

การสกัดเคราตินจากขนไก่เพื่อใช้ตกแต่งทรงไฟสำหรับผ้าฝ้าย



นายธนาวัฒน์ ชัยวุฒินันท์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

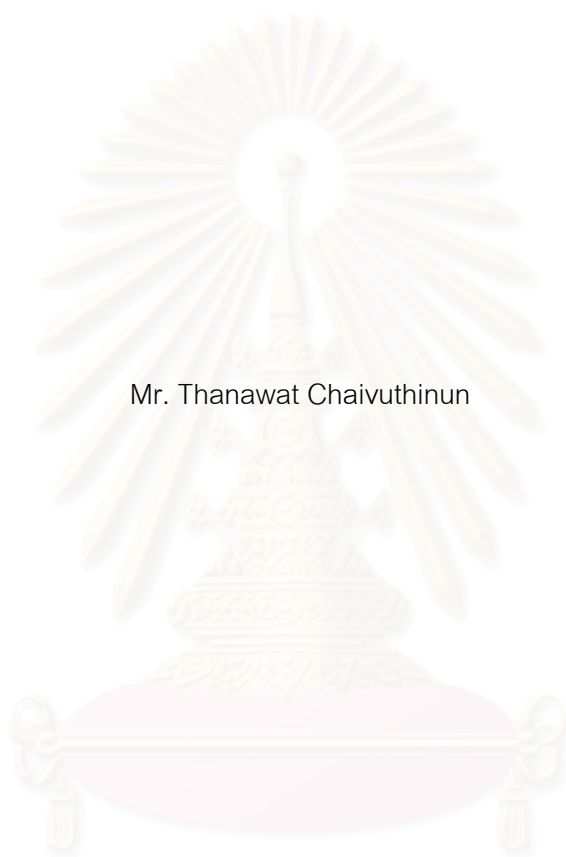
ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-3231-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EXTRACTION OF KERATIN FROM POULTRY FEATHER FOR FLAME RETARDANT FINISHING ON
COTTON FABRICS

Mr. Thanawat Chaivuthinun



สถาบันวิทยบริการ

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Applied Polymer Science and Textile Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-3231-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสกัดเคราตินจากขนไก่เพื่อใช้ตกแต่งหน่วงไฟสำหรับผ้าฝ้าย
โดย	นายธนาวัฒน์ ชัยวุฒินันท์
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. สิริรัตน์ จารุจินดา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กาวี ศรีกุลกิจ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย โพธิ์พิจิตร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. สิริรัตน์ จารุจินดา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กาวี ศรีกุลกิจ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ อรุษา สรวารี)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ปาริชาติ ภู่ว่าง)

นายธนวัฒน์ ชัยวุฒินันท์ : การสกัดเคราตินจากขนไก่เพื่อใช้ตกแต่งหน่วงไฟสำหรับผ้าฝ้าย. (EXTRACTION OF KERATIN FROM POULTRY FEATHER FOR FLAME RETARDANT FINISHING ON COTTON FABRICS) อ. ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร. สิริรัตน์ จารุจินดา, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กาวี ศรีกุลกิจ, จำนวน 95 หน้า. ISBN 974-17-3231-5.

การสกัดเคราตินจากขนไก่สามารถทำได้โดยการใช้ 2-เมอร์แคปโตเอทานอลในสารละลายยูเรีย สารละลายเคราตินที่สกัดได้จะถูกนำไปตกแต่งหน่วงไฟบนผ้าฝ้าย จากนั้นนำผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วยเคราตินไปศึกษาพฤติกรรมและอัตราการลุกลามของเปลวไฟในแนวตั้งและแนว 45 องศา หาค่า LOI และศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA ในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน

การสกัดเคราตินจากขนไก่ด้วย 2-เมอร์แคปโตเอทานอลความเข้มข้น 125 มิลลิโมลาร์และสารละลายยูเรียความเข้มข้น 8 โมลาร์ ที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เป็นภาวะที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากสามารถสกัดเคราตินได้สูงถึง 69.30 เปอร์เซ็นต์ จากการทดสอบความสามารถในการหน่วงไฟพบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเคราตินที่ใช้ในการตกแต่งหน่วงไฟเพิ่มขึ้นจะทำให้ผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งด้วยสารละลายเคราตินมีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟเพิ่มขึ้น กล่าวคือจะมีค่า LOI เพิ่มขึ้นเท่ากับ 27.5-30.0 พื้นที่ที่เกิดการเผาไหม้น้อยลง เปลวไฟดับได้เองและมีอัตราการลุกลามของเปลวไฟลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA พบว่าผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารละลายเคราตินที่สกัดจากขนไก่เกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ตกแต่งหน่วงไฟ และจะมีปริมาณถ่านคาร์บอนเหลืออยู่ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเคราตินเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองสรุปได้ว่าสารละลายเคราตินที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 12.80 กรัมต่อลิตรขึ้นไปเหมาะสมต่อการนำมาตกแต่งหน่วงไฟผ้าฝ้ายให้มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาวัสดุศาสตร์

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ

ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนิสิต.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4472280723: MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEY WORD: EXTRACTION / POULTRY FEATHER / KERATIN / FLAME RETARDANT / COTTON FABRICS

MR. THANAWAT CHAIVUTHINUN : EXTRACTION OF KERATIN FROM POULTRY FEATHER FOR FLAME RETARDANT FINISHING ON COTTON FABRICS. THESIS ADVISOR : SIREERAT CHARUCHINDA, Ph.D., THESIS COADVISOR : ASST. PROF. KAWEE SRIKULKIT, Ph. D., 95 pp. ISBN 974-17-3231-5.

Extraction of keratin from poultry feather was conducted using 2-mercaptoethanol in aqueous urea solution. The extracted keratin solution was applied onto cotton fabric to impart the flame retardancy. Flame retardancy performance of treated fabric was evaluated using burning test of 90 degree (vertically upward flame spreading), 45 degree and LOI. Thermal analysis using TGA in nitrogen was also studied.

For extraction part, it was found that extraction with 125 mM 2-mercaptoethanol and 8 M urea carried out at 60°C for 6 hours produced optimal result with 69.30 %. The efficiency of flame retardancy of cotton fabrics treated with the extracted keratin increased with an increase in the concentration of keratin solution. LOI values increased to 27.5-30.0 whereas burning area and flame spread rate decreased with an increase in the concentration of keratin solution. Thermal behavior of the flame retardant cotton fabrics using TGA technique showed that the main decomposition temperature of flame retardant cotton fabrics and weight loss after pyrolysis gradually decreased whereas residue left at 400°C increased with an increase in the concentration of keratin solution. The results indicated that the optimal concentration of feather keratin for flame retardant finishing on cotton fabrics was at least 12.80 g/l.

Department of Materials Science

Student's signature.....

Field of study Applied Polymer Science and Textile Technology

Advisor's signature.....

Academic year 2002

Co-advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้นั้น เป็นเพราะได้รับคำแนะนำทางด้านวิชาการ การเอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และวัสดุสำหรับวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังได้รับการช่วยเหลือและการแนะนำทางในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่าง ๆ เป็นอย่างดี

ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร. สิริรัตน์ จารุจินดา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ. ดร. กาวี ศรีกุลกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษาปรึกษา การแก้ไข ปัญหา ตลอดจนให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ รศ. เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์ รศ. อรุษา สรวารี และรศ. ปาริชาติ ภูสว่าง กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำ และแนวคิดที่เป็นประโยชน์ต่อการจัดทำวิทยานิพนธ์ ฉบับสมบูรณ์

ขอขอบคุณ รศ. ไพพรรณ สันติสุข และ ผศ.ดร.วิมลวรรณ พิมพพันธ์ุ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและดูแลตลอดระยะเวลาที่ทำวิจัย

ขอขอบคุณ Dr. Peter M. M. Schrooyen ที่ให้คำแนะนำทางจดหมายอิเล็กทรอนิกส์ เกี่ยวกับการสกัดเคราตินจากขนไก่ ตลอดจนการวิเคราะห์ปริมาณเคราติน ด้วยความกรุณาเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณ ผศ. ปารณี มีแต่้ม และภาควิชาชีวเภสัช คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์โปรตีน

ขอขอบคุณ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนด้านเครื่องมือ สารเคมี และสถานที่ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุนพัฒนาอาจารย์ใหม่/นักวิจัยใหม่ กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช ปีงบประมาณ 2545 ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคน โดยเฉพาะคุณชิตชัย จันทร์ตั้งสี่ ที่ให้ความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาที่ทำการวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนกระทั่งสำเร็จลงด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิประสาทวิชาการ จนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เป็นผลสำเร็จตามที่มุ่งหวังไว้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. วารสารปริทรรศน์.....	3
2.1 ฝ้าย.....	3
2.1.1 การผลิตฝ้าย.....	3
2.1.2 สมบัติทางกายภาพ.....	3
2.1.3 สมบัติทางเคมี.....	5
2.1.4 การใช้งานของฝ้าย.....	5
2.2 เคราติน.....	6
2.2.1 โครงสร้างเคราติน.....	6
2.2.2 พันธะที่เกี่ยวข้องในโครงสร้างโปรตีน.....	10
2.2.3 การเสียสภาพของโปรตีน.....	12
2.2.4 ปฏิบัติการที่ใช้ในการทดสอบโปรตีน.....	15
2.3 การตกแต่งสำเร็จหน่วยไฟ.....	17
2.4 วงจรการลุกไหม้ของวัสดุสิ่งทอ.....	18
2.4.1 ลักษณะการสลายตัวของฝ้ายเมื่อได้รับความร้อน.....	19
2.4.1.1 การสลายตัวที่อุณหภูมิ Tp.....	20
2.4.1.2 การลุกเป็นเปลว.....	21
2.4.1.3 การคุ้แดง.....	21
2.4.2 ถ่านคาร์บอน.....	21
2.5 กลไกการทำงานของสารหน่วงไฟ.....	22
2.5.1 Endothermic theory.....	22
2.5.2 Gas theory.....	23
2.5.3 Melt theory.....	23
2.5.4 Radical theory.....	23

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.5.5 Dehydration theory	23
2.6 ประเภทของสารหน่วงไฟ	24
2.6.1 สารหน่วงไฟที่จำแนกตามความคงทน	24
2.6.1.1 สารหน่วงไฟประเภทไม่คงทน	24
2.6.1.2 สารหน่วงไฟประเภทกึ่งคงทน	24
2.6.1.3 สารหน่วงไฟประเภทมีความคงทนสูง	25
2.6.2 สารหน่วงไฟที่จำแนกจากองค์ประกอบ	25
2.6.2.1 สารหน่วงไฟประเภทฮาโลเจน	25
2.6.2.2 สารหน่วงไฟประเภทฟอสฟอรัส	27
2.6.2.3 สารหน่วงไฟประเภทอนินทรีย์	29
2.6.2.4 สารหน่วงไฟประเภทไนโตรเจน	29
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	31
2.7.1 การสกัดเคราตินจากขนไก่	31
2.7.2 การตกแต่งสำเร็จหน่วงไฟ	33
บทที่ 3 การทดลอง	35
3.1 ขอบเขตการทดลอง	35
3.2 วัตถุประสงค์และสารเคมี	35
3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	36
3.4 การทำความสะอาดขนไก่	37
3.5 การสกัดเคราตินจากขนไก่	39
3.6 การทดสอบหาปริมาณเคราตินที่สกัดได้จากขนไก่	39
3.6.1 การไดแอลลิซิสและการละลายตะกอนเคราติน	39
3.6.2 การหาปริมาณเคราตินโดยวิธีไปยูเรต	40
3.6.2.1 การสร้างกราฟมาตรฐาน	40
3.6.2.2 การหาค่าการดูดกลืนแสงด้วย เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์	40
3.7 การตกแต่งหน่วงไฟผ้าฝ้ายด้วยสารละลายเคราติน	42
3.8 การศึกษาพฤติกรรมและอัตราเร็วในการลุกลามของเปลวไฟ	43
3.8.1 การศึกษาพฤติกรรมและอัตราเร็วในการลุกลาม ของเปลวไฟในแนวตั้ง	43
3.8.2 การศึกษาพฤติกรรมและอัตราเร็วในการลุกลาม ของเปลวไฟในแนว 45 องศา	44

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.9 การทดสอบหาค่า Limiting oxygen index (LOI)	45
3.10 การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA และ DTG	46
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	47
4.1 ผลการทำความสะอาดขี้เถ้า	47
4.2 ผลการสกัดไขมันออกจากขี้เถ้า	48
4.3 ผลการสกัดเคราตินจากขี้เถ้า	48
4.4 ผลการไดเอไลซิสสารละลายเคราติน	50
4.5 ผลการหาปริมาณเคราตินด้วยวิธีไปยูเรต	50
4.5.1 ผลของเวลาต่อปริมาณเคราตินที่สกัดได้	52
4.5.2 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณเคราตินที่สกัดได้	54
4.6 การศึกษาพฤติกรรมและอัตราการลุกลามของเปลวไฟในแนวตั้ง	56
4.6.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเคราติน ต่อพื้นที่ที่เกิดการเผาไหม้ในแนวตั้ง	59
4.6.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเคราติน ต่ออัตราการลุกลามของเปลวไฟในแนวตั้ง	60
4.7 การศึกษาพฤติกรรมและอัตราการลุกลามของเปลวไฟในแนว 45 องศา	62
4.7.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเคราติน ต่อพื้นที่ที่เกิดการเผาไหม้แนว 45 องศา	65
4.7.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเคราติน ต่ออัตราการลุกลามของเปลวไฟในแนว 45 องศา	66
4.8 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเคราติน ต่อค่า Limiting oxygen index (LOI)	68
4.9 การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วย TGA และ DTG	69
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	79
5.1 สรุปผลการทดลอง	79
5.2 ข้อเสนอแนะ	80
รายการอ้างอิง	81
ภาคผนวก	84
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	95

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติในด้านความคงทนต่อความร้อนของเส้นใยชนิดต่าง ๆ.....	19
ตารางที่ 4.1 ปริมาณของโปรตีนมาตรฐานและค่า Absorbance ที่ใช้ในการสร้างกราฟมาตรฐาน.....	51
ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์เคราตินที่สกัดได้จากขนไก่ที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ กัน.....	48
ตารางที่ 4.3 พฤติกรรมการลุกลามของเปลวไฟบนผ้าฝ้ายที่ผ่านและไม่ผ่าน การตกแต่งหนังไฟในแนวตั้ง.....	56
ตารางที่ 4.4 พฤติกรรมการลุกลามของเปลวไฟบนผ้าฝ้ายที่ผ่านและไม่ผ่าน การตกแต่งหนังไฟในแนว 45 องศา.....	62

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างโซ่เกลียวอัลฟา.....	7
รูปที่ 2.2 พันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นภายในโซ่เพปไทด์ของเกลียวอัลฟา ระหว่างหมู่ C=O ของหน่วย n และหมู่ -NH ของหน่วย (n+4).....	7
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเคราตินที่พบในเส้นผม.....	8
รูปที่ 2.4 การเรียงตัวขึ้นลงของหมู่ R อย่างเป็นระเบียบ ในโครงสร้างเบตาของโซ่พอลิเพปไทด์.....	9
รูปที่ 2.5 โครงสร้างแผ่นจีบเบตา.....	10
รูปที่ 2.6 การสร้างพันธะเพปไทด์ของกรดอะมิโน 2 ตัว เกิดเป็นไดเพปไทด์.....	10
รูปที่ 2.7 พันธะไดซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นจากกรดอะมิโนซีสเทอีน.....	11
รูปที่ 2.8 พันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างของโปรตีน.....	11
รูปที่ 2.9 สูตรโครงสร้างของยูเรียและกวาดิเนียม ไอออน.....	12
รูปที่ 2.10 โครงสร้างของ กรดเพอร์ฟอร์มิก β -เมอร์แคปโตเอทานอล และไดไฮโอไทรทอล.....	13
รูปที่ 2.11 ปฏิกิริยาการทำลายพันธะไดซัลไฟด์โดยกรดฟอร์มิก.....	13
รูปที่ 2.12 ปฏิกิริยารีดักชันของพันธะไดซัลไฟด์ในโปรตีนโดย β -เมอร์แคปโตเอทานอล.....	14
รูปที่ 2.13 ปฏิกิริยานินไฮดริน.....	15
รูปที่ 2.14 สารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง Cu^{++} และสารประกอบที่มีพันธะเพปไทด์.....	16
รูปที่ 2.15 วงจรการลุกไหม้ของวัสดุสิ่งทอ.....	18
รูปที่ 2.16 การสลายตัวของเซลลูโลส.....	20
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LOI และปริมาณของ char.....	22
รูปที่ 2.18 ปริมาณของสารหน่วงไฟแต่ละชนิดที่ใช้ในปี ค.ศ. 1998.....	25
รูปที่ 2.19 การกำจัดน้ำออกของฝ้ายโดยกรดลูอิส.....	28
รูปที่ 2.20 การเกิดถ่านคาร์บอน.....	28
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำความสะอาดขนไก่.....	37
รูปที่ 3.2 เครื่องบดตัด.....	38
รูปที่ 3.3 การสกัดไขมันออกจากขนไก่ด้วยวิธี Soxhlet extraction.....	38
รูปที่ 3.4 เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์.....	41
รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ทดสอบความสามารถในการลุกไหม้ของเปลวไฟในแนวตั้ง.....	43
รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบความสามารถในการลุกไหม้ของเปลวไฟในแนว 45 องศา.....	44
รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบหาค่า LOI (Limiting oxygen index).....	46
รูปที่ 4.1 ขนไก่ที่นำมาใช้ในการทดลอง.....	47

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.2	48
รูปที่ 4.3	49
รูปที่ 4.4	51
รูปที่ 4.5	53
รูปที่ 4.6	54
รูปที่ 4.7	59
รูปที่ 4.8	60
รูปที่ 4.9	65
รูปที่ 4.10	66
รูปที่ 4.11	68
รูปที่ 4.12	69
รูปที่ 4.13	70
รูปที่ 4.14	71
รูปที่ 4.15	72
รูปที่ 4.16	72
รูปที่ 4.17	73
รูปที่ 4.18	73
รูปที่ 4.19	74

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.20 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วย สารละลายเคราตินความเข้มข้น 26.64 กรัมต่อลิตร.....	74
รูปที่ 4.21 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วย สารละลายเคราตินความเข้มข้น 27.72 กรัมต่อลิตร.....	75



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

อัคคีภัยก่อให้เกิดการสูญเสียต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนเป็นจำนวนมาก สำหรับประเทศไทยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2532 เป็นต้นมามีจำนวนอัคคีภัยที่เกิดขึ้นในประเทศสูงกว่า 3,000 ครั้งต่อปี คิดเป็นมูลค่าความเสียหายประมาณ 2,100 ล้านบาทต่อปี⁽¹⁻³⁾ และยังก่อให้เกิดการบาดเจ็บและเสียชีวิตซึ่งมีอาจประเมินค่าได้ สาเหตุสำคัญประการหนึ่งที่ทำให้ไม่สามารถควบคุมไฟที่ลุกลามไปอย่างรวดเร็วได้ เนื่องจากอาคารบ้านเรือนมีวัสดุที่เป็นแหล่งเชื้อเพลิงมากมาย เช่น ผลิตภัณฑ์เสื้อผ้า ผ้าม่าน ผ้าปูเตียง และสิ่งทอในเฟอร์นิเจอร์ต่าง ๆ

อย่างไรก็ตามมาตรการป้องกันอัคคีภัยของประเทศไทยในปัจจุบันยังไม่ชัดเจนและเข้มงวดเพียงพอที่จะลดปัญหาดังกล่าวได้ ผลิตภัณฑ์สิ่งทอเพื่อการบริโภคในประเทศยังไม่มีกฎข้อบังคับและมาตรฐานทดสอบด้านการติดไฟมาควบคุม ซึ่งต่างจากประเทศที่พัฒนาแล้วอย่างเช่น สหรัฐอเมริกา อังกฤษ ฝรั่งเศส เยอรมนี และญี่ปุ่น ที่ได้ตระหนักเรื่องความปลอดภัยของประชาชนโดยออกกฎข้อบังคับเกี่ยวกับการใช้ผลิตภัณฑ์สิ่งทอที่ติดไฟง่าย และมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์สิ่งทอให้มีสมบัติหน่วงไฟ (flame retardancy) โดยการตกแต่งหน่วงไฟผลิตภัณฑ์เหล่านั้นด้วยสารหน่วงไฟ (flame retardant) ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถลดการเกิดอัคคีภัยได้ โดยจะไปขัดขวางกระบวนการลุกไหม้ให้เกิดได้น้อยลง ทำให้สามารถลดอัตราการเสียชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนได้ มาตรการดังกล่าวนี้มีส่วนผลักดันให้มีการศึกษาวิจัยและพัฒนาอย่างกว้างขวาง ไม่ว่าจะเป็นสารหน่วงไฟ ระบบตกแต่งหน่วงไฟ กรรมวิธีการผลิตเส้นใยให้สามารถทนไฟได้ ขณะนี้ประเทศดังกล่าวได้เริ่มมีการเคลื่อนไหวที่จะมีการแก้ไขและปรับปรุงมาตรการบังคับต่าง ๆ เกี่ยวกับการติดไฟของผลิตภัณฑ์ให้เข้มงวดขึ้น และเพิ่มประเภทของผลิตภัณฑ์บังคับที่ต้องผ่านมาตรฐาน เพื่อร่วมกันแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมโลกและเพื่อยกระดับคุณภาพชีวิตด้านความปลอดภัยของประชาคมโลก สำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอไทยซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีการส่งออกไปยังประเทศดังกล่าวสูงเป็นอันดับหนึ่งในสามของประเทศย่อมได้รับผลกระทบตามไปด้วยจึงจำเป็นต้องปรับตัวเพื่อขยายขีดความสามารถของการแข่งขันด้านการค้าในตลาดโลก

สำหรับประเทศไทยนั้นการนำเข้าสารหน่วงไฟมีขั้นตอนที่ยุ่งยากและมีราคาแพง อีกทั้งการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับระบบการหน่วงไฟรวมทั้งการพัฒนาสารหน่วงไฟยังมีน้อยมาก ผู้วิจัยจึงมีความคิดที่จะดำเนินโครงการวิจัยเกี่ยวกับสารหน่วงไฟหรือระบบหน่วงไฟที่เหมาะสม โดยเน้นในเรื่องของการหาสารทดแทนที่ไม่เป็นพิษ กระบวนการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยการนำวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมเกษตรภายในประเทศมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

อึ่งประเทศไทยเป็นประเทศผู้ส่งออกไก่สดแช่แข็งและผลิตภัณฑ์จากไก่ที่สำคัญรายหนึ่งของโลก โดยในปี พ.ศ. 2543 ประเทศไทยส่งออกไก่สดแช่แข็งและไก่แปรรูปเป็นปริมาณ 310,231 ตัน นำเงินตราเข้าสู่ประเทศกว่า 24,438 ล้านบาทและมีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้นทุกปี ทั้งนี้ยังไม่รวมปริมาณการบริโภคในประเทศอีกกว่า 663,382 ตัน⁽⁴⁾ จากอุตสาหกรรมการผลิตไก่นี้จึงทำให้เกิดวัสดุเหลือใช้จำพวกขนไก่เป็นจำนวนมาก ซึ่งการกำจัดทำได้ยากและก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม ในปี พ.ศ. 2541 มีขนไก่เหลือจากอุตสาหกรรมการผลิตไก่ทั่วโลกประมาณ 4 ล้านตัน⁽⁵⁾ ฉะนั้นการนำขนไก่ที่เหลือใช้เหล่านี้มาสกัดเคราติน (keratin) เพื่อพัฒนาเป็นสารหน่วงไฟจึงเป็นแนวทางที่จะลดการนำเข้าสารหน่วงไฟ ทำให้ประหยัดเงินตราที่ต้องสูญเสียให้กับต่างประเทศและยังเป็นการรักษาสิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่งด้วย

โดยสรุปงานวิจัยที่เกิดขึ้นนี้เพื่อค้นคว้านำขนไก่ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมเกษตรมาพัฒนาและดัดแปรเป็นสารหน่วงไฟเพื่อใช้ตกแต่งหน่วงไฟให้กับผ้าฝ้าย โดยศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเคราตินจากขนไก่และศึกษาพฤติกรรมการลุกไหม้ของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ เพื่อเป็นแนวทางในการผลิตสารหน่วงไฟที่มีความเป็นพิษต่ำและมีกระบวนการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมต่อไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

2.1 ฝ้าย (Cotton)⁶

2.1.1 การผลิตฝ้าย

ฝ้ายเป็นเส้นใยเซลลูโลสที่มนุษย์รู้จักและใช้ประโยชน์มานานแล้ว พบในทั่วทุกแห่งของโลก ฝ้ายเป็นพืชใบเลี้ยงคู่ชนิดไม้พุ่ม ลำต้นตั้งตรง มีกิ่งก้านสาขาแตกจากลำต้นความสูงของต้นจะแตกต่างกันแล้วแต่พันธุ์ ฤดูปลูก และวิธีการปลูกโดยทั่วๆ ไปความสูงเฉลี่ยประมาณ 2-6 ฟุต เมื่อฝ้ายออกดอก และดอกบานเต็มที่ที่มีการผสมเกสรแล้วจะเกิดเป็นผลฝ้ายหรือสมอฝ้าย ภายในผลจะแบ่งเป็น 3-5 พู แต่ละพูจะมีเมล็ด 6-7 เมล็ด เซลล์ที่ผิวนอกของเมล็ดจะเจริญออกเป็นเส้นยาวแล้วมีการพอกพูนของเซลลูโลสทำให้ผนังเซลล์แข็งแรงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อผลผลิตแก่และแห้งสมอจะแตกตามความยาวของผล เปิดให้เห็นเป็นพูฝ้ายพองฟูออกจากเปลือก พูฝ้ายจะมี 2 ชนิด คือ พูยาวสีขาวครีม (lint) ซึ่งจะนำไปปั่นด้าย และพูสั้นสีขาว (fuzz) อยู่ติดกับเมล็ดไม่ใช้ทำเส้นด้าย

เมื่อเก็บรวบรวมพูฝ้ายได้แล้วจะนำไปหีบฝ้ายเพื่อแยกพูออกจากเมล็ด ได้เป็นพู 1 ส่วน เมล็ด 2 ส่วน โดยน้ำหนัก ส่วนเมล็ดฝ้ายจะใช้ทำประโยชน์โดยแยกพูสั้นที่ติดเมล็ดไปทำผ้าเช็ดซับ ทำเบาะ พรม อุตสาหกรรมเซลลูโลสประดิษฐ์ เช่น ใยเซลลูโลสอะซิเตต เรยอน फिल्म เอกซเรย์ เปลือกเมล็ดใช้ทำเป็นอาหารสัตว์ พูอินทรีย์ อุตสาหกรรมพลาสติก เนื้อเมล็ดนำไปสกัดน้ำมันพืช กากใช้ทำอาหารสัตว์และปุ๋ย พูฝ้ายยาวจะถูกบรรจุเป็นมัดพูฝ้ายเรียกว่า เบล (bale) โดย 1 เบล มีน้ำหนักประมาณ 150-200 กิโลกรัม หรือ 600 ปอนด์

2.1.2 สมบัติทางกายภาพ

ลักษณะภายนอก ฝ้ายจากธรรมชาติมีลักษณะคล้ายหลอดแบนบิดขั้วกันเป็นเกลียว พื้นทีหน้าตัดเป็นเม็ดถั่วตรงกลางเป็นรูซึ่งเกิดจากท่อส่งน้ำตามแกนกลางของเส้นใยนั่นเองผิวของเส้นใยไม่เรียบและทึบแสง

ความยาวเส้นใย เส้นใยแต่ละเส้นมีความยาวอยู่ในช่วง 1/8–2 1/2 นิ้ว (3-63 มิลลิเมตร) โดยทั่วไปฝ้ายยาวมีความแข็งแรงกว่าฝ้ายสั้น

สี ปกติฝ้ายมีสีขาว บางชนิดอาจพบเป็นสีครีมหรือสีน้ำตาล

ความเงามัน โดยธรรมชาติฝ้ายมีความเงามันน้อย ยกเว้นกรณีที่ผ่านมาการทำเมอร์เซอไรส์แล้วความเงามันจะดีขึ้น

ความแข็งแรง ฝ้ายเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงปานกลาง ความทนแรงดึง ณ จุดขาด ประมาณ 3.0-5.0 กรัมต่อแดนเนียร์ เมื่อเปียกน้ำฝ้ายมีความแข็งแรง เพิ่มขึ้นอีก 10-20 เปอร์เซ็นต์ ฝ้ายที่ผ่านกระบวนการเมอร์เซอไรส์แล้วความแข็งแรงจะสูง โดยทั่วไปความแข็งแรงของฝ้ายจะแปรตามความแข็งแรงของเส้นใยเมื่อนำมาตีเกลียวเป็นเส้นด้าย เส้นใยยาวจะมีจุดสัมผัสและการเกาะกันของเส้นใยมากกว่าเส้นใยสั้น ทำให้เกิดแรงเสียดทานได้มากกว่าส่งผลให้การทนแรงดึงสูงขึ้น

การยืดตัว ฝ้ายเป็นเส้นใยที่มีการยืดตัวดีกว่าลินิน แต่ต่ำกว่าไหมและขนสัตว์ เกลียวฝ้ายที่เกิดตามธรรมชาติทำให้มีการยืดตัวที่ดี และนำมาปั่นเป็นด้ายได้ง่ายสามารถยืดตัวได้ประมาณ 3-7 เปอร์เซ็นต์

การคืนตัวแรงอัด ฝ้ายมีความสามารถในการคืนตัวภายหลังถูกกดทับได้ต่ำ เกิดการยับได้ง่าย ในปัจจุบันมีการตกแต่งสำเร็จหลายวิธีที่จะช่วยให้ปัญหาของการยับลดลงในลักษณะที่เรียกกันว่า Wrinkle-free

การดูดซึมความชื้น ที่ภาวะมาตรฐานอุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 65 เปอร์เซ็นต์ ฝ้ายมีความสามารถในการดูดซึมความชื้นได้สูงถึง 7-10 เปอร์เซ็นต์ และความแข็งแรงของฝ้ายสูงขึ้นเมื่อเปียก

ความร้อน ฝ้ายทนความร้อนได้ดี อุณหภูมิที่ใช้ในการรีดอาจสูงถึง 204-218 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาสั้น ๆ ฝ้ายเริ่มไหม้และเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลที่อุณหภูมิ 246 องศาเซลเซียส ถ้าสูงกว่านั้นอาจถูกทำลายได้

การติดไฟ ฝ้ายติดไฟได้ง่ายจะสลายตัวเป็นไอที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส จะเพิ่มปริมาณการสลายตัวต่อไปเรื่อย ๆ ขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้นถึง 400 องศาเซลเซียส ก็จะถึงจุดที่ลุกไหม้ และความร้อนที่เกิดขึ้นก็จะนำไปสลายผ้าที่ยังไม่ลุกไหม้ต่อไปจนกว่าจะหมดเชื้อ

2.1.3 สมบัติทางเคมี

กรด กรดอินทรีย์ เช่น กรดน้ำส้มไม่เป็นอันตรายต่อฝ้าย แต่ถ้าเป็นกรดประเภทกรดกำมะถัน หรือกรดไฮโดรคลอริกจะละลายฝ้ายเป็นยางเหนียว และถ้าถูกกรดไนตริก ทำปฏิกิริยาได้เซลลูโลสไนเตรตมีสมบัติเป็นวัตถุระเบิด

ด่าง ฝ้ายทนต่อสารละลายต่างได้ดี แม้ด่างที่ใช้เป็นสบู่ในการซักล้างก็ไม่มีผลต่อสมบัติของฝ้าย นอกจากนั้นแล้วด่างที่เป็นสารเคมีหลักในการทำเมอร์เซอไรส์กลับทำให้ฝ้ายมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

สารละลายอินทรีย์ ฝ้ายสามารถซักแห้งได้เนื่องจากมีความสามารถทนทานต่อสารละลายอินทรีย์ส่วนใหญ่ได้ดีมาก

สารซักฟอก สารซักฟอกที่มีขายในตลาดชนิดที่ไม่แ่ก่มากนักสามารถใช้ซักฟอกฝ้ายได้ แต่ต้องระวังเรื่องของความเข้มข้นและระยะเวลา ประกอบกับภายหลังการซักฟอกแล้วควรทำการซักล้างน้ำสะอาดออกให้หมด สารซักฟอกประเภทออกซิไดส์ที่แ่ก เช่น โปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต และโซเดียมไฮโปคลอไรท์ มีผลทำให้ฝ้ายเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกลายเป็นสภาพที่เรียกว่า ออกซีเซลลูโลส (oxycellulose) ที่มีสมบัติอ่อนแ่กว่าฝ้ายปกติขาดง่ายเมื่อเปียก และเปลี่ยนเป็นสีเหลือง

ราและแมลง ปกติผ้าฝ้ายเกิดราได้ง่ายเนื่องจากการลงแ่่งทำให้เป็นปัจจัยต่อการเจริญเติบโตของรา ปัญหานี้แ่ก้โดยการตกแต่งสำเร็จผ้าฝ้ายภายหลัง สำหรับแมลงก็เช่นกันเป็นปัญหาที่สืบเนื่องมาจากการลงแ่่งที่ตกค้างในฝ้ายมากกว่าสืบเนื่องจากเส้นใยฝ้ายเอง

