฝ้ายในงานวิจัยของ Tsafack และ Levalois-Grqtmacher [7]

สารหน่วงไฟเหล่านี้ได้ถูกกราฟต์ลงไปกับบนพื้นผิวของผ้าฝ้ายเพื่อเพิ่มความคงทนต่อการซักล้าง โดยใช้อาร์กอนพลาสมาช่วยให้เกิดการเหนียวแน่นและสร้างพันธะโคเวเลนต์ระหว่างสารหน่วงไฟกับผ้าฝ้าย สารหน่วงไฟที่ถูกกราฟต์ลงไปกับบนพื้นผิวของผ้าฝ้ายจะมีลักษณะเป็นฟิล์มบางของพอลิเมอร์ปกคลุมเส้นใยของฝ้ายเอาไว้ ส่วนสารหน่วงไฟที่ทำให้ค่า LOI ของผ้าฝ้ายที่ผ่านการปรับปรุงแล้วมีค่าสูงที่สุด คือ DEAEPN และ BisDEAEPN โดยมีค่าเป็น 28.5 และ 29.5 ตามลำดับ เนื่องจากสารทั้งสองตัวนี้มีไนโตรเจนอะตอมอยู่ในโครงสร้างจึงเกิดการทำงานร่วมกันกับฟอสฟอรัสและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการหน่วงไฟให้ดียิ่งขึ้น ส่วนผลของการหน่วงไฟหลังจากผ่านการทดลองจำลองการซักล้างพบว่าค่า LOI ของสารหน่วงไฟมีค่าลดลงไปเล็กน้อยดังใน ตารางที่ 2.6 นั้นแสดงให้เห็นว่าการกราฟต์สารหน่วงไฟลงบนพื้นผิวของผ้าฝ้ายโดยใช้พลาสมานั้นสามารถเพิ่มความคงทนให้กับสารหน่วงไฟได้

ตารางที่ 2. 6 ค่า LOI ของผ้าฝ้ายที่ผ่านการกราฟต์ด้วยสารหน่วงไฟหลังจากผ่านการจำลองการซักล้างในงานวิจัยของ Tsafack และ Levalois-Grqztmacher [7]

มอนอเมอร์ สารหน่วงไฟ	สถานะที่ใช้		ก่อนการซักล้าง		หลังการซักล้าง	
	ความเข้มข้น มอนอเมอร์ (g/L)	ความเข้มข้นสาร เชื่อมขวาง (%wt)	%G ₁	LOI ₁ (%)	%G ₂	LOI ₂ (%)
DEAEP	300	10	43.2	26.5	35.5	25.5
DMAMP	200	10	31.1	26.0	24.2	22.5
DEAEPN	300	5	38.6	28.5	25.4	25.5
BisDEAEPN	200	5	29.8	29.5	26.7	25.0

ยังมีอีกหลายงานวิจัยที่ใช้พลาสมาในการเหนียวแน่นให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์ของสารหน่วงไฟลงบนพื้นผิวของผ้า ดังเช่น ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ของ Tsafack และ Levalois-Grqztmacher [6] ก็ได้ใช้พลาสมาเหนียวแน่นให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์ของสารหน่วงไฟอะคริเลต (accylate) ที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ 4 ชนิด คือ ไดเอทิล(อะคริโอลลีเอทิล)ฟอสเฟต (DEAEP), ไดเอทิล-2-(เมทาคริโอลลีเอทิล)ฟอสเฟต (DEMEP), ไดเอทิล(อะคริโอลลีเอทิล)ฟอสโฟเนต (DEAMP) และ ไดเมทิล(อะคริโอลลีเอทิล)ฟอสโฟเนต (DMAMP) ลงไปกับบนพื้นผิวของผ้าพอลิอะคริโโนไนไตรล์ (polyacrylonitrile, PAN) ผลที่ได้แสดงใน ตารางที่ 2.7 ซึ่งมีการลดลงของค่า LOI เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่วนงานวิจัยของ Kamlangkla และคณะ [8] ใช้พลาสมาเหนียวแน่นให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์ของสารหน่วงไฟไดเอทิล(อะคริโอลลีเอทิล)ฟอสเฟต (DEAEP) และสารหน่วงไฟไดเอทิล(อะคริโอลลีเอทิล)ฟอสโฟรามิเดต (DEAEPN) ลงไปกับผ้าไหม ผลที่ได้พบว่าหลังผ่านการซักล้างแล้วปริมาณสารหน่วงไฟที่กราฟต์ติดและค่า LOI มีการลดลงไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังแสดงใน ตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2. 7 ค่า LOI ของผ้าพอลิอะครีโลไนไตรล์ที่ผ่านการกราฟต์ด้วยสารหน่วงไฟก่อนและหลังจำลองการชก้าง [6]

มอนอเมอร์	ค่า LOI ก่อนชก้าง (%)	ค่า LOI หลังชก้าง (%)
DEMEP	21.5	21
DEAEP	22	20
DEAMP	23.5	20
DMAMP	26.5	21

ความเข้มข้นมอนอเมอร์ = 200 g/L (DEMEP, DEAEP) และ 300 g/L (DEAEMP, DMAMP)

ความเข้มข้นของตัวริเริ่มปฏิกิริยา (initiator) = 5% โดยน้ำหนัก

และความเข้มข้นของสารเชื่อมขวาง (crosslinking agent) = 20% โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2. 8 ค่า LOI ของผ้าไหมที่ผ่านการกราฟต์ด้วยสารหน่วงไฟ DEAEP และ DEAEPN ก่อนและหลังจำลองการชก้าง [8]

มอนอเมอร์สารหน่วงไฟ	ก่อนการชก้าง		หลังการชก้าง	
	%G ₁	LOI ₁ (%)	%G ₂	LOI ₂ (%)
DEAEP	11.22	30.5	9.45	29.2
DEAEPN	10.16	29.0	8.99	28.0

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Jermstjarit [37] ซึ่งเป็นงานวิจัยในกลุ่มเดียวกัน ได้กราฟต์ 2-เมทาครีโลอิลออกซีเอทิล ไดฟีนิล ฟอสเฟต (2-methacryloyloxyethyl diphenyl phosphate, MEDP) และ 2-เมทาครีโลอิลออกซีเอทิล ฟีนิล เบนซีนฟอสเฟต (2-methacryloyloxyethyl phenyl benzenephosphophate, MPBP) ลงไปบนผ้าฝ้ายและผ้าไหม ผลที่ได้แสดงใน ตารางที่ 2.9

จากผลของการหน่วงไฟหลังผ่านการจำลองการชก้างในทุกงานวิจัยที่ได้กล่าวมา แสดงให้เห็นว่าการกราฟต์สารหน่วงไฟลงบนพื้นผิวของผ้าสามารถเพิ่มความคงทนของสารหน่วงไฟต่อการชก้างได้

ตารางที่ 2. 9 ค่า LOI ของผ้าฝ้ายและผ้าไหมที่ผ่านการกราฟต์ด้วยสารหน่วงไฟ MEDP และ MPBP ก่อนและหลังการชก้าง [37]

ชนิดผ้า	มอนอเมอร์สารหน่วงไฟ	น้ำหนักผ้าก่อนชก้าง (g)	ค่า LOI ก่อนชก้าง (%)	น้ำหนักผ้าหลังชก้าง (g)	ค่า LOI หลังชก้าง (%)
ผ้าฝ้าย	MEDP	3.05	28	3.05	24
	MPBP	3.78	24	3.78	24
ผ้าไหม	MPBP	2.54	28	2.54	28