แสง ฝ้ายถูกแสงแดดทำให้เกิดการออกซิไดส์เป็นออกซีเซลลูโลสเปลี่ยนเป็นสีเหลืองและเสื่อมคุณภาพลง ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงการใช้งานของฝ้ายไม่ให้ถูกแสงแดดโดยตรง

2.1.4 การใช้งานของฝ้าย

ด้วยสมบัติที่ดีเด่นมากมายของฝ้ายทั้งความแข็งแรง ทนทาน ความสามารถในการดูดซึมความชื้น การใช้งานหลากหลาย สามารถปั่นเป็นด้ายได้แทบทุกระดับของความละเอียด ทอเป็นผ้าได้ทุกโครงสร้าง ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากฝ้ายเป็นที่นิยมและใช้กันมาตลอด ผ้าฝ้าย 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ไม่สามารถใช้อย่างอื่นทดแทนได้ เช่น กางเกงยีน ผ้าปลอกหมอน ผ้าคลุมเตียง เป็นต้น นอกจากนั้นแล้วยังสามารถใช้ผสมร่วมกับเส้นใยชนิดอื่นทั้งใยธรรมชาติและ

ใยสังเคราะห์ ที่รู้จักกว้างขวางมากก็คือการใช้ร่วมกับเส้นใยพอลิเอสเทอร์ เช่น กรณีนีผ้า T/C คือ การผสมแบบมาตรฐานระหว่างพอลิเอสเทอร์กับฝ้ายในส่วนผสม 65 ต่อ 35 เป็นต้น

2.2 เคราติน (Keratin)⁷⁻¹¹

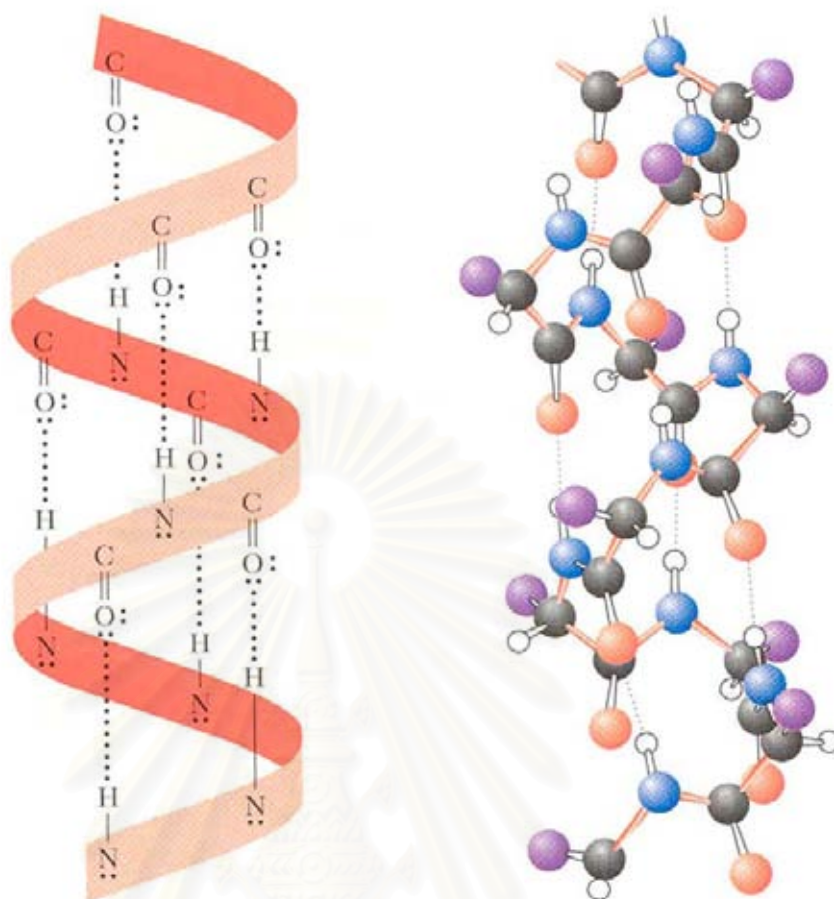
เคราตินเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติในกลุ่มของโปรตีน ซึ่งพบได้ทั่วไปในสัตว์ที่มีกระดูกสันหลัง โดยเป็นส่วนประกอบของผม ขน เขา และเล็บ เคราตินแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ α -เคราติน ซึ่งพบในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม และ β -เคราตินพบในสัตว์ปีกและสัตว์เลื้อยคลาน

2.2.1 โครงสร้างของเคราติน

1. เกลียวอัลฟา เป็นโครงสร้างที่มีลักษณะม้วนเป็นขดเกลียวเหมือนลวดสปริง พบใน α -เคราติน การหมุนครบ 1 รอบประกอบด้วยกรดอะมิโน 3.6 หน่วย และมีระยะ 5.4 \AA หมู่ R บน α -C อะตอมของกรดอะมิโนจะพุ่งออกจากแกนของเกลียวดังแสดงในรูปที่ 2.1 ลักษณะการขดม้วนเป็นเกลียวนี้ เสถียรด้วยพันธะไฮโดรเจนภายในโซ่ (interchain hydrogen bond) ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างอะตอมไฮโดรเจน ที่เกิดพันธะกับเพปไทด์อะตอมไนโตรเจนของกรดอะมิโนตำแหน่งที่หนึ่งกับอะตอมออกซิเจนของหมู่คาร์บอนิลของพันธะเพปไทด์ของกรดอะมิโนตำแหน่งที่สี่ถัดไปดังรูปที่ 2.2

รูปที่เสถียรของเกลียวอัลฟา คือ เกลียววนขวา (right-handed helix) ประกอบด้วยคอนฟิกูเรชันแบบ L (L-configuration) กรดอะมิโนบางชนิดไม่สามารถอยู่ในโครงสร้างเกลียวอัลฟาได้ เช่น โพรลีน (proline) เพราะ N อะตอมเป็นส่วนของวงแหวนที่แข็งแรงแง้ง บิดไม่ได้และไม่มีการหมุนรอบพันธะ N-C นอกจากนี้หมู่ R ของกรดอะมิโนบางชนิดที่มีขนาดใหญ่และมีประจุสามารถรบกวนการสร้างเกลียวอัลฟาได้

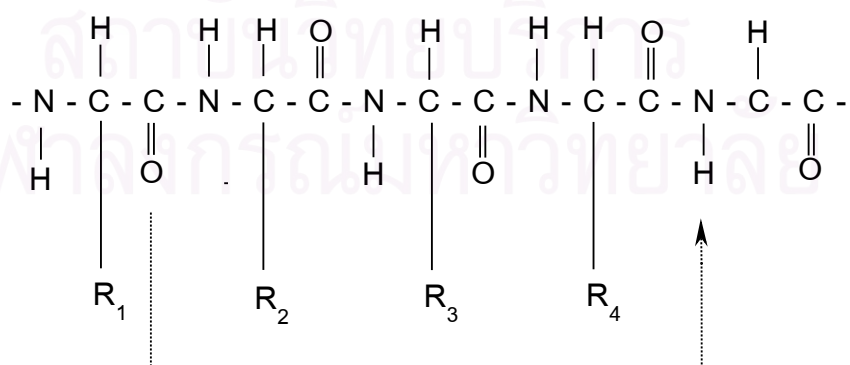
โซ่เพปไทด์ของ α -เคราตินที่พบในเส้นผมและขนสัตว์นั้นเป็นเกลียวอัลฟาชนิดวนขวา และทั้งสามหรือสี่เส้นมาอยู่รวมกันในลักษณะของเกลียวชนิดวนซ้าย (left-handed) เรียกว่า โปรโตไฟบริล (protofibril) ซึ่งเสถียรอยู่ด้วยพันธะไดซัลไฟด์ ไมโครไฟบริล (microfibril) ประกอบด้วย โปรโตไฟบริล 11 หน่วย ไมโครไฟบริลหลายร้อยหน่วยยึดแน่นในโปรตีนแมทริกซ์ (protien matrix) สร้างเป็นแมโครไฟบริล (macrofibril) แมโครไฟบริลหลาย ๆ หน่วยประกอบขึ้นเป็นเซลล์ ด้วยเหตุนี้เส้นใยของขนสัตว์จึงประกอบด้วยพอลิเพปไทด์จำนวนมากอยู่รวมกันยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจนและพันธะไดซัลไฟด์ และยึดแน่นในโปรตีนแมทริกซ์ที่มีปริมาณซัลเฟอร์สูง นอกจากนี้ไมโอซิน และโทรโปไมโอซิน (tropomyosin) ในกล้ามเนื้อ และอีพิเดอร์มิน (epidermin) ของผิวหนังก็ประกอบด้วยเกลียวอัลฟาตั้งแต่ 2 เกลียวขึ้นไปมาอยู่รวมกัน



(a) พันธะไฮโดรเจนระหว่างกรดอะมิโน

(b) เกลียวอัลฟาชนิดวนขวา

รูปที่ 2.1 โครงสร้างโซ่เกลียวอัลฟา (a) พันธะไฮโดรเจนระหว่างกรดอะมิโน (b) เกลียวอัลฟาชนิดวนขวา⁷



รูปที่ 2.2 พันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นภายในโซ่เพปไทด์ของเกลียวอัลฟา ระหว่างหมู่ C=O ของหน่วย n และหมู่ -NH ของหน่วย (n+4)¹¹

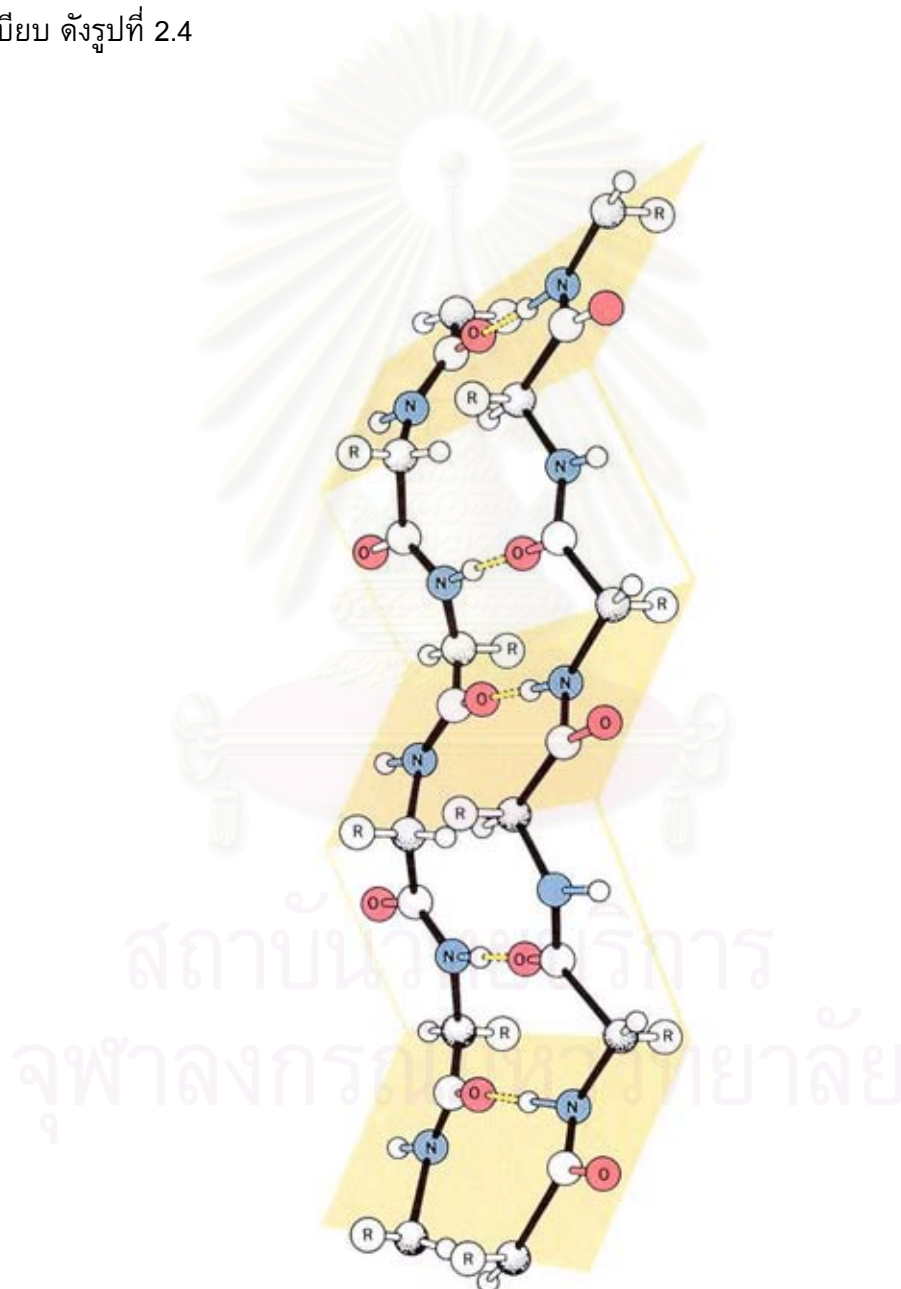
α -เคราตินมีกรดอะมิโนที่นอนโพลาร์ชนิดฟีนิลอะลามีน (phenylalanine) ไอโซลิวซีน (isoleucine) แวลีน (valine) เมไทโอนีน (methionine) และอะลานีนสูง นอกจากนี้ยังมีปริมาณของซิสเตอีนสูง ทำให้พันธะไดซัลไฟด์เชื่อมสายโซ่พอลิเพปไทด์ที่อยู่ใกล้กัน α -เคราตินแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ชนิดแข็ง (hard) และชนิดอ่อน (soft) ขึ้นอยู่กับปริมาณซัลเฟอร์ว่ามีมากหรือน้อย เคราตินชนิดแข็ง (hard keratin) เช่น ในผม เขา และเล็บ มีความอ่อนน้อยกว่าเคราตินชนิดอ่อน (soft keratin) เช่น ในผิวหนังเพราะพันธะไดซัลไฟด์ด้านแรงที่จะเปลี่ยนรูปของมัน



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของ α -เคราตินที่พบในเส้นผม(a) Macroscopic organization

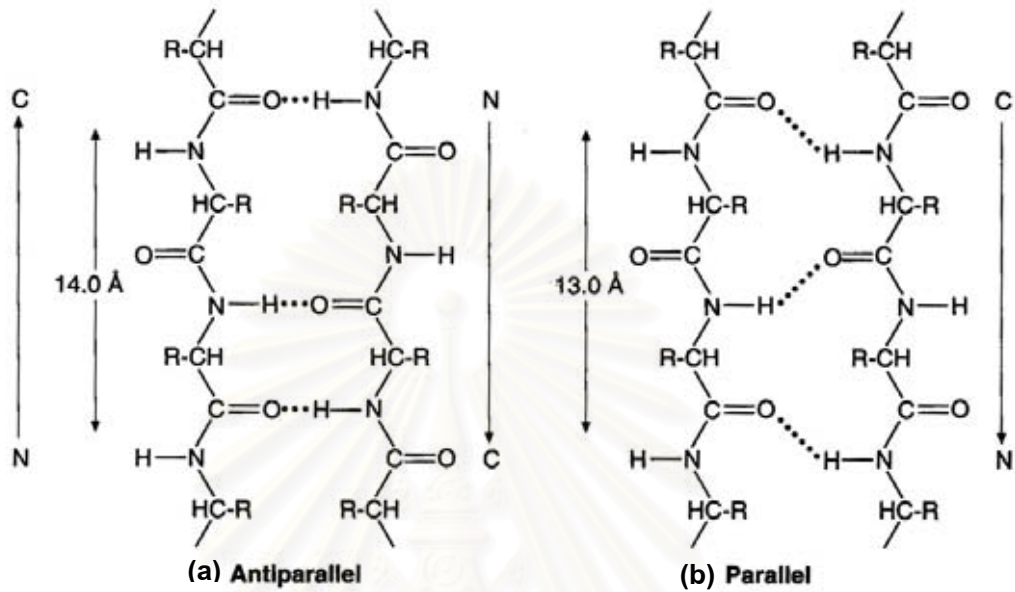
(b) Molecular organization⁸

2. แผ่นจیب เมื่อเส้นใยของ α -เคราตินถูกไคความร้อนหรือถูกดึงอย่างแรงจะทำให้โครงสร้างจากเกลียวอัลฟาเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างรูปเบตาหรือ β -เคราติน ซึ่งพบในขนสัตว์ปีก เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนภายในโซ่ถูกทำลายไป เมื่อปล่อยให้เย็นโครงสร้างรูปเบตาจะกลับมาสรางเป็นเกลียวอัลฟาเหมือนเดิม โครงสร้างรูปเบตาของโซ่พอลิเพปไทด์มีลักษณะเป็นโครงสร้างซิกแซกแล้วมาเรียงเป็นแผ่นจیب แต่ละโซ่พอลิเพปไทด์ถูกเชื่อมกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโซ่ (interchain hydrogen bond) พันธะไฮโดรเจนนี้เกิดขึ้นระหว่างหมู่ C=O และหมู่ -NH- ของโซ่ต่างกัน หมู่ R จะเรียงขึ้นข้างบนและลงข้างล่างของระนาบแผ่นจیبอย่างเป็นระเบียบ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การเรียงตัวขึ้นลงของหมู่ R อย่างเป็นระเบียบในโครงสร้างรูปเบตาของโซ่พอลิเพปไทด์^๑

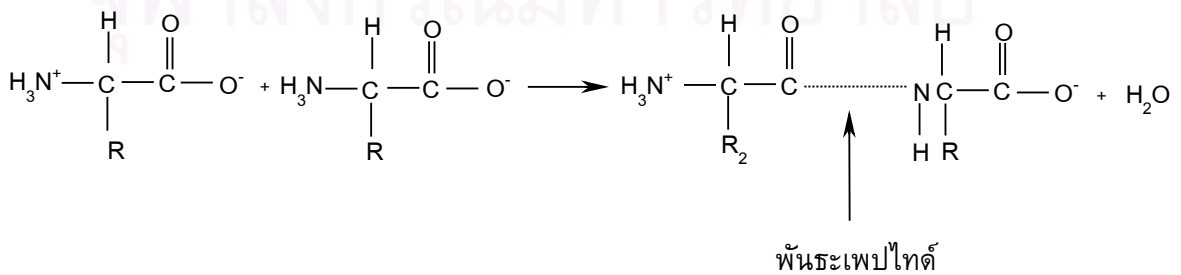
β -เคราตินมีโครงสร้างเป็นแผ่นจีบหรือโครงรูปเบตาแบบขนาน (parallel β -plated sheet) แต่ละสายโซ่เพปไทด์มีทิศทางไปทางเดียวกันดังรูปที่ 2.5 (b)



รูปที่ 2.5 โครงสร้างแผ่นจีบเบตา (a) Antiparallel (b) Parallel¹¹

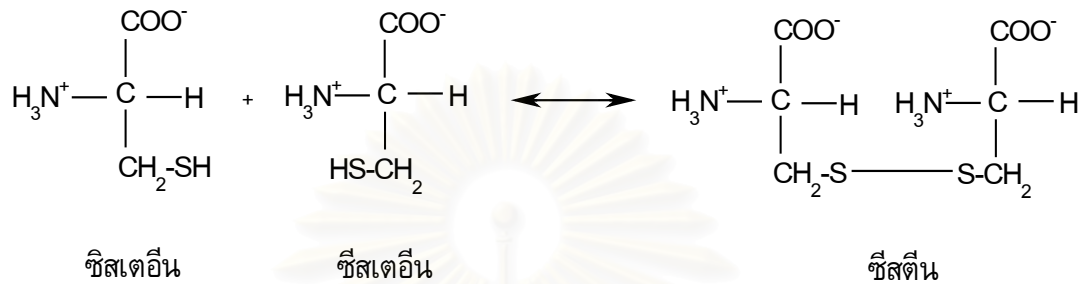
2.2.2 พันธะที่เกี่ยวข้องในโครงสร้างของโปรตีน

1. พันธะเพปไทด์ เป็นพันธะโควาเลนต์หรือพันธะเอไมด์ที่เชื่อมกรดอะมิโนเข้าด้วยกันเป็นโซ่พอลิเพปไทด์ เกิดขึ้นระหว่างหมู่คาร์บอกซิลของกรดอะมิโนตัวที่หนึ่งกับหมู่เอมิโนของกรดอะมิโนตัวที่อยู่ถัดไป รูปที่ 2.6 แสดงการสร้างพันธะเพปไทด์เชื่อมกรดอะมิโน 2 ตัวเป็นไดเพปไทด์ (dipeptide)



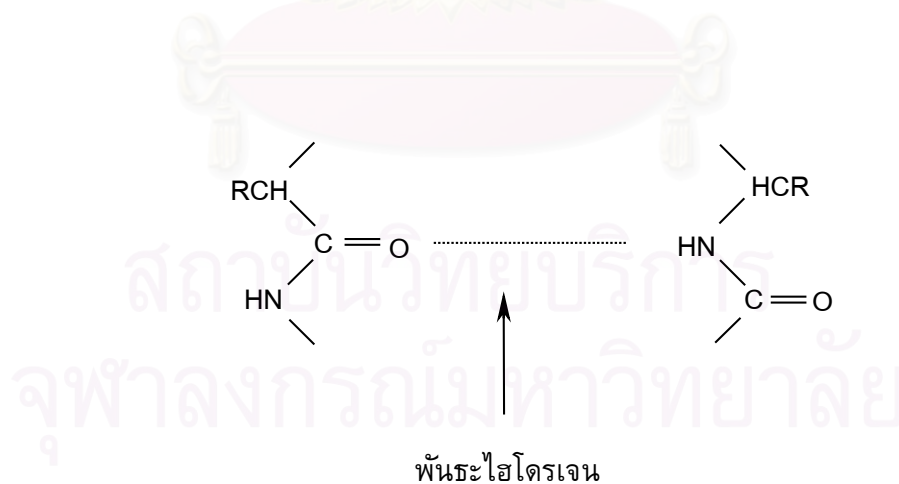
รูปที่ 2.6 การสร้างพันธะเพปไทด์ของกรดอะมิโน 2 ตัวเกิดเป็นไดเพปไทด์¹¹

2. พันธะไดซัลไฟด์ เป็นพันธะโควาเลนต์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ระหว่างหมู่ไทออล (thiol group, SH) ของกรดอะมิโนชนิดซิสเทอีน (cysteine) 2 โมเลกุล ในโซ่พอลิเพปไทด์โซ่เดียวกัน (intrachain disulfide bond) หรือต่างโซ่กัน (interchain disulfide bond) ก็ได้



รูปที่ 2.7 พันธะไดซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นจากกรดอะมิโนชนิดซิสเทอีน¹¹

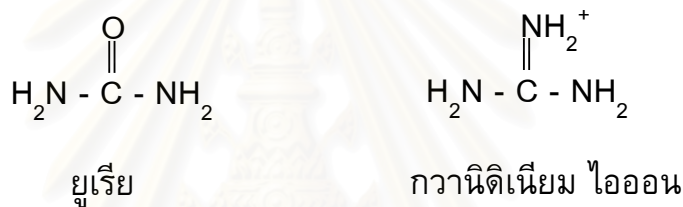
3. พันธะไฮโดรเจน เป็นพันธะอ่อนที่เกิดขึ้นโดยการแบ่งการใช้ H อะตอมระหว่าง N กับคาร์บอนิล O ในโซ่พอลิเพปไทด์เดียวกัน (intrachain hydrogen bond) หรือต่างกัน (interchain hydrogen bond) ก็ได้ โครงสร้างของเกลียวอัลฟาเสถียรอยู่ด้วยพันธะนี้ระหว่างหมู่ C=O และ -NH- ในโซ่เดียวกันดังรูปที่ 2.8 พันธะนี้สามารถถูกทำลายได้โดยกระบวนการทำให้โปรตีนสูญเสียสภาพธรรมชาติ (denaturation)



รูปที่ 2.8 พันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างของโปรตีน¹¹

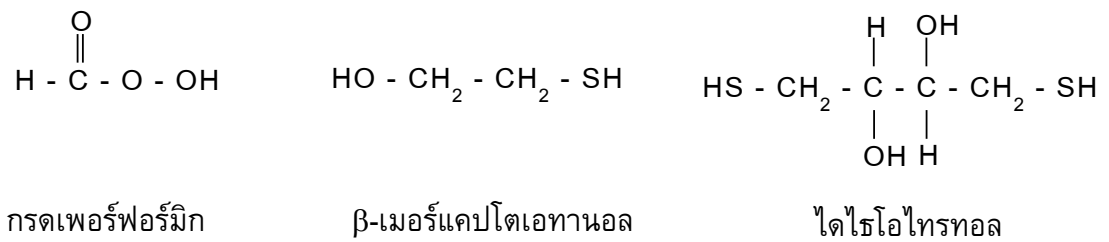
2.2.3 การเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีน (Denaturation)

การใช้อุณหภูมิที่สูงหรือการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-เบสที่สูงหรือต่ำเกินไป หรือการใช้สารบางชนิด เช่น 6-8 โมลาร์ ยูเรีย และ 4-6 โมลาร์ กวานิดีนียม ไอออน (guanidinium ion) ดังรูปที่ 2.9 มีผลทำให้โปรตีนเสียลักษณะการขดตัวหรือม้วนตัวไปและสูญเสียแอกติวิตีทางชีวภาพ หรือสูญเสียสภาพธรรมชาติไป พันธะอ่อน เช่น พันธะไฮโดรเจน พันธะไฮโดรโฟบิก และพันธะไอออนิกถูกทำลาย แต่พันธะเพปไทด์และพันธะไดซัลไฟด์ยังคงอยู่ ตัวอย่างเช่น ถ้านำเอนไซม์ไปต้มจะทำให้เอนไซม์สูญเสียสภาพธรรมชาติไม่สามารถไปเร่งปฏิกิริยาได้ เมื่อโปรตีนสูญเสียสภาพธรรมชาติสมบัติของโปรตีนจะเปลี่ยนแปลงไป เช่น ความหนืด (viscosity) การดูดแสงในช่วงคลื่นอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet) และการหมุนระนาบของแสงโพลาไรซ์ (optical rotation)



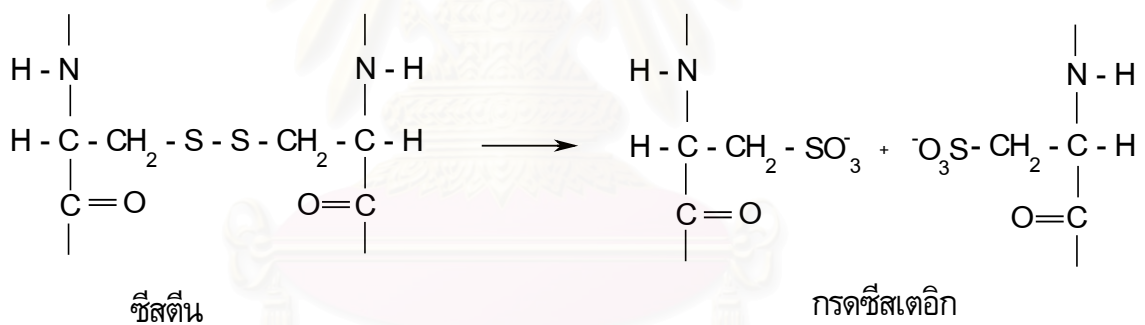
รูปที่ 2.9 สูตรโครงสร้างของยูเรียและกวานิดีนียม ไอออน¹¹

ทั้งยูเรียและกวานิดีนียมไอออนสามารถทำลายพันธะอ่อนได้ เช่น พันธะไฮโดรเจน จึงใช้ประโยชน์ของยูเรียและกวานิดีนียมไอออน รวมทั้งสารซักฟอก (detergent) เช่น โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (sodium dodecyl sulfate หรือ SDS) ในการแยกหน่วยย่อยของโปรตีนออกจากกัน สารซักฟอกสามารถทำให้โปรตีนเสียสภาพธรรมชาติได้ถึงแม้ที่ความเข้มข้นต่ำประมาณ 10^{-6} โมลาร์ ทั้งนี้เพราะมันไปทำลายแรงไฮโดรโฟบิกที่ทำให้โครงสร้างโปรตีนคงตัวอยู่ได้ เช่นเดียวกับสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ เช่น อะลิฟาติกแอลกอฮอล์ (aliphatic alcohol) ที่ความเข้มข้นสูง ๆ สามารถทำลายแรงไฮโดรโฟบิกในโครงสร้างของโปรตีนได้ ส่วนสารเคมี เช่น กรดฟอร์มิก (formic acid) และตัวรีดิวซ์ (reducing agent) เช่น β -เมอร์แคปโตเอทานอล (β -mercaptoethanol) และไดไทโอไทรทอล (dithiothreitol) ดังรูปที่ 2.10 สามารถทำลายพันธะไดซัลไฟด์

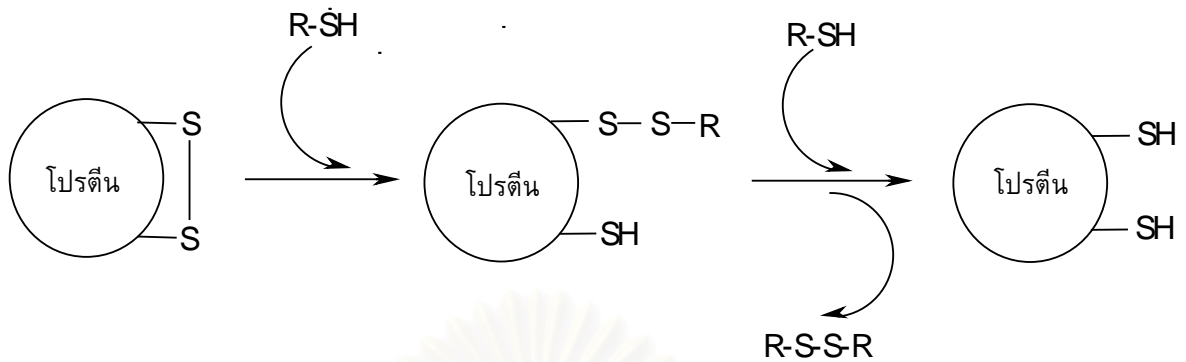


รูปที่ 2.10 โครงสร้างของ กรดเพอร์ฟอร์มิก β -เมอร์แคปโตเอทานอล และไดไฮโอไทรทอล¹¹

ปฏิกิริยาการทำลายพันธะไดซัลไฟด์โดยกรดเพอร์ฟอร์มิก เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ไม่ผันกลับดังรูปที่ 2.11 แต่ปฏิกิริยาการทำลายพันธะนี้โดย β -เมอร์แคปโตเอทานอลเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 ปฏิกิริยาการทำลายพันธะไดซัลไฟด์โดยกรดเพอร์ฟอร์มิก¹¹



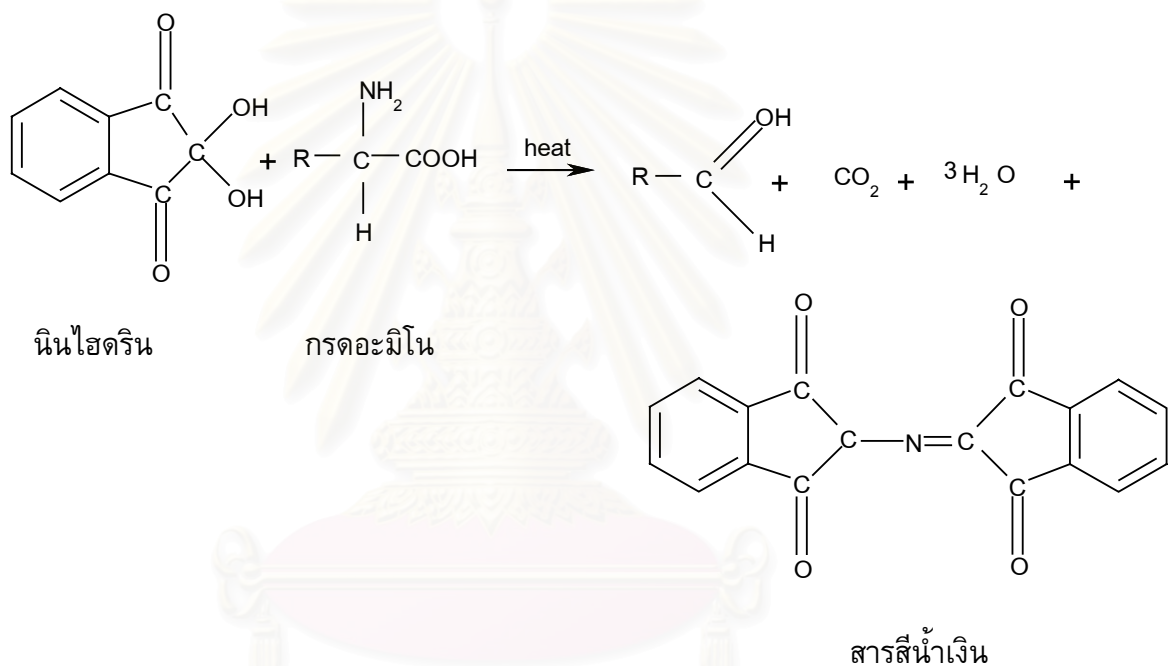
รูปที่ 2.12 ปฏิกิริยารีดักชันของพันธะไดซัลไฟด์ในโปรตีนโดย β -เมอร์แคปโตเอทานอล¹¹

กระบวนการแอนนีลิ่ง (annealing หรือ renaturation หรือ refolding) เป็นกระบวนการทำให้โปรตีนที่สูญเสียสภาพธรรมชาติกลับสู่สภาพเดิม ทำให้โปรตีนกลับมีแอกติวิตีทางชีวภาพเหมือนเดิมได้ หลังจากที่แยกเอาตัวทำลายสภาพการขดตัว เช่น ยูเรีย และ β -เมอร์แคปโตเอทานอลออกไปโดยไดเอลิซิส

2.2.4 ปฏิกริยาที่ใช้ในการทดสอบโปรตีน

1. ปฏิกริยานินไฮดริน (Ninhydrin reaction)

ปฏิกริยานินไฮดริน เป็นปฏิกริยาการทดสอบกรดแอลฟาอะมิโนเพปไทด์หรือโปรตีน โดยให้กรดอะมิโนทำปฏิกริยากับนินไฮดรินที่อุณหภูมิสูงๆ จะเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แอมโมเนีย และสารสีน้ำเงิน ดังแสดงในรูปที่ 2.13

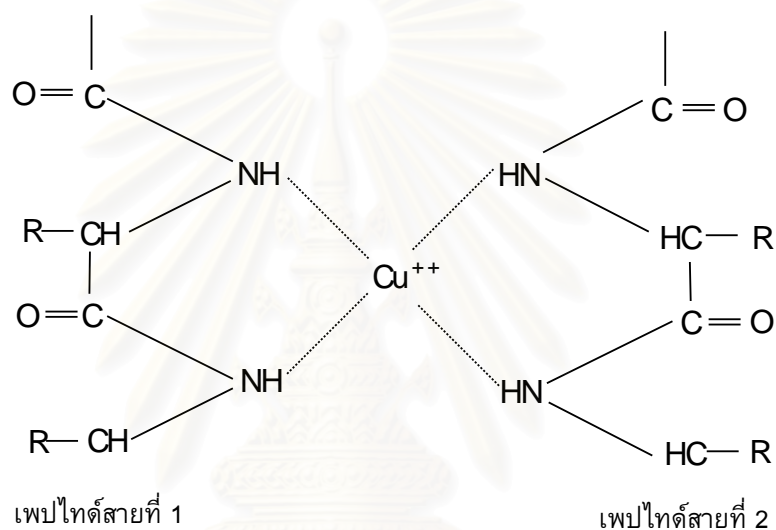


รูปที่ 2.13 ปฏิกริยานินไฮดริน¹¹

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. ปฏิกริยาไบยูเรต (Biuret reaction)

ปฏิกริยาไบยูเรต เป็นปฏิกริยาการทดสอบสารที่ประกอบด้วยพันธะเพปไทด์ตั้งแต่ 2 แห่งขึ้นไป ใช้ทดสอบโปรตีนทั่วไป และผลจากการไฮโดรไลซ์โปรตีนที่มีโมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีเอส เพปโทน และเพปไทด์ โดยทำปฏิกริยากับสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) ในสารละลายต่าง ซึ่งจะให้สีม่วงครามกับโปรตีน แต่สารที่ได้จากการไฮโดรไลซ์โปรตีน จะให้สีต่างกันออกไปตั้งแต่ม่วงจนถึงชมพู ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลว่าใหญ่หรือเล็ก ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.14 สารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง Cu^{++} และสารประกอบที่มีพันธะเพปไทด์¹¹

3. ปฏิกริยาแซนโทโปรเทอิก (Xanthoproteic reaction)

ปฏิกริยาแซนโทโปรเทอิกใช้ตรวจสอบโปรตีนที่ประกอบด้วยกรดอะมิโนที่มีวงแหวนเบนซีนอยู่ในโมเลกุลคือ ไทโรซีน และทริปโตเฟนโดยการเติมกรดไนตริก ลงในสารละลายโปรตีนจะทำให้โปรตีนเปลี่ยนเป็นสีเหลือง ปฏิกริยานี้มีประโยชน์ในการตรวจหาโปรตีนอัลบูมินในปัสสาวะของผู้ป่วยโรคไต

2.3 การตกแต่งสำเร็จห้วงไฟ (Flame Retardant Finishing)

การตกแต่งสำเร็จสิ่งทอ หมายถึงการกระทำด้วยวิธีการใด ๆ กับเส้นใย เส้นด้ายหรือผ้า ก่อนหรือหลังการผลิตเป็นผืนเพื่อเปลี่ยนลักษณะที่เห็นและสัมผัสให้ดีขึ้น และเพิ่มสมบัติที่ดีในด้านต่าง ๆ เพื่อให้เหมาะสมที่จะใช้ประโยชน์ต่อไป

การตกแต่งสิ่งทอหรือเสื้อผ้าให้ทนไฟเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อลดอันตรายที่เกิดจากลุกติดไฟ ในหลายประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น ฯลฯ มีกฎหมายกำหนดให้เสื้อผ้า เช่น ชุดนอนเด็ก เครื่องใช้ที่ทำจากผ้า เช่น ผ้าม่าน พรม ที่นอน เป็นต้น ต้องผ่านการตกแต่งสำเร็จห้วงไฟ (flame retardant finishes)

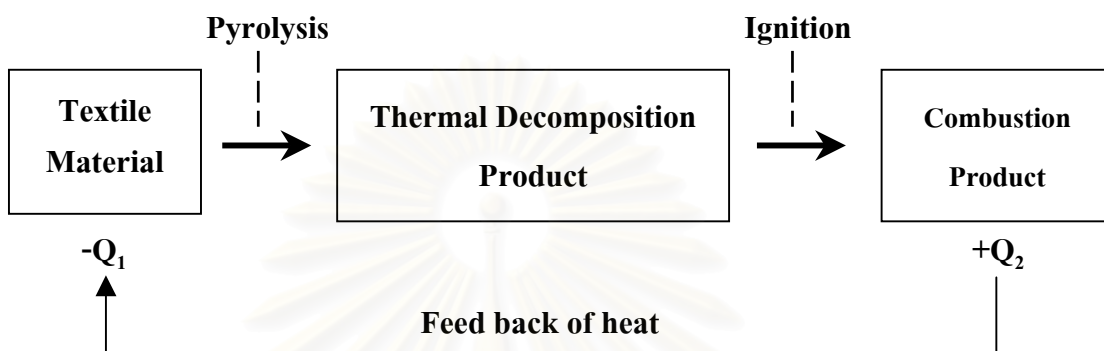
เส้นใยธรรมชาติที่จัดว่ามีสมบัติทนไฟได้แน่นอน (fire proof) คือ โยหิน (asbestos) แต่เส้นใยชนิดนี้ไม่เหมาะที่จะใช้ทำเสื้อผ้า หรือตกแต่งภายใน ประโยชน์ใช้สอยดังกล่าวทำจากเส้นใยฝ้าย ขนสัตว์หรือพอลิเอสเตอร์ ไนลอน ฯลฯ และเส้นใยเหล่านี้จะลุกติดไฟหรือหลอมตัวให้ความร้อนสูง เป็นอันตรายอย่างยิ่งแก่ผู้ใช้ เมื่อเกิดอุบัติเหตุไฟไหม้ขึ้นเสื้อผ้าหรือเครื่องใช้ที่ตกแต่งเพื่อไม่ให้ผ้าติดไฟ สามารถช่วยลดอันตรายดังกล่าวได้

ผ้ามีสมบัติทนไฟต่างกัน 3 ระดับ คือ ผ้าที่ทนไฟหรือกันไฟแบบ fire proof จะไม่ลุกไหม้ไฟและไม่เสียหาย ซึ่งได้แก่ผ้าโยหิน ผ้าที่มีสมบัติทนไฟแบบ flame resistant จะสามารถทนหรือไม่ลุกไหม้ เมื่อได้รับอุณหภูมิสูงถึง 600 องศาเซลเซียส โดยจะยังคงรูปร่างอยู่ เช่น ผ้าที่ทำจากเส้นใย Nomex, Kynol ส่วนผ้าที่ใช้มีสมบัติต้านการลุกไหม้แบบ flame retardant อาจจะมีการลุกติดไฟได้ แต่ก็เกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่าปกติ และเกิดในระยะสั้น ๆ หรือไหม้แดงโดยไม่มีเปลวไฟในระยะสั้น ๆ เมื่อไม่มีการลุกไหม้ที่อุณหภูมิสูงก็จะไม่ทำให้เกิดความร้อนที่จะทำให้เกิดการลุกไหม้หรือสลายตัวต่อไป ผ้าที่มีสมบัติทนไฟก็โดยการตกแต่งผ้านั้น ๆ ด้วยสารทนไฟ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4 วงจรการลุกไหม้ของวัสดุสิ่งทอ (Burning Cycle of Textile Materials)¹²

การที่เราจะสามารถหน่วงหรือต้านการติดไฟหรือการลุกไหม้ของวัสดุสิ่งทอได้นั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องเข้าใจวงจรการลุกไหม้ของวัสดุสิ่งทอเป็นอย่างดี วงจรการลุกไหม้ของวัสดุสิ่งทอแสดงในรูปที่ 2.15 ดังนี้



รูปที่ 2.15 วงจรการลุกไหม้ของวัสดุสิ่งทอ

จากรูปวัสดุสิ่งทอจะเกิดการสลายตัว กลายเป็นไอหรือแก๊สที่ติดไฟได้ง่าย (flammable volatiles or flammable gases) เมื่อได้รับความร้อน เรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการ Pyrolysis ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดปฏิกิริยาดูดความร้อน (endothermic reaction, $-Q_1$) ไอหรือแก๊สที่ติดไฟได้ดังกล่าวจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศเกิดการเผาไหม้ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic reaction, $+Q_2$) และความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะถูกนำกลับไปทำให้วัสดุสิ่งทอร้อนและเกิดการสลายตัวให้ไอหรือแก๊สที่ติดไฟได้ง่าย ทำให้การเผาไหม้ดำเนินต่อไปเป็นวงจรเช่นเดิมอีก

เส้นใยแต่ละชนิดมีความสามารถในการติดไฟและการลุกไหม้ที่แตกต่างกัน เช่น ฝ้าย จะลุกติดไฟได้ง่าย และเมื่อลุกไหม้จะให้เปลวไฟซึ่งจะเผาไหม้ส่วนที่เหลือต่อไปจนเหลือแต่ถ่าน ถึงแม้ว่าจะได้นำแหล่งต้นไฟออกไปแล้ว แต่ถ้าเป็นเส้นใยสังเคราะห์เมื่อเข้าใกล้ไฟจะมีการหดตัว เมื่อติดไฟจะลุกไหม้แต่จะดับไปเองเมื่อแหล่งต้นไฟได้ถูกนำออกไป ตารางที่ 2.1 ได้เปรียบเทียบให้เห็นถึงสมบัติในด้านความคงทนต่อความร้อนของเส้นใยชนิดต่าง ๆ

ตารางที่ 2.1 สมบัติในด้านความคงทนต่อความร้อนของเส้นใยชนิดต่าง ๆ¹³

ชนิดเส้นใย	T_p (°C)	T_c (°C)	LOI
ขนสัตว์	245	600	25
ฝ้าย	230	350	18.4
วิสโคส เรยอน	350	420	18.9
ไทรอะซีเตต	305	540	18.4
ไนลอน 6	431	450	20-21.5
ไนลอน 6,6	403	530	20-21.5
พอลิเอสเตอร์	420-447	480	20-21
อะคริลิก	290	560	18.2
นอมเม็กซ์	410	500	28.5-30
เคฟลาร์	590	550	29

หมายเหตุ T_p = อุณหภูมิที่เส้นใยเริ่มสลายตัวด้วยความร้อน

T_c = อุณหภูมิที่เส้นใยลุกไหม้ได้ถ้ามีออกซิเจนเพียงพอ

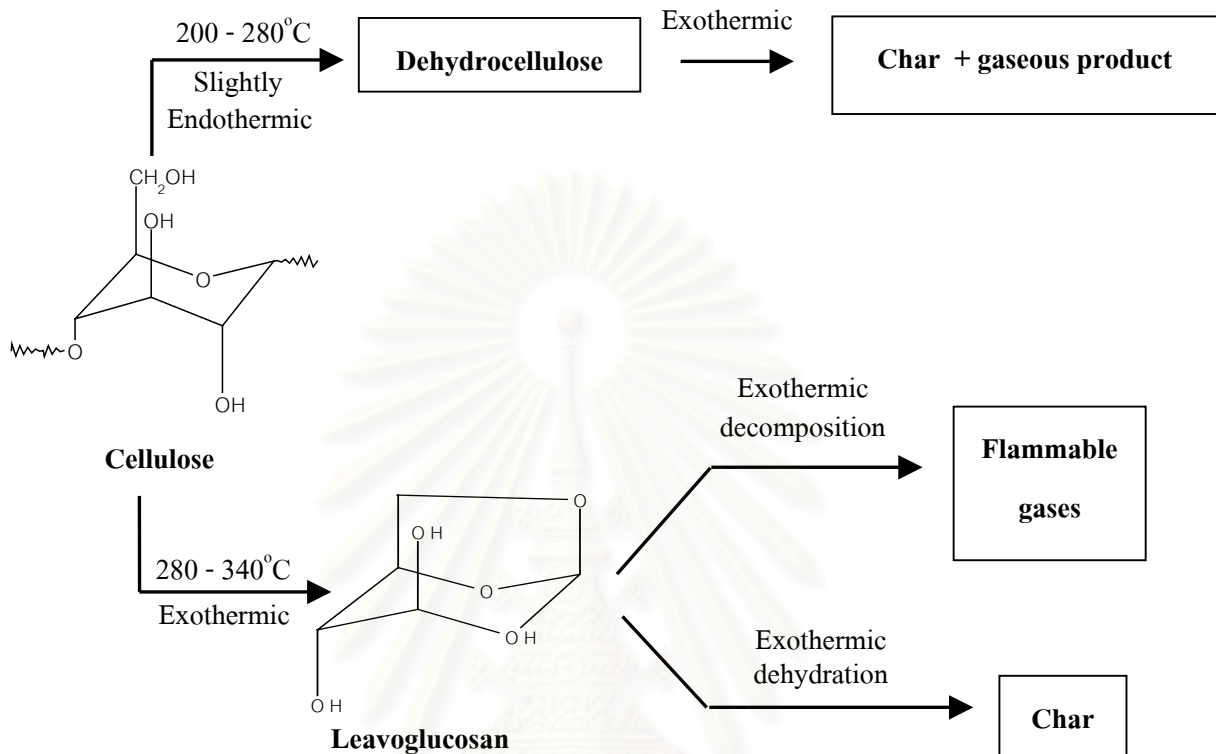
LOI (Limiting oxygen index) คือ ปริมาณของออกซิเจนต่ำที่สุดที่จำเป็นต้องมีในบรรยากาศเพื่อให้การลุกไหม้ดำเนินต่อไปได้ โดยปกติอากาศมีออกซิเจนอยู่ 21 เปอร์เซ็นต์ เพราะฉะนั้น เส้นใยที่มีค่า LOI ต่ำกว่า 21 จะสามารถลุกได้ง่ายในบรรยากาศ โดยทั่วไป ถ้า LOI สูงกว่า 26 เส้นใยจะมีสมบัติในด้านการหน่วงไฟหรือทนไฟที่ดี

จากตารางที่ 2.1 เห็นได้ว่าฝ้ายซึ่งเป็นเส้นใยที่มีการนำมาทอเป็นผืนผ้าและมีปริมาณการใช้มากที่สุดเนื่องจากมีความสบายเมื่อสวมใส่จะมีอุณหภูมิในการติดไฟต่ำกว่าเส้นใยชนิดอื่นๆ และยังมีค่า LOI ต่ำเพียง 18.4 เท่านั้นจึงสามารถติดไฟได้ง่ายกว่าเส้นใยชนิดอื่น ดังนั้น ฝ้ายจึงเป็นเส้นใยที่มีการนำมาตกแต่งหน่วงไฟมากที่สุด

2.4.1 ลักษณะการสลายตัวของฝ้ายเมื่อได้รับความร้อน

ผ้าฝ้ายติดไฟง่ายเนื่องจากเซลลูโลสซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักได้รับความร้อนจากเปลวไฟจะเกิดการสลายตัวได้ Leavoglucosan ซึ่งจะสลายตัวต่อไปได้ char และแก๊สที่ติดไฟได้ง่าย หรือสามารถสลายตัวโดยการกำจัดน้ำออกได้ char และ gases product ผลิตภัณฑ์ที่ติดไฟยาก

แต่โดยทั่วไปแล้วเซลลูโลสจะสลายตัวให้ Leavoglucosan มากกว่าจึงทำให้ฝ้าฝายเกิดการลุกไหม้โดยไม้ดับได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อนจากเปลวไฟ ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การสลายตัวของเซลลูโลส¹⁴

การสลายตัวของฝ้าฝายเมื่อได้รับความร้อนที่สูงพอ จะดำเนินไปตามขั้นตอนประกอบด้วย 3 ขั้นตอนดังนี้

2.4.1.1 การสลายตัวที่อุณหภูมิ T_p (Pyrolysis)

เมื่อฝ้าฝายได้รับความร้อน มันจะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 230 องศาเซลเซียส การสลายตัวในขั้นแรกนี้ จะทำให้เกิดของเหลวซึ่งมีทั้งประเภทระเหยง่าย และระเหยยาก รวมทั้งสารกึ่งของเหลวและของแข็ง (tars) และส่วนที่เหลือของใยฝ้าฝายซึ่งจะมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นคาร์บอน (carbonaceous char) ถ้าความร้อนยังคงอยู่ การสลายตัวจะดำเนินต่อไปเกิดแก๊สชนิดต่างๆ ทั้งที่ติดไฟได้ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ เอทิลีน และมีเทน และแก๊สที่ไม่ติดไฟ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ นอกจากนี้ก็จะมีของเหลวที่ระเหยง่ายและไม่ติดไฟ เช่น

แอลกอฮอล์ แอลดีไฮด์ และแอลเคน ชนิดต่าง ๆ ด้วย สำหรับวัสดุเส้นใยเดิมก็จะสลายตัวต่อไปจนเหลือแต่ถ่านคาร์บอน (char)

2.4.1.2 การลุกเป็นเปลว (Flaming)

เนื่องจากการสลายตัวของเส้นใยในข้อ 2.4.1.1 ได้เกิดสารที่ติดไฟหลายชนิด และค่า LOI ของฝ้ายก็อยู่ในระดับต่ำพอที่ฝ้ายจะไม่ลุกไหม้ในบรรยากาศธรรมดาได้นั้น ดังนั้นเราจึงพบว่า ทันทีที่ฝ้ายเริ่มสลายตัวด้วยความร้อน การลุกไหม้เป็นเปลวก็จะเกิดขึ้นไปพร้อม ๆ กัน โดยส่วนใหญ่จะเกิดการลุกไหม้ของแก๊สและไอของของเหลวที่ติดไฟได้ง่ายที่เกิดจากการสลายตัวของเซลลูโลสในขั้นแรก การลุกไหม้นี้จะทำให้แก๊สและของเหลวเหล่านี้สลายไปหมดกลายเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ และน้ำ เมื่อสารที่ลุกติดไฟนี้สลายไปหมดแล้ว เปลวไฟก็จะดับ เหลือแต่สารที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก

2.4.1.3 การคุแดง (Glowing)

เมื่อเปลวไฟดับสารที่เหลือจากการลุกไหม้เป็นเปลวข้างต้นจะคุแดงต่อไป โดยคาร์บอนที่อยู่ในสารที่เหลือนี้จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังสมการ

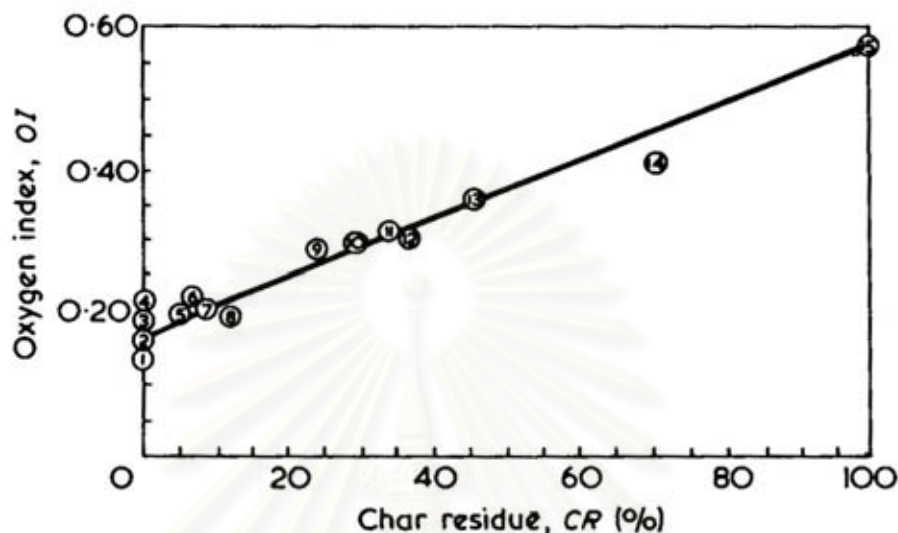


โดยปกติปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น จะเป็นปฏิกิริยาที่ 2.1 ซึ่งจะปล่อยความร้อนออกมามากกว่าปฏิกิริยาที่ 2.2 ถึง 4 เท่า ความร้อนที่ปล่อยออกมานี้ มีมากพอที่จะทำให้การคุแดงดำเนินต่อไปจนเหลือแต่ถ่าน

2.4.2 ถ่านคาร์บอน (Char)

char เกิดจากกระบวนการสลายตัวเนื่องจากความร้อน ซึ่งมีบทบาทอย่างมากในการหน่วงไฟ การเกิดขึ้นของ char มีความสำคัญต่อการสลายตัว เพราะการเกิด char จะไปลดการเกิดแก๊สไวไฟ (flammable gas) อีกนัยหนึ่ง การเกิด char จะไปจำกัดปริมาณของเชื้อเพลิงนอกจากนี้ หน้าที่ของ char อีกประการหนึ่งก็คือ char จะเกิดเป็นชั้นของฉนวนที่ยึดติดกับผิวหน้าของพอลิเมอร์ และเนื่องจาก char เกิดการสลายตัวได้ยากกว่าพอลิเมอร์ char จึงทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้พอลิเมอร์สัมผัสกับเปลวไฟ ดังนั้นการสลายตัวของพอลิเมอร์จึงเกิดได้ยากขึ้น อย่างไรก็ตามต้องพิจารณาถึงความยากง่ายของการสลายตัวของ char ซึ่งขึ้นกับองค์ประกอบของ char

นั่นเอง จากการทดลองพบว่าเมื่อมีชั้นของ char มากขึ้น วัสดุจะติดไฟยากขึ้น โดยพิจารณาจากค่า LOI ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LOI และปริมาณของ char 1, polyformaldehyde; 2, polyethylene, polypropylene; 3, polystyrene, polyisoprene; 4, nylon; 5, cellulose; 6, poly (vinyl alcohol); 7, PETP; 8, polyacrylonitrile; 9, PPO[®]; 10, polycarbonate; 11, Nomex[®]; 12, polysulfone; 13, Kynol[®]; 14, polyamide; 15, carbon¹²

2.5 กลไกการทำงานของสารหน่วงไฟ (Flame Retardant Mechanisms)

กลไกการทำงานของสารหน่วงไฟ คือการไปรบกวนวงจรการลุกไหม้ของวัสดุสิ่งทอที่แสดงในรูปที่ 2.15 ไม่ให้ดำเนินไปได้ตามปกติ ซึ่งจะถูกรบกวนด้วยทฤษฎีที่แตกต่างกันดังนี้

2.5.1 Endothermic theory (thermal theory)

ทฤษฎีนี้ใช้อธิบายการทำงานของสารหน่วงไฟที่จะดูดความร้อนบางส่วนจากระบบไป ทำให้สารหน่วงไฟเกิดการสลายตัวในรูปของการหลอมเหลวหรือการระเหิด ซึ่งจะช่วยให้เส้นใยได้รับความร้อนน้อยลงจนไม่สามารถร้อนถึงอุณหภูมิที่สามารถเกิดการเผาไหม้ได้

2.5.2 Gas theory

ทฤษฎีนี้ใช้อธิบายการทำงานของสารหน่วงไฟที่เมื่อติดไฟแล้วจะสลายให้แก๊สที่ติดไฟยากหรือแก๊สที่ไม่ติดไฟ เช่น แก๊สไนโตรเจน (N_2) แก๊สแอมโมเนีย (NH_3) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และไอน้ำ ทำให้เส้นใยไม่สามารถเกิดการเผาไหม้ได้

2.5.3 Melt theory

ทฤษฎีนี้ใช้อธิบายการทำงานของสารหน่วงไฟที่เมื่อโดนความร้อนแล้วจะหลอมละลายปกคลุมพื้นผิวเส้นใย ทำให้แก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ถูกปล่อยออกมา และยังทำให้อากาศหรือออกซิเจนไม่สามารถแทรกเข้าไปในเส้นใยได้อีกด้วย เส้นใยจึงไม่เกิดการเผาไหม้

2.5.4 Radical capture theory

ทฤษฎีนี้ใช้อธิบายการทำงานของสารหน่วงไฟที่เมื่อโดนความร้อนแล้วจะเกิดอนุมูลอิสระที่สามารถจับกับอนุมูลอิสระที่เกิดจากการเผาไหม้ของเส้นใยเซลลูโลส เช่น $H\cdot$, $OH\cdot$ กลายเป็นแก๊ส ซึ่งทำให้ปฏิกิริยา Free-radical chain propagation สิ้นสุด การลุกลามก็จะสิ้นสุดลง

2.5.5 Dehydration theory

ทฤษฎีนี้ใช้อธิบายการทำงานของสารหน่วงไฟที่ใช้สำหรับเส้นใยเซลลูโลส โดยสารเหล่านี้จะไปทำให้เส้นทางการสลายตัว (decomposition path) ของเส้นใยเซลลูโลสเปลี่ยนแปลง จากเดิมที่เคยสลายตัวให้ไอและแก๊สที่ติดไฟได้ง่าย ส่งผลให้การลุกลามดำเนินต่อไปนั้นเปลี่ยนเป็นการสลายตัวที่เกิดแต่ถ่านคาร์บอน และน้ำ

2.6 ประเภทของสารหน่วงไฟ (Classification of Flame Retardants)¹⁵

การใช้สารหน่วงไฟเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถลดการเกิดอัคคีภัยได้ โดยจะไปขัดขวางกระบวนการลุกไหม้ให้เกิดขึ้นน้อยลง

2.6.1 สารหน่วงไฟที่จำแนกตามความคงทน

2.6.1.1 สารหน่วงไฟประเภทไม่คงทน (Nondurable flame retardants)

สารหน่วงไฟประเภทนี้ได้แก่ กรดอินทรีย์ เช่น กรดบอริก กรดฟอสฟอริก และซิงค์คลอไรด์ หรือเบส เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมคาร์บอเนต แต่เนื่องจากกรดและเบสจะทำให้เกิดปัญหาการกัดกร่อน ดังนั้นในทางปฏิบัติแล้ว มักนิยมใช้สารหน่วงไฟในรูปของเกลือมากกว่า เช่น แอมโมเนียมฟอสเฟต ไคโอเนียมฟอสเฟต ยูเรียฟอสเฟต และแอมโมเนียมซัลฟาเมต เมื่อเกลือเหล่านี้ได้รับความร้อนจะสลายตัวเป็นแอมโมเนีย กรดฟอสฟอริก หรือกรดพอลิฟอสฟอริก เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกรดฟอสฟอริกจะทำให้น้ำออกกลายเป็นกรดเมตาไฟโรฟอสฟอริกมีลักษณะเป็นของเหลวหนืดทำหน้าที่เป็นตัวกันไม่ให้อากาศหรือออกซิเจนแทรกเข้าไปในเส้นใย ทำให้เส้นใยไม่สามารถเกิดการเผาไหม้ และทำหน้าที่เป็นกรดลูอิสที่ทำให้เส้นใยสลายตัวเกิดถ่านคาร์บอนเพิ่มขึ้น (char-promoting lewis acid)

สารหน่วงไฟสำหรับเส้นใยเซลลูโลสประเภทนี้จะไม่คงทนต่อการซักล้าง สามารถถูกชะล้างออกไปได้ด้วยน้ำ น้ำฝน เหงื่อ เหมาะที่จะตกแต่งผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องผ่านการซักล้าง เช่น ผ้าประเภทใช้แล้วทิ้ง (disposable fabrics) ฉนวนจ่อภาพยนตร์ กระดาษ และบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น

2.6.1.2 สารหน่วงไฟประเภทกึ่งคงทน (Semidurable flame retardants)

สารหน่วงไฟประเภทนี้ได้แก่ เกลือของกรดอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ เช่น เกลือฟอสเฟตหรือเกลือบอเรตของโลหะดีบุก สังกะสี อะลูมิเนียม รวมทั้งเกลือที่มีไอออนของพอลิฟอสเฟตน้ำหนักโมเลกุลสูง

สารหน่วงไฟประเภทนี้ยังมีความคงทนภายหลังการซักล้าง 20 ครั้ง ดังนั้นจึงเหมาะที่จะใช้ตกแต่งผลิตภัณฑ์ที่ไม่จำเป็นต้องผ่านการซักล้างบ่อย เช่น ผลิตภัณฑ์ผ้าปูที่นอน เคาะสิ่งทอ และพรม เป็นต้น

2.6.1.3 สารหน่วงไฟประเภทมีความคงทนสูง (Durable flame retardant)

สารหน่วงไฟประเภทนี้จะมีฟอสฟอรัสหรือฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบหรือเป็นสารประกอบประเภท Organophosphorus

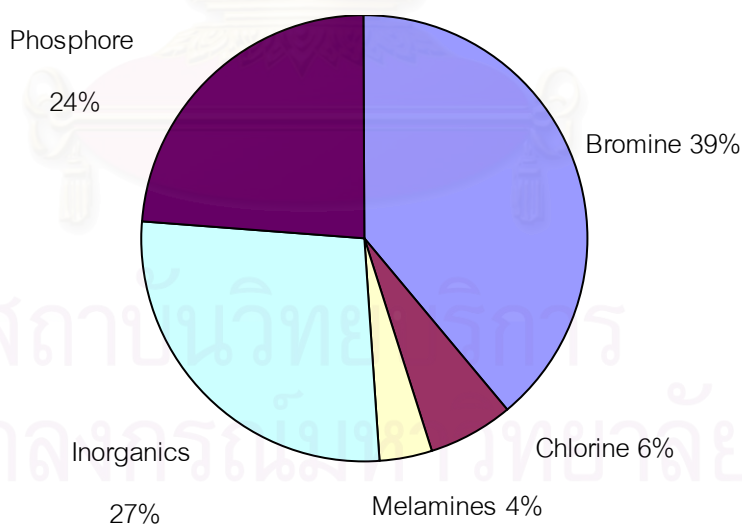
สารหน่วงไฟประเภทนี้มีความคงทนภายหลังการซัก 50 ครั้ง ดังนั้นจึงเหมาะที่จะใช้ตกแต่งผลิตภัณฑ์ที่จำเป็นต้องผ่านการซักล้างบ่อย เช่น ผลิตภัณฑ์เสื้อผ้า

2.6.2 สารหน่วงไฟที่จำแนกจากองค์ประกอบ

ประเภทสารหน่วงไฟที่จำแนกจากองค์ประกอบ แสดงในรูปที่ 2.18

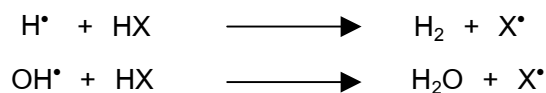
2.6.2.1 สารหน่วงไฟประเภทฮาโลเจน (Halogen-based flame retardants)

สารหน่วงไฟที่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบนี้เป็นสารหน่วงไฟที่มีการใช้มากที่สุด ทั้งในพลาสติก และสิ่งทอเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ดี



รูปที่ 2.18 ปริมาณของสารหน่วงไฟแต่ละชนิดที่ใช้ในปี ค.ศ. 1998¹⁶

สารหน่วงไฟประเภทนี้มีกลไกการหน่วงไฟตามทฤษฎี Radical capture เมื่อสารหน่วงไฟได้รับความร้อนจะแตกตัวให้อนุมูลอิสระที่สามารถจับกับอนุมูลอิสระที่เกิดจากการเผาไหม้ของเส้นใยเซลลูโลส เช่น H^\bullet , OH^\bullet กลายเป็นแก๊สฮาโลเจนซึ่งทำให้ปฏิกิริยา Free radical Chain propagation สิ้นสุดการเผาไหม้ก็สิ้นสุดลง ดังกลไกต่อไปนี้



โดย

- OH^\bullet และ H^\bullet เป็นอนุมูลอิสระที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยา โดยที่ H^\bullet เกิดจากการเผาไหม้ในที่ที่มีแก๊สออกซิเจนเพียงพอ ส่วน OH^\bullet เกิดจากการเผาไหม้ในที่ที่มีแก๊สคาร์บอนมอนออกไซด์
- HX เป็นสารหน่วงไฟที่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ
- X^\bullet เป็นอนุมูลอิสระที่ไม่ว่องไวในการทำปฏิกิริยา

ผลิตภัณฑ์ที่ตกค้างหน่วงไฟด้วยสารหน่วงไฟที่มีสารประกอบฮาโลเจนจะสามารถหน่วงไฟได้ดีเมื่อได้รับความร้อน แต่จะให้ควันพิษซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ประชาชนถึงแก่ความตายเมื่อสูดควันพิษดังกล่าวเข้าไป รวมทั้งการเผาขยะที่เป็นสารหน่วงไฟประเภทนี้จะให้สาร Dioxin และ Furan ที่เป็นสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งได้ โดยเฉพาะสารหน่วงไฟประเภทฮาโลเจนที่มีโบรมีนเป็นองค์ประกอบ ทำให้ในขณะนี้ประเทศในแถบยุโรป เช่น สวีเดน และเยอรมนี ได้ออกกฎหมายห้ามผลิตภัณฑ์สิ่งทอ พลาสติกสำหรับผลิตโทรทัศน์ คอมพิวเตอร์ เครื่องพิมพ์ และเครื่องถ่ายเอกสาร เป็นต้น ตกค้างหน่วงไฟโดยใช้สารหน่วงไฟที่มีโบรมีนเป็นองค์ประกอบ

นอกจากนี้ได้มีการใช้เกลือของโลหะ เช่น แอนติโมนีไตรออกไซด์ (antimony trioxide) เป็นสารเสริมการหน่วงไฟ โดยที่แอนติโมนีไตรออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับสารหน่วงไฟที่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ เกิดเป็นแอนติโมนีไตรเฮไลด์ (antimony trihalide) และน้ำ ซึ่งแอนติโมนีไตรเฮไลด์ สามารถจับอนุมูลอิสระที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา และเกิดน้ำเป็นผลพลอยได้ ซึ่งน้ำที่เกิดขึ้นนี้สามารถเจือจางแก๊สหรือไอที่ติดไฟได้ง่าย จึงสามารถช่วยลดการลุกไหม้ได้อีกทางหนึ่ง

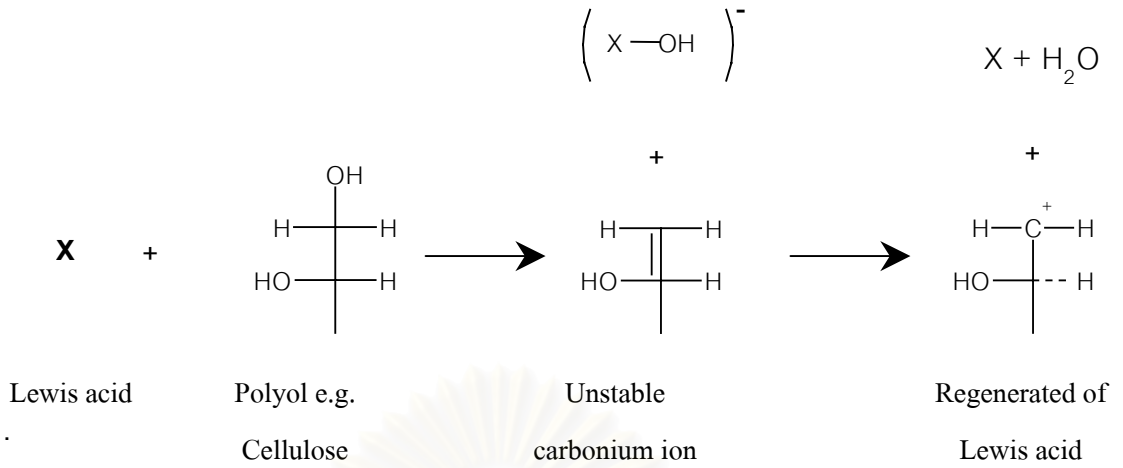
2.6.2.2 สารหน่วงไฟประเภทฟอสฟอรัส (Phosphorus-based flame retardants)

สารหน่วงไฟประเภทฟอสฟอรัสสามารถหาได้ง่าย จะมีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟเมื่อใช้กับวัสดุที่มีออกซิเจนสูง เช่น เซลลูโลส และอนุพันธ์ของเซลลูโลส สารหน่วงไฟชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ สารที่นิยมใช้คือ กรดฟอสฟอริก (phosphoric acid) แต่เนื่องจากกรดฟอสฟอริกมีความสามารถในการกัดกร่อน ดังนั้นในการใช้งานจึงนิยมใช้ในรูปแบบที่เป็นเกลือมากกว่า เช่น แอมโมเนียมฟอสเฟต (ammonium phosphate) ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (diammonium phosphate) ซึ่งเกลือทั้งสองชนิดนี้จะใช้ตกแต่งหน่วงไฟวัสดุจำพวกเซลลูโลส แต่เนื่องจากเป็นเกลือจึงสามารถละลายน้ำได้ จึงทำให้ไม่คงทนต่อการใช้งานที่ต้องผ่านการซักล้าง

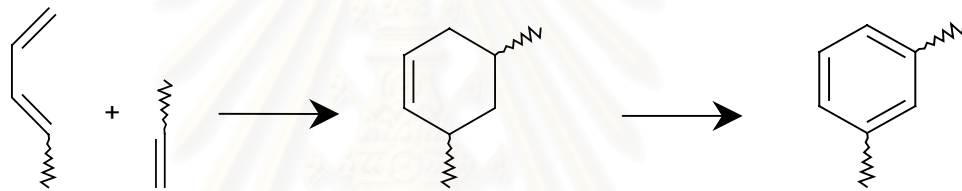
กลไกการทำงานของสารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ ขึ้นอยู่กับประเภทของสารหน่วงไฟที่ใช้ และชนิดของวัสดุสิ่งทอที่จะทำการตกแต่งหน่วงไฟโดยทั่วไปถ้าใช้สารหน่วงไฟประเภทนี้ร่วมกับฮาโลเจน หรือไนโตรเจนจะเป็นการเสริมการหน่วงไฟ (synergism) ให้ดีขึ้น สารหน่วงไฟชนิดนี้สามารถหน่วงไฟทั้งใน condensed phase และ vapor phase โดยที่ใน vapor phase มีข้อได้เปรียบคือสามารถใช้ตกแต่งหน่วงไฟได้กับวัสดุสิ่งทอทุกชนิดโดยไม่ต้องอาศัยการทำปฏิกิริยาทางเคมีกับโครงสร้างของวัสดุสิ่งทอ ดังนี้

Condensed phase

เมื่อได้รับความร้อนสารหน่วงไฟชนิดนี้จะสลายตัวกลายเป็น กรดฟอสฟอริก และกรดพอลิฟอสฟอริก ซึ่งกรดที่เกิดขึ้นนี้จะไปเอสเทอร์ฟายหมู่คาร์บอกซิลของเซลลูโลสทำให้เกิดชั้นของของเหลวที่มีความหนืดปกคลุมพื้นผิวของวัสดุสิ่งทอเพื่อป้องกันพื้นผิวชั้นในจากเปลวไฟและออกซิเจน นอกจากนี้สารหน่วงไฟชนิดนี้ยังทำหน้าที่เป็นกรดลูอิส (Lewis acid) ซึ่งสามารถกำจัดน้ำออกจากเซลลูโลสได้ดังแสดงในรูปที่ 2.19 เพื่อสร้างชั้นของ char ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ซึ่งชั้นของ char นี้จะไปป้องกันวัสดุสิ่งทอจากความร้อน เปลวไฟ และออกซิเจน นอกจากนี้ยังเกิดแก๊สเป็นจำนวนมาก ซึ่งแก๊สที่เกิดขึ้นนี้สามารถเจือจางแก๊สที่ติดไฟได้ง่ายได้ ทำให้วัสดุติดไฟเกิดยากขึ้น



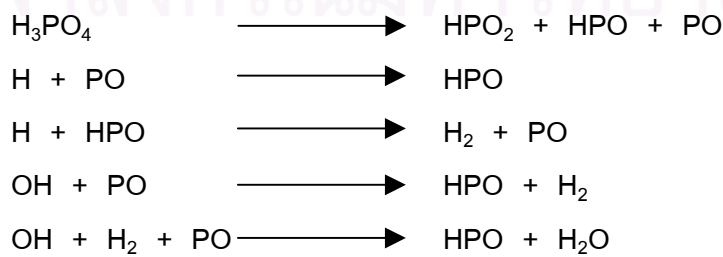
รูปที่ 2.19 การกำจัดน้ำออกของฝ้ายโดยกรดลูอิส¹⁷



รูปที่ 2.20 การเกิดถ่านคาร์บอน¹⁸

Vapor phase

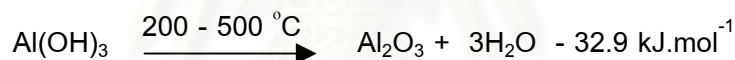
เมื่อเกิดการลุกไหม้สารหน่วงไฟชนิดนี้จะระเหยกลายเป็นไอ แล้วเข้าขัดขวางการลุกไหม้ของวัสดุโดยการจับกับอนุมูลอิสระที่ไม่ว่องไวในการทำปฏิกิริยา ดังสมการ



2.6.2.3 สารหน่วงไฟประเภทอนินทรีย์ (Inorganic salt flame retardants)

สารหน่วงไฟประเภทอนินทรีย์ที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง ได้แก่ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (aluminium hydroxide, Al_2O_3), แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และ สารประกอบโบรอน เป็นต้น สารหน่วงไฟประเภทนี้นอกจากจะมีราคาถูก ไม่เป็นพิษ มีสมบัติในการหน่วงไฟแล้ว ยังมีสมบัติในการลดควันที่เกิดจากการเผาไหม้ อย่างไรก็ตามสารประเภทนี้จะมีความคงทนต่ำ ส่วนใหญ่จะใช้ตกแต่งหน่วงไฟโดยการเคลือบด้านในของชั้นพรมที่เตรียมด้วย SBR ลาเท็กซ์ และใช้ตกแต่งหน่วงไฟสายไฟ สายเคเบิล และในพอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัวเสริมแรง (reinforcing unsaturated polyester) ที่ใช้ทำเป็นอ่างอาบน้ำ ม้านอาบน้ำ หรือเรือ เป็นต้น

กลไกการหน่วงไฟของสารหน่วงไฟชนิดนี้คือ เมื่อได้รับความร้อนสารหน่วงไฟจะดูดความร้อนบางส่วนออกจากระบบเพื่อใช้ในปฏิกิริยาการกำจัดน้ำออกทำให้ความร้อนโดยรวมของระบบลดลง นอกจากนี้ไอน้ำที่เกิดขึ้นนี้จะไปเจือจางแก๊สที่ติดไฟง่าย และยังช่วยกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าใกล้พื้นผิวของวัสดุอีกด้วย ยิ่งไปกว่านั้นยังเกิดอะลูมิเนียมไตรออกไซด์ที่ส่งเสริมการเกิด char อีกด้วย ทำให้การลุกติดไฟเกิดได้ยากขึ้น ดังสมการ



2.6.2.4 สารหน่วงไฟประเภทไนโตรเจน (Nitrogen – based flame retardants)

ธาตุไนโตรเจน ยังมีความเข้าใจในกลไกไม่มากนัก แต่พอสรุปได้ว่าไนโตรเจนจะให้ผลในการต้านการลุกไหม้เมื่อมีฟอสฟอรัสอยู่ด้วย เช่น ในสาร Pyrovatex CP และ Diammonium Phosphate

แม้ว่าผ้าที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟจะมีสมบัติห่วงไฟที่ดีขึ้น แต่ก็ยังมีข้อบกพร่องอีกหลายประการ คือ

1. ความแข็งแรงลดลง
2. ลักษณะสัมผัสของผ้าเปลี่ยนเป็นแข็งกระด้าง
3. สารที่ตกแต่งจะเสื่อมสภาพได้เนื่องจากการซัก โดยเฉพาะการซักด้วยสบู่ในน้ำกระด้างจะลดสมบัติห่วงไฟลงไปมากกว่าผ้าที่ซักด้วยสารซักฟอก ทั้งนี้เพราะมีการสะสมเกลือสเตรียเรตที่ลู่กใหม่ ส่วนผ้าที่ซักด้วยสารซักฟอกที่มีเกลือคาร์บอเนตจะไม่ลดสมบัติห่วงไฟ
4. สารบางชนิดมีหลักฐานเชื่อได้ว่าเป็นอันตรายแก่ผู้ใช้ เช่น Tris ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง และถูกบังคับห้ามใช้แล้ว

ดังนั้นการพัฒนาสมบัติห่วงไฟของผ้านอกจากจะพัฒนาสารตกแต่งให้มีประสิทธิภาพดี ไม่มีอันตรายต่อร่างกายและไม่มีราคาแพงแล้ว ยังมีการพัฒนาการใช้ชนิดของเส้นใยผ้าที่มีสมบัติไม่ลู่กใหม่่ง่ายมีหลายชนิด เช่น

Cordelan เป็นเส้นใย matrix fiber ที่ใช้พอลิเมอร์ชนิดพอลิไวนิลคลอไรด์และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ใช้ทำเสื้อผ้าชุดนอนเด็ก ผ้าม่าน

Heim เป็นเส้นใยพอลิเอสเทอร์ที่มีการเติมสารประกอบฟอสฟอรัสลงในพอลิเมอร์ก่อนที่อัดเป็นเส้นใย ต่อมาบริษัทโตโยโบผลิตเส้นใยชนิดใหม่ออกมาให้ชื่อว่า Toyobo GH ใช้ทำเสื้อผ้าชุดนอนของเด็ก ผ้าม่าน ผ้าบุเฟอร์นิเจอร์

Dacron 900F เป็นพอลิเอสเทอร์ชนิดใหม่ ผลิตโดยบริษัทดูปองท์

Zefran M281 เป็นใยมอดอะคริลิก ใช้ทำพรม ผลิตโดยบริษัทโด้ว์ บาติช

Aramid เป็นเส้นใยสังเคราะห์จาก m-phenylene diamine กับ Isophthaloyl chloride ผลิตโดยบริษัทดูปองท์ ใช้ชื่อว่า Nomex ใช้ทำเสื้อนักผจญเพลิง นักขับรถแข่ง คนงานในโรงงานผลิตอาวุธ ในโรงงานปิโตรเลียม ทำถุงกรองฝุ่นแก๊สที่มีอุณหภูมิสูง ชนิดที่มีชื่อทางการค้า Durette ใช้สำหรับตกแต่งในแคปซูลอวกาศขององค์การนาซา

Novoloid เป็นพอลิเมอร์ชนิด Cross linked phenol formaldehyde ใช้ทำเสื้อผ้าเพื่อทำให้เกิดความปลอดภัยขณะปฏิบัติงานที่เสี่ยงภัยจากการเกิดเพลิงไหม้

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 การสกัดเคราตินจากขนไก่

Harrap และ Woods¹⁹ ได้ทำการสกัดโปรตีนจากส่วนต่าง ๆ ของขนไก่ จากนั้นนำโปรตีนที่ได้ไปทำการศึกษาโครงสร้างและชนิดของโปรตีนที่ได้ โดยทำการสกัดโปรตีนจากขนไก่ ด้วยวิธีการบวณการต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. รีดักชันและอัลคิลเลชัน (Reduction and alkylation)

จากการทดลองพบว่าการหาภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเคราตินจากขนไก่จำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น อุณหภูมิ เวลา ความเป็นกรด-เบส และความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์ (reducing agent) ซึ่งตัวรีดิวซ์ที่ใช้ในกระบวนการนี้คือ เมอร์แคปโตอะซิเตต ในอัตราส่วนของเหลว 100 ส่วนต่อขนไก่ 1 ส่วน โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก พบว่าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โปรตีนจะถูกสกัดออกมาอย่างรวดเร็ว ในช่วงความเป็นกรด-เบส 9.5 ถึง 10.5 และถ้าความเข้มข้นของเมอร์แคปโตอะซิเตต มากกว่า 0.2 โมลาร์ จะทำให้ปริมาณของโปรตีนที่สกัดได้ลดลง จากการทดลองนี้สามารถสกัดโปรตีนได้ 85–90 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้อัตราส่วนของเหลว 100 ส่วนต่อขนไก่ 1 ส่วน โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก โซเดียมเมอร์แคปโตอะซิเตตความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 11 อุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียส นาน 30–36 ชั่วโมง หลังจากนั้นเติมโซเดียมไอโอไดอะซิเตต (sodium iodoacetate) ลงในสารละลายที่สกัดได้เพื่อทำให้หมู่ไทออล (-SH group) เสถียร ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเกิดรีออกซิเดชัน (reoxidation) ซึ่งไอโอไดอะซิเตตส่วนเกินนี้จะถูกกำจัดโดยโซเดียมซัลไฟต์ (sodium sulphite) และยังพบว่าการใช้ยูเรียความเข้มข้น 8 โมลาร์ ช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในการสกัดเคราตินได้

2. การสกัดด้วยคิวพรัมโมเนียมซัลไฟต์ (Extraction with cuprammonium sulphite)

ในกระบวนการนี้ใช้สารละลาย 2 ชนิดในการสกัดโปรตีน ได้แก่ คอปเปอร์ซัลเฟต (0.1 โมลาร์) แอมโมเนีย (0.5 นอร์แมล) และ โซเดียมไดซัลเฟต (0.2 โมลาร์) แอมโมเนีย (0.3 นอร์แมล) ในสัดส่วนที่เท่ากัน โดยใช้อัตราส่วนของเหลว 100 ส่วนต่อขนไก่ 1 ส่วน โดยปริมาตรต่อน้ำหนักที่อุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียส นาน 40 ชั่วโมง จากกระบวนการดังกล่าวจะสามารถสกัดโปรตีนได้ 85–90 เปอร์เซ็นต์ และพบว่าการสกัดโปรตีนด้วยกระบวนการนี้ไม่จำเป็นต้องใช้ยูเรียความเข้มข้น 8 โมลาร์

3. การสกัดที่ภาวะเป็นกลางด้วยซัลไฟต์และเททระไฮโอเนต (Extraction at neutral pH with sulphite and tetrathionate)

การสกัดโปรตีนด้วยกระบวนการนี้ใช้ยูเรียความเข้มข้น 8 โมลาร์ โซเดียมไดซัลเฟต (Na_2SO_3) ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ $\text{Na}_2\text{S}_4\text{O}_6$ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และ tris ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกปรับความเป็นกรด-เบสให้มีค่าเท่ากับ 7.5 ใช้อัตราส่วนของเหลว 100 ส่วนต่อขนไก่ 1 ส่วน หลังจากเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมงแล้วจึงเติม Na_2SO_3 และ $\text{Na}_2\text{S}_4\text{O}_6$ ลงไปอีกเพื่อให้มีความเข้มข้นรวมเป็น 0.4 โมลาร์ และ 0.2 โมลาร์ ตามลำดับ จากนั้นปรับความเป็นกรด-เบสอีกครั้งเพื่อให้มีค่าเท่ากับ 7.5 หลังจาก 48 ชั่วโมง โปรตีนจะถูกสกัดออกมาถึง 80 เปอร์เซ็นต์

4. การสกัดด้วยการออกซิเดชัน (Oxidation)

การสกัดโปรตีนด้วยกระบวนการออกซิเดชันจะใช้กรดฟอร์มิคซึ่งได้จากการเตรียมโดยการผสมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรต่อปริมาตร 1 ส่วนกับกรดฟอร์มิคความเข้มข้น 98–100 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรต่อปริมาตร 9 ส่วน ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 1–2 ชั่วโมง ขนไก่ 1 กรัมจะถูกออกซิไดส์ด้วยกรดฟอร์มิค 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียส นาน 22 ชั่วโมง หลังจากการสกัดจะได้โปรตีน 88 เปอร์เซ็นต์ของวัตถุดิบเริ่มต้น โปรตีนที่สกัดได้นี้ คือ เคราโตส (keratoses) ซึ่งเป็นชนิดเดียวกับโปรตีนที่ได้กระบวนการออกซิเดชันของเคราตินจากขนสัตว์

Schrooyen และคณะ⁵ ได้ทำการสกัดเคราตินจากขนไก่โดยใช้สารละลายของยูเรียและ 2-เมอร์แคปโทเอทานอล จากนั้นเติมไอโอโดอะซีตามิด์ (iodoacetamide) ไอโอโดอะซีติกแอซิด (iodoacetic acid) หรือโบรมอสัคซินิกแอซิด (bromosuccinic acid) เพื่อไปบล็อกหมู่ไทออลอิสระเพื่อทำให้เกิดหมู่ที่ชอบน้ำ (hydrophilic group) จากนั้นนำไปผลิตเป็นวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพและศึกษสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมต่อการสกัดเคราตินจากขนไก่คือ ยูเรียความเข้มข้น 5-8 โมลาร์ 2-เมอร์แคปโทเอทานอลความเข้มข้น 125 มิลลิโมลาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที จากภาวะดังกล่าวจะทำให้สามารถสกัดเคราตินได้มากกว่า 75 เปอร์เซ็นต์

2.7.2 การตกแต่งสำเร็จหน่วยไฟ

Willard และ Wondra²⁰ ได้ศึกษาวิจัยเรื่องการตกแต่งหน่วยไฟผ้าฝ้ายด้วยเทคนิค Limiting oxygen index พบว่าสารประกอบไนโตรเจน เช่น ยูเรีย และ เมลามีน ที่นำมาใช้ร่วมกับแอมโมเนียมฟอสเฟต ช่วยลดความเสียหายของการเร่งปฏิกิริยาด้วยกรด ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการ thermal phosphorylation ของเส้นใยเซลลูโลสได้ เป็นผลให้ประสิทธิภาพในการหน่วยไฟดีขึ้น

Holme และ Patel²¹ ได้ทำการวิจัยระบบการหน่วยไฟแบบเสริมกันของไนโตรเจน-ฟอสฟอรัสที่ตกแต่งหน่วยไฟบนผ้าพอลิเอสเตอร์ผสมฝ้าย พบว่ายูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินทำให้ฟอสฟอรัสกลายเป็นไอระหว่างการเผาไหม้ได้ง่ายขึ้นทำให้สมบัติการหน่วยไฟของผ้าพอลิเอสเตอร์ผสมฝ้ายดีขึ้น

Pandya และ Bhagwat²² ได้ทำการศึกษาระบบการหน่วยไฟแบบเสริมกันของไนโตรเจน-ฟอสฟอรัสในผ้าฝ้าย พบว่าสารประกอบไนโตรเจนจะช่วยรักษาฟอสฟอรัสใน Condensed phase ทำให้สมบัติการหน่วยไฟของผ้าฝ้ายดีขึ้น

Cullis, Hirscher และ Khattab²³ ได้ศึกษาระบบการหน่วยไฟของซัลเฟอร์-อะลูมิเนียม-โบรมีน โดยใช้แอมโมเนียมซัลเฟตและฟอสเฟตมาตกแต่งหน่วยไฟพอลิเมอร์ธรรมชาติซึ่งได้แก่ เซลลูโลส และเปรียบเทียบผลของโลหะชนิดต่าง ๆ ที่มีต่อการลุกไหม้ของเซลลูโลส พบว่าอะลูมิเนียมและโบรมีนเพิ่มความสามารถในการหน่วยไฟของซัลเฟอร์ได้

Cullis, Hirscher และ Madden²⁴ ได้ศึกษาผลของฟอสฟอรัสและสารประกอบของไนโตรเจนที่มีต่อการเผาไหม้ของเซลลูโลส พบว่าทั้งไนโตรเจนและฟอสฟอรัสช่วยทำให้เกิด char ในการเผาไหม้เซลลูโลส จึงทำให้ผ้าฝ้ายซึ่งเป็นเส้นใยเซลลูโลสเกิดการลุกไหม้น้อยลง

Horrocks, Anand และ Sanderson²⁵ ได้ศึกษาโครงสร้างของ char ที่เกิดขึ้นจากเส้นใยเซลลูโลสที่ตกแต่งหน่วยไฟด้วยแอมโมเนียมฟอสเฟตในระบบของอินทนูเมสเซนส์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าโครงสร้างของ char ที่เกิดขึ้นมาจากการสร้างพันธะกันของ char ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวจะลดการแพร่ผ่านของอากาศและเพิ่มการต้านทานการเกิดออกซิเดชันบริเวณพื้นผิวที่อุณหภูมิสูง

Kandola และ Horrocks²⁶ ได้ทำการศึกษาระบบการหน่วยไฟเส้นใยในระบบอินทนูเมสเซนส์ โดยเส้นใยเซลลูโลสตกแต่งหน่วยไฟด้วยแอมโมเนียมฟอสเฟตในระบบของอินทนูเมสเซนส์ พบว่า

เมื่อได้เกิดการลุกไหม้เส้นใยห้วงไฟซึ่งประกอบด้วยอนุภาคต่าง ๆ ที่ใช้ในการห้วงไฟจะปลดปล่อยพอลิแอซิด ทำให้เกิด char ที่มีโครงสร้างเฉพาะตัวทำให้มีสมบัติในการต้านหรือห้วงไฟดีขึ้น ทั้งนี้การเกิด char ดังกล่าวต้องอาศัยกลไกทางเคมีและกายภาพที่เหมาะสม ซึ่งในการเริ่มต้นของการศึกษาได้ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อศึกษาโครงสร้างของ char ส่วนในงานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (DSC, TGA) เพื่อศึกษาระบบดังกล่าว และใช้เทคนิค FT-IR เพื่อวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของ char ที่เกิดขึ้น

Hebeish, Waly และ Abou-Okeil²⁷ ได้ทำการตกแต่งห้วงไฟผ้าฝ้ายด้วย Hexahydroxymethylamidocyclotriphosphatriazatriene (HHMAPT) ซึ่งได้จากการสังเคราะห์โดยปฏิกิริยาของฟอสโฟไนทรายคลอไรด์กับแอมโมเนียเหลว และทำปฏิกิริยาต่อด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ สารนี้จะอุดมไปด้วยฟอสฟอรัส ไนโตรเจน และสารประกอบพอลิฟังก์ชันนัล ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาต่อได้อีกมากมาย ไม่ว่าจะเป็นตัวมันเองหรือเส้นใยเซลลูโลสก็ตาม พบว่าความเข้มข้นของ HHMAPT ที่เหมาะสมต่อการตกแต่งห้วงไฟ คือ 60 กรัมต่อลิตร ทั้งนี้ผ้าตัวอย่างทั้งหมดที่ตกแต่งด้วย HHMAPT จะมีสมบัติการยึดดึงลดลงประมาณร้อยละ 20

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 ขอบเขตการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสกัดเคราตินจากขนไก่ โดยศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ทำการสกัดต่อปริมาณเคราตินที่สกัดได้ จากนั้นนำสารละลายเคราตินที่สกัดได้ไปตกแต่งหน่วงไฟบนผ้าฝ้าย หลังจากนั้นนำผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟมาทดสอบพฤติกรรมและหาอัตราเร็วของการลุกลามของเปลวไฟในแนวตั้งและแนว 45 องศา ทดสอบหาค่า Limiting oxygen index (LOI) และศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA (thermogravimetric analysis)

3.2 วัตถุประสงค์และสารเคมี

(1) ขนไก่จากโรงงานชำแหละไก่

(2) ผ้าฝ้าย

- | | |
|------------------------|---|
| - โครงสร้างผ้า | ผ้าทอลายขัด (plain weave) |
| - ส่วนประกอบ | ด้ายพุ่ง (weft) และด้ายยืน (warp) เป็นผ้าฝ้าย 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ผ่านการเผาขน ไม่ชุบมัน |
| - ขนาดเส้นด้าย | ด้ายพุ่งและด้ายยืนมีขนาดเบอร์ด้าย 20 (cotton count) |
| - น้ำหนักผ้าต่อพื้นที่ | 136 กรัมต่อตารางเมตร |
| - ความหนาแน่นของผ้า | ด้ายพุ่ง 59 เส้นต่อตารางนิ้ว
ด้ายยืน 65 เส้นต่อตารางนิ้ว |

(3) สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ

(4) บีโตร์เลียมอีเทอร์ (จุดเดือด 40-60 องศาเซลเซียส)

(5) ยูเรีย

(6) 2-เมอร์แคปโตเอทานอล

(7) โซเดียมโบคาร์บอเนต

(8) เอทิลีนไดอะมีนเทตระอะซิติกแอซิด (EDTA)

(9) สารละลาย Egg albumin ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

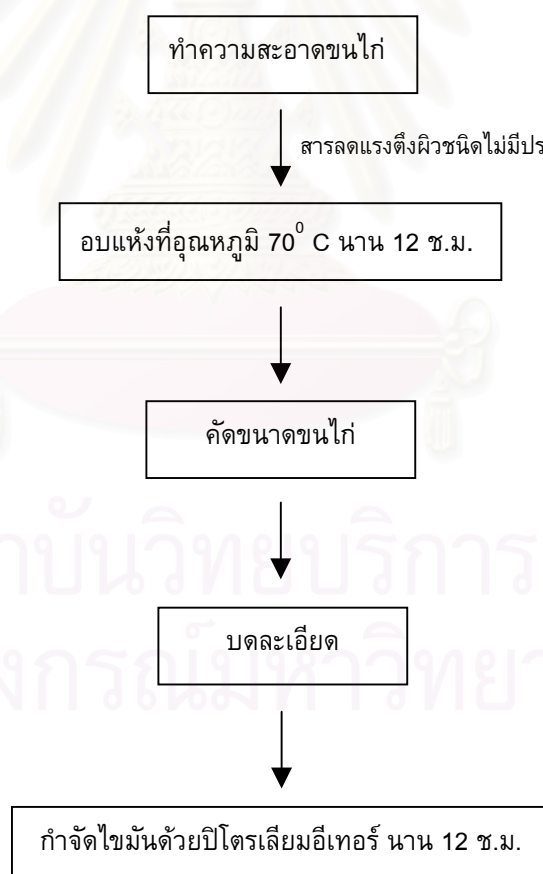
- (10) สารละลายไบยูเรต
- (11) โซเดียมไฮดรอกไซด์
- (12) ไมโครปิเปตต์
- (13) แก๊สออกซิเจน
- (14) แก๊สไนโตรเจน

3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- (1) ไตแอลิซิสทิวบิง (บริษัท Spectra/Por)
 - MWCO 6,000-8,000
 - Flat width 40 มิลลิเมตร
 - เส้นผ่านศูนย์กลาง 25.5 มิลลิเมตร
 - ปริมาตรต่อความยาว 5.1 มิลลิเมตรต่อเซนติเมตร
- (2) เครื่องแก้ว
- (3) อุปกรณ์ Soxhlet extraction
- (4) กระดาษกรอง เบอร์ 54 (Whatman)
- (5) pH meter
- (6) หลอดหมุนเหวี่ยง
- (7) ตะแกรงวงกลม
- (8) เครื่องบดตัด (บริษัท Fritsch Pulverizte รุ่น 14.702)
- (9) เครื่องจุ่มอัด (บริษัท Laborator Machine รุ่น DM-450A)
- (10) เครื่องอบไอร่อนแห้ง (บริษัท Rapid Labortex รุ่น H-TS-3)
- (11) ตู้ดูดความชื้น
- (12) ตู้อบความร้อน
- (13) เครื่องหมุนเหวี่ยงแบบแรงเหวี่ยงสูง
- (14) เครื่องทดสอบความสามารถในการลุกไหม้ (Atlas 45⁰ Automatic Flammability Tester)
- (15) Limiting oxygen indexer (บริษัท Stanton Redcroft)
- (16) เทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลเซอร์ (TGA บริษัท Perkin-Elmer รุ่น TGA 7)
- (17) สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer บริษัท Antyitikjena รุ่น Specord S 100)

3.4 การทำความสะอาดขนไก่

- (1) นำขนไก่ที่ได้จากโรงงานชำแหละไก่มาทำความสะอาดด้วยกระบวนการตามมาตรฐาน ASTM D 584
- (2) นำขนไก่ที่ทำความสะอาดแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จนกระทั่งขนไก่แห้ง
- (3) คัดเลือกขนไก่ที่มีขนาดความยาวไม่เกิน 3 นิ้ว เพื่อนำมาใช้ในการทดลอง
- (4) นำขนไก่ที่ได้จากข้อ 3 ไปบดตัดด้วยเครื่องบดตัดตั้งรูปที่ 3.2 โดยใช้ตะแกรงวงกลมที่มีช่องขนาด 0.5 มิลลิเมตร
- (5) นำขนไก่ที่ผ่านการบดจนละเอียดแล้วไปกำจัดไขมันออกด้วยวิธีการสกัดแบบ Soxhlet extraction ดังรูปที่ 3.3 ด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำขนไก่ที่ได้มาตั้งทิ้งไว้ในอากาศ เพื่อให้ปิโตรเลียมอีเทอร์ระเหยจนกระทั่งขนไก่แห้ง



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนทำความสะอาดขนไก่



รูปที่ 3.2 เครื่องบดตัด



รูปที่ 3.3 การสกัดไขมันออกจากขนไก่ด้วยวิธี Soxhlet extraction

3.5 การสกัดเคราตินจากขนไก่

- (1) เตรียมสารละลายยูเรียความเข้มข้น 8 โมลาร์ เอทิลีนไดอะมีนเททระอะซิติกแอซิดความเข้มข้น 3 มิลลิโมลาร์ โซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 200 มิลลิโมลาร์ และ 2-เมอร์แคปโตเอทานอลความเข้มข้น 125 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 250 มิลลิลิตร จากนั้นใส่ขนไก่ที่กำจัดไขมันแล้วลงไป 10 กรัม
- (2) นำของผสมที่ได้ใส่ลงในขวดแก้วกันกลม 4 คอ ขนาด 500 มิลลิลิตร พร้อมแท่งกวนแม่เหล็ก เครื่องควบคุมแรง และเทอร์โมมิเตอร์ นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส นาน 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมงตามลำดับ พร้อมทั้งกวนของผสมด้วยอัตราเร็วสม่ำเสมอตลอดเวลา หลังจากนั้นจึงตั้งทิ้งไว้ให้ผลิตภัณฑ์เย็นลงมาที่อุณหภูมิห้อง
- (3) กรองแยกตะกอนที่ได้ด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 54 (Whatman)
- (4) นำสารละลายที่ได้ซึ่งมีสีเหลืองใส บรรจุลงขวดบรรจุสารปิดผนึกปากขวดด้วยพาราฟิล์มก่อนปิดฝาขวด

3.6 การทดสอบหาปริมาณเคราตินที่สกัดได้จากขนไก่

3.6.1 การไตแอลิซิสและการละลายตะกอนเคราติน

- (1) บีบอัดสารละลายเคราตินที่สกัดได้จากขนไก่ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ลงในไตแอลิซิสเมมเบรน MWCO 6,000-8,000 ที่มีดปลายด้านหนึ่งจากนั้นทำการใส่อากาศที่อยู่เหนือสารละลายออกแล้วมีดปลายด้านบน จะได้ถุงที่บรรจุด้วยสารละลายที่สกัดได้
- (2) นำถุงที่ได้ไปแช่ในภาชนะบรรจุน้ำกลั่นปริมาตร 10 ลิตร จากนั้นเปลี่ยนน้ำกลั่นที่เวลา 10, 24, 34, 48, 58 และ 72 ชั่วโมง ตามลำดับ
- (3) หลังจากเปลี่ยนน้ำกลั่นครบตามจำนวนแล้ว นำถุงไตแอลิซิสเมมเบรนขึ้นมาจากน้ำกลั่นเพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป
- (4) นำสารออกจากถุงไตแอลิซิสเมมเบรนไปใส่ในหลอดหมุนเหวี่ยง จากนั้นบรรจุหลอดหมุนเหวี่ยงลงในหัวเหวี่ยง เปิดเครื่องหมุนเหวี่ยงให้มีอัตราหมุนเหวี่ยง 13,000 รอบต่อ นาที เป็นเวลา 40 นาที

- (5) นำหลอดหมุนเหวี่ยงออกจากเครื่องหมุนเหวี่ยงดูดของเหลวออกจากหลอดจนเหลือแต่ตะกอนเคราตินที่นอนก้นอยู่ที่ก้นหลอด
- (6) ปิเปตต์สารละลายไซโตเต็มไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 นอร์แมล ลงในหลอดหมุนเหวี่ยงที่มีตะกอนเคราตินนอนก้นอยู่ บันทึกปริมาตรของสารละลายไซโตเต็มไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการละลายตะกอนเคราติน

3.6.2 การหาปริมาณเคราตินโดยวิธีไบยูเรต²⁷

เคราตินเป็นโปรตีนซึ่งมีพันธะเพปไทด์สามารถทำปฏิกิริยากับสารละลายไบยูเรต ให้สารประกอบเชิงซ้อนสีม่วง ซึ่งสามารถหาปริมาณได้โดยวัดความเข้มของสีม่วงที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 570 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน

3.6.2.1 การสร้างกราฟมาตรฐาน

การสร้างกราฟมาตรฐานทำได้โดยการทำตามขั้นตอนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- (1) เติมสารละลายไบยูเรตลงในโปรตีนมาตรฐาน (Egg albumin) ความเข้มข้นต่าง ๆ
- (2) เขย่าสารละลายทุกหลอดให้เข้าเป็นเนื้อเดียว ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 20 นาที
- (3) นำไปวัดการดูดกลืนแสง (absorbance) ในเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 570 นาโนเมตร
- (4) นำค่าความเข้มข้นของโปรตีนมาตรฐานและค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปสร้างกราฟมาตรฐาน

3.6.2.2 การหาค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

นำสารละลายเคราตินจากข้อ 3.6.1 ไปวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ดังรูปที่ 3.4 มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- (1) ปิเปตต์สารละลายเคราตินและสารละลายไบยูเรตลงในหลอดทดลองเขย่าสารละลายให้เข้าเป็นเนื้อเดียว ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 20 นาที

- (2) นำไปวัดการดูดกลืนแสงในเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 570 นาโนเมตร
- (3) นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปเทียบกับกราฟมาตรฐานเพื่อหาปริมาณแคราติน
- (4) คำนวณหาปริมาณแคราตินทั้งหมด ดังแสดงในภาคผนวก



รูปที่ 3.4 เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.7 การตกแต่งห่วงไฟผ้าฝ้ายด้วยสารละลายเคราติน

การตกแต่งห่วงไฟบนผ้าฝ้าย แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ

1. การจุ่มอัด (padding) นำผ้าฝ้ายที่เตรียมไว้มา ทำการจุ่มอัดด้วยสารละลายเคราตินที่สกัดได้จากขนไก่ที่ภาวะต่าง ๆ ตามหัวข้อ 3.5 ด้วยเครื่องจุ่มอัดโดยให้มี % Pick up อยู่ในช่วง 85-95 เปอร์เซ็นต์

$$\% \text{ Pick up} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

โดย W_1 = น้ำหนักผ้าก่อนการตกแต่งห่วงไฟ

W_2 = น้ำหนักผ้าขณะเปียก

2. การอบไอร้อนแห้ง (drying) นำผ้าที่ผ่านขั้นตอนการจุ่มอัดแล้วมาอบให้แห้งด้วยเครื่องอบไอร้อนแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 นาที จากนั้นนำผ้ามาเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้นเป็นเวลาอย่างน้อย 48 ชั่วโมงก่อนทำการทดสอบความสามารถในการห่วงไฟ โดยควบคุมให้มีความชื้นสัมพัทธ์น้อยกว่า 20% จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อหา % Add-on โดยใช้สูตรในการคำนวณตามสมการที่ 3.2

$$\% \text{ Add-on} = \frac{(W_3 - W_1)}{W_1} \times 100 \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

โดย W_1 = น้ำหนักผ้าก่อนตกแต่งห่วงไฟ

W_3 = น้ำหนักผ้าหลังตกแต่งห่วงไฟ

นำผ้าที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟดังกล่าวข้างต้นมาศึกษาพฤติกรรมและความสามารถในการลุกลามของเปลวไฟแนวตั้งและแนว 45 องศา ทดสอบหาค่า Limiting oxygen index (LOI) และศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA และ DTG

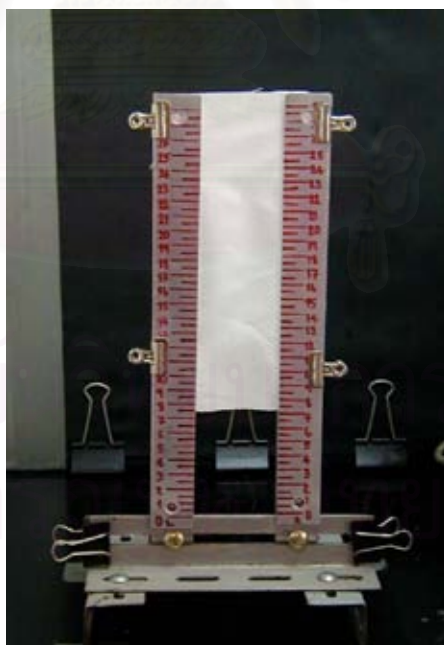
3.8 การศึกษาพฤติกรรมและอัตราเร็วในการลุกลามของเปลวไฟ

3.8.1 การศึกษาพฤติกรรมและอัตราเร็วในการลุกลามของเปลวไฟในแนวตั้ง

นำผ้าฝ้ายที่ผ่านและไม่การตกแต่งห่วงไฟด้วยสารละลายเคราตินมาศึกษาพฤติกรรมและอัตราเร็วในการลุกลามของเปลวไฟในแนวตั้ง ด้วยอุปกรณ์ทดสอบการลุกลามของเปลวไฟในแนวตั้ง ดังรูป 3.5 โดยตัดชิ้นทดสอบให้มีขนาดความกว้าง 7 เซนติเมตร และความยาว 20 เซนติเมตรแล้ว นำมายึดกับที่จับชิ้นตัวอย่างในแนวตั้งโดยให้มีพื้นที่ที่จะเกิดการลุกไหม้กว้าง 5 เซนติเมตร และยาว 20 เซนติเมตร จากนั้นจุดไฟด้วยอุปกรณ์จุดไฟแบบ slit burner ที่บริเวณขอบปลายของผ้าเป็นเวลา 1 วินาที บันทึกเวลาที่เปลวไฟเคลื่อนจากผ้าขึ้นด้านบน นำเวลาและระยะทางที่เปลวไฟเคลื่อนที่ไป คำนวณห้อตราเร็วในการลุกลามของไฟ (flame spread rate) ดังสมการที่ 3.3

$$\text{อัตราเร็วในการลุกลามของเปลวไฟ} = \frac{\text{ระยะทางในการเคลื่อนที่ของเปลวไฟ (ซม.)}}{\text{เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของเปลวไฟ (วินาที)}} \dots\dots\dots (3.3)$$

(เซนติเมตรต่อวินาที)



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ทดสอบความสามารถในการลุกลามของเปลวไฟในแนวตั้ง

3.8.2 การศึกษาพฤติกรรมและอัตราเร็วในการลุกลามของเปลวไฟในแนว 45 องศา

นำผ้าฝ้ายที่ผ่านและไม่การตกแต่งห่วงไฟด้วยสารละลายเคราตินมาศึกษาพฤติกรรมและอัตราเร็วในการลุกลามของเปลวไฟแนว 45 องศาด้วยเครื่องทดสอบ Atlas 45⁰ Automatic Flammability Tester ดังรูปที่ 3.6 โดยใช้มาตรฐาน ASTM D 1230 เป็นแนวทางในการทดสอบ ตัดชิ้นทดสอบให้มีขนาดความกว้าง 5.5 เซนติเมตร และความยาว 16.5 เซนติเมตรแล้วนำมายึดกับที่จับชิ้นตัวอย่างและวางบนแท่นด้วยมุมเอียง 45 องศา จากนั้นจุดไฟที่บริเวณบนพื้นผิวเหนือปลายผ้าด้านล่าง 19 มิลลิเมตร เป็นเวลา 5 วินาที บันทึกเวลาที่เปลวไฟเคลื่อนที่ไปถึง stop cord (ด้ายฝ้ายชุบมัน ขนาด 50/3) ซึ่งคิดเป็นระยะทาง 12.7 เซนติเมตรหรือ 5 นิ้ว นำเวลาและระยะทางที่เปลวไฟเคลื่อนที่ไปคำนวณหาอัตราเร็วในการลุกลามของเปลวไฟ (flame spread rate) ดังสมการที่ 3.3

ในระหว่างทำการทดสอบหาอัตราเร็วในการลุกลามของเปลวไฟได้มีการสังเกตพฤติกรรมการติดไฟของผ้าฝ้าย เช่น ลักษณะของเปลวไฟ สีของควัน เป็นต้น



รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบความสามารถในการลุกลามของเปลวไฟในแนว 45 องศา
(Atlas 45⁰ Automatic Flammability Tester)

3.9 การทดสอบหาค่า Limiting oxygen index (LOI)

เพื่อศึกษาความเข้มข้นของสารละลายเคราตินที่มีผลต่อความสามารถในการติดไฟของผ้าฝ้ายที่ผ่านและไม่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารละลายเคราติน โดยพิจารณาจากค่า LOI ซึ่งเป็นปริมาณของออกซิเจนที่ต่ำที่สุดที่จะทำให้วัสดุเกิดการลุกไหม้ได้อย่างต่อเนื่องตามมาตรฐาน ASTM D2863-95 ด้วยเครื่อง Limiting oxygen indexer ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

- (1) ตัดชิ้นทดสอบที่ผ่านและไม่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟให้ได้ขนาดกว้าง 5.2 เซนติเมตร และยาว 16.5 เซนติเมตร
- (2) สอบเทียบมาตรฐานเครื่องโดยใช้แก๊สไนโตรเจน 100 เปอร์เซ็นต์ หรือออกซิเจน 100 เปอร์เซ็นต์ แล้วสังเกตว่าค่า LOI ที่ได้มีค่าเท่ากับ 0 และ 100 ตามลำดับหรือไม่ ถ้าไม่ได้ค่าดังกล่าวให้ตั้งค่า 0 และ 100 ตามลำดับ
- (3) ปิดวาล์วแก๊สหลังจากที่ทำการสอบเทียบมาตรฐานของเครื่องแล้ว นำชิ้นทดสอบที่เตรียมไว้มายึดติดกับชิ้นตัวอย่าง (sample holder) ของเครื่องทดสอบโดยให้ปลายด้านบนสุดของชิ้นทดสอบอยู่ต่ำกว่าปากครอบแก้วที่ทดสอบอย่างน้อย 40 มิลลิเมตร
- (4) เลือกปริมาณของแก๊สไนโตรเจนและออกซิเจนที่ต้องการทดสอบโดยให้มีอัตราการไหลของแก๊สในครอบแก้วที่ทดสอบมีค่าเท่ากับ 15 ลิตรต่อนาที
- (5) ปลดปล่อยให้แก๊สไหลผ่านในครอบแก้วที่ทดสอบเป็นเวลา 30 วินาที เพื่อให้ระบบอยู่ในภาวะคงที่ตามที่ต้องการ
- (6) เริ่มจุดไฟปรับให้มีความยาวเปลวไฟ 6 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปจุดที่บริเวณปลายด้านบนของชิ้นทดสอบเป็นเวลาทุก ๆ 5 วินาที แต่ไม่เกิน 30 วินาที แล้วนำหัวจุดไฟออกสังเกตว่าชิ้นทดสอบมีการติดไฟหรือไม่

หมายเหตุ

1. ถ้าชิ้นทดสอบลุกไหม้มากกว่าเกณฑ์ที่ใช้พิจารณาแล้ว (การลุกไหม้ผ่านระยะอ้างอิง 100 มิลลิเมตร) ในการทดสอบชิ้นทดสอบใหม่ต้องทำการปรับลดปริมาณออกซิเจน
 2. ถ้าการลุกไหม้ของชิ้นทดสอบดับก่อนถึงระยะอ้างอิง 100 มิลลิเมตร ในการทดสอบชิ้นทดสอบใหม่ต้องทำการเพิ่มปริมาณออกซิเจน
- (7) ทำซ้ำขั้นตอน 5-6 จนกระทั่งได้ปริมาณแก๊สออกซิเจนต่ำสุดที่จุดวิกฤตคือเป็นปริมาณแก๊สออกซิเจนต่ำสุดที่ทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการลุกไหม้อย่างต่อเนื่องตามเกณฑ์พิจารณาข้างต้น
 - (8) บันทึกค่า LOI ที่ได้จากข้อ (7)



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบหาค่า LOI (Limiting oxygen indexer)

3.10 การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA และ DTG

นำผ้าฝ้ายที่ผ่านและไม่ผ่านการตากแห้งวางไฟไปศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง TGA โดยให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องถึง 900 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน มีอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่า 20 มิลลิลิตรต่อนาที และให้ความร้อนด้วยอัตราคงที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทำความสะอาดขนไก่

ขนไก่ที่นำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้เป็นขนไก่ที่ได้มาจากโรงงานชำแหละไก่ซึ่งมีสิ่งสกปรก จำพวก แกลบ เศษอาหารสัตว์ เป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงนำมาทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาดก่อน จากนั้นนำมาทำความสะอาดต่อด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ และนำขนไก่เปียกที่ทำความสะอาดแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมงเพื่อให้ขนไก่แห้ง นำขนไก่แห้งที่ได้ไปทำการคัดแยกขนาด โดยคัดเลือกขนาดที่มีความยาวไม่เกิน 3 นิ้ว เนื่องจากขนไก่ที่มีขนาดใหญ่กว่านี้จะทำให้ไม่สามารถทำการบดตัดได้ นำขนไก่ที่คัดขนาดแล้วไปทำการบดตัดจะได้ขนไก่ที่มีลักษณะคล้ายปุยฝ้าย มีสีค่อนข้างขาว



(a) ขนไก่หลังผ่านการคัดแยกและทำความสะอาด



(b) ขนไก่หลังผ่านการบด

รูปที่ 4.1 ขนไก่ที่นำมาใช้ในการทดลอง (a) ขนไก่หลังผ่านการคัดแยกและทำความสะอาด
(b) ขนไก่หลังผ่านการบด

4.2 ผลการสกัดไขมันออกจากขนไก่

นำขนไก่ที่ผ่านการบดตัดแล้วไปทำการสกัดไขมันออกโดยวิธี Soxhlet extraction ด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์นาน 12 ชั่วโมง พบว่าปิโตรเลียมอีเทอร์มีสีเหลืองมากขึ้น ทั้งนี้คาดว่าน่าจะเป็นไขมันที่สกัดได้จากขนไก่ นำขนไก่ที่ผ่านการสกัดไขมันออกแล้วตั้งทิ้งไว้ในอากาศเพื่อทำให้ขนไก่แห้ง ลักษณะขนไก่ที่ได้จะมีสีขาวขึ้นเล็กน้อยและมีความกระด้างมากขึ้น จากการที่ไขมันถูกสกัดออกไป



(a) ขนไก่ก่อนการสกัดไขมัน



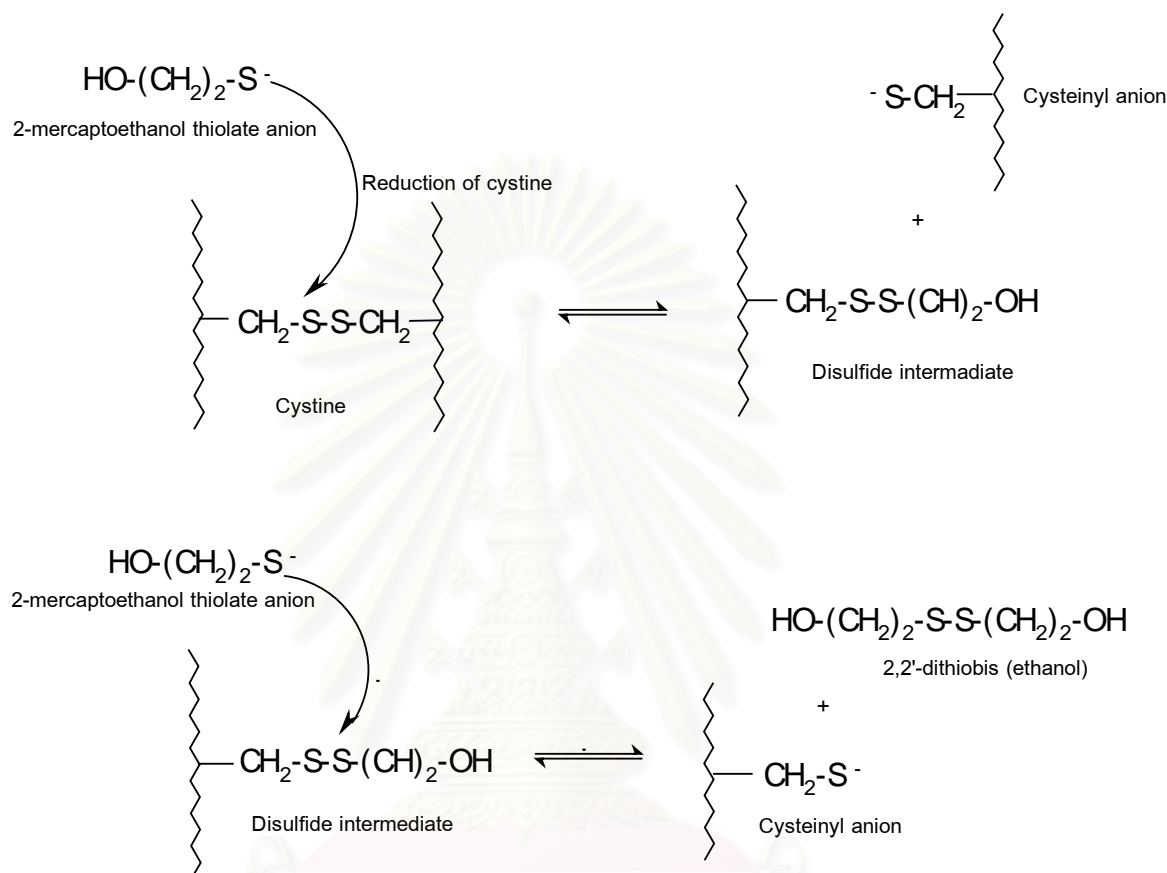
(b) ขนไก่หลังการสกัดไขมัน

รูปที่ 4.2 ขนไก่ก่อนและหลังการสกัดไขมัน (a) ขนไก่ก่อนการสกัดไขมัน
(b) ขนไก่หลังการสกัดไขมัน

4.3 ผลการสกัดเคราตินจากขนไก่

จากการสืบค้นงานวิจัยที่ทำมาแล้วในอดีต²⁹⁻³⁵ พบว่ากรรมวิธีในการสกัดเคราตินที่มีประสิทธิภาพดี จะใช้อัตราส่วนของขนไก่ต่อของเหลว เท่ากับ 1 ต่อ 25 ในสารละลายของยูเรียความเข้มข้น 8 โมลาร์ 2-เมอร์แคปโตเอทานอลความเข้มข้น 125 มิลลิโมลาร์ และ เอทิลีนไดอะมีนเทตระอะซิดิกแอซิดความเข้มข้น 3 มิลลิโมลาร์ ที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ จะได้ของเหลวที่มีลักษณะเป็นสารแขวนลอยและเมื่อตั้งทิ้งไว้สารบางส่วนจะตกตะกอน นำของเหลวที่ได้ไปกรองด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 54 (Whatman) ภายหลังการกรองจะได้ของเหลวที่มี

ลักษณะไอ สีเหลือง ซึ่งคาดว่าเคราตินจะถูกสกัดออกมาในรูปของสารละลาย กลไกการละลายของเคราตินแสดงให้เห็นได้ดังแสดงในรูป 4.3



รูปที่ 4.3 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการสกัดเคราตินจากขนไก่⁵

เมื่อพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายพอลิเมอร์เคราตินถูกทำให้แยกออกจากกันด้วยยูเรีย 2-เมอร์แคปโตเอทานอลไฮโอเลตแอนไอออน (2-mercaptoethanol thiolate anion) จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับซิสตีน (cystine) ด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ด้วยนิวคลีโอฟิลิก (nucleophilic substitution) จะได้ซิสตีนิวแอนไอออน (cysteinyl anion) และสารตัวกลางไดซัลไฟด์ (disulfide intermediate) สารตัวกลางไดซัลไฟด์จะมาทำปฏิกิริยาต่อกับ 2-เมอร์แคปโตเอทานอลไฮโอเลตแอนไอออนตัวอื่น ๆ เกิดเป็น 2,2'-ไดไฮโอปีสเอทานอล (2,2'-dithiobis(ethanol)) โดยปกติอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะต่ำ ดังนั้นจึงต้องใช้ 2-เมอร์แคปโตเอทานอล ในปริมาณที่มากเกินพอเป็น 10 เท่าของปริมาณที่จะทำปฏิกิริยากับซิสตีน และความเข้มข้นของสารละลายยูเรียที่เหมาะสมคือ 8 โมลาร์⁵

4.4 ผลการไดแอลิซิสสารละลายเคราติน

เนื่องจากในสารละลายเคราตินที่สกัดได้ในเบื้องต้นมีส่วนผสมของยูเรีย 2-เมอร์แคปโตเอทานอล เอทิลีนไดอะมีนเททระอะซิติกแอซิด และโซเดียมโบคาร์บอเนต ดังนั้นจึงต้องทำให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีการไดแอลิซิส เมื่อนำสารละลายเคราตินที่สกัดได้ปริมาณ 25 มิลลิลิตรไปไดแอไลซ์ด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 10 ลิตร และเปลี่ยนน้ำกลั่นทุก ๆ 10, 24, 34, 48, 58 และ 72 ชั่วโมง ตามลำดับ หลังจากเปลี่ยนน้ำกลั่นจนครบแล้วพบว่ามิของหนืดสีขาวมารวมอยู่ที่ด้านล่างของถุงไดแอลิซิสเมมเบรน

ของหนืดสีขาวที่มารวมกันอยู่ที่ก้นถุงคือ เคราติน ตามที่ Schrooyen และคณะ⁵ ได้ทำการสกัดเคราตินจากขนไก่ โดยใช้สารละลายของยูเรียความเข้มข้น 8 โมลาร์ 2-เมอร์แคปโตเอทานอลความเข้มข้น 125 มิลลิโมลาร์ และ เอทิลีนไดอะมีนเททระอะซิติกแอซิดความเข้มข้น 3 มิลลิโมลาร์ พบว่าสารที่สกัดได้เป็นเคราตินซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุล 10,400 Da ในขณะที่ไดแอลิซิสเมมเบรน (MWCO 6,000-8,000) จะปล่อยให้สารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 6,000-8,000 แพร่ผ่านเข้าออกได้เท่านั้น ซึ่งได้แก่ ยูเรีย 2-เมอร์แคปโตเอทานอล เอทิลีนไดอะมีนเททระอะซิติกแอซิด และโซเดียมโบคาร์บอเนตที่ใช้ในการสกัดเคราติน สารต่าง ๆ ดังกล่าวนี้จะถูกกำจัดออกในขั้นตอนของการไดแอลิซิส

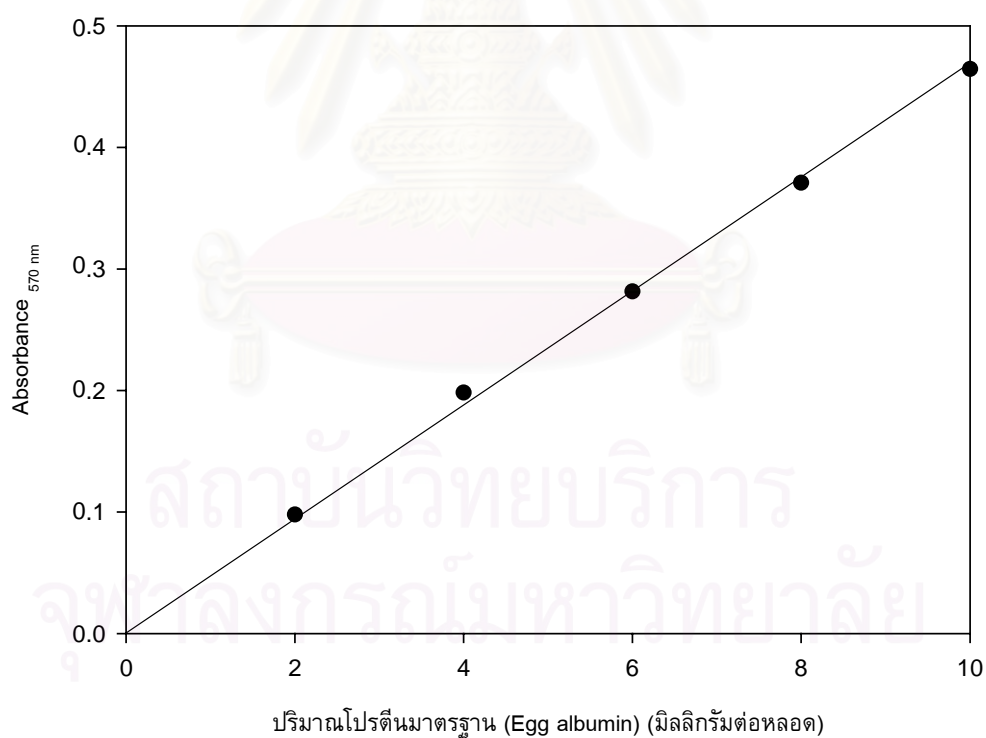
เมื่อนำของเหลวพร้อมด้วยของหนืดสีขาวในถุงไดแอลิซิสเมมเบรนไปใส่ในหลอดหมุนเหวี่ยง จากนั้นนำไปใส่ในเครื่องหมุนเหวี่ยงความเร็วสูงจะได้ตะกอนเคราตินนอนกันอยู่ในหลอดหมุนเหวี่ยง ซึ่งตะกอนดังกล่าวจะถูกนำไปละลายด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 นอร์แมล และนำไปหาปริมาณเคราตินด้วยวิธีไบยูเรต ส่วนของเหลวที่อยู่เหนือตะกอนซึ่งมีลักษณะใสไม่มีสีจะถูกนำไปทดสอบด้วยวิธีไบยูเรตด้วยเช่นกัน จากการทดสอบพบว่าไม่มีเคราตินอยู่ของเหลวดังกล่าว ในส่วนของตะกอนเคราตินจะมีปริมาณต่าง ๆ กันขึ้นอยู่กับภาวะที่ใช้ในการสกัด

4.5 ผลของการหาปริมาณเคราตินด้วยวิธีไบยูเรต

การหาปริมาณโปรตีนด้วยวิธีไบยูเรตจะต้องมีการสร้างกราฟมาตรฐานก่อน โดยนำสารละลายโปรตีนมาตรฐาน (Egg albumin) ที่ทราบปริมาณไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ความยาวคลื่น 570 นาโนเมตร จากนั้นนำค่าความเข้มข้นของสารละลายโปรตีนมาตรฐานและค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1 มาสร้างเป็นกราฟมาตรฐานดังรูป 4.4

ตารางที่ 4.1 ปริมาณของโปรตีนมาตรฐานและค่า Absorbance ที่ใช้ในการสร้างกราฟมาตรฐาน

หลอดที่	ปริมาณโปรตีนมาตรฐาน (Egg albumin) (มิลลิกรัม)	ค่า Absorbance _{570nm}
1	0.00	-
2	2.00	0.0979
3	4.00	0.1982
4	6.00	0.2815
5	8.00	0.3710
6	10.00	0.4645



รูปที่ 4.4 กราฟมาตรฐานที่ได้จากการหาปริมาณโปรตีนจาก Egg albumin ด้วยวิธีไบยูเรต

สารละลายเคราตินที่ได้จากการละลายตะกอนเคราตินด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 นอร์แมล จะถูกนำไปทำปฏิกิริยากับสารละลายไบยูเรต จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 570 นาโนเมตร นำค่าที่ได้ไปหาปริมาณเคราตินโดยการเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานและหาปริมาณเคราตินทั้งหมด ดังแสดงในภาคผนวก นำปริมาณเคราตินที่คำนวณได้ไปหาเปอร์เซ็นต์เคราตินที่สกัดได้โดยนำไปเทียบกับน้ำหนักชนไก่เริ่มต้น ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เปอร์เซนต์เคราตินที่สกัดได้จากชนไก่ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน

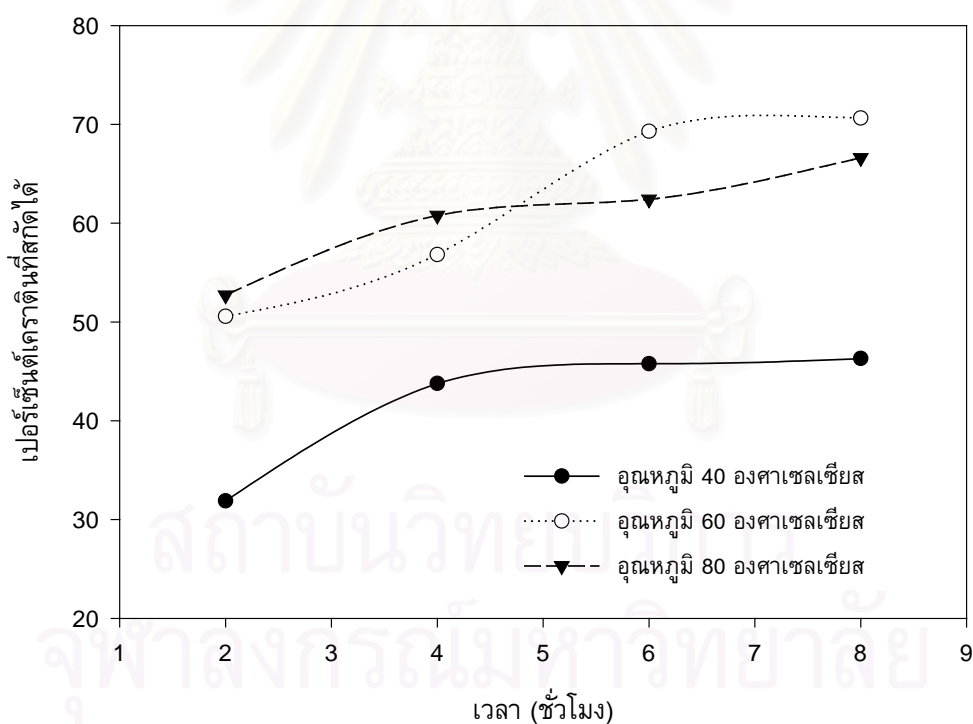
สูตร	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)	เปอร์เซนต์เคราติน ที่สกัดได้
S1	40	2	31.89
S2	40	4	43.76
S3	40	6	45.77
S4	40	8	46.30
S5	60	2	50.56
S6	60	4	56.82
S7	60	6	69.30
S8	60	8	70.63
S9	80	2	52.70
S10	80	4	60.78
S11	80	6	62.40
S12	80	8	66.61

4.5.1 ผลของเวลาต่อปริมาณเคราตินที่สกัดได้

การสกัดเคราตินจากชนไก่ที่ภาวะต่าง ๆ กันมีผลต่อปริมาณเคราตินที่สกัดได้ ทั้งนี้จากการทดลองพบว่าเวลาเป็นปัจจัยสำคัญในสกัดเคราตินจากชนไก่ จากตารางที่ 4.2 ปริมาณเคราตินที่สกัดได้มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลามากขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสจะสามารถสกัดเคราตินได้ 46.30 เปอร์เซนต์ของน้ำหนักชนไก่ เมื่อใช้เวลาในการสกัด 8 ชั่วโมง ในช่วงแรกของ

การทำปฏิกิริยาปริมาณเคราตินที่สกัดได้จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเริ่มคงที่เมื่อใช้เวลาในการสกัด 6 ชั่วโมง ส่วนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสก็เช่นกัน กล่าวคือจะสามารถสกัดเคราตินได้อย่างรวดเร็วเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 และ 4 ชั่วโมง จากนั้นปริมาณเคราตินที่สกัดได้จะเริ่มคงที่เมื่อใช้เวลาในการสกัด 6 ชั่วโมง และเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมงจะสามารถสกัดเคราตินได้ 66.61 เปอร์เซ็นต์

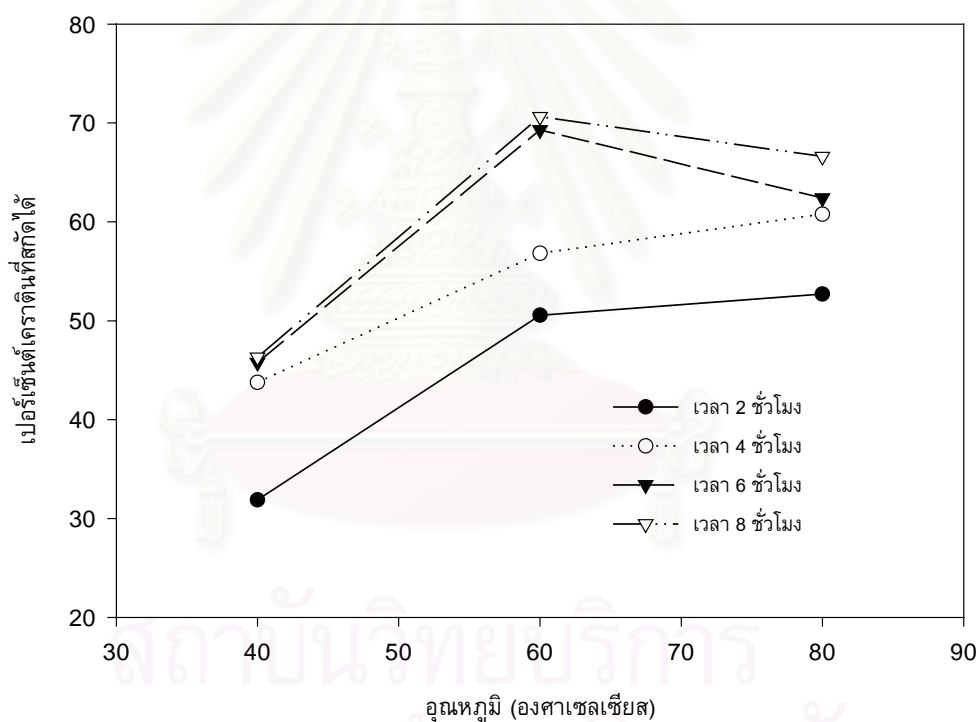
ในขณะที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ใช้เวลาทำการสกัดนาน 8 ชั่วโมง สามารถสกัดเคราตินได้ปริมาณมากที่สุดคือ 70.63 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.5 พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจาก 2 ชั่วโมงเป็น 4 และ 6 ชั่วโมง ปริมาณเคราตินที่สกัดได้จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเมื่อใช้เวลาในการสกัด 8 ชั่วโมง พบว่าปริมาณเคราตินที่สกัดได้จะเริ่มมีปริมาณคงที่ ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ผลของเวลาต่อปริมาณเคราตินที่สกัดได้

4.5.2 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณเคราตินที่สกัดได้

อุณหภูมิมีความสำคัญต่อการสกัดเคราตินจากขนไก่ จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้เวลาในการสกัดเท่ากัน ที่อุณหภูมิสูงกว่าจะสามารถสกัดเคราตินได้มากกว่า ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อใช้เวลาในการสกัด 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสจะสามารถสกัดเคราตินได้ 31.89 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อใช้อุณหภูมิในการสกัด 60 องศาเซลเซียสจะสามารถสกัดเคราตินได้ 50.56 เปอร์เซ็นต์ และเพิ่มเป็น 52.70 เปอร์เซ็นต์เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 80 องศาเซลเซียส ในขณะที่ใช้เวลาในการสกัด 4, 6 และ 8 ชั่วโมงก็ให้แนวโน้มเช่นเดียวกันคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะสามารถสกัดเคราตินได้มากขึ้น



รูปที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณเคราตินที่สกัดได้

จากรูปที่ 4.6 ที่เวลาในการสกัด 2 และ 4 ชั่วโมงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 40 องศาเซลเซียส เป็น 60 องศาเซลเซียส ปริมาณเคราตินที่สกัดได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเริ่มคงที่ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ในขณะที่เวลาที่ทำการสกัด 6 และ 8 ชั่วโมง พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการสกัดจาก

40 องศาเซลเซียสเป็น 60 องศาเซลเซียส ปริมาณเคราตินที่สกัดได้มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 80 องศาเซลเซียส ปริมาณเคราตินที่สกัดได้มีปริมาณลดลงเล็กน้อย

จากผลของอุณหภูมิและเวลาที่กล่าวมาแล้วข้างต้นพบว่า อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมสำหรับการสกัดเคราตินจากขนไก่ คือ 60 องศาเซลเซียส นาน 6 ชั่วโมง เนื่องจากสามารถสกัดเคราตินได้ 69.30 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักขนไก่ ถึงแม้ว่าการสกัดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 8 ชั่วโมง จะสามารถสกัดเคราตินได้ถึง 70.63 เปอร์เซ็นต์ก็ตาม แต่เมื่อคำนึงถึงพลังงานและเวลาที่ใช้แล้วพบว่า การสกัดเคราตินจากขนไก่ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 6 ชั่วโมง จะให้ผลที่คุ้มค่ากว่า เนื่องจากสามารถสกัดเคราตินได้ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน



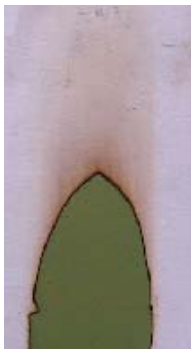
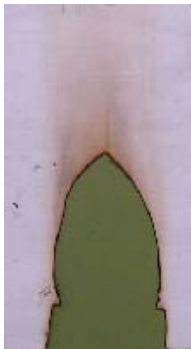

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.6 การศึกษาพฤติกรรมและอัตราการลุกลามของเปลวไฟในแนวตั้ง

ตารางที่ 4.3 พฤติกรรมการลุกลามของเปลวไฟบนผ้าฝ้ายที่ผ่านและไม่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟในแนวตั้ง

ความเข้มข้น เคราติน (กรัม/ลิตร)	ลักษณะการ ติดไฟ	ลักษณะการลุกไหม้	อัตราการลุกลาม ของเปลวไฟ (ซม./วินาที)	ลักษณะผ้าภายหลัง ทดสอบ
Untreated	ติดไฟทันที	-มีการลุกไหม้อย่าง รุนแรง -เมื่อนำไฟออกยังคง มีการลุกไหม้อย่าง ต่อเนื่อง -เกิดควันสีค่อนข้าง ดำ	1.84	
2-เมอร์แคป โตเอทานอล 125 มิลลิโม ลาร์และยูเรีย 8 โมลาร์	ติดไฟทันที	-มีการลุกไหม้อย่าง รุนแรง -เมื่อนำไฟออกยังคง มีการลุกไหม้อย่าง ต่อเนื่อง -เกิดควันสีค่อนข้าง ดำ	1.23	
12.80	ติดไฟภายใน 1 วินาที	-มีการลุกไหม้ไม่รุน แรง เกิดควันสีดำ -เมื่อนำแหล่งต้นไฟ ออกยังคงมีเปลวไฟ เคลื่อนที่อยู่บนผ้า และดับลงเมื่อเวลา 15 วินาที หลังจากนั้น เกิดการลุกลามจน กระทั่งดับ	0.67 A.F. = 15 วินาที A.G. = 5.32 นาที	

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) พฤติกรรมการลุกลามของเปลวไฟบนผ้าฝ้ายที่ผ่านและไม่ผ่านการตกแต่ง
หน่วยไฟในแนวตั้ง

ความเข้มข้น เคราติน (กรัม/ลิตร)	ลักษณะการ ติดไฟ	ลักษณะการลุกลามใหม่	อัตราการลุกลาม ของเปลวไฟ (ซม./วินาที)	ลักษณะผ้าภายหลัง ทดสอบ
17.60	ติดไฟภายใน 1 วินาที	มีการลุกลามใหม่ไม่รุนแรง เกิดควันสีดำ -เมื่อนำแหล่งต้นไฟออกยังคงมีเปลวไฟเคลื่อนที่อยู่บนผ้าและดับลงเมื่อเวลา 15 วินาที หลังจากนั้นเกิดการคุแดงจนกระทั่งดับ	n.d. A.F. = 15 วินาที A.G. = 4.39 นาที	
20.23	ติดไฟภายใน 1 วินาที	-มีการลุกลามใหม่ไม่รุนแรง เกิดควันสีดำ -เมื่อนำแหล่งต้นไฟออกยังคงมีเปลวไฟเคลื่อนที่อยู่บนผ้าและดับลงเมื่อเวลา 14 วินาที หลังจากนั้นเกิดการการคุแดงจนกระทั่งดับ	n.d. A.F. = 14 วินาที A.G. = 4.20 นาที	
24.82	ติดไฟภายใน 1 วินาที	-มีการลุกลามใหม่ไม่รุนแรง -เปลวไฟดับลงทันทีเมื่อนำแหล่งต้นไฟออกและเกิดการคุแดง -เกิดควันสีดำ มีกลิ่นเหม็น	n.d. A.F. = 0 วินาที A.G. = 2.23 นาที	

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) พฤติกรรมการลุกไหม้ของเปลวไฟบนผ้าฝ้ายที่ผ่านและไม่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟในแนวตั้ง

ความเข้มข้น คราติน (กรัม/ลิตร)	ลักษณะการ ติดไฟ	ลักษณะการลุกไหม้	อัตราการลุกไหม้ ของเปลวไฟ (ชม./วินาที)	ลักษณะผ้าภายหลัง ทดสอบ
26.64	ติดไฟภายใน 1 วินาที	-มีการลุกไหม้ไม่รุนแรง -เปลวไฟดับลงทันที เมื่อนำแหล่งต้นไฟ ออกและเกิดการคุแดง -เกิดควันสีดำ มีกลิ่น เหม็น	n.d. A.F. = 0 วินาที A.G. = 1.41 นาที	
27.72	ติดไฟภายใน 1 วินาที	-มีการลุกไหม้ไม่รุนแรง -เปลวไฟดับลงทันที เมื่อนำแหล่งต้นไฟ ออกและเกิดการคุแดง -เกิดควันสีดำ มีกลิ่น เหม็น	n.d. A.F. = 0 วินาที A.G. = 1.14 นาที	
28.25	ติดไฟภายใน 1 วินาที	-มีการลุกไหม้ไม่รุนแรง -เปลวไฟดับลงทันที เมื่อนำแหล่งต้นไฟ ออก -เกิดควันสีดำ มีกลิ่น เหม็น	n.d. A.F. = 0 วินาที A.G. = 50 วินาที	

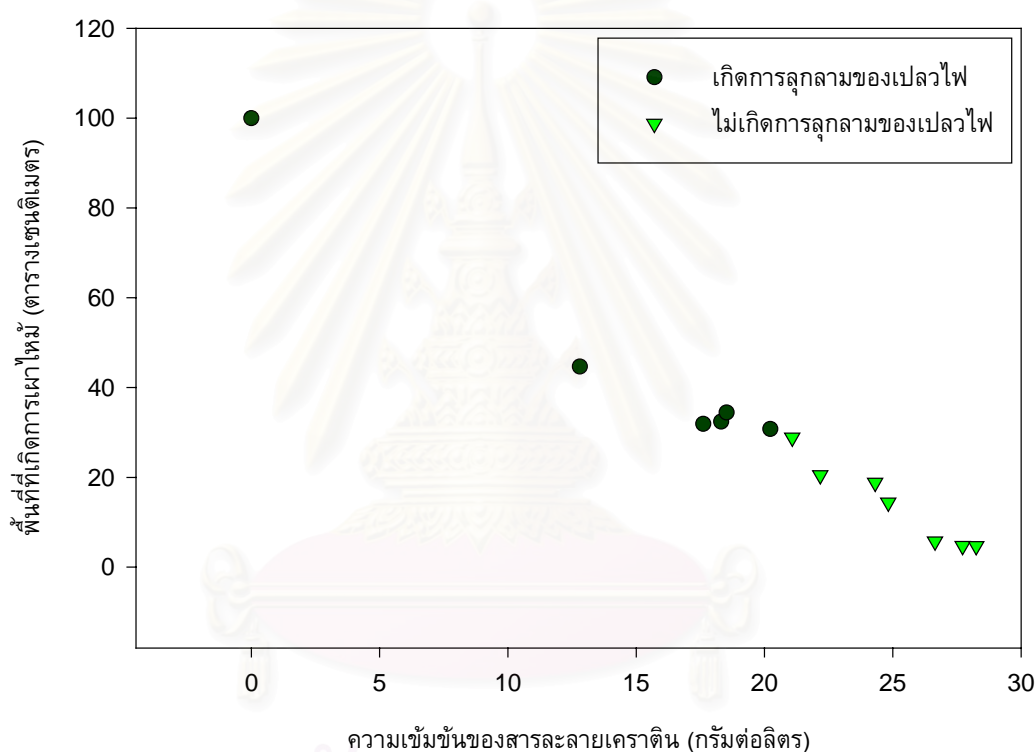
หมายเหตุ : n.d. หมายถึง ไม่สามารถหาอัตราการลุกไหม้ของเปลวไฟได้

: A.F. (Afterflame time) หมายถึง เวลาที่เปลวไฟเกิดการลุกไหม้ภายหลังจากนำแหล่งต้นไฟออก

: A.G. (Afterglow time) หมายถึง เวลาที่เกิดการคุแดงภายหลังจากที่เปลวไฟดับ

4.6.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเคราตินต่อพื้นที่ที่เกิดการเผาไหม้ในแนวตั้ง

นำผ้าที่ผ่านและไม่ผ่านตกแต่งด้วยสารละลายเคราตินที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ภายหลังทดสอบการลุกไหม้ในแนวตั้งไปหาพื้นที่ที่ผ้าเกิดการเผาไหม้ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเคราตินที่ทำการตกแต่งหน่วงไฟกับพื้นที่ของผ้าฝ่ายที่เกิดการเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 4.7



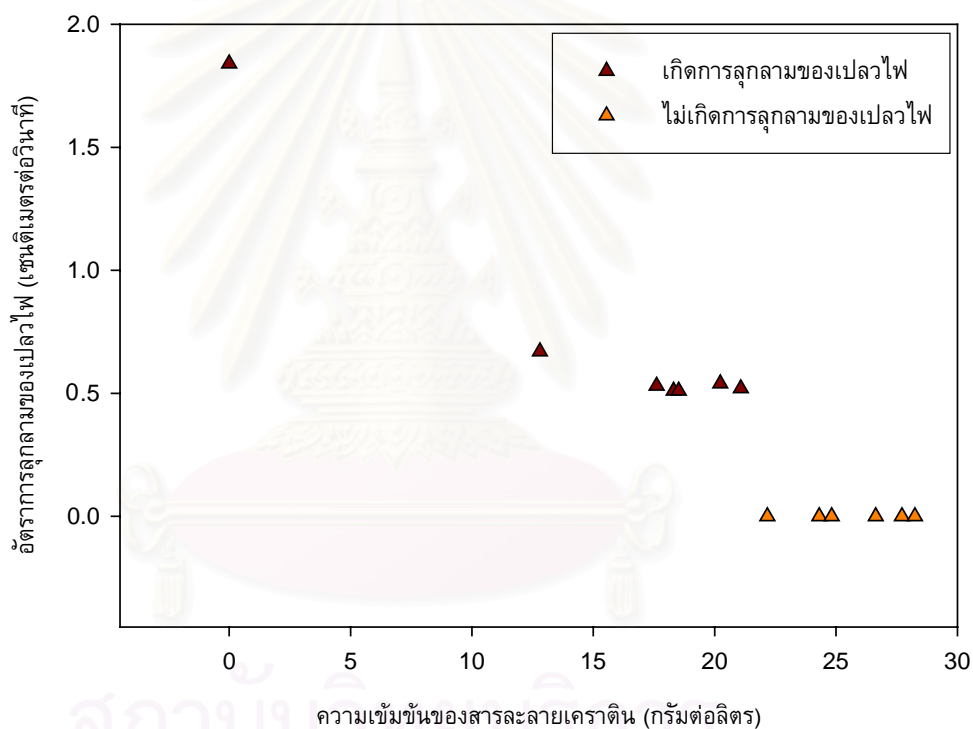
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเคราตินกับพื้นที่ของผ้าฝ่ายที่เกิดการเผาไหม้ในแนวตั้ง

จากรูปที่ 4.7 พบว่าผ้าฝ่ายที่ไม่ได้ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟจะถูกเผาไหม้กลายเป็นเถ้าจนหมด ในขณะที่ผ้าฝ่ายที่ผ่านการตกแต่งด้วยสารละลายเคราตินจะเกิดการเผาไหม้น้อยกว่า กล่าวคือจะมีพื้นที่ที่เกิดการเผาไหม้ไฟน้อยลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเคราตินเพิ่มขึ้น เช่น เมื่อนำผ้าฝ่ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารละลายเคราตินความเข้มข้น 28.25 กรัมต่อลิตร ไปทดสอบการลุกไหม้ในแนวตั้ง ผ้าจะถูกเผาไหม้ไปเพียง 4.70 ตารางเซนติเมตรเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากเคราติน

ประกอบด้วยธาตุไนโตรเจนและซัลเฟอร์ประมาณ 16.2-17.7 และ 0.7-5.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งธาตุทั้งสองมีสมบัติในการหน่วงไฟที่เสริมดี จึงทำให้ผ้าฝ้ายเกิดการเผาไหม้น้อยลง

4.6.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเคราตินต่ออัตราการลุกลามของเปลวไฟในแนวตั้ง

ในการศึกษาพฤติกรรมการลุกลามของไฟในแนวตั้งสามารถทำให้หาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการลุกลามของเปลวไฟกับความเข้มข้นของสารละลายเคราตินได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเคราตินต่ออัตราการลุกลามของเปลวไฟในแนวตั้ง

จากรูปที่ 4.8 พบว่าผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ผ่านการตกแต่งด้วยสารละลายเคราตินที่สกัดจากขนไก่จะมีอัตราการลุกลามของเปลวไฟในแนวตั้งสูงเท่ากับ 1.84 เซนติเมตรต่อวินาที ในขณะที่ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารละลายเคราตินที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 12.80 ถึง 21.08 กรัมต่อลิตรจะ

เกิดการลุกลามของเปลวไฟช้ากว่าผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ตกแต่งห่วงไฟ และเมื่อเปลวไฟดับจะเกิดการคุ
แดงต่อไปจนกระทั่งดับลงได้เอง ในขณะที่ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วยสารละลาย
เคราตินความเข้มข้นตั้งแต่ 22.17 ถึง 28.25 กรัมต่อลิตรจะไม่เกิดการลุกลามของเปลวไฟ แต่เปลว
ไฟจะดับลงทันทีเมื่อนำแหล่งต้นไฟออก และเกิดการคุแดงเคลื่อนที่ขึ้นไปตามแนวตั้งมีเส้นทางการ
เคลื่อนที่ไม่แน่นอนและสามารถดับได้ด้วยตัวของมันเอง ขณะเผาไหม้จะเกิดควันสีดำเป็นจำนวน
มากและมีกลิ่นเหม็นคล้ายเส้นผมไหม้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.7 การศึกษาพฤติกรรมและอัตราการลุกลามของเปลวไฟในแนว 45 องศา

ตารางที่ 4.4 พฤติกรรมการลุกลามของเปลวไฟบนผ้าฝ้ายที่ผ่านและไม่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟในแนว 45 องศา

ความเข้มข้น เคราติน (กรัม/ลิตร)	ลักษณะการติดไฟ	ลักษณะการลุกไหม้	ลักษณะผ้าภายหลัง ทดสอบ
Untreated	ติดไฟทันที	-เกิดลุกไหม้อย่างรุนแรงและ ไร้ทิศทาง -เมื่อนำแหล่งต้นไฟออกเปลว ไฟยังคงลุกไหม้ต่อไป -เกิดควันสีขาวขณะลุกไหม้ -อัตราการลุกลามของเปลว ไฟ เท่ากับ 0.87 (ซม./วินาที)	
12.80	ติดไฟภายใน 5 วินาที	-เกิดการลุกไหม้ไม่รุนแรง -เมื่อนำแหล่งต้นไฟออกเปลว ไฟยังคงลุกไหม้ต่อไป 1-2 วินาที จากนั้นจะเกิดการ คุแดงค่อย ๆ ลุกลามไปอย่าง ช้า ๆ และเกิดควันสีดำ มี กลิ่นเหม็น -A.G. = 30 วินาที	
17.61	ติดไฟภายใน 5 วินาที	-เกิดการลุกไหม้ไม่รุนแรง -เมื่อนำแหล่งต้นไฟออกเปลว ไฟยังคงลุกไหม้ต่อไป 1-2 วินาที จากนั้นจะเกิดการ คุแดงค่อย ๆ ลุกลามไปอย่าง ช้า ๆ และเกิดควันสีดำ มี กลิ่นเหม็น -A.G. = 25 วินาที	

ตารางที่ 4.4(ต่อ) พฤติกรรมการลุกลามของเปลวไฟบนผ้าฝ้ายที่ผ่านและไม่ผ่านการตกแต่ง
หน่วยไฟในแนว 45 องศา

ความเข้มข้น เคราติน (กรัม/ลิตร)	ลักษณะการติดไฟ	ลักษณะการลุกไหม้	ลักษณะผ้าภายหลัง ทดสอบ
20.23	ติดไฟภายใน 5 วินาที	-เกิดการลุกไหม้ไม่รุนแรง -เมื่อนำแหล่งต้นไฟออกเปลวไฟยังคงลุกไหม้ต่อไป 1-2 วินาที จากนั้นจะเกิดการคุแดงค่อย ๆ ลุกลามไปอย่างช้า ๆ และเกิดควันสีดำ มีกลิ่นเหม็น -A.G. = 31 วินาที	
22.17	ติดไฟภายใน 5 วินาที	-เกิดการลุกไหม้ไม่รุนแรง -เมื่อนำแหล่งต้นไฟออกเปลวไฟยังคงลุกไหม้ต่อไป 1-2 วินาที จากนั้นจะเกิดการคุแดงค่อย ๆ ลุกลามไปอย่างช้า ๆ และเกิดควันสีดำ มีกลิ่นเหม็น -A.G. = 26 วินาที	
24.31	ติดไฟภายใน 5 วินาที	-เกิดการลุกไหม้ไม่รุนแรง -เมื่อนำแหล่งต้นไฟออกเปลวไฟยังคงลุกไหม้ต่อไป 1-2 วินาที จากนั้นจะเกิดการคุแดงค่อย ๆ ลุกลามไปอย่างช้า ๆ และเกิดควันสีดำ มีกลิ่นเหม็น -A.G. = 20 วินาที	

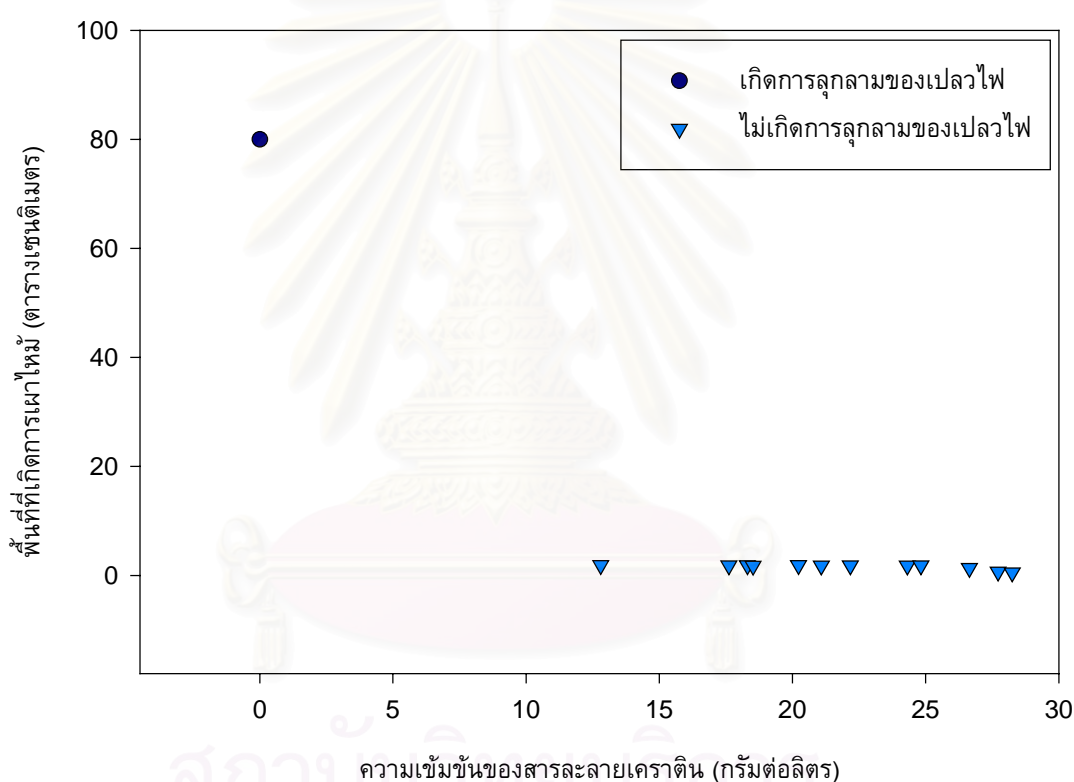
ตารางที่ 4.4(ต่อ) พฤติกรรมการลุกไหม้ของเปลวไฟบนผ้าฝ้ายที่ผ่านและไม่ผ่านการตกแต่งหนองไฟแนว 45 องศา

ความเข้มข้น คราติน (กรัม/ลิตร)	ลักษณะการติดไฟ	ลักษณะการลุกไหม้	ลักษณะผ้าภายหลัง ทดสอบ
26.64	ติดไฟภายใน 5 วินาที	-เกิดการลุกไหม้ไม่รุนแรง -เมื่อนำแหล่งต้นไฟออก เปลวไฟยังคงลุกไหม้ต่อไป 1-2 วินาที จากนั้นจะเกิด การคุแดงค่อย ๆ ลุกไหม้ไป อย่างช้า ๆ และเกิดควันสีดำ มีกลิ่นเหม็น -A.G. = 18 วินาที	
27.72	ติดไฟภายใน 5 วินาที	-เกิดการลุกไหม้ไม่รุนแรง -เมื่อนำแหล่งต้นไฟออก เปลวไฟจะดับทันที จากนั้น จะเกิดการคุแดงค่อย ๆ ลุก ไหม้ไปอย่างช้า ๆ และเกิด ควันสีดำ มีกลิ่นเหม็น -A.G.= 15 วินาที	
28.25	ติดไฟภายใน 5 วินาที	-เกิดการลุกไหม้ไม่รุนแรง -เมื่อนำแหล่งต้นไฟออก เปลวไฟจะดับทันที จากนั้น จะเกิดการคุแดงค่อย ๆ ลุก ไหม้ไปอย่างช้า ๆ และเกิด ควันสีดำ มีกลิ่นเหม็น -A.G. = 14 วินาที	

หมายเหตุ : A.G. (Afterglow time) หมายถึง เวลาที่เกิดการคุแดงภายหลังที่เปลวไฟดับ

4.7.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเคราตินต่อพื้นที่ที่เกิดการเผาไหม้ในแนว 45 องศา

นำผ้าที่ผ่านและไม่ผ่านตากแต่งห่วงไฟด้วยสารละลายเคราตินที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ภาย หลังการทดสอบการลุกไหม้ในแนว 45 องศา ไปหาพื้นที่ที่ผ้าเกิดการเผาไหม้ เพื่อหาความสัมพันธ์ ระหว่างความเข้มข้นของเคราตินที่ทำการตากแต่งห่วงไฟกับพื้นที่ของผ้าฝ้ายที่เกิดการเผาไหม้ ดัง รูปที่ 4.9



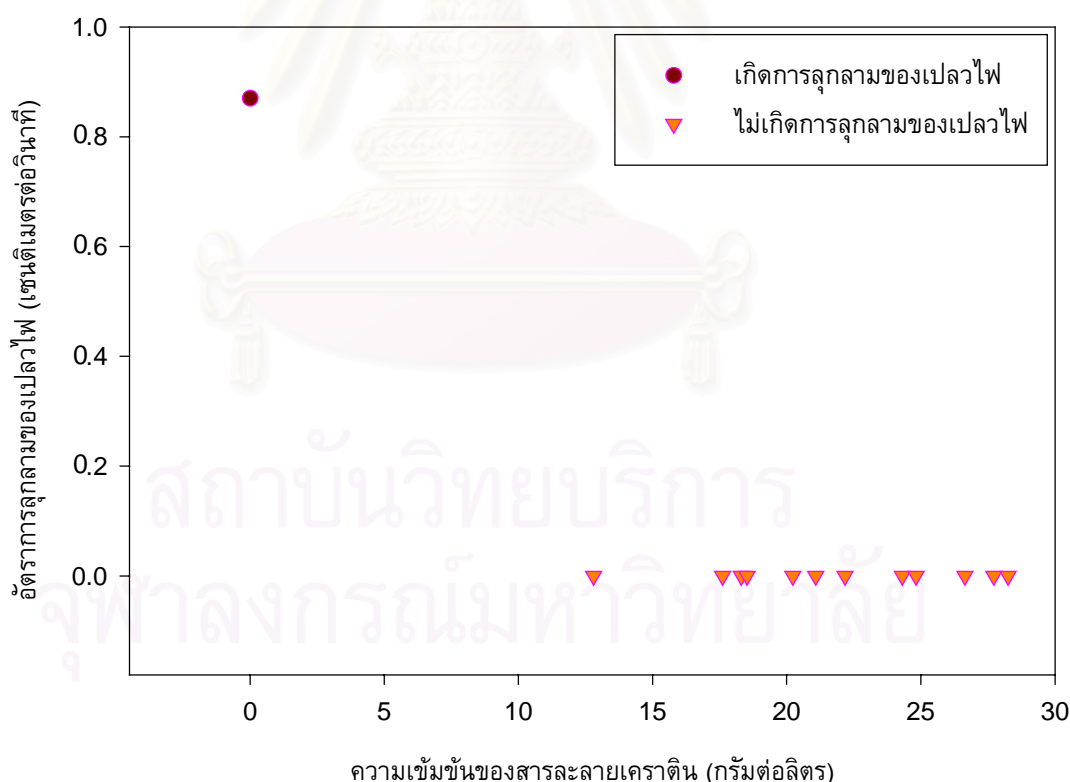
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเคราตินกับพื้นที่ของผ้าฝ้ายที่เกิดการเผาไหม้ในแนว 45 องศา

จากรูปที่ 4.9 พบว่าผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ผ่านการตากแต่งห่วงไฟจะถูกเผาไหม้กลายเป็นถ่านหมด ในขณะที่ผ้าที่ผ่านการตากแต่งด้วยสารละลายเคราตินที่สกัดได้จากขนไก่ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 12.80 ถึง 28.25 กรัมต่อลิตรจะมีพื้นที่ที่ถูกเผาไหม้น้อยลง และพบว่าความเข้มข้นของสารละลาย

เคราตินตั้งแต่ 12.80 ถึง 28.25 กรัมต่อลิตรจะทำให้ฝ้าฝ้ามีที่ที่เกิดการเผาไหม้ใกล้เคียงกันคือ อยู่ในช่วงระหว่าง 0.53-1.89 ตารางเซนติเมตร

4.7.2 ผลของความเข้มข้นสารละลายเคราตินเคราตินต่ออัตราการลุกลามของเปลวไฟในแนว 45 องศา

จากรูปที่ 4.10 พบว่าฝ้าฝ้าที่ไม่ได้ผ่านการตกแต่งผนังไฟด้วยสารละลายเคราตินที่สกัดจากขนไก่จะมีอัตราการลุกลามของไฟในแนว 45 องศาสูงถึง 0.87 เซนติเมตรต่อวินาที ในขณะที่ฝ้าฝ้าที่ตกแต่งด้วยสารละลายเคราตินที่สกัดได้จากขนไก่ความเข้มข้นตั้งแต่ 12.80 ถึง 28.25 กรัมต่อลิตร จะไม่เกิดการลุกลามของเปลวไฟ แต่เปลวไฟจะดับทันทีเมื่อนำแหล่งต้นไฟออก ดังนั้นจึงไม่สามารถหาอัตราการลุกลามของเปลวไฟได้ แต่จะเกิดการคุแฉงเคลื่อนที่ออกไปรอบ ๆ มีลักษณะค่อนข้างกลมและดับเองในที่สุด ขณะเผาไหม้จะเกิดควันสีดำเป็นจำนวนมากและมีกลิ่นเหม็นคล้ายเส้นผมไหม้



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเคราตินต่ออัตราการลุกลามของเปลวไฟในแนว 45 องศา

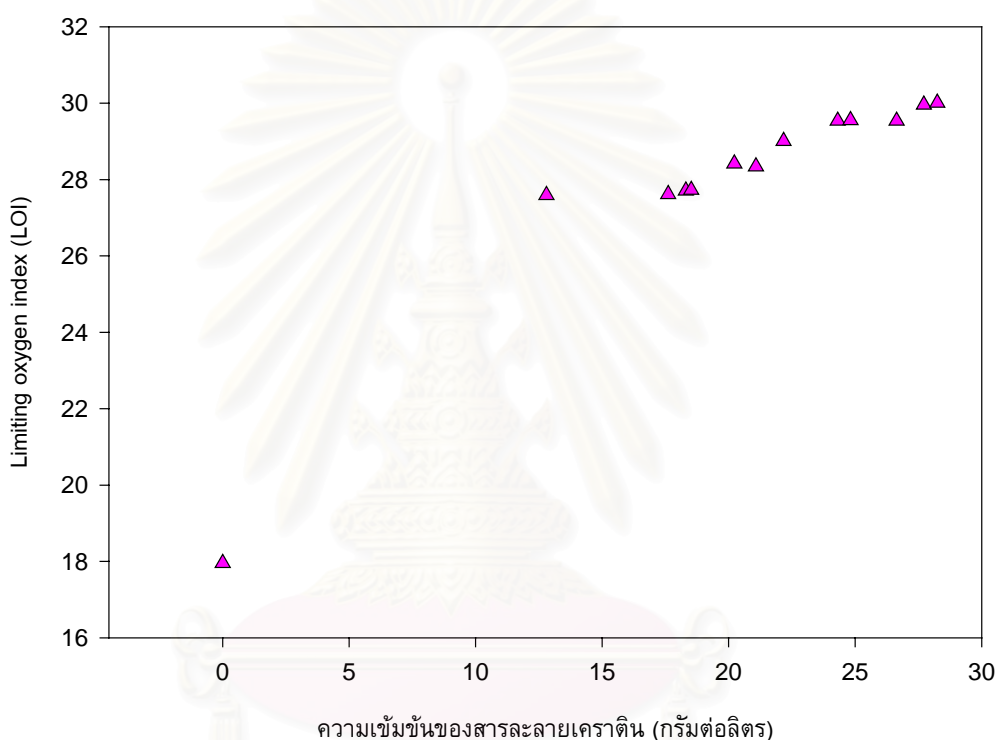
เมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการลุกลามของเปลวไฟบนผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ตกแต่งห่วงไฟในแนวตั้งและแนว 45 องศา พบว่า การลุกลามของเปลวไฟในแนวตั้งจะมีอัตราเร็ว 1.84 เซนติเมตรต่อวินาที ในขณะที่การลุกลามของเปลวไฟในแนว 45 องศาจะมีอัตราเร็ว 0.87 เซนติเมตรต่อวินาที แสดงให้เห็นว่าการลุกลามของเปลวไฟในแนวตั้งจะมีการลุกลามที่มากกว่าการลุกลามของเปลวไฟในแนว 45 องศา โดยผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งด้วยสารละลายเคราตินที่มีความเข้มข้น 12.80 ถึง 22.17 กรัมต่อลิตรจะมีอัตราการลุกลามของเปลวไฟในแนวตั้งที่น้อยกว่าผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ตกแต่งห่วงไฟด้วยสารละลายเคราติน แต่ผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งด้วยสารละลายเคราตินที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 24.31 กรัมต่อลิตรจะไม่เกิดการลุกลามของเปลวไฟ แต่จะเกิดการคุแดงเช่นเดียวกับการลุกลไหมในแนว 45 องศาของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารละลายเคราตินที่สกัดได้จากขนไก่ความเข้มข้นตั้งแต่ 12.80 ถึง 28.25 กรัมต่อลิตร



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.8 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเคราตินต่อค่า Limiting oxygen index (LOI)

เมื่อนำผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วยสารละลายเคราตินที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ ไปทดสอบหาค่า Limiting oxygen index (LOI) ด้วยเครื่อง Limiting oxygen indexer แล้ว นำค่า LOI ที่ได้มาหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเคราตินกับค่า LOI ได้ดังรูปที่ 4.11

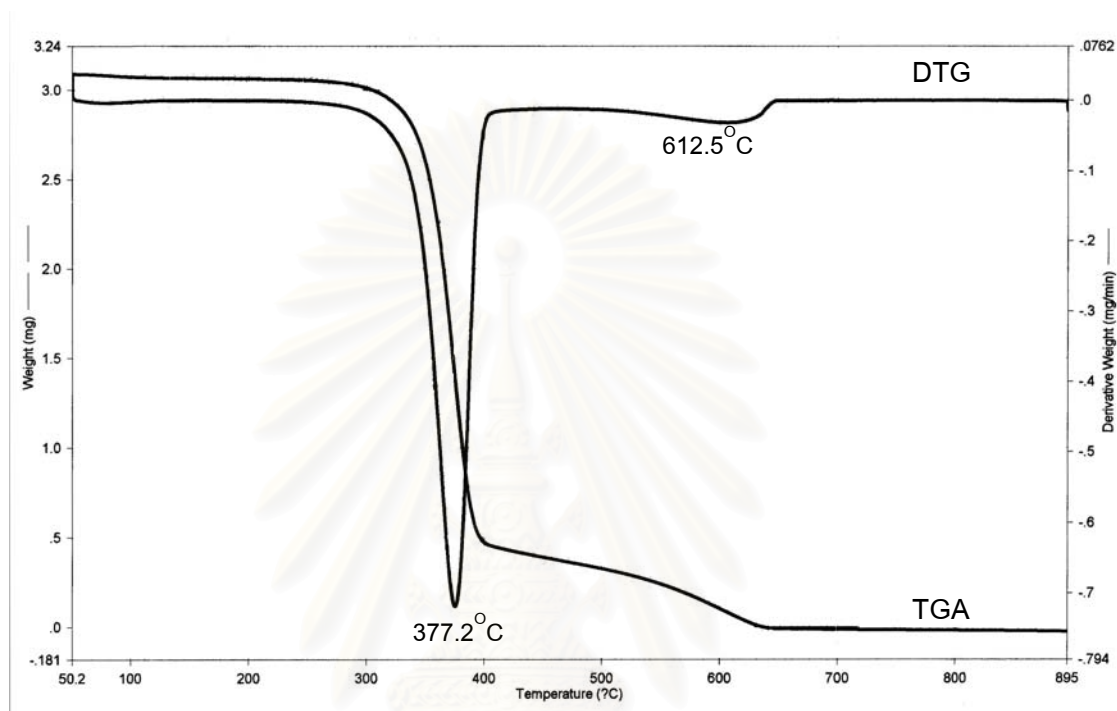


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเคราตินและค่า LOI

จากรูปที่ 4.11 พบว่าผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ผ่านการตกแต่งห่วงไฟมีค่า LOI เท่ากับ 17.9 ซึ่งแสดงว่าผ้าฝ้ายมีการติดไฟง่ายในบรรยากาศปกติเมื่อมีแหล่งต้นไฟ ในขณะที่ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วยสารละลายเคราตินที่สกัดได้จากขนไก่ที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 12.80 ถึง 28.25 กรัมต่อลิตร มีค่า LOI มากกว่า 27.5 และมีค่า LOI เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเคราตินเพิ่มขึ้น โดยเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเคราตินที่ใช้ตกแต่งห่วงไฟบนผ้าฝ้ายมีค่าเท่ากับ 28.25 กรัมต่อลิตร จะทำให้มีค่า LOI สูงสุดเท่ากับ 30.0 ซึ่งในวัสดุที่มีค่า LOI มากกว่า 26.0 จะสามารถทนไฟได้ดี ดังนั้นผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วยสารละลายเคราตินที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 12.80 กรัมต่อลิตร จึงมีความสามารถในการทนไฟที่ดี

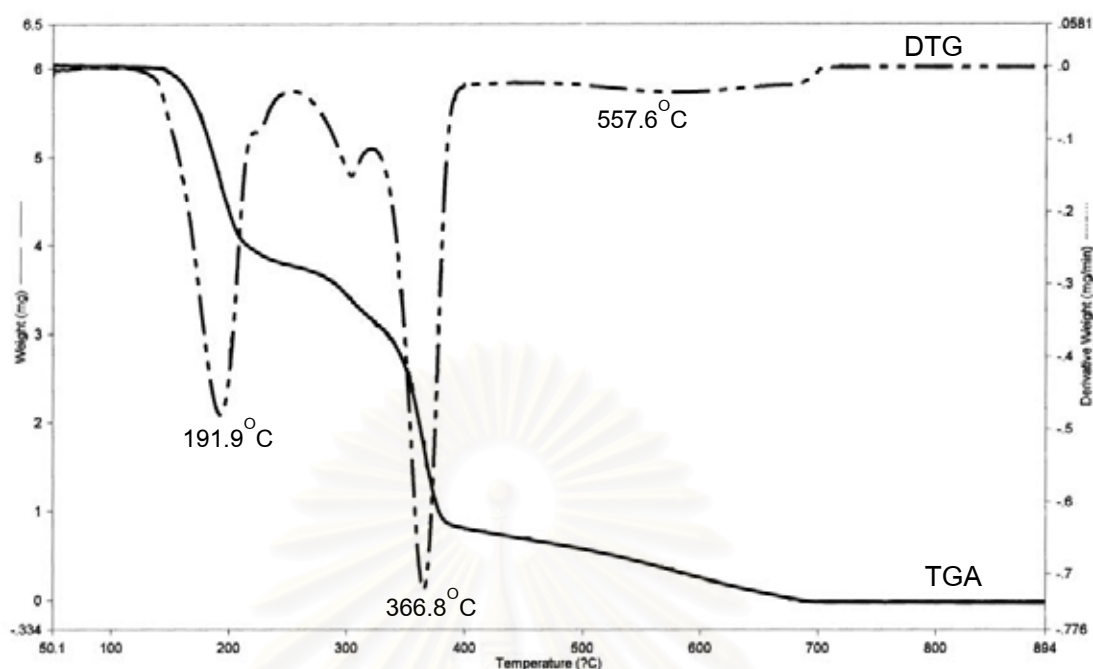
4.9 การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA และ DTG

สมบัติทางความร้อนของผ้าที่ผ่านและไม่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเทคนิค TGA และ DTG ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนแสดงดังรูปที่ 4.12 ถึง 4.21



รูปที่ 4.12 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของผ้าฝ้ายไม่ได้ตกแต่งหน่วงไฟ

รูปที่ 4.12 แสดง TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ พบว่าผ้าฝ้ายพบว่าผ้าฝ้ายเกิดการสลายตัว 2 ขั้นตอน ที่อุณหภูมิ 377.2 และ 612.5 องศาเซลเซียส จะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 352.8 องศาเซลเซียส และมีอัตราการสลายตัวมากที่สุดที่อุณหภูมิ 377.2 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 52.46 โดยผ้าฝ้ายจะเกิดการสลายตัวกลายเป็น laevoglucosan ซึ่งสลายต่อไปได้แก๊สที่ติดไฟง่าย และมีถ่านคาร์บอนเหลืออยู่ที่อุณหภูมิ 400 และ 600 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 12.96 และ 4.85 ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 699.0 องศาเซลเซียส ถ่านคาร์บอนจะเกิดการสลายตัวจนหมด

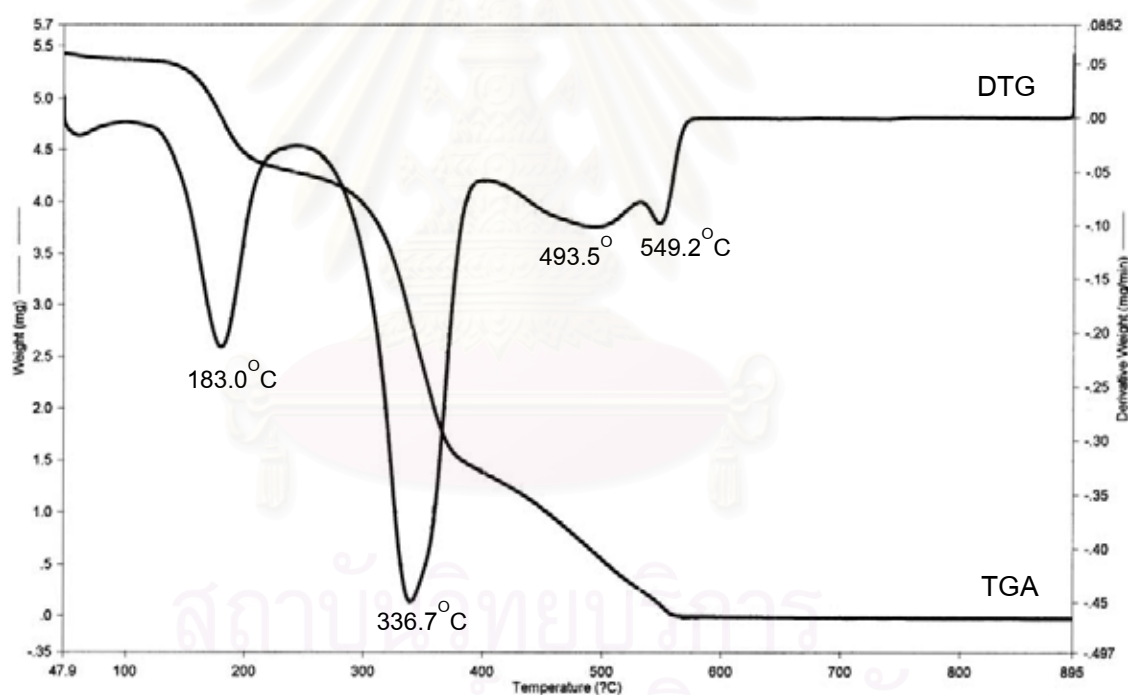


รูปที่ 4.13 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารละลายของ ยูเรีย 2-เมอร์แคปโตเอทานอล เอทิลีนไดอะมีนเทตระอะซิติกแอซิด และโซเดียมไบคาร์บอเนต

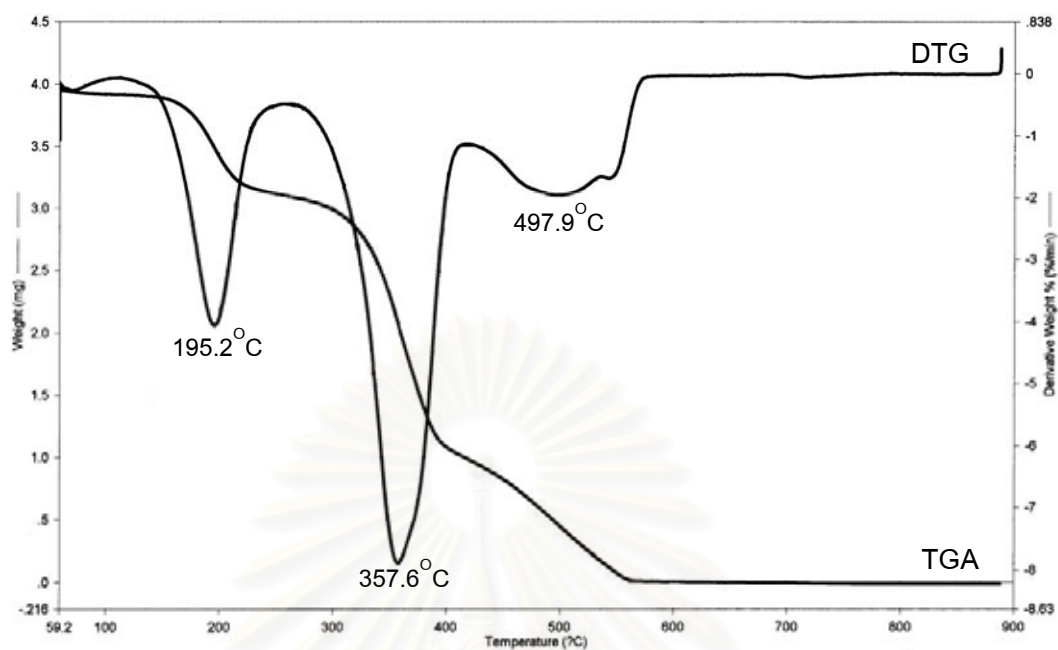
รูปที่ 4.13 แสดง TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารละลายของ ยูเรีย 2-เมอร์แคปโตเอทานอล เอทิลีนไดอะมีนเทตระอะซิติกแอซิด และโซเดียมไบคาร์บอเนตซึ่งเป็นสารละลายที่ใช้ในการสกัดเคราตินจากขนไก่ พบว่าผ้าฝ้ายเกิดการสลายตัว 3 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกที่อุณหภูมิประมาณ 150 ถึง 250 องศาเซลเซียส ขั้นตอนที่สอง ที่อุณหภูมิประมาณ 250 ถึง 400 องศาเซลเซียส และขั้นตอนที่สาม ที่อุณหภูมิประมาณ 400 ถึง 670 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิระหว่าง 102.3 ถึง 253.8 องศาเซลเซียส เป็นช่วงอุณหภูมิที่ผ้าฝ้ายจะมีการระเหยน้ำออกจากโมเลกุลของเซลลูโลสและมีการปล่อยแก๊สแอมโมเนียและแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 191.9 องศาเซลเซียส มีอัตราการสลายตัวมากที่สุด สูญเสียน้ำหนักคิดเป็นร้อยละ 37.48 และสำหรับที่อุณหภูมิ 322.0 องศาเซลเซียส ผ้าฝ้ายจะเริ่มสลายตัว และมีอัตราการสลายตัวที่อุณหภูมิ 366.8 องศาเซลเซียส เกิดการสูญเสียน้ำหนักคิดเป็นร้อยละ 59.15 และที่อุณหภูมิ 522.0 องศาเซลเซียส ถ่านคาร์บอนที่เกิดขึ้นเริ่มสลายตัว และมีอัตราการสลายตัวมากที่สุดที่อุณหภูมิ 557.6 องศาเซลเซียส มีปริมาณถ่านคาร์บอนเหลืออยู่ที่อุณหภูมิ 400 และ 600 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 14.89 และ 6.62 ตามลำดับ และสลายตัวจนหมดที่อุณหภูมิ 757.0 องศาเซลเซียส

สำหรับ TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหนังไฟด้วยสารละลายเคราตินที่สกัดจากขนไก่ความเข้มข้นระหว่าง 12.80 ถึง 27.72 กรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ถึง 4.21

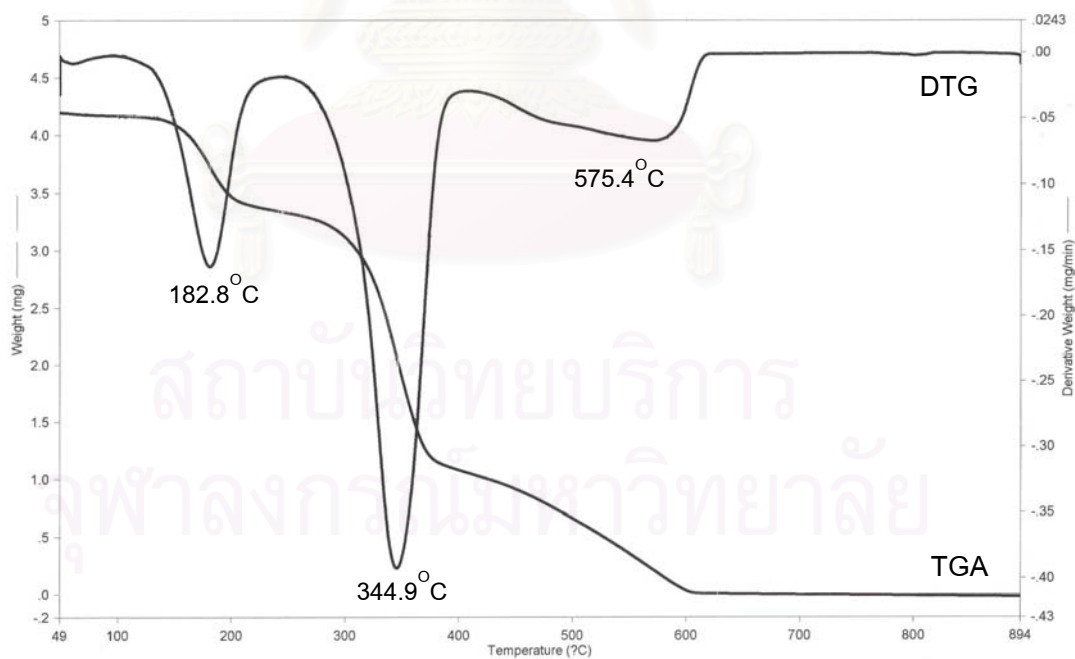
พบว่ามีการสลายตัวแบบเดียวกันคือมีการสลายตัว 3 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกที่อุณหภูมิประมาณ 100 ถึง 250 องศาเซลเซียส ขั้นตอนที่สองที่อุณหภูมิประมาณ 250 ถึง 400 องศาเซลเซียส และขั้นตอนที่สามที่อุณหภูมิประมาณ 400 ถึง 650 องศาเซลเซียส และคล้ายกับผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารละลายของ ยูเรีย 2-เมอร์แคปโตเอทานอล เอทิลีนไดอะมีนเทระอะซิติกแอซิด และ โซเดียมไบคาร์บอเนต แต่ต่างกันที่ช่วงอุณหภูมิที่ผ้าฝ้ายเกิดการสลายตัว และปริมาณของน้ำหนักที่สูญเสียไป โดยเมื่อความเข้มข้นของเคราตินเพิ่มขึ้น อุณหภูมิที่ผ้าฝ้ายเกิดการสลายตัวจะต่ำลง และต่ำกว่าอุณหภูมิการสลายตัวของผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารละลายเคราติน สำหรับปริมาณถ่านคาร์บอนที่เหลือที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณมากกว่าผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารละลายเคราติน



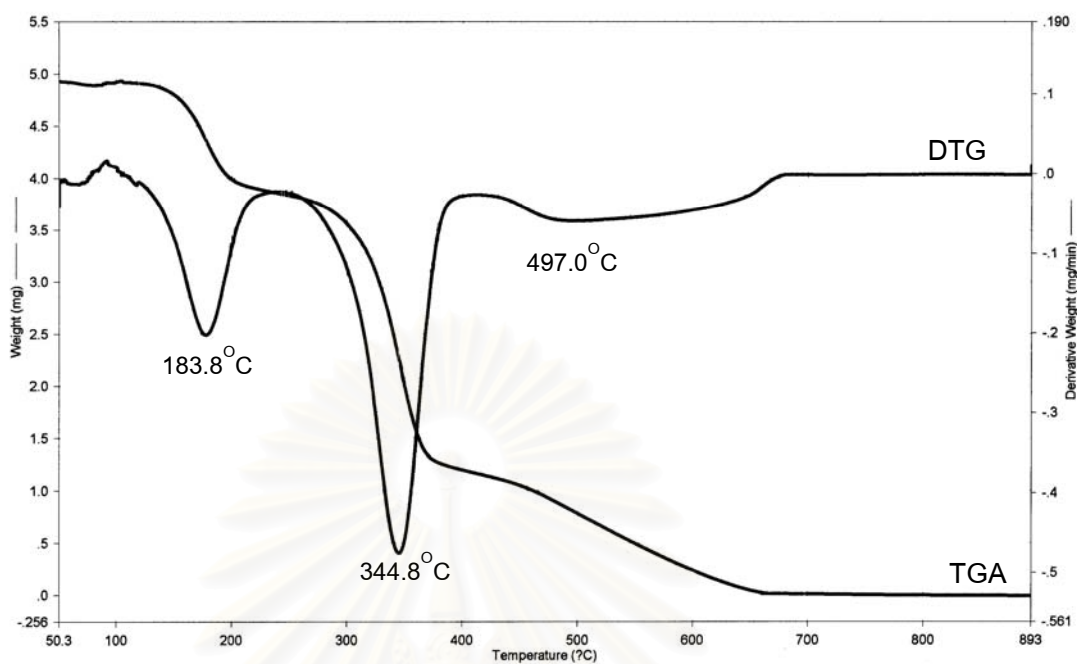
รูปที่ 4.14 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วย สารละลายเคราตินความเข้มข้น 12.80 กรัมต่อลิตร



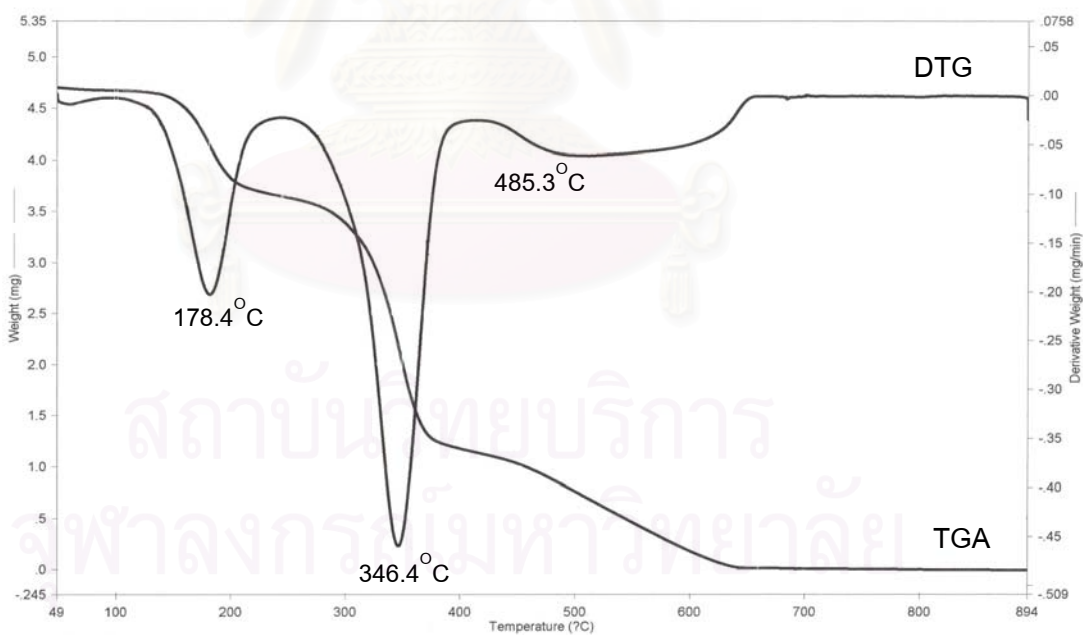
รูปที่ 4.15 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วย สารละลายเคราตินความเข้มข้น 18.31 กรัมต่อลิตร



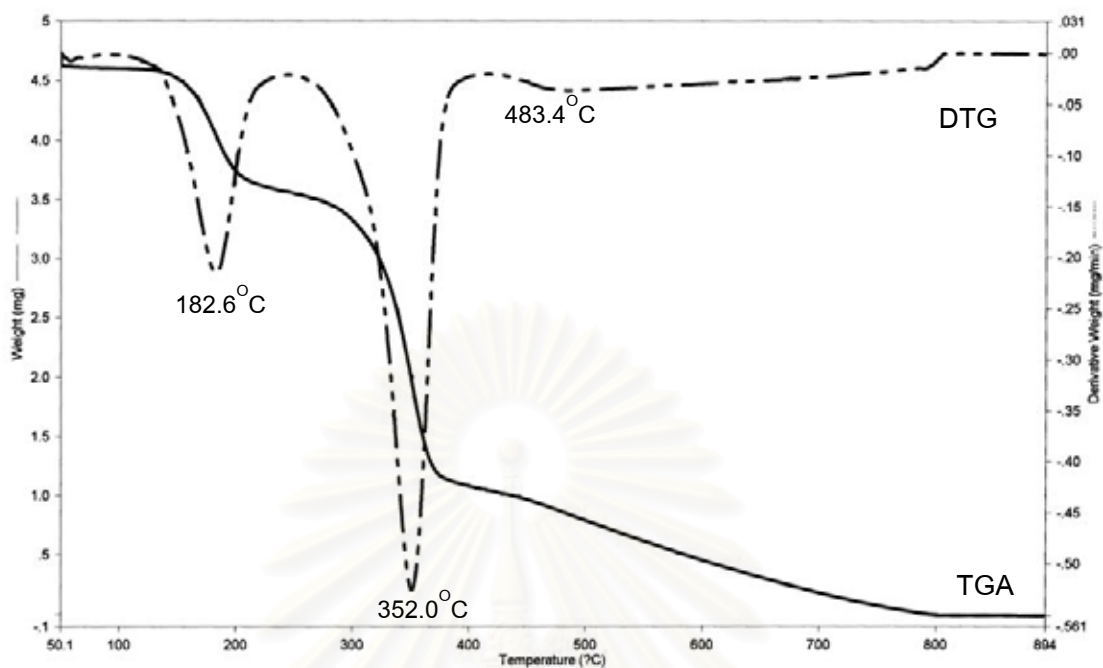
รูปที่ 4.16 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วย สารละลายเคราตินความเข้มข้น 18.52 กรัมต่อลิตร



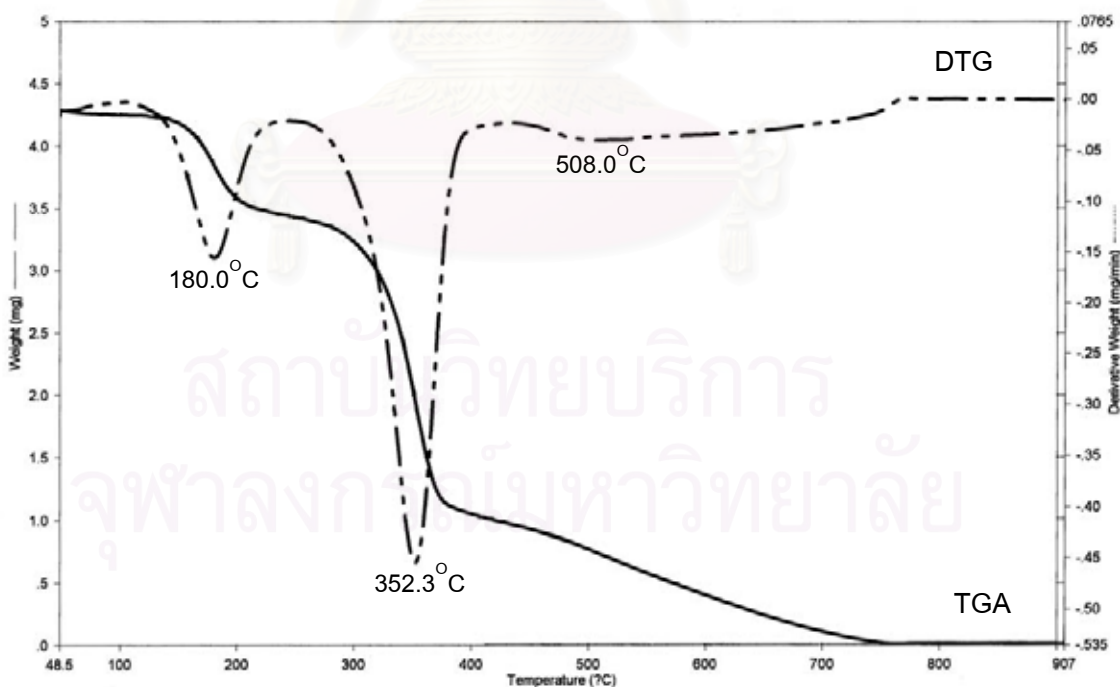
รูปที่ 4.17 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วย
สารละลายเคราตินความเข้มข้น 21.08 กรัมต่อลิตร



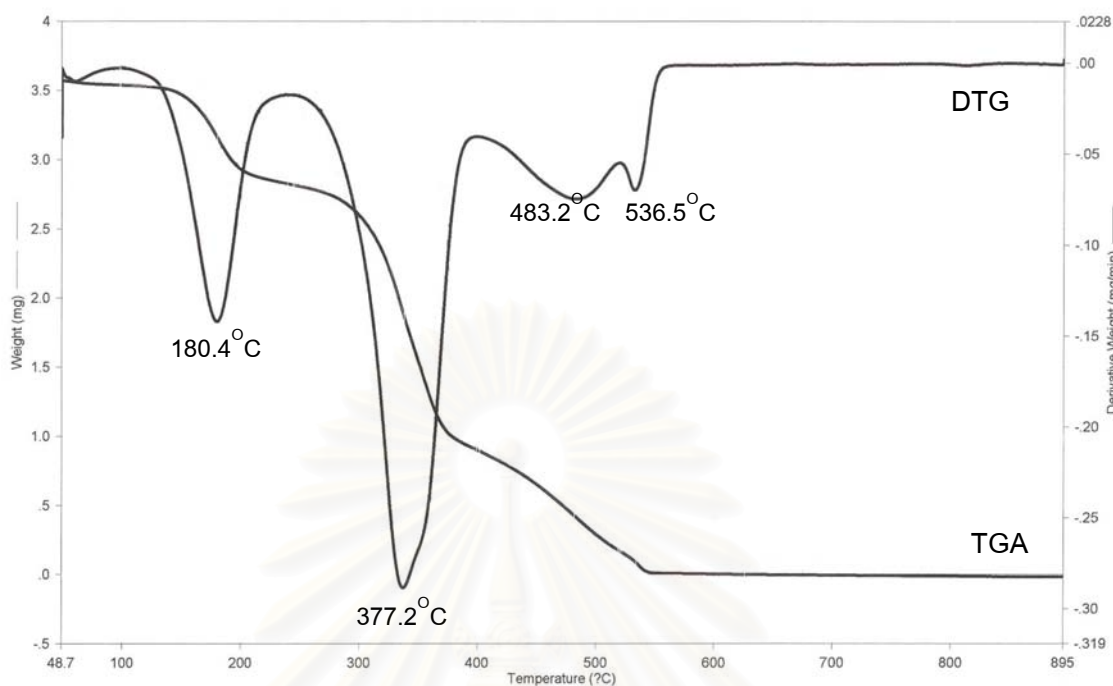
รูปที่ 4.18 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วย
สารละลายเคราตินความเข้มข้น 22.17 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.19 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วย สารละลายเคราตินความเข้มข้น 24.82 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.20 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วย สารละลายเคราตินความเข้มข้น 26.64 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.21 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารละลายเคราตินความเข้มข้น 27.72 กรัมต่อลิตร

รูปที่ 4.14 แสดง TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารละลายเคราตินความเข้มข้น 12.80 กรัมต่อลิตร พบว่าที่อุณหภูมิระหว่าง 103.3 ถึง 244.1 องศาเซลเซียส เป็นช่วงอุณหภูมิที่ผ้าฝ้ายจะมีการระเหยน้ำออกจากโมเลกุลของเซลลูโลสและมีการปล่อยแก๊สแอมโมเนียและแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 183.0 องศาเซลเซียส มีอัตราการสลายตัวมากที่สุด สูญเสียน้ำหนักคิดเป็นร้อยละ 13.0 และมีอัตราการสลายตัวมากที่สุดที่อุณหภูมิ 336.8 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 74.1 และที่อุณหภูมิ 447.0 องศาเซลเซียส ถ่านคาร์บอนที่เกิดขึ้นเริ่มสลายตัว และมีอัตราการสลายตัวมากที่สุดที่อุณหภูมิ 493.5 องศาเซลเซียส มีปริมาณถ่านคาร์บอนเหลืออยู่ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 26.05 และสลายตัวจนหมดที่อุณหภูมิ 665.7 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.15 แสดง TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารละลายเคราตินความเข้มข้น 18.31 กรัมต่อลิตร พบว่าที่อุณหภูมิระหว่าง 106.6 ถึง 259.5 องศาเซลเซียส เป็นช่วงอุณหภูมิที่ผ้าฝ้ายจะมีการระเหยน้ำออกจากโมเลกุลของเซลลูโลสและมีการปล่อยแก๊สแอมโมเนียและแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 195.2 องศาเซลเซียส มีอัตราการสลายตัว

มากที่สุด สูญเสียน้ำหนักคิดเป็นร้อยละ 10.3 มีอัตราการสลายตัวมากที่สุดที่อุณหภูมิ 357.6 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 71.65 และที่อุณหภูมิ 448.0 องศาเซลเซียส ถ่านคาร์บอนที่เกิดขึ้นเริ่มสลายตัว และมีอัตราการสลายตัวมากที่สุดที่อุณหภูมิ 497.9 องศาเซลเซียส มีปริมาณถ่านคาร์บอนเหลืออยู่ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 26.05 และสลายตัวจนหมดที่อุณหภูมิ 665.7 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.16 แสดง TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วยสารละลายเคราตินความเข้มข้น 18.52 กรัมต่อลิตร พบว่าที่อุณหภูมิระหว่าง 101.6 ถึง 244.8 องศาเซลเซียส เป็นช่วงอุณหภูมิที่ผ้าฝ้ายจะมีการระเหยน้ำออกจากโมเลกุลของเซลลูโลสและมีการปล่อยแก๊สแอมโมเนียและแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 182.8 องศาเซลเซียส มีอัตราการสลายตัวมากที่สุด สูญเสียน้ำหนักคิดเป็นร้อยละ 21.4 มีอัตราการสลายตัวมากที่สุดที่อุณหภูมิ 344.8 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 75.6 และที่อุณหภูมิ 471.9 องศาเซลเซียส ถ่านคาร์บอนที่เกิดขึ้นเริ่มสลายตัว และมีอัตราการสลายตัวมากที่สุดที่อุณหภูมิ 575.4 องศาเซลเซียส มีปริมาณถ่านคาร์บอนเหลืออยู่ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสคิดเป็นร้อยละ 25.02 และสลายตัวจนหมดที่อุณหภูมิ 625.5 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.17 แสดง TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วยสารละลายเคราตินความเข้มข้น 21.08 กรัมต่อลิตร พบว่าที่อุณหภูมิระหว่าง 101.2 ถึง 245.8 องศาเซลเซียส เป็นช่วงอุณหภูมิที่ผ้าฝ้ายจะมีการระเหยน้ำออกจากโมเลกุลของเซลลูโลสและมีการปล่อยแก๊สแอมโมเนียและแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 183.8 องศาเซลเซียส มีอัตราการสลายตัวมากที่สุด สูญเสียน้ำหนักคิดเป็นร้อยละ 23.4 มีอัตราการสลายตัวมากที่สุดที่อุณหภูมิ 344.8 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 76.0 และที่อุณหภูมิ 452.9 องศาเซลเซียส ถ่านคาร์บอนที่เกิดขึ้นเริ่มสลายตัว และมีอัตราการสลายตัวมากที่สุดที่อุณหภูมิ 497.0 องศาเซลเซียส มีปริมาณถ่านคาร์บอนเหลืออยู่ที่อุณหภูมิ 400 และ 600 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 24.46 และ 4.25 ตามลำดับ และสลายตัวจนหมดที่อุณหภูมิ 661.2 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.18 แสดง TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วยสารละลายเคราตินความเข้มข้น 22.17 กรัมต่อลิตร พบว่าที่อุณหภูมิระหว่าง 113.8 ถึง 243.6 องศาเซลเซียส เป็นช่วงอุณหภูมิที่ผ้าฝ้ายจะมีการระเหยน้ำออกจากโมเลกุลของเซลลูโลสและมีการปล่อยแก๊สแอมโมเนียและแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 178.4 องศาเซลเซียส มีอัตราการสลายตัวมากที่สุด สูญเสียน้ำหนักคิดเป็นร้อยละ 12.24 มีอัตราการสลายตัวมากที่สุดที่อุณหภูมิ 346.4 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 75.5 และที่อุณหภูมิ 452.7 องศาเซลเซียส ถ่านคาร์บอนที่เกิดขึ้นเริ่มสลาย

ตัว และมีอัตราการสลายตัวที่สูงสุดที่อุณหภูมิ 485.3 องศาเซลเซียส มีปริมาณถ่านคาร์บอนเหลืออยู่ที่อุณหภูมิ 400 และ 600 องศาเซลเซียสคิดเป็นร้อยละ 26.05 และ 23.33 ตามลำดับ และสลายตัวจนหมดที่อุณหภูมิ 665.7 องศาเซลเซียส

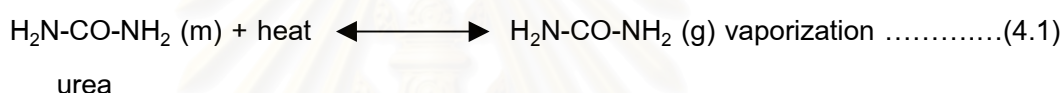
รูปที่ 4.19 แสดง TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วยสารละลายเคราตินความเข้มข้น 24.82 กรัมต่อลิตร พบว่าที่อุณหภูมิระหว่าง 100.1 ถึง 244.5 องศาเซลเซียส เป็นช่วงอุณหภูมิที่ผ้าฝ้ายจะมีการระเหยน้ำออกจากโมเลกุลของเซลลูโลสและมีการปล่อยแก๊สแอมโมเนียและแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 182.6 องศาเซลเซียส มีอัตราการสลายตัวมากที่สุด สูญเสียน้ำหนักคิดเป็นร้อยละ 21.73 มีอัตราการสลายตัวมากที่สุดที่อุณหภูมิ 352.0 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 78.26 และที่อุณหภูมิ 451.6 องศาเซลเซียส ถ่านคาร์บอนที่เกิดขึ้นเริ่มสลายตัว และมีอัตราการสลายตัวมากที่สุดที่อุณหภูมิ 483.4 องศาเซลเซียส มีปริมาณถ่านคาร์บอนเหลืออยู่ที่อุณหภูมิ 400 และ 600 องศาเซลเซียสคิดเป็นร้อยละ 25.63 และ 9.32 ตามลำดับ และสลายตัวจนหมดที่อุณหภูมิ 750.0 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.20 แสดง TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วยสารละลายเคราตินความเข้มข้น 26.64 กรัมต่อลิตร พบว่าที่อุณหภูมิระหว่าง 100.4 ถึง 244.0 องศาเซลเซียส เป็นช่วงอุณหภูมิที่ผ้าฝ้ายจะมีการระเหยน้ำออกจากโมเลกุลของเซลลูโลสและมีการปล่อยแก๊สแอมโมเนียและแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 180.0 องศาเซลเซียส มีอัตราการสลายตัวมากที่สุด สูญเสียน้ำหนักคิดเป็นร้อยละ 20.93 มีอัตราการสลายตัวมากที่สุดที่อุณหภูมิ 352.3 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 76.19 และที่อุณหภูมิ 432.0 องศาเซลเซียส ถ่านคาร์บอนที่เกิดขึ้นเริ่มสลายตัว และมีอัตราการสลายตัวมากที่สุดที่อุณหภูมิ 508.0 องศาเซลเซียส มีปริมาณถ่านคาร์บอนเหลืออยู่ที่อุณหภูมิ 400 และ 600 องศาเซลเซียสคิดเป็นร้อยละ 25.63 และ 9.32 ตามลำดับ และสลายตัวจนหมดที่อุณหภูมิ 821.1 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.21 แสดง TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วยสารละลายเคราตินความเข้มข้น 27.72 กรัมต่อลิตร พบว่าที่อุณหภูมิระหว่าง 98.8 ถึง 239.2 องศาเซลเซียส เป็นช่วงอุณหภูมิที่ผ้าฝ้ายจะมีการระเหยน้ำออกจากโมเลกุลของเซลลูโลสและมีการปล่อยแก๊สแอมโมเนียและแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 180.4 องศาเซลเซียส มีอัตราการสลายตัวมากที่สุด สูญเสียน้ำหนักคิดเป็นร้อยละ 20 มีอัตราการสลายตัวมากที่สุดที่อุณหภูมิ 337.0 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 74.28 และที่อุณหภูมิ 433.6 องศาเซลเซียส ถ่านคาร์บอนที่เกิดขึ้นเริ่ม

สลายตัว และมีอัตราการสลายตัวมากที่สุดที่อุณหภูมิ 483.2 องศาเซลเซียส ไม่มีปริมาณถ่านคาร์บอนเหลืออยู่ที่อุณหภูมิ 400 และ 600 องศาเซลเซียส

จากการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนโดยใช้เทคนิค TGA และ DTG สามารถอธิบายได้ว่า ผ้าที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารละลายเคราตินที่สกัดได้จากขนไก่มีการสลายตัวที่แตกต่างจากผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ตกแต่งหน่วงไฟ กล่าวคือผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารละลายเคราตินมีการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำมีการกำจัดน้ำออกได้ถ่านคาร์บอนและแก๊สที่ติดไฟยากซึ่งได้แก่แก๊สแอมโมเนียและแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งจะไปเจือจางแก๊สที่ติดไฟได้ง่ายให้น้อยลง ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเริ่มจากยูเรียจะเริ่มหลอมที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส และน้ำหนักจะเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส และเกิดยูเรียในสถานะแก๊ส ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2



จึงทำให้เส้นใยไม่สามารถเกิดการเผาไหม้ต่อไปได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบหาค่า LOI กล่าวคือ ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารละลายเคราตินความเข้มข้นระหว่าง 12.80-28.25 กรัมต่อลิตร จะมีค่า LOI อยู่ในช่วงระหว่าง 27.5-30.0 ซึ่งในวัสดุใดก็ตามที่มีค่า LOI มากกว่า 26.0 ขึ้นไปจัดว่าเป็นวัสดุที่สามารถทนไฟได้ ฉะนั้นผ้าที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารละลายเคราตินที่สกัดได้จากขนไก่ความเข้มข้นมากกว่า 12.80 กรัมต่อลิตร จึงมีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟได้ดี

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการวิจัยการสกัดเคราตินจากขนไก่เพื่อใช้ตกแต่งหนังไฟสำหรับผ้าฝ้ายสรุปได้ว่า

- 5.1.1 อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมสำหรับการสกัดเคราตินจากขนไก่ คือ 60 องศาเซลเซียส นาน 6 ชั่วโมง เนื่องจากสามารถสกัดเคราตินได้ 69.30 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักขนไก่เริ่มต้น ในขณะที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 8 ชั่วโมงสามารถสกัดเคราตินได้สูงสุดคือ 70.63 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อคำนึงถึงพลังงานและเวลาที่ใช้แล้วพบว่า การสกัดเคราตินจากขนไก่ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 6 ชั่วโมง จะให้ผลที่คุ้มค่ากว่าเนื่องจากสามารถสกัดเคราตินได้ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน
- 5.1.2 ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหนังไฟด้วยสารละลายเคราตินมีสมบัติหนังไฟที่ดีขึ้นโดย เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเคราตินที่ใช้ตกแต่งหนังไฟบนผ้าฝ้ายเพิ่มขึ้น ทำให้ค่า LOI เพิ่มขึ้น อัตราการลุกลามของเปลวไฟทั้งแนวตั้งและแนว 45 องศา มีค่าลดลง และพื้นที่ที่เกิดการเผาไหม้มีค่าลดลง
- 5.1.3 สารละลายเคราตินที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 12.80 กรัมต่อลิตรขึ้นไปเหมาะสมต่อการตกแต่งหนังไฟผ้าฝ้ายให้มีประสิทธิภาพในการหนังไฟที่ดี
- 5.1.4 จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA พบว่าผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหนังไฟด้วยสารละลายเคราตินมีการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่าผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ตกแต่งหนังไฟ ทำให้เกิดแก๊สที่ติดไฟยากจึงไปขัดขวางกระบวนการลุกไหม้ของผ้าฝ้าย

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ควรทำการวิเคราะห์หารธาตุซัลเฟอร์และไนโตรเจนในเคราตินที่สกัดได้จากขนไก่ เพื่อศึกษาผลของธาตุทั้งสองต่อประสิทธิภาพในการหมักไฟ
- 5.2.2 ควรใช้ขนไก่จากไก่พันธุ์เดียวกัน ที่มีอายุเท่ากันอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่เหมือนกันในการสกัดเคราตินจากขนไก่ เพื่อศึกษาปริมาณเคราตินที่มีอยู่ในขนไก่พันธุ์นั้น ๆ
- 5.2.3 ควรมีการศึกษาและปรับปรุงให้เคราตินสามารถยึดติดบนผ้าฝ้ายได้ดี เพื่อให้ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหมักไฟด้วยสารละลายเคราตินที่สกัดได้จากขนไก่มีความคงทนต่อการซักล้าง
- 5.2.4 ควรทำการศึกษากระบวนการตกแต่งหมักไฟด้วยสารละลายเคราตินที่สกัดได้จากขนไก่ในผ้าชนิดอื่น ๆ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เป็นสารหมักไฟสำหรับผ้าแต่ละประเภท

รายการอ้างอิง

1. ตำรวจดับเพลิง, กองบังคับการ. สถิติการปฏิบัติงานประจำปี พ.ศ. 2544. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์ตำรวจ, 2545.
2. ป้องกันภัยฝ่ายพลเรือน, สำนักเลขาธิการ. สรุปสถานการณ์ภัยประจำปี 2544. กรุงเทพมหานคร: สำนักเลขาธิการป้องกันภัยฝ่ายพลเรือน, 2545.
3. คณะกรรมการป้องกันอุบัติภัยแห่งชาติ, สำนักงาน. สถิติอุบัติภัยประจำปี 2544. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานคณะกรรมการป้องกันอุบัติภัยแห่งชาติ, 2545.
4. ผู้ผลิตไก่เพื่อการส่งออกไทย, สมาคม. World poultry and broiler statistics. กรุงเทพมหานคร: สมาคมผู้ผลิตไก่เพื่อการส่งออกไทย, 2541.
5. Schrooyen, P. M. M., Dijkstra, P. J., Obeerthur, R. C., Bantjes, A., and Feijen, J. Partially carboxymethylated feather keratins 1. Properties in aqueous systems. J. Agric. Food Chem. 48 (2000): 4326-4334.
6. วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา. วิทยาศาสตร์เส้นใย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
7. Voet, D. and Voet, J., G. Biochemistry. 2 nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1995.
8. Mckee, T. and Mckee, J., R. Biochemistry. 2 nd ed. New York: 1999.
9. Campbell, M., K. Biochemistry. 3 rd ed. San Francisco: Addison-Wasley, 2000.
10. Holde, K., E. and Ahern, K., G. Biochemistry. 3 rd ed. New York: Harcourt Brace, 1999.
11. อาภัสสรฯ ชมิทธ์. ชีวเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: เค. ยู. เพลสส์, 2537.
12. van Krevelen, D. W. Some basic aspects of flame resistance of polymeric materials. Polymer. 16 (1975): 615-620.
13. นันทยา ยานุมาศ. เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่องการตกแต่งสำเร็จสิ่งทอ. กรุงเทพฯ (ม.ป.ป.)
14. Kandola, B. K., Horrocks, A., R., Price, D. and Coleman, G. V. Flame-retardant treatments of cellulose and their influence on the mechanism of cellulose pyrolysis. J.M.S.-REV. Macromol. Chem. Phys. 36 (4) (1996): 721-794.
15. สิธีรัตน์ จารุจินดา. สิ่งทอทนไฟ (Flame-retardant Textiles). TTIS Textile digest 9 (94) (2002): 44-47.
16. Borton, J. A choice of treatment. International Dyer 14 (2001): 28-33.
17. Oulton, D. P. fire retardant textiles. In C. M. Carr (ed.), Chemistry of the textiles industry. pp. 103-124. London: Blackie academic and professional, 1995.

18. Georlette, P., Simons, J., and Costa, L. Halogen-containing fire-retardant compounds.
In A. F. Grand, and C. A. Wilkie (eds.), Fire retardancy of polymeric materials. pp. 245-281. New York: Marcel Dekker, 2000.
19. Harrap, B. S., and Woods, E. F. Soluble derivatives of feather keratin 1. Isolation, fractionation and aminoacid composition. Biochem. J. 92 (1964a): 8-18.
20. Willard, J. J., and Wondra, R.E. Quantitative evaluation of flame-retardant cotton finishes by the limiting oxygen index (LOI) technique. Text. Res. J. 43 (3) (1970): 203-210.
21. Holme, I., and Patel, S. R. A study of nitrogen- phosphorus synergism in the flame-retardant finishing of resin-treated polyester-cotton blend. J. Soc. Dyers. Colour. 96 (1980): 224-237.
22. Pandya, H. B., and Bhagwat, M. M. Mechanistic aspects of phosphorus-nitrogen synergism in cotton flame retardancy. Text. Res. J. 51 (1) (1981): 5-8.
23. Cullis, C. F., Hirscher, M. M., and Khattab, M .A. A. The flame-retardant of natural polymer by a sulfur-aluminium-bromine system. Eur. Polym. J. 20 (6) (1984): 559-562.
24. Cullis, C. F., Hirscher, M. M., and Madden, R. G. Studies of the phosphorus and its compounds on the combustion of cellulose. Eur. Polym. J. 28 (5) (1992): 493-497.
25. Horrocks, A. R., and Dsvies, P. J. Char formation in the flame-retarded wool fiber. 1. Effect of intumescent on the thermogravimetric behaviour. Fire and Materials. 24 (2000): 151-157.
26. Kandola, B., K. and Horrocks, A.,R. Complex char formation in flame-retarded fiber-intumescent combination- II. Thermal analytical studies. Poly. Deg. Stab. 54 (1996): 289-303.
27. Hebeish, A., Waly, A. and Abou-Okeil, A. M. Flame retardant cotton. Fire Mater. 24 (2000): 151-157.
28. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. คณะวิทยาศาสตร์. ภาควิชาชีวเคมี. ตำราปฏิบัติการชีวเคมีเบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
29. Fraser, R. D. B., Macrae, T. P., Rogers, G. E. Keratins. Their composition, structure and biosynthesis. Springfield, IL: Charles C. Thomas, 1972.
30. Nagai, Y., and Nishikawa, T. Alkali solubilization of chicken feather keratin. Agr. Biol. Chem. 34 (1970a): 16-22.

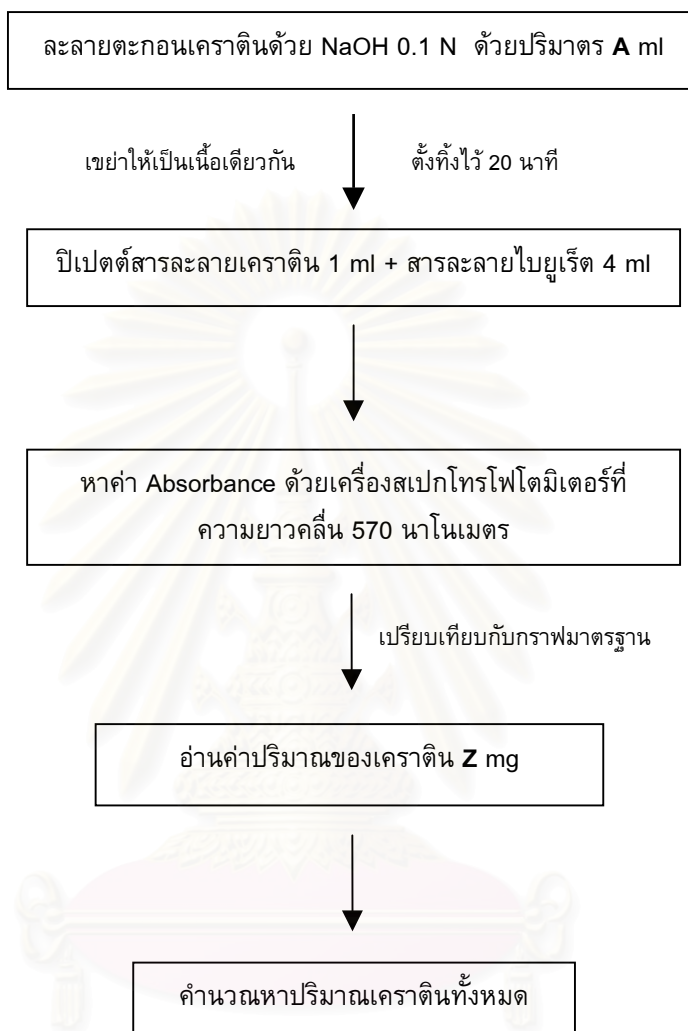
31. van Ingen, G. A., Faber, T. A., Obdam, J., and Kolster, P. Method for manufacturing a biodegradable thermoplastic material. (n.p.), 1998.
32. Dalev, P. G. Utilisation of waste feathers poultry slaughter for production of a protein concentrate. Bioresource Technol. 48 (1994): 265-267.
33. Virkki, M., Frosman, K. E., and Alajoki, A. Eura-process: the finish solution for feather processing. In upgrading of slaughter byproducts for animal nutrition; B. A. P. Urlings (ed.), ECCEAMST 1995. 1995.
34. Nagai, Y., and Nishikawa, T. Alkali solubilization of chicken feather keratin by a copper-aminecomplex. The action of cupriethylenediamine on feather keratin. Agr. Biol. Chem. 34 (1970b): 1676-1682.
35. Nagai, Y., and Nishikawa, T. Alkali solubilization of chicken feather keratin by a copper-hydroxide (Schweitzer's reagent). Preparation of keratose by catalytic air oxidation of feather keratin. Agr. Biol. Chem. 34 (1970c): 575-587.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก



รูปที่ 1 ขั้นตอนการหาปริมาณเคราติน

สูตรการคำนวณหาปริมาณเคราติน

$$\text{ปริมาณเคราตินทั้งหมด (มิลลิกรัม)} = A \times Z$$

เมื่อ A = ปริมาตรของสารละลาย NaOH 0.1 N ที่ใช้ละลายตะกอนเคราติน (มิลลิลิตร)

Z = ปริมาณเคราตินใน 1 มิลลิลิตร (มิลลิกรัม)

ตารางที่ 1 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการสกัดเคราตินจากขนไก่

สูตร	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)
S1	40	2
S2	40	4
S3	40	6
S4	40	8
S5	60	2
S6	60	4
S7	60	6
S8	60	8
S9	80	2
S10	80	4
S11	80	6
S12	80	8

หมายเหตุ : ใช้น้ำหนักขนไก่เริ่มต้นในการสกัดเคราติน 10 กรัม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2 ปริมาณเคราตินที่สกัดได้จากขนไก่ที่ภาวะต่าง ๆ

สูตร	ปริมาณเคราติน (กรัม)			
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย
S1	3.189	3.372	3.159	3.240
S2	4.296	4.472	4.362	4.377
S3	4.577	4.670	4.721	4.656
S4	4.810	4.618	4.462	4.630
S5	5.056	5.223	4.917	5.065
S6	5.595	5.745	5.365	5.568
S7	6.800	6.963	7.027	6.930
S8	7.031	7.118	7.041	7.063
S9	5.198	5.357	5.256	5.270
S10	6.448	5.724	6.062	6.078
S11	6.205	6.134	6.277	6.205
S12	6.764	6.575	6.642	6.660

ตารางที่ 3 ความเข้มข้นของสารละลายเคราตินที่สกัดได้จากขนไก่ที่ภาวะต่าง ๆ

สูตร	ความเข้มข้นของเคราติน (กรัม/ลิตร)			
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย
S1	12.288	13.488	12.636	12.804
S2	17.494	17.886	17.448	17.609
S3	17.360	18.678	18.883	18.307
S4	19.240	18.472	17.848	18.520
S5	20.114	20.894	19.668	20.225
S6	22.380	22.679	21.461	22.173
S7	27.200	27.853	28.106	27.720
S8	28.120	28.470	28.164	28.250
S9	20.794	21.427	21.024	21.082
S10	25.790	22.896	24.250	24.312
S11	24.822	24.535	25.109	24.822
S12	27.057	26.302	26.569	26.643

ตารางที่ 4 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเคราตินต่ออัตราการลุกลามของเปลวไฟ

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของสารละลายเคราติน (กรัม/ลิตร)	อัตราการลุกลามของเปลวไฟ (ซม./วินาที)	
		แนวตั้ง	แนว 45 องศา
Untreated	-	1.84	0.87
C0	-	1.23	n.d. ^a
C1	12.80	0.67 ^a	n.d. ^a
C2	17.61	0.53 ^a	n.d. ^a
C3	18.31	0.51 ^a	n.d. ^a
C4	18.52	0.51 ^a	n.d. ^a
C5	20.23	0.54 ^a	n.d. ^a
C6	22.17	n.d. ^a	n.d. ^a
C7	27.72	n.d. ^a	n.d. ^a
C8	28.25	n.d. ^a	n.d. ^a
C9	21.08	0.52 ^a	n.d. ^a
C10	24.31	n.d. ^a	n.d. ^a
C11	24.82	n.d. ^a	n.d. ^a
C12	26.64	n.d. ^a	n.d. ^a

หมายเหตุ : ตัวอย่าง C0 เป็นผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารละลาย 2-เมอร์แคปโตเอทานอลความเข้มข้น 125 มิลลิโมลาร์และยูเรียความเข้มข้น 8 โมลาร์

: ตัวอย่าง C1-C12 เป็นผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วยสารละลายเคราตินที่สกัดได้จากขนไก่ในสูตร S1-S12 จากตารางที่ 1 ตามลำดับ

: n.d. หมายถึง ไม่สามารถหาอัตราการลุกลามของเปลวไฟได้

: ^a หมายถึง เปลวไฟสามารถดับได้เอง

ตารางที่ 5 พื้นที่ของผ้าที่เกิดการเผาไหม้ภายหลังจุดไฟในแนวตั้งบนผ้าที่ผ่านและไม่มีการตกแต่งด้วยสารละลายเคราติน

ตัวอย่าง	พื้นที่ที่เกิดการเผาไหม้ (ตารางเซนติเมตร)			
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย
Untreated	100	100	100	100
C1	47.25	41.47	45.26	44.66
C2	36.48	34.65	34.51	31.88
C3	35.56	30.17	31.53	32.42
C4	34.61	35.72	31.76	34.43
C5	30.75	31.65	29.86	30.75
C6	21.53	19.29	20.75	20.52
C7	4.72	4.95	4.48	4.72
C8	4.68	4.88	4.55	4.70
C9	30.51	28.29	27.75	28.85
C10	19.98	17.53	18.85	18.79
C11	14.53	14.96	13.75	14.41
C12	5.62	5.78	5.92	5.73

หมายเหตุ : ตัวอย่าง C1-C12 เป็นผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารละลายเคราตินที่สกัดได้จากขนไก่ในสูตร S1-S12 จากตารางที่ 1 ตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6 พื้นที่ของผ้าที่เกิดการเผาไหม้หลังจากจุดไฟในแนว 45 องศา บนผ้าที่ผ่านและไม่
การตกแต่งด้วยสารละลายเคราติน

ตัวอย่าง	พื้นที่ที่เกิดการเผาไหม้ (ตารางเซนติเมตร)			
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย
Untreated	80	80	80	80
C1	1.88	1.94	1.85	1.89
C2	1.97	1.87	1.64	1.82
C3	1.77	1.98	1.78	1.84
C4	1.78	1.66	1.75	1.73
C5	1.95	1.79	1.84	1.86
C6	1.86	1.87	1.72	1.81
C7	0.64	0.67	0.68	0.66
C8	0.57	0.54	0.48	0.53
C9	1.87	1.91	1.73	1.77
C10	1.76	1.84	1.70	1.76
C11	1.92	1.78	1.75	1.81
C12	1.28	1.35	1.44	1.35

หมายเหตุ : ตัวอย่าง C1-C12 เป็นผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารละลายเคราตินที่สกัดได้จาก
ขนไก่ในสูตร S1-S12 จากตารางที่ 1 ตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 7 ค่า LOI ของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารละลายเคราตินสูตรต่าง ๆ

ตัวอย่าง	Limiting oxygen index (LOI)			
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย
Untreated	17.96	17.93	18.00	17.96
C1	27.60	27.60	27.56	27.59
C2	27.63	27.66	27.56	27.62
C3	27.73	27.63	27.76	27.71
C4	27.70	27.67	27.83	27.73
C5	28.36	28.40	28.50	28.42
C6	28.90	29.07	29.06	29.01
C7	29.93	29.93	30.03	29.96
C8	30.03	29.96	30.03	30.01
C9	28.23	28.33	28.47	28.34
C10	29.43	29.53	29.67	29.54
C11	29.60	29.53	29.53	29.55
C12	29.63	29.56	29.43	29.54

หมายเหตุ : ตัวอย่าง C1-C12 เป็นผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารละลายเคราตินที่สกัดได้จาก
ขนไก่ในสูตร S1-S12 จากตารางที่ 1 ตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 8 อุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวโดยการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA และ DTG

ความเข้มข้น เคราติน (กรัม/ลิตร)	TDOP ₁ (°C)	MDRP ₁ (°C)	TDOP ₂ (°C)	MDRP ₂ (°C)	TDOP ₃ (°C)	MDRP ₃ (°C)	TDOP ₄ (°C)	MDRP ₄ (°C)
Untreated	-	-	352.761	377.215	543.444	612.469	-	-
2M+U	166.156	191.919	285.246	366.784	521.988	557.643	-	-
12.80	154.365	182.969	309.512	366.687	446.978	493.543	543.877	549.161
18.31	169.909	195.206	329.154	357.612	447.957	497.871	-	-
18.52	155.886	182.766	317.312	344.832	471.946	575.423	-	-
21.08	159.746	183.828	317.281	344.774	452.944	497.020	-	-
22.23	156.613	178.423	318.213	346.730	452.679	485.345	-	-
24.82	158.092	182.592	324.366	351.982	451.570	483.368	-	-
26.64	158.186	179.955	327.703	352.274	431.952	508.024	-	-
27.72	155.047	180.424	310.293	337.236	433.588	483.158	532.620	536.518

หมายเหตุ : 2M+U หมายถึง ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารละลาย 2-เมอร์แคปโตเอทานอล ความเข้มข้น 125 มิลลิโมลาร์และยูเรียความเข้มข้น 8 โมลาร์

: TDOP (Thermal Degradation Onset Point) คือ อุณหภูมิเริ่มต้นที่วัสดุเกิดการสลายตัวด้วยความร้อน

: MDRP (Maximum Degradation Rate Point) คือ อุณหภูมิที่วัสดุมีอัตราการสลายตัวด้วยความร้อนสูงที่สุด

ตารางที่ 9 % Residue ที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

ความเข้มข้น เคราติน (กรัม/ลิตร)	น้ำหนัก เริ่มต้น (มล.)	น้ำหนักเหลือ ที่ 400°C (มล.)	% Residue ที่ 400°C	น้ำหนักเหลือ ที่ 600°C (มล.)	% Residue ที่ 600°C
Untreated	3.09	0.40	12.96	0.15	4.85
2M+U	6.04	0.90	14.89	0.40	6.62
12.80	5.37	1.40	26.05	0.00	0.00
18.31	3.95	1.10	27.85	0.00	0.00
18.52	4.20	1.05	25.02	0.00	0.00
21.08	4.70	1.15	24.46	0.20	4.25
22.23	4.93	1.15	23.33	0.50	10.14
24.82	4.62	1.05	22.72	0.45	9.74
26.64	4.29	1.10	25.63	0.40	9.32
27.72	3.57	0.80	22.41	0.00	0.00

หมายเหตุ : 2M+U หมายถึง ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารละลาย 2-เมอร์แคปโตเอทานอล ความเข้มข้น 125 มิลลิโมลาร์และยูเรียความเข้มข้น 8 โมลาร์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธนาวัฒน์ ชัยวุฒินันท์ เกิดเมื่อวันที่ 11 ตุลาคม พ.ศ. 2519 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาพอลิเมอร์และสิ่งทอ จากภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2543 หลังจากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2544 และสำเร็จการศึกษาในภาคปลายปีการศึกษา 2546



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย