

การสกัดคราตินจากเส้นผมมนุษย์สำหรับการตกแต่งหนังไฟบนผ้าทอ



นางสาวจิตต์โสภา เฉลียวศักดิ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

KERATIN EXTRACTION FROM HUMAN HAIR FOR FLAME RETARDANT FINISHING ONTO W
OVEN FABRICS

Miss Jitsopa Chaliewsak



A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Materials Science

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสกัดเคราตินจากเส้นผมมนุษย์สำหรับการตกแต่ง หนังงูไฟบนผ้าทอ
โดย	นางสาวจิตต์โสภา เถลิยวงศ์ศักดิ์
สาขาวิชา	วัสดุศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริรัตน์ จารุจินดา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มัญชุมาส เพระาสุนทร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรีบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวงนิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โปธิยะราช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริรัตน์ จารุจินดา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มัญชุมาส เพระาสุนทร)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.กาวี ศรีกุลกิจ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงดาว อัจจงค์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.นันทยา ยานูเมศ)

จิตต์โสภา เฉลียวศักดิ์ : การสกัดเคราตินจากเส้นผมมนุษย์สำหรับการตกแต่งห่วงไฟบนผ้าทอ (KERATIN EXTRACTION FROM HUMAN HAIR FOR FLAME RETARDANT FINISHING ONTO WOVEN FABRICS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.สิริรัตน์ จารุจินดา, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร.มัญจมาศ เพราะสุนทร, 291 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการสกัดเคราตินจากเส้นผมมนุษย์ด้วยสารรีดิวซ์ที่ต่างกัน (2-เมอร์แคปโทเอทานอล (Shindai) ไทโอไกลโคลิกแอซิด และ 1,2-อีเทนไดโธล) ในภาวะที่ต่างกัน (สกัดภายใต้ความดันบรรยากาศ และความดันต่ำ ที่อุณหภูมิห้อง 50 องศาเซลเซียส และ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4, 24, 48, 72 และ 84 ชั่วโมง) โดยสารสกัดหยาบเคราตินที่ได้จะถูกนำไปตกแต่งห่วงไฟร่วมกับแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตด้วยวิธีการเคลือบผ่านสกรีนลงบนผ้าทอ 3 ชนิด คือ ผ้าฝ้าย ผ้าพอลิเอสเตอร์ และผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ แล้วศึกษาประสิทธิภาพการห่วงไฟ สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกายภาพ และลักษณะทางสัณฐานวิทยาเปรียบเทียบกับผ้าที่ตกแต่งห่วงไฟโดยใช้เคราตินทางการค้าร่วมกับแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตทางการค้า พบว่า ภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสกัดเคราตินจากเส้นผมมนุษย์คือ การสกัดด้วยสารรีดิวซ์ 1,2-อีเทนไดโธล ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ยูเรียความเข้มข้น 5 โมลาร์ และไทโอยูเรียความเข้มข้น 2.6 โมลาร์ pH 8.5 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยจะให้ปริมาณสารสกัดหยาบสูงถึงร้อยละ 61.89 และมีปริมาณโปรตีนในสารสกัดหยาบสูงถึงร้อยละ 68.52 จากการทดสอบความสามารถในการห่วงไฟตามมาตรฐาน UL94-VTM พบว่าผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วยแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตทางการค้า ร้อยละ 9 และ 7 ร่วมกับเคราตินทางการค้าและสารสกัดหยาบเคราติน ร้อยละ 1 และ 3 ตามลำดับ และมีสารช่วยผนึก สามารถห่วงไฟได้และให้ค่า VTM-0 นอกจากนี้ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วยแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตทางการค้าร่วมกับสารสกัดหยาบเคราติน และมีสารช่วยผนึก ทุกสูตรมีค่า LOI มากกว่า 30 ซึ่งสูงกว่าผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตทางการค้า ร้อยละ 10 เพียงอย่างเดียว (LOI เท่ากับ 26) โดยผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วยแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตทางการค้า ร้อยละ 9 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราติน ร้อยละ 1 และมีสารช่วยผนึกมีค่า LOI สูงถึง 34.4 ส่วนการตกแต่งห่วงไฟด้วยแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตทางการค้าร่วมกับเคราตินทางการค้าและสารสกัดหยาบเคราตินบนผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ และผ้าพอลิเอสเตอร์นั้นยังไม่สามารถปรับปรุงสมบัติห่วงไฟได้อาจเนื่องจากปริมาณไม่เพียงพอ จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการเติมเคราตินลงไปสามารถช่วยเสริมและลดปริมาณการใช้แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตลงถึงร้อยละ 3 โดยผ้าฝ้ายยังมีประสิทธิภาพการห่วงไฟที่ดีในระดับ VTM-0

ภาควิชา วัสดุศาสตร์

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วัสดุศาสตร์

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5373877823 : MAJOR MATERIALS SCIENCE

KEYWORDS: KERATIN, FLAME RETARDANT, COTTON FABRIC

JITSOPA CHALIEWSAK: KERATIN EXTRACTION FROM HUMAN HAIR FOR FLAME RETARDANT FINISHING ONTO WOVEN FABRICS. ADVISOR: ASST. PROF. SIREERAT CHARUCHINDA, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST. PROF. MANCHUMAS PROUSOONTORN, Ph.D., 291 pp.

The objective of this research was to study the extraction of keratin from human hair with various types of reducing agents (2-mercaptoethanol (Shindai), thioglycolic acid and 1,2-ethanedithiol) in various conditions (under atmospheric and low pressure at room temperature, 50°C and 70°C for 4, 24, 48, 72 and 84 hours). The obtained crude keratin was applied as a flame retardant with ammonium polyphosphate onto 3 types of woven fabrics (cotton, cotton/polyester blend and polyester) by silk screen coating process. Flame retardancy, thermal properties, physical properties and morphology of coated fabrics were then compared with fabrics coated with commercial keratin and commercial ammonium polyphosphate. It was found that the optimal condition for keratin extraction is to extract keratin with 5% of 1,2-ethanedithiol, 5 M of urea and 2.6 M of thiourea pH 8.5 at 50°C for 4 hours. At this condition, the maximum yield of 61.89% and maximum protein yield of 68.52% were obtained. The cotton fabrics coated with 9% and 7% of commercial ammonium polyphosphate, 1% and 3% of keratin (commercial keratin or crude keratin), respectively and fixer showed rating of UL94-VTM standard as VTM-0. Moreover, all coated cotton fabrics with commercial ammonium polyphosphate, crude keratin and fixer presented LOI value more than 30 which were higher than that of coated fabrics with 10% of only commercial ammonium polyphosphate (LOI = 26). The coated cotton fabrics with 9% of commercial ammonium polyphosphate, 1% crude keratin and fixer showed the highest LOI value (34.4). While the flame retardancy of coated cotton/polyester blended fabrics and polyester fabrics were not improved by using commercial ammonium polyphosphate, commercial keratin and crude keratin. This may be due to the insufficient amount of ammonium polyphosphate to achieve flame retardancy. The results indicated that the addition of keratin could promote and decrease amount of ammonium polyphosphate about 3% whereas the cotton fabrics still exhibited rating of UL94-VTM-0.

Department: Materials Science

Student's Signature

Field of Study: Materials Science

Advisor's Signature

Academic Year: 2015

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จตามวัตถุประสงค์อย่างสมบูรณ์เพราะได้รับคำแนะนำทางวิชาการจากผู้ทรงคุณวุฒิด้านต่าง ๆ เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังได้รับความอนุเคราะห์เครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ และสถานที่ในการทำวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบพระคุณอาจารย์ และบุคคลผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง ดังรายนามต่อไปนี้

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริรัตน์ จารุจินดา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ซึ่งได้ช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และแนะแนวทางในการทำวิจัย รวมถึงแก้ไขปัญหาเมื่อเกิดข้อผิดพลาดในการทำวิจัยได้อย่างถูกต้อง จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มัญชุมาส เพระาสุนทร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งได้ช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และแนะแนวทางในการทำวิจัย รวมถึงแก้ไขปัญหาเมื่อเกิดข้อผิดพลาดในการทำวิจัยได้อย่างถูกต้อง จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

3. รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ภาวี ศรีกุลกิจ รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงดาว อัจจงค์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.นันทยา ยานูเมศ กรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลามาให้คำปรึกษาและแนะนำ ตลอดจนตรวจสอบความถูกต้องในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

4. ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CU-58-034-AM) ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย

5. “ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย” กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย

6. บริษัท คลาเรียนท์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมีในการวิจัย

7. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ และ ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ วัสดุอุปกรณ์ และสถานที่ในการทำวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ญาติพี่น้อง รุ่นพี่ เพื่อน และรุ่นน้อง ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้กำลังใจ และให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถสร้างสรรค์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ด
สารบัญรูป.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เคราติน (keratin).....	4
2.1.1 ชนิดของเคราติน.....	4
2.1.2 องค์ประกอบทางเคมี.....	5
2.1.3 เคราตินจากเส้นผมมนุษย์.....	6
2.1.4 การสกัดเคราติน.....	7
2.1.4.1 การทำลายพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างเคราติน.....	7
2.1.4.2 การทำลายพันธะไดซัลไฟด์ในโครงสร้างเคราติน.....	9
2.1.5 สารรีดิวซ์ที่ใช้สกัดเคราติน.....	9
2.1.5.1 2-เมอร์แคปโทเอทานอล (2-Mercaptoethanol, 2-ME).....	9
2.1.5.2 ไทโอไกลโคลิกแอซิด (Thioglycolic acid).....	10

2.1.5.3 1,2-อีเทนไดไทออล (1,2-Ethanedithiol).....	11
2.1.5 การสลายตัวทางความร้อน	12
2.2 ฝ้าย (cotton).....	13
2.2.1 องค์ประกอบทางเคมี.....	13
2.2.2 สมบัติของฝ้าย	14
2.2.3 การเผาไหม้ของฝ้าย.....	14
2.3 พอลิเอสเตอร์ (polyester).....	15
2.3.1 การผลิตเส้นใยพอลิเอสเตอร์	15
2.3.2 สมบัติของพอลิเอสเตอร์	16
2.3.3 การเผาไหม้ของพอลิเอสเตอร์.....	16
2.4 ฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ (cotton/polyester blend).....	17
2.5 การตกแต่งสำเร็จห่วงใยของสิ่งทอ (Flame retardant finishing of textile).....	18
2.5.1 องค์ประกอบของไฟ.....	19
2.5.2 กลไกการเผาไหม้	20
Pyrolysis	20
Ignition.....	20
2.5.3 กลไกการทำงานของสารห่วงใย.....	21
2.5.3.1 กลไกการห่วงใยทางกายภาพ.....	21
2.5.3.1.1 การทำให้ระบบเย็นลง (Endothermic theory, thermal theory).....	21
2.5.3.1.2 การสร้างฉนวนความร้อน (Melt theory).....	21
2.5.3.1.3 การเจือจางแก๊สติดไฟง่าย (Gas theory).....	21
2.5.3.2 กลไกการห่วงใยทางเคมี	21

2.5.3.2.1 กลไกแบบ Gas phase (Radical capture theory).....	21
2.5.3.2.2 กลไกแบบ Condensed phase (Dehydration theory).....	22
2.5.4 ประเภทของสารหน่วงไฟ.....	22
2.5.4.1 สารหน่วงไฟที่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ (Halogen-containing flame retardants).....	22
2.5.4.2 สารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ (Phosphorus-containing flame retardants).....	22
2.5.4.3 สารหน่วงไฟที่มีสารอนินทรีย์เป็นองค์ประกอบ (Inorganic-containing flame retardants).....	23
2.5.4.4 สารหน่วงไฟที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ (Nitrogen-containing flame retardants).....	24
2.5.5 แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (ammonium polyphosphate).....	24
2.6 การเคลือบผ่านสกรีน (screen coating technique).....	25
2.6.1 อุปกรณ์ในการเคลือบผ่านสกรีน.....	25
2.6.1.1 ผ้าสกรีน (screen fabric).....	25
2.6.1.2 กรอบสกรีน (screen frame).....	25
2.6.1.3 ยางปาด (squeegee).....	26
2.6.2 สารเคลือบ (coating paste).....	26
2.6.3 กรรมวิธีการเคลือบผ่านสกรีน.....	27
2.6.3.1 วัสดุที่ต้องการเคลือบ.....	27
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
2.7.1 งานวิจัยเกี่ยวข้องกับการสกัดเคราติน.....	27
2.7.1.1 การสกัดเคราตินแบบดั้งเดิม (conventional method).....	27
2.7.1.2 การสกัดเคราตินด้วยตัวทำละลาย Shindai.....	27

2.7.1.3 การสกัดเคราตินด้วยตัวทำละลายชนิดอื่น	30
2.7.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้งานเคราติน	31
2.7.3 งานวิจัยเกี่ยวกับสมบัติทางความร้อนของเคราติน และการประยุกต์เคราตินเป็น สารหน่วงไฟ	35
2.7.4 งานวิจัยเกี่ยวกับการตกแต่งหน่วงไฟ.....	39
2.7.4.1 งานวิจัยเกี่ยวกับสารหน่วงไฟที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ	39
2.7.4.2 งานวิจัยเกี่ยวกับสารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ	39
2.7.4.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการเสริมกันของสารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสและ ไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ	40
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	45
3.1 ขอบเขตการทดลอง	45
3.2 วัสดุและสารเคมี.....	45
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์	48
3.4 การดำเนินงานวิจัย.....	50
3.4.1 การสกัดเคราตินจากเส้นผมมนุษย์	51
3.4.1.1 การเตรียมขยะเส้นผมมนุษย์.....	51
3.4.1.2 การเตรียมสารละลายที่ใช้ในการสกัดเคราติน	51
3.4.1.3 การสกัดเคราตินที่ภาวะต่างๆ.....	52
3.4.2 การวิเคราะห์และทดสอบเคราติน.....	53
3.4.2.1 การหาปริมาณของสารสกัดหยาบเคราตินด้วยวิธีการหาค่าหนักแห้ง	53
3.4.2.2 การหาปริมาณโปรตีนในเคราตินด้วยวิธีแบรดฟอร์ด (Bradford method)	54

3.4.2.3 การหาน้ำหนักโมเลกุลของเคราตินด้วยเทคนิคการแยกทางไฟฟ้าโดยใช้เจลแบบโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต-พอลิอะคริลาไมด์อเล็กโตรฟอรีซิส (Sodium Dodecyl Sulfate-Polyacrylamide Gel Electrophoresis (SDS-PAGE))	55
3.4.2.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเคราตินด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy; FTIR).....	60
3.4.2.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของเคราตินด้วยเทคนิค EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)	61
3.4.2.6 การตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของเคราตินด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope; OM)	61
3.4.2.7 การตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของเคราตินด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)	62
3.4.2.8 การหาขนาดและการกระจายขนาดอนุภาคของเคราตินด้วยเทคนิค Laser Particle Size Distribution Analyzer (LPDA)	63
3.4.2.9 การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของเคราตินด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลซิส (Thermogravimetric Analysis; TGA).....	63
3.4.3 การตกแต่งหนังงไฟ้าทอด้วยเคราตินร่วมกับแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต ด้วยวิธีการเคลือบแบบปาดอย่างผ่านสกรีน	64
3.4.3.1 การตกแต่งหนังงไฟ้าฝ้าย	64
3.4.3.1.1 การตกแต่งหนังงไฟ้าฝ้ายด้วยเคราติน.....	64
3.4.3.1.2 การตกแต่งหนังงไฟ้าฝ้ายด้วยแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต.....	65
3.4.3.1.3 การตกแต่งหนังงไฟ้าฝ้ายด้วยเคราตินร่วมกับแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต	66
3.4.3.2 การตกแต่งหนังงไฟ้าพอลิเอสเทอร์และฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์	67

3.4.3.2.1 การตกแต่งห่วงไฟฟ้าพอลิเอสเตอร์และผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ด้วยเคราติน	67
3.4.3.2.2 การตกแต่งห่วงไฟฟ้าพอลิเอสเตอร์และผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ด้วยแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต	68
3.4.3.2.3 การตกแต่งห่วงไฟฟ้าพอลิเอสเตอร์และผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ด้วยเคราตินร่วมกับแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต	69
3.4.4 การวิเคราะห์และทดสอบผ้าทอที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟ	70
3.4.4.1 การวัดความหนืดของสารเคลือบห่วงไฟด้วยเครื่อง Brookfield	70
3.4.4.2 การวัดค่าการเปลี่ยนสีของผ้า	71
3.4.4.3 การทดสอบประสิทธิภาพในการห่วงไฟของผ้าทอ	72
3.4.4.4 การทดสอบหาค่า Limiting Oxygen Index (LOI)	74
3.4.4.5 การทดสอบความทนแรงดึงของผ้าทอ	74
3.4.4.6 การทดสอบสภาพแข็งตึงตัดโค้งหรือความแข็งกระด้างของผ้าทอ	75
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	77
4.1 การสกัดเคราตินจากเส้นผมมนุษย์	77
4.1.1 การหาภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเคราตินจากเส้นผมมนุษย์ด้วย Shindai	77
4.1.1.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อปริมาณสารสกัดหยาบเคราติน	78
4.1.1.2 ผลของความดันต่อปริมาณสารสกัดหยาบเคราติน	79
4.1.1.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารสกัดหยาบเคราตินที่ภาวะต่าง ๆ ด้วยเทคนิค FT-IR	79
4.1.1.4 การวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณวิทยาของเส้นผมมนุษย์ที่ก่อนและหลังการสกัดเคราตินด้วย OM	81
4.1.1.5 สัญญาณวิทยาของเส้นผมมนุษย์ที่ก่อนและหลังการสกัดเคราตินด้วย SEM	82

4.1.2 การหาสารรีดิวซ์ที่เหมาะสมในการสกัดเคราตินจากเส้นผมมนุษย์.....	84
4.1.2.1 ผลของสารรีดิวซ์ต่อปริมาณสารสกัดหยาบเคราติน.....	84
4.1.2.2 ผลของสารรีดิวซ์ต่อปริมาณโปรตีนในสารสกัดหยาบเคราติน.....	86
4.1.2.3 ผลของสารรีดิวซ์ต่อน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนในสารสกัดหยาบเคราติน.....	89
4.1.2.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารสกัดหยาบเคราตินด้วยเทคนิค FT-IR....	96
4.1.2.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของสารสกัดหยาบเคราตินด้วยเทคนิค EDS	98
4.1.2.6 สัณฐานวิทยาของเส้นผมมนุษย์ที่ก่อนและหลังการสกัดเคราตินด้วย SEM	101
4.1.2.7 การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของเคราตินด้วยเทคนิค TGA... ..	107
4.1.2.8 การหาขนาดและการกระจายขนาดอนุภาคของเคราตินด้วยเทคนิค Laser Particle Size Distribution Analyzer	110
4.1.2.9 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของสารสกัดหยาบเคราติน.....	112
4.1.2.9.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของสารสกัดหยาบเคราตินด้วยตาเปล่า.....	112
4.1.2.9.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของสารสกัดหยาบเคราตินด้วย SEM.....	114
4.2 การตกแต่งหนังผ้าทอด้วยเคราตินร่วมกับแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตด้วยวิธีการเคลือบแบบปาดยางผ่านสกรีน.....	116
4.2.1 ผลของขนาดอนุภาคแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตร่วมกับเคราตินต่อการหนังผ้าฝ้าย.....	116
4.2.1.1 ลักษณะทางกายภาพของสารเคลือบหนังผ้า.....	116
4.2.1.1.1 สีของสารเคลือบหนังผ้า.....	116
4.2.1.1.2 ความหนืดของสารเคลือบหนังผ้า.....	118
4.2.1.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต	120

4.2.1.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตที่มีขนาดอนุภาคต่างกันด้วยเทคนิค TGA.....	121
4.2.1.4 ความสามารถในการหน่วงไฟของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารหน่วงไฟแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตที่มีขนาดอนุภาคต่างกันร่วมกับเคราติน ตามมาตรฐาน UL94-VTM.....	123
4.2.2 การตกแต่งหน่วงไฟด้วยแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตร่วมกับเคราตินผ้าฝ้าย.....	127
4.2.2.1 ลักษณะทางกายภาพของสารเคลือบหน่วงไฟ.....	127
4.2.2.1.1 สีของสารเคลือบหน่วงไฟ.....	127
4.2.2.1.2 ความหนืดของสารเคลือบหน่วงไฟ.....	130
4.2.2.1.3 ความเข้ากันได้และเสถียรภาพของส่วนประกอบในสารเคลือบหน่วงไฟ.....	131
4.2.2.2 ลักษณะทางกายภาพของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ.....	136
4.2.2.2.1 สีของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ.....	136
4.2.2.2.2 ความหนาของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ.....	139
4.2.2.3 สันฐานวิทยาวิทยาของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ.....	142
4.2.2.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ.....	149
4.2.2.5 การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเทคนิค TGA.....	162
4.2.2.6 ความสามารถในการหน่วงไฟของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตร่วมกับเคราติน.....	169
4.2.2.6.1 ความสามารถในการหน่วงไฟของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ ตามมาตรฐาน UL94-VTM.....	169
4.2.2.6.2 ลักษณะทางกายภาพของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ ตามมาตรฐาน UL94-VTM.....	174
4.2.2.6.3 ค่า LOI ของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ.....	180

4.2.2.7	สัณฐานวิทยาวิทยาของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟหลังการเผาไหม้ตามมาตรฐาน UL94-VTM	182
4.2.2.8	ความทนแรงดึงของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟ	189
4.2.2.9	สภาพแข็งตึงดัดโค้งหรือความแข็งกระด้างของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟ.....	191
4.2.3	การตกแต่งห่วงไฟด้วยแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตร่วมกับเคราตินบนผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์.....	193
4.2.3.1	ลักษณะทางกายภาพของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟ.....	193
4.2.3.1.1	สีของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟ ...	193
4.2.3.1.2	ความหนาของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟ	195
4.2.3.2	สัณฐานวิทยาวิทยาของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟ.....	197
4.2.3.3	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟ.....	201
4.2.3.4	ความสามารถในการห่วงไฟของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน สูตรที่มีสารช่วยฉนิก ตามมาตรฐาน UL94-VTM	208
4.2.3.5	ลักษณะทางกายภาพของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์หลังการเผาไหม้ ตามมาตรฐาน UL94-VTM.....	211
4.2.3.6	สัณฐานวิทยาวิทยาของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟหลังการเผาไหม้ตามมาตรฐาน UL94-VTM	215
4.2.4	การตกแต่งห่วงไฟด้วยแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตร่วมกับเคราตินบนผ้าพอลิเอสเทอร์.....	218
4.2.4.1	ลักษณะทางกายภาพของผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟ... ..	218

4.2.4.1.1	สีของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟ.....	218
4.2.4.1.2	ความหนาของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟ ...	220
4.2.4.2	สัณฐานวิทยาวิทยาของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟ.....	222
4.2.4.3	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟ.....	225
4.2.4.4	ความสามารถในการห่วงไฟของผ้าพอลิเอสเตอร์ ตามมาตรฐาน UL94-VTM.....	232
4.2.3.5	ลักษณะทางกายภาพของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ ตามมาตรฐาน UL94-VTM	234
4.2.4.6	สัณฐานวิทยาวิทยาของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟหลังการเผาไหม้ตามมาตรฐาน UL94-VTM	238
บทที่ 5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	242
5.1	สรุปผลการทดลอง	242
5.1.1	การสกัดเคราตินจากเส้นผมมนุษย์	242
5.1.2	การตกแต่งห่วงไฟผ้าทอด้วยเคราตินร่วมกับแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต ด้วยวิธีการเคลือบแบบปาดอย่างผ่านสกรีน	243
5.2	ข้อเสนอแนะ	244
รายการอ้างอิง	.....	245
ภาคผนวก.....	.....	251
ภาคผนวก ก	.....	252
ภาคผนวก ข	.....	270
ภาคผนวก ค	.....	272
ภาคผนวก จ	.....	284
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	.....	291

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติของ 2-เมอร์แคปโทเอทานอล.....	10
ตารางที่ 2.2 สมบัติของไทโอไกลโคลิกแอซิด	11
ตารางที่ 2.3 สมบัติของ1,2-อีเทนไดโธล.....	11
ตารางที่ 2.4 สมบัติความคงทนต่อความร้อนของเส้นใยชนิดต่าง ๆ.....	18
ตารางที่ 2.5 ผลของยูเรีย ไทโอยูเรีย และ2-เมอร์แคปโทเอทานอล ต่อปริมาณโปรตีนที่สกัดได้ จากเส้นผมมนุษย์	29
ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบปริมาณโปรตีนที่ได้จากสกัดด้วยวิธี Shindai และวิธีดั้งเดิม	30
ตารางที่ 2.7 ปริมาณองค์ประกอบของเคราตินที่สกัดด้วยไทโอไกลโคลิกแอซิดที่เวลาสกัด เพิ่มขึ้น	31
ตารางที่ 2.8 ผลการทดสอบการสลายตัวทางความร้อนของผ้าฝ้าย.....	39
ตารางที่ 2.9 ประสิทธิภาพการหน่วงไฟของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย PEPBP.....	40
ตารางที่ 2.10 สูตรการตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารประกอบโซเดียมพอลิฟอสเฟตร่วมกับ ไคโตซาน	41
ตารางที่ 2.11 ค่า LOI ของผ้าฝ้ายที่ผ่านตกแต่งหน่วงไฟก่อนและหลังซักล้าง.....	41
ตารางที่ 2.12 ค่า LOI และปริมาณชาร์ของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วย TBP ร่วมกับ สารเติมแต่งไนโตรเจน	43
ตารางที่ 2.13 ความยาวชาร์และค่า LOI ของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งด้วยยูเรียร่วมกับ DAP...44	
ตารางที่ 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	48
ตารางที่ 3.2 สูตรการเตรียมสารละลายเพื่อเตรียมเจลส่วนบนและเจลส่วนล่าง	57
ตารางที่ 3.3 สูตรเคลือบหน่วงไฟผ้าฝ้ายด้วยเคราติน.....	65
ตารางที่ 3.4 สูตรเคลือบหน่วงไฟด้วยแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต	66
ตารางที่ 3.5 สูตรเคลือบหน่วงไฟด้วยเคราตินร่วมกับแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต.....	67

ตารางที่ 3.6	สูตรเคลือบหนังไฟด้วยเคราติน.....	68
ตารางที่ 3.7	สูตรเคลือบหนังไฟด้วยแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต	68
ตารางที่ 3.8	สูตรเคลือบหนังไฟด้วยเคราตินร่วมกับแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต.....	69
ตารางที่ 3.9	มาตรฐานที่ใช้จัดชั้นความสามารถในการหนังไฟ ตามมาตรฐาน UL94 VTM.....	73
ตารางที่ 4.1	ปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินที่ได้จากการสกัดด้วย Shindai ที่ภาวะต่าง ๆ	77
ตารางที่ 4.2	ปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินที่ได้จากการสกัดด้วยตัวทำละลายที่ประกอบด้วย สารรีติวซ์ที่แตกต่างกัน ที่ภาวะต่าง ๆ.....	85
ตารางที่ 4.3	ปริมาณโปรตีนในสารสกัดหยาบเคราตินที่ได้จากการสกัดด้วยตัวทำละลายที่ ประกอบด้วยสารรีติวซ์ที่แตกต่างกัน ที่ภาวะต่างๆ	88
ตารางที่ 4.4	องค์ประกอบธาตุของเคราตินทางการค้า และสารสกัดหยาบเคราตินที่ได้จากการ สกัดด้วยสารรีติวซ์ต่างกัน ที่ภาวะต่าง ๆ.....	99
ตารางที่ 4.5	ขนาดอนุภาค (d(0.5)) ของเคราตินทางการค้าและสารสกัดหยาบเคราติน.....	110
ตารางที่ 4.6	ความหนืดของสารเคลือบแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตที่มีขนาดอนุภาคต่างกันร่วมกับ เคราติน	119
ตารางที่ 4.7	ความหนืดของสารเคลือบเคราติน	119
ตารางที่ 4.8	การหนังไฟของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารหนังไฟ Exolit AP422 ร่วมกับเคราติน ตามมาตรฐาน UL94-VTM.....	125
ตารางที่ 4.9	การหนังไฟของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารหนังไฟ Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน ตามมาตรฐาน UL94-VTM.....	126
ตารางที่ 4.10	ความหนืดของสารเคลือบ Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน	130
ตารางที่ 4.11	ความหนืดของสารเคลือบเคราติน.....	131
ตารางที่ 4.12	สีของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน ที่ไม่มีสารช่วยผืนึก	137
ตารางที่ 4.13	สีของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน ที่มีสารช่วยผืนึก....	138
ตารางที่ 4.14	ความหนาของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน ที่ไม่มีสารช่วย ผืนึก	140

ตารางที่ 4.15 ความหนาของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน ที่มีสารช่วย ผนัง	141
ตารางที่ 4.16 การทอของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารทอ Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน สูตรที่ไม่มีสารช่วยผนัง ตามมาตรฐาน UL94-VTM.....	172
ตารางที่ 4.17 การทอของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารทอ Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผนัง ตามมาตรฐาน UL94-VTM.....	173
ตารางที่ 4.18 ค่า LOI ของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งทอด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผนัง ตามมาตรฐาน ASTM D2863-06A	181
ตารางที่ 4.19 ความทนแรงดึงของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งทอด้วย Exolit AP423 ร่วมกับ เคราติน สูตรที่มีสารช่วยผนัง ตามมาตรฐาน ASTM D5035-06	190
ตารางที่ 4.20 ความแข็งตึงดัดโค้งของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งทอด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผนัง ตามมาตรฐาน BS 2471	192
ตารางที่ 4.21 สีของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน สูตร ที่มีสารช่วยผนัง.....	194
ตารางที่ 4.22 ความหนาของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับ เคราติน สูตรที่มีสารช่วยผนัง	196
ตารางที่ 4.23 การทอของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยสารทอ Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผนัง ตามมาตรฐาน UL94-VTM	210
ตารางที่ 4.24 สีของผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบ Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผนัง	219
ตารางที่ 4.25 ความหนาของผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบ Exolit AP423 ร่วมกับ เคราติน สูตรที่มีสารช่วยผนัง	221
ตารางที่ 4.26 การทอของผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบ Exolit AP423 ร่วมกับ เคราติน สูตรที่มีสารช่วยผนัง ตามมาตรฐาน UL94-VTM.....	233

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเคราติน.....	5
รูปที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเคราติน	6
รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของเส้นผมมนุษย์.....	7
รูปที่ 2.4 พันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างแอลฟาเคราติน.....	8
รูปที่ 2.5 ปฏิกริยาการทำลายพันธะไฮโดรเจนในแอลฟาเคราติน	8
รูปที่ 2.6 ปฏิกริยาการทำลายพันธะไดซัลไฟด์ในแอลฟาเคราติน.....	9
รูปที่ 2.7 แสดงปฏิกริยารีดิวซ์พันธะไดซัลไฟด์ของ 2-เมอร์แคปโทเอทานอล.....	10
รูปที่ 2.8 การสลายตัวทางความร้อนของเมลานิน	13
รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส	13
รูปที่ 2.10 การสลายตัวของฝ้าย	15
รูปที่ 2.11 ชั้นที่ 1 ของปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต	15
รูปที่ 2.12 ชั้นที่ 2 ของปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต	15
รูปที่ 2.13 กระบวนการขึ้นรูปเส้นใยแบบปั่นหลอม	16
รูปที่ 2.14 การขาดของสายโซ่ของพอลิเอสเทอร์	17
รูปที่ 2.15 สามเหลี่ยมไฟ.....	19
รูปที่ 2.16 องค์ประกอบที่ทำให้เกิดการเผาไหม้.....	20
รูปที่ 2.17 วงจรการเผาไหม้ของวัสดุ	20
รูปที่ 2.18 โครงสร้างทางเคมีของ APP I.....	24
รูปที่ 2.19 โครงสร้างทางเคมีของ APP II.....	25
รูปที่ 2.20 การสกัดองค์ประกอบของเส้นผม.....	28
รูปที่ 2.21 เส้นผมที่ผ่านการสกัดโปรตีนด้วย 2-เมอร์แคปโทเอทานอล	28
รูปที่ 2.22 ปริมาณโปรตีนที่ได้จากการสกัดด้วยวิธี Shindai และวิธีดั้งเดิม	30

รูปที่ 2.23	ภาพ SEM ของฟิล์มเคราตินที่เตรียมด้วยวิธี TCA coating.....	32
รูปที่ 2.24	อนุภาคเคราตินระดับนาโนด้วยเทคนิค TEM และลักษณะรอยแตกบนผิวของฟิล์ม เคราตินที่เตรียมด้วยวิธี keratin clear coating ด้วยเทคนิค SEM	33
รูปที่ 2.25	ภาพ SEM ของไฮโดรเจลเคราตินที่กำลังขยายต่างกัน.....	33
รูปที่ 2.26	ภาพ SEM ของฟิล์มผสมที่เตรียมได้.....	34
รูปที่ 2.27	การเตรียมฟิล์มแผ่นเส้นเคราติน	34
รูปที่ 2.28	ลักษณะของฟองน้ำไฮโดรเจลเคราตินที่กำลังขยายต่างกัน	35
รูปที่ 2.29	เปรียบเทียบ TGA เทอร์โมแกรมของผ้าขนสัตว์ที่ไม่ได้ตกแต่งห่วงไฟ และผ้าขนสัตว์ ที่ตกแต่งห่วงไฟด้วย K_2TiF_6 ต่อกรดไดคาร์บอกซิลิกในอัตราส่วน 1:1	36
รูปที่ 2.30	เปรียบเทียบ DTG เทอร์โมแกรมของผ้าขนสัตว์ที่ไม่ได้ตกแต่งห่วงไฟ และผ้าขนสัตว์ ที่ตกแต่งห่วงไฟด้วย K_2TiF_6 ต่อกรดไดคาร์บอกซิลิกในอัตราส่วน 1:1	36
รูปที่ 2.31	TGA เทอร์โมแกรมของขยะเคราติน.....	37
รูปที่ 2.32	การปลดปล่อยน้ำและแก๊สแอมโมเนียขณะสลายตัวของเส้นผม	37
รูปที่ 2.33	การปลดปล่อยสารอนินทรีย์ที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบขณะสลายตัวของเส้นผม	38
รูปที่ 2.34	การสังเคราะห์ PEPBP.....	40
รูปที่ 2.35	ค่า LOI ของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย MDPA และ HFPO	42
รูปที่ 2.36	สัณฐานวิทยาของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟหลังการทดสอบ LOI	43
รูปที่ 3.1	แผนภาพแสดงขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย	50
รูปที่ 3.2	เครื่องตัดกระดาษที่นำมาใช้ตัดเส้นผม	51
รูปที่ 3.3	เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์.....	55
รูปที่ 3.4	การประกอบแผ่นกระจกในอุปกรณ์ขึ้นรูปเจล	59
รูปที่ 3.5	การประกอบเครื่องแยกน้ำหนักโมเลกุลโปรตีนด้วยไฟฟ้า.....	59
รูปที่ 3.6	เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี	60
รูปที่ 3.7	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โหมดวิเคราะห์ EDS.....	61

รูปที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง	62
รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	62
รูปที่ 3.10 เครื่อง Laser Particle Size Distribution Analyzer	63
รูปที่ 3.11 เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลซิส	64
รูปที่ 3.12 เครื่อง Brookfield Viscometer.....	70
รูปที่ 3.13 เครื่องวัดสีรุ่น Macbeth Color-Eye 7000.....	72
รูปที่ 3.14 เครื่อง Horizontal Vertical Flame Chamber.....	73
รูปที่ 3.15 เครื่องทดสอบหาค่า Limiting oxygen indexer.....	74
รูปที่ 3.16 เครื่อง Universal tensile testing machine LLOYD.....	75
รูปที่ 3.17 เครื่องวัดสภาพแข็งตึงดัดโค้งของผ้า.....	76
รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย Shindai ที่ภาวะต่าง ๆ	78
รูปที่ 4.2 FT-IR สเปกตรัมของเส้นผมที่ผ่านการกำจัดไขมัน และสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัด ภายใต้ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	80
รูปที่ 4.3 ภาพ OM ของเส้นผมมนุษย์ที่กำลังขยาย 20 เท่า	81
รูปที่ 4.4 ภาพ SEM ของเส้นผมก่อนการสกัดเคราติน	82
รูปที่ 4.5 ภาพ SEM ของเส้นผมหลังการสกัดเคราตินด้วย Shindai ที่ภาวะต่าง ๆ.....	83
รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินที่ได้จากการสกัดด้วยตัวทำละลายที่ ประกอบด้วยสารรีดิวซ์ที่แตกต่างกัน ที่ภาวะต่าง ๆ	86
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบปริมาณโปรตีนในสารสกัดหยาบเคราตินที่ได้จากการสกัดด้วยตัวทำละลาย ที่ประกอบด้วยสารรีดิวซ์ที่แตกต่างกัน ที่ภาวะต่าง ๆ.....	88
รูปที่ 4.8 การแยกน้ำหนักรีดิวซ์โปรตีนของสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดโดยไม่มีสารรีดิวซ์.....	91
รูปที่ 4.9 การแยกน้ำหนักรีดิวซ์โปรตีนของสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย Shindai.....	92
รูปที่ 4.10 การแยกน้ำหนักรีดิวซ์โปรตีนของสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วยไทโธไกลโคลิก แอสิด ที่มีค่า pH 2 (TA2)	93

รูปที่ 4.11 การแยกน้ำหนักรวมของสารสกัดหยาบเคราะห์ที่สกัดด้วยไทโอไกลโคลิก แอซิด ที่มีค่า pH 8.5 (TA8.5).....	94
รูปที่ 4.12 การแยกน้ำหนักรวมของสารสกัดหยาบเคราะห์ที่สกัดด้วย 1,2-อีเทนไดโทอล (EDT).....	95
รูปที่ 4.13 FT-IR สเปกตรัมของเคราะห์ทางการค้า และสารสกัดหยาบเคราะห์ที่สกัดด้วยสารรีดิวิซ์ต่างกัน ภายใต้ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	97
รูปที่ 4.14 องค์ประกอบธาตุของเคราะห์ทางการค้า	99
รูปที่ 4.15 องค์ประกอบธาตุของสารสกัดหยาบเคราะห์ที่สกัดโดยไม่มีสารรีดิวิซ์ 84 ชั่วโมง.....	99
รูปที่ 4.16 องค์ประกอบธาตุของสารสกัดหยาบเคราะห์ที่สกัดด้วย Shindai 48 ชั่วโมง.....	100
รูปที่ 4.17 องค์ประกอบธาตุของสารสกัดหยาบเคราะห์ที่สกัดด้วย TA2, 24 ชั่วโมง	100
รูปที่ 4.18 องค์ประกอบธาตุของสารสกัดหยาบเคราะห์ที่สกัดด้วย TA8.5, 84 ชั่วโมง.....	100
รูปที่ 4.19 องค์ประกอบธาตุของสารสกัดหยาบเคราะห์ที่สกัดด้วย EDT 4 ชั่วโมง.....	100
รูปที่ 4.20 ภาพ SEM ของเส้นผมก่อนและหลังสกัดเคราะห์ และเส้นผมหลังสกัดเคราะห์โดยไม่มีสารรีดิวิซ์ (UT) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	102
รูปที่ 4.21 ภาพ SEM ของเส้นผมก่อนและหลังสกัดเคราะห์ และเส้นผมหลังสกัดเคราะห์ด้วย Shindai ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส.....	103
รูปที่ 4.22 ภาพ SEM ของเส้นผมก่อนและหลังสกัดเคราะห์ด้วย TA2.....	104
รูปที่ 4.23 ภาพ SEM ของเส้นผมก่อนและหลังสกัดเคราะห์ด้วย TA8.5.....	105
รูปที่ 4.24 ภาพ SEM ของเส้นผมก่อนและหลังสกัดเคราะห์ด้วย EDT.....	106
รูปที่ 4.25 กลไกการสลายตัวทางความร้อนของเคราะห์	107
รูปที่ 4.26 TGA เทอร์โมแกรมภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนของเคราะห์ทางการค้าและสารสกัดหยาบเคราะห์ที่สกัดด้วยสารรีดิวิซ์ต่างกัน.....	109
รูปที่ 4.27 DTG เทอร์โมแกรมภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนของเคราะห์ทางการค้าและสารสกัดหยาบเคราะห์ที่สกัดด้วยสารรีดิวิซ์ต่างกัน.....	109
รูปที่ 4.28 การกระจายขนาดอนุภาคของเคราะห์ทางการค้า	111
รูปที่ 4.29 การกระจายขนาดอนุภาคของสารสกัดหยาบเคราะห์ที่สกัดด้วย Shindai.....	111

รูปที่ 4.30 การกระจายขนาดอนุภาคของสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย EDT.....	111
รูปที่ 4.31 ภาพถ่ายของเคราตินทางการค้า และสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วยสารรีดิวซ์ ต่างกัน.....	113
รูปที่ 4.32 ภาพ SEM ของเคราตินทางการค้า และสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วยสารรีดิวซ์ ต่างกัน ที่ภาวะต่าง ๆ	115
รูปที่ 4.33 สีของสารเคลือบเคราตินที่มีปริมาณเคราตินต่างกัน	117
รูปที่ 4.34 สีของสารเคลือบ AP422 : เคราติน	117
รูปที่ 4.35 สีของสารเคลือบ AP423 : เคราติน	118
รูปที่ 4.36 FT-IR สเปกตรัมของ Exolit AP422 และ Exolit AP423	120
รูปที่ 4.37 กลไกการสลายตัวทางความร้อนของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต	121
รูปที่ 4.38 TGA เทอร์โมแกรมภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตที่มี ขนาดอนุภาคต่างกัน.....	122
รูปที่ 4.39 DTG เทอร์โมแกรมภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตที่มี ขนาดอนุภาคต่างกัน.....	123
รูปที่ 4.40 สีของสารเคลือบเคราตินสูตรที่ไม่มีสารช่วยผนึก.....	128
รูปที่ 4.41 สีของสารเคลือบเคราตินสูตรที่มีสารช่วยผนึก.....	128
รูปที่ 4.42 สีของสารเคลือบเคราตินร่วมกับ Exolit AP423 สูตรที่ไม่มีสารช่วยผนึก	129
รูปที่ 4.43 สีของสารเคลือบเคราตินร่วมกับ Exolit AP423 สูตรที่มีสารช่วยผนึก	129
รูปที่ 4.44 ภาพถ่ายของสารเคลือบเคราติน สูตรที่ไม่มีสารช่วยผนึก เมื่อทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง. 132	
รูปที่ 4.45 ภาพถ่ายของสารเคลือบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผนึก เมื่อทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง	133
รูปที่ 4. 46 ภาพถ่ายของสารเคลือบ Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน สูตรที่ไม่มีสารช่วยผนึก เมื่อ ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง	134
รูปที่ 4.47 ภาพถ่ายของสารเคลือบ Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผนึก เมื่อทิ้ง ไว้ที่อุณหภูมิห้อง.....	135
รูปที่ 4.48 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบควบคุม.....	142

รูปที่ 4.49 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 สูตรที่ไม่มีสารช่วยผนิก.....	143
รูปที่ 4.50 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า สูตรที่ไม่มีสารช่วยผนิก	144
รูปที่ 4.51 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่ไม่มีสารช่วยผนิก	144
รูปที่ 4.52 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยเคราตินทางการค้า สูตรที่ไม่มีสารช่วยผนิก....	145
รูปที่ 4.53 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่ไม่มีสารช่วยผนิก	145
รูปที่ 4.54 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 สูตรที่มีสารช่วยผนิก.....	146
รูปที่ 4.55 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยผนิก	147
รูปที่ 4.56 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผนิก	147
รูปที่ 4.57 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยเคราตินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยผนิก.....	148
รูปที่ 4.58 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผนิก..	148
รูปที่ 4.59 FT-IR สเปกตรัมของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบควบคุม.....	151
รูปที่ 4.60 FT-IR สเปกตรัมของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ที่ความเข้มข้นต่างกัน สูตรที่ไม่มีสารช่วยผนิก	152
รูปที่ 4.61 FT-IR สเปกตรัมของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ที่ความเข้มข้นต่างกัน สูตรที่มีสารช่วยผนิก	153
รูปที่ 4.62 FT-IR สเปกตรัมของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยเคราตินทางการค้า ที่ความเข้มข้นต่างกัน สูตรที่ไม่มีสารช่วยผนิก	154
รูปที่ 4.63 FT-IR สเปกตรัมของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยเคราตินทางการค้า ที่ความเข้มข้นต่างกัน สูตรที่มีสารช่วยผนิก	155
รูปที่ 4.64 FT-IR สเปกตรัมของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราติน ที่ความเข้มข้นต่างกัน สูตรที่ไม่มีสารช่วยผนิก	156

รูปที่ 4.65 FT-IR สเปกตรัมของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราติน ที่ความเข้มข้นต่างกัน ที่มีสารช่วยผนึก.....	157
รูปที่ 4.66 FT-IR สเปกตรัมของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า (KC) สูตรต่าง ๆ สูตรที่ไม่มีสารช่วยผนึก.....	158
รูปที่ 4.67 FT-IR สเปกตรัมของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า สูตรต่าง ๆ สูตรที่มีสารช่วยผนึก	159
รูปที่ 4.68 FT-IR สเปกตรัมของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราติน สูตรต่าง ๆ ที่ไม่มีสารช่วยผนึก	160
รูปที่ 4.69 FT-IR สเปกตรัมของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราติน สูตรต่าง ๆ ที่มีสารช่วยผนึก	161
รูปที่ 4.70 TGA เทอร์โมแกรมภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วย Exolit AP423 สูตรที่มีสารช่วยผนึก.....	164
รูปที่ 4.71 DTG เทอร์โมแกรมภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วย Exolit AP423 สูตรที่มีสารช่วยผนึก.....	164
รูปที่ 4.72 TGA เทอร์โมแกรมภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วยเคราตินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยผนึก.....	165
รูปที่ 4.73 DTG เทอร์โมแกรมภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วยเคราตินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยผนึก.....	165
รูปที่ 4.74 TGA เทอร์โมแกรมภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วยสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผนึก.....	166
รูปที่ 4.75 DTG เทอร์โมแกรมภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วยสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผนึก.....	166
รูปที่ 4.76 TGA เทอร์โมแกรมภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยผนึก	167
รูปที่ 4.77 DTG เทอร์โมแกรมภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยผนึก	167

รูปที่ 4.78 TGA เทอร์โมแกรมภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราดิน สูตรที่มีสารช่วยฉนิก	168
รูปที่ 4.79 DTG เทอร์โมแกรมภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราดิน สูตรที่มีสารช่วยฉนิก	168
รูปที่ 4.80 ภาพถ่ายของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบควบคุม.....	175
รูปที่ 4.81 ภาพถ่ายของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ที่ความเข้มข้นต่างๆ สูตรที่ไม่มีสารช่วยฉนิก	175
รูปที่ 4.82 ภาพถ่ายของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราดินทางการค้า สูตรที่ไม่มีสารช่วยฉนิก	176
รูปที่ 4.83 ภาพถ่ายของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราดิน สูตรที่ไม่มีสารช่วยฉนิก	176
รูปที่ 4.84 ภาพถ่ายของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วยเคราดินทางการค้าที่ความเข้มข้นต่างๆ สูตรที่ไม่มีสารช่วยฉนิก	177
รูปที่ 4.85 ภาพถ่ายของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราดินที่ความเข้มข้นต่างๆ สูตรที่ไม่มีสารช่วยฉนิก	177
รูปที่ 4.86 ภาพถ่ายของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ที่ความเข้มข้นต่างๆ สูตรที่มีสารช่วยฉนิก	178
รูปที่ 4.87 ภาพถ่ายของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราดินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยฉนิก	178
รูปที่ 4.88 ภาพถ่ายของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราดิน สูตรที่มีสารช่วยฉนิก	179
รูปที่ 4.89 ภาพถ่ายของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วยเคราดินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยฉนิก	179
รูปที่ 4.90 ภาพถ่ายของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราดิน สูตรที่มีสารช่วยฉนิก.....	180
รูปที่ 4.91 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบควบคุม	182

รูปที่ 4.92 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 สูตรที่ไม่มีสารช่วยฉนิก.....	183
รูปที่ 4.93 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า สูตรที่ไม่มีสารช่วยฉนิก.....	184
รูปที่ 4.94 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ผ่านการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่ไม่มีสารช่วยฉนิก.....	184
รูปที่ 4.95 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วยเคราตินทางการค้า สูตรที่ไม่มีสารช่วยฉนิก.....	185
รูปที่ 4.96 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ผ่านการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่ไม่มีสารช่วยฉนิก.....	185
รูปที่ 4.97 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 สูตรที่มีสารช่วยฉนิก.....	186
รูปที่ 4.98 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยฉนิก.....	187
รูปที่ 4.99 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ผ่านการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยฉนิก.....	187
รูปที่ 4.100 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วยเคราตินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยฉนิก.....	188
รูปที่ 4.101 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ผ่านการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยฉนิก.....	188
รูปที่ 4.102 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบควบคุม.....	197
รูปที่ 4.103 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 สูตรที่มีสารช่วยฉนิก.....	198
รูปที่ 4.104 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยฉนิก.....	199
รูปที่ 4.105 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยฉนิก.....	199

รูปที่ 4.106 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยเคราตินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยฉนิก.....	200
รูปที่ 4.107 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยฉนิก	200
รูปที่ 4.108 FT-IR สเปกตรัมของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ที่ความเข้มข้นต่างกัน สูตรที่มีสารช่วยฉนิก	203
รูปที่ 4.109 FT-IR สเปกตรัมของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยเคราตินทางการค้าที่ความเข้มข้นต่างกัน สูตรที่มีสารช่วยฉนิก	204
รูปที่ 4.110 FT-IR สเปกตรัมของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราตินที่ความเข้มข้นต่างกัน สูตรที่มีสารช่วยฉนิก	205
รูปที่ 4.111 FT-IR สเปกตรัมของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า สูตรต่าง ๆ สูตรที่มีสารช่วยฉนิก.....	206
รูปที่ 4.112 FT-IR สเปกตรัมของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราตินทาง สูตรต่าง ๆ สูตรที่มีสารช่วยฉนิก.....	207
รูปที่ 4.113 ภาพถ่ายของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้	212
รูปที่ 4.114 ภาพถ่ายของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 สูตรที่มีสารช่วยฉนิก	212
รูปที่ 4.115 ภาพถ่ายของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยฉนิก	213
รูปที่ 4.116 ภาพถ่ายของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยฉนิก	213
รูปที่ 4.117 ภาพถ่ายของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วยเคราตินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยฉนิก	214
รูปที่ 4.118 ภาพถ่ายของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยฉนิก	214
รูปที่ 4.119 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 สูตรที่มีสารช่วยฉนิก	215

รูปที่ 4.120 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยผนิก.....	216
รูปที่ 4.121 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผนิก.....	216
รูปที่ 4.122 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วยเคราตินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยผนิก	217
รูปที่ 4.123 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผนิก	217
รูปที่ 4.124 ภาพ SEM ของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบควบคุม.....	222
รูปที่ 4.125 ภาพ SEM ของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 สูตรที่มีสารช่วยผนิก	223
รูปที่ 4.126 ภาพ SEM ของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยผนิก	223
รูปที่ 4.127 ภาพ SEM ของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผนิก	224
รูปที่ 4.128 ภาพ SEM ของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยเคราตินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยผนิก	224
รูปที่ 4.129 ภาพ SEM ของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผนิก.....	225
รูปที่ 4.130 FT-IR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ที่ความเข้มข้นต่างกัน สูตรที่มีสารช่วยผนิก.....	227
รูปที่ 4.131 FT-IR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยเคราตินทางการค้า ที่ความเข้มข้นต่างกัน สูตรที่มีสารช่วยผนิก	228
รูปที่ 4.132 FT-IR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราติน ที่ความเข้มข้นต่างกัน สูตรที่มีสารช่วยผนิก	229
รูปที่ 4.133 FT-IR สเปกตรัมของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า ที่ความเข้มข้นต่างกัน สูตรที่มีสารช่วยผนิก	230

รูปที่ 4.134 FT-IR สเปกตรัมของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราดินทาง ที่ความเข้มข้นต่างกัน สูตรที่มีสารช่วยผนึก	231
รูปที่ 4.135 ภาพถ่ายของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบควบคุม...	235
รูปที่ 4.136 ภาพถ่ายของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 สูตรที่มีสารช่วยผนึก.....	235
รูปที่ 4.137 ภาพถ่ายของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราดินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยผนึก	236
รูปที่ 4.138 ภาพถ่ายของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราดิน สูตรที่มีสารช่วยผนึก.....	236
รูปที่ 4.139 ภาพถ่ายของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วยเคราดินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยผนึก.....	237
รูปที่ 4.140 ภาพถ่ายของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราดิน สูตรที่มีสารช่วยผนึก	237
รูปที่ 4.141 ภาพ SEM ของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบควบคุม	238
รูปที่ 4.142 ภาพ SEM ของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 สูตรที่มีสารช่วยผนึก	239
รูปที่ 4.143 ภาพ SEM ของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราดินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยผนึก	240
รูปที่ 4.144 ภาพ SEM ของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราดิน สูตรที่มีสารช่วยผนึก	240
รูปที่ 4.145 ภาพ SEM ของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วยเคราดินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยผนึก	241
รูปที่ 4.146 ภาพ SEM ของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราดิน สูตรที่มีสารช่วยผนึก	241

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

อัคคีภัยเป็นสาธารณภัยที่ก่อให้เกิดความสูญเสียต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนเป็นจำนวนมาก จากรายงานสถิติสถานการณ์อัคคีภัยของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2557 พบว่า มีอัคคีภัยเกิดขึ้นจำนวน 771 ครั้ง ทำให้มีผู้เสียชีวิต 26 คน และมีผู้บาดเจ็บ 74 คน คิดเป็นมูลค่าความเสียหายประมาณ 336 ล้านบาท [1] สาเหตุสำคัญประการหนึ่งของการลุกลามไฟอย่างรวดเร็วจนไม่สามารถควบคุมการเกิดอัคคีภัยได้ เนื่องจากมีการใช้วัสดุที่เป็นแหล่งเชื้อเพลิงเป็นจำนวนมากในแหล่งที่อยู่อาศัย เช่น เสื้อผ้า เครื่องนุ่งห่ม ผ้าม่าน ผ้าปูเตียง พรมบุพื้น และเฟอร์นิเจอร์ที่ตกแต่งด้วยวัสดุสิ่งทอต่างๆ ในประเทศไทยมีการใช้ผ้าฝ้าย ผ้าพอลิเอสเตอร์ และผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ อย่างแพร่หลาย เช่น เสื้อผ้า วัสดุตกแต่งที่อยู่อาศัย และสิ่งทอเทคนิค แต่การใช้ผลิตภัณฑ์จากผ้าฝ้าย ผ้าพอลิเอสเตอร์ และผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ นั้นอาจไม่ปลอดภัยจากอัคคีภัย เนื่องจากวัสดุเหล่านี้สามารถเป็นแหล่งเชื้อเพลิงได้อย่างดีในขณะเกิดอัคคีภัยได้ โดยผ้าฝ้ายจะเกิดการเผาไหม้ได้ง่าย ในขณะที่ผ้าพอลิเอสเตอร์เมื่อเผาไหม้สามารถหลอมหยดได้ ทำให้เกิดอันตรายต่อผู้สวมใส่ และความร้อนจากวัสดุที่หลอมหยดยังสามารถทำให้เกิดการลามไฟไปยังพื้นที่ข้างเคียงได้ ดังนั้นการตกแต่งห้องไฟผ้าฝ้าย ผ้าพอลิเอสเตอร์ และผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ จึงมีความสำคัญมาก เพื่อให้ผู้ใช้งานปลอดภัยจากอัคคีภัยได้

การตกแต่งเพื่อเพิ่มสมบัติทนไฟของผ้าด้วยสารทนไฟเป็นวิธีที่ง่ายและประหยัดที่สุด อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันการนำเข้าสารทนไฟจากต่างประเทศนั้นมีความยุ่งยาก เนื่องจากสารทนไฟส่วนมากมีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นของวัตถุระเบิดได้ จึงต้องมีการควบคุมการนำเข้าสารทนไฟดังกล่าวส่งผลให้ให้สารทนไฟมีราคาแพง จึงมีความสนใจที่จะหาสารทนไฟที่หาได้ง่าย ราคาถูก ไม่เป็นพิษ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมาตกแต่งห้องไฟร่วมกับการใช้สารทนไฟที่นำเข้าจากต่างประเทศ เพื่อช่วยลดต้นทุนในการตกแต่งสำเร็จ โดยการนำวัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติมาปรับปรุงและพัฒนาเป็นสารทนไฟสำหรับสิ่งทอ

เส้นใยขนสัตว์เป็นเส้นใยโปรตีนที่ติดไฟยากเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยชนิดอื่น เช่น ฝ้าย หรือพอลิเอสเตอร์ เนื่องจากเส้นใยขนสัตว์มีองค์ประกอบหลักคือเคราติน ซึ่งประกอบด้วยธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ ดังนั้นเมื่อมีการสลายตัวทางความร้อนจะสามารถปล่อยแก๊สแอมโมเนียและซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งเป็นแก๊สติดไฟยากออกมา โดยแก๊สเหล่านี้จะเจือจางแก๊ส

ติดไฟง่ายที่เกิดจากการเผาไหม้ในระบบ เส้นใยขนสัตว์จึงมีการติดไฟลดลง [2, 3] ดังนั้นการนำ
 เคราตินเพื่อใช้เป็นสารหน่วงไฟ สำหรับวัสดุสิ่งทอจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง

ปัจจุบันประชากรโลกมีจำนวนประมาณ 7.4 พันล้านคน โดยประชากรในประเทศไทยมี
 จำนวนประมาณ 68 ล้านคน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดเวลา [4] จึงทำให้มีเส้นผมมนุษย์จำนวนมาก
 ถูกตัดทุกวัน และมีปริมาณเส้นผมมนุษย์ที่เหลือทิ้งเป็นขยะเส้นผมมนุษย์จากร้านตัดผมเป็นจำนวน
 มาก โดยขยะเส้นผมมนุษย์เหล่านี้จะถูกขจัดด้วยการฝังกลบหรือถูกทิ้งตามแหล่งต่างๆโดยไร้ประโยชน์
 เนื่องจากเส้นผมมนุษย์มีองค์ประกอบหลักคือ เคราติน เช่นเดียวกับขนสัตว์ ที่มีการเชื่อมขวางด้วย
 พันธะไดซัลไฟด์ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรงเป็นจำนวนมาก ทำให้ขยะเส้นผมมนุษย์ถูกขจัดได้ยากและ
 สามารถนำไปสู่ปัญหามลพิษทางสิ่งแวดล้อมได้ ดังนั้นการนำเคราตินที่สกัดจากเส้นผมมนุษย์มาใช้เป็น
 สารหน่วงไฟสำหรับวัสดุสิ่งทอแทนการใช้สารหน่วงไฟที่นำเข้าจากต่างประเทศจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจ
 เป็นอย่างยิ่ง

งานวิจัยนี้จึงการนำเส้นผมมนุษย์ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้มาสกัดเคราตินด้วยสารรีดิวซ์แตกต่างกัน
 โดยศึกษาผลของสารรีดิวซ์และภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเคราตินจากเส้นผมมนุษย์ หาน้ำหนัก
 โมเลกุลของเคราตินที่สกัดได้ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟรีซิส และหาปริมาณของเคราตินที่สกัดได้ด้วยวิธี
 แบริดฟอร์ดและวิธีการหาน้ำหนักแห้ง จากนั้นนำเคราตินที่สกัดได้มาตกแต่งหน่วงไฟโดยวิธีการ
 เคลือบแบบปาดอย่างผ่านสกรีนบนผ้าทอต่างชนิด ได้แก่ ผ้าฝ้าย ผ้าพอลิเอสเตอร์ และผ้าฝ้ายผสม
 พอลิเอสเตอร์ จากนั้นศึกษาผลของปริมาณเคราตินร่วมกับแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตต่อสมบัติหน่วง
 ไฟ สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพของผ้าทอที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วยเคราติน
 จากเส้นผมมนุษย์ เปรียบเทียบกับการตกแต่งหน่วงไฟโดยใช้เคราตินทางการค้าร่วมกับแอมโมเนียม
 พอลิฟอสเฟตทางการค้า

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาผลของชนิดของสารรีดิวซ์และภาวะที่เหมาะสมต่อปริมาณ และคุณภาพของสารสกัด
 หยาบเคราตินที่สกัดได้จากเส้นผมมนุษย์โดยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย เปรียบเทียบกับ
 เคราตินจากเส้นผมมนุษย์ทางการค้า
2. ศึกษาผลของปริมาณและการเสริมกันของเคราตินและแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตต่อสมบัติ
 หน่วงไฟ และสมบัติทางความร้อนของผ้าทอที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วยเคราตินที่สกัดได้ร่วมกับ
 แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตทางการค้า เปรียบเทียบกับการตกแต่งหน่วงไฟโดยใช้เคราตินทาง
 การค้าร่วมกับแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตทางการค้า

3. วิเคราะห์ลักษณะสัมมนาวิทยา สมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพของผ้าทอที่ตกแต่ง
ห่วงไฟด้วยเคราตินร่วมกับแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตทางการค้า เปรียบเทียบกับการ
ตกแต่งห่วงไฟโดยใช้เคราตินทางการค้าร่วมกับแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตทางการค้า

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การสกัดสารสกัดหยาบเคราตินจากเส้นผมมนุษย์ด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยใช้สาร
รีดิทซ์และภาวะที่แตกต่างกัน แล้วนำสารสกัดหยาบเคราตินที่ได้มากตกแต่งห่วงไฟร่วมกับ
แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตทางการค้าด้วยวิธีการเคลือบแบบปาดอย่างผ่านสกรีนลงบนผ้าทอ 3 ชนิด
คือ ผ้าฝ้าย ผ้าพอลิเอสเตอร์ และผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ โดยศึกษาประสิทธิภาพการห่วงไฟ
สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพ เปรียบเทียบกับการตกแต่งห่วงไฟโดยใช้
เคราตินทางการค้าร่วมกับแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตทางการค้า

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเคราตินจากเส้นผมมนุษย์เหลือทิ้งและได้ผ้าทอห่วงไฟที่
ตกแต่งด้วยสารห่วงไฟเคราตินที่สกัดจากเส้นผมมนุษย์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เคราติน (keratin)

เคราตินเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติในกลุ่มโปรตีนที่มีโครงสร้างแบบเส้นใย ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเส้นผม ขน เล็บ เขา กีบเท้า และผิวหนังชั้นนอกของสัตว์มีกระดูกสันหลัง โดยในปัจจุบันได้มีการนำเคราตินมาประยุกต์ใช้งานในด้านวัสดุชีวภาพ เช่น ด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ (tissue engineering) ด้านการนำส่งยา (drug permeation) และด้านการรักษาแผล (wound healing) เนื่องจากความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) การย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradability) ความคงทนเชิงกล (mechanical durability) และการมีเพียงพอในการนำไปใช้งาน (availability) [5] นอกจากนี้ยังมีการนำเคราตินมาใช้ในการผลิตฟิล์มผสมร่วมกับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ เช่น พอลิเอทิลีนออกไซด์ (PEO) พอลิเอไมด์ (PA) เป็นต้น

2.1.1 ชนิดของเคราติน

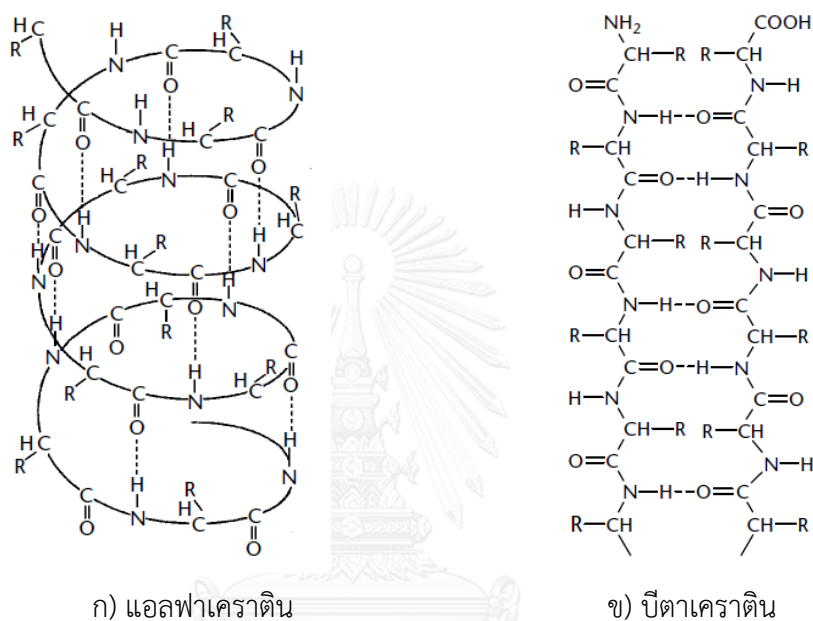
เคราตินสามารถจำแนกได้เป็น 3 กลุ่มตามการจัดเรียงตัวของโครงสร้างโมเลกุล คือ แอลฟาเคราติน (α -keratin), บีตาเคราติน (β -keratin) และแกมมาเคราติน (γ -keratin) [5-10]

1. แอลฟาเคราติน มีโครงสร้างขดเป็นเกลียวเหมือนสปริง (alpha helix) โดยลักษณะการขดเป็นเกลียวนี้จะเสถียรด้วยพันธะไฮโดรเจนภายในสายโซ่โมเลกุล (interchain hydrogen bond) แอลฟาเคราติน มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 40-60 kDa พบในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม เช่น เส้นผมมนุษย์ ขนแกะ เขาสัตว์ เป็นต้น เกลียวแอลฟาที่เสถียรจะอยู่ในรูปเกลียวเวียนขวา (right-handed helix) โดยมีพันธะไฮโดรเจนเกิดขึ้นภายในสายโซ่โปรตีนระหว่างหมู่ C=O ของกรดอะมิโนหน่วย n กับหมู่ -NH ของกรดอะมิโนหน่วย n+4 และมีหมู่ -R (side chain) ชี้ออกนอกเกลียวแอลฟา การหมุนครบ 1 รอบจะประกอบด้วยกรดอะมิโน 3.6 หน่วย

2. บีตาเคราติน มีโครงสร้างเป็นแผ่นจิบ (beta sheet) โดยโครงสร้างแบบแผ่นจิบจะสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อแอลฟาเคราตินได้รับความร้อนหรือถูกดึงอย่างแรงจนทำให้โครงสร้างแบบเกลียวยืดออกเป็นแผ่นจิบ เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนภายในสายโซ่โมเลกุลถูกทำลายไป บีตาเคราตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 10-20 kDa พบในสัตว์ปีกและสัตว์เลื้อยคลาน เช่น ขนนก ขนไก่ ผิวหนังของสัตว์เลื้อยคลาน เป็นต้น โครงสร้างแบบแผ่นจิบเกิดจากสายโซ่โปรตีนต่างสายขนานกัน เกิดการยึดกัน

ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ $C=O$ กับหมู่ $-NH$ เรียงขนานกันไปแบบซิกแซกเป็นแผ่นจับ และมีหมู่ $-R$ ซ้ำออกด้านบนและด้านล่างของแผ่นจับ

3. แกลมมาเคราติน หรือโปรตีนเมทริกซ์ (matrix protein) มีโครงสร้างเป็นก้อน (globular protein) มีสายเพปไทด์พันกันไปมาหลวมๆ มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 10-25 kDa พบในสัตว์ทุกชนิด ทำหน้าที่ยึดโครงสร้างของแอลฟาเคราตินหรือบีตาเคราตินให้คงรูปอยู่ได้



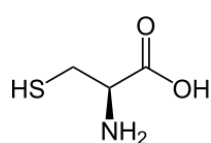
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเคราติน [11]

นอกจากนี้เคราตินยังสามารถจำแนกได้เป็น 2 กลุ่มตามปริมาณซิสทีน (cystine) ซึ่งเป็นการเชื่อมขวางของพันธะไดซัลไฟด์ของโมโนโครงสร้าง คือ เคราตินชนิดแข็ง (hard keratin) เป็นเคราตินที่มีความแข็งแรงมากเนื่องจากมีปริมาณซิสทีนมาก พบในเล็บ เขาสัตว์ กีบเท้าสัตว์ เป็นต้น และเคราตินชนิดอ่อน (soft keratin) เป็นเคราตินที่มีความอ่อนตัว (Flexibility) และยืดหยุ่น (elasticity) พบในผิวหนัง เส้นผม ขนสัตว์ เป็นต้น [9, 12, 13]

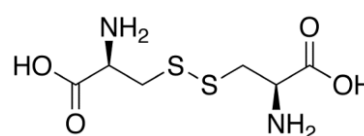
2.1.2 องค์ประกอบทางเคมี

เคราตินเป็นโปรตีนชนิดหนึ่งประกอบด้วยการดอะมิโนซิสเทอีน (cysteine) ในสายโซ่โมเลกุล ซึ่งกรดอะมิโนซิสเทอีนจะประกอบด้วยธาตุ 5 ธาตุ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ ในโครงสร้างโมเลกุล กรดอะมิโนซิสเทอีนเป็นกรดอะมิโนที่มีหมู่ไทออล (thiol group, $-SH$) เป็นหมู่ $-R$ ทำให้หมู่ $-R$ ของกรดอะมิโนมีความเป็นขั้ว (polar) และมีฤทธิ์เป็น

กลาง (neutral) โดยหมู่ไทออลเป็นหมู่ -R ที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากที่สุด สามารถเกิดพันธะไดซัลไฟด์ (disulfide bond) ซึ่งเป็นพันธะโควาเลนต์ที่เกิดจากหมู่ไทออลในกรดอะมิโนซิสเทอีน 2 โมเลกุล โดยกรดอะมิโนซิสเทอีน 2 โมเลกุลที่เกิดการเชื่อมขวางของพันธะไดซัลไฟด์เรียกว่า ซีสทีน (cystine) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 พันธะไดซัลไฟด์ในโครงสร้างโมเลกุลเคราตินจะเกิดขึ้นเมื่อสายโซ่พอลิเปปไทด์ของเคราตินมีการหดหรือพับตัว ทำให้เคราตินมีโครงสร้างที่แข็งแรงมาก มีความคงทนสูง สามารถทนต่อน้ำ กรดอ่อน เบสอ่อน และทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อม [7, 13-15]



a) โครงสร้างทางเคมีของซิสเทอีน [16]



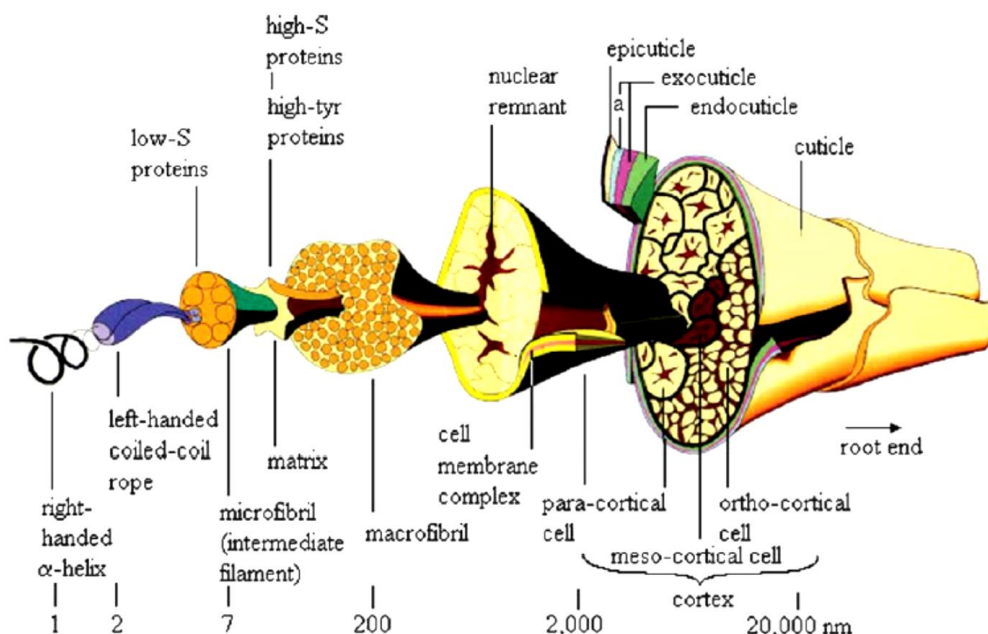
b) โครงสร้างทางเคมีของซิสทีน [17]

รูปที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเคราติน

2.1.3 เคราตินจากเส้นผมมนุษย์

เส้นผมมนุษย์มีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ คือ คาร์บอนประมาณร้อยละ 50 ไฮโดรเจนประมาณร้อยละ 7 ออกซิเจนประมาณร้อยละ 22 ไนโตรเจนประมาณร้อยละ 16 และซัลเฟอร์ประมาณร้อยละ 5 นอกจากนี้เส้นผมประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน คือ คิวทิเคิล (cuticle) และคอร์เท็กซ์ (cortex) โดยคิวทิเคิลประกอบด้วยเซลล์ที่มีรูปร่างเป็นแผ่นเรียกว่า เกล็ดผม มีความหนาประมาณ 1 ไมโครเมตร ทำหน้าที่ปกป้องแกนผมชั้นในจากความชื้นและความร้อนและภาวะต่างๆ ในขณะที่คอร์เท็กซ์หรือแกนผมชั้นใน ประกอบด้วยคอร์ทิคอลเซลล์ (cutical cells) และเซลล์เมมเบรนคอมเพล็กซ์ (cell membrane complex) โดยในคอร์ทิคอลเซลล์จะประกอบด้วยเส้นใยเคราตินรวมกันเป็นจำนวนมาก [15, 18, 19]

เคราตินจากเส้นผมมนุษย์นั้นเป็นเคราตินชนิดที่พบในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ซึ่งประกอบด้วยแอลฟาเคราติน (ประมาณร้อยละ 50-60) และแกมมาเคราติน (ประมาณร้อยละ 20-30) โดยมีแอลฟาเคราติน เป็นองค์ประกอบหลัก โดยจะมี โซ่เพปไทด์ของแอลฟาเคราตินนั้นเป็นเกลียวแบบวนขวา การรวมกันของโซ่เพปไทด์จำนวน 3 ถึง 4 โซ่ จะรวมกันแบบเกลียววนซ้ายเรียกว่า โปรโตไฟบริล (protofibril) โปรโตไฟบริล 11 หน่วย รวมกันเรียกว่า ไมโครไฟบริล (microfibril) ไมโครไฟบริลหลายร้อยหน่วยรวมกันถูกยึดด้วยแกมมาเคราตินเรียกว่า แมโครไฟบริล (macrofibril) แมโครไฟบริลหลายๆหน่วยประกอบขึ้นเป็นเส้นใย เส้นใยหลายๆเส้นใยประกอบขึ้นเป็นเส้นผม [5, 8, 9, 20]



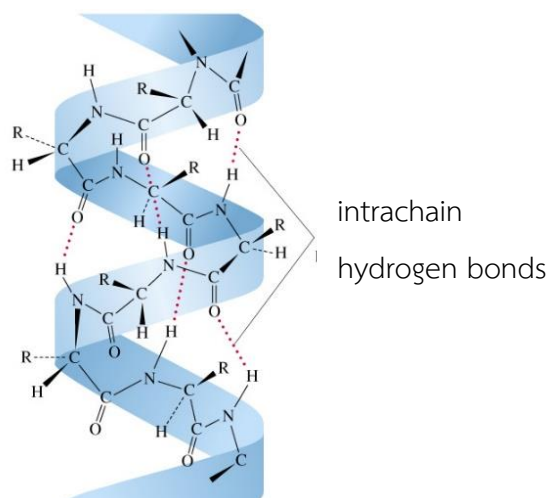
รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของเส้นผมมนุษย์ [18]

2.1.4 การสกัดเคราติน

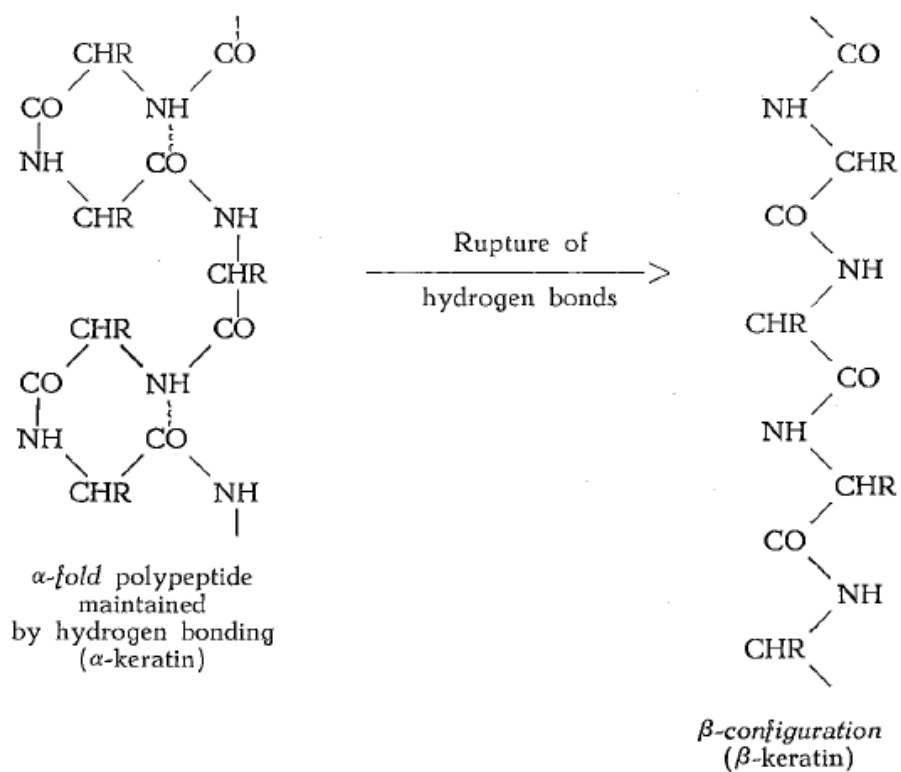
กลไกในการสกัดเคราตินมี 2 กลไก คือ

2.1.4.1 การทำลายพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างเคราติน

พันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างเคราตินทำให้เกลียวแอลฟาของเคราตินเสถียรอยู่ได้ โดยพันธะไฮโดรเจนจะเกิดระหว่างหมู่ C=O และ -NH- ในสายโซ่โพลีเปปไทด์เดียวกัน (intrachain hydrogen bonds) แสดงในรูปที่ 2.4 หรือต่างกันสายโซ่กัน (interchain hydrogen bonds) โดยการทำลายพันธะไฮโดรเจนต้องใช้สารทำลายพันธะไฮโดรเจน (chaotropic agent) ได้แก่ ยูเรีย (urea) ไทโอยูเรีย (thiourea) และกัวนินีนไฮโดรคลอไรด์ (guanidine hydrochloride) ปฏิกริยาการทำลายพันธะไฮโดรเจนในแอลฟาเคราติน แสดงในรูปที่ 2.5 นอกจากนี้พันธะเพปไทด์และพันธะไดซัลไฟด์จะไม่ถูกทำลายหลังการทำลายพันธะไฮโดรเจนแล้ว [21, 22]



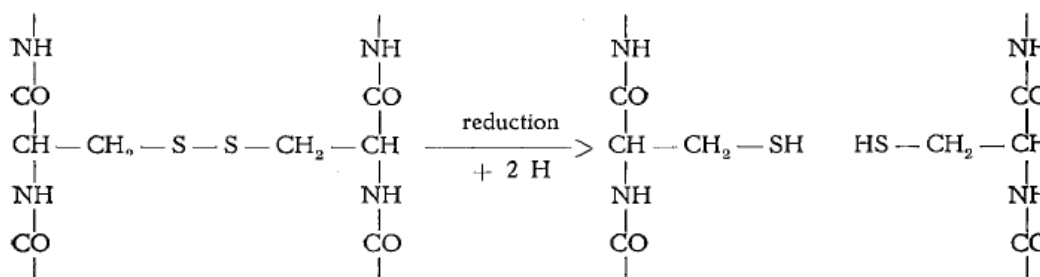
รูปที่ 2.4 พันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างแอลฟาเคราติน [23]



รูปที่ 2.5 ปฏิกริยาการทำลายพันธะไฮโดรเจนในแอลฟาเคราติน [21]

2.1.4.2 การทำลายพันธะไดซัลไฟด์ในโครงสร้างเคราติน

พันธะไดซัลไฟด์ในโครงสร้างเคราตินจะสร้างความแข็งแรงให้กับเคราติน โดยเป็นพันธะโควาเลนต์ที่เกิดจากหมู่ไทออลในกรดอะมิโนซิสเทอีน 2 โมเลกุล โดยกรดอะมิโนซิสเทอีน 2 โมเลกุลที่เกิดการเชื่อมขวางของพันธะไดซัลไฟด์เรียกว่า ซีสทีน การทำลายพันธะไดซัลไฟด์ต้องใช้สารรีดิวซ์ที่มีหมู่ฟังก์ชันไทออลในโมเลกุล ได้แก่ 2-เมอร์แคปโทเอทานอล (2-mercaptoethanol, 2-ME) และไดไธโอเทรียล (dithiothreitol, DTT) [22] โดยจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผันกลับได้ โดยเมื่อแยกสารรีดิวซ์ออกจากเคราติน เคราตินจะสามารถเกิดการเชื่อมขวางของพันธะไดซัลไฟด์อีกครั้ง นอกจากนี้ยังสามารถใช้กรดฟอร์มิก (formic acid) ในการทำลายพันธะไดซัลไฟด์ได้ แต่จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ไม่ผันกลับ ปฏิกิริยาการทำลายพันธะไดซัลไฟด์ในแอลฟาเคราติน แสดงในรูปที่ 2.6 [21, 22]



รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาการทำลายพันธะไดซัลไฟด์ในแอลฟาเคราติน [21]

2.1.5 สารรีดิวซ์ที่ใช้สกัดเคราติน

สารรีดิวซ์ที่ใช้ในการสกัดเคราตินที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นสารรีดิวซ์ที่มีความสามารถในการรีดิวซ์ต่างกัน เนื่องจากมีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน (E^0) ต่างกัน คือ ถ้ามีค่า E^0 เป็นลบมากแสดงว่าเป็นสารรีดิวซ์ที่แรง และมีความสามารถในการรีดิวซ์สูง ทำให้สามารถทำลายพันธะไดซัลไฟด์ในโครงสร้างเคราตินได้ดี [24]

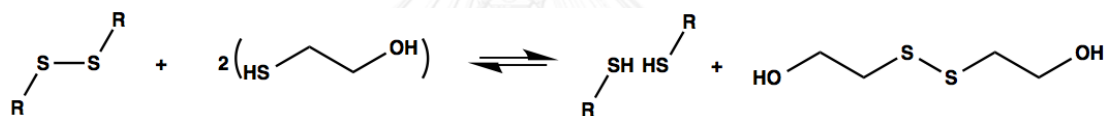
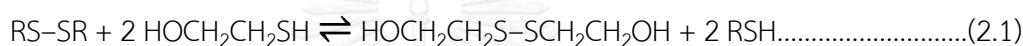
2.1.5.1 2-เมอร์แคปโทเอทานอล (2-Mercaptoethanol, 2-ME)

2-เมอร์แคปโทเอทานอล เป็นสารรีดิวซ์ที่มีหมู่ไทออล (thiol group) และหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ในโครงสร้าง และมีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเป็นลบมากทำให้เป็นสารรีดิวซ์ที่แรง ดังแสดงในตารางที่ 2.1 จึงนิยมใช้ 2-เมอร์แคปโทเอทานอล เป็นสารรีดิวซ์พันธะไดซัลไฟด์ในการสกัดเคราติน ดังสมการเคมีที่ (2.1) และรูปที่ 2.7 [24, 25]

ตารางที่ 2.1 สมบัติของ 2-เมอร์แคปโทเอทานอล [24, 25]

สูตรเคมี	C ₂ H ₆ OS
สูตรโครงสร้าง	HS-CH ₂ -CH ₂ -OH
มวลโมเลกุล	78.13 g·mol ⁻¹
ความหนาแน่น	1.114 g/cm ³
จุดหลอมเหลว	-100 °C
จุดเดือด	157 °C
ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน	-0.207 V

สมการการรีดิวซ์พันธะไดซัลไฟด์ในโครงสร้างโปรตีนของ 2-เมอร์แคปโทเอทานอล

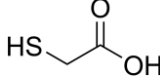


รูปที่ 2.7 แสดงปฏิกิริยารีดิวซ์พันธะไดซัลไฟด์ของ 2-เมอร์แคปโทเอทานอล [25]

2.1.5.2 ไทโอไกลโคลิกแอซิด (Thioglycolic acid)

ไทโอไกลโคลิกแอซิด เป็นสารรีดิวซ์ที่มีหมู่ไทออล (thiol group) และหมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) ในโครงสร้าง และมีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเป็นลบน้อย ดังแสดงในตารางที่ 2.2 เนื่องจากไทโอไกลโคลิกแอซิด เป็นสารรีดิวซ์ที่อ่อนจึงนิยมใช้เป็นสารรีดิวซ์พันธะไดซัลไฟด์ในผลิตภัณฑ์ตัดผม ยืดผม และกำจัดขน เพราะมีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค สมการการรีดิวซ์พันธะไดซัลไฟด์ในโครงสร้างโปรตีนของไทโอไกลโคลิกแอซิด แสดงดังสมการเคมีที่ (2.2) [24, 26]

ตารางที่ 2.2 สมบัติของไทโอไกลโคลิกแอซิด [24, 26]

สูตรเคมี	$C_2H_4O_2S$
สูตรโครงสร้าง	
มวลโมเลกุล	$92.11 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$
ความหนาแน่น	$1.32 \text{ g}/\text{cm}^3$
จุดหลอมเหลว	$-16 \text{ }^\circ\text{C}$
จุดเดือด	$96 \text{ }^\circ\text{C}$
ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน	-0.084 V

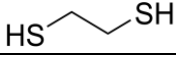
สมการการรีดิวซ์พันธะไดซัลไฟต์ในโครงสร้างโปรตีนของไทโอไกลโคลิกแอซิด



2.1.5.3 1,2-อีเทนไดไทออล (1,2-Ethanedithiol)

1,2-อีเทนไดไทออลเป็นสารรีดิวซ์ที่มีหมู่ไทออล (thiol group) 2 หมู่ และมีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเป็นลบมากทำให้เป็นสารรีดิวซ์ที่แรงมาก ดังแสดงในตารางที่ 2.3 สมการการรีดิวซ์พันธะไดซัลไฟต์ในโครงสร้างโปรตีนของ 1,2-อีเทนไดไทออล แสดงดังสมการเคมีที่ (2.3) [24, 27]

ตารางที่ 2.3 สมบัติของ 1,2-อีเทนไดไทออล [24, 27]

สูตรเคมี	$C_2H_6S_2$
สูตรโครงสร้าง	
มวลโมเลกุล	$94.19 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$
ความหนาแน่น	$1.123 \text{ g}/\text{cm}^3$
จุดหลอมเหลว	$-41 \text{ }^\circ\text{C}$
จุดเดือด	$146 \text{ }^\circ\text{C}$
ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน	-0.255 V

สมการการรีดิวซ์พันธะไดซัลไฟต์ในโครงสร้างโปรตีนของ 1,2-อีเทนไดไทออล



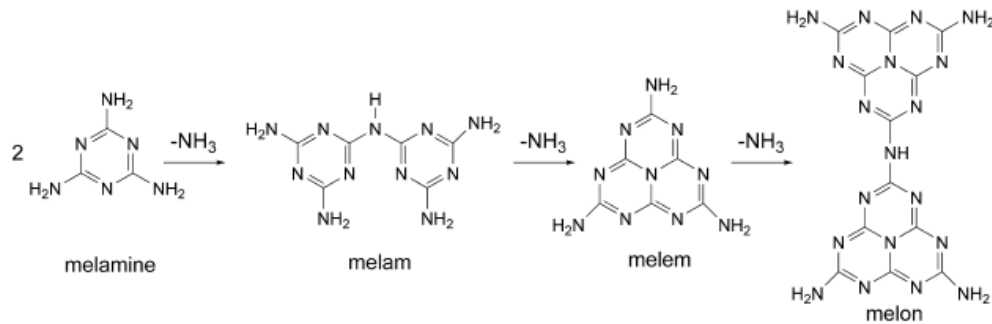
2.1.5 การสลายตัวทางความร้อน

เคราตินประกอบด้วยธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ เมื่อเคราตินได้รับอุณหภูมิสูงจะปลดปล่อยแก๊สติดไฟยากคือ แก๊สแอมโมเนีย (ammonia, NH₃) ที่อุณหภูมิประมาณ 273 องศาเซลเซียส แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (hydrogen sulfide, H₂S) ที่อุณหภูมิประมาณ 255 องศาเซลเซียส และแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (sulfur dioxide, SO₂) ที่อุณหภูมิประมาณ 260 องศาเซลเซียส โดยแก๊สแอมโมเนียจะเกิดจากการสลายตัวของกรดอะมิโน และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จะเกิดจากการสลายตัวของกรดอะมิโนซิสเทอีน ไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นแก๊สติดไฟง่ายและมีกลิ่นเหม็นคล้ายไข่เน่า เมื่อรวมตัวกับแก๊สออกซิเจนขณะเผาไหม้จะเกิดเป็นแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และน้ำ แสดงในสมการเคมี (2.4) [15]



เส้นใยขนสัตว์เป็นเส้นใยที่มีสมบัติทนไฟได้ตามธรรมชาติเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยทั่วไป ได้แก่ เส้นใยฝ้าย และเส้นใยพอลิเอสเตอร์ โดยเส้นใยขนสัตว์จะมีอุณหภูมิติดไฟ (ignition temperature) สูงประมาณ 600 องศาเซลเซียส มีค่าดัชนีออกซิเจนจำกัด (Limiting Oxygen Index, LOI) สูงประมาณ 25-26% และสามารถดับไฟได้ด้วยตัวเอง เนื่องจากเส้นใยขนสัตว์มีเคราติน เป็นองค์ประกอบ เมื่อได้รับอุณหภูมิสูงจึงปลดปล่อยแก๊สแอมโมเนียและแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งเป็นแก๊สติดไฟยากออกมาเจือจางแก๊สออกซิเจนและแก๊สติดไฟง่ายที่เกิดจากการเผาไหม้ จึงทำให้การเผาไหม้ลดลง [28]

การสลายตัวของเคราตินสอดคล้องกับการสลายตัวของสารหน่วงไฟประเภทไนโตรเจน ได้แก่ เมลามีน ซึ่งจะสลายตัวแล้วปลดปล่อยแก๊สแอมโมเนีย และเกิดโครงสร้างร่างแหที่มีความคงทนต่อความร้อนขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยกลไกการสลายตัวนี้จะสอดคล้องกับกลไกการปลดปล่อยแก๊สที่ไม่ติดไฟของสารหน่วงไฟ (Gas theory) ซึ่งเมื่อสารหน่วงไฟสลายตัวจะปลดปล่อยแก๊สเฉื่อยออกมา ทำให้แก๊สติดไฟง่ายถูกเจือจาง การเผาไหม้ในระบบจึงลดลง [2, 29, 30]



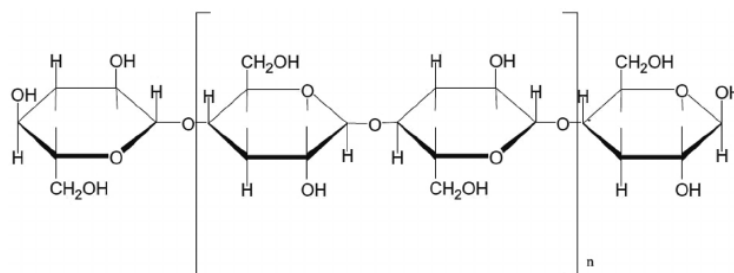
รูปที่ 2.8 การสลายตัวทางความร้อนของเมลามีน [30]

2.2 ฝ้าย (cotton)

ฝ้ายเป็นเส้นใยธรรมชาติที่ได้จากพืชที่มีความสำคัญและนิยมนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ หลากหลายมากที่สุด ทำให้มีการเพาะปลูกฝ้ายเป็นพืชเศรษฐกิจในหลาย ๆ ประเทศ โดยฝ้ายที่มีคุณภาพดีจะต้องมีสีขาว เส้นใยมีความยาวเหมาะสม เส้นใยมีความละเอียดและแข็งแรง ฝ้ายจัดเป็นเส้นใยสั้น (staple fiber) เส้นใยมีการบิดเป็นเกลียวและมีภาคตัดขวางคล้ายเมล็ดถั่วหรือรูปไต ฝ้ายประกอบด้วยเซลลูโลส (cellulose) ร้อยละ 88-96 เพคติน (pectin) ร้อยละ 0.7-1.2 ขี้ผึ้ง (wax) ร้อยละ 0.4-1.0 โปรตีนร้อยละ 1.1-1.9 สารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ ร้อยละ 0.5-1.0 เถ้า (ash) ร้อยละ 0.7-1.6 [31, 32]

2.2.1 องค์ประกอบทางเคมี

ฝ้ายประกอบด้วยธาตุหลัก คือ คาร์บอนร้อยละ 44.4 ไฮโดรเจนร้อยละ 6.2 และออกซิเจนร้อยละ 49.4 มีเซลลูโลสหรือพอลิแซคคาไรด์ (polysaccharide) เป็นองค์ประกอบหลักมากกว่าร้อยละ 80 โครงสร้างประกอบด้วยหน่วยย่อย คือ anhydro-D-glucose ($C_6H_{10}O_5$) ต่อกันเป็นสายโซ่โมเลกุลยาวทำให้ไม่ละลายน้ำ การที่ฝ้ายมีลักษณะโครงสร้างทางเคมีเช่นนี้ ทำให้มีความแข็งแรงสูงเนื่องจากมีความเป็นผลึก (crystalline) สูงประมาณร้อยละ 65-70 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสแสดงในรูปที่ 2.9 [31, 32]



รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส [33]

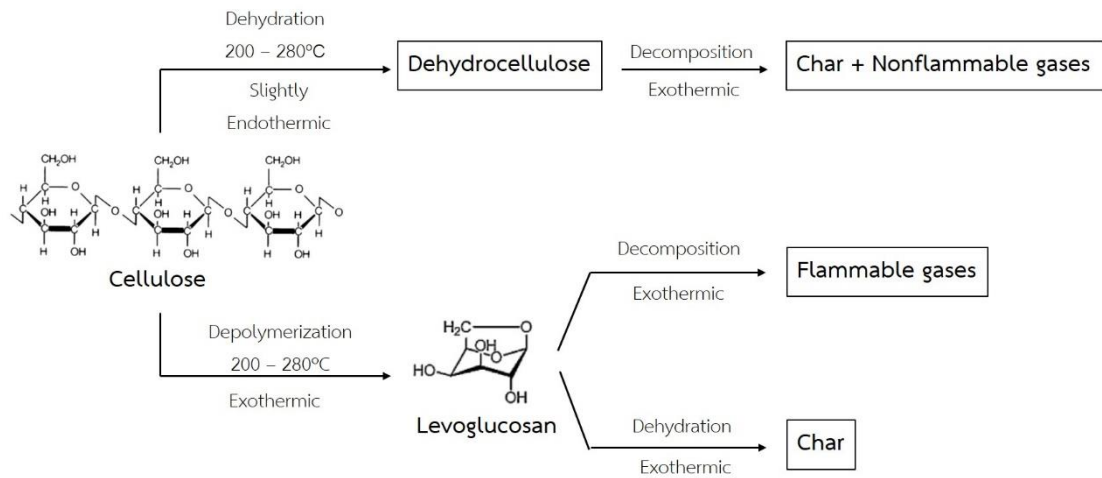
2.2.2 สมบัติของฝ้าย

ฝ้ายเป็นเส้นใยที่มีการนำมาประยุกต์ใช้งานหลากหลาย โดยการใช้งานเฉพาะด้านวัสดุสิ่งทอ เช่น เสื้อผ้า เครื่องนุ่งห่ม วัสดุตกแต่งที่อยู่อาศัย เนื่องจากฝ้ายดูดความชื้นได้ดี (ดูดซึมความชื้นประมาณร้อยละ 8.5 ที่สภาวะมาตรฐาน) ทำให้สวมใส่สบาย มีความนุ่ม สามารถหาได้ง่ายและมีราคาถูก ฝ้ายมีความแข็งแรงปานกลางและจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อเปียก ความสามารถในการยืดตัวประมาณร้อยละ 5-10 สามารถคืนตัวจากแรงอัดได้น้อยทำให้ยับง่าย มีความถ่วงจำเพาะ 1.54 แต่ฝ้ายมีข้อจำกัดในการใช้งาน คือ ไม่ทนสารเคมีที่เป็นกรดเข้มข้นและสารที่เป็นเบส เช่น กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ และฝ้ายจะติดไฟได้ง่ายและลุกไหม้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้การผสมเส้นใยฝ้ายกับเส้นใยอื่น เช่น พอลิเอสเตอร์ และไนลอน เป็นต้น จะสามารถปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงและความคงทนต่อสารเคมีของฝ้ายได้ [31, 32]

2.2.3 การเผาไหม้ของฝ้าย

ฝ้ายสามารถทนต่อความร้อนจากการรีดไต้สูงถึง 200 องศาเซลเซียส ถ้าใช้อุณหภูมิสูงกว่านี้ ฝ้ายจะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเหลือง นอกจากนี้เมื่อฝ้ายได้รับความร้อนจากแสงแดดเป็นเวลานานจะมีสีเหลืองและคุณภาพเสื่อมลง การนำฝ้ายมาใช้งานเป็นเครื่องนุ่งห่มและวัสดุตกแต่งที่อยู่อาศัยไม่ปลอดภัยนัก เนื่องจากฝ้ายสามารถติดไฟและเผาไหม้ได้ง่ายและรวดเร็ว ทำให้ฝ้ายเป็นเชื้อเพลิงชั้นดีก่อให้เกิดอัคคีภัยได้ เมื่อเกิดการเผาไหม้ฝ้ายจะไม่หลอมหดยดและหดตัว แต่จะลุกไหม้อย่างรวดเร็ว มีควันน้อย กลิ่นคล้ายกระดาษไหม้ และแก่น้ำหนักเบาและมีสีเทา [31, 32]

ฝ้ายจะมีการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนในกระบวนการ pyrolysis 2 กลไก คือ การสลายโครงสร้างโมเลกุล (depolymerization) โดยจะสลายตัวได้ Leavoglucosan ซึ่งจะสลายตัวต่อไปได้ Char และแก๊สติดไฟง่าย และการกำจัดน้ำ (dehydration) โดยจะกำจัดน้ำออกจากโครงสร้างได้ dehydrocellulose ซึ่งจะสลายตัวต่อไปได้ Char และแก๊สติดไฟยาก โดยทั่วไปการสลายทางความร้อนของฝ้ายจะให้ leavoglucosan มากกว่าการกำจัดน้ำ ทำให้ฝ้ายเกิดการลุกไหม้และเกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องจนเป็นสาเหตุให้เกิดอัคคีภัยได้ [2, 34-36] กลไกการสลายตัวทางความร้อนของฝ้ายแสดงในรูปที่ 2.10



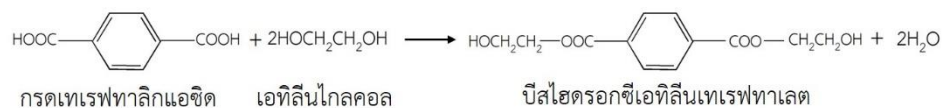
รูปที่ 2.10 การสลายตัวของฝ้าย

2.3 พอลิเอสเทอร์ (polyester)

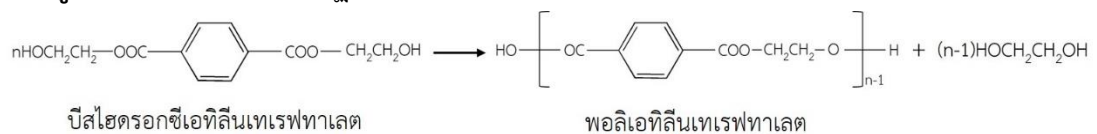
เส้นใยพอลิเอสเทอร์เป็นเส้นใยสังเคราะห์ที่ผลิตจากเทอร์โมพลาสติก คือ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (poly(ethylene terephthalate), PET) โดยการขึ้นรูปเป็นเส้นใยยาวแล้วตีเกลียวเป็นเส้นด้าย เส้นใยพอลิเอสเทอร์นิยมนำมาใช้งานด้านสิ่งทอ เช่น เครื่องนุ่งห่ม เสื้อผ้ากีฬา วัสดุตกแต่งที่อยู่อาศัย และสิ่งทอเทคนิค เนื่องจากเส้นใยพอลิเอสเทอร์มีความแข็งแรง คงทนต่อสารเคมีและภาวะต่าง ๆ [31, 32]

2.3.1 การผลิตเส้นใยพอลิเอสเทอร์

เส้นใยพอลิเอสเทอร์เป็นเส้นใยพอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ โดยมีสารตั้งต้น คือ กรดเทเรฟทาลิกแอซิด (terephthalic acid) และเอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol) สังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (esterification reaction) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 และ 2.12 [31, 32]

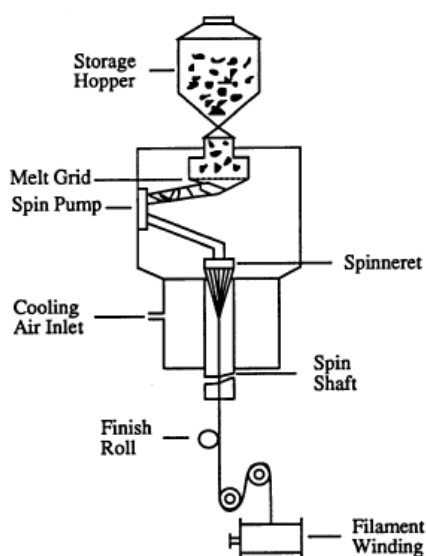


รูปที่ 2.11 ขั้นที่ 1 ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต



รูปที่ 2.12 ขั้นที่ 2 ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ที่ได้จะถูกทำให้หลอมเหลว เพื่อขึ้นรูปเป็นเส้นใยด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบปั่นหลอม (melt spinning) แสดงในรูปที่ 2.13 โดยการนำพอลิเมอร์เหลวอัดผ่านหัวรีดที่สามารถกำหนดรูปร่างของภาคตัดของเส้นใยได้ตามคุณสมบัติที่ต้องการ เส้นใยจะผ่านการดึงยืดขณะร้อน (hot drawing) ซึ่งเป็นการเพิ่มผลึก (crystalline) ทำให้เส้นใยมีความแข็งแรง จากนั้นนำเส้นใยยาวพอลิเอสเตอร์ที่ได้มาตีเกลียวเป็นเส้นด้ายเพื่อนำไปทอเป็นผ้าพอลิเอสเตอร์ต่อไป [32]



รูปที่ 2.13 กระบวนการขึ้นรูปเส้นใยแบบปั่นหลอม [37]

2.3.2 สมบัติของพอลิเอสเตอร์

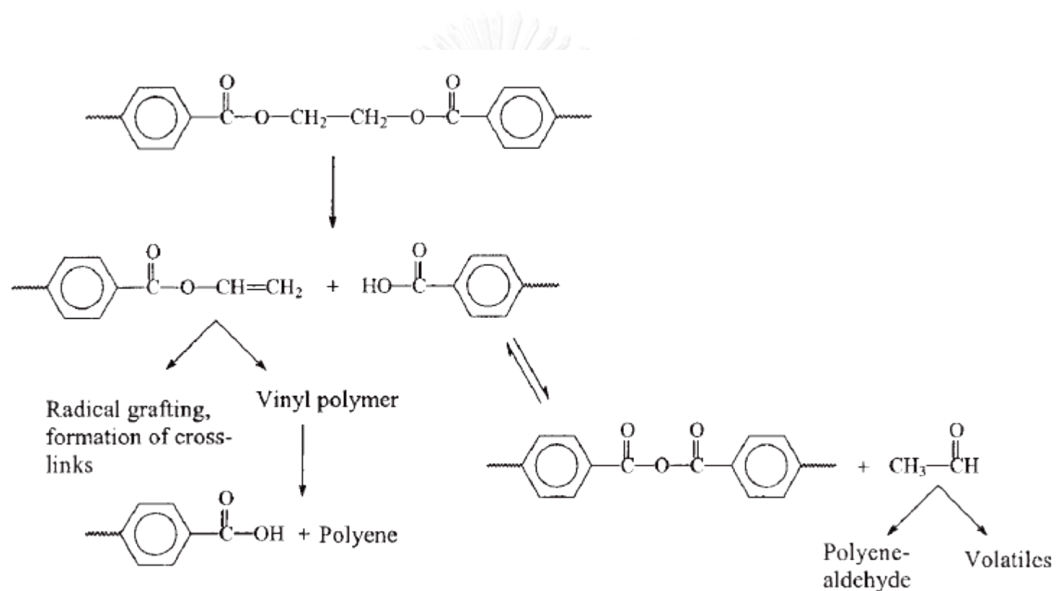
พอลิเอสเตอร์มีความแข็งแรงสูงและมีความคงตัวสูง เนื่องจากลักษณะทางกายภาพที่มีปริมาณผลึกสูง มีความทนแรงดึงทนต่อแรงดึง (tenacity) และทนต่อแรงเสียดสี (abrasion resistance) ดีมาก ความสามารถในการยืดตัวประมาณร้อยละ 15-40 มีความถ่วงจำเพาะ 1.38 ดูดความชื้นต่ำ (ดูดซึมความชื้นประมาณร้อยละ 0.4 ที่สภาวะมาตรฐาน) ทำให้ผ้าแห้งเร็ว แต่สวมใส่ไม่สบาย เนื่องจากไม่ระบายความชื้นและเกิดการสะสมประจุไฟฟ้าได้ นอกจากนี้ยังสามารถทนต่อสารเคมีที่เป็นกรดและเบสได้ดี [31, 32]

2.3.3 การเผาไหม้ของพอลิเอสเตอร์

พอลิเอสเตอร์จะเริ่มเหนียวและอ่อนตัวที่อุณหภูมิประมาณ 227-242 องศาเซลเซียส การรีดผ้าพอลิเอสเตอร์จึงต้องใช้อุณหภูมิต่ำกว่าช่วงนี้ พอลิเอสเตอร์จะหลอมและลุกติดไฟที่อุณหภูมิ

ประมาณ 249-290 องศาเซลเซียส เนื่องจากพอลิเอสเทอร์มีจุดหลอมเหลวประมาณ 250-260 องศาเซลเซียส การนำพอลิเอสเทอร์มาใช้งานเป็นเครื่องนุ่งห่มและวัสดุตกแต่งที่อยู่อาศัยไม่ปลอดภัย เนื่องจากเมื่อเกิดการลุกติดไฟและเผาไหม้ พอลิเอสเทอร์จะหดหนีไฟและเกิดการหลอมหยด พอลิเมอร์หลอมเหลวที่มีความร้อนสูง หรืออาจมีการหลอมหยดของเปลวไฟ ซึ่งเป็นการนำพาความร้อนและเปลวไฟสู่วัสดุข้างเคียงทำให้เกิดอัคคีภัยได้ มีควันทกิ่นคล้ายน้ำมันเบนซิน และเกิดผงเขม่าสีดำ [31, 32]

พอลิเอสเทอร์จะมีการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนในกระบวนการ pyrolysis ได้หลายกลไก ได้แก่ การขาดของสายโซ่ (chain scission) เกิดเป็นไวนิลเอสเทอร์ (vinyl ester) และสารประกอบที่มีปลายสายโซ่เป็นหมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) แสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การขาดของสายโซ่ของพอลิเอสเทอร์ [38]

2.4 ฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ (cotton/polyester blend)

การผลิตผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์เพื่อปรับปรุงสมบัติของผ้าให้ดีขึ้น เหมาะสมกับการใช้งาน โดยการผสมเส้นใย 2 ชนิดที่มีสมบัติต่างกันมาก คือ ฝ้าย เป็นเส้นใยที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และพอลิเอสเทอร์ ซึ่งเป็นเส้นใยที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ทำให้ได้ผ้าที่มีสมบัติดีขึ้น เช่น ผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์จะแห้งเร็วกว่า และยับน้อยกว่าผ้าฝ้าย เนื่องจากมีพอลิเอสเทอร์ผสมอยู่ ผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์จะสวมใส่สบายกว่าผ้าพอลิเอสเทอร์ เนื่องจากมีฝ้ายผสมอยู่ เป็นต้น [31, 32]

การผลิตผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ทำได้ 3 วิธี คือ [31, 32]

1. การผสมในกระบวนการปั่นเส้นด้าย โดยการตัดเส้นใยยาว (filament fiber) ของพอลิเอสเตอร์ให้เป็นเส้นใยสั้น (staple fiber) เพื่อผสมกับเส้นใยฝ้ายซึ่งเป็นเส้นใยสั้นขณะปั่นเส้นด้าย
2. การผสมในกระบวนการตีเกลียวเส้นด้าย โดยการนำเส้นด้ายเดี่ยวพอลิเอสเตอร์ และเส้นด้ายเดี่ยวฝ้าย มาตีเกลียวเข้าด้วยกันเป็นเส้นด้ายผสม
3. การผสมในกระบวนการทอผ้า โดยการใช้เส้นด้ายพอลิเอสเตอร์ทอสลับกับเส้นด้ายฝ้ายเป็นผ้าผืน ในงานวิจัยนี้ใช้ผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ผสมในกระบวนการนี้

การเผาไหม้ของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ จะเริ่มจากการสลายตัวของฝ้ายที่อุณหภูมิต่ำกว่าพอลิเอสเตอร์ ทำให้เกิดชาร์ก่อนการหลอมหยด โดยชาร์ของฝ้ายจะดูดซับพอลิเอสเตอร์หลอมไว้ ทำให้ไม่เกิดการหลอมหยดของพอลิเอสเตอร์ขึ้น เรียกว่า scaffolding [2, 3]

2.5 การตกแต่งสำเร็จห่วงไฟของสิ่งทอ (Flame retardant finishing of textile)

การตกแต่งห่วงไฟสิ่งทอมีความสำคัญมาก เนื่องจากสิ่งทอสามารถลุกติดไฟและเผาไหม้ได้รวดเร็ว ภายในอาคารบ้านเรือนมีสิ่งทออยู่เป็นจำนวนมาก เช่น เสื้อผ้า เครื่องนุ่งห่ม ผ้าปูที่นอน พรม ผ้าม่าน และสิ่งทอตกแต่งที่อยู่อาศัย เมื่อสิ่งทอเกิดการลุกติดไฟจึงเป็นเชื้อเพลิงทำให้เกิดอัคคีภัยได้ เส้นใยแต่ละชนิดจะมีความคงทนต่อความร้อนและการลุกติดไฟที่แตกต่างกัน แสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สมบัติความคงทนต่อความร้อนของเส้นใยชนิดต่าง ๆ [2]

ชนิดของเส้นใย	อุณหภูมิสลายตัว ($T_p, ^\circ\text{C}$)	อุณหภูมิเผาไหม้ ($T_c, ^\circ\text{C}$)	LOI (%)
ขนสัตว์	245	600	25
ฝ้าย	350	350	18.4
วิสโคสเรยอน	350	420	18.9
ไทรอะซิเตต	305	540	18.4
พอลิเอสเตอร์	420 - 447	480	20 - 21
ไนลอน 6	431	450	20 - 21.5
ไนลอน 6,6	403	530	20 - 21.5
นอเมกซ์	410	>500	28.5 - 30
เคฟลาร์	>590	>550	29

โดยการตกแต่งผนังไฟจะต้องพิจารณาจากความคงทนต่อความร้อนของเส้นใย เช่น ฝ้ายจะลุกติดไฟง่าย และพอลิเอสเตอร์จะเกิดการหลอมหดเมื่อได้รับความร้อนสูง ซึ่งเส้นใยทั้ง 2 ชนิดเป็นเส้นใยที่นิยมใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลาย เมื่อได้รับความร้อนสูงสามารถเกิดอันตรายแก่ผู้บริโภคได้ จึงจำเป็นต้องมีการตกแต่งผนังไฟผ้าฝ้ายและผ้าพอลิเอสเตอร์

2.5.1 องค์ประกอบของไฟ

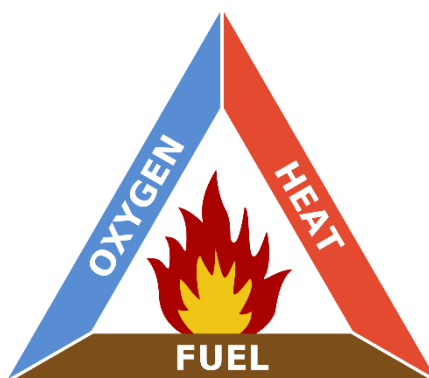
การเกิดไฟต้องมีองค์ประกอบ 3 อย่าง คือ

1. เชื้อเพลิง (fuel) คือ วัสดุที่สามารถลุกติดไฟได้ สามารถมีได้ทั้ง 3 สถานะ คือ สถานะของแข็ง ได้แก่ เสื้อผ้า กระดาษ พลาสติก สถานะของเหลว ได้แก่ แอลกอฮอล์ น้ำมัน และสถานะแก๊ส ได้แก่ มีเทน โพรเพน เป็นต้น

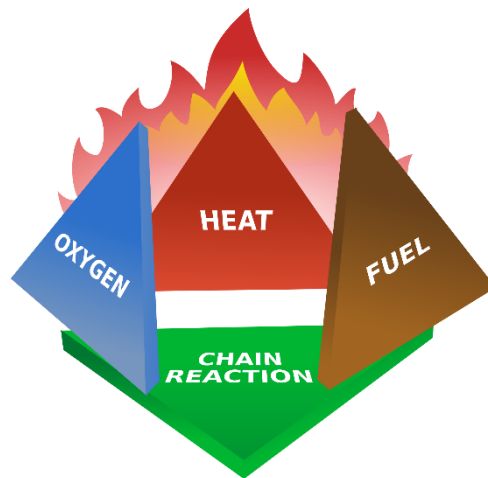
2. ความร้อน (heat) คือ ความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงพอที่จะทำให้เชื้อเพลิงเกิดการลุกติดไฟที่อุณหภูมิจุดติดไฟ (ignition point)

3. ออกซิเจน (oxygen) คือ แก๊สที่ช่วยให้วัสดุเกิดการลุกติดไฟและเผาไหม้ได้ โดยในบรรยากาศจะมีปริมาณแก๊สออกซิเจนอยู่ประมาณร้อยละ 21 ถ้าวัสดุมีค่าปริมาณของออกซิเจนต่ำที่สุดที่ช่วยในการเผาไหม้ (Limiting oxygen index, LOI) ต่ำกว่า 21 วัสดุจะสามารถลุกติดไฟได้ง่ายในบรรยากาศ แต่ถ้ามีค่า LOI สูงกว่า 26 วัสดุจะลุกติดไฟได้ยากในบรรยากาศ หรือมีสมบัติผนังไฟ

เมื่อมีองค์ประกอบของการเกิดไฟครบทั้ง 3 อย่างแล้ว วัสดุจะเกิดการลุกไหม้ขึ้น โดยองค์ประกอบการเกิดไฟทั้ง 3 อย่าง เรียกว่า สามเหลี่ยมไฟ (fire triangle) แสดงในรูปที่ 2.15 เมื่อวัสดุเกิดการลุกติดไฟแล้วจะต้องมีการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction) เพื่อให้การเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง แสดงในรูปที่ 2.16 [2, 30]



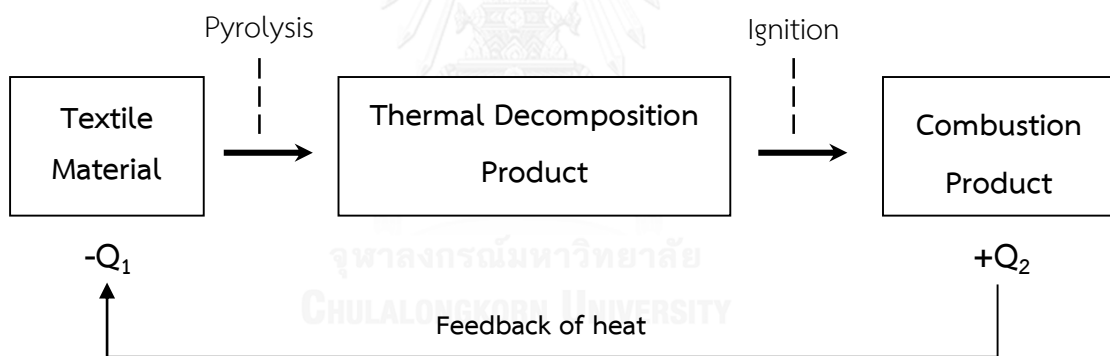
รูปที่ 2.15 สามเหลี่ยมไฟ [39]



รูปที่ 2.16 องค์ประกอบที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ [39]

2.5.2 กลไกการเผาไหม้

กลไกการเผาไหม้ของวัสดุสามารถอธิบายได้ด้วยวงจรการเผาไหม้ของวัสดุ (Burning Cycle of Materials) แสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 วงจรการเผาไหม้ของวัสดุ

เมื่อวัสดุได้รับความร้อนจะเกิดกระบวนการสลายตัวทางความร้อน (pyrolysis) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (endothermic reaction, $-Q_1$) วัสดุจะสลายตัวให้ไอหรือแก๊สติดไฟได้ง่าย (flammable volatiles or flammable gases) ออกมา จากนั้นไอหรือแก๊สติดไฟได้ง่ายนี้จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศเกิดกระบวนการลุกติดไฟ (ignition) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic reaction, $+Q_2$) โดยวัสดุจะคายความร้อนออกมาสู่ระบบ จากนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกนำกลับไปทำให้วัสดุร้อนและสลายตัวให้ไอหรือแก๊สติดไฟได้ง่ายอีกครั้ง ทำให้เกิดวงจรการเผาไหม้ของวัสดุอย่างต่อเนื่อง [2]

2.5.3 กลไกการทำงานของสารหน่วงไฟ

หลักการทำงานของสารหน่วงไฟ คือ การรบกวนวงจรการเผาไหม้ของวัสดุไม่ให้เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ เช่น การลดความร้อนของระบบไม่ให้อุณหภูมิสลายตัวหรือลุกติดไฟของวัสดุ หรือการปลดปล่อยแก๊สติดไฟยากออกมาเจือจางแก๊สติดไฟง่ายในระบบ ทำให้การเผาไหม้ของวัสดุยุติลงหรือเกิดการเผาไหม้ได้ช้าลง ซึ่งกลไกการทำงานของสารหน่วงไฟมีดังนี้ [2, 30]

2.5.3.1 กลไกการหน่วงไฟทางกายภาพ

2.5.3.1.1 การทำให้ระบบเย็นลง (Endothermic theory, thermal theory)

เมื่อสารหน่วงไฟได้รับความร้อนจะดูดความร้อนจากระบบไปใช้ในการสลายตัวด้วยการหลอมหรือการระเหิด ทำให้อุณหภูมิในระบบลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิที่วัสดุเกิดการเผาไหม้ได้ วงจรการเผาไหม้จึงยุติลง

2.5.3.1.2 การสร้างฉนวนความร้อน (Melt theory)

เมื่อสารหน่วงไฟได้รับความร้อนจะเกิดการหลอมตัวปกคลุมพื้นผิวของวัสดุเป็นฉนวนความร้อน ทำให้แก๊สติดไฟง่ายที่เกิดจากการสลายตัวของวัสดุไม่สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศได้ วงจรการเผาไหม้จึงยุติลง

2.5.3.1.3 การเจือจางแก๊สติดไฟง่าย (Gas theory)

เมื่อสารหน่วงไฟได้รับความร้อนจะสลายตัวให้แก๊สติดไฟยากหรือแก๊สไม่ติดไฟ เช่น แก๊สแอมโมเนีย (NH_3) แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออกมา ทำให้แก๊สติดไฟง่ายที่เกิดจากการสลายตัวของวัสดุลดลงจนมีปริมาณน้อยกว่าปริมาณที่เหมาะสมในการลุกติดไฟ จึงไม่สามารถเกิดการเผาไหม้กับออกซิเจนในอากาศได้ วงจรการเผาไหม้จึงยุติลง

2.5.3.2 กลไกการหน่วงไฟทางเคมี

2.5.3.2.1 กลไกแบบ Gas phase (Radical capture theory)

เมื่อสารหน่วงไฟได้รับความร้อนจะปลดปล่อยอนุมูลอิสระ (free radical) ออกมา โดยอนุมูลอิสระจากสารหน่วงไฟจะไปจับตัวกับอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของวัสดุ เช่น $\text{H}\cdot$ และ $\text{OH}\cdot$ เกิดเป็นแก๊สไฮโดรเจน (H_2) น้ำ (H_2O) และอนุมูลอิสระที่ไม่ว่องไวในการทำปฏิกิริยา ($\text{X}\cdot$) ขึ้นในระบบ ทำให้ปฏิกิริยา Free-radical chain propagation สิ้นสุด วงจรการเผาไหม้จึงยุติลง สารหน่วงไฟที่มีกลไกการหน่วงไฟแบบนี้ คือ สารหน่วงไฟที่มีฮาโลเจนและฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ

2.5.3.2.2 กลไกแบบ Condensed phase (Dehydration theory)

เมื่อสารหน่วงไฟได้รับความร้อนจะทำปฏิกิริยากับวัสดุที่เกิดการเผาไหม้ ทำให้วัสดุที่เกิดการเผาไหม้สลายตัวที่อุณหภูมิต่ำลง หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงเส้นทางการสลายตัว (decomposition pathway) ของวัสดุ จากที่เคยสลายตัวให้แก๊สติดไฟง่ายกลายเป็นสลายตัวให้ขาร์และน้ำ วงจรการเผาไหม้จึงยุติลง

2.5.4 ประเภทของสารหน่วงไฟ

สารหน่วงไฟสามารถจำแนกจากองค์ประกอบได้เป็น 4 ประเภท คือ [2, 30]

2.5.4.1 สารหน่วงไฟที่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ (Halogen-containing flame retardants)

สารหน่วงไฟที่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบเป็นสารหน่วงไฟที่มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟมากที่สุด และเป็นสารหน่วงไฟที่มีความคงทนมากที่สุดสำหรับสิ่งทอ สารหน่วงไฟประเภทนี้มีกลไกการหน่วงไฟแบบ Gas phase ดังนี้



เมื่อได้รับความร้อนสารหน่วงไฟที่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบจะปลดปล่อยฮาโลเจนเฮไลด์ (HX) ออกมา โดย HX จะไปจับตัวกับ $\text{OH}\cdot$ และ $\text{H}\cdot$ ซึ่งเป็นอนุมูลอิสระที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของวัสดุ เกิดเป็นแก๊สไฮโดรเจน (H_2) น้ำ (H_2O) และอนุมูลอิสระที่ไม่ว่องไวในการทำปฏิกิริยา ($\text{X}\cdot$) ทำให้ปฏิกิริยา Free-radical chain propagation สิ้นสุดลง

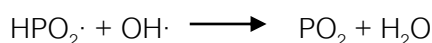
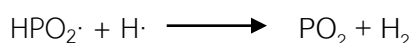
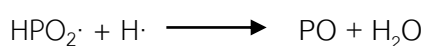
ถึงแม้ว่าสารหน่วงไฟที่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบจะมีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟมากที่สุด แต่เมื่อได้รับความร้อนจะสลายตัวให้แก๊สฮาโลเจน ซึ่งเป็นแก๊สพิษมีฤทธิ์เป็นสารก่อมะเร็ง (Carcinogen) และมีฤทธิ์กัดกร่อนออกสู่สิ่งแวดล้อม ทำให้ในปัจจุบันบางประเทศได้ออกกฎหมายห้ามใช้สารหน่วงไฟมีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ

2.5.4.2 สารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ (Phosphorus-containing flame retardants)

สารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบเป็นสารหน่วงไฟที่หาได้ง่าย และมีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อใช้กับวัสดุที่มีออกซิเจนสูง เช่น เซลลูโลส และอนุพันธ์ของเซลลูโลส กลไกการหน่วงไฟ

ของสารหน่วงไฟประเภทนี้สามารถเป็นได้ทั้งแบบ Gas phase และแบบ Condensed phase ขึ้นกับชนิดของฟอสฟอรัสและโครงสร้างทางเคมีของวัสดุ

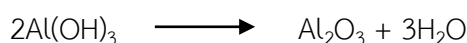
กลไกการหน่วงไฟแบบ Gas phase เกิดเมื่อสารหน่วงไฟได้รับความร้อนจะสลายตัวให้อนุมูลอิสระ $\text{PO}\cdot$ ซึ่งจะไปจับตัวกับอนุมูลอิสระ $\text{OH}\cdot$ และ $\text{H}\cdot$ ที่เกิดจากการสลายตัวของวัสดุ ทำให้ปฏิกิริยา Free-radical chain propagation สิ้นสุดลง ดังนี้



กลไกการหน่วงไฟแบบ Condensed phase เกิดเมื่อสารหน่วงไฟได้รับความร้อนจะสลายตัวให้กรดฟอสฟอริก และกรดพอลิฟอสฟอริก โดยกรดจะไปทำปฏิกิริยากับเซลลูโลส เกิดเป็นฟอสฟอริเลตเซลลูโลส (phosphorylated cellulose) และกำจัดน้ำออกมา เพื่อสร้างชั้นของ char

2.5.4.3 สารหน่วงไฟที่มีสารอนินทรีย์เป็นองค์ประกอบ (Inorganic-containing flame retardants)

สารหน่วงไฟที่มีสารอนินทรีย์เป็นองค์ประกอบ ได้แก่ เมทัลไฮดรอกไซด์ (metal hydroxide) สารประกอบโบรอน และสารประกอบซิลิกอน เป็นต้น สารหน่วงไฟประเภทนี้ไม่มีการปลดปล่อยแก๊สพิษขณะเผาไหม้ และมีราคาถูก โดยสารหน่วงไฟที่มีสารอนินทรีย์เป็นองค์ประกอบที่นิยมใช้มากที่สุดคือ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (aluminium hydroxide, $2\text{Al}(\text{OH})_3$) และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (magnesium hydroxide, $\text{Mg}(\text{OH})_2$) สารหน่วงไฟประเภทนี้จะมีกลไกการหน่วงไฟแบบการทำให้ระบบเย็นลง โดยการปลดปล่อยน้ำออกมาทำให้ระบบเย็นลง และสามารถเจือจางแก๊สติดไฟง่ายในกระบวนการเผาไหม้อีกด้วย กลไกการหน่วงไฟของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ มีดังนี้

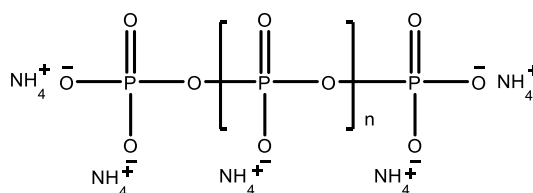


2.5.4.4 สารหน่วงไฟที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ (Nitrogen-containing flame retardants)

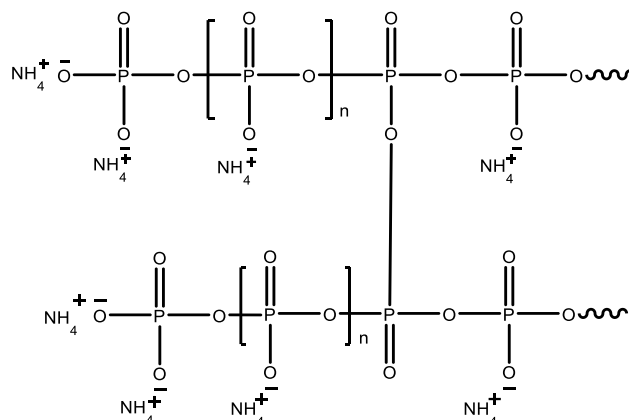
สารหน่วงไฟที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ เมลามีน และอนุพันธ์ของเมลามีน ซึ่งเป็นสารหน่วงไฟที่กำลังได้รับความนิยม เนื่องจากไม่มีการปล่อยแก๊สพิษออกมาขณะเผาไหม้ กลไกการหน่วงไฟของสารหน่วงไฟชนิดนี้เป็นแบบการเจือจางแก๊สติดไฟง่าย เมื่อสารหน่วงไฟได้รับความร้อนจะสลายตัวให้แก๊สติดไฟยากออกมา คือ แก๊สแอมโมเนีย ซึ่งสามารถเจือจางแก๊สติดไฟง่ายที่เกิดขึ้นขณะเผาไหม้ในระบบได้ นอกจากนี้สารหน่วงไฟที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบสามารถใช้ร่วมกับสารประกอบฟอสฟอรัส เพื่อเสริมประสิทธิภาพการหน่วงไฟ (synergism) ให้ดีขึ้นอีกด้วย

2.5.5 แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (ammonium polyphosphate)

แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (ammonium polyphosphate, APP, $(\text{NH}_4\text{PO}_3)_n$) เป็นสารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ นิยมใช้เป็นองค์ประกอบในการหน่วงไฟระบบอินทูเมสเซนต์ (intumescent) โดยทำหน้าที่เป็นแหล่งกรด (acid source) นิยมใช้ร่วมกับเมลามีน (melamine) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวทำให้เกิดโฟม (blowing agent) และ pentaerythritol ซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งให้คาร์บอน (carbonific compound) แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ Crystal phase I APP (APP I) และ Crystal phase II APP (APP II) โดย APP I จะมีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.18 มีจำนวนหน่วยฟอสเฟต (n) น้อยกว่า 1000 และจะสลายตัวให้กรดพอลิฟอสฟอริก และแก๊สแอมโมเนียที่อุณหภูมิสูงกว่า 150 องศาเซลเซียส ในขณะที่ APP II มีโครงสร้างเป็นกิ่งก้านหรือเกิดการเชื่อมขวางขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.19 มีจำนวนหน่วยฟอสเฟต (n) มากกว่า 1000 และจะสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตเป็นสารหน่วงไฟที่มีประสิทธิภาพสูง ไม่เป็นพิษ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และไม่ก่อให้เกิดควัน แต่มีราคาค่อนข้างแพง จึงจำเป็นต้องใช้ตัวเติมแร่ธาตุเพื่อลดต้นทุนการผลิต และเสริมประสิทธิภาพการหน่วงไฟ [40, 41]



รูปที่ 2.18 โครงสร้างทางเคมีของ APP I



รูปที่ 2.19 โครงสร้างทางเคมีของ APP II

2.6 การเคลือบผ่านสกรีน (screen coating technique)

การเคลือบผ่านสกรีน หรือการพิมพ์สกรีน (screen printing) เป็นเทคนิคการเคลือบหรือพิมพ์วัสดุ โดยการกดปาดสารเคลือบหรือหมึกพิมพ์ผ่านรูเปิดของผ้าสกรีน (screen fabric) ด้วยยางปาดลงบนวัสดุรองรับ การเคลือบผ่านสกรีนสามารถใช้เคลือบวัสดุได้หลายชนิด เช่น ผ้า ไม้ กระจก โลหะ และพลาสติก เป็นต้น ปัจจุบันเทคนิคการเคลือบผ่านสกรีนเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการตกแต่งหรือเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุ เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และต้นทุนต่ำ [42]

2.6.1 อุปกรณ์ในการเคลือบผ่านสกรีน

2.6.1.1 ผ้าสกรีน (screen fabric)

ผ้าสกรีนทำหน้าที่ให้สารเคลือบหรือหมึกพิมพ์ผ่านลงไปยังวัสดุ โดยจะควบคุมปริมาณ ความหนา ความคมชัด (การพิมพ์ลวดลาย) และความสม่ำเสมอของสารเคลือบบนวัสดุ ผ้าสกรีนนิยมใช้ผ้าพอลิเอสเตอร์ ทอแบบลายเดี่ยว (plain weave) ผ้าสกรีนเบอร์ 70 (เส้นด้าย 70 เส้นต่อ 1 นิ้ว) เมื่อนำผ้าสกรีนไปขึ้นบนกรอบสกรีนต้องมีความตึงเหมาะสม จากนั้นจะนำไปอัดลวดลายเพื่อใช้เป็นแม่พิมพ์ต่อไป [42]

2.6.1.2 กรอบสกรีน (screen frame)

กรอบสกรีนทำหน้าที่ควบคุมความตึงของผ้าสกรีน กรอบสกรีนต้องไม่มีการบิดงอเพราะจะทำให้แรงกดของยางปาดไม่สม่ำเสมอ ทำให้สารเคลือบมีความหนาไม่เท่ากัน [42]

2.6.1.3 ยางปาด (squeegee)

ยางปาดทำหน้าที่พาสารเคลือบหรือหมึกพิมพ์ผ่านแม่พิมพ์สกรีนไปติดบนวัสดุ โดยยางปาดจะมีผลต่อความหนาและความเรียบของสารเคลือบบนวัสดุ [42]

2.6.2 สารเคลือบ (coating paste)

ในงานวิจัยนี้เป็นการเตรียมสารเคลือบหน่วงไฟตามหลักการเตรียมสารเคลือบสำหรับการเคลือบแบบปาดผ่านสกรีน [42, 43] ซึ่งมีองค์ประกอบของสารเคลือบหน่วงไฟ ดังนี้

1. สารหน่วงไฟ (flame retardant) ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเสริมกันของสารหน่วงไฟ 2 ชนิด คือ แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตทางการค้า (Exolit AP422 และ Exolit AP423) ร่วมกับเคราติน (เคราตินทางการค้า และสารสกัดหยาบเคราติน โดยจะควบคุมปริมาณสารหน่วงไฟร้อยละ 10 เนื่องจากเป็นปริมาณที่น้อยที่สุดของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตที่สามารถหน่วงไฟได้จากการทดสอบความสามารถในการหน่วงไฟของ Exolit AP423 ตามมาตรฐาน UL94-VTM [44] และจัดชั้นได้ VTM-0

2. ตัวทำละลาย (solvent) ทำหน้าที่ช่วยปรับความเข้มข้นของสารเคลือบและช่วยประสานองค์ประกอบในสารเคลือบให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับองค์ประกอบอื่น ๆ ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย

3. สารเพิ่มความหนืด (thickener) ทำหน้าที่เพิ่มความหนืด และเป็นตัวพาสารเคลือบผ่านแม่พิมพ์สกรีนลงไปในวัสดุ สารเพิ่มความหนืดต้องมีความเข้ากันได้กับทุกองค์ประกอบของสารเคลือบ เมื่อรวมตัวกันแล้วแล้วไม่แยกตัวออกจากกัน ในงานวิจัยนี้ใช้สารข้นสังเคราะห์ (TP-150) ในการเตรียมสารเคลือบ

4. สารยึด (binder) ทำหน้าที่ยึดสารเคลือบให้ติดบนผ้าทอด้วยการเกิดการเชื่อมขวาง เพื่อให้สารเคลือบมีความคงทนต่อการใช้งาน ในงานวิจัยนี้ใช้สารยึดชนิดนาโนพอลิยูรีเทนที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 100 นาโนเมตร

5. สารลดแรงตึงผิว (surfactant) ทำหน้าที่ลดแรงตึงผิวของสารหน่วงไฟ เพื่อช่วยให้กระจายตัวในตัวทำละลายดีขึ้น ในงานวิจัยนี้ใช้ TWEEN 80 (polysorbate 80) เป็นสารลดแรงตึงผิว

6. สารช่วยผนึก (fixer) ทำหน้าที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดสารเคลือบกับผ้าทอ และช่วยให้ฟิล์มของสารเคลือบมีความแข็งแรง ในงานวิจัยนี้ใช้ TUBIFIX ML55 ที่มีประจุบวก เป็นสารช่วยผนึก

2.6.3 กรรมวิธีการเคลือบผ่านสกรีน

2.6.3.1 วัสดุที่ต้องการเคลือบ

ก่อนการเคลือบจำเป็นต้องรู้ลักษณะของวัสดุที่จะเคลือบก่อน เพื่อการเตรียมสารเคลือบและอุปกรณ์ให้เหมาะสม โดยต้องคำนึงลักษณะของวัสดุที่จะเคลือบ ดังนี้

1. ประเภทของวัสดุ ได้แก่ กระดาษ ผ้า พลาสติก ไม้ โลหะ และเซรามิกส์ เป็นต้น
2. รูปร่างของวัสดุ แบ่งเป็น 4 รูปร่าง คือ แผ่นเรียบ ทรงโค้ง ทรงกระบอก และทรงกลม
3. พื้นผิวของวัสดุ ได้แก่ วัสดุผิวเรียบ และผิวขรุขระ
4. สภาพของวัสดุ คือ ความแข็งความอ่อนของวัสดุ วัสดุต้องมีความคงตัวขณะสกรีน

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 งานวิจัยเกี่ยวข้องกับการสกัดเคราติน

2.7.1.1 การสกัดเคราตินแบบดั้งเดิม (conventional method)

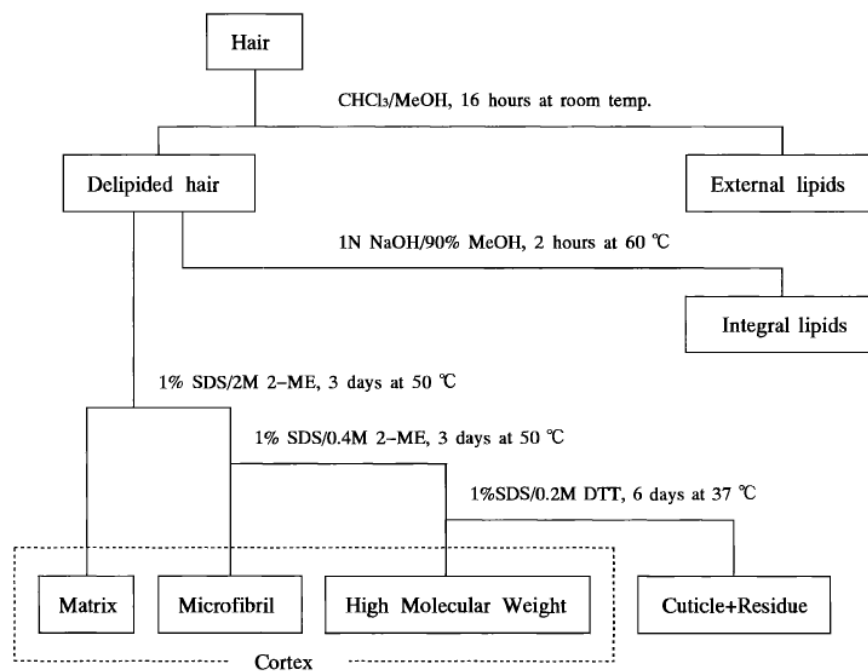
ในปี ค.ศ. 1964 O'Donnell และคณะ [45] ได้ศึกษาการสกัดโปรตีนหรือเคราตินจากขนแกะ ด้วยยูเรียความเข้มข้น 8 โมลาร์ และเมอร์แคปโทเอทานอลร้อยละ 1 ที่ pH 10.5 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยยูเรียทำหน้าที่เป็นสารทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่เคราติน และเมอร์แคปโทเอทานอลทำหน้าที่เป็นสารรีดิวซ์ ทำลายพันธะไดซัลไฟด์ในโครงสร้างเคราติน พบว่า โปรตีนจากขนแกะสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามปริมาณของซัลเฟอร์ คือ โปรตีนที่มีซัลเฟอร์มาก (SCMKB) จะมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 16-28 kDa และโปรตีนที่มีซัลเฟอร์น้อย (SCMKA) จะมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 50 kDa ซึ่งวิธีการสกัดโปรตีนจากขนแกะในงานวิจัยนี้จัดเป็นวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม ที่ใช้ในการสกัดเคราติน

ในปี ค.ศ. 1972 Day [46] ได้สกัดเคราตินจากขนของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม 22 ชนิด และสัตว์ปีก 1 ชนิด ด้วยวิธีแบบดั้งเดิม [45] แล้วทดสอบแบบแผนน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีน (protein pattern) ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟรีซิส (electrophoresis) พบว่า แบบแผนน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนสามารถใช้ในการจำแนกสปีชีส์ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมและสัตว์ปีกออกจากกัน จึงเป็นการยืนยันว่าเคราตินที่พบในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมและสัตว์ปีกแตกต่างกัน

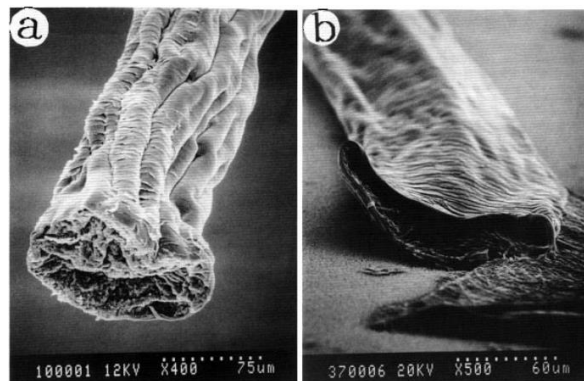
2.7.1.2 การสกัดเคราตินด้วยตัวทำละลาย Shindai

ในปี ค.ศ. 1998 Kon และคณะ [47] ได้ศึกษาวิธีการใหม่ในการสกัดองค์ประกอบโปรตีนจากเส้นผมมนุษย์ด้วยการวิเคราะห์การทำลายโครงสร้างของเส้นผมในขณะที่ดัดผม (perming) โดยได้เสนอ

วิธีใหม่ในการสกัดโปรตีนในเส้นผมที่สามารถสกัดแยกองค์ประกอบได้ด้วยการเพิ่มความเข้มข้นของ สารรีติวซ์ และเพิ่มเวลาในการสกัด โดยมี 2-เมอร์แคปโทเอทานอล และไดไฮโอริอิทอลเป็นสารรีติวซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ซึ่งจะได้ปริมาณโปรตีนเส้นใย (microfibril) ประมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และได้ปริมาณเมทริกซ์โปรตีน (matrix) ร้อยละ 28 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังพบว่า ในการสกัด โปรตีนส่วนคิวทิเคิล (cuticle) จะไม่ถูกทำลาย มีเพียงโปรตีนส่วนของคอร์เท็กซ์ (cortex) เท่านั้นที่ถูก ออกซิไดซ์ออกมาทางภาคตัดขวางของเส้นผม ดังแสดงในรูปที่ 2.21 โดยวิธีการสกัดแบบนี้เป็น ต้นแบบของการสกัดเคราตินด้วยตัวทำละลาย Shindai



รูปที่ 2.20 การสกัดองค์ประกอบของเส้นผม [47]



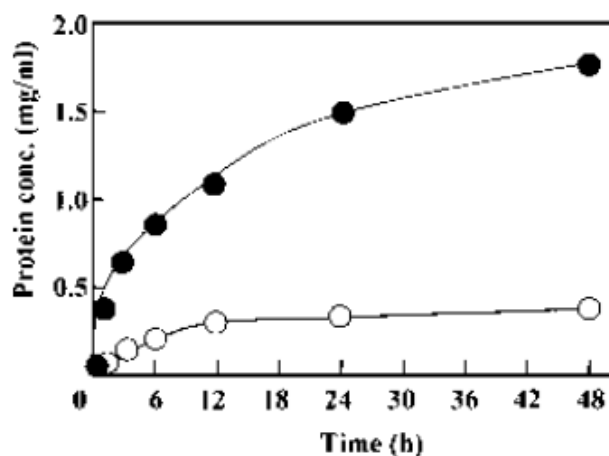
รูปที่ 2.21 เส้นผมที่ผ่านการสกัดโปรตีน a) เส้นผมขณะสกัดด้วย 2-เมอร์แคปโทเอทานอล b) เส้นผม หลังการสกัดด้วย 2-เมอร์แคปโทเอทานอล [47]

ในปี ค.ศ. 2002 Nakamura และคณะ [48] ได้ศึกษาตัวทำละลายใหม่ที่มีประสิทธิภาพในการสกัดโปรตีนจากเส้นผมมนุษย์ คือ ยูเรียความเข้มข้น 5 โมลาร์ ไทโอยูเรียความเข้มข้น 2.6 โมลาร์ 2-เมอร์แคปโทเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 5 และทริสไฮโดรคลอไรด์ บัฟเฟอร์ (Tris-HCl buffer) pH 8.5 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน ซึ่งให้ปริมาณโปรตีนมากที่สุด คือ มีปริมาณสารสกัดหยาบร้อยละ 61 และปริมาณโปรตีนด้วยวิธีแบรดฟอร์ดร้อยละ 65 ดังแสดงในตารางที่ 2.5 โดยตัวทำละลายที่ใช้การสกัดโปรตีนจำเป็นต้องประกอบด้วย ยูเรีย ไทโอยูเรีย ซึ่งเป็นสารทำลายพันธะไฮโดรเจน และ 2-เมอร์แคปโทเอทานอลซึ่งเป็นสารรีดิวซ์ จึงได้ปริมาณโปรตีนมากที่สุด โดยโปรตีนที่สกัดได้ประกอบด้วย แอลฟาเคราติน ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 40-60 kDa และเมทริกซ์โปรตีน ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 12-18 kDa การสกัดโปรตีนจากเส้นผมด้วยวิธีนี้ให้ปริมาณโปรตีนมากกว่าการสกัดแบบดั้งเดิม เนื่องจากมีไทโอยูเรียซึ่งเป็นสารทำลายพันธะไฮโดรเจนในตัวทำละลาย ดังแสดงในรูปที่ 2.22 ปัจจุบันวิธีนี้เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมที่สุดในการสกัดเคราตินจากเส้นผมมนุษย์ นอกจากนี้การสกัดเคราตินด้วยวิธี Shindai ยังสามารถใช้สกัดเคราตินจากวัสดุชนิดอื่นอย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.5 ผลของยูเรีย ไทโอยูเรีย และ 2-เมอร์แคปโทเอทานอล ต่อปริมาณโปรตีนที่สกัดได้จากเส้นผมมนุษย์ [48]

Reagent	Yield (%) ^{a)}	Yield (%) ^{b)}
2 M urea + 5% 2-ME	10	8
5 M urea + 5% 2-ME	23	22
8 M urea + 5% 2-ME	27	24
0.6 M thiourea + 5 M urea + 5% 2-ME	31	25
1.2 M thiourea + 5 M urea + 5% 2-ME	43	49
1.8 M thiourea + 5 M urea + 5% 2-ME	59	60
2.4 M thiourea + 5 M urea + 5% 2-ME	61	65
3 M thiourea + 5 M urea + 5% 2-ME	60	67
2.4 M thiourea + 5% 2-ME	19	18
2.4 M thiourea + 5 M urea	4	5
2.4 M thiourea + 5 M urea + 5% DTT	67	70

The protein was extracted from human delipidized hair at 50 °C for 2 d in 25 mM Tris-HCl, pH 8.5 containing the reagents as indicated. a) Dry weight method. b) Bradford method.



รูปที่ 2.22 ปริมาณโปรตีนที่ได้จากการสกัดด้วยวิธี Shindai (●) และวิธีดั้งเดิม (○) [48]

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบปริมาณโปรตีนที่ได้จากการสกัดด้วยวิธี Shindai และวิธีดั้งเดิม [48]

Sample	Yield (%)	
	Shindai method	Conventional method
Chicken feather	80	6
Rat hair	78	12
Wool	85	10
Human nail	81	5

The protein was extracted at 50°C for 2 d using Shindai method or conventional method.

2.7.1.3 การสกัดเคราตินด้วยตัวทำละลายชนิดอื่น

ในปี ค.ศ. 1934 Goddard และ Michaelis [49] ได้สกัดเคราตินจากขนแกะด้วยสารละลายไทโอไกลโคลิกแอซิด ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ pH 12 (ปรับ pH ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น) ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ได้ปริมาณเคราตินร้อยละ 60 ซึ่งเคราตินที่สกัดได้ประกอบด้วย ไนโตรเจนร้อยละ 16.66 ซัลเฟอร์ร้อยละ 3.13 และซิสทีนร้อยละ 11.90 โดยเมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการสกัดจาก 3 ชั่วโมง เป็น 24 ชั่วโมง เคราตินมีปริมาณซัลเฟอร์เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากร้อยละ 3.13 เป็น 3.20 ในขณะที่ปริมาณไนโตรเจนและซิสทีนลดลงเล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 2.7 แสดงว่าการสกัดด้วยวิธีนี้สามารถสกัดเคราตินได้โดยไม่ทำให้องค์ประกอบทางเคมีเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 2.7 ปริมาณองค์ประกอบของเคราตินที่สกัดด้วยไทโกลโคลิกแอซิดที่เวลาสกัดเพิ่มขึ้น [49]

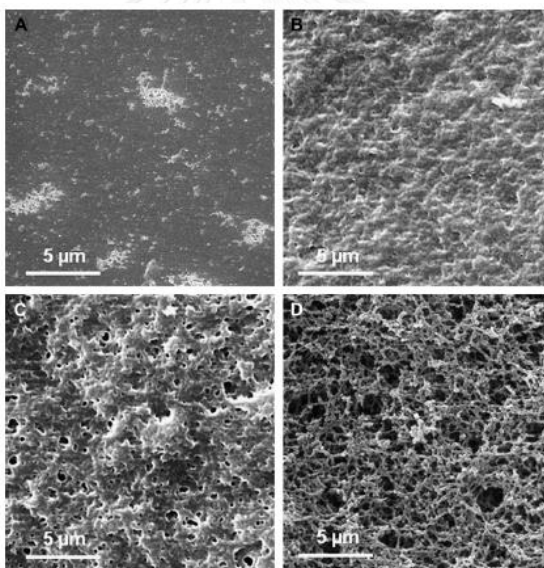
	Treated with thioglycolate for 24 hrs.	Treated with thioglycolate for 3 hrs.
Sulfur.....	3.20	3.13
Nitrogen.....	15.71	15.75
Cystine.....	11.8	11.9
“ calculated from sulfur.....	12.0	11.74
Isoelectric point.....	4.6	4.7

ในปี ค.ศ. 2009 Zoccola และคณะ [50] ได้สกัดเคราตินจากวัตถุดิบเหลือใช้ 2 ชนิด คือ ขนแกะจากโรงงานอุตสาหกรรม เขาและกิบเท้าสัตว์จากโรงฆ่าสัตว์ ด้วยการสกัด 2 วิธี คือ วิธีที่ 1 สกัดด้วยยูเรียความเข้มข้น 8 โมลาร์ ไตไฮโอริอิทอลความเข้มข้น 0.14 โมลาร์ pH 8.6 เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากไตไฮโอริอิทอลเกิดการออกซิเดชันได้ง่ายที่อุณหภูมิสูง ส่วนวิธีที่ 2 สกัดด้วยสกัดด้วยยูเรียความเข้มข้น 8 โมลาร์ เมตาไบซัลไฟต์ (meta-bisulphite) ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ pH 6.5 ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง โดยการสกัดด้วยวิธีที่ 1 ได้ปริมาณเคราตินจากขนแกะร้อยละ 50 และเคราตินจากเขาและกิบเท้าสัตว์ร้อยละ 3 ส่วนการสกัดด้วยวิธีที่ 2 ได้ปริมาณเคราตินจากขนแกะร้อยละ 30 และเคราตินจากเขาและกิบเท้าสัตว์ร้อยละ 10 ในการสกัดเคราตินจากเขาและกิบเท้าสัตว์จะได้ปริมาณเคราตินน้อยกว่าขนแกะ เนื่องจากเขาและกิบเท้าสัตว์มีปริมาณแอลฟาเคราตินมากกว่าขนสัตว์ จึงมีความเป็นผลึกสูงกว่า ทำให้สกัดได้ยากกว่า แต่เมื่อสกัดเคราตินจากเขาสัตว์ด้วยวิธีที่ 2 ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส จะได้ปริมาณเคราตินมากกว่าการสกัดด้วยวิธีที่ 1 เพราะเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ความแข็งแรงของโครงสร้างแอลฟาเคราตินลดลง จึงสกัดได้มากขึ้น

2.7.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้งานเคราติน

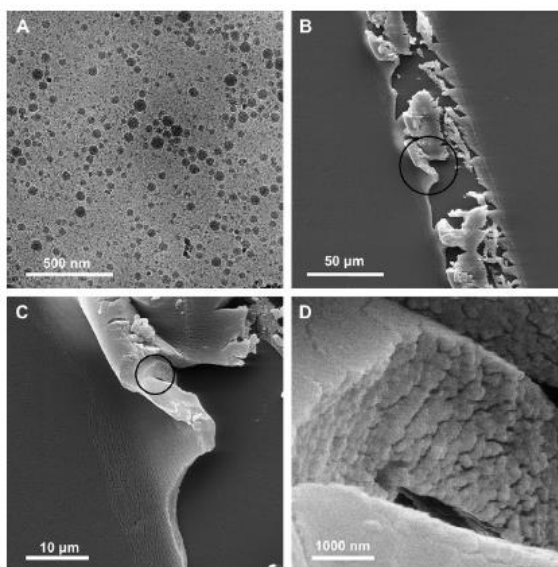
ในปัจจุบันนิยมนำเคราตินมาประยุกต์ใช้งานในด้านวัสดุชีวภาพ เช่น ด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ (tissue engineering) ด้านการนำส่งยา (drug permeation) และด้านการรักษาแผล (wound healing) เป็นจำนวนมาก เนื่องจากความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) การย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradability) ความคงทนเชิงกล (mechanical durability) และการมีเพียงพอในการนำไปใช้งาน (availability) ของเคราติน นอกจากนี้ยังมีการนำเคราตินมาใช้ในการผลิตฟิล์มคอมโพสิทร่วมกับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ อีกด้วย

ในปี ค.ศ. 2009 Reichl [51] ได้สกัดเคราตินจากเส้นผมมนุษย์ด้วยวิธี Shindai [48] เพื่อนำไปใช้เป็นฟิล์มเคลือบบนพื้นผิวพอลิสไตรีน (PS substrate) สำหรับการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ (cell culture) และด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ (tissue engineering) โดยวิธีการเคลือบผิว 2 วิธี คือ วิธีที่ 1 TCA coating เป็นการตกตะกอนด้วยกรดไตรคลอโรอะซิติก (trichloroacetic acid, TCA) ลงบนพื้นผิวโดยตรง และวิธีที่ 2 keratin clear coating เป็นการเคลือบด้วยเคราตินที่ผ่านการไดแอไลซิสลงบนพื้นผิวโดยตรง ฟิล์มที่ได้จากการเคลือบผิวแบบ TCA coating มีลักษณะเป็นรูพรุนเชื่อมต่อกันเป็นร่างแหคล้ายฟองน้ำ โดยความเป็นรูพรุนจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเคราตินเพิ่มขึ้น ฟิล์มที่ได้มีลักษณะโปร่งใสจนถึงโปร่งแสงขึ้นกับความเข้มข้นเคราติน แสดงในรูปที่ 2.23 ในขณะที่ฟิล์มที่ได้จากการเคลือบผิวแบบ keratin clear coating มีลักษณะการจัดเรียงตัวที่แน่น และมีการเชื่อมต่อของโครงสร้างระดับนาโนดีกว่าการเคลือบแบบ TCA coating ฟิล์มที่ได้มีลักษณะโปร่งใสและไม่มีสี แต่ฟิล์มที่ได้มีการแตกขึ้น เนื่องจากการที่เคราตินไม่ละลายน้ำและสารเลี้ยงเนื้อเยื่อ แสดงในรูปที่ 2.24



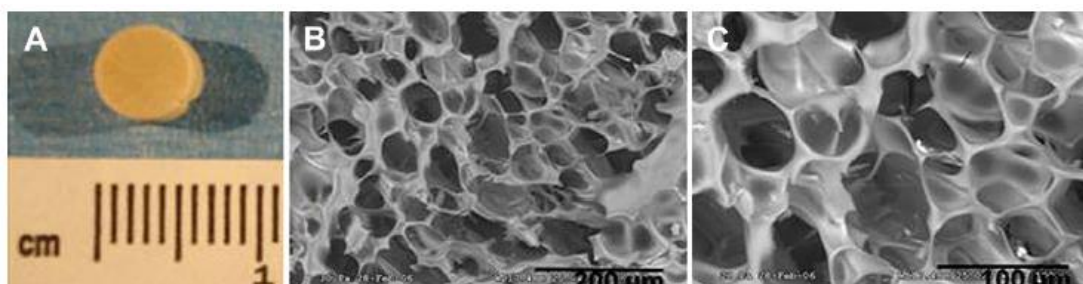
รูปที่ 2.23 ภาพ SEM ของฟิล์มเคราตินที่เตรียมด้วยวิธี TCA coating ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันดังนี้

A) 0.03 มิลลิกรัม B) 0.1 มิลลิกรัม C) 0.4 มิลลิกรัม และ D) 1 มิลลิกรัม [51]



รูปที่ 2.24 A) อนุภาคเคราตินระดับนาโนด้วยเทคนิค TEM และ B)-D) ลักษณะรอยแตกบนผิวของฟิล์มเคราตินที่เตรียมด้วยวิธี keratin clear coating ด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยายต่างกัน [51]

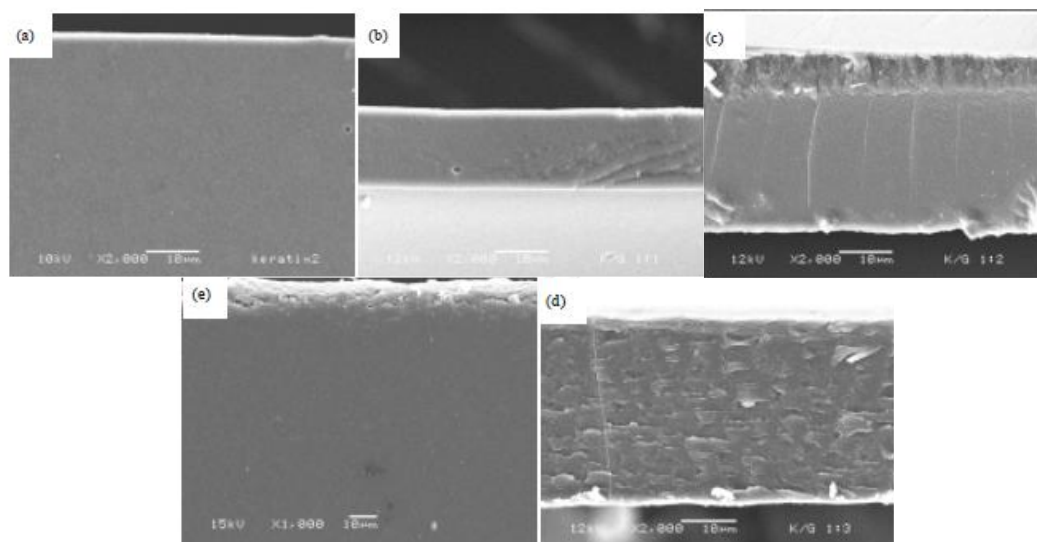
ในปี ค.ศ. 2010 Hill และคณะ [6] ได้สกัดเคราตินจากเส้นผมมนุษย์โดยมีไทโอไกลโคลิกแอซิดเป็นสารรีดิวซ์ [49] เพื่อนำมาผลิตไฮโดรเจล (hydrogel) สำหรับการปลูกถ่ายเนื้อเยื่อ โดยการสร้างชั้นเจลเคราตินที่มีรูพรุน 15-20 ชั้น แล้วนำมาระเหิดน้ำออกด้วยเทคนิค lyophilization จะได้ไฮโดรเจลที่มีรูพรุน ดังแสดงในรูปที่ 2.25 โดยเมื่อปลูกถ่ายไฮโดรเจลในร่างกาย เจลจะคงรูปอยู่ได้เป็นเวลา 3 เดือน



รูปที่ 2.25 A) ไฮโดรเจลเคราตินขนาดปกติ และภาพ SEM ของไฮโดรเจลเคราตินที่กำลังขยายต่างกัน B) กำลังขยาย 100 และ C) กำลังขยาย 300 [6]

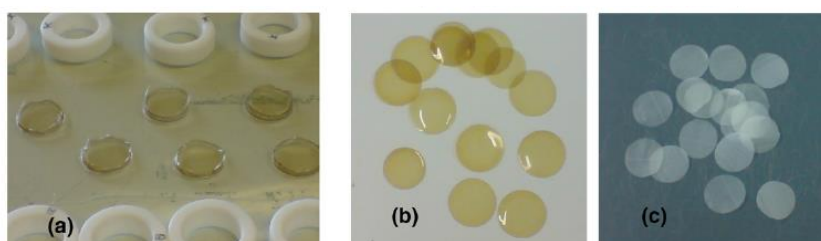
ในปี ค.ศ. 2011 Prasong และ Wasan [52] ได้สกัดเคราตินจากเส้นผมมนุษย์ด้วยวิธี Shindai [48] เพื่อนำมาขึ้นรูปฟิล์มผสมร่วมกับเจลาติน (gelatin) โดยฟิล์มผสมมีอัตราส่วนของ

สารละลายเคราตินร้อยละ 1 ต่อสารละลายเจลาตินร้อยละ 1 คือ 1:1, 1:2 และ 2:1 ลักษณะของฟิล์มผสมที่เตรียมได้ แสดงในรูปที่ 2.26 ทั้งฟิล์มเคราตินและฟิล์มเจลาตินจะมีผิวเรียบ แต่เมื่อปริมาณเคราตินในฟิล์มผสมเพิ่มขึ้นผิวของฟิล์มจะยิ่งขรุขระ (roughness) ขึ้น เนื่องจากความไม่เข้ากันของเคราตินและเจลาตินจึงทำให้เกิดการแยกตัวขึ้น



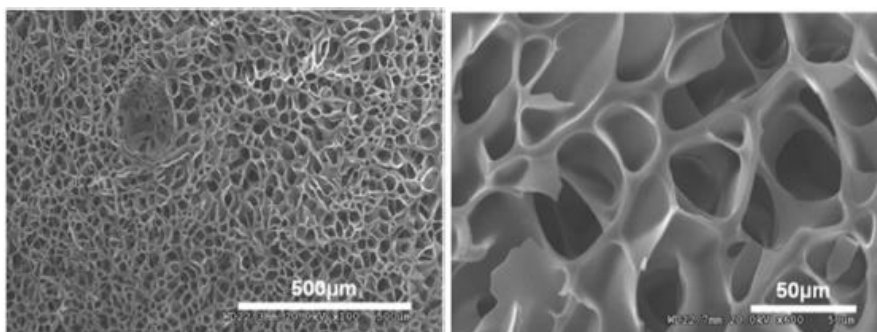
รูปที่ 2.26 ภาพ SEM ของฟิล์มผสมที่เตรียมได้ a) ฟิล์มเคราติน ฟิล์มผสมมีอัตราส่วนเคราตินต่อเจลาติน b) 1:1 c) 1:2 d) 2:1 และ e) ฟิล์มเจลาติน [52]

ในปี ค.ศ. 2011 Reichl และคณะ [53] ได้สกัดเคราตินจากเส้นผมมนุษย์ด้วยวิธี Shindai [48] เพื่อนำมาขึ้นรูปฟิล์มแผ่นเล็บ (nail plate) สำหรับการศึกษานำส่งยา (drug permeation) โดยขึ้นรูปฟิล์มเคราตินในแม่พิมพ์รูปวงแหวน และมีการเติมกลีเซอรอล (glycerol) เพื่อทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ (plasticizers) เปรียบเทียบกับแผ่นเล็บที่ทำจากกิบเท้าสัตว์ ดังแสดงในรูปที่ 2.27 โดยฟิล์มแผ่นเล็บเคราตินมีสีน้ำตาลอ่อนและมีความโปร่งใสมากกว่าแผ่นเล็บที่ทำจากกิบเท้าสัตว์ นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการดูดซึมความชื้นน้อยกว่าแผ่นเล็บจริงอีกด้วย



รูปที่ 2.27 a) การเตรียมฟิล์มแผ่นเล็บเคราติน b) ฟิล์มแผ่นเล็บเคราติน และ c) แผ่นเล็บที่ทำจากกิบเท้าสัตว์ [53]

ในปี ค.ศ. 2012 Richter และคณะ [8] ได้สกัดเคราตินจากเส้นผมมนุษย์โดยมีไทโอไกลโคลิกแอซิดเป็นสารรีดิวซ์ [49] เพื่อนำมาขึ้นรูปเป็นฟองน้ำไฮโดรเจลเคราติน (keratin sponge) โดยการเตรียมไฮโดรเจลที่มีอัตราส่วนของแอลฟาเคราตินต่อแกมมาเคราติน คือ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 และ 50:50 จากนั้นนำไฮโดรเจลไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วระเหิดน้ำออกด้วยเทคนิค lyophilization ได้ฟองน้ำไฮโดรเจลที่มีรูพรุน ดังแสดงในรูปที่ 2.28



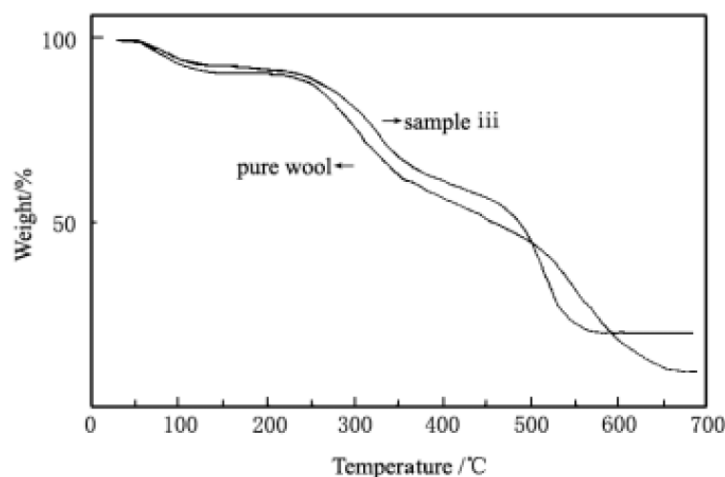
รูปที่ 2.28 ลักษณะของฟองน้ำไฮโดรเจลเคราตินที่กำลังขยายต่างกัน [8]

2.7.3 งานวิจัยเกี่ยวกับสมบัติทางความร้อนของเคราติน และการประยุกต์เคราตินเป็นสารหน่วงไฟ

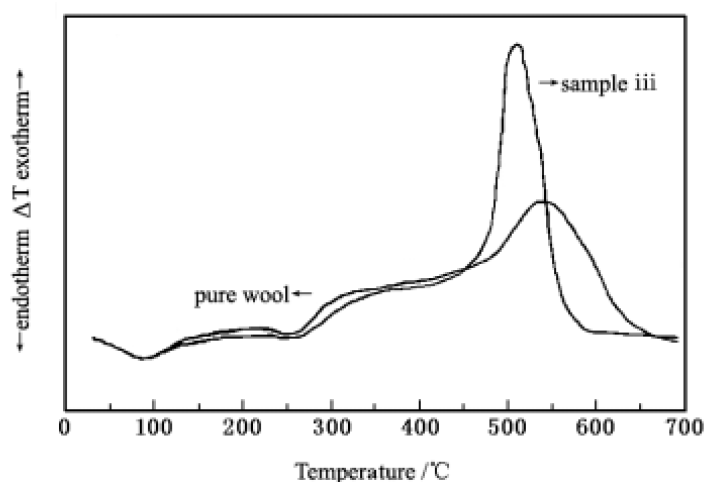
ปัจจุบันมีการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางความร้อนของเคราติน และการประยุกต์เคราตินเป็นสารหน่วงไฟมีน้อยมาก เนื่องจากนิยมนำเคราตินมาประยุกต์ในด้านวัสดุชีวภาพซึ่งวัสดุเหล่านี้มักไม่ต้องผ่านการใช้งานหรือขึ้นรูปด้วยความร้อน

ในปี ค.ศ. 2003 Tian และคณะ [28] ได้ศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของผ้าขนสัตว์ที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารหน่วงไฟ 2 ชนิดที่มีการเสริมกัน คือ โพแทสเซียมเฮกซะฟลูออโรไททาเนต (potassium hexafluorotitanate, K_2TiF_6) และกรดไดคาร์บอกซิลิก (dicarboxylic acid) โดยการสลายตัวทางความร้อนของผ้าขนสัตว์ที่ไม่ได้ตกแต่งหน่วงไฟ และผ้าขนสัตว์ที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วย K_2TiF_6 ต่อกกรดไดคาร์บอกซิลิกในอัตราส่วน 1:1 แสดงในรูปที่ 2.29 และ 2.30 โดยทั้งผ้าขนสัตว์ที่ไม่ได้ตกแต่งหน่วงไฟและตกแต่งหน่วงไฟมีรูปแบบการสลายตัวทางความร้อนที่เหมือนกัน คือ มีการสลายตัว 3 ชั้น โดยชั้นแรกเป็นการกำจัดความชื้นในเส้นใย เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 120-160 องศาเซลเซียส ชั้นที่ 2 เป็นการสลายตัวทางความร้อน (pyrolysis) โดยพันธะไฮโดรเจนในสายโซ่เคราตินจะถูกกรบกวน และพันธะไดซัลไฟด์ในโครงสร้างจะถูกแยกออก ทำให้มีการสลายตัวและปลดปล่อยแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ และแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกมา เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 220-400

องศาเซลเซียส โดยผ้าขนสัตว์ที่ตกแต่งห่วงไฟมีการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า และมีการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าผ้าขนสัตว์ที่ไม่ได้ตกแต่งห่วงไฟ ดังนั้น K_2TiF_6 และกรดไดคาร์บอกซิลิก จะเกิดกลไกการห่วงไฟแบบ Condensed phase คือทำให้ผ้าขนสัตว์ที่เกิดการเผาไหม้สลายตัวที่อุณหภูมิต่ำลง ขั้นที่ 3 มีการปลดปล่อยความร้อนออกสู่ระบบ (exothermic reaction) ซึ่งเป็นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของชาร์ (char oxidation reaction) เพื่อสร้างชาร์ โดยที่ขั้นนี้ผ้าขนสัตว์ที่ตกแต่งห่วงไฟมีอัตราการสลายตัวทางความร้อนสูงมาก เพื่อเกิดปฏิกิริยานี้อย่างรวดเร็ว ทำให้การเผาไหม้สิ้นสุด (569 องศาเซลเซียส) ที่อุณหภูมิต่ำกว่าผ้าขนสัตว์ที่ไม่ได้ตกแต่งห่วงไฟ (628 องศาเซลเซียส) นอกจากนี้ ผ้าขนสัตว์ที่ตกแต่งห่วงไฟจะมีค่า LOI (36.0) สูงกว่าผ้าขนสัตว์ที่ไม่ได้ตกแต่งห่วงไฟ (26.0) อีกด้วย

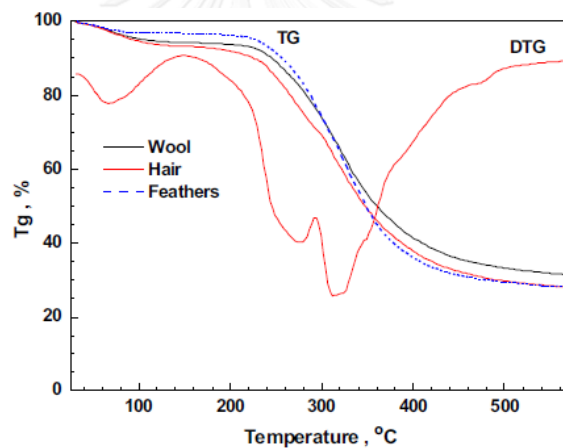


รูปที่ 2.29 เปรียบเทียบ TGA เทอร์โมแกรมของผ้าขนสัตว์ที่ไม่ได้ตกแต่งห่วงไฟ และผ้าขนสัตว์ที่ตกแต่งห่วงไฟด้วย K_2TiF_6 ต่อกรดไดคาร์บอกซิลิกในอัตราส่วน 1:1 [28]

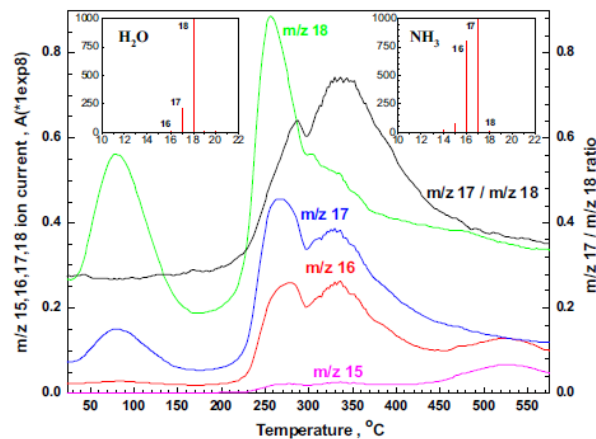


รูปที่ 2.30 เปรียบเทียบ DTG เทอร์โมแกรมของผ้าขนสัตว์ที่ไม่ได้ตกแต่งห่วงไฟ และผ้าขนสัตว์ที่ตกแต่งห่วงไฟด้วย K_2TiF_6 ต่อกรดไดคาร์บอกซิลิกในอัตราส่วน 1:1 [28]

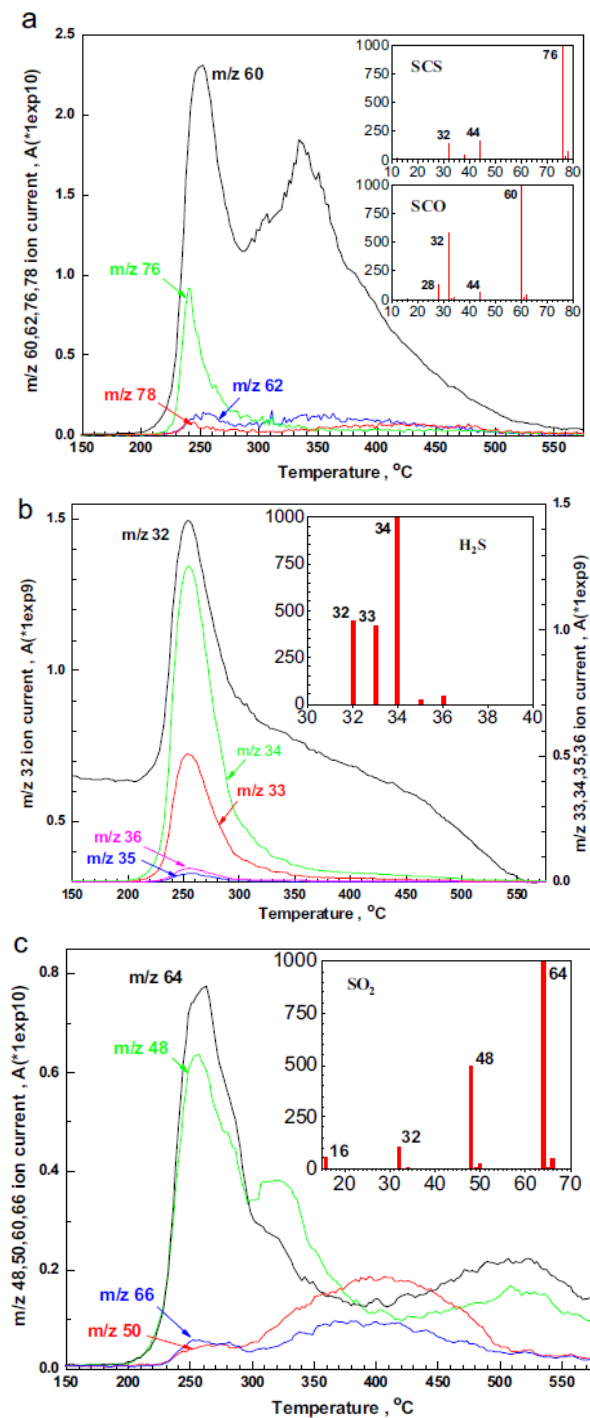
ในปี ค.ศ. 2011 Brebu และ Spiridon [15] ได้ศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของขยะเคราติน 3 ชนิด คือ ขนแกะ เส้นผมมนุษย์ และขนไก่ โดยการสลายตัวทางความร้อนของเคราตินแสดงในรูปที่ 2.31 ขยะเคราตินทั้ง 3 ชนิดมีรูปแบบการสลายตัวทางความร้อนเหมือนกัน คือ มีการสลายตัว 2 ชั้น โดยชั้นแรกเป็นการกำจัดความชื้นเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 120 องศาเซลเซียส ชั้นที่ 2 จะเป็นการสลายตัวของโครงสร้างเคราตินเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 150-600 องศาเซลเซียส โดยขนแกะจะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิสูงสุดประมาณ 180 องศาเซลเซียส ในขณะที่เส้นผมและขนไก่เริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 155 องศาเซลเซียส การวิเคราะห์แก๊สที่ปลดปล่อยออกมาขณะขยะเคราตินสลายตัวด้วยความร้อนวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TG-FTIR/MSD แสดงในรูปที่ 2.32 และ 2.33 พบว่าขณะเส้นผมเกิดการสลายตัว การปลดปล่อยน้ำเกิดที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส การปลดปล่อยแก๊สไนโตรเจนเกิด 2 ชั้น คือ ที่อุณหภูมิ 220-300 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 300-450 องศาเซลเซียส การปลดปล่อยแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดที่อุณหภูมิ 255 องศาเซลเซียส และการปลดปล่อยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เกิดที่อุณหภูมิ 253-260 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.31 TGA เทอร์โมแกรมของขยะเคราติน [15]



รูปที่ 2.32 การปลดปล่อยน้ำและแก๊สแอมโมเนียขณะสลายตัวของเส้นผม [15]



รูปที่ 2.33 การปลดปล่อยสารอนินทรีย์ที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบขณะสลายตัวของเส้นผม [15]

ส่วนการประยุกต์ใช้งานคราตินเป็นสารหน่วงไฟมีการศึกษาวิจัยน้อยมาก ในปี ค.ศ. 2002 ธนาวัฒน์ และคณะ [54] ได้ศึกษาผลของคราตินที่สกัดจากขนของสัตว์ปีกที่นำมาใช้เป็นสารหน่วงไฟสำหรับผ้าฝ้าย โดยสกัดคราตินด้วยตัวทำละลายที่มียูเรียความเข้มข้น 8 โมลาร์ เป็นสารทำลายพันธะไฮโดรเจน และ 2-เมอร์แคปโทเอทานอลความเข้มข้น 125 มิลลิโมลาร์ เป็นสารรีดิวซ์ ที่อุณหภูมิ 60

องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ได้ปริมาณคราตินร้อยละ 69.30 จากการทดสอบการหน่วงไฟทั้งในแนวตั้งและแนว 45 องศา พบว่า ผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยคราตินมีการหน่วงไฟเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายคราตินเพิ่มขึ้น และเปลวไฟสามารถดับได้ด้วยตัวเองเมื่อนำแหล่งกำเนิดไฟออก นอกจากนั้นค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดยังมีค่าเพิ่มขึ้น (จาก 27.5 เป็น 30) เมื่อความเข้มข้นของสารละลายคราตินเพิ่มขึ้น

2.7.4 งานวิจัยเกี่ยวกับการตกแต่งหน่วงไฟ

2.7.4.1 งานวิจัยเกี่ยวกับสารหน่วงไฟที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ

ในปี ค.ศ. 2009 Gaan และคณะ [55] ได้ศึกษาผลของสารประกอบไนโตรเจนต่อการสลายตัวทางความร้อนของผ้าฝ้าย โดยใช้สารเติมแต่ง (additive) 3 ชนิดที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ คือ ยูเรีย กัวนิตินคาร์บอเนต และเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ ตกแต่งลงบนผ้าฝ้ายด้วยวิธีการจุ่มอัด (padding) ผลการทดสอบการสลายตัวทางความร้อนของผ้าฝ้าย แสดงดังตารางที่ 2.8 พบว่า ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารประกอบไนโตรเจนทั้ง 3 ชนิดมีค่า LOI ใกล้เคียงกัน (LOI=19-21) และมีค่าใกล้เคียงกับผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ตกแต่ง (LOI=19) โดยการปลดปล่อยแก๊สติดไฟยากของสารประกอบไนโตรเจนไม่สามารถเพิ่มการหน่วงไฟของผ้าฝ้ายได้ เมื่อได้รับความร้อนยูเรียจะสลายตัวอย่างรวดเร็ว และปลดปล่อยแก๊สแอมโมเนียและแก๊สติดไฟยากอื่น ๆ ออกมาเป็นจำนวนมาก ในขณะที่เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์จะเสริมการสร้างชาร์ของผ้า และกัวนิตินคาร์บอเนตจะแสดงพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนทั้งการปลดปล่อยแก๊สและการสร้างชาร์

ตารางที่ 2.8 ผลการทดสอบการสลายตัวทางความร้อนของผ้าฝ้าย [55]

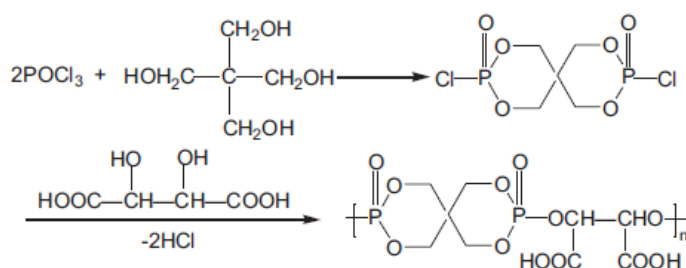
Percentage of N content on fabric (%)	Urea		Guanidine carbonate		Melamine formaldehyde	
	LOI	Char (%)	LOI	Char (%)	LOI	Char (%)
0.9	19	10.63	19	8.89	19	11.94
1.8	19	8.55	19	13.08	19	16.64
3.6	19	8.21	19.5	15.40	19	23.20
7.2	19.5	9.05	21	18.25	19.8	23.80

Untreated cotton fabric had a LOI of 19; char formed from fabrics treated with additives (at 500 °C).

2.7.4.2 งานวิจัยเกี่ยวกับสารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ

ในปี ค.ศ. 2012 Liu และคณะ [56] ได้สังเคราะห์สารหน่วงไฟสำหรับผ้าฝ้ายที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ คือ poly (1,2-dicarboxyl ethylene spirocyclic pentaerythritol bisphosphonate) (PEPBP) แสดงในรูปที่ 2.34 ผลการทดสอบหาค่า LOI และทดสอบการหน่วงไฟในแนวตั้ง แสดงในตารางที่ 2.9 พบว่า ค่า LOI ของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย PEPBP ร้อยละ 21.2 จะมีค่า

สูง (LOI=33.8) และมีค่ามากกว่าผ้าฝ้ายที่ไม่ตกแต่ง (LOI=21.2) เมื่อทดสอบการหน่วงไฟในแนวตั้ง ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย PEPBP จะมีการลามไฟลดลง ความยาวชาร์ลดลง และไม่มีลูกติดไฟเมื่อเอาแหล่งต้นกำเนิดไฟออก



รูปที่ 2.34 การสังเคราะห์ PEPBP [56]

ตารางที่ 2.9 ประสิทธิภาพการหน่วงไฟของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย PEPBP [56]

Add-on%	LOI	Vertical burning test		
		After-flame time	After-glow time	Char length
0	19.4	N.R. ^a	N.R.	T.D. ^b
5.0	25.7	0 s	1.8 s	14.4 cm
11.7	28.4	0 s	0 s	10.2 cm
21.2	33.8	0 s	0 s	7.1 cm

^a N.R. denotes no record due to the complete destruction of the fabrics.

^b T.D. denotes the case that fabrics were completely destroyed during the test.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.7.4.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการเสริมกันของสารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสและไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ

ในปี ค.ศ. 2005 Charuchinda และคณะ [57] ได้ศึกษาการปรับปรุงให้ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารประกอบโซเดียมพอลิฟอสเฟตร่วมกับไคโตซานให้มีสมบัติหน่วงไฟที่คงทนต่อการซักล้าง โดยสูตรการตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารประกอบโซเดียมพอลิฟอสเฟตร่วมกับไคโตซาน แสดงในตารางที่ 2.10 เมื่อตกแต่งร่วมกับสารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ ไคโตซานจะสร้างชั้นฟิล์มเคลือบผิวผ้าไว้ จึงสามารถปรับปรุงสมบัติหน่วงไฟให้คงทนต่อการซักล้างได้ โดยค่า LOI ของผ้าฝ้ายที่ผ่านตกแต่งหน่วงไฟก่อนและหลังซักล้าง แสดงในตารางที่ 2.11 นอกจากนี้ไคโตซานมีองค์ประกอบของไนโตรเจนในกรดอะมิโนจึงสามารถเกิดการเสริมกันของสารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบอีกด้วย

ตารางที่ 2.10 สูตรการตกแต่งห่วงไฟด้วยสารประกอบโซเดียมพอลิฟอสเฟตร่วมกับไคโตซาน [57]

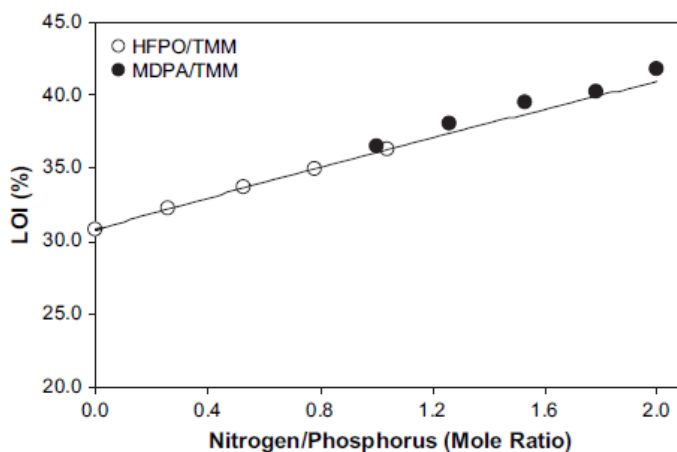
Formulation	Sodium polyphosphate (wt%)	Chitosan (wt%)	Acetic acid %(v/v)	Crosslinking agent (wt% based on chitosan)	Potassium persulphate (wt% based on chitosan)
UT	0	0	0	0	0
PP	5	0	0	0	0
C	0	2	8	0	0
PPC	5	2	8	0	0
PPCX1	5	2	8	0.5	5
PPCX2	5	2	8	1	5
PPCX3	5	2	8	1.5	5
PPCX4	5	2	8	2	5

ตารางที่ 2.11 ค่า LOI ของผ้าฝ้ายที่ผ่านตกแต่งห่วงไฟก่อนและหลังซักล้าง [57]

Formulation	Before washing		After washing	
	% add-on	LOI	% add-on	LOI
UT	0	17.1	0	17.1
PP	4.45	22.1	1.46	17.2
C	2.91	17.2	1.09	17.2
PPC	7.32	20.1	3.31	18.7
PPCX1	7.49	20.3	3.96	19.0
PPCX2	7.68	20.7	4.48	19.3
PPCX3	7.62	20.6	4.45	19.1
PPCX4	7.45	20.4	3.54	18.9

ในปี ค.ศ. 2007 Wu และ Yang [58] ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพการห่วงไฟของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารห่วงไฟ 2 ชนิด คือ เอ็น-เมทิลออลโตเมทิลฟอสโฟโนโพรพิโอนาไมด์ (N-Methylol dimethylphosphonopropionamide, MDPA) ซึ่งเป็นสารห่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสและไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ และไฮดรอกซี-ฟังก์ชันนอล ออร์กาโนฟอสฟอรัส โอลิโกเมอร์ (hydroxy-functional organophosphorus oligomer, HFPO) ซึ่งเป็นสารห่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ พบว่าผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารห่วงไฟ MDPA จะมีค่า LOI สูงกว่าผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารห่วงไฟ HFPO เมื่อตกแต่งด้วยสารละลายที่มีปริมาณฟอสฟอรัสเท่ากัน แสดงในรูปที่ 2.35

ดังนั้นการที่ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารหน่วงไฟ MDPA มีค่า LOI สูงกว่า แสดงถึงประสิทธิภาพการต้านไฟของสารหน่วงไฟที่มีการเสริมกันของสารหน่วงไฟประเภทฟอสฟอรัสและไนโตรเจน



รูปที่ 2.35 ค่า LOI ของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย MDPA และ HFPO [58]

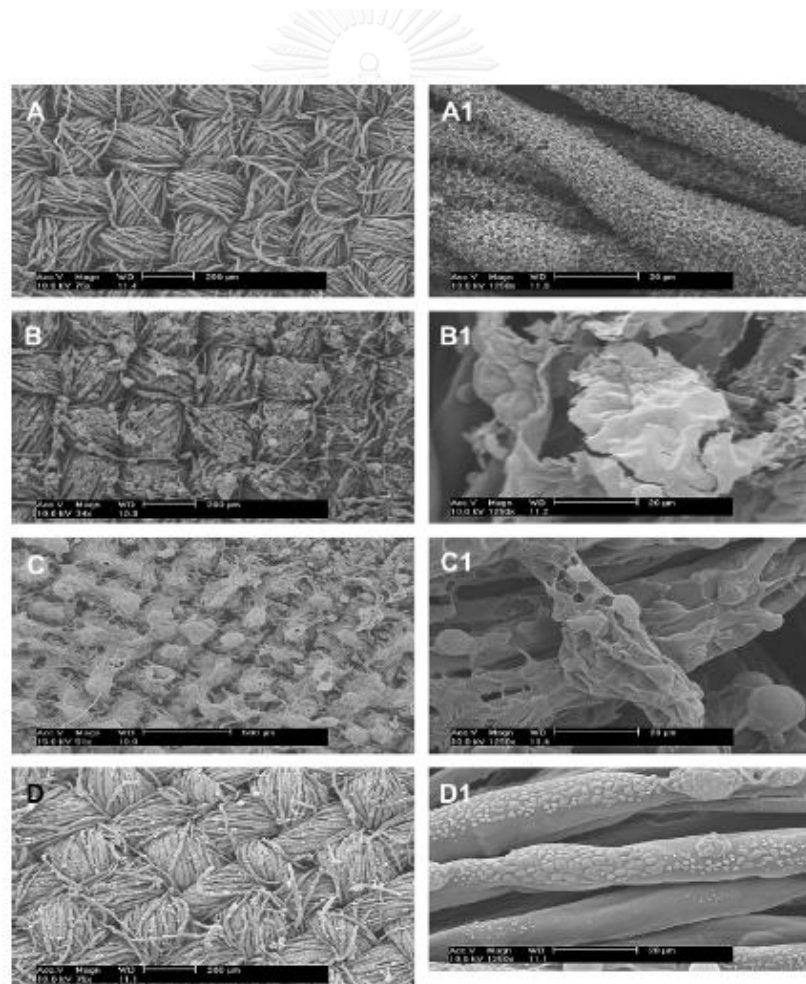
ในปี ค.ศ. 2008 Gaan และคณะ [59] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการหน่วงไฟของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารเติมแต่ง 3 ชนิดที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ คือ ยูเรีย (UR) กัวนิตินคาร์บอนเนต (GC) และเมลามีนฟอรัลดีไฮด์ (MF) ร่วมกับไตรบิวทิลฟอสเฟต (TBP) ซึ่งเป็นสารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ ตกแต่งลงบนผ้าฝ้ายด้วยวิธีการจุ่มอัด (padding) ค่า LOI และปริมาณชาร์ (CC) ของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วย TBP ร่วมกับสารเติมแต่งไนโตรเจน แสดงในตารางที่ 2.12 พบว่า ค่า LOI เพิ่มขึ้น (จาก 25 เป็น 27) เมื่อเพิ่มปริมาณของไนโตรเจนในสารเติมแต่งเพิ่มขึ้น แสดงถึงพฤติกรรมเสริมกันของฟอสฟอรัสและไนโตรเจนในการหน่วงไฟ ผิวของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วย TBP ร่วมกับสารเติมแต่งไนโตรเจน หลังการทดสอบ LOI แสดงในรูปที่ 2.36 พบว่า หลังการเผาไหม้ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย TBP อย่างเดียว จะมีลักษณะคล้ายขนพองฟูปกคลุมทั่วเส้นใยเกิดจากการสลายตัวของเส้นใย เนื่องจาก TBP มีการเกิดชั้นชาร์ไม่เพียงพอที่จะปกคลุมเส้นใย ผิวเส้นใยจึงถูกทำลาย ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งร่วมกับสารเติมแต่งไนโตรเจนหลังการเผาไหม้จะมีลักษณะผิวต่างกัน คือ ผ้าที่ตกแต่งด้วย TBP ร่วมกับ UR จะมีการพองออกมาพอง (bubble) บนเส้นใย เนื่องจากยูเรียจะสลายตัวอย่างรวดเร็ว และปลดปล่อยแก๊สแอมโมเนียและแก๊สติดไฟยากอื่น ๆ ออกมาเป็นจำนวนมากทำให้เกิดพองขึ้น ในขณะที่ผ้าที่ตกแต่งด้วย TBP ร่วมกับ MF จะเกิดชาร์ขึ้นมาปกคลุมเส้นใย เนื่องจากเมลามีนฟอรัลดีไฮด์จะเสริมการสร้างชาร์ของฝ้าย และผ้าที่ตกแต่งด้วย TBP ร่วมกับ GC จะเกิดทั้งพองและชาร์ขึ้นมาปกคลุมเส้นใย เนื่องจากกัวนิตินคาร์บอนเนตจะแสดงพฤติกรรมสลายตัวทางความร้อนทั้งการปลดปล่อยแก๊สและการสร้างชาร์

ตารางที่ 2.12 ค่า LOI และปริมาณชาร์ของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วย TBP ร่วมกับ สารเติมแต่งไนโตรเจน [59]

% P:% N on the cotton	Urea		Guanidine carbonate		Melamine formaldehyde	
	LOI	CC	LOI	CC	LOI	CC
2:0.9	25.3	6.4	25.3	7.5	25.5	9.6
2:1.8	26.0	6.9	26.0	9.3	25.8	15.3
2:3.6	26.5	7.5	26.5	11.0	26.0	22.1
2:7.2	27.5	11.7	27.5	14.7	26.0	26.8

Untreated cotton fabric had a LOI of 19 whereas TBP-treated cotton fabric with 2% phosphorus and no nitrogen had a LOI of 24.5.

^a Char content of treated cotton obtained from TGA data at 500 °C.



รูปที่ 2.36 สัณฐานวิทยาของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟหลังการทดสอบ LOI A)/A1) TBP B)/B1) TBP ร่วมกับ UR C)/C1) TBP ร่วมกับ GC และD)/D1) TBP ร่วมกับ MF โดยมี ปริมาณฟอสฟอรัสร้อยละ 2 และไนโตรเจนร้อยละ 3.6 [59]

ในปี ค.ศ. 2012 Nam และคณะ [60] ได้ศึกษาผลของยูเรียต่อการสลายตัวทางความร้อนของผ้าฝ้าย โดยการตกแต่งตกแต่งยูเรียที่มีปริมาณไนโตรเจนต่างกันร่วมกับไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP) ที่มีการควบคุมปริมาณฟอสฟอรัส (D1, %P=0.8% และ D2, %P=1.6%) โดยความยาวซาร์และค่า LOI ของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งด้วยยูเรียร่วมกับ DAP แสดงดังตารางที่ 2.13 เมื่อปริมาณยูเรียเพิ่มขึ้น (ไนโตรเจนเพิ่มขึ้น) ความยาวซาร์จะลดลง และค่า LOI จะสูงขึ้น และมีค่าสูงกว่าผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย DAP หรือยูเรียเพียงอย่างเดียว แสดงว่ายูเรียสามารถเสริมสมบัติทนวงไฟของผ้าฝ้ายได้ ซึ่งจะเห็นการเสริมกันที่ชัดเจนเมื่อตกแต่งร่วมกับ DAP ปริมาณน้อย (%P=0.8%)

ตารางที่ 2.13 ความยาวซาร์และค่า LOI ของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งด้วยยูเรียร่วมกับ DAP [60]

Sample name	Char length (cm) ^a	LOI (%) ^b
Untreated	—	21.6 (0.5) ^c
D1	29.7 (1.7) ^c	26.0 (0.3)
D1U1	19.5 (2.4)	27.0 (0.3)
D1U2	10.4 (0.7)	30.3 (0.5)
D1U3	8.6 (1.0)	33.3 (0.5)
D1U4	8.5 (0.5)	35.7 (0.7)
D2	9.7 (0.8)	31.8 (0.8)
D2U2	8.8 (0.8)	33.3 (0.6)
D2U3	7.6 (0.7)	35.5 (0.8)
D2U4	7.1 (0.6)	37.0 (1.0)
U4	—	22.6 (0.5)

^a Obtained by vertical flammability test (ASTM D6413-99).

^b Measured according to ASTM D2863-00.

^c Standard deviation of six samples.

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 ขอบเขตการทดลอง

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 การสกัดสารสกัดหยาบเคราตินจากเส้นผมมนุษย์ที่ภาวะต่าง ๆ ด้วยสารรีดิวิซ์ 3 ชนิด คือ 2-เมอร์แคปโทเอทานอล ไทโอไกลโคลิกแอซิด (pH 2 และ pH 8.5) และ 1,2-อีเทนไดโธล จากนั้นวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี น้ำหนักแห้งและปริมาณโปรตีนของสารสกัดหยาบเคราติน เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสกัดสารสกัดหยาบเคราตินจากเส้นผมมนุษย์

ส่วนที่ 2 การตกแต่งห่วงไฟผ้าทอ 3 ชนิด คือ ผ้าฝ้าย ผ้าผสมพอลิเอสเตอร์ และผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ด้วยเคราติน 2 ชนิด ได้แก่ เคราตินทางการค้า และสารสกัดหยาบเคราตินที่เตรียมได้จากการทดลองส่วนที่ 1 ร่วมกับแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตทางการค้า 2 ชนิด คือ Exolit AP422 และ Exolit AP423 โดยวิธีการเคลือบแบบปาดอย่างผ่านสกรีน จากนั้นนำผ้าทอที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟมาศึกษาสมบัติการห่วงไฟในแนวตั้งตามมาตรฐาน UL-94 สมบัติทางความร้อน ทดสอบหาค่า LOI (Limiting oxygen index) องค์ประกอบทางเคมี ลักษณะสัณฐานวิทยา และวัดสีของผ้าทอที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟ นอกจากนี้ยังทดสอบความแข็งตึงดัดโค้ง และความคงทนแรงดึง เพื่อประเมินคุณภาพและสมบัติห่วงไฟของผ้าทอภายหลังการนำไปใช้งานทั่วไป

3.2 วัสดุและสารเคมี

1) ผ้าทอ 3 ชนิด คือ ผ้าฝ้าย ผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ และผ้าพอลิเอสเตอร์

1.1) ผ้าฝ้าย เป็นผ้าทอลายขัด (plain weave) มีน้ำหนักผ้าต่อพื้นที่ 160 กรัมต่อตารางเมตร จากบริษัทบุญช่วยอุตสาหกรรมฟอกย้อม ก่อนการตกแต่งห่วงไฟนำผ้าฝ้ายไปซักด้วยสารซักล้างมาตรฐานความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที

1.2) ผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ เป็นผ้าทอผสมระหว่างพอลิเอสเตอร์ร้อยละ 80 และฝ้ายร้อยละ 20 ทอด้วยเครื่องแจ็กการ์ด (Jacquard) โดยมีด้ายยืนเป็นฝ้ายสลับกับพอลิเอสเตอร์ และมีด้ายพุ่งเป็นพอลิเอสเตอร์ มีน้ำหนักผ้าต่อพื้นที่ 236 กรัมต่อตารางเมตร จากบริษัท ปากน้ำเท็กซ์ไทล์ จำกัด ก่อนการตกแต่งห่วงไฟนำผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ไปซักด้วยสารซักล้างมาตรฐานความ

เข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที

1.3) ผ้าพอลิเอสเตอร์ เป็นผ้าทอด้วยเครื่องแจ็กการ์ด (Jacquard) มีน้ำหนักผ้าต่อพื้นที่ 160 กรัมต่อตารางเมตร จากบริษัทปากน้ำเท็กซ์ไทล์ จำกัด ก่อนการตกแต่งห่วงไฟนำผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ไปซักด้วยสารซักล้างมาตรฐานความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที

2) เคราตินทางการค้า เป็นเคราตินผงสีขาวที่สกัดจากเส้นผมมนุษย์ที่ผ่านการปรับสภาพให้สามารถละลายน้ำได้ มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 และมีปริมาณซิสทีน (cysteine) ร้อยละ 14 จากบริษัท Xi'an Aladdin Biological Technology Co., Ltd.

3) ขยะเส้นผมมนุษย์ จากร้านตัดผมในกรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

4) เฮกเซน (n-hexane) เกรดคุณภาพเชิงวิเคราะห์ จากบริษัท Duksan Pure Chemical Co., Ltd.

5) ยูเรีย (urea) เกรดคุณภาพเชิงวิเคราะห์ จากบริษัท Sigma-Aldrich Co. LLC.

6) ไทโอยูเรีย (thiourea) เกรดคุณภาพเชิงวิเคราะห์ จากบริษัท Sigma-Aldrich Co. LLC.

7) 2-เมอร์แคปโทเอทานอล (2-mercaptoethanol) เกรดคุณภาพเชิงวิเคราะห์ จากบริษัท Sigma-Aldrich Co. LLC.

8) ไทโอไกลโคลิกแอซิด (thioglycolic acid) เกรดคุณภาพเชิงวิเคราะห์ จากบริษัท Sigma-Aldrich Co. LLC.

9) 1,2-อีเทนไดไทโธล (1,2-ethanedithiol) เกรดคุณภาพเชิงวิเคราะห์ จากบริษัท Sigma-Aldrich Co. LLC.

10) ทริส-ไฮดรอกซีเมทิลอะมีโนมีเทน (Tris (hydroxymethyl) aminomethane) เกรดคุณภาพเชิงวิเคราะห์ จากบริษัท Sigma-Aldrich Co. LLC.

11) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide) เกรดคุณภาพเชิงวิเคราะห์ จากบริษัท Ajax Finechem

12) โปรตีนมาตรฐาน BSA (Bovine Serum Albumin, BSA) ความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 95 (agarose gel electrophoresis) จากบริษัท Sigma-Aldrich Co. LLC.

13) สีย้อมโปรตีน (Coomassie Brilliant Blue R-250) เกรดสำหรับการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ จากบริษัท Sigma-Aldrich Co. LLC.

14) เอทานอล (ethanol) ความเข้มข้นร้อยละ 99.8 เกรดคุณภาพเชิงวิเคราะห์ จากบริษัท T.C. Sathaporn Group Ltd., Part.

15) แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตทางการค้า (ammonium polyphosphate) มี 2 ชนิด คือ

15.1) Exolit AP422 เป็นแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตที่ไม่ละลายน้ำ มีขนาดอนุภาค ประมาณ 50 ไมโครเมตร [61] ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท Clariant

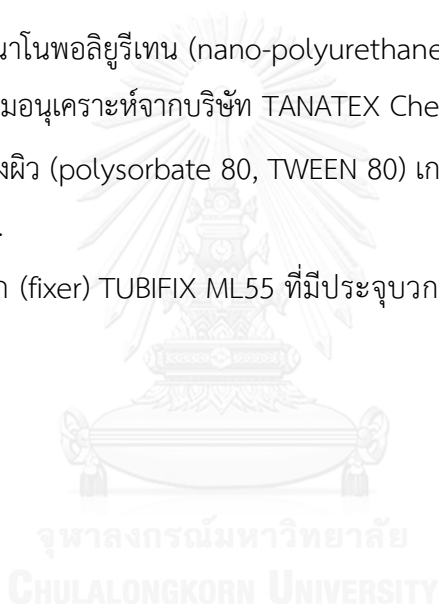
15.2) Exolit AP423 เป็นแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตที่ไม่ละลายน้ำ มีขนาดอนุภาค ประมาณ 20 ไมโครเมตร [62] ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท Clariant

16) สารข้นสังเคราะห์ (synthetic thickener) TP-150 ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท V.P.C. Group

17) สารยึดชนิดนาโนพอลิยูรีเทน (nano-polyurethane binder) ที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 100 นาโนเมตร ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท TANATEX Chemicals

18) สารลดแรงตึงผิว (polysorbate 80, TWEEN 80) เกรดคุณภาพเชิงวิเคราะห์ จากบริษัท Sigma-Aldrich Co. LLC.

19) สารช่วยผนึก (fixer) TUBIFIX ML55 ที่มีประจุบวก ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท V.P.C. Group



3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อเครื่องมือ/อุปกรณ์	รุ่น/รายละเอียด	บริษัทผู้ผลิต
เครื่องตัดกระดาษ	รุ่น 8004	Ningbo Deli Import & Export Co., Ltd., China
ถุงไดอะไลซิส (dialysis tubing)	Spectra/Por MWCO 6,000-8,000	SPECTRUM LABORATORIES, INC, U.S.
กระดาษกรอง	Whatman เบอร์ 4	GE Healthcare Limited, UK
เตาให้ความร้อนที่สามารถปั่นผสมสาร (hot plate stirrer)	IKA C-MAG HS 7	IKA Works GmbH & Co., China
ปั๊มลมสุญญากาศ (rotary vacuum pump)	รุ่น IM115D อัตราการดูด 1.8L/min	IMPERIAL-AIRMAN- IMTECH Vacuum, China
เครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge machine)	รุ่น 2420	Kubota, Japan
เครื่องปั่นกวนผสมแบบ Homogenizer	รุ่น T 18 basic Ultra Turrax IKA	IKA Works GmbH & Co., China
เครื่องอบไอร้อนแห้ง (stenter)	รุ่น H-TS-3	Rapid, Labortex Co. Ltd., Taiwan
เครื่องทดสอบการเผาไหม้ (Horizontal Vertical Flame Chamber)	รุ่น HVUL2	ATLAS Material Testing Technology LLC, U.S.
กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM)	OM BH2-UMA	OLYMPUS, U.S.
เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)	รุ่น Specord S 100	Analytik Jena AG, Germany

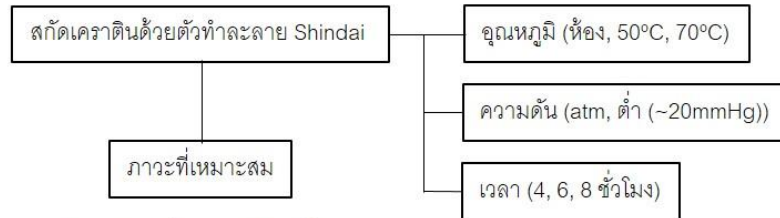
ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

ชื่อเครื่องมือ/อุปกรณ์	รุ่น/รายละเอียด	บริษัทผู้ผลิต
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)	รุ่น JSM 5410 LV	JEOL Ltd., Japan
เครื่องแยกน้ำหนักรวมเคลื่อนด้วยไฟฟ้า (Electrophoresis Chambers)	Mini-PROTEAN® Tetra Handcast Systems	Bio-Rad Laboratories, Inc., U.S.
เครื่องวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคแบบเลเซอร์ (Laser Particle Size Distribution Analyzer, LPSDA)	Mastersizer 2000	Malvern, UK
เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer: FTIR)	Nicolet 6700 FT-IR Spectrometer	Thermo Fisher Scientific Inc., U.S.
เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (Thermogravimetric Analyzer, TGA)	รุ่น SDTA851e	Mettler Toledo, Switzerland
เครื่องวัดความหนืด (Brookfield Viscometer)	รุ่น LVT	Brookfield Engineering Laboratories., Inc., U.S.
เครื่องวัดสี (Reflectance Spectrophotometer)	รุ่น Macbeth color – eye 7000	X-Rite, Incorporated, U.S.
เครื่องทดสอบความคงทนต่อแรงดึง (Universal tensile testing machine)	รุ่น LR 100K	LLOYDL, Fareham, UK
เครื่องวัดสภาพแข็งตึงดัดโค้ง (Fixed-angle flexometer)	รุ่น M00-38	SDL ATLAS, UK
เครื่องซักผ้า (Gyrowash)	รุ่น 815/20	James H. Heal Co., Ltd., UK

3.4 การดำเนินงานวิจัย

ส่วนที่ 1 การสกัดสารสกัดหยาบเคราตินจากเส้นผมมนุษย์

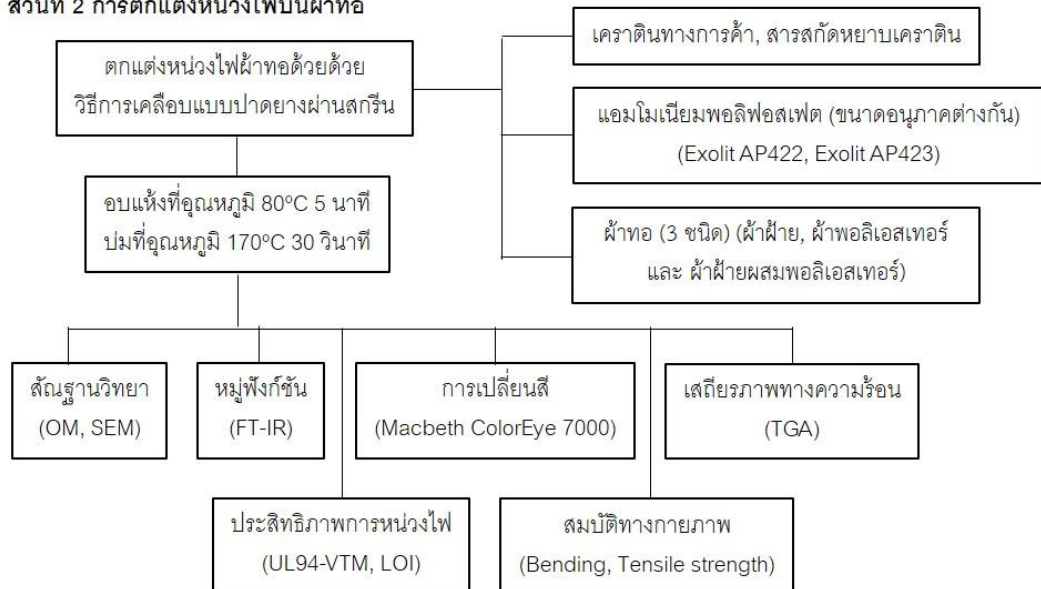
1.1 การทดสอบเบื้องต้นเพื่อหาภาวะที่เหมาะสม



1.2 การสกัดเคราตินเพื่อหาสารรีดิวซ์ที่เหมาะสม



ส่วนที่ 2 การตกแต่งหนังไฟบนผ้าทอ



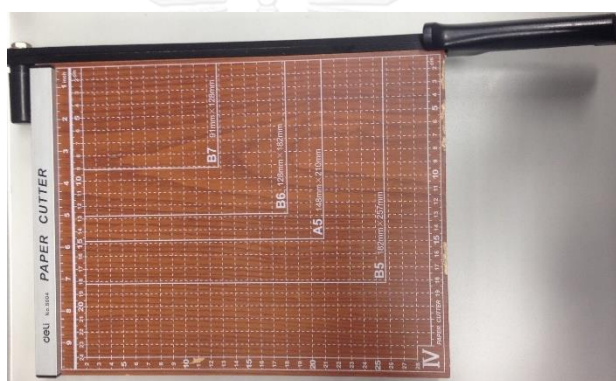
รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.4.1 การสกัดเคราตินจากเส้นผมมนุษย์

3.4.1.1 การเตรียมขยะเส้นผมมนุษย์

การเตรียมขยะเส้นผมมนุษย์ตามวิธีของ Nakamura และคณะ [48] และ Hill และคณะ [6]

- 1) ทำความสะอาดขยะเส้นผมมนุษย์จากร้านตัดผมด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ
- 2) อบเส้นผมที่ทำความสะอาดแล้วที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนกระทั่งเส้นผมแห้ง
- 3) ตัดเส้นผมให้มีความยาวไม่เกิน 5 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องตัดกระดาษ ดังแสดงในรูปที่ 3.2
- 4) กำจัดไขมันเคลือบผิวชั้นนอกเส้นผมที่ผ่านการตัดแล้วด้วยเฮกเซนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นตั้งทิ้งไว้ในตู้ดูดควัน เพื่อให้เฮกเซนระเหยจนกระทั่งเส้นผมแห้ง



รูปที่ 3.2 เครื่องตัดกระดาษที่นำมาใช้ตัดเส้นผม

3.4.1.2 การเตรียมสารละลายที่ใช้ในการสกัดเคราติน

ในงานวิจัยนี้เตรียมสารละลายที่ใช้ในการสกัดเคราตินตามวิธีของ Nakamura และคณะ [48] ซึ่งประกอบด้วยสารละลายยูเรียความเข้มข้น 5 โมลาร์ ไทโอยูเรียความเข้มข้น 2.6 โมลาร์ และ 2-เมอร์แคปโทเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้มีค่า pH 8.5 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ แล้วใช้ ทริส-ไฮดรอกซีเมทิลอะมิโนมีเทน ความเข้มข้น 25 มิลลิโมลลาร์ เป็นสารบัฟเฟอร์ (สารละลาย Shindai) โดยในงานวิจัยนี้เตรียมสารละลายที่ใช้ในการสกัดเคราตินที่มีสารรีดิวซ์แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ 2-เมอร์แคปโทเอทานอล ไทโอไกลโคลิกแอซิด และ 1,2-อีเทนไดไทอล โดยควบคุมปริมาณยูเรีย ไทโอยูเรีย และสารรีดิวซ์ของสารละลายตามการเตรียมสารละลาย Shindai ดังนี้

1) สารละลายที่ไม่มีสารรีดิวซ์ (UT)

เตรียมสารละลายยูเรียความเข้มข้น 5 โมลาร์ และไทโอยูเรียความเข้มข้น 2.6 โมลาร์ ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้มีค่า pH 8.5 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ แล้วใช้ทริส-ไฮดรอกซีเมทิลอะมิโนมีเทนความเข้มข้น 25 มิลลิโมลลาร์ เป็นสารบัฟเฟอร์

2) สารละลายที่มี 2-เมอร์แคปโทเอทานอล เป็นสารรีดิวซ์ (Shindai)

เตรียมสารละลายยูเรียความเข้มข้น 5 โมลาร์ ไทโอยูเรียความเข้มข้น 2.6 โมลาร์ และ 2-เมอร์แคปโทเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้มีค่า pH 8.5 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ แล้วใช้ ทริส-ไฮดรอกซีเมทิลอะมิโนมีเทนความเข้มข้น 25 มิลลิโมลลาร์ เป็นสารบัฟเฟอร์

3) สารละลายที่มี ไทโอไกลโคลิกแอซิด ที่มีค่า pH 2 เป็นสารรีดิวซ์ (TA2)

เตรียมสารละลายยูเรียความเข้มข้น 5 โมลาร์ ไทโอยูเรียความเข้มข้น 2.6 โมลาร์ และ ไทโอไกลโคลิกแอซิด ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จะได้สารละลายที่มีค่า pH 2 แล้วใช้ทริส-ไฮดรอกซีเมทิลอะมิโนมีเทนความเข้มข้น 25 มิลลิโมลลาร์ เป็นสารบัฟเฟอร์

4) สารละลายที่มี ไทโอไกลโคลิกแอซิด ที่มีค่า pH 8.5 เป็นสารรีดิวซ์ (TA8.5)

เตรียมสารละลายยูเรียความเข้มข้น 5 โมลาร์ ไทโอยูเรียความเข้มข้น 2.6 โมลาร์ และ ไทโอไกลโคลิกแอซิด ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้มีค่า pH 8.5 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ แล้วใช้ทริส-ไฮดรอกซีเมทิลอะมิโนมีเทนความเข้มข้น 25 มิลลิโมลลาร์ เป็นสารบัฟเฟอร์

5) สารละลายที่มี 1,2-อีเทนไดไทออล เป็นสารรีดิวซ์ (EDT)

เตรียมสารละลายยูเรียความเข้มข้น 5 โมลาร์ ไทโอยูเรียความเข้มข้น 2.6 โมลาร์ และ 1,2-อีเทนไดไทออลความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้มีค่า pH 8.5 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ แล้วใช้ทริส-ไฮดรอกซีเมทิลอะมิโนมีเทนความเข้มข้น 25 มิลลิโมลลาร์ เป็นสารบัฟเฟอร์

3.4.1.3 การสกัดเคราตินที่ภาวะต่างๆ

ในงานวิจัยนี้ประยุกต์ภาวะที่ใช้สกัดเคราตินจากวิธีของ Nakamura และคณะ [48] ซึ่งสกัดเคราตินด้วย Shindai ภายใต้ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยในงานวิจัยนี้ศึกษาผลของความดัน (ความดันต่ำ และความดันบรรยากาศ) อุณหภูมิ (อุณหภูมิห้อง

50 และ 70 องศาเซลเซียส) และเวลา (4, 24, 48, 72 และ 84 ชั่วโมง) ที่มีต่อปริมาณและคุณภาพคราตินที่สกัดด้วยสารรีดิวซ์ต่างกัน

1) นำสารละลายที่เตรียมในข้อ 3.4.1.2 และเส้นผมที่กำลังจัดไขมันแล้วมาผสมกันในอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 20:1 จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิห้อง 50 และ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4, 24, 48, 72 และ 84 ชั่วโมงตามลำดับ ภายใต้ความดันบรรยากาศและความดันต่ำ พร้อมทั้งกวนของผสมด้วยอัตราเร็วสม่ำเสมอตลอดเวลา หลังจากนั้นทิ้งของผสมไว้ให้มีอุณหภูมิลดลงมาที่อุณหภูมิห้อง

2) นำของผสมที่ได้ไปตกตะกอนด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นกรองแยกตะกอนด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4

3) นำสารละลายที่ได้ซึ่งคือ สารละลายสารสกัดหยาบคราติน ไปทำให้บริสุทธิ์ด้วยเทคนิคไดอะไลซิส โดยใช้ถุงไดอะไลซิส MWCO 6,000-8,000 Da เปลี่ยนน้ำกลั่นจนค่า pH ของสารละลายสารสกัดหยาบคราตินเท่ากับ pH 7

4) นำสารสกัดหยาบคราตินที่กระจายตัวในน้ำกลั่นไปทำให้แห้งด้วยเทคนิคพรีชูดราย

3.4.2 การวิเคราะห์และทดสอบคราติน

3.4.2.1 การหาปริมาณของสารสกัดหยาบคราตินด้วยวิธีการหาน้ำหนักแห้ง

1) สกัดสารสกัดหยาบคราตินด้วยสารรีดิวซ์ที่แตกต่างกันที่ภาวะต่าง ๆ โดยทำการสกัดสารสกัดหยาบคราตินซ้ำภาวะละ 3 ครั้ง ตามขั้นตอนการสกัดสารสกัดหยาบคราตินในข้อ 3.4.1.3

2) นำผงสารสกัดหยาบคราตินจากภาวะต่าง ๆ มาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก จากนั้นหาค่าเฉลี่ยของน้ำหนักผงสารสกัดหยาบคราตินที่ได้จากการสกัดซ้ำภาวะละ 3 ครั้ง

3) คำนวณหาปริมาณของสารสกัดหยาบคราติน จากสมการที่ (3.1)

$$\text{ปริมาณสารสกัดหยาบคราติน} = \frac{W_2}{W_1} \times 100 \dots \dots \dots (3.1)$$

W_1 หมายถึง น้ำหนักแห้งของเส้นผมที่ใช้ในการสกัดคราติน (กรัม)

W_2 หมายถึง น้ำหนักแห้งของสารสกัดหยาบคราตินที่สกัดได้ที่ภาวะต่าง ๆ (กรัม)

3.4.2.2 การหาปริมาณโปรตีนในคราดินด้วยวิธีแบรดฟอร์ด (Bradford method)

คราดินเป็นโปรตีนชนิดหนึ่งซึ่งมีพันธะเพปไทด์ในโครงสร้าง ทำให้สามารถทำปฏิกิริยากับสีย้อมโปรตีน (Coomassie blue) ให้สารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำเงิน ซึ่งสามารถหาปริมาณโปรตีนได้โดยวัดความเข้มของสีน้ำเงินที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ดังรูปที่ 3.3 ที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน ตามวิธีวิเคราะห์โปรตีนแบบแบรดฟอร์ด [63]

1) การเตรียมสีย้อมโปรตีนแบรดฟอร์ด (Bradford's reagent)

1.1) นำสีย้อมโปรตีน (Coomassie blue) น้ำหนัก 10 มิลลิกรัม ละลายในเอทานอล ปริมาตร 5 มิลลิตรโดยใส่ในขวดสีชา ปั่นจนจนสีย้อมโปรตีนละลายหมดประมาณ 2-3 ชั่วโมง

1.2) เติมกรดฟอสฟอริกความเข้มข้นร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 10 มิลลิตร กวนให้เข้ากัน กรองสีย้อมโปรตีนที่ไม่ละลายด้วยกระดาษกรอง จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตรเป็น 100 มิลลิตร เก็บในขวดสีชา

2) การสร้างกราฟมาตรฐาน

2.1) เติมสีย้อมโปรตีนลงในโปรตีนมาตรฐาน (BSA) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

2.2) เขย่าสารละลายทุกหลอดให้เข้าเป็นเนื้อเดียว ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 10 นาที

2.3) นำไปวัดการดูดกลืนแสง (absorbance) ในเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร ทำซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง หาค่าเฉลี่ย

2.4) นำค่าความเข้มข้นของโปรตีนมาตรฐานและค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปสร้างกราฟมาตรฐาน

3) การหาค่าการดูดกลืนแสงของโปรตีนตัวอย่างด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

3.1) เตรียมสารละลายคราดินที่ความเข้มข้นต่าง ๆ โดยการกระจายตัวในน้ำกลั่น

3.2) เติมสีย้อมโปรตีนลงในสารละลายคราดินที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

3.3) เขย่าสารละลายทุกหลอดให้เข้าเป็นเนื้อเดียว ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 10 นาที

3.4) นำไปวัดการดูดกลืนแสง (absorbance) ในเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร ทำซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง หาค่าเฉลี่ย

3.5) นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปเทียบกับกราฟมาตรฐานเพื่อหาปริมาณโปรตีนในสารสกัดหยาบคราดิน

3.6) คำนวณหาปริมาณโปรตีนในสารสกัดหยาบคราดินทั้งหมด ดังแสดงในภาคผนวก



รูปที่ 3.3 เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

3.4.2.3 การหาน้ำหนักโมเลกุลของเคราตินด้วยเทคนิคการแยกทางไฟฟ้าโดยใช้เจล แบบ โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต-พอลิอะครีลาไมด์อิเล็กโตรฟอรีซิส (Sodium Dodecyl Sulfate-Polyacrylamide Gel Electrophoresis (SDS-PAGE))

เคราตินจากเส้นผมมนุษย์เป็นเคราตินชนิดแอลฟาเคราติน ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 40-60 kDa และยังมีเคราตินชนิดแกมมาเคราตินเป็นเมทริกซ์โปรตีนยึดโครงสร้างของแอลฟาเคราติน ประกอบอยู่ด้วย ซึ่งแกมมาเคราตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 10-20 kDa การหาน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนสามารถทำได้โดยใช้เทคนิคการแยกทางไฟฟ้าโดยใช้เจลแบบ SDS-PAGE โดยสารตัวอย่างจะจับกับโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (sodium dodecyl sulfate (SDS)) ในสารละลายบัฟเฟอร์ ทำให้โปรตีนในสารตัวอย่างมีประจุลบ และมีโครงสร้างยึดตัวออกเป็นแท่ง โดยโปรตีนที่มีประจุลบทุกสายจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวก ทำให้สามารถแยกโปรตีนได้ด้วย ความแตกต่างของขนาด (น้ำหนักโมเลกุล) โดยโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากจะเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อย จึงสามารถมองเห็นแถบสีของโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างกันเมื่อย้อมด้วยสีย้อมโปรตีน (Coomassie blue) ตามวิธีวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนด้วยเทคนิคการแยกทางไฟฟ้าโดยใช้เจลแบบ SDS-PAGE [64]

1) เตรียมสารละลายต่าง ๆ เพื่อใช้ในการเตรียมเจล

1.1) สารละลาย A (solution A)

สารละลายมอนอเมอร์อะครีลาไมด์ทางการค้าความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

1.2) สารละลาย B (solution B)

1.2.1) เตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ทริส-ไฮโดรคลอริกแอซิดความเข้มข้น 2 โมลาร์ที่มีค่า pH 8.8 โดยใช้ทริส-ไฮดรอกซีเมทิลอะมิโนมีเทนน้ำหนัก 24.2 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 30 มิลลิลิตร แล้วปรับค่า pH ให้มีค่า 8.8 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

1.2.2) นำสารละลายบัฟเฟอร์ทริส-ไฮโดรคลอริกแอซิดความเข้มข้น 2 โมลาร์ที่มีค่า pH 8.8 ที่เตรียมได้จากข้อ 1.2.1 ปริมาตร 75 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายโซเดียมโดดีซิลซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 4 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

1.3) สารละลาย C (solution C)

1.3.1) เตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ทริส-ไฮโดรคลอริกแอซิดความเข้มข้น 1 โมลาร์ที่มีค่า pH 6.8 โดยใช้ทริส-ไฮดรอกซีเมทิลอะมิโนมีเทนน้ำหนัก 12.1 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 30 มิลลิลิตร แล้วปรับค่า pH ให้มีค่า 6.8 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

1.3.2) นำสารละลายบัฟเฟอร์ทริส-ไฮโดรคลอริกแอซิดความเข้มข้น 1 โมลาร์ที่มีค่า pH 6.8 ที่เตรียมได้จากข้อ 1.3.1 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายโซเดียมโดดีซิลซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 4 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

1.4) เตรียมสารละลายบัฟเฟอร์

โดยใช้ทริส-ไฮดรอกซีเมทิลอะมิโนมีเทนน้ำหนัก 3 กรัม โกลซีนน้ำหนัก 14.4 กรัม และโซเดียมโดดีซิลซัลเฟต 1 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 300 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตรเป็น 1 ลิตร

2) เตรียมสารละลายผสมเพื่อเตรียมเจล

เจลที่ใช้ในวิธีนี้จะเป็นเจลแผ่น (slab gel) ซึ่งประกอบด้วยเจล 2 ส่วน คือ เจลส่วนบน (stacking gel) และเจลส่วนล่าง (separating gel) โดยการเตรียมสารละลายเพื่อเตรียมเจลทั้ง 2 ส่วน โดยมีความเข้มข้นของเจลส่วนบน ร้อยละ 5 และความเข้มข้นของเจลส่วนล่าง ร้อยละ 14 ตามวิธีการเตรียมเจลในงานวิจัยของ Reichl [51] แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สูตรการเตรียมสารละลายเพื่อเตรียมเจลส่วนบนและเจลส่วนล่าง

สาร	เจลส่วนบน (stacking gel)		เจลส่วนล่าง (separating gel) มอนอเมอร์อะคริลาไมด์ร้อยละ 14	
	1 เจล	2 เจล	1 เจล	2 เจล
สารละลาย A	0.160 ml	0.320 ml	1.316 ml	2.632 ml
สารละลาย B	-	-	1.250 ml	2.500 ml
สารละลาย C	0.250 ml	0.500 ml	-	-
น้ำกลั่น	0.850 ml	1.750 ml	1.750 ml	3.490 ml
10% APS*	12.5 μ l	25 μ l	50 μ l	100 μ l
TEMED**	1.5 μ l	3 μ l	5 μ l	10 μ l

10% APS* – สารละลายแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

TEMED** – เตตระเมทิลเอทิลีนไดเอมีน

3) เตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการแยกน้ำหนักโมเลกุล

3.1) โปรตีนอ้างอิง (protein marker)

เตรียมสารละลายโปรตีนอ้างอิง 4 ไมโครลิตรต่อสีย้อม 1 ไมโครลิตร

3.2) เคราตินทางการค้า

เตรียมสารละลายเคราตินทางการค้าความเข้มข้น 8 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร เนื่องจากเคราตินทางการค้าสามารถละลายในน้ำได้ดีจึงไม่ต้องใช้ตัวทำละลายช่วยในการละลาย จากนั้นนำไปสั่นในเครื่องโซนิคเท (sonicator) ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาทีจากนั้นเตรียมสารละลายเคราตินทางการค้า 15 ไมโครลิตรต่อสีย้อม 3.75 ไมโครลิตร

3.3) สารสกัดหยาบเคราติน

ความเข้มข้นของสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดจากภาวะต่าง ๆ จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณโปรตีนที่มีในสารสกัดหยาบเคราติน

3.3.1) สารละลายที่ไม่มีสารรีดิวซ์

เตรียมสารละลายสารสกัดหยาบเคราตินความเข้มข้น 3, 5, 7 และ 10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ในตัวทำละลายที่มี 2-เมอร์แคปโทเอทานอล ความเข้มข้นร้อยละ 20 ในสารละลายบัฟเฟอร์ จากนั้น

นำไปสั่นในเครื่องโซนิกเคทที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเตรียมสารละลายสารสกัดหยาบเคราะห์ดิน 15 ไมโครลิตรต่อสีย้อม 3.75 ไมโครลิตร

3.3.2) สารละลายที่มี 2-เมอร์แคปโทเอทานอล เป็นสารรีดิวซ์ (Shindai)

เตรียมสารละลายสารสกัดหยาบเคราะห์ดินความเข้มข้น 5, 10, 15 และ 20 มิลลิกรัมต่อ มิลลิลิตร ในตัวทำละลายที่มี 2-เมอร์แคปโทเอทานอล ความเข้มข้นร้อยละ 20 ในสารละลายบัฟเฟอร์ จากนั้นนำไปสั่นในเครื่องโซนิกเคทที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเตรียมสารละลายสารสกัด หยาบเคราะห์ดิน 15 ไมโครลิตรต่อสีย้อม 3.75 ไมโครลิตร

3.3.3) สารละลายที่มีไทโธไกลโคลิกแอซิด ที่มีค่า pH 2 เป็นสารรีดิวซ์

เตรียมสารละลายสารสกัดหยาบเคราะห์ดินความเข้มข้น 30, 35, 40 และ 45 มิลลิกรัมต่อ มิลลิลิตร ในตัวทำละลายที่มี 2-เมอร์แคปโทเอทานอล ความเข้มข้นร้อยละ 20 ในสารละลายบัฟเฟอร์ จากนั้นนำไปสั่นในเครื่องโซนิกเคทที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเตรียมสารละลายสารสกัด หยาบเคราะห์ดิน 15 ไมโครลิตรต่อสีย้อม 3.75 ไมโครลิตร

3.3.4) สารละลายที่มีไทโธไกลโคลิกแอซิด ที่มีค่า pH 8.5 เป็นสารรีดิวซ์

เตรียมสารละลายสารสกัดหยาบเคราะห์ดินความเข้มข้น 10, 15, 20 และ 25 มิลลิกรัมต่อ มิลลิลิตร ในตัวทำละลายที่มี 2-เมอร์แคปโทเอทานอล ความเข้มข้นร้อยละ 50 ในสารละลายบัฟเฟอร์ จากนั้นนำไปสั่นในเครื่องโซนิกเคทที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเตรียมสารละลายสารสกัด หยาบเคราะห์ดิน 15 ไมโครลิตรต่อสีย้อม 3.75 ไมโครลิตร

3.3.5) สารละลายที่มี 1,2-อีเทนไดไทออล เป็นสารรีดิวซ์

เตรียมสารละลายสารสกัดหยาบเคราะห์ดินความเข้มข้น 5, 10, 15 และ 20 มิลลิกรัมต่อ มิลลิลิตร ในตัวทำละลายที่มี 2-เมอร์แคปโทเอทานอล ความเข้มข้นร้อยละ 50 ในสารละลายบัฟเฟอร์ จากนั้นนำไปสั่นในเครื่องโซนิกเคทที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเตรียมสารละลายสารสกัด หยาบเคราะห์ดิน 15 ไมโครลิตรต่อสีย้อม 3.75 ไมโครลิตร

3.4) นำตัวอย่างที่เตรียมได้จากข้อ 3.1, 3.2 และ 3.3 ไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 5 นาที

3) ประกอบแผ่นกระจกสำหรับขึ้นรูปเจล (glass plate) โดยให้กระจกแผ่นสั้นอยู่ข้างหน้า จากนั้นหนีบกระจกทั้ง 2 แผ่นด้วยอุปกรณ์หนีบกระจก นำแผ่นกระจกไปใส่ในอุปกรณ์ขึ้นรูปเจล (castle frame) เติมน้ำกลั่นเพื่อทดสอบการรั่วของแผ่นกระจกที่หนีบไว้ ใส่ฟันทวีแล้วทำเครื่องหมายไว้สำหรับใส่เจลชั้นล่าง ดังรูปที่ 3.4

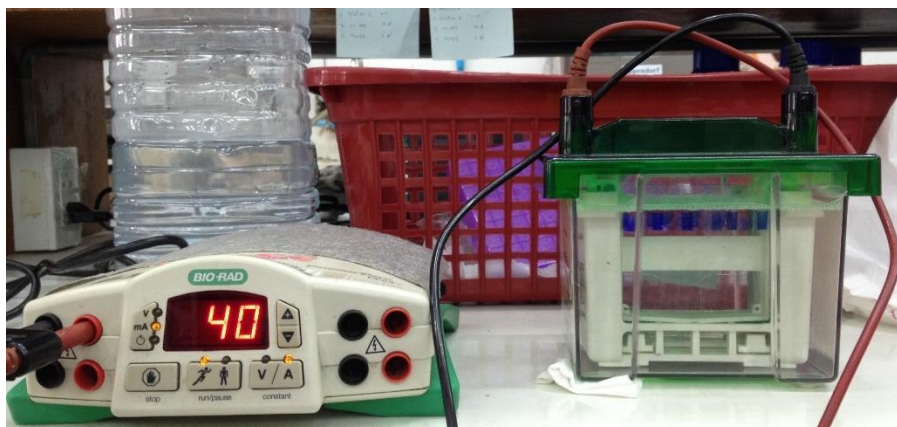


รูปที่ 3.4 การประกอบแผ่นกระจกในอุปกรณ์ขึ้นรูปเจล

4) เตรียมเจลส่วนล่าง (separating gel) ตามตารางที่ 3.2 โดยเติม TEMED หลังสุด เพราะจะทำให้เจลแข็งตัว จากนั้นรีบนำสารละลายผสมเจลส่วนล่างใส่ลงในแผ่นกระจกสำหรับขึ้นรูปเจลที่เตรียมไว้จนถึงระดับที่ทำเครื่องหมายไว้ เติมน้ำกลั่นเพื่อปรับหน้าเจลให้เรียบ ทิ้งไว้ให้เจลเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันจนแข็งตัวประมาณ 1-2 ชั่วโมง

5) เตรียมเจลส่วนบน (stacking gel) ตามตารางที่ 3.2 โดยเติม TEMED หลังสุด จากนั้นรีบนำสารละลายผสมเจลส่วนล่างใส่ลงในแผ่นกระจกสำหรับขึ้นรูปเจลที่เตรียมไว้จนถึงขอบกระจกแผ่นสั้นแล้วรีบเสียบ핀หนี ทิ้งไว้ให้เจลเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันจนแข็งตัวประมาณ 1-2 ชั่วโมง

6) นำแผ่นกระจกออกจากอุปกรณ์ขึ้นรูปเจล แล้วนำไปประกอบในเครื่องแยกน้ำหนักริโมเลกุลโปรตีนด้วยไฟฟ้า (gel-electrophoresis) ดังรูปที่ 3.5 เติมน้ำสารละลายบัฟเฟอร์ที่เตรียมไว้ในข้อ 1.4 นำ핀หนีออกจากเจลส่วนบน จะเกิดช่องว่างตามรอย핀หนีสำหรับใส่ตัวอย่าง



รูปที่ 3.5 การประกอบเครื่องแยกน้ำหนักริโมเลกุลโปรตีนด้วยไฟฟ้า

7) นำตัวอย่างที่เตรียมได้ในข้อ 3.4 มาใส่ในช่องวางพื้นผิวของเจลชั้นบนที่เตรียมไว้ จากนั้นต่อเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้า (power supply) ที่กำลังไฟฟ้า 40 มิลลิแอมแปร์ จนตัวอย่างเคลื่อนที่ลงมาจนสุดเจลส่วนล่าง

8) แกะเจลออกจากกระจกชั้นรูปเจล นำมาแช่ในสารละลายสีย้อมโปรตีน (stain solution) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยสารละลายสีย้อมโปรตีนประกอบด้วยสีย้อมโปรตีน (Coomassie blue) 1 กรัม เมทิลแอลกอฮอล์ 450 มิลลิลิตร กรดแอสซิดิก 100 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น 450 มิลลิลิตร

9) นำเจลที่ได้มาล้างสีย้อมโปรตีนออกด้วยสารละลายชะล้างสีย้อมโปรตีน (destain solution) ซึ่งประกอบด้วยเมทิลแอลกอฮอล์ 100 มิลลิลิตร กรดแอสซิดิก 100 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น 800 มิลลิลิตร จนได้เจลที่แสดงแถบน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนที่ชัดเจน

3.4.2.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเคราตินด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy; FTIR)

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดได้จากภาวะต่างๆเปรียบเทียบกับเคราตินทางการค้า โดยใช้เครื่อง FT-IR ดังรูปที่ 3.6 ใช้โหมดแสงส่องผ่านตั้งแต่ความยาวคลื่น 500-4000 cm^{-1} ความละเอียด 8 cm^{-1} จำนวนครั้งการสแกน 64 ครั้ง



รูปที่ 3.6 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ของบริษัท Thermo Fisher รุ่น Nicolet 6700

3.4.2.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของคราตินด้วยเทคนิค EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของคราตินด้วยเทคนิค EDS เพื่อหาองค์ประกอบธาตุและปริมาณองค์ประกอบธาตุของคราตินที่ได้จากการสกัดด้วยสารรีดิวซ์ต่างชนิดกัน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของ JEOL รุ่น JSM 6400 LV โหมดวิเคราะห์ EDS ดังแสดงในรูปที่ 3.7 เตรียมตัวอย่างโดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างไปเคลือบทองผ่านเครื่อง sputter-coater ใช้ศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ และ spotsize 20 ในการวิเคราะห์ สำหรับงานวิจัยนี้ใช้กำลังขยาย 100, 500 และ 1000 เท่า



รูปที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของบริษัท JEOL., Ltd. รุ่น JSM 6400 LV โหมดวิเคราะห์ EDS

3.4.2.6 การตรวจสอบลักษณะพื้นฐานวิทยาของคราตินด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope; OM)

การตรวจสอบลักษณะพื้นฐานวิทยาของสารสกัดหยาบคราตินในระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงธรรมดาของ OLYMPUS รุ่น OM BH2-UMA ดังแสดงในรูปที่ 3.8 มีกำลังขยาย 10 ถึง 100 เท่า จึงทำให้สามารถมองเห็นรูปร่างและการกระจายตัวของสารสกัดหยาบคราตินเปรียบเทียบกับคราตินทางการค้า สำหรับงานวิจัยนี้ใช้กำลังขยาย 100 เท่า



รูปที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง ของบริษัท OLYMPUS รุ่น OM BH2-UMA

3.4.2.7 การตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของคราตินด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา ผิวของคราติน และความสามารถในการยึดระหว่างคราตินกับผิวผ้าทอ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของ JEOL รุ่น JSM 6400 LV ดังแสดงในรูปที่ 3.9 เตรียมตัวอย่างโดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างไปเคลือบทองผ่านเครื่อง sputter-coater ใช้ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ และ spotsize 20 ในการวิเคราะห์ สำหรับงานวิจัยนี้ใช้กำลังขยาย 100, 500 และ 1000 เท่า



รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของบริษัท JEOL., Ltd. รุ่น JSM 6400 LV

3.4.2.8 การหาขนาดและการกระจายขนาดอนุภาคของคราตินด้วยเทคนิค Laser Particle Size Distribution Analyzer (LPDA)

การหาขนาดอนุภาคเฉลี่ยและการกระจายตัวของคราติน ด้วยเครื่อง Laser Particle Size Distribution Analyzer ของ Malvern รุ่น Mastersizer 2000 ก่อนทำการวิเคราะห์ต้องนำคราตินไปกระจายตัวในน้ำกลั่นโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูง (sonicate) เป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นนำคราตินที่กระจายตัวในน้ำกลั่นมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Laser Particle Size Distribution Analyzer ดังรูปที่ 3.10 โดยใช้ค่า particle refractive index เท่ากับ 1.5 และค่า absorption เท่ากับ 0.1 ในการวิเคราะห์



รูปที่ 3.10 เครื่อง Laser Particle Size Distribution Analyzer ของบริษัท Malvern รุ่น Mastersizer 2000 และหน่วยกระจาย Hydro 2000SM

3.4.2.9 การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของคราตินด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลซิส (Thermogravimetric Analysis; TGA)

การวิเคราะห์หาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของคราติน และผ้าทอที่ตกแต่งห่วงไฟ ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลซิส ของ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA851e ดังแสดงในรูปที่ 3.11 โดยมีอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 20 มิลลิลิตรต่อนาที เริ่มการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ถึง 800 องศาเซลเซียส และมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที



รูปที่ 3.11 เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลซิส ของบริษัท Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA851e

3.4.3 การตกแต่งหนังงไฟผ้าทอด้วยเคราตินร่วมกับแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต ด้วยวิธีการเคลือบแบบปาดยางผ่านสกรีน

3.4.3.1 การตกแต่งหนังงไฟผ้าฝ้าย

3.4.3.1.1 การตกแต่งหนังงไฟผ้าฝ้ายด้วยเคราติน

มีขั้นตอนดังนี้

1) เตรียมสารเคลือบเคราติน (keratin paste) ทั้งเคราตินทางการค้าและสารสกัดหยาบเคราตินตามสัดส่วนในตารางที่ 3.3 โดยสูตรตกแต่งแบ่งเป็น 2 สูตร คือ สูตรเคลือบหนังงไฟที่ไม่มีสารช่วยผนึก และสูตรเคลือบหนังงไฟที่มีสารช่วยผนึกความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

2) ปั่นของผสมจากข้อ 1) ด้วยเครื่องผสมสาร Homogenizer ที่อัตราเร็ว 3200 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปวัดความหนืด

3) นำของผสมที่ได้จากข้อ 2) มาเคลือบผ้าฝ้ายโดยใช้ยางปาดผ่านสกรีนเพื่อควบคุมความหนา แล้วนำผ้าที่ได้มาทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที และบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วินาที เพื่อให้ฟิล์มของสารยีนานาโนพอลิยูรีเทนเกิดการเชื่อมขวาง

ตารางที่ 3.3 สูตรเคลือบหนังไฟฟ้าฝ้ายด้วยเคราติน

สูตร	เคราติน (กรัม)	สารยัด (กรัม)	สารลด แรงตึงผิว (กรัม)	สารขึ้นสังเคราะห์ (10% โดยน้ำหนัก) (กรัม)	น้ำ (กรัม)	รวม (กรัม)
control	-	5	1	30	64	100
K1	1	5	1	30	63	100
K3	3	5	1	30	61	100
K5	5	5	1	30	59	100

3.4.3.1.2 การตกแต่งหนังไฟฟ้าฝ้ายด้วยแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต

มีขั้นตอนดังนี้

1) เตรียมสารเคลือบหนังไฟฟ้าที่ประกอบด้วยแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต 2 ชนิด (Exolit AP422 และ Exolit AP423) ตามสัดส่วนในตารางที่ 3.4 โดยสูตรเคลือบหนังไฟฟ้าแบ่งเป็น 2 สูตร คือ สูตรเคลือบหนังไฟฟ้าที่ไม่มีสารช่วยผนึก และสูตรเคลือบหนังไฟฟ้าที่มีสารช่วยผนึกความเข้มข้น 1 กรัม ต่อลิตร

2) ปั่นของผสมจากข้อ 1) ด้วยเครื่องผสมสาร Homogenizer ที่อัตราเร็ว 3200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปวัดความหนืด

3) นำของผสมที่ได้จากข้อ 2) มาเคลือบผ้าฝ้ายโดยใช้ยางปาดผ่านสกรีนเพื่อควบคุมความหนา แล้วนำผ้าที่ได้มาทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที และบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วินาที เพื่อให้ฟิล์มของสารยัดนาโนพอลิยูรีเทนเกิดการเชื่อมขวาง

ตารางที่ 3.4 สูตรเคลือบหนังไฟด้วยแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต

สูตร	แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (กรัม)	สารยัด (กรัม)	สารลดแรงตึงผิว (กรัม)	สารขึ้นสังเคราะห์ (10% โดยน้ำหนัก) (กรัม)	น้ำ (กรัม)	รวม (กรัม)
control	-	5	1	30	64	100
AP5	5	5	1	30	59	100
AP7	7	5	1	30	57	100
AP9	9	5	1	30	55	100
AP10	10	5	1	30	54	100

3.4.3.1.3 การตกแต่งหนังไฟผ้าฝ้ายด้วยเคราตินร่วมกับแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต มีขั้นตอนดังนี้

1) เตรียมสารเคลือบหนังไฟที่ประกอบด้วยเคราติน (เคราตินทางการค้าและสารสกัดหยาบเคราติน) ร่วมกับแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (Exolit AP422 และ Exolit AP423) ตามสัดส่วนในตารางที่ 3.5 โดยสูตรเคลือบหนังไฟแบ่งเป็น 2 สูตร คือ สูตรเคลือบหนังไฟที่ไม่มีสารช่วยผนึก และสูตรเคลือบหนังไฟที่มีสารช่วยผนึกความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร โดยควบคุมปริมาณสารหนังไฟเท่ากับร้อยละ 10 เนื่องจากเป็นปริมาณที่น้อยที่สุดของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตที่สามารถหนังไฟได้ (จากการทดสอบความสามารถในการหนังไฟของ Exolit AP423) ตามมาตรฐาน UL94-VTM และให้ค่า VTM-0

2) ปั่นของผสมจากข้อ 1) ด้วยเครื่องผสมสาร Homogenizer ที่อัตราเร็ว 3200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปวัดความหนืด

3) นำของผสมที่ได้จากข้อ 2) มาเคลือบผ้าฝ้ายโดยใช้ยางปาดผ่านสกรีนเพื่อควบคุมความหนา แล้วนำผ้าที่ได้มาทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที และบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วินาที เพื่อให้ฟิล์มของสารยัดนาโนพอลิยูรีเทนเกิดการเชื่อมขวาง

ตารางที่ 3.5 สูตรเคลือบหนังไฟด้วยเคราตินร่วมกับแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต

สูตร	สารหน่วงไฟ		สารยึด (กรัม)	สารลด แรงตึงผิว (กรัม)	สารชั้นสังเคราะห์ (10% โดยน้ำหนัก) (กรัม)	น้ำ (กรัม)	รวม (กรัม)
	APP (กรัม)	เคราติน (กรัม)					
control	-	-	5	1	30	64	100
AP9K1	9	1	5	1	30	54	100
AP7K3	7	3	5	1	30	54	100
AP5K5	5	5	5	1	30	54	100

3.4.3.2 การตกแต่งหนังไฟผ้าพอลิเอสเทอร์และผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์

3.4.3.2.1 การตกแต่งหนังไฟผ้าพอลิเอสเทอร์และผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ด้วยเคราติน มีขั้นตอนดังนี้

- 1) เตรียมสารเคลือบทั้งเคราตินทางการค้าและสารสกัดหยาบเคราตินตามสัดส่วนในตารางที่ 3.6 สูตรที่มีสารช่วยพนักความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร
- 2) ปั่นของผสมจากข้อ 1) ด้วยเครื่องผสมสาร Homogenizer ที่อัตราเร็ว 3200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปวัดความหนืด
- 3) นำของผสมที่ได้จากข้อ 2) มาเคลือบผ้าพอลิเอสเทอร์และผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ โดยใช้ยางปาดผ่านสกรีนเพื่อควบคุมความหนา แล้วนำผ้าที่ได้มาทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที และบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วินาที เพื่อให้ฟิล์มของสารยึดนาโนพอลิยูรีเทนเกิดการเชื่อมขวาง

ตารางที่ 3.6 สูตรเคลือบหนังไฟด้วยเคราติน

สูตร	เคราติน (กรัม)	สารยัด (กรัม)	สารลด แรงตึงผิว (กรัม)	สารชั้นสังเคราะห์ (10% โดยน้ำหนัก) (กรัม)	น้ำ (กรัม)	รวม (กรัม)
control	-	5	1	30	64	100
K1	1	5	1	30	63	100
K3	3	5	1	30	61	100
K5	5	5	1	30	59	100

3.4.3.2.2 การตกแต่งหนังไฟผ้าพอลิเอสเทอร์และผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ด้วย
แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต มีขั้นตอนดังนี้

- 1) เตรียมสารเคลือบแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตชนิด Exolit AP423 ตามสัดส่วนในตารางที่ 3.7 สูตรที่มีสารช่วยผนึกความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร
- 2) ปั่นของผสมจากข้อ 1) ด้วยเครื่องผสมสาร Homogenizer ที่อัตราเร็ว 3200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปวัดความหนืด
- 3) นำของผสมที่ได้จากข้อ 2) มาเคลือบผ้าพอลิเอสเทอร์และผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ โดยใช้ยางปาดผ่านสกรีนเพื่อควบคุมความหนา แล้วนำผ้าที่ได้มาทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที และบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วินาที เพื่อให้ฟิล์มของสารยัดนาโนพอลิยูรีเทนเกิดการเชื่อมขวาง

ตารางที่ 3.7 สูตรเคลือบหนังไฟด้วยแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต

สูตร	แอมโมเนียม พอลิฟอสเฟต (กรัม)	สารยัด (กรัม)	สารลด แรงตึงผิว (กรัม)	สารชั้นสังเคราะห์ (10% โดยน้ำหนัก) (กรัม)	น้ำ (กรัม)	รวม (กรัม)
control	-	5	1	30	64	100
AP5	5	5	1	30	59	100
AP7	7	5	1	30	57	100
AP9	9	5	1	30	55	100
AP10	10	5	1	30	54	100

3.4.3.2.3 การตกแต่งหนังงไฟผ้าพอลิเอสเทอร์และผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ด้วย เคราตินร่วมกับแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต มีขั้นตอนดังนี้

1) เตรียมสารเคลือบหนังงไฟที่ประกอบด้วยเคราติน (เคราตินทางการค้าและสารสกัดหยาบเคราติน) ร่วมกับแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตชนิด Exolit AP423 ตามสัดส่วนในตารางที่ 3.8 สูตรที่มีสารช่วยผนึกความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร โดยควบคุมปริมาณสารหนังงไฟเท่ากับร้อยละ 10 เนื่องจากเป็นปริมาณที่น้อยที่สุดของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตที่สามารถหนังงไฟได้ (จากการทดสอบความสามารถในการหนังงไฟของ Exolit AP423) ตามมาตรฐาน UL94-VTM และให้ค่า VTM-0

2) ปั่นของผสมจากข้อ 1) ด้วยเครื่องผสมสาร Homogenizer ที่อัตราเร็ว 3200 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปวัดความหนืด

3) นำของผสมที่ได้จากข้อ 2) มาเคลือบผ้าพอลิเอสเทอร์และผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ โดยใช้ยางปาดผ่านสกรีนเพื่อควบคุมความหนา แล้วนำผ้าที่ได้มาทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที และบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วินาที เพื่อให้ฟิล์มของสารยึดนาโนพอลิยูรีเทนเกิดการเชื่อมขวาง

ตารางที่ 3.8 สูตรเคลือบหนังงไฟด้วยเคราตินร่วมกับแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต

สูตร	สารหนังงไฟ		สารยึด (กรัม)	สารลด แรงตึงผิว (กรัม)	สารชั้นสังเคราะห์ (10% โดยน้ำหนัก) (กรัม)	น้ำ (กรัม)	รวม (กรัม)
	APP (กรัม)	เคราติน (กรัม)					
control	-	-	5	1	30	64	100
AP9K1	9	1	5	1	30	54	100
AP7K3	7	3	5	1	30	54	100
AP5K5	5	5	5	1	30	54	100

3.4.4 การวิเคราะห์และทดสอบผ้าทอที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟ

3.4.4.1 การวัดความหนืดของสารเคลือบห่วงไฟด้วยเครื่อง Brookfield

มีขั้นตอนดังนี้

1) นำสารเคลือบห่วงไฟใส่ในภาชนะที่มีขนาดเหมาะสมกับ Spindle ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เครื่อง Brookfield Viscometer รุ่น LVT ดังรูปที่ 3.12 โดยใช้ความเร็วรอบ 20 รอบต่อนาที ใช้ค่าแฟคเตอร์เท่ากับ 500 วัดความหนืดของสารเคลือบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

2) ติดตั้ง Spindle เข้ากับเครื่อง แล้วจุ่ม Spindle ลงในสารเคลือบ โดยให้ปริมาณสารเคลือบอยู่เหนือรอยบากบนแกน Spindle

3) เปิดเครื่อง Brookfield Viscometer ปลดปล่อยให้ Spindle หมุนจนกระทั่งเข็มชี้สเกลไม่เคลื่อนที่ กดคัลท์ซลงและปิดเครื่อง บันทึกค่าที่อ่านได้จากสเกล และนำค่าที่อ่านได้มาคำนวณความหนืด ดังสมการที่ (3.2)

$$\eta = \text{ค่าที่อ่านได้จากสเกล} \times F \dots \dots \dots (3.2)$$

η = ค่าความหนืดมีหน่วยเป็น cps

F = Scale Factor



รูปที่ 3.12 เครื่อง Brookfield Viscometer รุ่น LVT ของบริษัท Brookfield Engineering Laboratories, Inc.

3.4.4.2 การวัดค่าการเปลี่ยนสีของผ้า

งานวิจัยนี้วัดค่าการเปลี่ยนสีของผ้าทอที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเครื่องวัดสี Macbeth Color-Eye 7000 (X-Rite) ดังแสดงในรูปที่ 3.13 โดยใช้โหมดในการวัดสีดังนี้ ไม่รวมความมันเงา (specular exclude, SPE) รวมแสง UV (UV include) Illuminant D 65 และ 10° Standard observer ทำการทดสอบโดยนำผ้าตัวอย่างมาวัดสีทั้งหมด 3 ตำแหน่ง มีการวัดสีตำแหน่งละ 2 ครั้ง โดยเครื่องวัดสีคำนวณหาค่าเฉลี่ยดัชนีความขาว (CIE whiteness index) และค่าเฉลี่ยดัชนีความเหลือง (Yellowness index, ASTM Method E313) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (3.3) และ(3.4) ตามลำดับ

$$W = Y + 800(0.3138 - x) + 1700(0.3310 - y) \dots \dots \dots (3.3)$$

W = ดัชนีความขาว (CIE whiteness index)

Y = CIE Tristimulus value

x,y = Chromaticity coordinate

$$YIE313 = \frac{100(C_x X - C_z Z)}{Y} \dots \dots \dots (3.4)$$

YIE313 = ดัชนีความเหลือง (Yellowness index, ASTM E313)

X, Y, Z = CIE Tristimulus value

C_x, C_z = เลขสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นกับ Illuminant และ Observer



รูปที่ 3.13 เครื่องวัดสีรุ่น Macbeth Color-Eye 7000 ของบริษัท X-Rite Incorporated

3.4.4.3 การทดสอบประสิทธิภาพในการหน่วงไฟของผ้าทอ

งานวิจัยนี้ทดสอบประสิทธิภาพในการหน่วงไฟของผ้าทอโดยการทดสอบในแนวดิ่งด้วยเครื่อง Horizontal Vertical Flame Chamber ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ตามมาตรฐาน UL94 VTM [44] โดยมีแผ่นสำลี (cotton pad) วางรองใต้ผ้าตัวอย่างขณะทดสอบ เพื่อดูการหลอมหยุดของตัวอย่างขณะเผาไหม้ว่าสามารถทำให้แผ่นสำลีลุกติดไฟได้หรือไม่ โดยผ้าตัวอย่างมีขนาดกว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร และถูกยึดในแนวดิ่งเหนือแหล่งจุดไฟ 20 มิลลิเมตร มีจ่อเปลวไฟครั้งแรกเป็นเวลา 3 วินาที แล้วนำแหล่งจุดไฟออกทันที บันทึกเวลาการลามไฟหลังนำแหล่งกำเนิดไฟออกครั้งแรก (The first afterflame time, t_1) และการหลอมหยุด จากนั้นทดสอบซ้ำอีกครั้งแล้วบันทึกเวลาการลามไฟหลังนำแหล่งกำเนิดไฟออกครั้งที่สอง (The second afterflame time, t_2) และการหลอมหยุด นำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับมาตรฐาน UL94 VTM ดังแสดงในตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 มาตรฐานที่ใช้จัดชั้นความสามารถในการหน่วงไฟ ตามมาตรฐาน UL94 VTM [44]

มาตรฐานที่ใช้วัด	VTM-0	VTM-1	VTM-2
t_1 หรือ t_2 ของแต่ละตัวอย่าง (s)	$\leq 10s$	$\leq 30s$	$\leq 30s$
t_1 บวก t_2 ของทั้ง 5 ตัวอย่างรวมกัน (s)	$\leq 50s$	$\leq 250s$	$\leq 250s$
t_2 บวก t_3 ของแต่ละตัวอย่าง (s)	$\leq 30s$	$\leq 60s$	$\leq 60s$
การลามไฟทั้งแบบมีเปลวไฟและไม่มีเปลวไฟ จนถึงระยะ 125 มม.	No	No	No
สําลึกลับติดไฟจากประกายไฟหรือการหลอมหยุด	No	No	Yes

t_1 คือ ระยะเวลาการลามไฟของตัวอย่าง หลังนำเปลวไฟออก ในครั้งที่ 1 (1st afterflame time)

t_2 คือ ระยะเวลาการลามไฟของตัวอย่าง หลังนำเปลวไฟออก ในครั้งที่ 2 (2nd afterflame time)

t_3 คือ ระยะเวลาการคุแดงของตัวอย่าง หลังการลามไฟดับลง (afterglow time)



รูปที่ 3.14 เครื่อง Horizontal Vertical Flame Chamber ของบริษัท Atlas Material Testing Technology

3.4.4.4 การทดสอบหาค่า Limiting Oxygen Index (LOI)

งานวิจัยนี้ทดสอบหาค่า LOI ของผ้าทอที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟตามมาตรฐาน ASTM D2863-95 ด้วยเครื่อง Limiting oxygen indexer ดังแสดงในรูปที่ 3.15 โดยผ้าตัวอย่างมีขนาดกว้าง 5.2 เซนติเมตร ยาว 16.5 เซนติเมตร สอบเทียบปริมาณแก๊สไนโตรเจนและออกซิเจนตามมาตรฐาน ก่อนการทดสอบ ยึดตัวอย่างผ้ากับเครื่องทดสอบโดยให้ปลายด้านบนอยู่ต่ำกว่าปากครอบแก้วอย่างน้อย 40 มิลลิเมตร ปรับอัตราการไหลของแก๊สในครอบแก้วที่ทดสอบเท่ากับ 15 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที จุดไฟให้มีความยาวเปลวไฟ 6 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปจุดที่ปลายด้านบนของตัวอย่างผ้าเป็นเวลา 5 วินาที แล้วนำหัวจุดไฟออก สังเกตการติดไฟของตัวอย่าง ทดสอบซ้ำจนได้ปริมาณออกซิเจนต่ำสุดที่ทำให้ตัวอย่างเกิดการลุกไหม้อย่างต่อเนื่องตามมาตรฐาน แล้วบันทึกค่า LOI ที่ได้



รูปที่ 3.15 เครื่องทดสอบหาค่า Limiting oxygen indexer ของบริษัท Stanton Redcroft Ltd

3.4.4.5 การทดสอบความทนแรงดึงของผ้าทอ

งานวิจัยนี้ทดสอบความทนแรงดึงของผ้าทอที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟด้วยเครื่อง Universal tensile testing machine (LR 100K, LLOYD, Fareham, UK) ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ตามมาตรฐาน ISO ASTM D5035 : 2011 [66] โดยเตรียมตัวอย่างแบบ cut strip test ผ้าตัวอย่างมีขนาดกว้าง 25 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร ดึงผ้าตัวอย่างจนตัวอย่างขาด ตั้งค่าระยะห่างระหว่างตัวยึด 75 ± 1 มิลลิเมตร อัตราเร็วในการดึง 300 ± 10 มิลลิเมตรต่อนาที ทดสอบซ้ำ 5 ครั้ง หาค่าเฉลี่ยของแรงดึงที่ทำให้ตัวอย่างขาดจะได้ค่าความทนแรงดึง (tensile strength) ของผ้าทอ



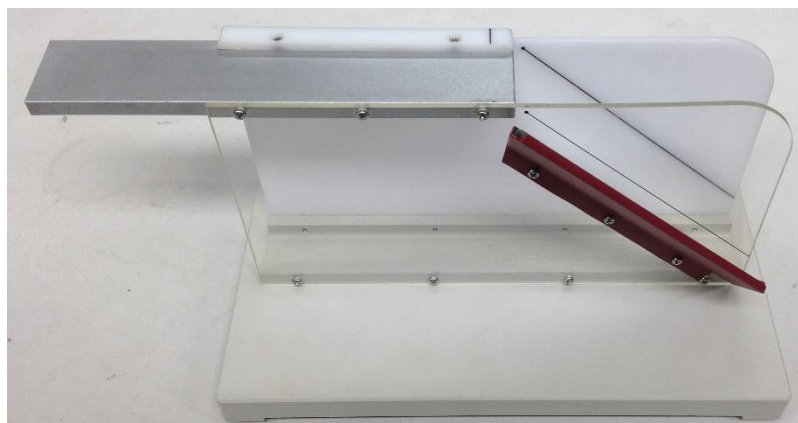
รูปที่ 3.16 เครื่อง Universal tensile testing machine LLOYD ของบริษัท Fareham

3.4.4.6 การทดสอบสภาพแข็งตึงดัดโค้งหรือความแข็งกระด้างของผ้าทอ

งานวิจัยนี้ทดสอบสภาพความแข็งตึงดัดโค้งของผ้าทอที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟตามมาตรฐาน BS 3356:1990 Method for the determination of bending length and flexural rigidity of fabrics [67] ด้วยเครื่องวัดสภาพแข็งตึงดัดโค้งของผ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.17 เตรียมผ้าตัวอย่างขนาดกว้าง 25 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร จากนั้นวางผ้าลงบนแท่นวางโดยให้ปลายผ้าอยู่ที่จุดอ้างอิง นำไม้บรรทัดที่ใช้วัดระยะการโค้งของวงทาบลงบนผ้า จากนั้นเคลื่อนผ้าไปพร้อมกับไม้บรรทัดด้วยอัตราเร็วประมาณ 120 มิลลิเมตรต่อนาที จนปลายผ้าอยู่ในตำแหน่งจุดอ้างอิง อ่านค่าที่วัดได้ด้วยไม้บรรทัด กลับด้านผ้าตัวอย่างแล้วทดสอบแบบเดิม นำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยแล้วคำนวณหาค่าสภาพแข็งตึงดัดโค้งดังสมการที่ (3.5) ถ้าค่าที่คำนวณได้มีค่ามากแสดงว่าผ้าตัวอย่างมีความกระด้างมาก

$$G = 0.1 MC^3 \dots\dots\dots(3.5)$$

- G หมายถึง ค่าสภาพแข็งตึงดัดโค้งของผ้า (มิลลิกรัม·เซนติเมตร)
M หมายถึง น้ำหนักผ้าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (กรัม/ตารางเมตร)
C หมายถึง ความยาวโค้งงอ (เซนติเมตร)



รูปที่ 3.17 เครื่องวัดสภาพแข็งตึงตัดโค้งของผ้า รุ่น M0038 ของบริษัท SDL Atlas Inc.



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การสกัดเคราตินจากเส้นผมมนุษย์

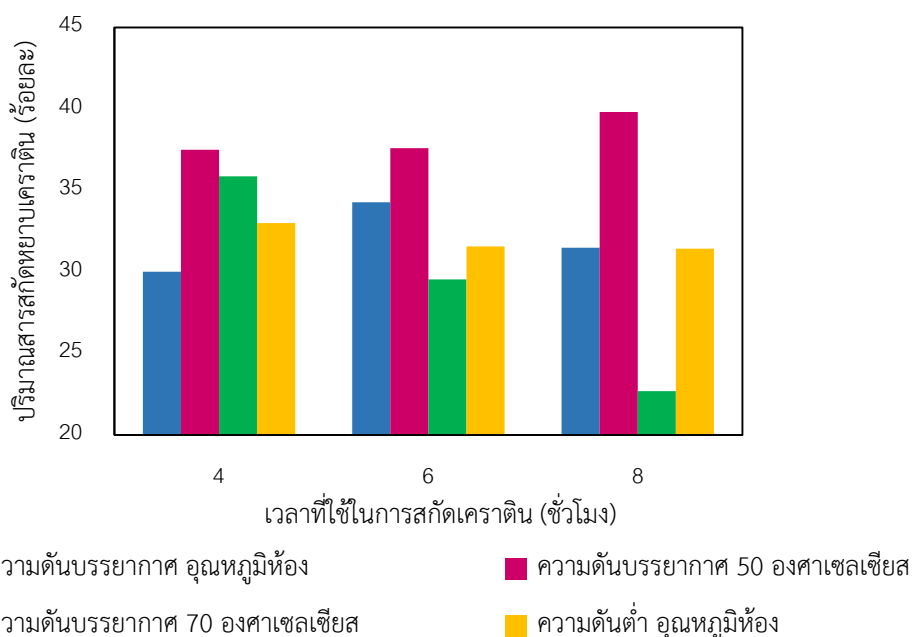
4.1.1 การหาภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเคราตินจากเส้นผมมนุษย์ด้วย Shindai

การสกัดเคราตินจากเส้นผมมนุษย์ด้วย Shindai (ประกอบด้วยยูเรีย ไทโอยูเรีย และ 2-เมอร์แคปโทเอทานอล pH 8.5) ซึ่งเป็นตัวทำละลายที่นิยมใช้ในการสกัดเคราตินจากเส้นผมมนุษย์ จากการศึกษาการสกัดเคราตินจากเส้นผมมนุษย์ด้วย Shindai ของ Nakamura และคณะ [48] พบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเคราตินได้มากที่สุด (ร้อยละ 61) คือ การสกัดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยในงานวิจัยนี้ศึกษาปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินที่ได้จากการสกัดด้วย Shindai ภายใต้ความดันบรรยากาศ และความดันต่ำ ที่อุณหภูมิห้อง 50 และ 70 องศาเซลเซียส แสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินที่ได้จากการสกัดด้วย Shindai ที่ภาวะต่าง ๆ

อุณหภูมิ	ปริมาณสารสกัดหยาบเคราติน (ร้อยละ)					
	ความดันบรรยากาศ			ความดันต่ำ		
	4 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง	8 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง	8 ชั่วโมง
อุณหภูมิห้อง	30.02	34.28	31.49	33.00	31.57	31.43
50°C	37.50	37.59	39.82	10.51	n.d.	n.d.
70°C	35.87	29.55	22.69	9.84	n.d.	n.d.

n.d. คือ ไม่สามารถสกัดได้



รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย Shindai ที่ภาวะต่าง ๆ

4.1.1.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อปริมาณสารสกัดหยาบเคราติน

ปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดภายใต้ความดันบรรยากาศ จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (จากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส) และเวลาที่ใช้ในการสกัดเพิ่มขึ้น (จาก 4-8 ชั่วโมง) ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 เนื่องจากอุณหภูมิและเวลาที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ Shindai สามารถทำลายพันธะไดซัลไฟด์ในโครงสร้างเคราตินในเส้นผมได้มากขึ้น ทำให้เคราตินสามารถละลายออกมาในตัวทำละลายได้มากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการสกัดเคราตินถึง 70 องศาเซลเซียส จะได้ปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินลดลง เมื่อเวลาที่ใช้ในการสกัดเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการสกัดที่อุณหภูมิสูงทำให้สารละลายระเหยไป ของผสมระหว่างเส้นผมกับตัวทำละลายจึงมีความหนืดเพิ่มขึ้น กลายเป็นของผสมที่มีลักษณะเหนียวข้น ตัวทำละลายแทรกซึมเข้าไปทำลายพันธะไดซัลไฟด์ได้ยากขึ้น ทำให้ได้ปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินลดลง เช่นเดียวกับการสกัดเคราตินภายใต้ความดันต่ำ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะได้ปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินลดลง เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดเพิ่มขึ้น เพราะการระเหยของตัวทำละลายที่อุณหภูมิต่ำจากการลดความดัน และเมื่อสกัดเคราตินเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทั้งภายใต้ความดันบรรยากาศและความดันต่ำ เมื่อเวลาที่ใช้ในการสกัดเพิ่มขึ้น จะได้ปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินลดลง

ดังนั้น ภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเคราติน คือ การสกัดภายใต้ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เนื่องจากปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาที่ใช้ในการสกัดเคราตินเพิ่มขึ้น และได้ปริมาณเคราตินมากที่สุด

4.1.1.2 ผลของความดันต่อปริมาณสารสกัดหยาบเคราติน

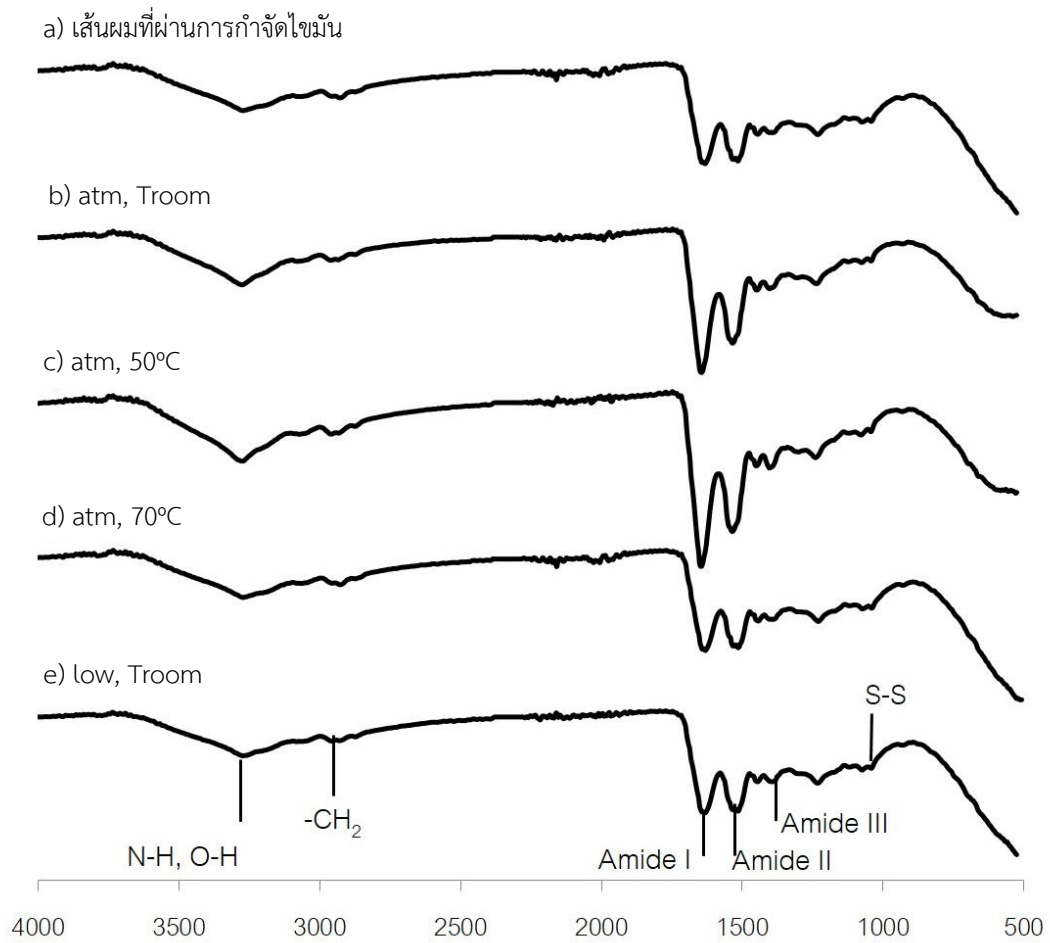
ปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินที่ได้จากการสกัดภายใต้ความดันต่ำ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 4 ชั่วโมง (ร้อยละ 33) จะมีปริมาณมากกว่าสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดภายใต้ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 4 ชั่วโมง (ร้อยละ 30.02) แต่เมื่อสกัดภายใต้ความดันต่ำ ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ 50 องศาเซลเซียส และ 70 องศาเซลเซียส ปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินจะลดลงเป็นร้อยละ 31.57 และ 31.43 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 เนื่องจากตัวทำละลายเคราตินระเหยไป ทำให้ของผสมระหว่างเส้นผมและตัวทำละลายกลายเป็นก้อนแข็ง จึงทำให้การสกัดเคราตินจากเส้นผมทำได้ยาก

ดังนั้น ความดันที่เหมาะสมในการสกัดเคราติน คือ การสกัดภายใต้ความดันบรรยากาศ เนื่องจากการสกัดภายใต้ความดันต่ำจะทำให้ตัวทำละลายระเหยได้เร็ว จึงสกัดเคราตินออกจากเส้นผมได้ง่าย

4.1.1.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารสกัดหยาบเคราตินที่ภาวะต่าง ๆ ด้วยเทคนิค

FT-IR

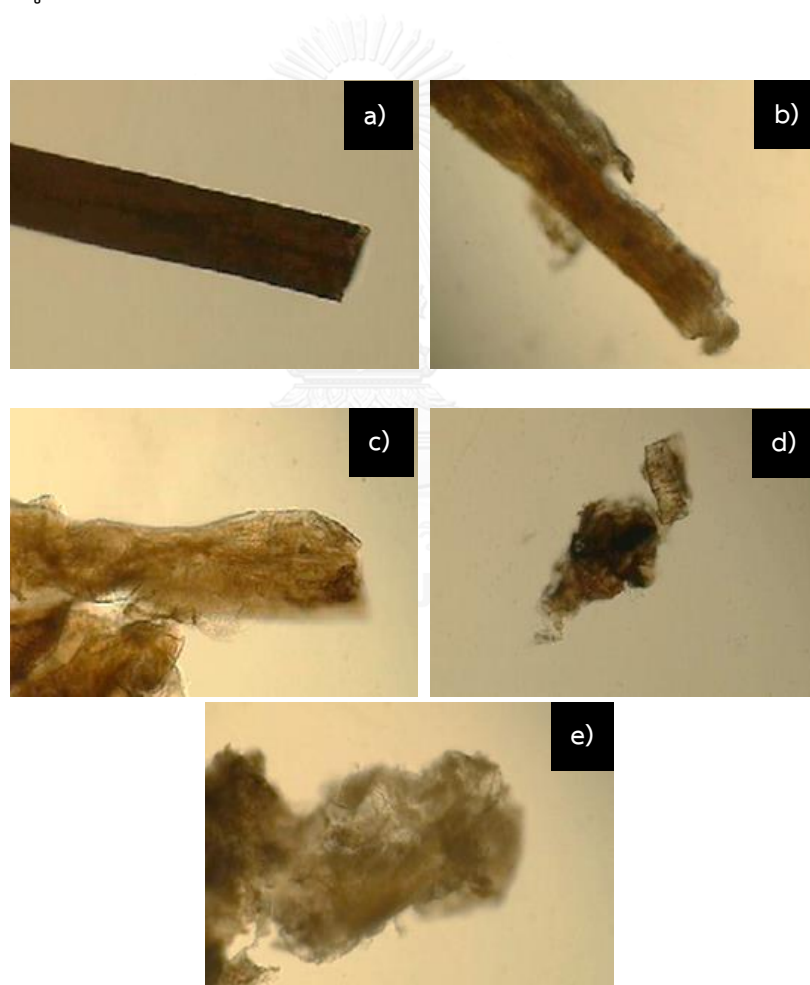
ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารสกัดหยาบเคราตินที่ได้จากการสกัดด้วย Shindai ภายใต้ความดันบรรยากาศ และความดันต่ำ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 4.2 พบว่า FT-IR สเปกตรัมของสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดจากภาวะต่าง ๆ แสดงหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกัน คือ แสดงหมู่ฟังก์ชัน N-H และ O-H (3300 cm^{-1}), $-\text{CH}_2$ (2900 cm^{-1}) เอไมด์ 3 ประเภท คือ เอไมด์ปฐมภูมิ (primary amide, RC(O)NH_2) (1635 cm^{-1}) เอไมด์ทุติยภูมิ (secondary amide, RC(O)NHR') (1525 cm^{-1}) และ เอไมด์ตติยภูมิ (tertiary amide, RC(O)NR'R'') (1222 cm^{-1}) และ S-S ($1300\text{-}1000\text{ cm}^{-1}$) ของพันธะไดซัลไฟด์ในโครงสร้างเคราติน ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกับหมู่ฟังก์ชันของเคราตินจากขนสัตว์ในงานวิจัยของ Xu W. และคณะ [68] ดังนั้นการสกัดเคราตินด้วย Shindai ที่ภาวะต่าง ๆ ไม่ทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันใหม่ และโครงสร้างทางเคมีเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.2 FT-IR สเปกตรัมของ a) เส้นผมที่ผ่านการกำจัดไขมัน และสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดภายใต้ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง b) อุณหภูมิห้อง c) 50 องศาเซลเซียส d) 70 องศาเซลเซียส และสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดภายใต้ความดันต่ำ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง f) อุณหภูมิห้อง

4.1.1.4 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นผมมนุษย์ที่ก่อนและหลังการสกัด เคราตินด้วย OM

เส้นผมที่ผ่านการกำจัดไขมันจะมีผิวเรียบ และมีสีเข้ม ดังแสดงในรูปที่ 4.3 a) เส้นผมหลังการสกัดเคราตินภายใต้ความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิต่างๆ (อุณหภูมิห้อง 50 และ 70 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 4.3 b)-d) พบว่า ผิวของเส้นผมถูกทำลายไปบางส่วนและสีของเส้นผมจะอ่อนลง และผิวของเส้นผมจะถูกทำลายมากขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิในการสกัดเพิ่มขึ้น ส่วนเส้นผมที่ผ่านการสกัดเคราตินภายใต้ความดันต่ำ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ผิวของเส้นผมจะถูกทำลายมากกว่าการสกัดภายใต้ความดันบรรยากาศ และสีของเส้นผมจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอ่อน และโปร่งแสง ดังแสดงในรูป 4.3 e)

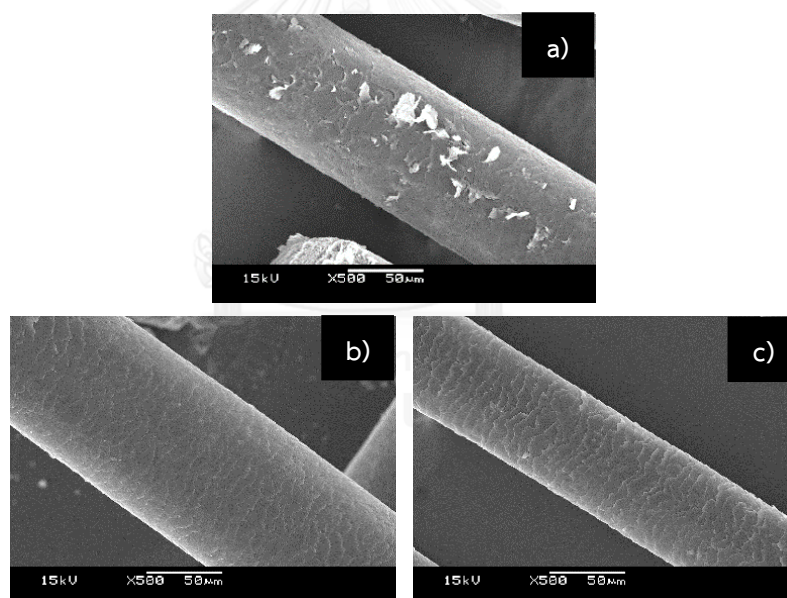


รูปที่ 4.3 ภาพ OM ของเส้นผมมนุษย์ที่กำลังขยาย 20 เท่า a) เส้นผมมนุษย์ที่ผ่านการกำจัดไขมัน, เส้นผมมนุษย์ที่ผ่านการสกัดภายใต้ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง b) อุณหภูมิห้อง c) 50°C d) 70°C และ e) เส้นผมมนุษย์ที่ผ่านการสกัดภายใต้ความดันต่ำ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

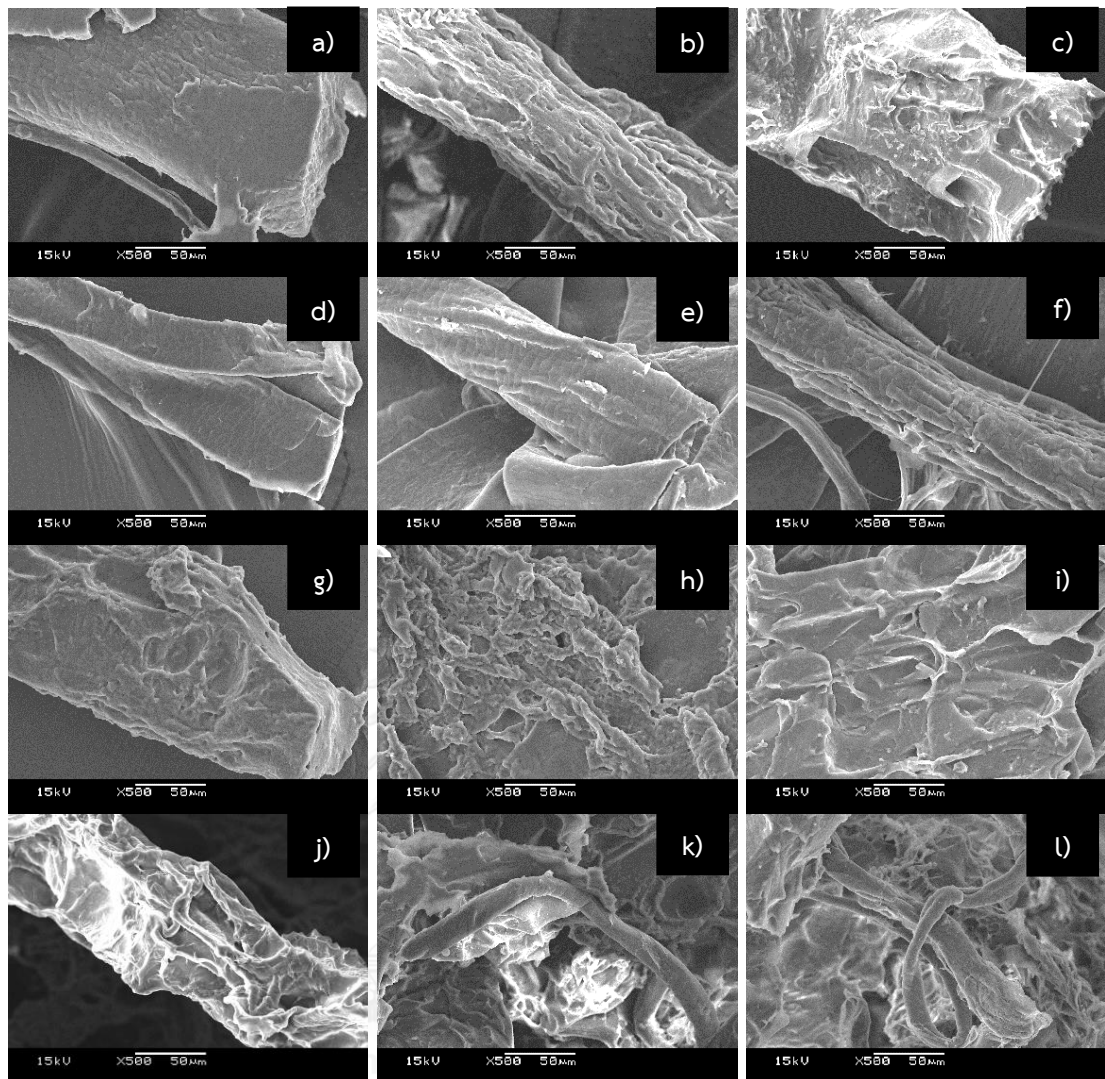
4.1.1.5 ลัทธิฐานวิทยาของเส้นผมมนุษย์ที่ก่อนและหลังการสกัดเคราตินด้วย SEM

ผิวของเส้นผมก่อนการสกัดเคราตินด้วย Shindai แสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าเส้นผมที่ไม่ผ่านการทำความสะอาดจะมีสิ่งสกปรกเกาะอยู่บนผิวอย่างเห็นได้ชัด ส่วนเส้นผมที่ผ่านการทำความสะอาดจะไม่มีสิ่งสกปรกเกาะอยู่บนผิวและเกล็ดผมปิดสนิท ในขณะที่เส้นผมที่ผ่านการกำจัดไขมันผิวนอกออกไปทำให้เกิดเกล็ดผมเปิดออก ซึ่งเป็นการเตรียมเส้นผมให้พร้อมกับการสกัดเคราตินต่อไป

ผิวของเส้นผมหลังการสกัดเคราตินด้วย Shindai ที่ภาวะต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าเส้นผมที่ผ่านการสกัดด้วย Shindai ภายใต้อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ ผิวของเส้นผมจะถูกทำลายมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาในการสกัดเพิ่มขึ้น โดยเส้นผมที่ถูกสกัดที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมงขึ้นไป ผิวของเส้นผมจะถูกทำลายจนไม่มีลักษณะของเส้นผมอีกต่อไป ในขณะที่เส้นผมที่ผ่านการสกัดด้วยตัวทำละลาย Shindai ที่อุณหภูมิและเวลาเดียวกัน ผิวของเส้นผมจะถูกทำลายมากขึ้นเมื่อความดันที่ใช้ในการสกัดลดลง



รูปที่ 4.4 ภาพ SEM ของเส้นผมก่อนการสกัดเคราติน ที่กำลังขยาย 500 เท่า a) เส้นผมที่ไม่ผ่านการทำความสะอาด b) เส้นผมที่ผ่านการทำความสะอาด และ c) เส้นผมที่ผ่านการกำจัดไขมัน



รูปที่ 4.5 ภาพ SEM ของเส้นผมหลังการสกัดเคราตินด้วย Shindai ที่ภาวะต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 500 เท่า การสกัดภายใต้ความดันบรรยากาศ สกัดที่อุณหภูมิห้อง a) 4 ชั่วโมง b) 6 ชั่วโมง c) 8 ชั่วโมง สกัดที่ 50°C d) 4 ชั่วโมง e) 6 ชั่วโมง f) 8 ชั่วโมง สกัดที่ 70°C g) 4 ชั่วโมง h) 6 ชั่วโมง i) 8 ชั่วโมง และการสกัดภายใต้ความดันต่ำ ที่อุณหภูมิห้อง j) 4 ชั่วโมง k) 6 ชั่วโมง l) 8 ชั่วโมง

4.1.2 การหาสารรีดิวซ์ที่เหมาะสมในการสกัดเคราตินจากเส้นผมมนุษย์

การสกัดเคราตินภายใต้ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4, 24, 48, 72 และ 84 ชั่วโมง ด้วยตัวทำละลายที่ประกอบด้วยยูเรียความเข้มข้น 5 โมลาร์ ไทโอยูเรียความเข้มข้น 2.6 โมลาร์ และสารรีดิวซ์ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่แตกต่างกัน 5 ชนิด คือ

- 1) สารละลายที่ไม่มีสารรีดิวซ์ ที่มีค่า pH 8.5 (UT)
- 2) สารละลายที่มี 2-เมอร์แคปโทเอทานอล ที่มีค่า pH 8.5 เป็นสารรีดิวซ์ (Shindai)
- 3) สารละลายที่มี ไทโอไกลโคลิกแอซิด ที่มีค่า pH 2 เป็นสารรีดิวซ์ (TA2)
- 4) สารละลายที่มี ไทโอไกลโคลิกแอซิด ที่มีค่า pH 8.5 เป็นสารรีดิวซ์ (TA8.5)
- 5) สารละลายที่มี 1,2-อีเทนไดไทออล ที่มีค่า pH 8.5 เป็นสารรีดิวซ์ (EDT)

4.1.2.1 ผลของสารรีดิวซ์ต่อปริมาณสารสกัดหยาบเคราติน

ปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดภายใต้ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4, 24, 48, 72 และ 84 ชั่วโมง ด้วยตัวทำละลายที่ประกอบด้วยสารรีดิวซ์แตกต่างกัน แสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.6

การสกัดเคราตินด้วยสารละลายที่ไม่มีสารรีดิวซ์ (UT) จะได้ปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินน้อยที่สุด เนื่องจากในสารละลายมีเพียงยูเรียและไทโอยูเรีย ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารทำลายพันธะไฮโดรเจน (chaotropic agents) ระหว่างสายโซ่เคราตินเท่านั้น จึงสามารถละลายเคราตินออกมากับตัวทำละลายได้ในปริมาณน้อย ดังนั้นสารรีดิวซ์จึงมีความสำคัญในการสกัดเคราติน เนื่องจากสารรีดิวซ์จะทำหน้าที่ทำลายพันธะไดซัลไฟด์ในโครงสร้างเคราติน ทำให้เคราตินสามารถละลายออกมากับตัวทำละลายได้มากขึ้น

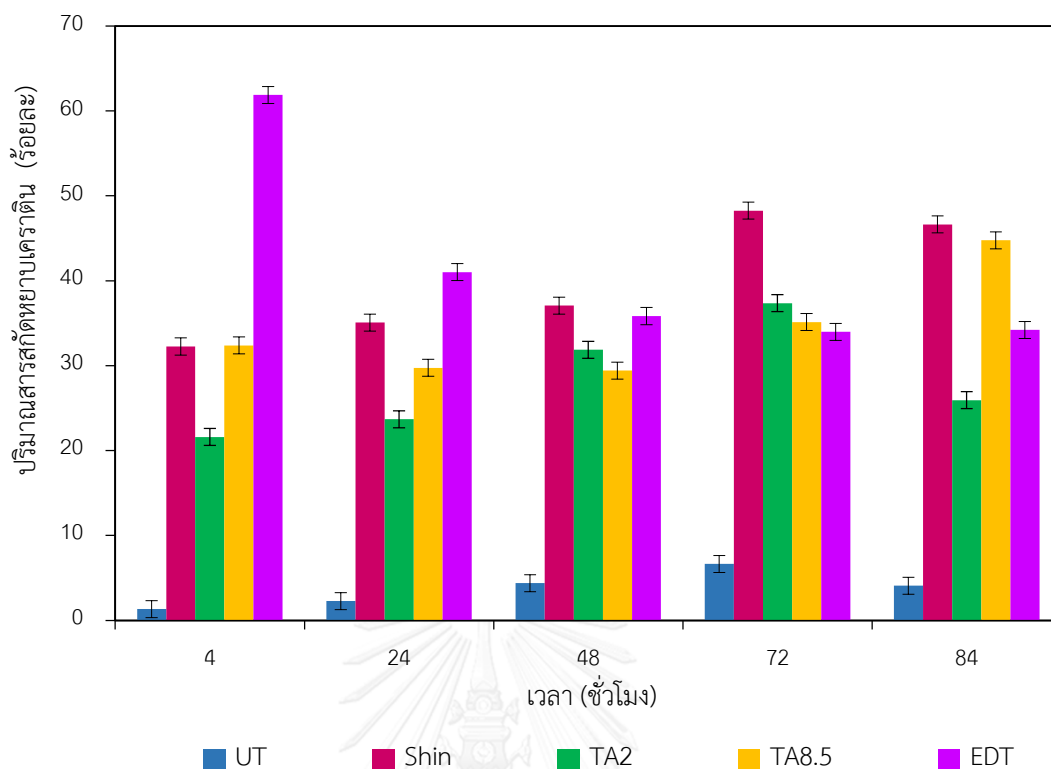
การสกัดเคราตินด้วยสารละลายที่มี 1,2-อีเทนไดไทออล (EDT) เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะได้ปริมาณเคราตินมากที่สุด คือ ร้อยละ 61.89 เนื่องจากสารรีดิวซ์ที่ใช้ในการสกัดเคราตินมีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน (E^0) ต่างกัน ทำให้มีความสามารถในการรีดิวซ์ต่างกัน คือ ถ้ามีค่า E^0 เป็นลบมากแสดงว่าเป็นสารรีดิวซ์ที่แรง มีความสามารถในการรีดิวซ์สูง โดยสารรีดิวซ์ที่ใช้ในการสกัดเคราตินในงานวิจัยนี้คือ 2-เมอร์แคปโทเอทานอล ($E^0 = -0.207V$) ไทโอไกลโคลิกแอซิด ($E^0 = -0.084 V$) และ 1,2-อีเทนไดไทออล ($E^0 = -0.255V$) [24] เป็นสารรีดิวซ์ที่มีค่า E^0 แตกต่างกัน ซึ่ง 1,2-อีเทนไดไทออลเป็นสารรีดิวซ์ที่มีค่า E^0 เป็นลบมากที่สุด จึงมีความสามารถในการรีดิวซ์ที่แรงที่สุด และสามารถสกัดเคราตินได้ปริมาณมากที่สุด เมื่อเพิ่มเวลาในการสกัดเคราตินด้วยสารรีดิวซ์ 1,2-อีเทนไดไทออล นานขึ้น จะได้ปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินลดลง เนื่องจากเมื่อเวลาในการสกัดเพิ่มขึ้น สารรีดิวซ์จะ

สามารถทำลายพันธะไดซัลไฟด์ได้มากขึ้น ทำให้สายโซ่โมเลกุลของเคราตินสั้นลง และมีน้ำหนักโมเลกุลลดลง ทำให้เคราตินที่มีขนาดโมเลกุลเล็กสามารถแพร่ผ่านถุงไตแอสซิสออกมาได้ขณะทำการแยกตัวทำลายออกจากสารสกัดหยาบเคราติน จึงทำให้ได้ปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินลดลง เมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้สกัดเคราติน โดยปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินที่ได้จากการสกัดด้วย 1,2-อีเทนไดโทล ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (ร้อยละ 61.89) มีปริมาณมากกว่าปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินที่ได้จากการศึกษาของ Nakamura และคณะ [48] โดยสกัดเคราตินด้วย Shindai ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ซึ่งเป็นวิธีการสกัดเคราตินที่ได้รับความนิยมในการสกัดเคราตินจากเส้นผมมนุษย์และได้ปริมาณเคราตินมาก (ร้อยละ 61)

ดังนั้น ความแรงของสารรีดิวซ์ และเวลาที่ใช้ในการสกัดเคราติน มีผลต่อปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดได้ โดยสารรีดิวซ์ที่เหมาะสมในการสกัดเคราติน คือ 1,2-อีเทนไดโทล และภาวะที่เหมาะสมในการสกัด คือ การสกัดภายใต้ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เนื่องจากการสกัดด้วยสารรีดิวซ์และภาวะนี้ จะให้ปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินมากที่สุด และใช้เวลาในการสกัดน้อยที่สุด จึงเป็นวิธีสกัดสารสกัดหยาบเคราตินจากเส้นผมมนุษย์ที่มีประสิทธิภาพที่สุด เนื่องจากประหยัดเวลาและเชื้อเพลิงในการสกัดเคราติน และได้ปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินมากที่สุด

ตารางที่ 4.2 ปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินที่ได้จากการสกัดด้วยตัวทำลายที่ประกอบด้วยสารรีดิวซ์ที่แตกต่างกัน ที่ภาวะต่าง ๆ

เวลาที่ใช้สกัด (ชั่วโมง)	ปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วยสารรีดิวซ์แตกต่างกัน (ร้อยละ)				
	UT	Shindai	TA pH2	TA pH8.5	EDT
4	1.34	32.26	21.61	32.38	61.89
24	2.28	35.08	23.70	29.75	41.01
48	4.38	37.07	31.88	29.43	35.84
72	6.66	48.25	37.35	35.13	33.99
84	4.09	46.63	25.94	44.77	34.21



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินที่ได้จากการสกัดด้วยตัวทำละลายที่ประกอบด้วยสารรีดิวซ์ที่แตกต่างกัน ที่ภาวะต่าง ๆ

4.1.2.2 ผลของสารรีดิวซ์ต่อปริมาณโปรตีนในสารสกัดหยาบเคราติน

ปริมาณโปรตีนในสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดภายใต้ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4, 24, 48, 72 และ 84 ชั่วโมง ด้วยตัวทำละลายที่ประกอบด้วยสารรีดิวซ์แตกต่างกัน แสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.7

การสกัดเคราตินด้วยสารละลายที่มี 1,2-อีเทนไดโทอล (EDT) เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะได้ปริมาณโปรตีนในเคราตินมากที่สุด คือ ร้อยละ 68.52 เนื่องจาก 1,2-อีเทนไดโทอล เป็นสารรีดิวซ์ที่มีค่า E^0 เป็นลบมากที่สุด จึงมีความสามารถในการรีดิวซ์ที่แรงที่สุด และสามารถสกัดเอาโปรตีนในเคราตินได้ปริมาณมากที่สุด ปริมาณโปรตีนในเคราตินที่สกัดด้วยสารละลายที่มี 1,2-อีเทนไดโทอล มีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้เวลาในการสกัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเวลาในการสกัดเพิ่มขึ้น สารรีดิวซ์จะสามารถทำลายพันธะไดซัลไฟด์ได้มากขึ้น ทำให้สายโซ่โมเลกุลของโปรตีนในสารสกัดหยาบเคราตินสั้นลง และมีน้ำหนักโมเลกุลลดลง ทำให้โปรตีนที่มีขนาดโมเลกุลเล็กสามารถแพร่ผ่านถุงไตแอสไซออกมาได้ขณะทำการแยกตัวทำละลายออกจากสารสกัดหยาบเคราติน จึงทำให้ได้ปริมาณโปรตีนในสารสกัดหยาบเคราตินลดลง สอดคล้องกับปริมาณสารสกัดหยาบที่ลดลงเมื่อใช้เวลาในการสกัดเพิ่มขึ้น

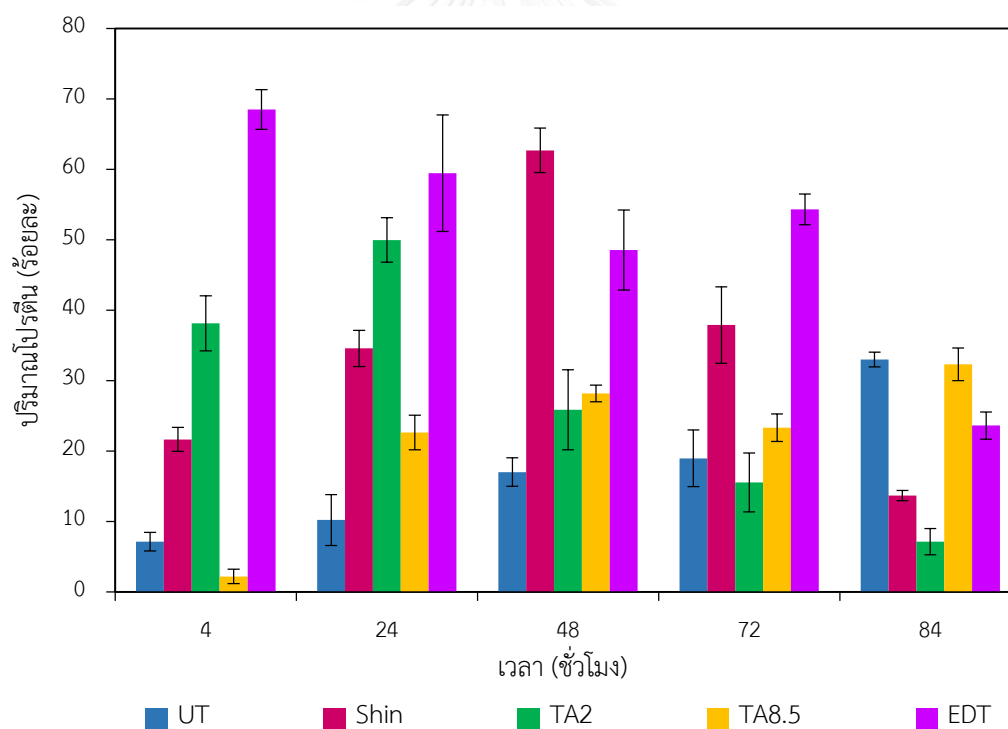
ปริมาณโปรตีนในเคราตินที่สกัดด้วย Shindai จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงเวลาสกัด 48 ชั่วโมง ซึ่งจะได้ปริมาณโปรตีนในเคราตินมากที่สุด คือ ร้อยละ 62.70 แต่ปริมาณโปรตีนจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการสกัดเคราติน เนื่องจากโปรตีนที่สกัดได้แช่อยู่ในสารรีดิวซ์ที่มีความแรงเป็นเวลานาน ทำให้สายโซ่โมเลกุลถูกตัดให้สั้นลงเรื่อยๆ จนได้โปรตีนที่มีขนาดโมเลกุลเล็กสามารถแพร่ผ่านถุงไตแอสซิสออกมาได้ขณะทำการแยกตัวทำลายออกจากสารสกัดหยาบเคราติน จึงทำให้ได้ปริมาณโปรตีนในสารสกัดหยาบเคราตินลดลง นอกจากนี้ปริมาณโปรตีนในเคราตินที่สกัดด้วยไทโอไกลโคลิกแอซิด ที่ค่า pH 2 (TA2) แนวโน้มลดลงเมื่อใช้เวลาในการสกัดเพิ่มขึ้น มากกว่า 24 ชั่วโมง เนื่องจากความเป็นกรดแก่ของสารรีดิวซ์ ทำให้ปริมาณโปรตีนที่สกัดได้สูญเสียสภาพความเป็นโปรตีนลง

ปริมาณโปรตีนในเคราตินที่สกัดด้วยตัวทำลายที่ไม่มีสารรีดิวซ์ (UT) และสารละลายที่มี ไทโอไกลโคลิกแอซิดที่มีค่า pH 8.5 (TA8.5) จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการสกัดเคราตินเพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวทำลายที่ไม่มีสารรีดิวซ์มีความสามารถในการละลายโปรตีนต่ำ และจะสามารถทำลายสายโซ่โมเลกุลของโปรตีนได้มากขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับสารละลายที่มีไทโอไกลโคลิกแอซิดที่มีค่า pH 8.5 ซึ่งมีความสามารถในการรีดิวซ์ต่ำ จะสามารถทำลายสายโซ่โมเลกุลของโปรตีนได้มากขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น จึงทำให้ปริมาณโปรตีนในสารสกัดหยาบสามารถละลายออกมากับตัวทำลายได้มากขึ้น เมื่อเวลาที่ใช้ในการสกัดเพิ่มขึ้น

ดังนั้น ความแรงของสารรีดิวซ์ ความเป็นกรดเป็นเบส และเวลาที่ใช้ในการสกัดเคราติน มีผลต่อปริมาณโปรตีนในสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดได้ โดยสารรีดิวซ์ที่เหมาะสมในการสกัดเคราติน คือ 1,2-อีเทนไดไทอล โดยภาวะที่เหมาะสมในการสกัด คือ การสกัดภายใต้ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เนื่องจากการสกัดด้วยสารรีดิวซ์และภาวะนี้ จะให้ปริมาณโปรตีนในสารสกัดหยาบเคราตินมากที่สุด และใช้เวลาในการสกัดน้อยที่สุด

ตารางที่ 4.3 ปริมาณโปรตีนในสารสกัดหยาบเคราดินที่ได้จากการสกัดด้วยตัวทำละลายที่ประกอบด้วยสารรีดิวซ์ที่แตกต่างกัน ที่ภาวะต่างๆ

เวลาที่ใช้สกัด (ชั่วโมง)	ปริมาณโปรตีนในสารสกัดหยาบเคราดินที่สกัดด้วยสารรีดิวซ์แตกต่างกัน (ร้อยละ)				
	UT	Shindai	TA pH2	TA pH8.5	EDT
4	7.12	21.65	38.14	2.18	68.52
24	10.20	34.57	49.98	22.63	59.47
48	17.00	62.70	25.86	28.16	48.56
72	18.96	37.90	15.53	23.31	54.34
84	33.00	13.68	7.12	32.32	23.61



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบปริมาณโปรตีนในสารสกัดหยาบเคราดินที่ได้จากการสกัดด้วยตัวทำละลายที่ประกอบด้วยสารรีดิวซ์ที่แตกต่างกัน ที่ภาวะต่าง ๆ

4.1.2.3 ผลของสารรีดิวซ์ต่อน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนในสารสกัดหยาบเคราดิน

น้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนในสารสกัดหยาบเคราดินที่สกัดด้วยตัวทำละลายที่ไม่มีสารรีดิวซ์ (UT) ภายใต้ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 84 ชั่วโมง จากการสกัดเคราดินเป็นเวลา 4-84 ชั่วโมง โดยการสกัดเป็นเวลา 84 ชั่วโมงเป็นภาวะที่ได้ปริมาณโปรตีนในสารสกัดหยาบเคราดินมากที่สุด (ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.7) และจากรูปที่ 4.8 พบว่าน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนในสารสกัดหยาบเคราดินจะมีค่าประมาณ 45 kDa ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงน้ำหนักโมเลกุลของแอลฟาเคราดิน คือ 40-60 kDa ซึ่งเป็นเคราดินที่พบในเส้นผมมนุษย์ และเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักโมเลกุลของเคราดินจากเส้นผมมนุษย์ทางการค้า พบว่า เคราดินทางการค้าจะมีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลหลายขนาด และมีน้ำหนักโมเลกุลมากที่สุดที่ค่าประมาณ 45 kDa เช่นเดียวกับน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนในสารสกัดหยาบเคราดิน ดังนั้น การสกัดเคราดินด้วยตัวทำละลายที่ไม่มีสารรีดิวซ์ ภายใต้ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 84 ชั่วโมง สามารถสกัดเคราดินได้โดยไม่ทำลายน้ำหนักโมเลกุลของเคราดิน

น้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนในสารสกัดหยาบเคราดินที่สกัดด้วยตัวทำละลายที่มี 2-เมอร์แคปโทเอทานอล เป็นสารรีดิวซ์ (Shindai) ภายใต้ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากการสกัดเคราดินเป็นเวลา 4-84 ชั่วโมง โดยการสกัดเป็นเวลา 48 ชั่วโมงเป็นภาวะที่ได้ปริมาณโปรตีนในสารสกัดหยาบเคราดินมากที่สุด (ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.7) และจากรูปที่ 4.9 พบว่าน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนในสารสกัดหยาบเคราดินจะมีค่าประมาณ 45 kDa และประมาณ 66 kDa ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงน้ำหนักโมเลกุลของแอลฟาเคราดิน คือ 40-60 kDa ซึ่งเป็นเคราดินที่พบในเส้นผมมนุษย์ และเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักโมเลกุลของเคราดินจากเส้นผมมนุษย์ทางการค้า พบว่า เคราดินทางการค้าจะมีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลหลายขนาด และมีน้ำหนักโมเลกุลมากที่สุดที่ค่าประมาณ 45 kDa ในขณะที่น้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนในสารสกัดหยาบเคราดินจะได้น้ำหนักโมเลกุลมากกว่า ดังนั้น การสกัดเคราดินด้วยตัวทำละลายที่มี 2-เมอร์แคปโทเอทานอล เป็นสารรีดิวซ์ ภายใต้ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง สามารถสกัดเคราดินได้โดยไม่ทำลายน้ำหนักโมเลกุลของเคราดิน และได้เคราดินที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง

น้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนในสารสกัดหยาบเคราดินที่สกัดด้วยตัวทำละลายที่มีไทโอไกลโคลิกแอซิด ที่มีค่า pH 2 เป็นสารรีดิวซ์ (TA2) ภายใต้ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากการสกัดเคราดินเป็นเวลา 4-84 ชั่วโมง โดยการสกัดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเป็นภาวะที่ได้ปริมาณโปรตีนในสารสกัดหยาบเคราดินมากที่สุด (ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.7) และจากรูปที่ 4.10 พบว่าน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนในสารสกัดหยาบเคราดินจะมีค่าต่ำมาก และไม่สามารถเทียบหาน้ำหนักโมเลกุลได้จากโปรตีนมาตรฐาน เนื่องจากความเป็นกรดแก่ของสาร

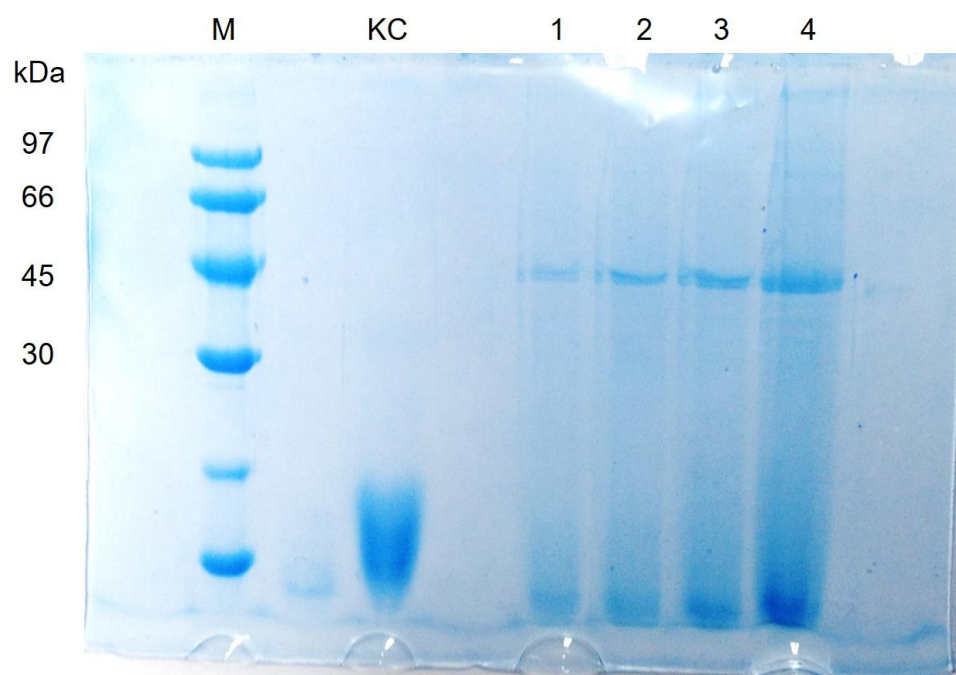
รีดิวซ์และความสามารถในการรีดิวซ์ของสารรีดิวซ์ต่ำ ทำให้สามารถสกัดได้เฉพาะโปรตีนน้ำหนักโมเลกุลต่ำในเมทริกซ์โปรตีน (10-25 kDa) โปรตีนที่สกัดได้จึงมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และสูญเสียสภาพความเป็นโปรตีนเนื่องจากความเป็นกรดแก่ ดังนั้นการสกัดเคราตินด้วยตัวทำละลายที่มี ไทโอไกลโคลิกแอซิด ที่มีค่า pH 2 เป็นสารรีดิวซ์ ภายใต้ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ไม่เหมาะสำหรับการสกัดเคราติน

น้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนในสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วยตัวทำละลายที่มี ไทโอไกลโคลิกแอซิด ที่มีค่า pH 8.5 เป็นสารรีดิวซ์ (TA8.5) ภายใต้ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 84 ชั่วโมง จากการสกัดเคราตินเป็นเวลา 4-84 ชั่วโมง โดยการสกัดเป็นเวลา 84 ชั่วโมงเป็นภาวะที่ได้ปริมาณโปรตีนในสารสกัดหยาบเคราตินมากที่สุด (ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.7) และจากรูปที่ 4.11 พบว่าน้ำหนักโมเลกุลของสารสกัดหยาบเคราตินจะมีค่าต่ำมาก และไม่สามารถเทียบหาน้ำหนักโมเลกุลได้จากโปรตีนมาตรฐาน เนื่องจากความสามารถในการรีดิวซ์ของสารรีดิวซ์ต่ำ ทำให้สามารถสกัดได้เฉพาะโปรตีนน้ำหนักโมเลกุลต่ำในเมทริกซ์โปรตีน (10-25 kDa) โปรตีนที่สกัดได้จึงมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ดังนั้นการสกัดเคราตินด้วยตัวทำละลายที่มี ไทโอไกลโคลิกแอซิด ที่มีค่า pH 8.5 เป็นสารรีดิวซ์ ภายใต้ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 84 ชั่วโมง ไม่เหมาะสำหรับการสกัดเคราติน

น้ำหนักโมเลกุลของสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วยตัวทำละลายที่มี 1,2-อีเทนไดโทอล เป็นสารรีดิวซ์ (EDT) ภายใต้ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากการสกัดเคราตินเป็นเวลา 4-84 ชั่วโมง โดยการสกัดเป็นเวลา 4 ชั่วโมงเป็นภาวะที่ได้ปริมาณโปรตีนในสารสกัดหยาบเคราตินมากที่สุด (ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.7) และจากรูปที่ 4.12 พบว่าน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนในสารสกัดหยาบเคราตินจะมีค่าประมาณ 45 kDa ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงน้ำหนักโมเลกุลของแอลฟาเคราติน คือ 40-60 kDa ซึ่งเป็นเคราตินที่พบในเส้นผมมนุษย์ และเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักโมเลกุลของเคราตินจากเส้นผมมนุษย์ทางการค้า พบว่า เคราตินทางการค้าจะมีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลหลายขนาด และมีน้ำหนักโมเลกุลมากที่สุดที่ค่าประมาณ 45 kDa เช่นเดียวกับน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนในสารสกัดหยาบเคราติน ดังนั้น การสกัดเคราตินด้วยตัวทำละลายที่มี 1,2-อีเทนไดโทอล เป็นสารรีดิวซ์ ภายใต้ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง สามารถสกัดเคราตินได้โดยไม่ทำลายน้ำหนักโมเลกุลของเคราติน

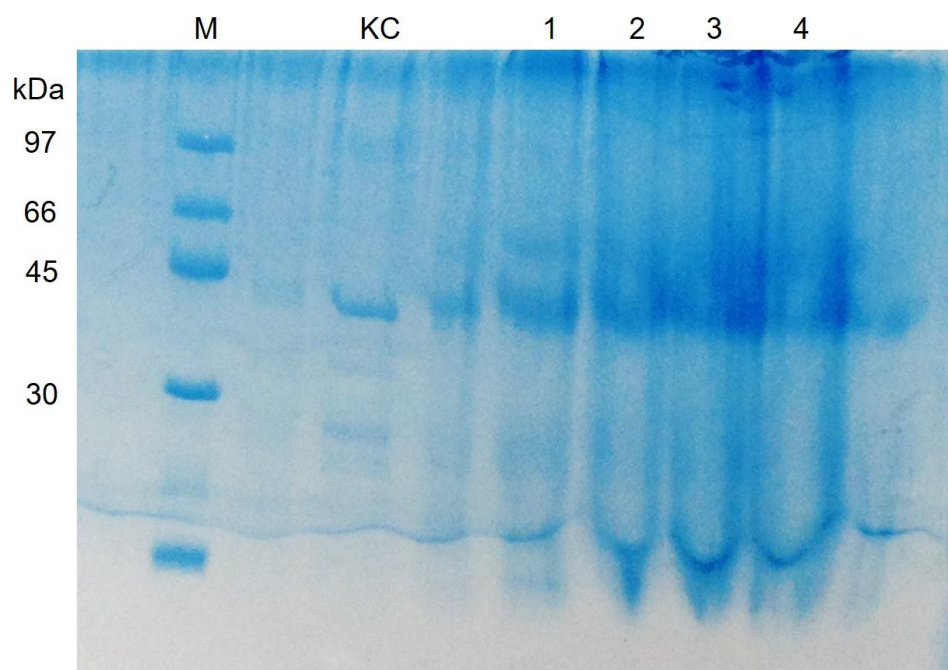
ดังนั้น ความแรงของสารรีดิวซ์ และความเป็นกรดเป็นเบส มีผลต่อน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนในสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดได้ โดยสารรีดิวซ์ที่เหมาะสมในการสกัดเคราติน คือ 1,2-อีเทนไดโทอล โดยภาวะที่เหมาะสมในการสกัด คือ การสกัดภายใต้ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เนื่องจากการสกัดด้วยสารรีดิวซ์และภาวะนี้ สามารถ

สกัดได้เคราตินในปริมาณมากที่สุด โดยไม่ทำลายน้ำหนักโมเลกุลของเคราติน และใช้เวลาในการสกัดน้อยที่สุด



รูปที่ 4.8 การแยกน้ำหนักโมเลกุลโปรตีน ของสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดโดยไม่มีสารรีดิวซ์ (UT)

- | | |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Lane M | โปรตีนมาตรฐาน (protein LMW marker) |
| Lane KC | เคราตินจากเส้นผมมนุษย์ทางการค้า (KC)
ความเข้มข้น 8 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร |
| Lane 1-4 | สารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย UT ภายใต้ความดันบรรยากาศ
ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 84 ชั่วโมง ความเข้มข้น 3, 5, 7
และ 10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร |



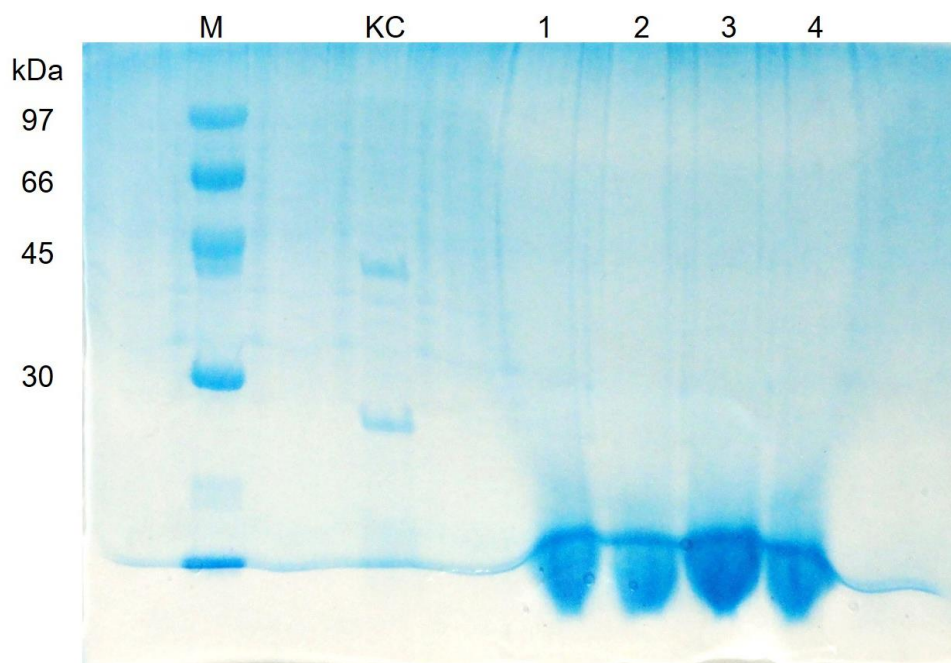
รูปที่ 4.9 การแยกน้ำหนักรโพลีโพรตีนของสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย Shindai

Lane M โปรตีนมาตรฐาน (protein LMW marker)

Lane KC เคราตินจากเส้นผมมนุษย์ทางการค้า (KC)

ความเข้มข้น 8 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

Lane 1-4 สารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย Shindai ภายใต้ความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ความเข้มข้น 5, 10, 15 และ 20 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

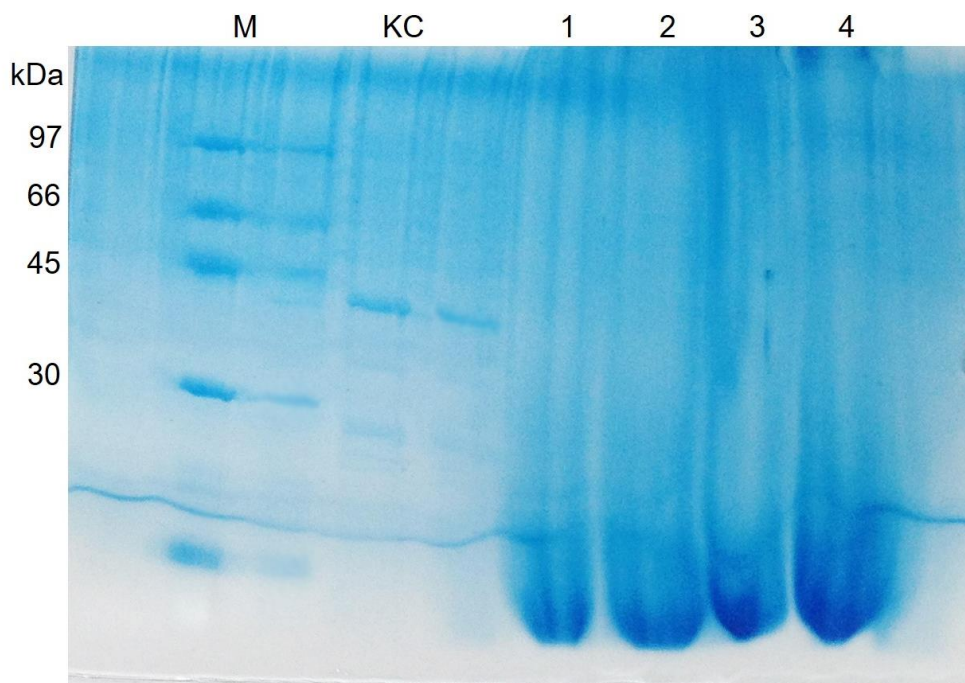


รูปที่ 4.10 การแยกน้ำหนักรโมเลกุลโปรตีนของสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วยไทโอไกลโคลิกแอซิดที่มีค่า pH 2 (TA2)

Lane M โปรตีนมาตรฐาน (protein LMW marker)

Lane KC เคราตินจากเส้นผมมนุษย์ทางการค้า (KC)
ความเข้มข้น 8 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

Lane 1-4 สารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย TA2 ภายใต้ความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ความเข้มข้น 30, 35, 40 และ 45 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

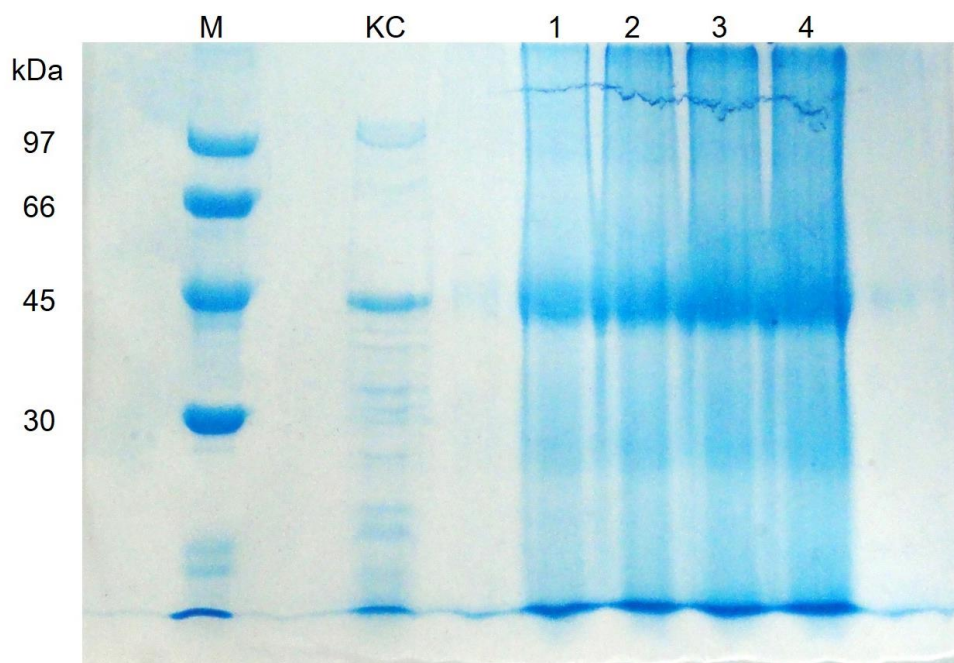


รูปที่ 4.11 การแยกน้ำหนักรโมเลกุลโปรตีนของสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วยไทโอไกลโคลิกแอซิดที่มีค่า pH 8.5 (TA8.5)

Lane M โปรตีนมาตรฐาน (protein LMW marker)

Lane KC เคราตินจากเส้นผมมนุษย์ทางการค้า (KC)
ความเข้มข้น 8 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

Lane 1-4 สารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย TA8.5 ภายใต้ความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 84 ชั่วโมง ความเข้มข้น 10, 15, 20 และ 25 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร



รูปที่ 4.12 การแยกน้ำหนักรโมเลกุลโปรตีนสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย 1,2-อีเทนไดโทอล (EDT)

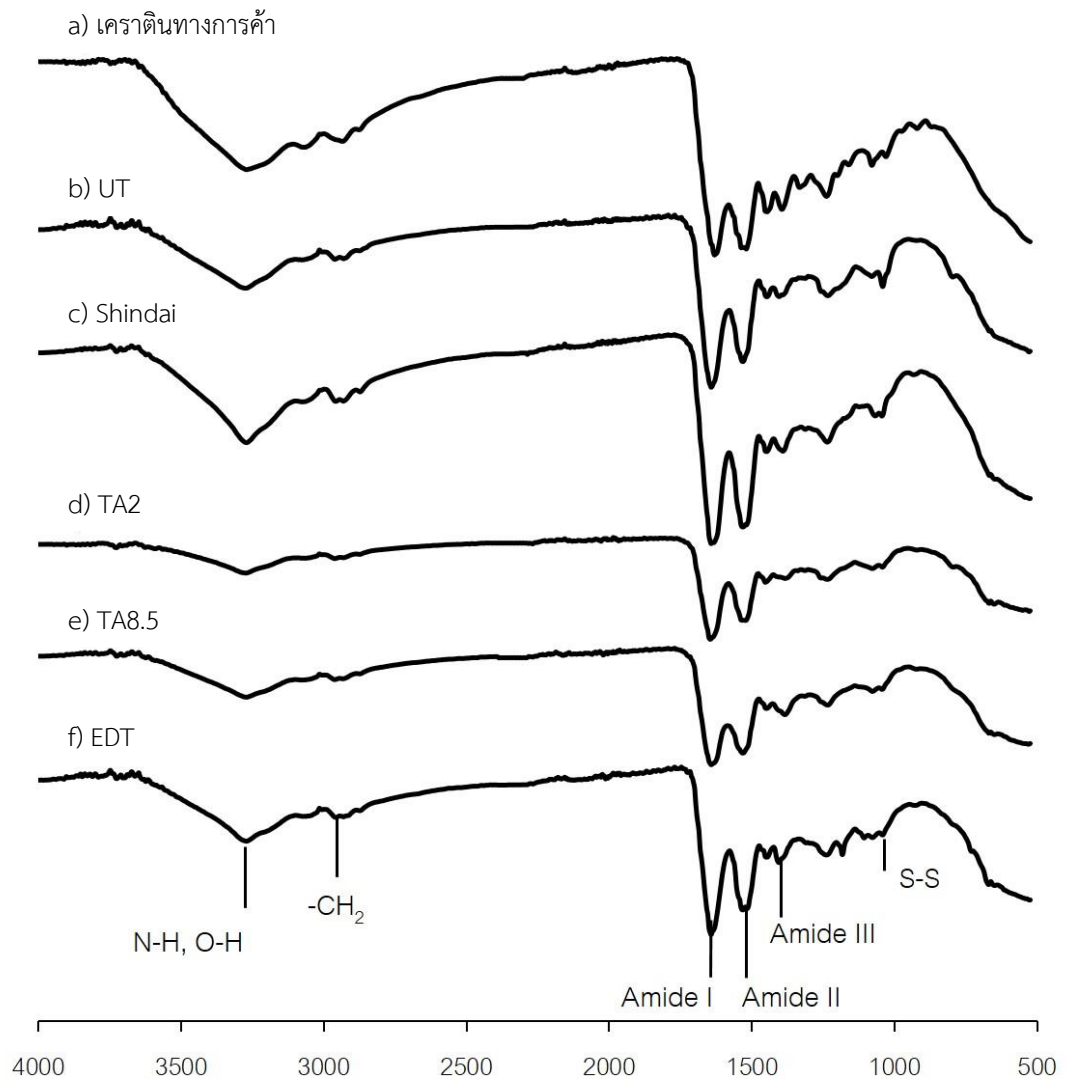
Lane M โปรตีนมาตรฐาน (protein LMW marker)

Lane KC เคราตินจากเส้นผมมนุษย์ทางการค้า (KC)
ความเข้มข้น 8 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

Lane 1-4 สารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย EDT ภายใต้ความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ความเข้มข้น 5, 10, 15 และ 20 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

4.1.2.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารสกัดหยาบเคราตินด้วยเทคนิค FT-IR

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของสารสกัดหยาบเคราตินที่ได้จากการสกัดด้วยตัวทำละลายที่มีสารรีดิวซ์ต่างกัน ภายใต้ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ณ เวลาต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.13 พบว่า FT-IR สเปกตรัมของสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดจากสารรีดิวซ์ต่างกัน แสดงหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกัน คือ แสดงหมู่ฟังก์ชัน N-H และ O-H (3300 cm^{-1}), $-\text{CH}_2$ (2900 cm^{-1}) เอไมด์ 3 ประเภท คือ เอไมด์ปฐมภูมิ (primary amide, RC(O)NH_2) (1635 cm^{-1}) เอไมด์ทุติยภูมิ (secondary amide, $\text{RC(O)NHR}'$) (1525 cm^{-1}) และเอไมด์ตติยภูมิ (tertiary amide, $\text{RC(O)NR}'\text{R}''$) (1222 cm^{-1}) และ S-S ($1300\text{-}1000\text{ cm}^{-1}$) ของพันธะไดซัลไฟด์ในโครงสร้างเคราติน ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกับหมู่ฟังก์ชันของเคราตินจากขนสัตว์ในงานวิจัยของ Xu W. และคณะ [68] แต่สารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วยตัวทำละลายที่มี ไทโอไกลโคลิกแอซิด ที่มีค่า pH 2 เป็นสารรีดิวซ์ (TA2) จะแสดงพีคของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ น้อยกว่าสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วยสารรีดิวซ์ชนิดอื่น เนื่องจากความเป็นกรดแก่ของสารรีดิวซ์ไปทำลายหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ของเคราติน ทำให้เคราตินเสียสภาพจึงแสดงลักษณะของหมู่ฟังก์ชันลดลง ดังนั้นการสกัดเคราตินด้วยสารรีดิวซ์ต่างๆที่มีค่า pH 8.5 ที่ภาวะต่าง ๆ ไม่ทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันใหม่ และโครงสร้างทางเคมีเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.13 FT-IR สเปกตรัมของ a) เคราตินทางการค้า และสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วยสารรีดิวซ์ต่างกัน ภายใต้ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส b) ไม่มีสารรีดิวซ์ (UT) เป็นเวลา 84 ชั่วโมง c) 2-เมอร์แคปโทเอทานอล (Shindai) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง d) ไทโอไกลโคลิกแอซิด ที่มีค่า pH 2 (TA2) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง e) ไทโอไกลโคลิกแอซิด ที่มีค่า pH 8.5 (TA8.5) เป็นเวลา 84 ชั่วโมง และ f) 1,2-อีเทนไดไทออล (EDT) เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

4.1.2.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของสารสกัดหยาบเคราตินด้วยเทคนิค EDS

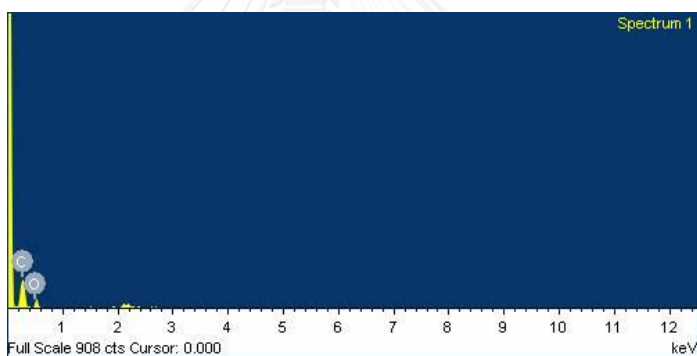
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดได้ด้วยสารรีดิวซ์ต่างกัน ได้แก่ ไม่มีสารรีดิวซ์ (UT) 2-เมอร์แคปโทเอทานอล (Shindai) ไทโอไกลโคลิกแอซิด ที่มีค่า pH2 (TA2) และ pH8.5 (TA8.5) และ 1,2-อีเทนไดโทอล (EDT) ภายใต้ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ณ เวลาต่างๆ ที่ให้ปริมาณโปรตีนมากที่สุด โดยใช้เทคนิค EDS แสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.14-4.19 พบว่า สารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วยสารรีดิวซ์ทุกชนิดมีองค์ประกอบเป็น คาร์บอนประมาณร้อยละ 60 ออกซิเจนประมาณร้อยละ 35 และซัลเฟอร์ในปริมาณที่ขึ้นกับชนิดของสารรีดิวซ์ และเคราตินทางการค้าจากเส้นผมมนุษย์ประกอบด้วยคาร์บอนประมาณร้อยละ 60 และออกซิเจนประมาณร้อยละ 40 เท่านั้น ในขณะที่งานวิจัยของ Popescu และคณะ [18] พบว่าเส้นผมมนุษย์ประกอบด้วย คาร์บอนประมาณร้อยละ 50 ออกซิเจนประมาณร้อยละ 22 ไนโตรเจนประมาณร้อยละ 16 ไฮโดรเจนประมาณร้อยละ 7 และซัลเฟอร์ประมาณร้อยละ 5 ซึ่งจะมีปริมาณองค์ประกอบแตกต่างกันขึ้นกับแหล่งที่มาของเส้นผม เมื่อเปรียบเทียบกับพบว่าสารสกัดหยาบเคราตินและเคราตินทางการค้าจะไม่มีไนโตรเจนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ คาดว่าเกิดจากฟิคของไนโตรเจนเกิดการซ้อนทับกับฟิคของคาร์บอน และฟิคของไฮโดรเจนซ้อนทับกับฟิคของออกซิเจน ทำให้ปริมาณคาร์บอนและออกซิเจนของสารสกัดหยาบเคราตินและเคราตินทางการค้ามีค่ามากกว่าปริมาณคาร์บอนและออกซิเจนในเส้นผม

เคราตินทางการค้าจากเส้นผมมนุษย์ประกอบด้วยคาร์บอนประมาณร้อยละ 60 และออกซิเจนประมาณร้อยละ 40 เท่านั้น คาดว่าเกิดจากการปรับสภาพผิวทางการค้าทำให้เคราตินสามารถละลายน้ำได้ จึงทำให้ไม่ปรากฏองค์ประกอบของซัลเฟอร์เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS เพราะเป็นการวัดจากผิวของเคราติน แต่เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR จะปรากฏองค์ประกอบของซัลเฟอร์ เพราะเป็นการวัดด้วยรังสีอินฟราเรดซึ่งสามารถทะลุผ่านระดับโมเลกุลได้

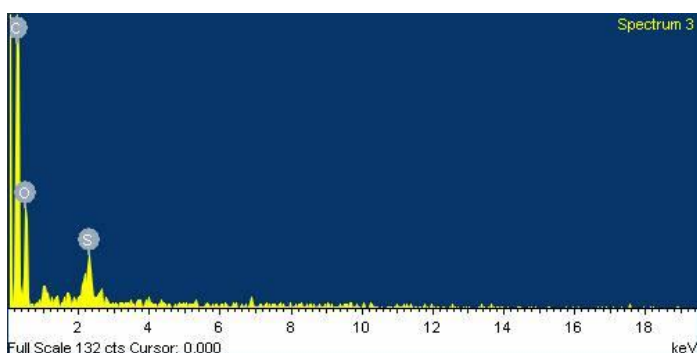
สารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วยสารรีดิวซ์ทุกชนิดมีองค์ประกอบเป็นคาร์บอน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ขึ้นกับชนิดของสารรีดิวซ์ โดยสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย 1,2-อีเทนไดโทอลจะมีปริมาณซัลเฟอร์มากที่สุด คือ ร้อยละ 5.42 เนื่องจาก 1,2-อีเทนไดโทอล เป็นสารรีดิวซ์ที่มีความสามารถในการรีดิวซ์มากที่สุด ในขณะที่สารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วยสารละลายที่ไม่มีสารรีดิวซ์จะมีปริมาณซัลเฟอร์น้อยที่สุด คือ ร้อยละ 1.84 เนื่องจากในสารละลายที่ไม่มีสารรีดิวซ์ที่จะทำลายพันธะไดซัลไฟด์ของเคราติน ดังนั้นความแรงของสารรีดิวซ์มีผลต่อองค์ประกอบของสารสกัดหยาบเคราติน และการสกัดเคราตินด้วยสารรีดิวซ์ 1,2-อีเทนไดโทอลภายใต้ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เป็นภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเคราติน เนื่องจากให้ปริมาณซัลเฟอร์ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของเคราตินมากที่สุด

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบธาตุของเคราตินทางการค้า และสารสกัดหยาบเคราตินที่ได้จากการสกัดด้วยสารรีดิวซ์ต่างกัน ที่ภาวะต่าง ๆ

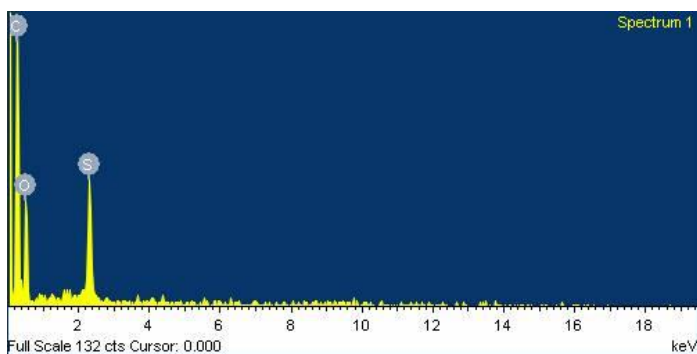
ตัวอย่าง	องค์ประกอบธาตุ (ร้อยละน้ำหนัก)		
	คาร์บอน (C)	ออกซิเจน (O)	ซัลเฟอร์ (S)
เคราตินทางการค้า	60.59	39.41	-
สารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย UT 84 ชั่วโมง	61.53	36.63	1.84
สารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย Shindai 48 ชั่วโมง	61.27	33.45	5.29
สารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย TA2, 24 ชั่วโมง	65.42	30.53	4.06
สารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย TA8.5, 84 ชั่วโมง	62.28	35.73	1.99
สารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย EDT 4 ชั่วโมง	60.30	34.28	5.42



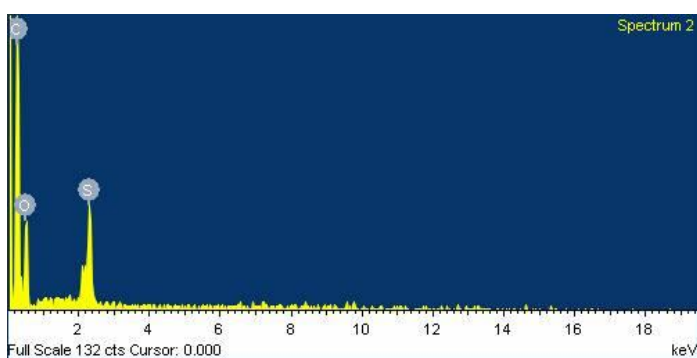
รูปที่ 4.14 องค์ประกอบธาตุของเคราตินทางการค้า



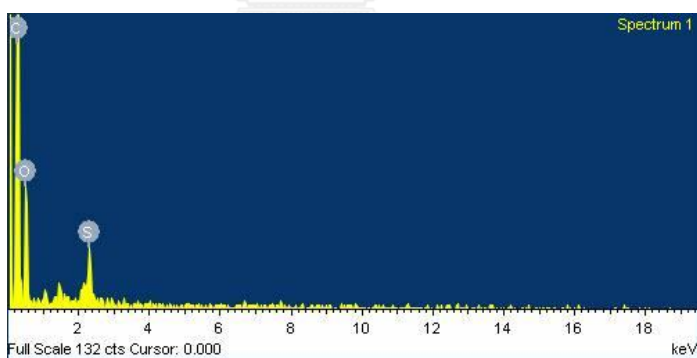
รูปที่ 4.15 องค์ประกอบธาตุของสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดโดยไม่มีสารรีดิวซ์ (UT) 84 ชั่วโมง



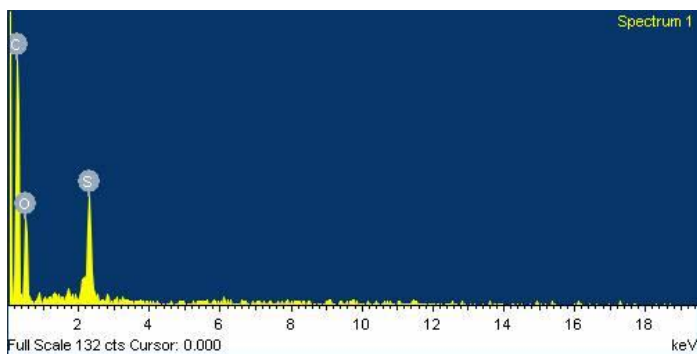
รูปที่ 4.16 องค์ประกอบธาตุของสารสกัดหยาดเคราตินที่สกัดด้วย Shindai 48 ชั่วโมง



รูปที่ 4.17 องค์ประกอบธาตุของสารสกัดหยาดเคราตินที่สกัดด้วย TA2, 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.18 องค์ประกอบธาตุของสารสกัดหยาดเคราตินที่สกัดด้วย TA8.5, 84 ชั่วโมง



รูปที่ 4.19 องค์ประกอบธาตุของสารสกัดหยาดเคราตินที่สกัดด้วย EDT 4 ชั่วโมง

4.1.2.6 สันฐานวิทยาของเส้นผมมนุษย์ที่ก่อนและหลังการสกัดเคราตินด้วย SEM

ผิวของเส้นผมหลังการสกัดเคราตินด้วยตัวทำละลายที่ไม่มีสารรีดิวซ์ (UT) ที่ภาวะต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.20 พบว่า ผิวของเส้นผมจะถูกทำลายมากขึ้นเมื่อเวลาในการสกัดเพิ่มขึ้น โดยเส้นผมจะถูกทำลายในลักษณะคล้ายถูกฉีกออกเป็นเส้นใยยาว (filament) หลายๆ เส้น เนื่องจากตัวทำละลายที่ไม่มีสารรีดิวซ์ ประกอบด้วยยูเรียและไทโอยูเรีย ซึ่งทำหน้าที่ทำลายพันธะไฮโดรเจนที่ยึดสายโซ่โมเลกุลของโปรตีนเข้าด้วยกัน โดยจะทำลายพันธะไฮโดรเจนดังกล่าวไปเรื่อยๆ แต่จะทำลายพันธะไดซัลไฟด์ในแอลฟาเคราตินได้น้อยมาก จึงสกัดเคราตินออกมาได้ในปริมาณน้อย [48]

ผิวของเส้นผมหลังการสกัดเคราตินด้วย Shindai ที่ภาวะต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.21 พบว่า ผิวของเส้นผมจะถูกทำลายมากขึ้นเมื่อเวลาในการสกัดเพิ่มขึ้น โดยเส้นผมจะถูกทำลายในลักษณะที่ถูกทำให้แยกออกเป็นเส้นใยยาว แล้วถูกตัดให้เป็นเส้นใยสั้นเรื่อยๆ จนเส้นใยถูกทำลายกระทั่งไม่มีลักษณะของเส้นใยที่เวลาสกัด 72 ชั่วโมง เนื่องจาก 2-เมอร์แคปโทเอทานอล เป็นสารรีดิวซ์ที่แรง เนื่องจากมีค่า E^0 เป็นลบมาก ($E^0 = -0.207V$) [24] จึงสามารถทำลายพันธะไดซัลไฟด์ได้ดี

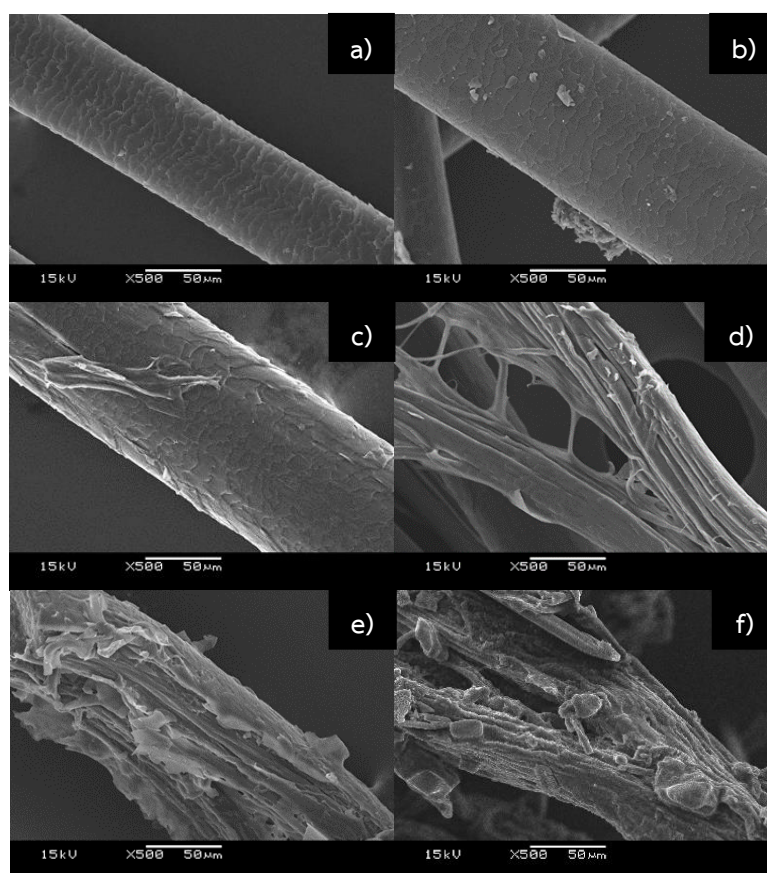
ผิวของเส้นผมหลังการสกัดเคราตินด้วยไทโอไกลโคลิกแอซิด pH 2 (TA2) ที่ภาวะต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.22 พบว่า ผิวของเส้นผมจะถูกทำลายมากขึ้นเมื่อเวลาในการสกัดเพิ่มขึ้น โดยเส้นผมจะถูกทำลายในลักษณะที่ถูกย่อยทำลายผิว แต่ไม่มีการทำให้เส้นใยแยกออกจากกัน จากนั้นเส้นผมจะถูกย่อยทำลายจนไม่มีลักษณะของเส้นใยที่เวลาสกัด 24 ชั่วโมง เนื่องจากสารรีดิวซ์เป็นกรดแก่สามารถทำลายโปรตีนอย่างรวดเร็ว และทำให้โปรตีนเสียสภาพ ดังนั้นจึงไม่เหมาะในการใช้สกัดเคราติน

ผิวของเส้นผมหลังการสกัดเคราตินด้วยไทโอไกลโคลิกแอซิด pH 8.5 (TA8.5) ที่ภาวะต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.23 พบว่า ผิวของเส้นผมจะถูกทำลายมากขึ้นเมื่อเวลาในการสกัดเพิ่มขึ้น โดยเส้นผมจะถูกทำลายในลักษณะที่ถูกย่อยทำลายผิว แต่ไม่มีการทำให้เส้นใยแยกออกจากกันเช่นเดียวกับการสกัดด้วยไทโอไกลโคลิกแอซิด pH 2 จากนั้นเส้นผมจะถูกย่อยทำลายจนไม่มีลักษณะของเส้นใยที่เวลาสกัด 72 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการทำลายเส้นผมมากกว่าการสกัดด้วยไทโอไกลโคลิกแอซิด (TA) pH 2 ซึ่งเป็นกรดแก่ จึงทำลายโปรตีนได้รุนแรงกว่า

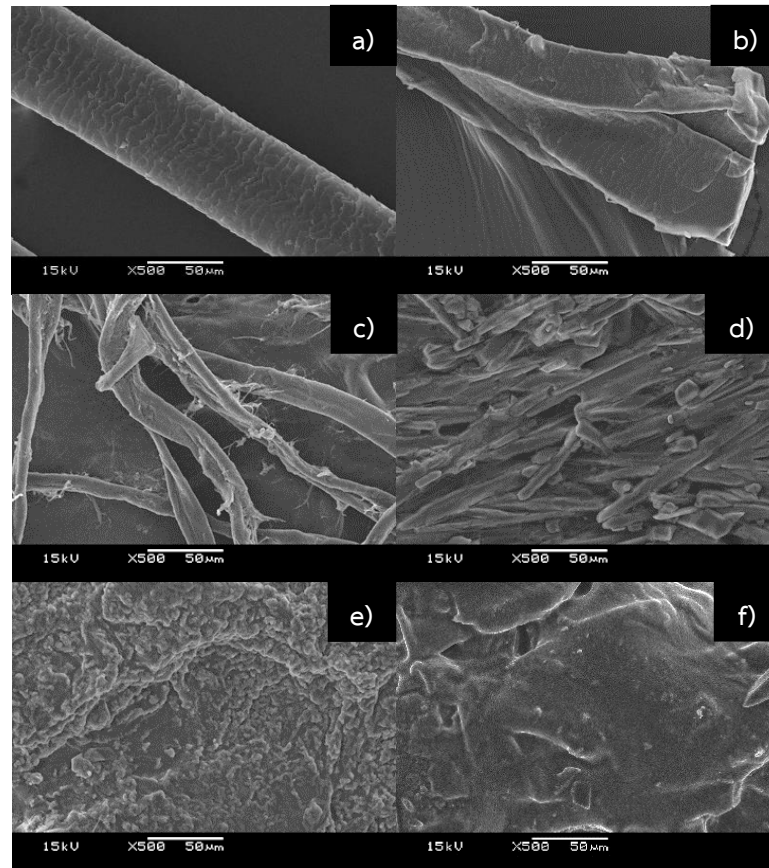
ผิวของเส้นผมหลังการสกัดเคราตินด้วยสารรีดิวซ์ 1,2-อีเทนไดไธออล (EDT) ที่ภาวะต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.24 พบว่า ผิวของเส้นผมจะถูกทำลายมากขึ้นเมื่อเวลาในการสกัดเพิ่มขึ้น โดยเส้นผมจะถูกทำลายในลักษณะที่ถูกย่อยทำลายผิว แต่ไม่มีการทำให้เส้นใยแยกออกจากกัน จากนั้นเส้นผมจะถูกย่อยทำลายจนไม่มีลักษณะของเส้นใยที่เวลาสกัด 24 ชั่วโมง เช่นเดียวกับการสกัดด้วยไทโอไกลโคลิกแอซิด pH 2 เนื่องจาก 1,2-อีเทนไดไธออล เป็นสารรีดิวซ์ที่แรงมากสามารถทำลายผิวเส้นผมได้

ใกล้เคียงกับกรดแก่ และทำลายพันธะไดซัลไฟด์ได้รวดเร็ว แต่จะไม่ทำให้โปรตีนเสียสภาพ จึงสามารถใช้เป็นสารรีดิวซ์ในการสกัดเคราตินได้

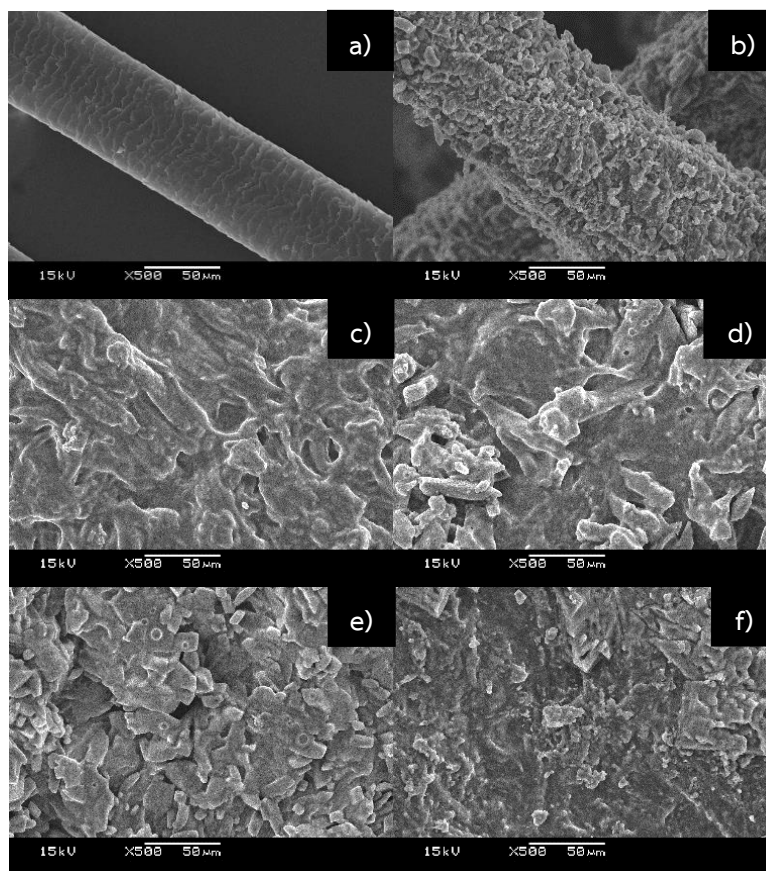
ดังนั้น ความแรงของสารรีดิวซ์ ความเป็นกรด เบส และเวลาที่ใช้ในการสกัดเคราติน มีผลต่อการทำลายผิวของเส้นผม ผิวของเส้นผมจะถูกทำลายมากขึ้น เมื่อความแรงของสารรีดิวซ์มากขึ้น ความเป็นกรด และเวลาในการสกัดเพิ่มขึ้น แต่การใช้สารรีดิวซ์ที่มีความเป็นกรดสูงจะทำให้โปรตีนเสียสภาพได้ จึงไม่เหมาะในการสกัดเคราติน โดยสารรีดิวซ์ที่เหมาะสมในการสกัดเคราตินมากที่สุด คือ 1,2-อีเทนไดโทล เพราะสามารถสกัดเคราตินได้รวดเร็วที่สุด แต่จะไม่ทำให้โปรตีนเสียสภาพ



รูปที่ 4.20 ภาพ SEM ของเส้นผมก่อนและหลังสกัดเคราติน ที่กำลังขยาย 500 เท่า a) เส้นผมก่อนสกัดเคราติน และเส้นผมหลังสกัดเคราตินโดยไม่มีสารรีดิวซ์ (UT) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส b) 4 ชั่วโมง c) 24 ชั่วโมง d) 48 ชั่วโมง e) 72 ชั่วโมง และ f) 84 ชั่วโมง

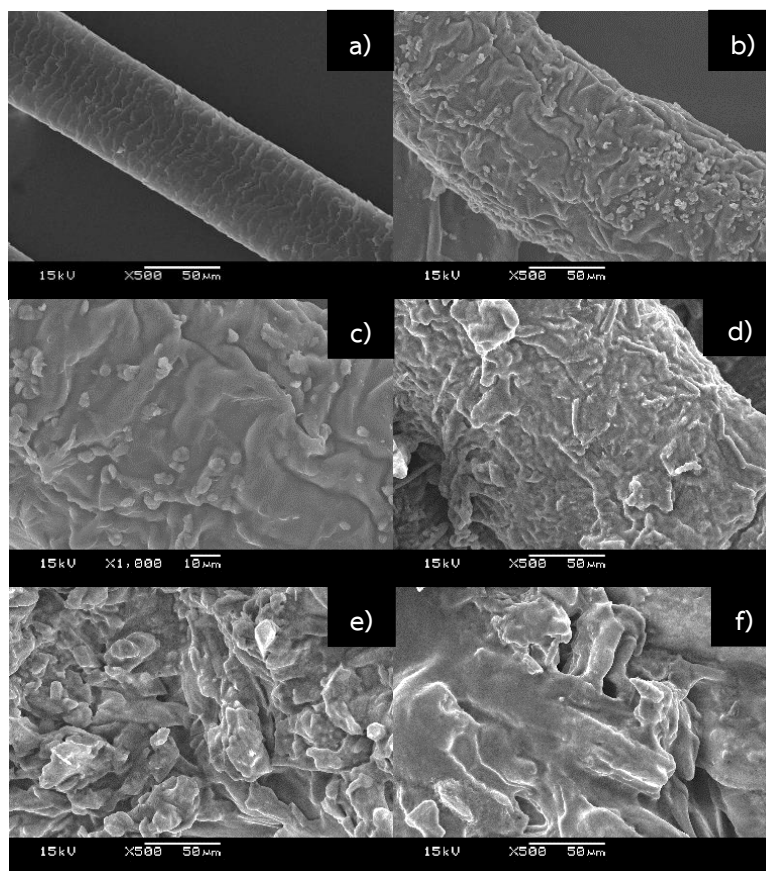


รูปที่ 4.21 ภาพ SEM ของเส้นไหมก่อนและหลังสกัดเคราติน ที่กำลังขยาย 500 เท่า a) เส้นไหมก่อนสกัดเคราติน และเส้นไหมหลังสกัดเคราตินด้วย Shindai ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส b) 4 ชั่วโมง c) 24 ชั่วโมง d) 48 ชั่วโมง e) 72 ชั่วโมง และ f) 84 ชั่วโมง



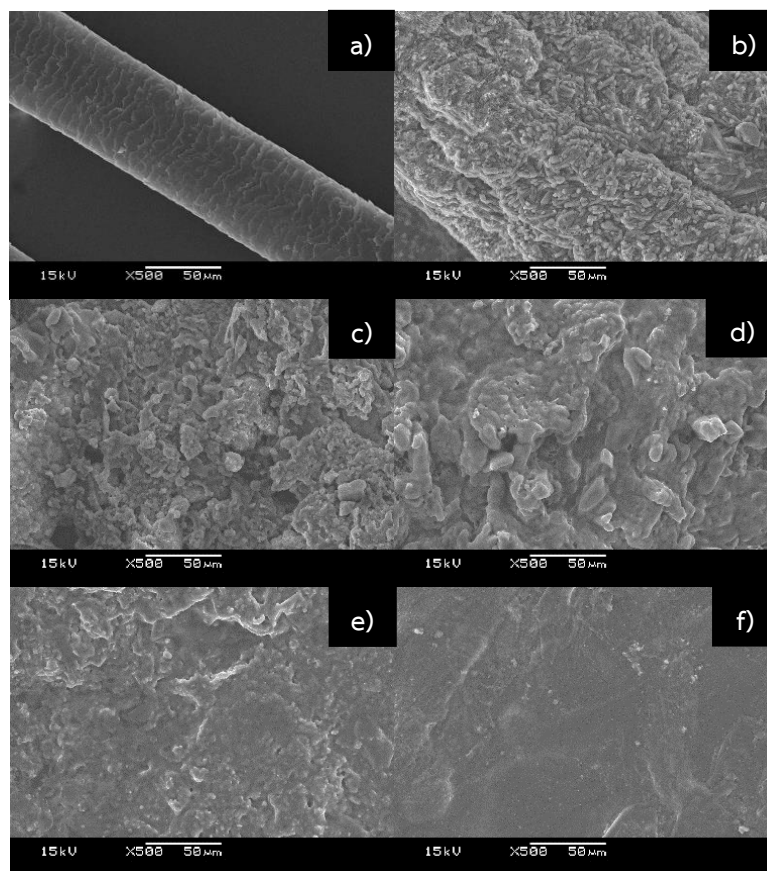
รูปที่ 4.22 ภาพ SEM ของเส้นผมก่อนและหลังสกัดเคราติน ที่กำลังขยาย 500 เท่า

a) เส้นผมก่อนสกัดเคราติน และเส้นผมหลังสกัดเคราตินด้วยไทโกลโคลิกแอซิด pH 2 (TA2) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส b) 4 ชั่วโมง c) 24 ชั่วโมง d) 48 ชั่วโมง e) 72 ชั่วโมง และ f) 84 ชั่วโมง



รูปที่ 4.23 ภาพ SEM ของเส้นผมก่อนและหลังสกัดเคราติน ที่กำลังขยาย 500 เท่า

a) เส้นผมก่อนสกัดเคราติน และเส้นผมหลังสกัดเคราตินด้วยไทโอไกลโคลิกแอซิด pH 8.5 (TA8.5) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส b) 4 ชั่วโมง c) 24 ชั่วโมง d) 48 ชั่วโมง e) 72 ชั่วโมง และ f) 84 ชั่วโมง

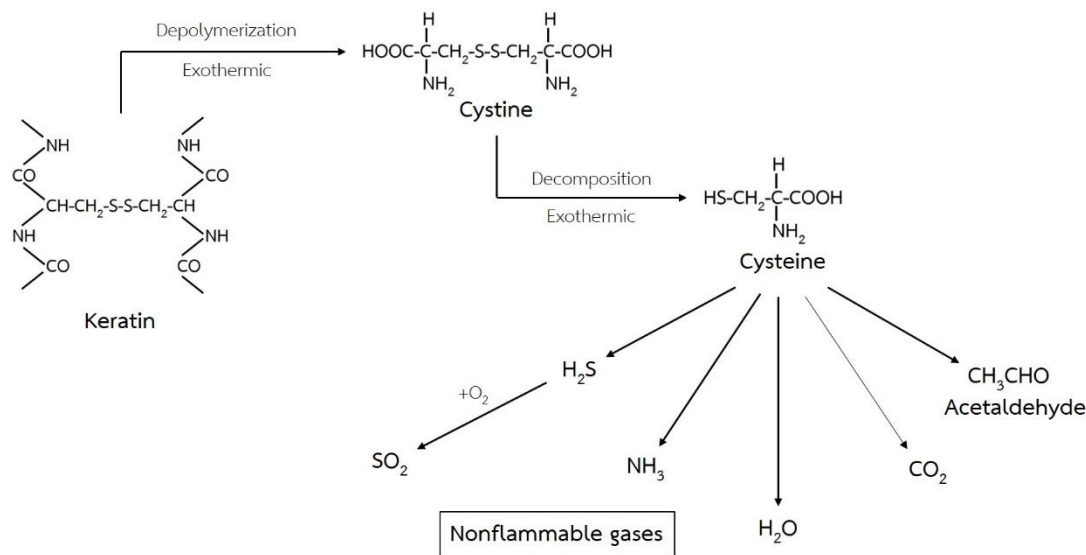


รูปที่ 4.24 ภาพ SEM ของเส้นผมก่อนและหลังสกัดเคราติน ที่กำลังขยาย 500 เท่า

- a) เส้นผมก่อนสกัดเคราติน และเส้นผมหลังสกัดเคราตินด้วย 1,2-อีเทนไดโทอล (EDT) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส b) 4 ชั่วโมง c) 24 ชั่วโมง d) 48 ชั่วโมง e) 72 ชั่วโมง และ f) 84 ชั่วโมง

4.1.2.7 การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของเคราตินด้วยเทคนิค TGA

การสลายตัวของเคราตินมี 2 ขั้น คือ ขั้นแรกจะสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า 120 องศาเซลเซียส เนื่องจากการระเหยของน้ำ ขั้นที่ 2 ที่อุณหภูมิ 150 – 600 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของเคราติน โดยปลดปล่อยแก๊สดีไพยาแกคือ แก๊สแอมโมเนีย (ammonia, NH₃) และแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (sulfur dioxide, SO₂) ออกมาเพื่อเจือจางแก๊สออกซิเจนในอากาศทำให้การเผาไหม้ลดลง จากการศึกษาของ Brebu และ Spiridon พบว่าเคราตินจากเส้นผมจะสลายตัวปลดปล่อยแก๊สแอมโมเนียออกมาที่อุณหภูมิประมาณ 220-450 องศาเซลเซียส และปลดปล่อยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกมาที่อุณหภูมิประมาณ 253-260 องศาเซลเซียส [15] โดยกลไกการสลายตัวทางความร้อนของเคราติน แสดงในรูปที่ 4.25 เมื่อเคราตินได้รับความร้อนจะสลายตัวเป็นซิสทีนซึ่งเป็นอนุพันธ์ซึ่งมีการเชื่อมขวางของพันธะไดซัลไฟด์ที่แสดงลักษณะของเคราติน จากนั้นพันธะไดซัลไฟด์จะแตกออกเกิดกรดอะมิโนซิสเทอีน เมื่อกรดอะมิโนซิสเทอีนสลายตัวจะปลดปล่อยแก๊สแอมโมเนีย และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกมา แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งเป็นแก๊สดีไพยาแก โดยจะมาช่วยเจือจางแก๊สดีไพยาแกในระบปร่วมกับแก๊สแอมโมเนีย [15, 21]

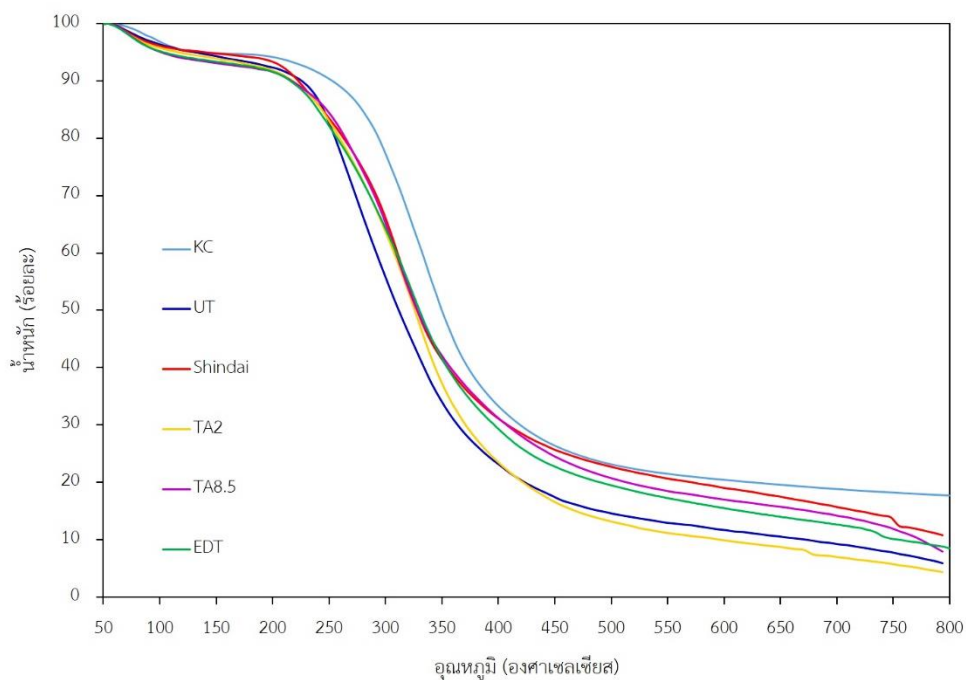


รูปที่ 4.25 กลไกการสลายตัวทางความร้อนของเคราติน

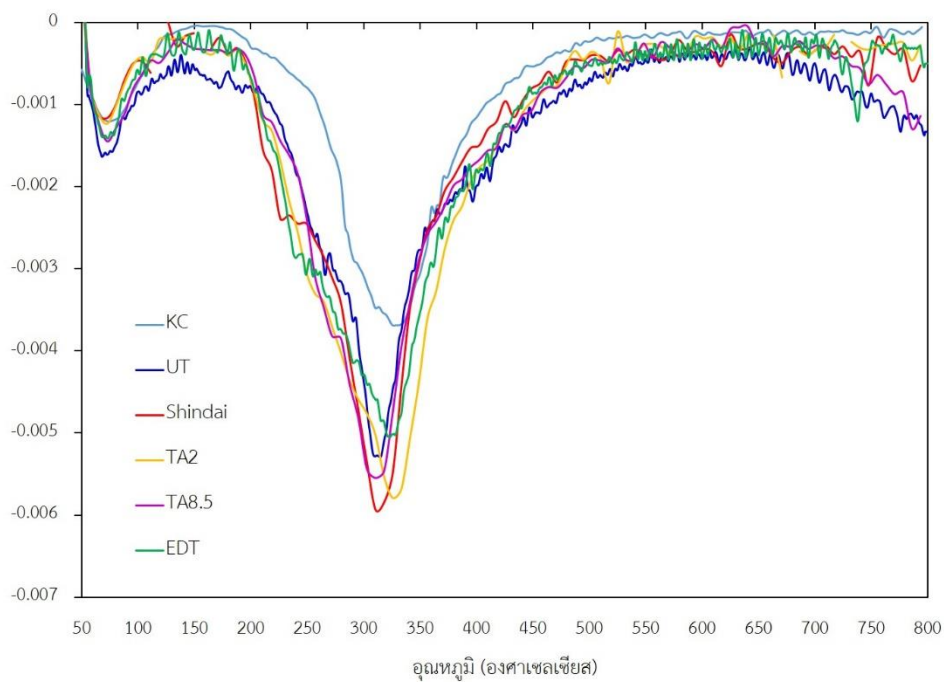
การสลายตัวทางความร้อนของเคราตินทางการค้าและสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วยสารรีติวซ์ต่างกัน ณ ภาวะที่ได้ปริมาณโปรตีนในสารสกัดหยาบเคราตินมากที่สุด แสดงในรูปที่ 4.26 และ 4.27

เคราตินทางการค้าเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 247 องศาเซลเซียส ในขณะที่สารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วยสารรีติวซ์ต่างกันเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่ามาก นอกจากนี้เคราตินทางการค้ายังมีอุณหภูมิที่มีอัตราการสลายตัวทางความร้อนมากที่สุด (T_{max}) ที่อุณหภูมิสูง และมีปริมาณชาร์ร่องรอยละ 17.7 ซึ่งมีปริมาณมากที่สุดเมื่อเทียบกับสารสกัดหยาบเคราติน แสดงว่าเคราตินทางการค้ามีความคงทนต่อความร้อนสูงกว่าสารสกัดหยาบเคราติน

สำหรับสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย Shindai จะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 202 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิเริ่มสลายตัวที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วยสารรีติวซ์ชนิดอื่น จึงปลดปล่อยแก๊สติดไฟยากได้เร็วที่สุด ทำให้มีปริมาณชาร์ที่เหลือน้อยร้อยละ 10.5 ซึ่งมีปริมาณมากที่สุดเมื่อเทียบกับสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วยสารรีติวซ์ชนิดอื่น แต่เมื่อเทียบกับเคราตินทางการค้าที่แม้จะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า จึงปลดปล่อยแก๊สติดไฟยากออกมาช้ากว่า แต่กลับมีปริมาณชาร์มากที่สุด ทั้งนี้อาจเกิดจากการปรับสภาพผิวของเคราตินทางการค้าให้มีความคงทนต่อความร้อนสูง นอกจากนี้สารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย 1,2-อีเทนไดโทออล (EDT) ก็มีความสามารถในการปลดปล่อยแก๊สติดไฟยากได้เร็วที่อุณหภูมิต่ำเช่นกัน คือ ที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส และให้ปริมาณชาร์ร่องรอยละ 8.6 ซึ่งมีปริมาณมากกว่าสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย Shindai



รูปที่ 4.26 TGA เทอร์โมแกรมภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนของเคราตินทางการค้าและสารสกัดหยาบ
เคราตินที่สกัดด้วยสารรีตีวซ์ต่างกัน



รูปที่ 4.27 DTG เทอร์โมแกรมภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนของเคราตินทางการค้าและสารสกัดหยาบ
เคราตินที่สกัดด้วยสารรีตีวซ์ต่างกัน

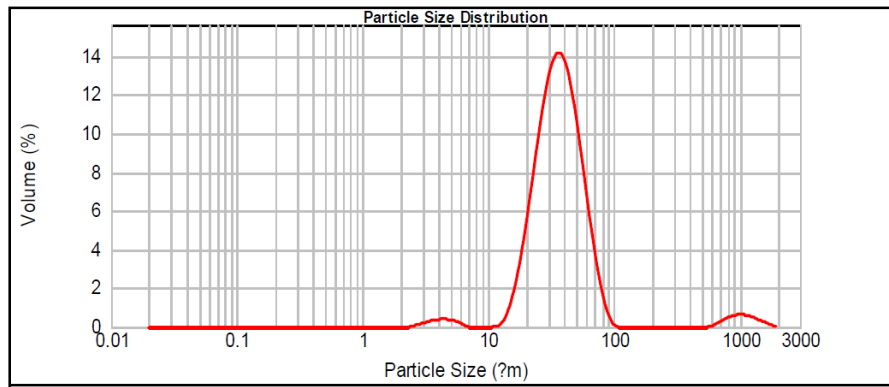
4.1.2.8 การหาขนาดและการกระจายขนาดอนุภาคของคราตินด้วยเทคนิค Laser Particle Size Distribution Analyzer

ขนาดอนุภาค ($d(0.5)$) ของคราตินทางการค้าและสารสกัดหยาบคราตินที่สกัดด้วย Shindai 48 ชั่วโมง และ 1,2-อีเทนไดโทออล (EDT) 4 ชั่วโมง แสดงในตารางที่ 4.5 และการกระจายขนาดอนุภาคคราตินทางการค้าและสารสกัดหยาบคราตินที่สกัดด้วย Shindai 48 ชั่วโมง และ EDT 4 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 4.28-4.30 ตามลำดับ โดยเป็นการเลือกเฉพาะสารสกัดหยาบคราตินที่สกัดด้วย EDT 4 ชั่วโมง ซึ่งเป็นภาวะที่เหมาะสมในการสกัดคราตินมากที่สุดมาวิเคราะห์ขนาดอนุภาค เนื่องจากให้ปริมาณสารสกัดหยาบมากที่สุด และให้ปริมาณโปรตีนในสารสกัดหยาบมากที่สุด โดยใช้เวลาในการสกัดน้อยที่สุดจึงเป็นการประหยัดเวลาและเชื้อเพลิงในการสกัด นอกจากนี้โปรตีนในสารสกัดหยาบยังเป็นแอลฟาคราตินอีกด้วย โดยจะเปรียบเทียบขนาดอนุภาคของสารสกัดหยาบจากภาวะที่เหมาะสมที่สุด (EDT 4 ชั่วโมง) กับคราตินทางการค้า และสารสกัดหยาบคราตินที่สกัดด้วย Shindai เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ซึ่งเป็นตัวทำละลายที่ได้รับความนิยมในการสกัดคราตินจากเส้นผมมนุษย์

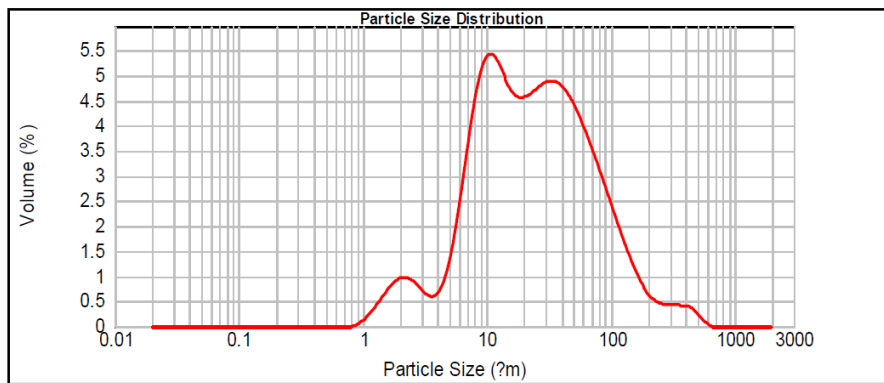
คราตินทางการค้าจะมีขนาดอนุภาค ($d(0.5)$) ที่ใหญ่ที่สุด คือ 35.88 ไมโครเมตร และมีการกระจายขนาดอนุภาค (span) ที่แคบ คือ span มีค่าน้อยกว่า 2 (1.15) ขนาดอนุภาคของคราตินทางการค้าจึงค่อนข้างสม่ำเสมอ ในขณะที่สารสกัดหยาบคราตินจะมีการกระจายขนาดอนุภาคที่กว้าง คือ span มีค่ามากกว่า 2 (3.98) ขนาดอนุภาคของสารสกัดหยาบคราตินจึงมีขนาดไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากมีองค์ประกอบหลายชนิด เช่น โปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างกัน และเม็ดสีเมลานิน จึงทำให้มีความบริสุทธิ์ต่ำ และมีขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน สารสกัดหยาบคราตินที่สกัดด้วย Shindai จะมีขนาดอนุภาค ($d(0.5)$) ปานกลาง คือ 22.59 ไมโครเมตร ในขณะที่สารสกัดหยาบคราตินที่สกัดด้วย EDT จะมีขนาดอนุภาค ($d(0.5)$) เล็กที่สุด คือ 12.76 ไมโครเมตร เนื่องจากความแรงของสารรีดิวซ์ทำให้สามารถรีดิวซ์โมเลกุลของคราติน และสารประกอบต่างๆ ให้มีขนาดเล็กที่สุด อย่างไรก็ตามคราตินที่สกัดด้วยสารรีดิวซ์ในงานวิจัยนี้มีขนาดอนุภาคกระจายกันค่อนข้างสูง

ตารางที่ 4.5 ขนาดอนุภาค ($d(0.5)$) ของคราตินทางการค้าและสารสกัดหยาบคราติน

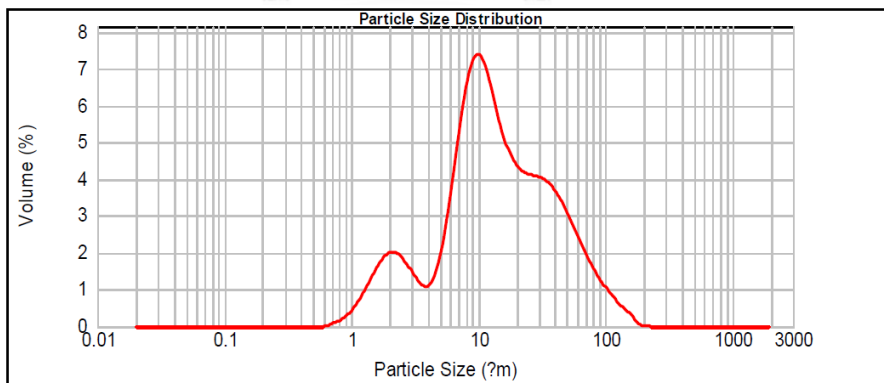
ตัวอย่าง	ขนาดอนุภาค ($d(0.5)$) (ไมโครเมตร)	Span
คราตินทางการค้า	35.88	1.15
สารสกัดหยาบคราตินที่สกัดด้วย Shindai 48 ชั่วโมง	22.59	3.98
สารสกัดหยาบคราตินที่สกัดด้วย EDT 4 ชั่วโมง	12.76	3.98



รูปที่ 4.28 การกระจายขนาดอนุภาคของเคราตินทางการค้า



รูปที่ 4.29 การกระจายขนาดอนุภาคของสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย Shindai 48 ชั่วโมง



รูปที่ 4.30 การกระจายขนาดอนุภาคของสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย 1,2-อีเทนไดโทอล (EDT) 4 ชั่วโมง

4.1.2.9 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของสารสกัดหยาบเคราติน

4.1.2.9.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของสารสกัดหยาบเคราตินด้วยตาเปล่า

ลักษณะทางกายภาพของเคราตินทางการค้าและสารสกัดหยาบเคราตินด้วยตาเปล่า แสดงในรูปที่ 4.31

เคราตินทางการค้า มีลักษณะเป็นผงละเอียด สีขาวครีมคล้ายนมผง สามารถละลายในน้ำได้ (hydrolyzed) เนื่องจากผ่านการปรับสภาพผิวทางการค้าให้มีลักษณะพิเศษในการนำไปใช้งาน

สารสกัดหยาบที่สกัดโดยไม่มีสารรีดิวซ์ (UT) มีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลเข้ม มีการเกาะกันของอนุภาคเป็นก้อน

สารสกัดหยาบที่สกัดด้วย 2-เมอร์แคปโทเอทานอล (Shindai) มีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลอ่อน มีลักษณะเป็นผงค่อนข้างละเอียด มีการกระจายตัวของอนุภาคดี

สารสกัดหยาบที่สกัดด้วยไทโอไกลโคลิกแอซิด pH 2 (TA2) มีลักษณะเป็นผงสีครีม มีการเกาะกันของอนุภาคเป็นก้อน

สารสกัดหยาบที่สกัดด้วยไทโอไกลโคลิกแอซิด pH 8.5 (TA8.5) มีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลอ่อน มีการเกาะกันของอนุภาคเป็นก้อน

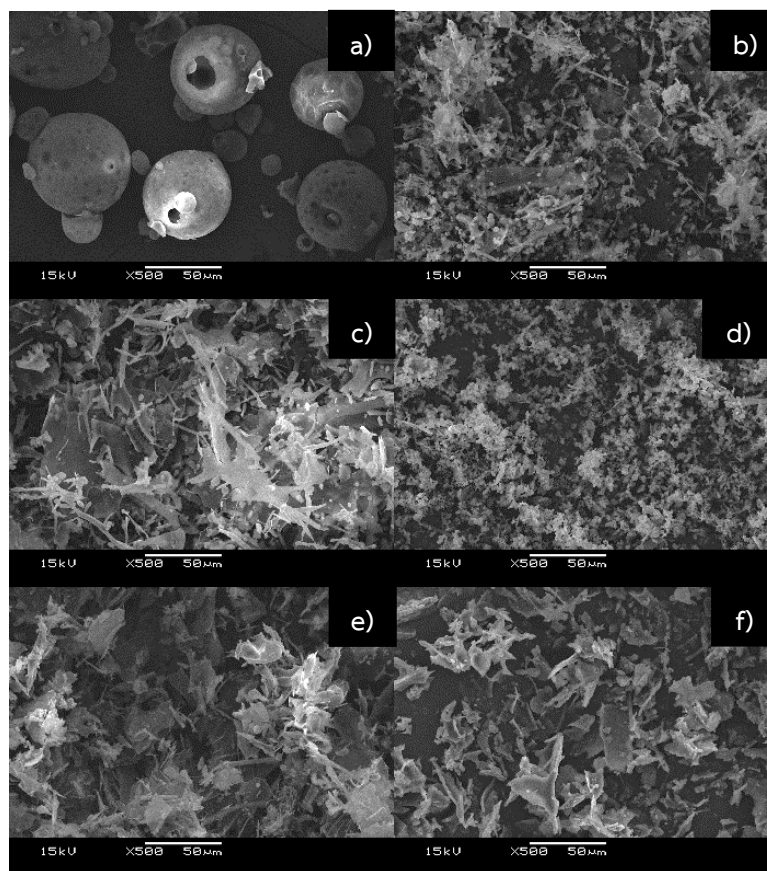
สารสกัดหยาบที่สกัดด้วย 1,2-อีเทนไดไธออล (EDT) มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีน้ำตาลอ่อน อนุภาคเกาะกันหลวมๆ ลักษณะคล้ายฟองน้ำ



รูปที่ 4.31 ภาพถ่ายของ a) เคราตินทางการค้า และสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วยสารรีดิวซ์ต่างกัน b) ไม่มีสารรีดิวซ์ (UT) c) 2-เมอร์แคปโทเอทานอล (Shindai) d) ไทโกลโคลิกแอซิด pH 2 (TA2) e) ไทโกลโคลิกแอซิด pH 8.5 (TA8.5) และ f) 1,2-อีเทนไดไธออล (EDT)

4.1.2.9.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของสารสกัดหยาบเคราตินด้วย SEM

ลักษณะของเคราตินทางการค้าและสารสกัดหยาบเคราตินวิเคราะห์ด้วย SEM แสดงในรูปที่ 4.32 พบว่า เคราตินทางการค้าจะมีลักษณะเป็นอนุภาคกลม ขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอ ผิวไม่เรียบ มีการยุบตัวเล็กน้อย เนื่องจากเคราตินทางการค้ามีการตกแต่งผิวให้มีลักษณะพิเศษ คือ สามารถละลายน้ำได้ และมีการควบคุมขนาดอนุภาคให้มีขนาดสม่ำเสมอ ส่วนสารสกัดหยาบเคราตินจะมีลักษณะคล้ายกัน คือ จะมีลักษณะเป็นเกล็ด (flake) มีขนาดไม่สม่ำเสมอ ยกเว้นสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วยไทโอไกลโคลิกแอซิด pH 2 (TA2) จะมีลักษณะเป็นอนุภาคกลมที่มีขนาดเล็กมากๆ เนื่องจากความเป็นกรดแก่ของสารรีดิวซ์ ทำให้โปรตีนถูกทำลายอย่างรุนแรงจนมีขนาดอนุภาคเล็กมาก โดยสารสกัดหยาบที่สกัดด้วย Shindai จะมีขนาดของเกล็ดที่ใหญ่ที่สุด เนื่องจากสารรีดิวซ์มีความแรงแต่ไม่ทำลายอนุภาคโปรตีน และสกัดในระยะเวลาที่เหมาะสม ทำให้ได้โปรตีนที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ ในขณะที่สารสกัดหยาบที่สกัดด้วย 1,2-อีเทนไดไธออล (EDT) จะมีขนาดของเกล็ดเล็ก เนื่องจากสารรีดิวซ์มีความแรงมาก แต่สกัดในระยะเวลาสั้น จึงไม่ทำลายอนุภาคโปรตีน นอกจากนี้สารสกัดหยาบที่สกัดโดยไม่มีสารรีดิวซ์ (UT) และสกัดด้วยไทโอไกลโคลิกแอซิด pH 8.5 (TA8.5) จะมีขนาดของเกล็ดเล็ก เนื่องจากถึงแม้ว่าจะไม่มีสารรีดิวซ์ และสารรีดิวซ์มีความแรงน้อย แต่ใช้ระยะเวลาในการสกัดนาน ทำให้โปรตีนมีขนาดอนุภาคเล็กได้ ดังนั้น ลักษณะของสารสกัดหยาบเคราตินยังขึ้นอยู่กับความแรงของสารรีดิวซ์ในการสกัด ความเป็นกรดเบส และระยะเวลาในการสกัดเคราติน



รูปที่ 4.32 ภาพ SEM ของคราติน ที่กำลังขยาย 500 เท่า a) คราตินทางการค้า และสารสกัดหยาบ คราตินที่สกัดด้วยสารรีดิวซ์ต่างกัน ที่ภาวะต่าง ๆ b) ไม่มีสารรีดิวซ์ (UT) 84 ชั่วโมง c) 2-เมอร์แคปโทเอทานอล (Shindai) 48 ชั่วโมง d) ไทโอไกลโคลิกแอซิด pH 2 (TA2) 24 ชั่วโมง e) ไทโอไกลโคลิกแอซิด pH 8.5 (TA8.5) 84 ชั่วโมง และ f) 1,2-อีเทนไดไทออล (EDT) 4 ชั่วโมง

4.2 การตกแต่งหน้าต่างไฟฟ้ายด้วยเคราตินร่วมกับแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตด้วยวิธีการเคลือบแบบปาดยางผ่านสกรีน

4.2.1 ผลของขนาดอนุภาคแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตร่วมกับเคราตินต่อการหน้าต่างไฟฟ้าย

ในการศึกษาผลของขนาดอนุภาคแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตร่วมกับเคราตินต่อการหน้าต่างไฟฟ้าย ได้ทำการตกแต่งหน้าต่างไฟฟ้ายด้วยแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตทางการค้า 2 ชนิด คือ Exolit AP422 (ขนาดอนุภาค 50 ไมโครเมตร) และ Exolit 423 (ขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร) ร่วมกับเคราติน 2 ชนิด คือ เคราตินทางการค้า และสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย 1,2-อีเทนไดโทล (EDT) 4 ชั่วโมง ซึ่งเป็นภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเคราตินที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยจะควบคุมปริมาณสารหน้าต่างไฟฟ้ายละ 10 เนื่องจากเป็นปริมาณที่น้อยที่สุดของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตที่สามารถหน้าต่างไฟได้ จากการทดสอบความสามารถในการหน้าต่างไฟตามมาตรฐาน UL94-VTM ให้ค่า VTM-0

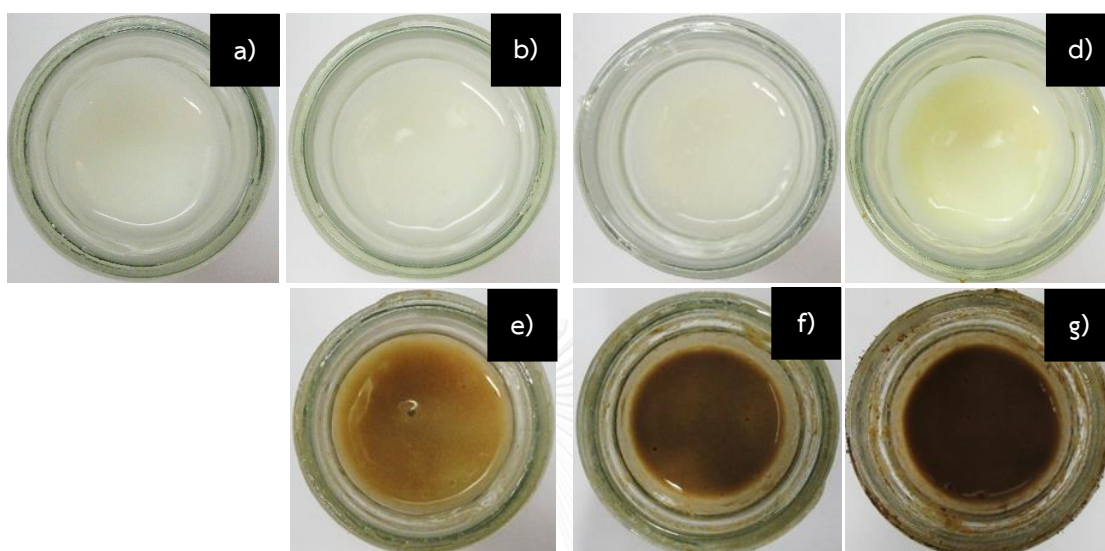
4.2.1.1 ลักษณะทางกายภาพของสารเคลือบหน้าต่างไฟ

4.2.1.1.1 สีของสารเคลือบหน้าต่างไฟ

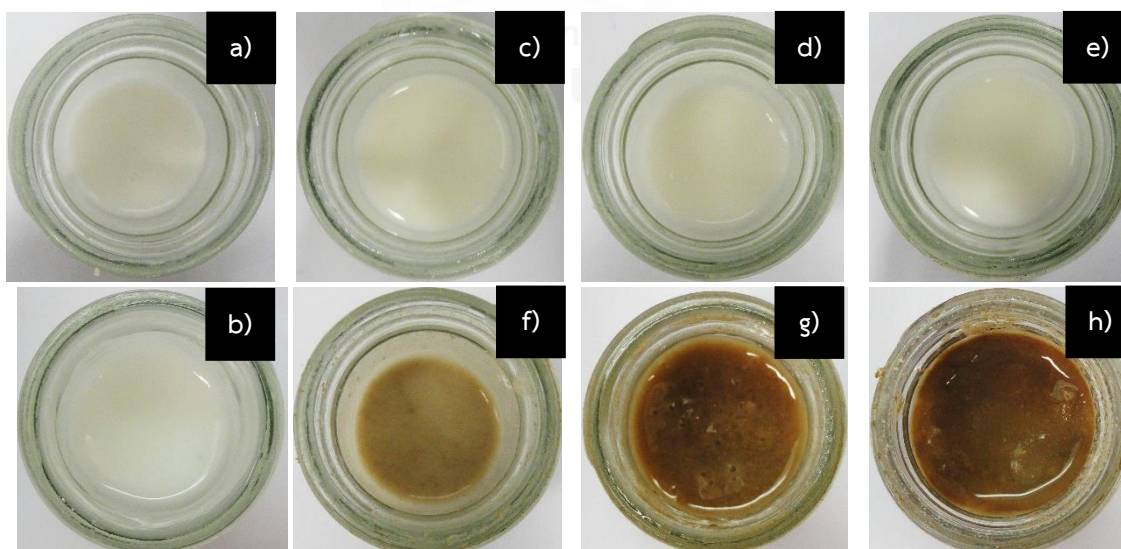
สีของสารเคลือบเคราติน แสดงในรูปที่ 4.33 พบว่า สีของสารเคลือบสูตรควบคุม (control) ที่ยังไม่มีเคราตินจะมีสีขาว แต่เมื่อผสมเคราตินทางการค้าสารเคลือบจะมีสีขาวเหลือง และมีสีเหลืองเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเคราตินทางการค้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเคราตินทางการค้ามีสีขาวเหลือง ในขณะที่สารเคลือบที่มีสารสกัดหยาบเคราตินจะมีสีน้ำตาล และมีสีน้ำตาลเข้มขึ้นเมื่อปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารสกัดหยาบเคราตินมีสีน้ำตาล

สีของสารเคลือบเคราตินร่วมกับ Exolit AP422 และสีของสารเคลือบเคราตินร่วมกับ Exolit AP423 แสดงในรูปที่ 4.34 และ 4.35 ตามลำดับ พบว่า สีของสารเคลือบที่มี Exolit AP422 และ Exolit AP423 มีสีขาว แต่จะมีความทึบแสงมากกว่าสารเคลือบสูตรควบคุม (control) ที่ไม่มีสารหน้าต่างไฟ เนื่องจาก Exolit AP422 และ Exolit AP423 เป็นผงสีขาว ไม่ละลายน้ำ ส่วนสารเคลือบที่มีเคราตินทางการค้าร่วมกับ Exolit AP422 และสารเคลือบเคราตินทางการค้าร่วมกับ Exolit AP423 จะมีสีขาวครีม โดยจะมีสีเหลืองเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณเคราตินทางการค้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากมี Exolit AP422 และ Exolit AP423 ซึ่งมีสีขาวผสมอยู่ด้วยในปริมาณที่มากกว่าหรือเท่ากัน ทำให้สีเหลืองของเคราตินทางการค้าอ่อนลงเป็นสีครีม ในขณะที่สารเคลือบที่มีสารสกัดหยาบเคราตินร่วมกับ Exolit AP422 และสารเคลือบสารสกัดหยาบเคราตินร่วมกับ Exolit AP423 จะมีสีน้ำตาล โดยจะมีสีน้ำตาลเข้มขึ้นเมื่อปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินเพิ่มขึ้น แต่มีความเข้มน้อยกว่าสารเคลือบที่มีสาร

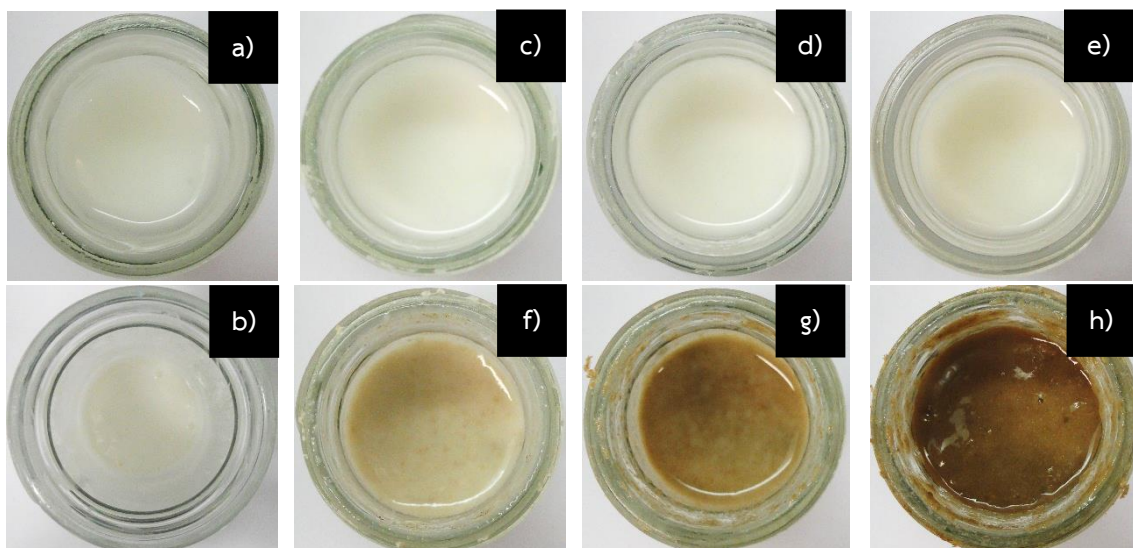
สีกัดหยาบเคราตินอย่างเดี่ยวที่มีปริมาณเคราตินเท่ากัน เนื่องจากมี Exolit AP422 และ Exolit AP423 ซึ่งมีสีขาวผสมอยู่ด้วยในปริมาณที่มากกว่าหรือเท่ากัน ทำให้สีน้ำตาลเข้มของสารสีกัดหยาบเคราตินอ่อนลง



รูปที่ 4.33 สีของสารเคลือบเคราตินที่มีปริมาณเคราตินต่างกัน a) ร้อยละ 0 (control) เคราตินทางการค้า b) ร้อยละ 1 c) ร้อยละ 3 และ d) ร้อยละ 5 และสารสีกัดหยาบเคราติน e) ร้อยละ 1 f) ร้อยละ 3 และ g) ร้อยละ 5



รูปที่ 4.34 สีของสารเคลือบ a) สูตรควบคุม (control) b) Exolit AP422 ร้อยละ 10 สารเคลือบที่มีอัตราส่วนของ AP422 : เคราตินทางการค้า (ร้อยละ) c) 9:1 d) 7:3 e) 5:5 และสารเคลือบที่มีอัตราส่วนของ AP422 : สารสีกัดหยาบเคราติน f) 9:1 g) 7:3 h) 5:5



รูปที่ 4.35 สีของสารเคลือบ a) สูตรควบคุม (control) b) Exolit AP423 ร้อยละ 10 สารเคลือบที่มีอัตราส่วนของ AP423 : เคราตินทางการค้า (ร้อยละ) c) 9:1 d) 7:3 e) 5:5 และสารเคลือบที่มีอัตราส่วนของ AP423 : สารสกัดหยาบเคราติน f) 9:1 g) 7:3 h) 5:5

4.2.1.1.2 ความหนืดของสารเคลือบสารหน่วงไฟ

ความหนืดของสารเคลือบแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตที่มีขนาดอนุภาคต่างกันร่วมกับเคราติน และความหนืดของเคราติน แสดงในตารางที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ พบว่า สารเคลือบแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตทั้ง Exolit AP422 และ Exolit AP423 จะมีความหนืดลดลง เมื่อเทียบกับสารเคลือบควบคุม (control) เนื่องจากแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตมีขนาดอนุภาคเล็ก และสามารถละลายน้ำได้บางส่วน ทำให้แตกตัวให้แอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ได้ นอกจากนี้สารเคลือบสารหน่วงไฟ Exolit AP422 จะมีความหนืดมากกว่าสารเคลือบสารหน่วงไฟ Exolit AP423 เล็กน้อย เนื่องจาก Exolit AP422 สามารถละลายน้ำ (ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก) ได้น้อยกว่า Exolit AP423 (ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก) จึงแตกตัวได้น้อยกว่า และ Exolit AP422 มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า Exolit AP423 ทำให้สารเคลือบมีความหนืดมากกว่าเล็กน้อย สารเคลือบแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตร่วมกับเคราตินทั้งเคราตินทางการค้า (KC) และสารสกัดหยาบเคราติน (KE) จะมีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเคราตินเพิ่มขึ้น แต่สารเคลือบเคราตินทางการค้าจะมีความหนืดน้อยกว่าสารเคลือบสารสกัดหยาบเคราติน เนื่องจากสารสกัดหยาบเคราตินมีอนุภาคขนาดเล็กกว่า น้ำหนักเบากว่า จึงต้องใช้ในปริมาณที่มากกว่าในปริมาณที่เท่ากัน ทำให้มีอนุภาคสารสกัดหยาบเคราตินมากกว่า นอกจากนั้นเคราตินทางการค้ายังถูกตกแต่งผิวให้สามารถละลายน้ำได้บางส่วน จึงทำให้อนุภาคของแข็งที่ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมในสารเคลือบลดลง ความหนืดจึงน้อยกว่าสารเคลือบสารสกัดหยาบเคราติน

ตารางที่ 4.6 ความหนืดของสารเคลือบแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตที่มีขนาดอนุภาคต่างกันร่วมกับ
 เคราติน (เคราตินทางการค้า (KC) และสารสกัดหยาบเคราติน (KE))

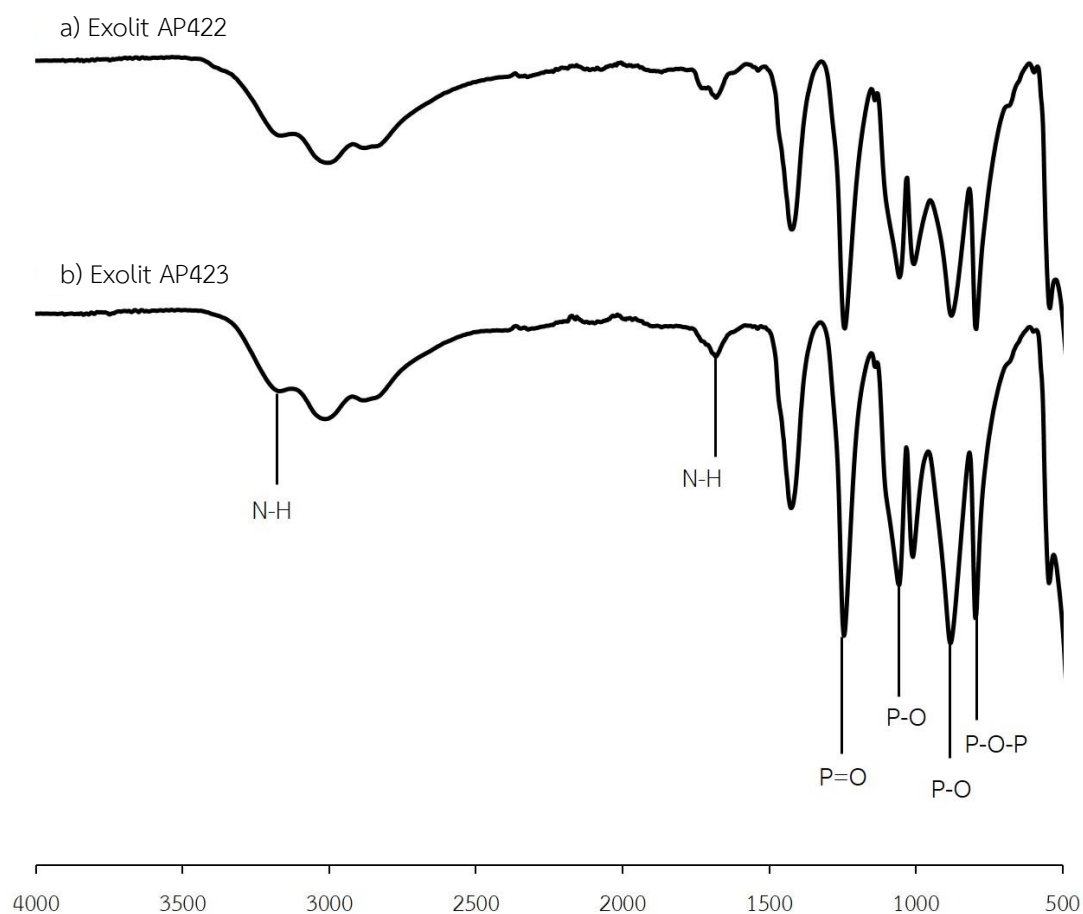
อัตราส่วนของ APP : เคราติน (ร้อยละน้ำหนัก)	ความหนืด (cps)			
	AP422		AP423	
	KC	KE	KC	KE
0:0 (control)	6458	6458	6458	6458
10:0	4025	4025	4000	4000
9:1	5792	5667	5542	5875
7:3	6375	7958	6333	8542
5:5	7500	10625	7083	10833
0:1	9875	10083	9875	10083
0:3	13667	15750	13667	15750
0:5	17833	19375	17833	19375

ตารางที่ 4.7 ความหนืดของสารเคลือบเคราติน (เคราตินทางการค้า (KC) และสารสกัดหยาบเคราติน
 (KE))

เคราติน (ร้อยละน้ำหนัก)	ความหนืด (cps)	
	KC	KE
1	9875	10083
3	13667	15750
5	17833	19375

4.2.1.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต

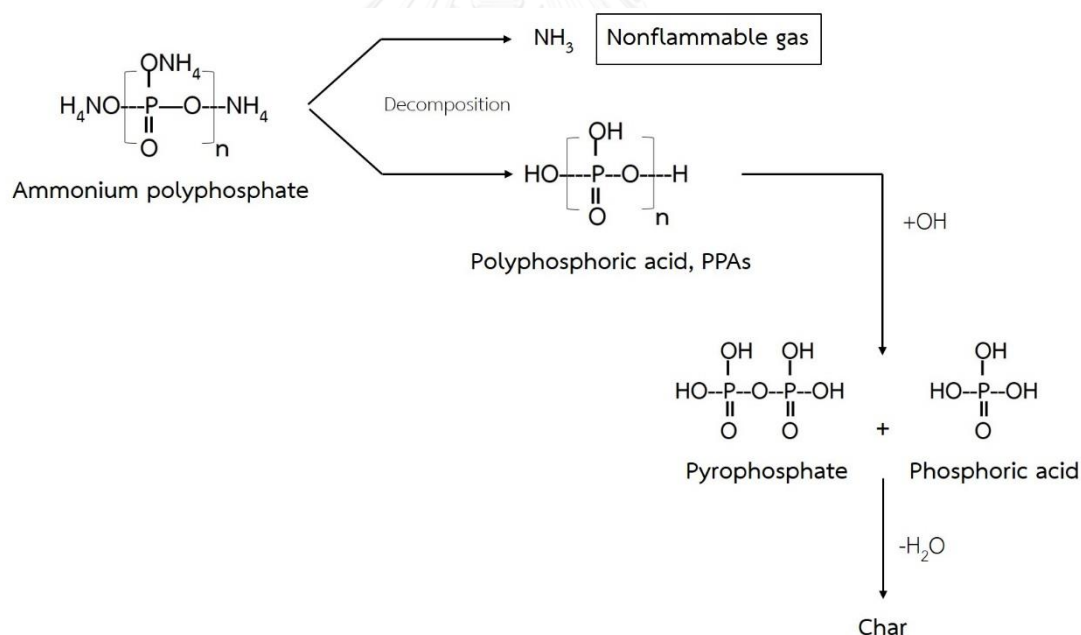
ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตที่มีขนาดอนุภาคต่างกัน แสดงในรูปที่ 4.36 พบว่า FT-IR สเปกตรัมของ Exolit AP422 (อนุภาคประมาณ 50 ไมโครเมตร) และ Exolit AP423 (อนุภาคประมาณ 20 ไมโครเมตร) แสดงหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกัน ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่แสดงลักษณะสมบัติทางเคมีของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต คือ แสดงหมู่ฟังก์ชัน N-H (3200 cm^{-1} และ 1650 cm^{-1}), P=O (1256 cm^{-1}), P-O (1075 cm^{-1} และ 880 cm^{-1}) และ P-O-P (800 cm^{-1}) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกับหมู่ฟังก์ชันของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตในงานวิจัยของ Wang และคณะ [69] แต่ Exolit AP423 แสดงพีคของ P=O, P-O และ P-O-P ที่มีความเข้มมากกว่า Exolit AP422 แสดงว่า Exolit AP423 มีหมู่ฟอสเฟตในโครงสร้างมากกว่า Exolit AP422 เนื่องจาก Exolit AP423 มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า จึงมีปริมาณของฟอสเฟตมากกว่าในปริมาณสารเท่ากัน



รูปที่ 4.36 FT-IR สเปกตรัมของ a) Exolit AP422 และ b) Exolit AP423

4.2.1.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตที่มีขนาดอนุภาคต่างกันด้วยเทคนิค TGA

กลไกการสลายตัวทางความร้อนของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต แสดงในรูปที่ 4.37 เมื่อแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตได้รับความร้อนที่อุณหภูมิมากกว่า 200 องศาเซลเซียส จะสลายตัวให้พอลิฟอสฟอริกแอซิด (polyphosphoric acid) และปลดปล่อยแอมโมเนียออกมา จากนั้นที่อุณหภูมิ 300-400 องศาเซลเซียส พอลิฟอสฟอริกแอซิดจะทำปฏิกิริยากับน้ำหรือหมู่ไฮดรอกซิลที่เกิดจากการสลายตัวของสารในระบบ เกิดเป็นไพโรฟอสเฟต (pyrophosphate) และถ้าปฏิกิริยายังดำเนินต่อไป จะเกิดกรดฟอสฟอริกขึ้น (phosphoric acid) และเมื่อถึงอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ไพโรฟอสเฟตและกรดฟอสฟอริกจะเป็นตัวเร่งให้เกิดการกำจัดน้ำ (dehydration) ได้ซาร์เกิดขึ้น [30, 70] ดังนั้นการที่แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตสามารถสลายตัวโดยปลดปล่อยแก๊สติดไฟยากออกมา พร้อมทั้งเกิดกรดฟอสฟอริกที่มีการกำจัดน้ำแล้วเร่งให้เกิดซาร์ ทำให้แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีและถูกนำมาใช้เป็นสารหน่วงไฟ

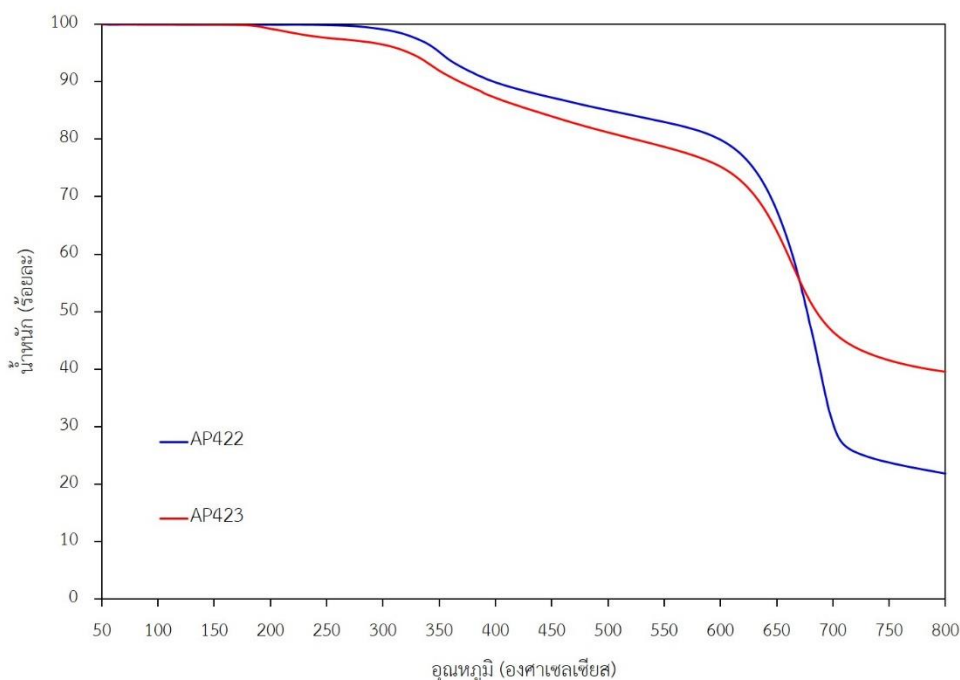


รูปที่ 4.37 กลไกการสลายตัวทางความร้อนของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต

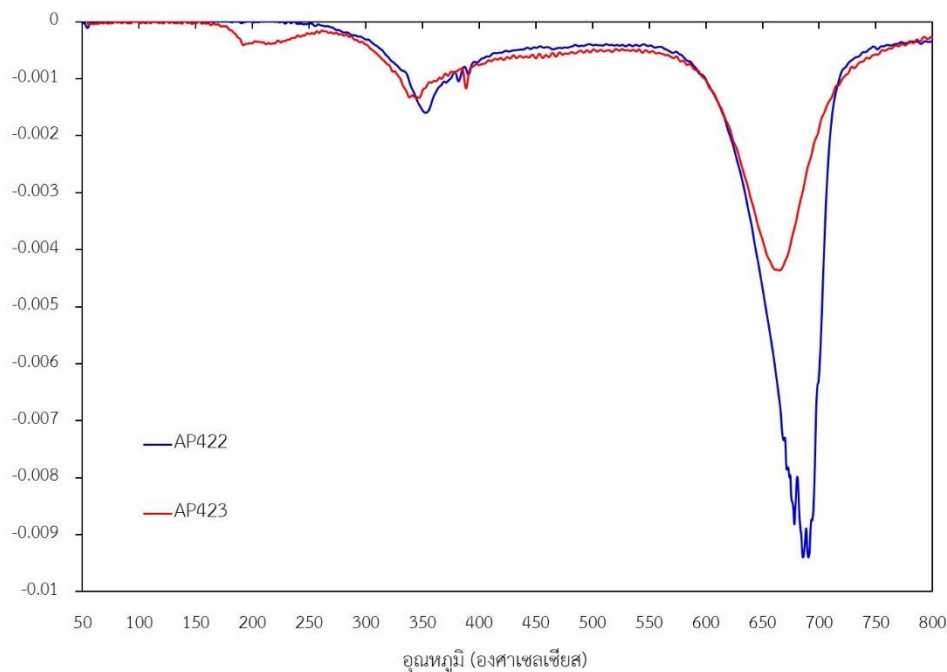
การสลายตัวทางความร้อนของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตที่มีขนาดอนุภาคต่างกัน แสดงในรูปที่ 4.38 และ 4.39 พบว่า Exolit AP423 มีการสลายตัว 3 ชั้น คือ ชั้นแรกเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 176 องศาเซลเซียส เนื่องจากการระเหยของน้ำและการปลดปล่อยแก๊สแอมโมเนียจากการสลายตัวของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตสายโซ่โมเลกุลสั้น [30] ชั้นที่ 2 ที่อุณหภูมิ 315 องศาเซลเซียส

พอลิฟอสฟอริกแอซิดจะทำปฏิกิริยากับน้ำหรือหมู่ไฮดรอกซิลที่เกิดจากการสลายตัวของสารในระบบ เกิดเป็นไพโรฟอสเฟต (pyrophosphate) และถ้าปฏิกิริยายังดำเนินต่อไปจะเกิดกรดฟอสฟอริกขึ้น (phosphoric acid) และขั้นที่ 3 ที่อุณหภูมิ 607 องศาเซลเซียส ไพโรฟอสเฟตและกรดฟอสฟอริกจะเป็นตัวเร่งให้เกิดการกำจัดน้ำ (dehydration) ได้ซาร์เกิดขึ้น

ในขณะที่ Exolit AP422 เริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่ามาก (315 องศาเซลเซียส) Exolit AP423 จึงปลดปล่อยแก๊สดีดีไพยากได้เร็ว ทำให้มีปริมาณซาร์ที่เหลืออยู่ถึงร้อยละ 39.6 มากกว่าปริมาณซาร์ที่เหลืออยู่ของ Exolit AP422 (ร้อยละ 21.8) นอกจากนี้ Exolit AP423 ยังมีอุณหภูมิที่มีอัตราการสลายตัวทางความร้อนมากที่สุด (T_{max}) ต่ำกว่า Exolit AP422 อีกด้วย แสดงว่า Exolit AP423 มีอัตราการสลายตัวทางความร้อนเร็วกว่า Exolit AP422 เนื่องจาก Exolit AP423 มีขนาดอนุภาคเล็ก (สายโซ่โมเลกุลสั้น) ทำให้มีการสลายตัวเร็วกว่า Exolit AP422 จึงปลดปล่อยแก๊สดีดีไพยากออกมาได้รวดเร็วกว่า กลไกการหน่วงไฟจึงเกิดขึ้นเร็วและมีประสิทธิภาพกว่า Exolit AP422 ดังนั้น Exolit AP423 มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟดีกว่า Exolit AP422 จึงเหมาะนำไปใช้ตกแต่งหน่วงไฟร่วมกับเคราติน เพื่อศึกษาการเสริมกันของสารหน่วงไฟที่มีไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ



รูปที่ 4.38 TGA เทอร์โมแกรมภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตที่มีขนาดอนุภาคต่างกัน



รูปที่ 4.39 DTG เทอร์โมแกรมภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตที่มีขนาดอนุภาคต่างกัน

4.2.1.4 ความสามารถในการหน่วงไฟของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารหน่วงไฟแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตที่มีขนาดอนุภาคต่างกันร่วมกับเคราติน ตามมาตรฐาน UL94-VTM

การหน่วงไฟของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารหน่วงไฟ Exolit AP422 ร่วมกับเคราติน ตามมาตรฐาน UL94-VTM แสดงในตารางที่ 4.8 พบว่า ผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟจะมีระยะเวลาการลามไฟหลังนำแหล่งกำเนิดไฟออก (afterflame time) นานที่สุด คือ 36.66 วินาที และเมื่อเผาไหม้หมดจะได้ขี้เถ้า ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP422 ร้อยละ 10 ไม่สามารถจัดความสามารถในการหน่วงไฟตามมาตรฐาน UL94-VTM ได้ เนื่องจากมีการลามไฟถึงระยะที่กำหนดไว้ 125 มิลลิเมตร เช่นเดียวกับผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP422 ร่วมกับเคราตินทั้งเคราตินทางการค้าและสารสกัดหยาบเคราติน โดย afterflame time จะเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณ Exolit AP422 ลดลงและเคราตินเพิ่มขึ้น แสดงว่าความสามารถในการหน่วงไฟขึ้นกับปริมาณ Exolit AP422 ในขณะที่ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยเคราตินทั้งเคราตินทางการค้าและสารสกัดหยาบเคราติน จะมี afterflame time ลดลง เมื่อปริมาณเคราตินเพิ่มขึ้น แสดงว่าการสลายตัวแล้วปลดปล่อยแก๊สติดไฟยากออกมา สามารถทำให้การลุกไหม้ของผ้าฝ้ายลดลงเล็กน้อย เนื่องจากปริมาณแก๊สที่ปลดปล่อยออกมามีปริมาณน้อย จึงไม่

สามารถทำให้การลุกไหม้หยุดลงอย่างรวดเร็วได้ ดังนั้นสารหน่วงไฟ Exolit AP422 จึงไม่เหมาะกับการตกแต่งเคลือบผิวบนผ้าฝ้าย เนื่องจากไม่สามารถทำให้ผ้าฝ้ายหน่วงไฟได้

การหน่วงไฟของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารหน่วงไฟ Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน ตามมาตรฐาน UL94-VTM แสดงในตารางที่ 4.9 พบว่า ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร้อยละ 10 สามารถจัดความสามารถในการหน่วงไฟตามมาตรฐาน UL94-VTM ได้ VTM-0 ซึ่งเป็นขั้นที่ดีที่สุด แสดงว่าผ้าฝ้ายสามารถหน่วงไฟได้ นอกจากนี้ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราติน ที่ปริมาณ Exolit AP423 ร้อยละ 9 สารสกัดหยาบเคราตินร้อยละ 1 (AP9KE1) และ Exolit AP423 ร้อยละ 7 สารสกัดหยาบเคราตินร้อยละ 3 (AP7KE3) สามารถจัดความสามารถในการหน่วงไฟตามมาตรฐาน UL94-VTM ได้ VTM-0 ในขณะที่ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า ที่ปริมาณ Exolit AP423 ร้อยละ 9 เคราตินทางการค้าร้อยละ 1 (AP9KC1) สามารถจัดความสามารถในการหน่วงไฟตามมาตรฐาน UL94-VTM ได้ VTM-0 และ Exolit AP423 ร้อยละ 7 เคราตินทางการค้าร้อยละ 3 (AP7KC3) สามารถจัดความสามารถในการหน่วงไฟตามมาตรฐาน UL94-VTM ได้ VTM-1 แสดงว่าการตกแต่งหน่วงไฟผ้าฝ้ายด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราติน สามารถเสริมการหน่วงไฟได้ดีกว่า Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า เนื่องจากสารสกัดหยาบเคราตินน่าจะสลายตัวให้แก๊สติดไฟยากในปริมาณมากกว่าเคราตินทางการค้า ทำให้การเสริมกันของ Exolit AP423 และสารสกัดหยาบเคราติน สามารถลดปริมาณการใช้ Exolit AP423 ลงเหลือร้อยละ 7 และยังสามารถหน่วงไฟได้

ดังนั้นสารหน่วงไฟแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตทางการค้าที่เหมาะสมในการตกแต่งหน่วงไฟร่วมกับเคราติน คือ Exolit AP423 เนื่องจากเมื่อตกแต่งหน่วงไฟร่วมกับเคราตินสามารถจัดความสามารถในการหน่วงไฟตามมาตรฐาน UL94-VTM ได้ VTM-0

ตารางที่ 4.8 การหน่วงไฟของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารหน่วงไฟ Exolit AP422 ร่วมกับเคราตินทางการค้า (KC) และสารสกัดหยาบเคราติน (KE) ตามมาตรฐาน UL94-VTM

ผ้าฝ้ายที่ตกแต่ง	Afterflame time (s) (t_1)	Afterglow time (s)(t_3)	125mm. mark	Dripping	Residue	VTM
ไม่ตกแต่ง	36.66	32.6	มี	ไม่มี	ขี้เถ้า	ไม่มี
control	31.12	35.78	มี	ไม่มี	ขี้เถ้า	ไม่มี
AP10	16.96	0	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
AP9KC1	14.36	0	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
AP7KC3	16.22	0	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
AP5KC5	17.26	0	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
AP9KE1	15.08	0	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
AP7KE3	15.96	0	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
AP5KE5	16.08	0	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
KC1	30.18	34.84	มี	ไม่มี	ขี้เถ้า	ไม่มี
KC3	28.10	39.26	มี	ไม่มี	ขี้เถ้า	ไม่มี
KC5	26.78	41.70	มี	ไม่มี	ขี้เถ้า	ไม่มี
KE1	31.22	24.44	มี	ไม่มี	ขี้เถ้า	ไม่มี
KE3	29.60	36.38	มี	ไม่มี	ขี้เถ้า	ไม่มี
KE5	28.00	35.14	มี	ไม่มี	ขี้เถ้า	ไม่มี

^{1st}Afterflame time (s) (t_1) คือ ระยะเวลาการลามไฟของตัวอย่าง หลังนำเปลวไฟออก ในครั้งที่ 1

Afterglow time (s) (t_3) คือ ระยะเวลาการคุแดงของตัวอย่าง หลังการลามไฟดับลง

125 mm mark คือ การลามไฟทั้งแบบมีเปลวไฟและไม่มีเปลวไฟถึงระยะที่กำหนดไว้ 125 มิลลิเมตร

Dripping คือ การลุกติดไฟของสำลีจากประกายไฟ หรือการหลอมหยดของชิ้นตัวอย่าง

VTM คือ การจัดความสามารถในการหน่วงไฟของชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน UL94-VTM

ตารางที่ 4.9 การหน่วงไฟของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารหน่วงไฟ Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า (KC) และสารสกัดหยาบเคราติน (KE) ตามมาตรฐาน UL94-VTM

ผ้าฝ้ายที่ตกแต่ง	Afterflame time (s) (t_1)	Afterglow time (s)(t_3)	125mm. mark	Dripping	Residue	VTM
ไม่ตกแต่ง	36.66	32.6	มี	ไม่มี	ขี้เถ้า	ไม่มี
control	31.12	35.78	มี	ไม่มี	ขี้เถ้า	ไม่มี
AP10	2.24	10.82	ไม่มี	ไม่มี	ชาร์	VTM-0
AP9KC1	1.26	16.20	ไม่มี	ไม่มี	ชาร์	VTM-0
AP7KC3	10.58	0	ไม่มี	ไม่มี	ชาร์	VTM-1
AP5KC5	12.82	2.60	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
AP9KE1	1.24	15.20	ไม่มี	ไม่มี	ชาร์	VTM-0
AP7KE3	7.66	2.48	ไม่มี	ไม่มี	ชาร์	VTM-0
AP5KE5	18.74	0	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
KC1	33.12	59.34	มี	ไม่มี	ขี้เถ้า	ไม่มี
KC3	31.12	79.46	มี	ไม่มี	ขี้เถ้า	ไม่มี
KC5	29.60	56.36	มี	ไม่มี	ขี้เถ้า	ไม่มี
KE1	32.68	49.44	มี	ไม่มี	ขี้เถ้า	ไม่มี
KE3	32.28	49.12	มี	ไม่มี	ขี้เถ้า	ไม่มี
KE5	30.40	43.62	มี	ไม่มี	ขี้เถ้า	ไม่มี

1^{st} Afterflame time (s) (t_1) คือ ระยะเวลาการลามไฟของตัวอย่าง หลังนำเปลวไฟออก ในครั้งที่ 1

Afterglow time (s) (t_3) คือ ระยะเวลาการคุแดงของตัวอย่าง หลังการลามไฟดับลง

125 mm mark คือ การลามไฟทั้งแบบมีเปลวไฟและไม่มีเปลวไฟถึงระยะที่กำหนดไว้ 125 มิลลิเมตร

Dripping คือ การลุกติดไฟของสำลีจากประกายไฟ หรือการหลอมหยดของชิ้นตัวอย่าง

VTM คือ การจัดความสามารถในการหน่วงไฟของชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน UL94-VTM

4.2.2 การตกแต่งหน้าไฟด้วยแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตร่วมกับเคราตินผ้าฝ้าย

จากการศึกษาผลของขนาดอนุภาคของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตที่ต่างกัน (Exolit AP422 และ Exolit AP423) ในหัวข้อ 4.2.1 ต่อการหน้าไฟผ้าฝ้าย พบว่า Exolit AP423 ที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าแสดงสมบัติหน้าไฟที่ดีกว่า ดังนั้นในการศึกษาประสิทธิภาพในการหน้าไฟของงานวิจัยต่อไปจึงเลือกใช้ Exolit AP423 ในการศึกษาการหน้าไฟของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตร่วมกับเคราตินบนผ้าฝ้าย งานวิจัยนี้ได้ทำการเคลือบหน้าไฟผ้าฝ้ายด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน 2 ชนิด คือ เคราตินทางการค้า และสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย 1,2-อีเทนไดโทอล (EDT) 4 ชั่วโมง โดยจะควบคุมปริมาณสารหน้าไฟร้อยละ 10 เนื่องจากเป็นปริมาณที่น้อยที่สุดของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตที่สามารถหน้าไฟได้ (จากการทดสอบความสามารถในการหน้าไฟของ Exolit AP423) ตามมาตรฐาน UL94-VTM และให้ค่า VTM-0 โดยการเตรียมสูตรเคลือบ 2 สูตร คือ สูตรที่ไม่มีสารช่วยผืนิก และสูตรที่มีสารช่วยผืนิก เพื่อศึกษาสูตรเคลือบหน้าไฟที่มีประสิทธิภาพในการหน้าไฟและการใช้งานมากที่สุด

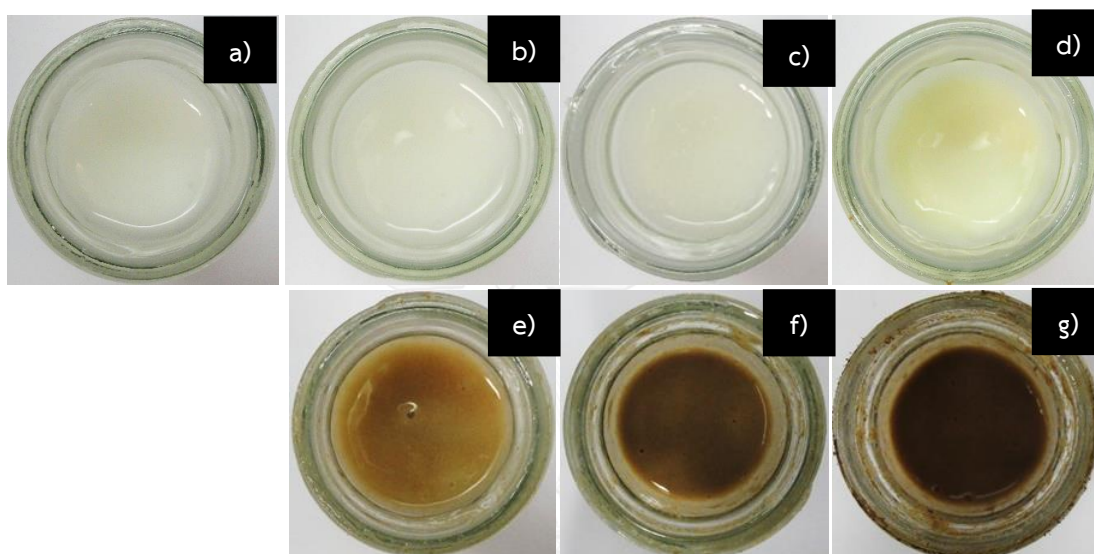
4.2.2.1 ลักษณะทางกายภาพของสารเคลือบหน้าไฟ

4.2.2.1.1 สีของสารเคลือบหน้าไฟ

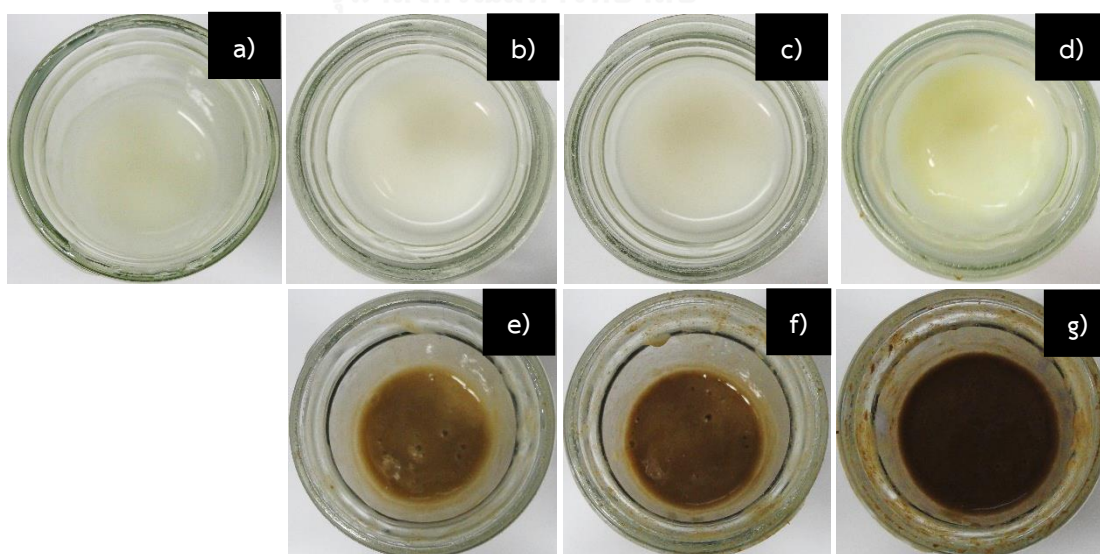
สีของสารเคลือบเคราตินสูตรที่ไม่มีสารช่วยผืนิก และสูตรที่มีสารช่วยผืนิก แสดงในรูปที่ 4.40 และ 4.41 ตามลำดับ พบว่าสีของสารเคลือบสูตรควบคุมสูตรที่ไม่มีสารช่วยผืนิก (control) และสารเคลือบควบคุมสูตรที่มีสารช่วยผืนิก (control-f) จะมีสีขาว แต่เมื่อผสมเคราตินทางการค้าสารเคลือบจะมีสีขาวเหลือง และมีสีเหลืองเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเคราตินทางการค้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเคราตินทางการค้ามีสีขาวเหลือง ในขณะที่สารเคลือบที่มีสารสกัดหยาบเคราตินจะมีสีน้ำตาล และมีสีน้ำตาลเข้มขึ้นเมื่อปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารสกัดหยาบเคราตินมีสีน้ำตาล

สีของสารเคลือบเคราตินร่วมกับ Exolit AP423 สูตรที่ไม่มีสารช่วยผืนิก และสีของสารเคลือบเคราตินร่วมกับ Exolit AP423 สูตรที่มีสารช่วยผืนิก แสดงในรูปที่ 4.42 และ 4.43 ตามลำดับ พบว่า สีของสารเคลือบที่มี Exolit AP423 ทั้งที่ไม่มีสารช่วยผืนิกและมีสารช่วยผืนิกจะมีสีขาว แต่จะมีความทึบแสงมากกว่าสารเคลือบควบคุมที่ไม่มีสารหน้าไฟ เนื่องจาก Exolit AP423 เป็นผงสีขาว ไม่ละลายน้ำ ส่วนสารเคลือบที่มีเคราตินทางการค้าร่วมกับ Exolit AP423 ทั้งสูตรที่ไม่มีสารช่วยผืนิก และมีสารช่วยผืนิกจะมีสีขาวครีม โดยจะมีสีเหลืองเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณเคราตินทางการค้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารเคลือบมี Exolit AP423 ซึ่งมีสีขาวผสมอยู่ด้วยในปริมาณที่มากกว่าหรือเท่ากัน ทำให้สีเหลืองของเคราตินทางการค้าอ่อนลงเป็นสีครีม ในขณะที่สารเคลือบที่มีสารสกัดหยาบเคราตินร่วมกับ Exolit AP423 ทั้งที่ไม่มีสารช่วยผืนิกและมีสารช่วยผืนิกจะมีสีน้ำตาล โดยจะมีสีน้ำตาลเข้ม

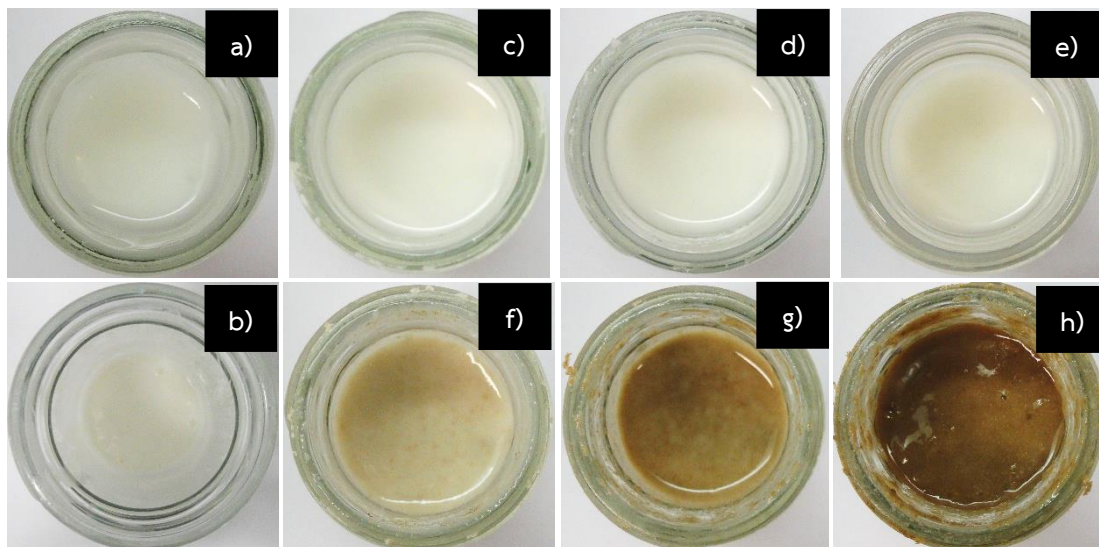
ขึ้นเมื่อปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินเพิ่มขึ้น แต่มีความเข้มข้นน้อยกว่าสารเคลือบที่มีสารสกัดหยาบเคราตินอย่างเดียวนที่มีปริมาณเคราตินเท่ากัน เนื่องจากสารเคลือบมี Exolit AP423 ซึ่งมีสีขาวผสมอยู่ด้วยในปริมาณที่มากกว่าหรือเท่ากัน ทำให้สีน้ำตาลเข้มของสารสกัดหยาบเคราตินอ่อนลง โดยสารเคลือบสูตรที่ไม่มีสารช่วยผนึกและมีสารช่วยผนึกทุกสูตรจะมีสีใกล้เคียงกัน ดังนั้นสารช่วยผนึกไม่มีผลต่อสีของสารเคลือบห่วงไฟ



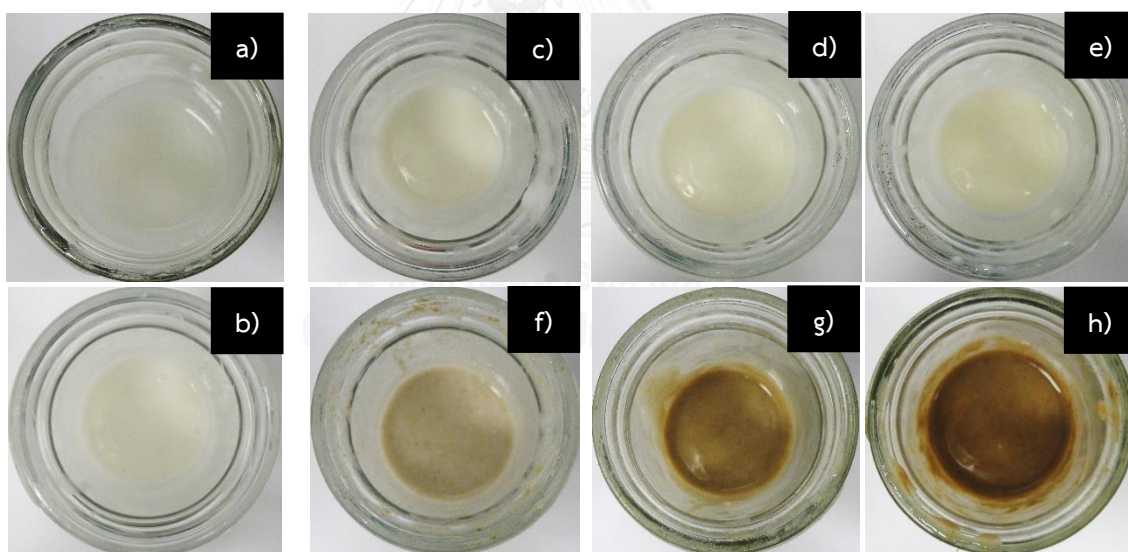
รูปที่ 4.40 สีของสารเคลือบเคราตินสูตรที่ไม่มีสารช่วยผนึก a) control b) KC1 c) KC3 d) KC5
e) KE1 f) KE3 และ g) KE5



รูปที่ 4.41 สีของสารเคลือบเคราตินสูตรที่มีสารช่วยผนึก a) control-f b) KC1-f c) KC3-f d) KC5-f
e) KE1-f f) KE3-f และ g) KE5-f



รูปที่ 4.42 สีของสารเคลือบสูตรที่ไม่มีสารช่วยย่นึก a) control และสารเคลือบเคราตินร่วมกับ Exolit AP423 b) AP10 c) AP9KC1 d) AP7KC3 e) AP5KC5 f) AP9KE1 g) AP7KE3 และ h) AP5KE5



รูปที่ 4.43 สีของสารเคลือบสูตรที่มีสารช่วยย่นึก a) control-f และสารเคลือบเคราตินร่วมกับ Exolit AP423 b) AP10-f c) AP9KC1-f d) AP7KC3-f e) AP5KC5-f f) AP9KE1-f g) AP7KE3-f และ h) AP5KE5-f

4.2.2.1.2 ความหนืดของสารเคลือบผงไฟ

ความหนืดของสารเคลือบ Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน ที่ไม่มีสารช่วยผงและมีสารช่วยผง และความหนืดของเคราติน แสดงในตารางที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ พบว่า สารเคลือบ Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินที่มีสารช่วยผง จะมีความหนืดลดลงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับสารเคลือบ Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินที่ไม่มีสารช่วยผง นอกจากนี้สารเคลือบ Exolit AP423 ทั้งสูตรที่ไม่มีสารผงและสูตรที่มีสารช่วยผง จะมีความหนืดลดลง เมื่อปริมาณ Exolit AP423 เพิ่มขึ้น เนื่องจาก Exolit AP423 สามารถละลายน้ำได้เล็กน้อย (ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก) จึงสามารถแตกตัวได้ และปลดปล่อยน้ำออกมา ทำให้ปริมาณน้ำในสารเคลือบเพิ่มขึ้น ความหนืดจึงลดลง สารเคลือบ Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทั้งเคราตินทางการค้า (KC) และสารสกัดหยาบเคราติน (KE) ทั้งที่ไม่มีสารช่วยผงและมีสารช่วยผง จะมีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเคราตินเพิ่มขึ้น แต่สารเคลือบเคราตินทางการค้าจะมีความหนืดน้อยกว่าสารเคลือบสารสกัดหยาบเคราติน เนื่องจากสารสกัดหยาบเคราตินมีอนุภาคขนาดเล็กกว่า น้ำหนักเบากว่า จึงต้องใช้ในปริมาตรที่มากกว่าในปริมาณที่เท่ากัน ทำให้มีอนุภาคสารสกัดหยาบเคราตินมากกว่า นอกจากนั้นเคราตินทางการค้ายังถูกปรับสภาพผิวให้สามารถละลายน้ำได้บางส่วน จึงทำให้อนุภาคของแข็งลดลง ความหนืดจึงน้อยกว่าสารเคลือบสารสกัดหยาบเคราติน

ตารางที่ 4.10 ความหนืดของสารเคลือบ Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน (เคราตินทางการค้า (KC) และสารสกัดหยาบเคราติน (KE))

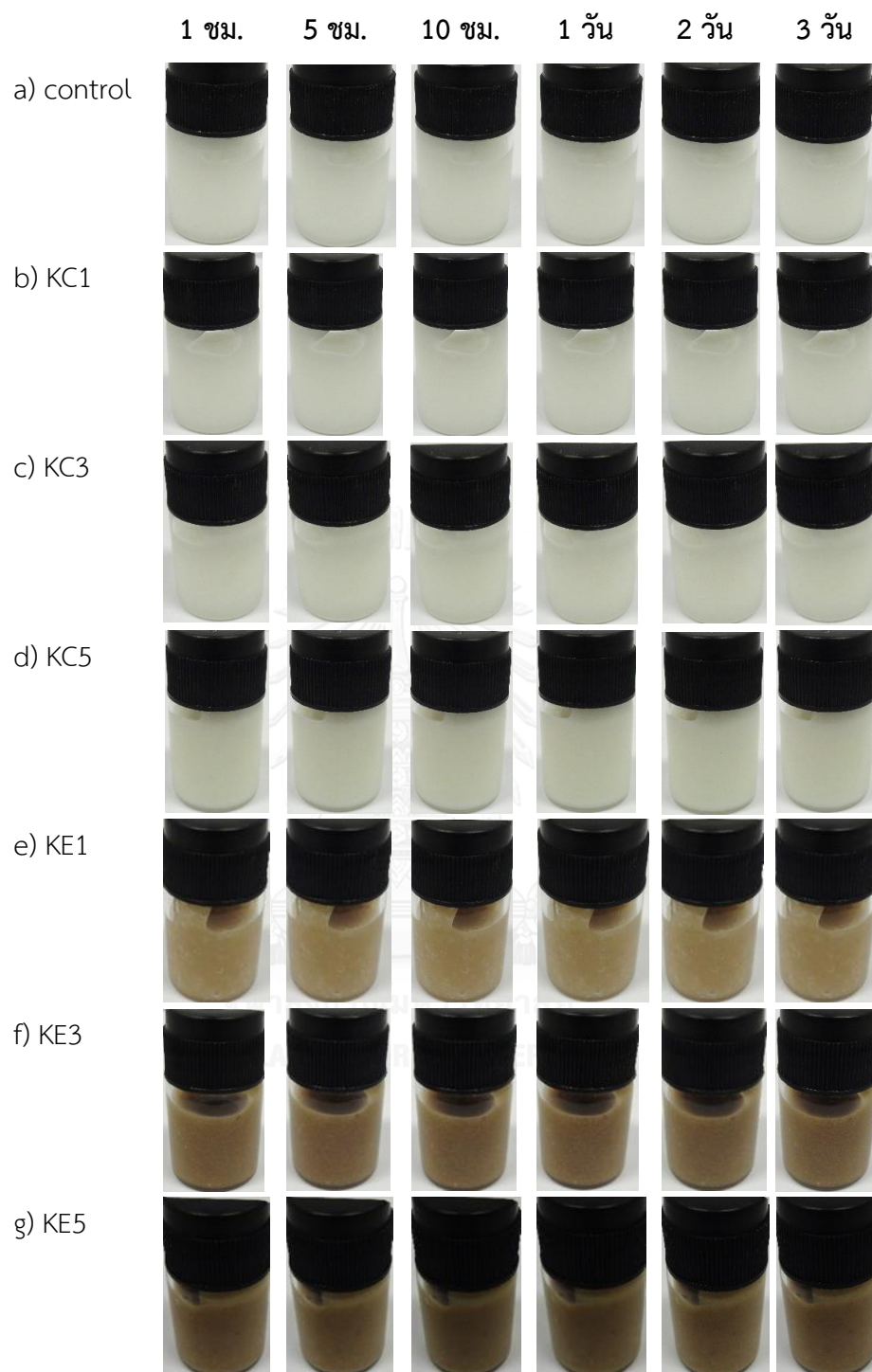
อัตราส่วนของ APP : เคราติน (ร้อยละน้ำหนัก)	ความหนืด (cps)			
	AP423		AP423-fixer	
	KC	KE	KC	KE
0:0 (control)	6458	6458	6383	6383
5:0	5350	5350	5100	5100
7:0	4617	4617	4567	4567
9:0	4300	4300	4283	4283
10:0	4000	4000	3967	3967
9:1	5542	5875	5625	5958
7:3	6333	8542	6375	8500
5:5	7083	10833	7000	11000

ตารางที่ 4.11 ความหนืดของสารเคลือบเคราติน (เคราตินทางการค้า (KC) และสารสกัดหยาบเคราติน (KE))

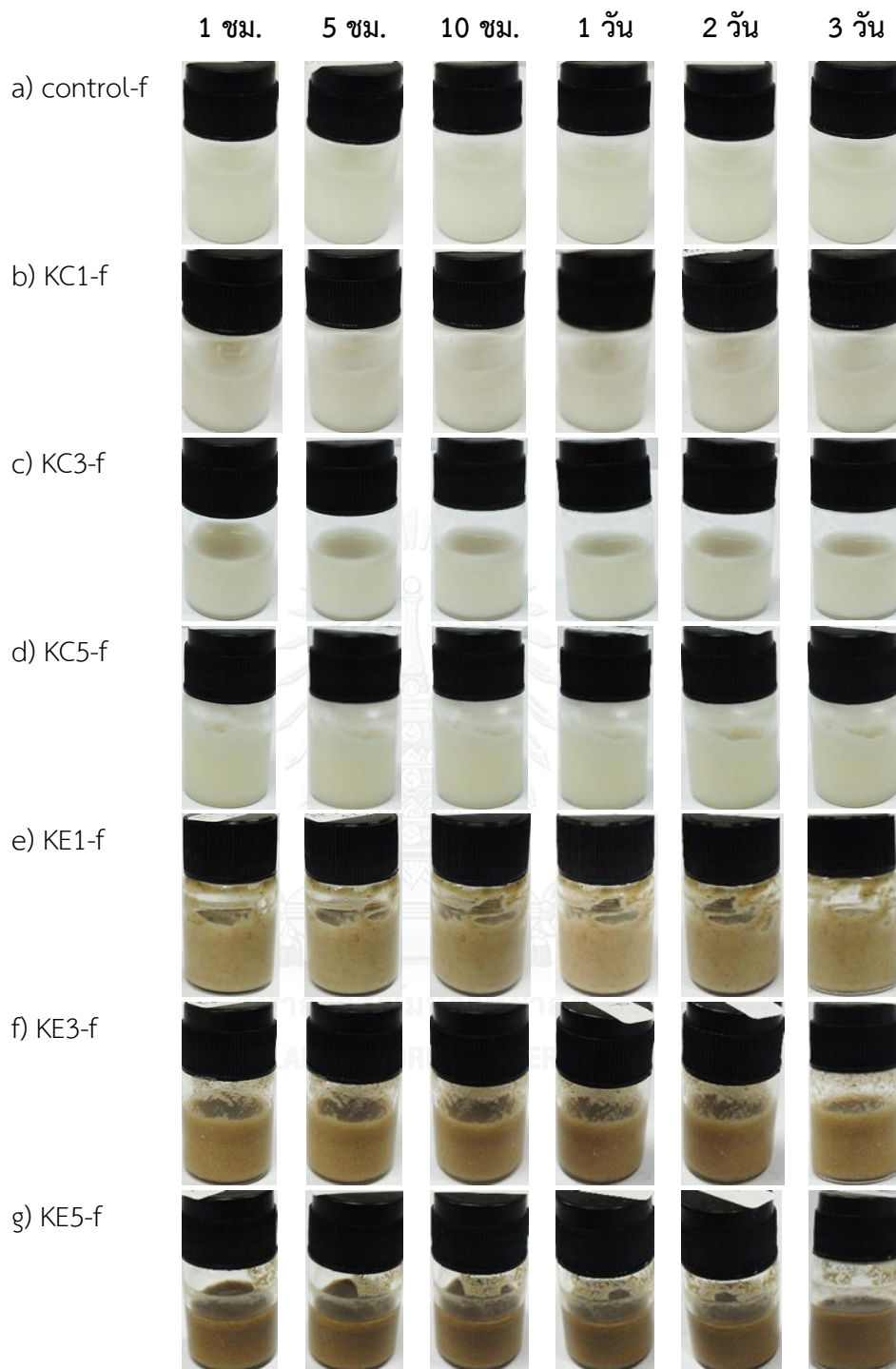
เคราติน (ร้อยละน้ำหนัก)	ความหนืด (cps)			
	สูตรที่ไม่มีสารช่วยผนึก		สูตรที่มีสารช่วยผนึก	
	KC	KE	KC	KE
1	9875	10083	9708	9208
3	13667	15750	13500	10208
5	17833	19375	17750	18292

4.2.2.1.3 ความเข้ากันได้และเสถียรภาพของส่วนประกอบในสารเคลือบหนังไฟ

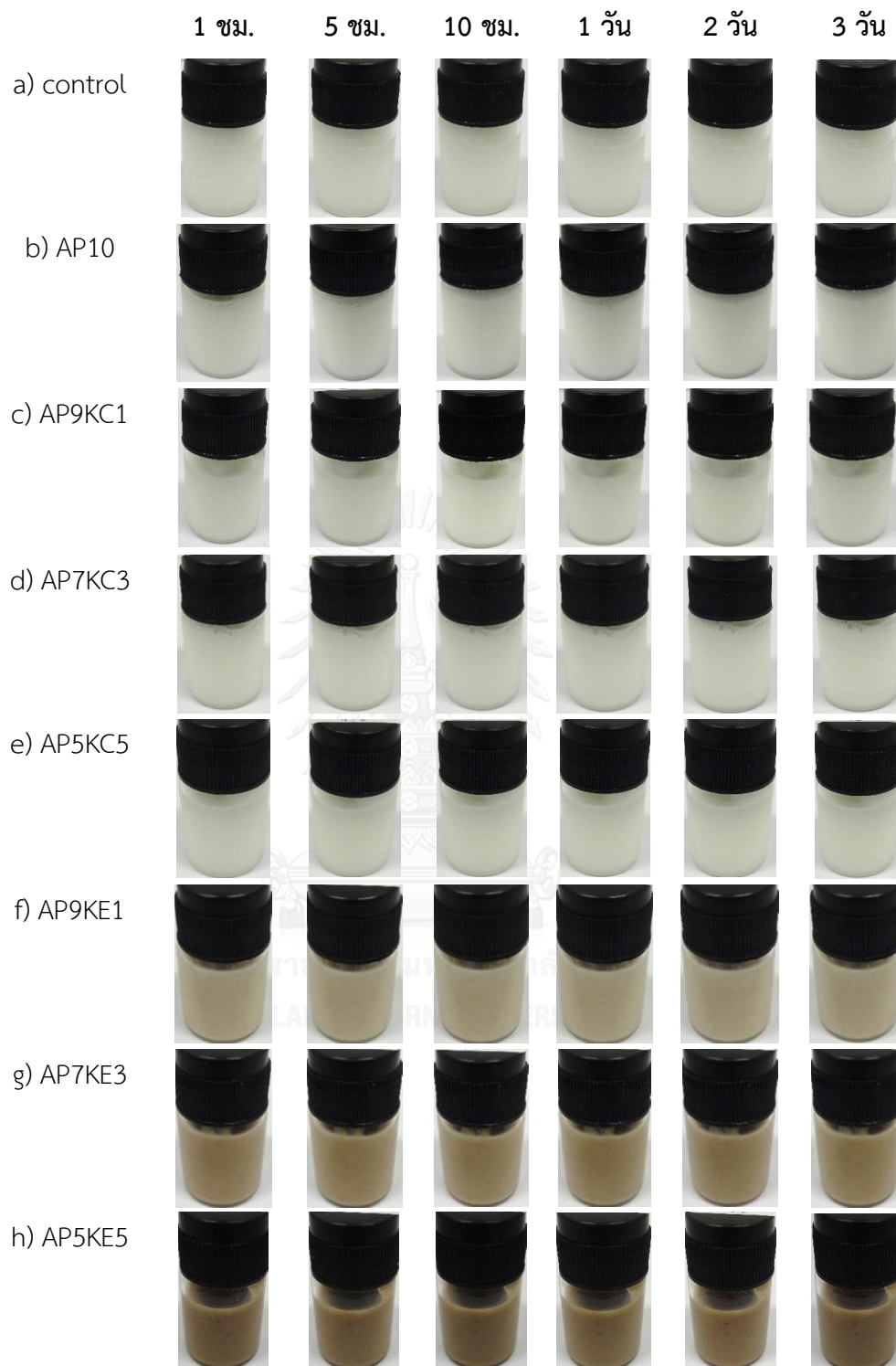
ความเข้ากันได้และเสถียรภาพของสารเคลือบเคราตินทางการค้า (KC) และสารสกัดหยาบเคราติน (KE) สูตรที่ไม่มีสารช่วยผนึกและสูตรที่มีสารช่วยผนึก แสดงในรูปที่ 4.44 และ 4.45 ตามลำดับ และ ความเข้ากันได้และเสถียรภาพของสารเคลือบ Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า และสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่ไม่มีสารช่วยผนึกและสูตรที่มีสารช่วยผนึก แสดงในตารางที่ 4.46 และ 4.47 ตามลำดับ พบว่าสารเคลือบทั้งหมดเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกันหลังจากปั่นผสม มีเสถียรภาพดี โดยสารเคลือบไม่มีการแยกชั้นกันเมื่อทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1, 5 และ 10 ชั่วโมง และ 1-3 วัน



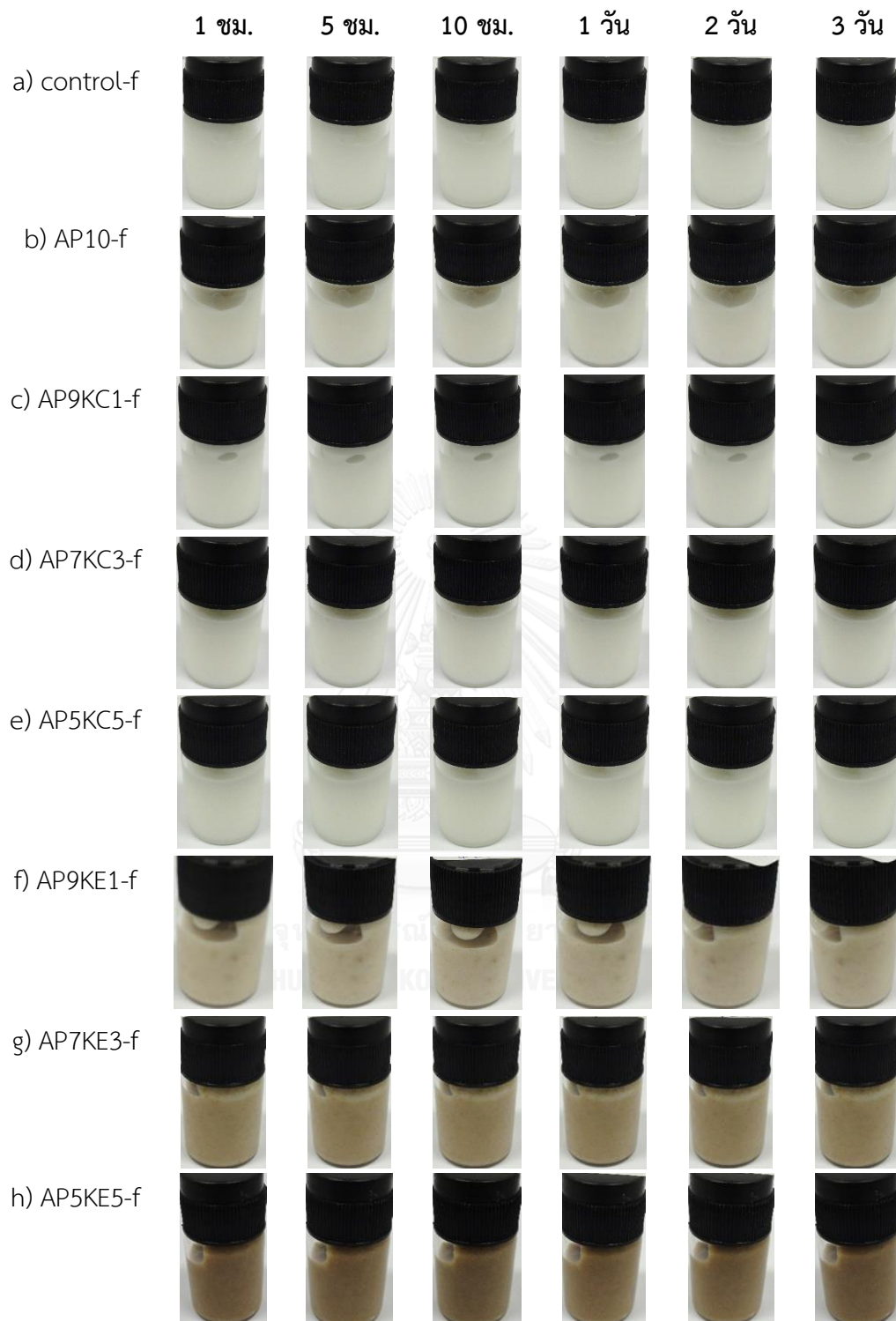
รูปที่ 4.44 ภาพถ่ายของสารเคลือบเคราตินทางการค้า (KC) และสารสกัดหยาบเคราติน (KE) สูตรที่ไม่มีสารช่วยผนึก เมื่อทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1, 5, 10 ชั่วโมง และ 1, 2, 3 วัน ตามลำดับ a) control b) KC1 c) KC3 d) KC5 e) KE1 f) KE3 และ g) KE5



รูปที่ 4.45 ภาพถ่ายของสารเคลือบเคราตินทางการค้า (KC) และสารสกัดหยาบเคราติน (KE) สูตรที่มีสารช่วยผนึก เมื่อทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1, 5, 10 ชั่วโมง และ 1, 2, 3 วัน ตามลำดับ a) control-f b) KC1-f c) KC3-f d) KC5-f e) KE1-f f) KE3-f และ g) KE5-f



รูปที่ 4. 46 ภาพถ่ายของสารเคลือบ Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า (KC) และสารสกัด
 หยาดเคราติน (KE) สูตรที่ไม่มีสารช่วยผนึก เมื่อทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1, 5, 10
 ชั่วโมง และ 1, 2, 3 วัน ตามลำดับ a) control b) AP9KC1 c) AP7KC3 d) AP5KC5
 e) AP9KE1 f) AP7KE3 และ g) AP5KE5



รูปที่ 4.47 ภาพถ่ายของสารเคลือบ Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า (KC) และสารสกัด
 หยาดเคราติน (KE) สูตรที่มีสารช่วยผนึก เมื่อทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1, 5, 10
 ชั่วโมง และ 1, 2, 3 วัน ตามลำดับ a) control-f b) AP9KC1-f c) AP7KC3-f
 d) AP5KC5-f e) AP9KE1-f f) AP7KE3-f และ g) AP5KE5-f

4.2.2.2 ลักษณะทางกายภาพของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ

4.2.2.2.1 สีของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ

ผ้าฝ้ายที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นผ้าฝ้ายทอหลายขีด (plain) และมีสีขาว เมื่อตกแต่งหน่วงไฟผ้าฝ้ายอาจทำให้สีของผ้าเปลี่ยนได้ จึงต้องมีการวัดสีของผ้าฝ้ายหลังการตกแต่ง เพื่อศึกษาสูตรสารเคลือบหน่วงไฟที่มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟและการใช้งานมากที่สุด

สีของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน สูตรที่ไม่มีสารช่วยผืนิกและสูตรที่มีสารช่วยผืนิก แสดงในตารางที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ พบว่าค่าความแตกต่างของสี (DE^*) ของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบ control และ control-f จะมีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการตกแต่ง ($DE^*=0$) และผ้าจะมีสีเหลืองขึ้น เนื่องจากค่า $+b^*$ ซึ่งเป็นค่าแสดงสีเหลืองและค่า $YI-E313$ ซึ่งเป็นค่าดัชนีความเหลืองมีค่าเพิ่มขึ้น โดยผ้าที่ตกแต่งด้วย control จะมีสีเหลืองมากกว่าผ้าที่ตกแต่งด้วย control-f เล็กน้อย ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 จะมีค่า DE^* เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณ Exolit AP423 เพิ่มขึ้น โดยผ้าจะมีสีเหลืองขึ้น เนื่องจากค่า $+b^*$ และ $YI-E313$ เพิ่มขึ้น ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยเคราตินจะมีค่า DE^* เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณเคราตินเพิ่มขึ้น โดยผ้าจะมีสีเหลืองขึ้นเช่นกัน แต่ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราตินจะมีสีที่เข้มขึ้นจนเป็นสีน้ำตาล เนื่องจากค่า $+L^*$ ซึ่งเป็นค่าแสดงความสว่างของสีมีค่าลดลงเมื่อปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินเพิ่มขึ้น ส่วนผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราติน เมื่อปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินเพิ่มขึ้น จะมีสีที่เข้มขึ้นจนเป็นสีน้ำตาลเช่นกัน ในขณะที่ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้าจะมีค่า DE^* ลดลง เมื่อปริมาณเคราตินทางการค้าเพิ่มขึ้น โดยจะมีสีเหลืองน้อยลงเล็กน้อย เนื่องจากมีค่า $WI-CIE$ ซึ่งเป็นค่าดัชนีความขาวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ตารางที่ 4.12 สีของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน สูตรที่ไม่มีสารช่วยผืนิก

ผ้าฝ้ายที่ผ่าน การตกแต่ง	L*	a*	b*	DE*	WI-CIE	YI-E313
ไม่ตกแต่ง	90.72	-0.26	2.03	0	68.31	3.82
Control	90.48	-0.50	4.02	2.01	58.32	7.52
AP5	91.16	-0.39	4.33	2.37	58.44	8.17
AP7	91.65	-0.21	4.78	2.93	57.55	9.12
AP9	91.28	-0.19	5.03	3.06	55.46	9.64
AP10	91.50	-0.15	5.13	3.22	55.53	9.85
AP9KC1	91.76	-0.32	5.06	3.24	56.49	9.56
AP7KC3	91.60	-0.41	4.96	3.08	56.60	9.30
AP5KC5	91.57	-0.57	4.47	2.63	58.77	8.26
KC1	90.50	-0.33	4.25	2.22	57.25	8.11
KC3	90.57	-0.53	4.5	2.48	56.25	8.42
KC5	90.72	-0.55	4.95	2.93	54.47	9.24
AP9KE1	90.26	0.19	8.17	6.16	38.17	15.93
AP7KE3	88.32	0.64	10.04	8.39	24.32	20.07
AP5KE5	84.14	2.02	14.67	14.39	N/A	30.59
KE1	89.39	-0.17	6.35	4.50	44.62	12.35
KE3	87.76	0.30	8.38	6.99	30.93	16.78
KE5	83.91	1.70	14.22	14.05	N/A	29.56

L* คือ ค่าความสว่าง โดยค่า +L* แสดงถึงสีขาว จนไปถึง -L* แสดงถึงสีดำ จาก CIE Lab

a* คือ สีจากเขียว (-a*) ไปจนถึงแดง (+a*) จาก CIE Lab

b* คือ สีจากน้ำเงิน (-b*) ไปเหลือง (+b*) จาก CIE Lab

DE* คือ ค่าความแตกต่างของสี จาก CIE Lab

WI-CIE คือ ค่าดัชนีความขาว (CIE whiteness index)

YI-E313 คือ ค่าดัชนีความเหลือง (Yellowness index, ASTM Method E313)

ตารางที่ 4.13 สีของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผืน

ผ้าฝ้ายที่ผ่าน การตกแต่ง	L*	a*	b*	DE*	WI-CIE	YI-E313
ไม่ตกแต่ง	90.72	-0.26	2.03	0	68.31	3.82
Control-f	90.82	-0.28	3.68	1.65	60.72	7.02
AP5-f	91.99	-0.55	3.57	2.08	64.00	6.52
AP7-f	91.56	-0.67	4.14	2.33	60.31	7.54
AP9-f	92.14	-0.60	3.92	2.43	62.75	7.14
AP10-f	92.59	-0.55	3.49	2.49	65.81	6.34
AP9KC1-f	92.24	-0.34	2.45	1.66	69.83	4.53
AP7KC3-f	92.33	-0.38	2.32	1.72	70.65	4.24
AP5KC5-f	91.87	-0.43	2.46	1.31	68.88	4.50
KC1-f	90.59	-0.58	3.91	1.91	59.06	7.25
KC3-f	90.60	-0.63	4.09	2.09	58.24	7.55
KC5-f	90.57	-0.67	4.26	2.27	57.34	7.86
AP9KE1-f	91.51	-0.37	6.41	4.47	49.54	12.07
AP7KE3-f	89.18	0.42	9.11	7.25	31.00	18.01
AP5KE5-f	87.33	0.79	10.48	9.13	19.72	21.17
KE1-f	89.59	-0.11	4.56	2.74	53.67	8.95
KE3-f	88.45	0.02	7.46	5.86	37.02	14.72
KE5-f	85.33	1.11	11.81	11.20	8.17	24.30

L* คือ ค่าความสว่าง โดยค่า +L* แสดงถึงสีขาว จนไปถึง -L* แสดงถึงสีดำ จาก CIE Lab

a* คือ สีจากเขียว (-a*) ไปจนถึงแดง (+a*) จาก CIE Lab

b* คือ สีจากน้ำเงิน (-b*) ไปเหลือง (+b*) จาก CIE Lab

DE* คือ ค่าความแตกต่างของสี จาก CIE Lab

WI-CIE คือ ค่าดัชนีความขาว (CIE whiteness index)

YI-E313 คือ ค่าดัชนีความเหลือง (Yellowness index, ASTM Method E313)

4.2.2.2 ความหนาของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ

ผ้าฝ้ายที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นผ้าฝ้ายทอหลายขีด (plain) มีสีขา และมีความหนาประมาณ 0.25 มิลลิเมตร เมื่อตกแต่งหน่วงไฟผ้าฝ้ายอาจทำให้ความหนาของผ้าเพิ่มขึ้นซึ่งจะส่งผลต่อความกระด้าง และลักษณะทางกายภาพอื่น ๆ จึงต้องมีการวัดความหนาของผ้าฝ้ายหลังการตกแต่ง เพื่อศึกษาสูตรสารเคลือบหน่วงไฟที่มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟและการใช้งานมากที่สุด

ความหนาของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน สูตรที่ไม่มีสารช่วยผนิก และสูตรที่มีสารช่วยผนิก แสดงในตารางที่ 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ พบว่าเมื่อตกแต่งหน่วงไฟผ้าฝ้ายด้วยสารเคลือบหน่วงไฟสูตรที่ไม่มีสารผนิกจะทำให้ผ้าฝ้ายมีความหนาประมาณ 0.30 มิลลิเมตร ซึ่งมีความหนาเพิ่มขึ้นจากผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ตกแต่งหน่วงไฟร้อยละ 20 ในขณะที่ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบหน่วงไฟสูตรที่มีสารช่วยผนิกมีความหนาประมาณ 0.31 มิลลิเมตร ซึ่งมีความหนาเพิ่มขึ้นจากผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ตกแต่งหน่วงไฟร้อยละ 24 โดยการที่ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบหน่วงไฟสูตรที่มีสารช่วยผนิกมีความหนามากกว่าผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบหน่วงไฟสูตรที่ไม่มีสารช่วยผนิก สอดคล้องกับร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (%add on) ของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบหน่วงไฟสูตรที่มีสารช่วยผนิกมีค่ามากกว่าผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบหน่วงไฟสูตรที่ไม่มีสารช่วยผนิก โดยความหนาของผ้าฝ้ายจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อปริมาณสารหน่วงไฟเพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณเคราตินในสารหน่วงไฟผสม (Exolit AP423 และเคราติน) เพิ่มขึ้น ยกเว้นผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ความหนาของผ้าฝ้ายจะลดลงเล็กน้อย เมื่อปริมาณ Exolit AP423 เนื่องจาก Exolit AP423 มีการแตกตัวเล็กน้อย ความหนืดของสารเคลือบจึงลดลง ทำให้เกิดชั้นเคลือบผ้าฝ้ายที่บางลง

ตารางที่ 4.14 ความหนาของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน สูตรที่ไม่มีสารช่วย
ผืนิก

ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย	%add on	ความหนา (mm.)
ไม่ตกแต่ง	0	0.25
control	1.90	0.3
AP5	7.73	0.29
AP7	8.54	0.29
AP9	9.52	0.28
AP10	13.23	0.28
AP9KC1	11.42	0.29
AP7KC3	10.35	0.29
AP5KC5	10.17	0.3
AP9KE1	11.32	0.29
AP7KE3	12.23	0.3
AP5KE5	14.77	0.3
KC1	2.46	0.3
KC3	4.60	0.3
KC5	4.78	0.31
KE1	2.39	0.3
KE3	3.02	0.3
KE5	6.84	0.31

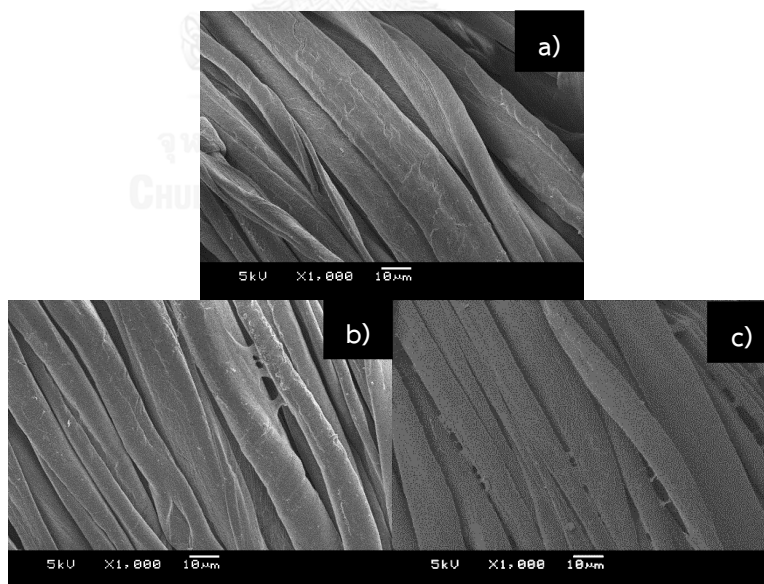
ตารางที่ 4.15 ความหนาของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน สูตรที่มีสารช่วย
ผืนิก

ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย	%add on	ความหนา (mm.)
ไม่ตกแต่ง	0	0.25
control-f	2.04	0.3
AP5-f	9.65	0.29
AP7-f	10.79	0.29
AP9-f	14.19	0.28
AP10-f	16.09	0.28
AP9KC1-f	16.11	0.31
AP7KC3-f	16.18	0.31
AP5KC5-f	16.79	0.31
AP9KE1-f	12.15	0.31
AP7KE3-f	13.68	0.32
AP5KE5-f	15.80	0.33
KC1-f	5.13	0.3
KC3-f	6.66	0.32
KC5-f	7.95	0.32
KE1-f	4.81	0.3
KE3-f	5.85	0.32
KE5-f	7.17	0.32

4.2.2.3 ลัทธิฐานวิทยาวิทยาของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ

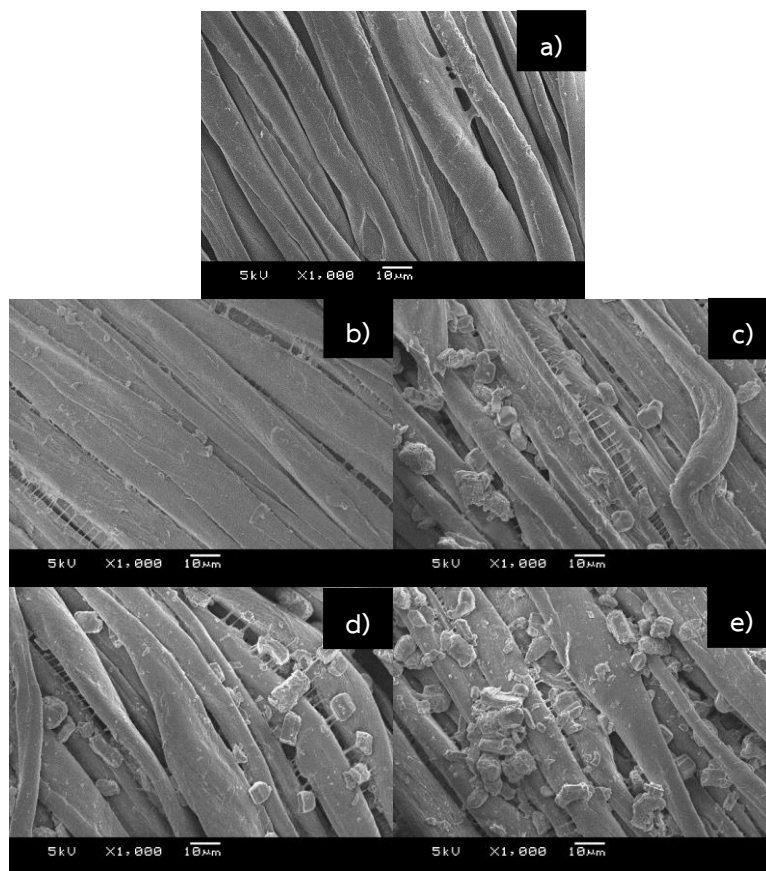
ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายก่อนและหลังตกแต่งด้วยสารเคลือบควบคุมสูตรที่ไม่มีสารช่วยผนัง (control) และสูตรที่มีสารช่วยผนัง (control-f) แสดงในรูปที่ 4.48 พบว่า ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบควบคุมจะมีสารเคลือบบนเส้นใยและมีการยึดออกของสารเคลือบเพื่อยึดระหว่างเส้นใย

ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 และเคราติน สูตรที่ไม่มีสารช่วยผนัง ที่มีปริมาณสารหน่วงไฟต่างกัน แสดงในรูปที่ 4.49-4.53 และภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 และเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผนัง ที่มีปริมาณสารหน่วงไฟต่างกัน แสดงในรูปที่ 4.54-4.58 พบว่า อนุภาคของ Exolit AP423 มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก (rod) [69] โดยอนุภาคของ Exolit AP423 จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ Exolit AP423 ในสารหน่วงไฟเพิ่มขึ้น ส่วนเคราตินทางการค้าจะสามารถกระจายตัวได้ดีในสารเคลือบ เนื่องจากเคราตินทางการค้าสามารถละลายน้ำได้ (Hydrolyzed keratin) จึงมีลักษณะของสารเคลือบบนผิวของผ้าฝ้ายบาง ๆ เมื่อปริมาณเคราตินทางการค้าเพิ่มขึ้น สารเคลือบบนผิวของผ้าฝ้ายจะมองเห็นได้ชัดเจนขึ้น ในขณะที่สารสกัดหยาบเคราตินจะมีการจับตัวกันเป็นก้อนและกระจายตัวได้น้อยในสารเคลือบ เนื่องจากอนุภาคของสารสกัดหยาบเกิดการเชื่อมขวางของพันธะไดซัลไฟด์อีกครั้งหลังการสกัด (re-crosslink) จึงไม่ละลายน้ำ เมื่อปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินเพิ่มขึ้น การจับตัวเป็นก้อนของสารสกัดหยาบเคราตินจะเพิ่มขึ้น

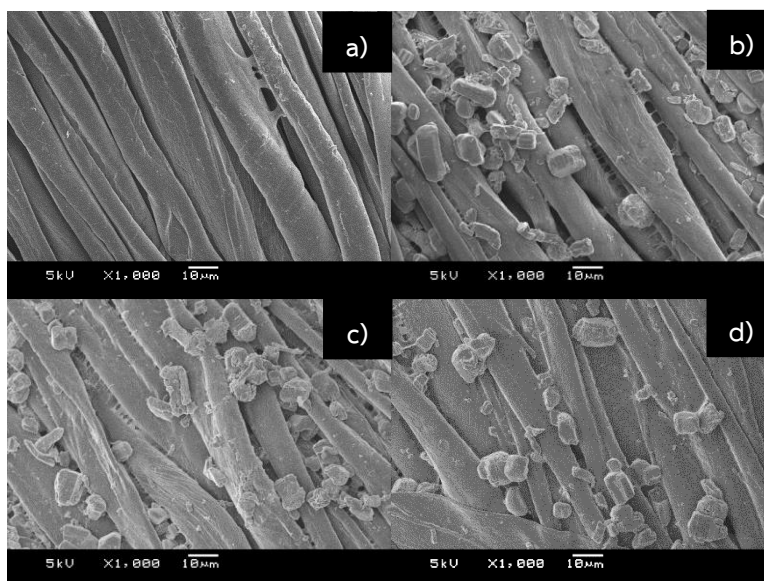


รูปที่ 4.48 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย a) ไม่ผ่านการตกแต่ง b) control c) control-f

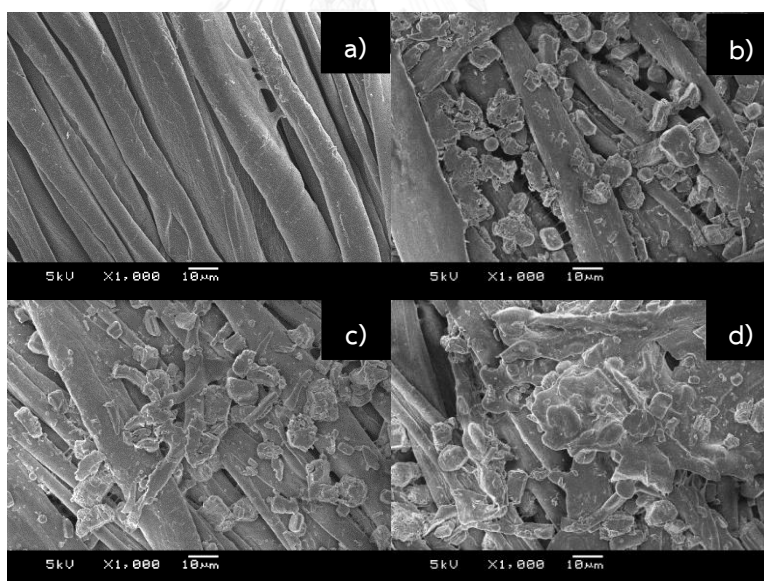
ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



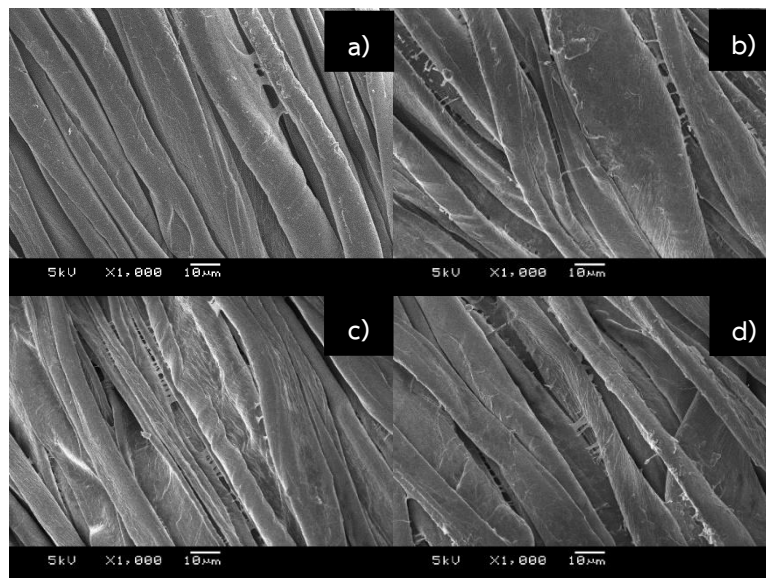
รูปที่ 4.49 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย a) control และตกแต่งด้วย Exolit AP423 สูตรที่ไม่ มีสารช่วยผนึก b) AP5 c) AP7 d) AP9 e) AP10 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



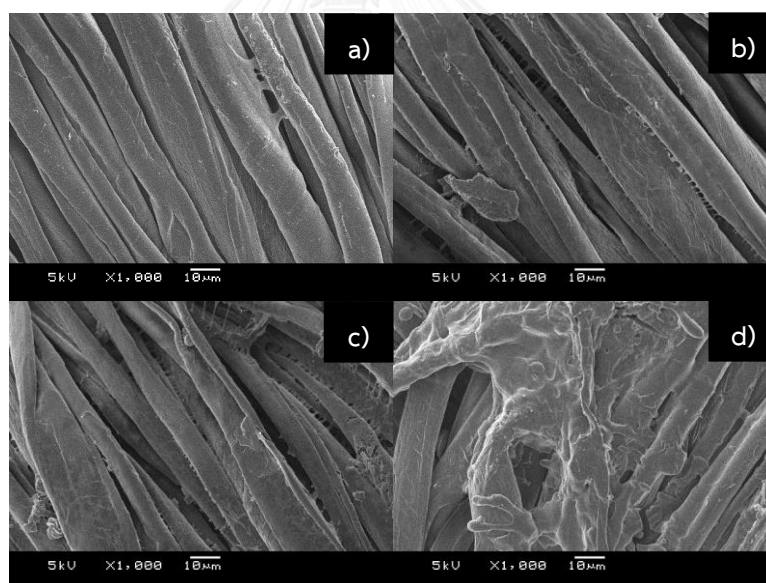
รูปที่ 4.50 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย a) control และตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับ
 เคราตินทางการค้า สูตรที่ไม่มีสารช่วยผนึก b) AP9KC1 c) AP7KC3 d) AP5KC5
 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



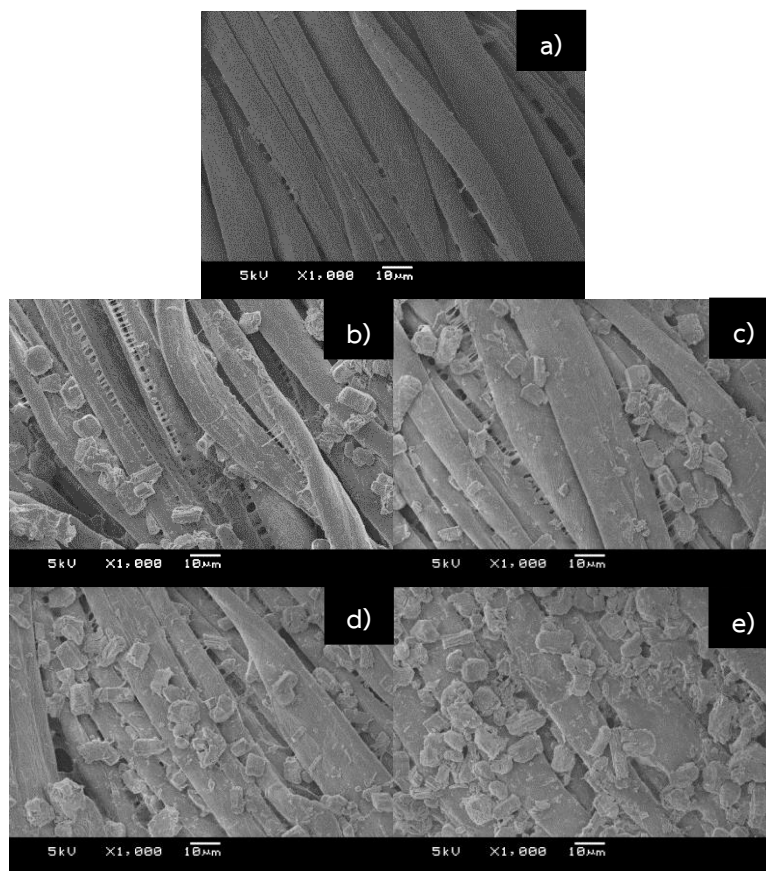
รูปที่ 4.51 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย a) control และตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับ
 สารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่ไม่มีสารช่วยผนึก b) AP9KE1 c) AP7KE3 d) AP5KE5
 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



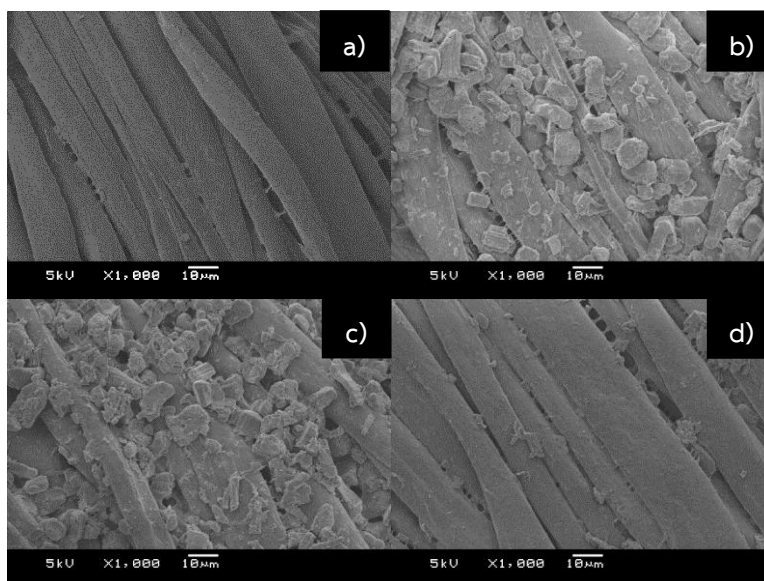
รูปที่ 4.52 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย a) control และตกแต่งด้วยเคราตินทางการค้า สูตรที่ไม่มีสารช่วยผนึก b) KC1 c) KC3 d) KC5 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



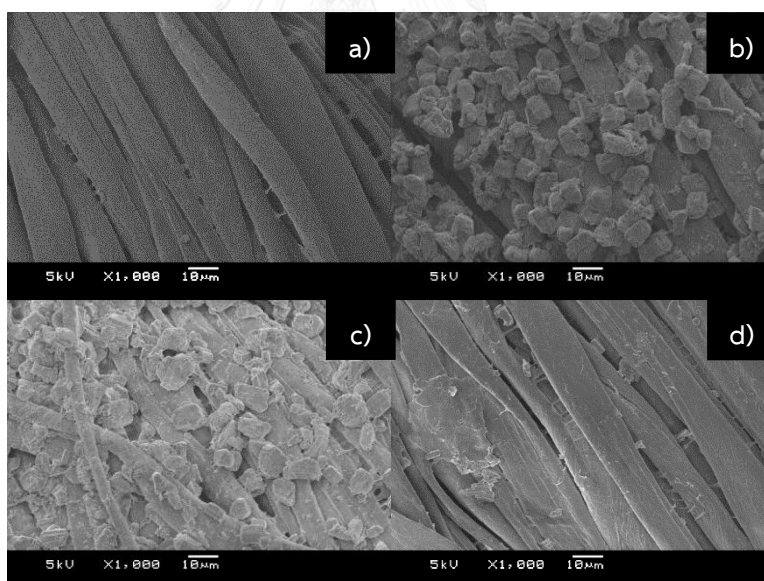
รูปที่ 4.53 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย a) control และตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่ไม่มีสารช่วยผนึก b) KE1 c) KE3 d) KE5 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



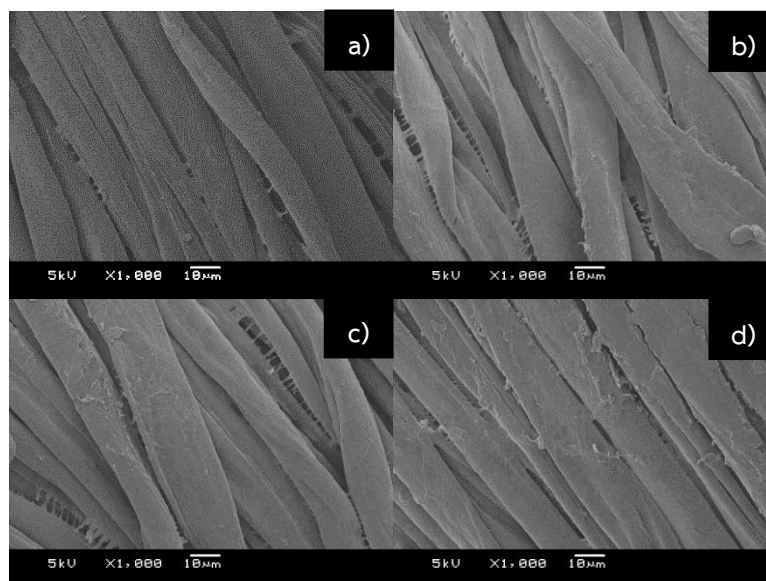
รูปที่ 4.54 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วย Exolit AP423 สูตรที่มี สารช่วยพ่น b) AP5-f c) AP7-f d) AP9-f e) AP10-f ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



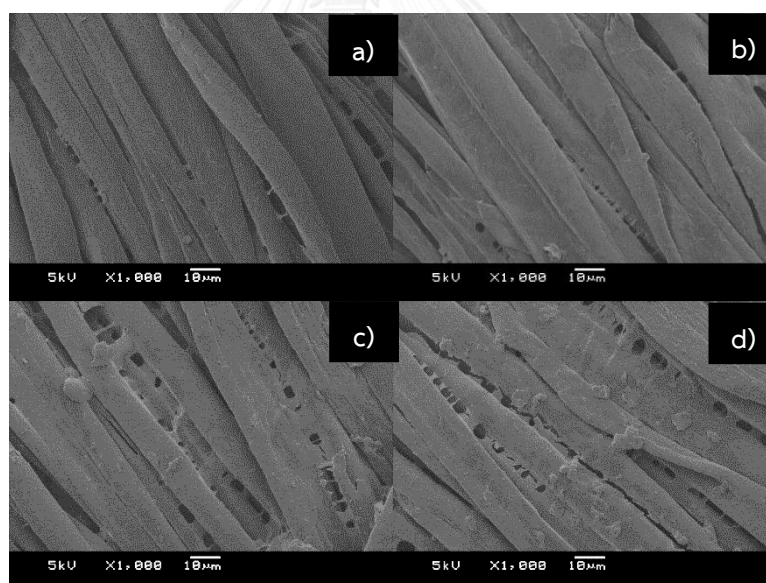
รูปที่ 4.55 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับ
 เคราตินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยพ่น b) AP9KC1-f c) AP7KC3-f d) AP5KC5-f
 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 4.56 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับ
 สารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยพ่น b) AP9KE1-f c) AP7KE3-f d) AP5KE5-f
 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 4.57 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วยเคราตินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยผืนิก b) KC1-f c) KC3-f d) KC5-f ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 4.58 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผืนิก b) KE1-f c) KE3-f d) KE5-f ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

4.2.2.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการตกแต่ง ฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบควบคุมสูตรที่ไม่มีสารช่วยผืน (control) และผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบควบคุมสูตรที่มีสารช่วยผืน (control-f) แสดงในรูปที่ 4.59 พบว่า FT-IR สเปกตรัมของผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการตกแต่ง ฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบควบคุมที่ไม่มีสารช่วยผืน และผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบควบคุมที่มีสารช่วยผืน แสดงหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกัน ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่แสดงลักษณะสมบัติทางเคมีของผ้าฝ้าย คือ O-H ($3550-3100\text{ cm}^{-1}$), $-\text{CH}_2$ ($2980-2800\text{ cm}^{-1}$), C-H (1429 cm^{-1}), C-O-C (1160 cm^{-1}) และ C-O (1030 cm^{-1}) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกับหมู่ฟังก์ชันของผ้าฝ้ายในงานวิจัยของ Chung และคณะ [71] และยังแสดงหมู่ฟังก์ชันที่แสดงลักษณะสมบัติทางเคมีของสารอีทานาโนพอลิยูรีเทน คือ C=O (1700 cm^{-1}) อีกด้วย โดยสารเคลือบควบคุมสูตรที่มีสารช่วยผืนจะแสดงพีคของสารอีทานาโนพอลิยูรีเทนที่เข้มข้นกว่า แสดงว่าสารช่วยผืนช่วยให้สารอีทานาโนพอลิยูรีเทนเกิดฟิล์มบนผ้าฝ้ายได้ดีขึ้น ดังนั้นการเคลือบสารเคลือบควบคุมทั้งสูตรที่ไม่มีและสูตรที่มีสารช่วยผืนลงผ้าฝ้ายไม่ทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันใหม่ขึ้นผ้าฝ้าย

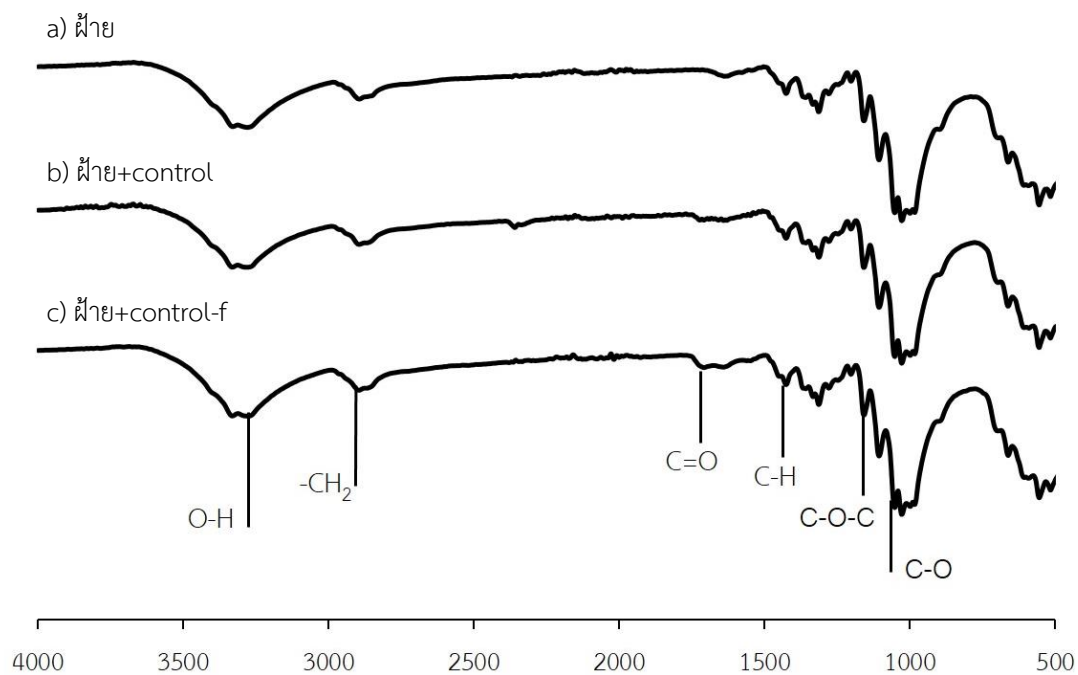
ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ที่ความเข้มข้นต่างกัน สูตรที่ไม่มีสารช่วยผืนและสูตรที่มีสารช่วยผืน แสดงในรูปที่ 4.60 และ 4.61 พบว่า FT-IR สเปกตรัมของของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ความเข้มข้นต่างกันทั้งสูตรที่ไม่มีสารช่วยผืนและสูตรที่มีสารช่วยผืน แสดงหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกัน ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่แสดงลักษณะสมบัติทางเคมีของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต คือ แสดงหมู่ฟังก์ชัน N-H (3200 cm^{-1} และ 1650 cm^{-1}), N-H ($1650-1590\text{ cm}^{-1}$), P=O (1256 cm^{-1}) และ P-O-P (800 cm^{-1}) ร่วมกับหมู่ฟังก์ชันที่แสดงลักษณะทางเคมีของผ้าฝ้าย คือ O-H ($3550-3100\text{ cm}^{-1}$), $-\text{CH}_2$ ($2980-2800\text{ cm}^{-1}$), C-O-C (1160 cm^{-1}) และ C-O (1030 cm^{-1}) [71] โดยความเข้มของพีค P=O และ P-O-P จะเพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณ Exolit AP423 ในสูตรสารเคลือบหน่วงไฟเพิ่มขึ้น

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยเคราตินทางการค้า (KC) ที่ความเข้มข้นต่างกันสูตรที่ไม่มีสารช่วยผืนและสูตรที่มีสารช่วยผืน แสดงในรูปที่ 4.62 และ 4.63 พบว่า FT-IR สเปกตรัมของของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยเคราตินทางการค้าที่ความเข้มข้นต่างกัน ทั้งสูตรที่ไม่มีสารช่วยผืนและสูตรที่มีสารช่วยผืน แสดงหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกัน ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่แสดงลักษณะทางเคมีของเคราติน คือ N-H (3300 cm^{-1}), เอไมด์ปฐมภูมิ (primary amide, RC(O)NH_2) (1635 cm^{-1}) และ เอไมด์ทุติยภูมิ (secondary amide, $\text{RC(O)NHR}'$) (1525 cm^{-1}) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกับหมู่ฟังก์ชันของเคราตินจากขนสัตว์ในงานวิจัยของ Xu และคณะ [68] ร่วมกับหมู่ฟังก์ชันที่แสดงลักษณะทางเคมีของผ้าฝ้าย คือ O-H ($3550-3100\text{ cm}^{-1}$), $-\text{CH}_2$ ($2980-2800\text{ cm}^{-1}$), C-O-C (1160 cm^{-1})

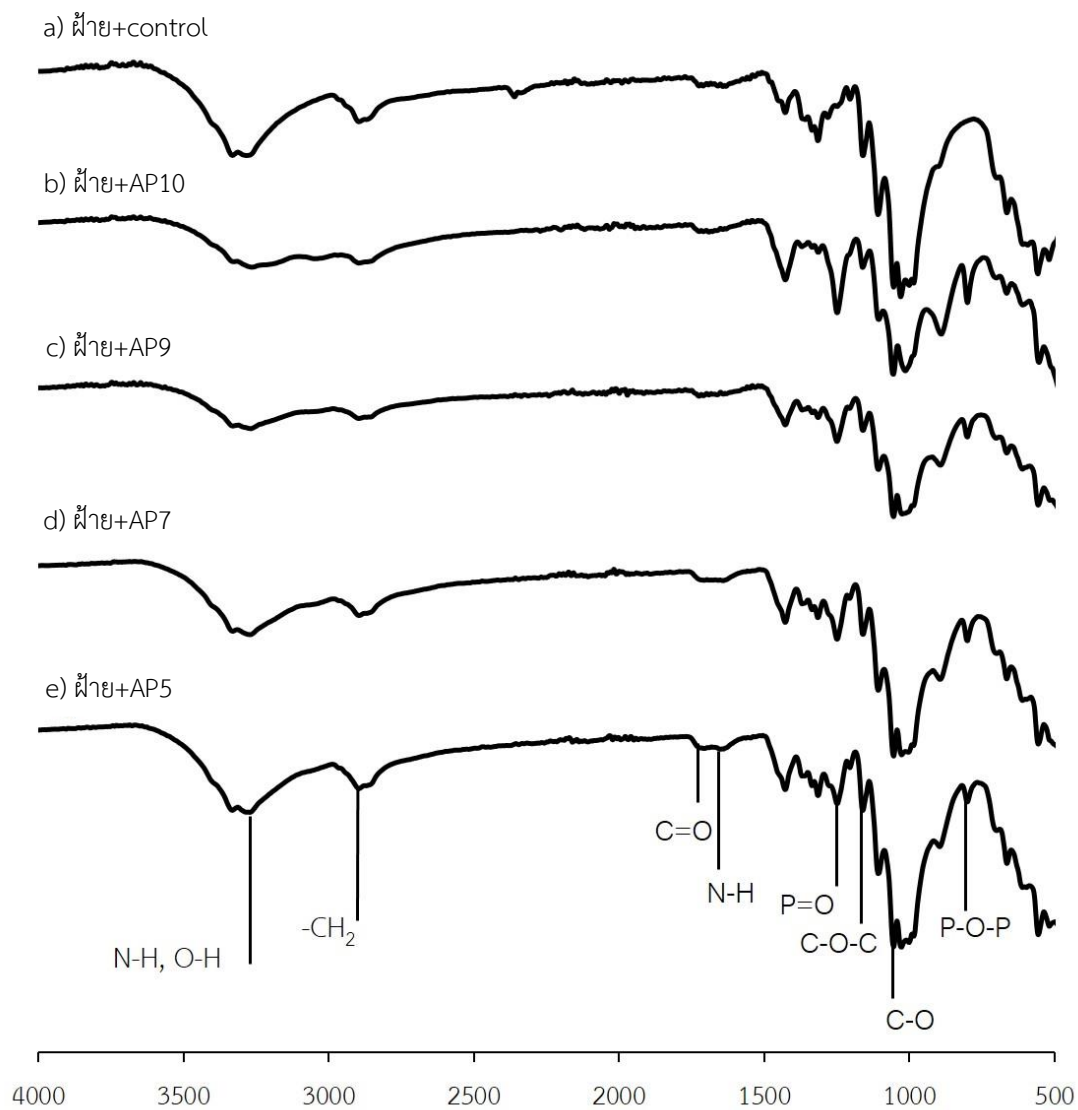
และ C-O (1030 cm^{-1}) [71] โดยความเข้มของพีคเอไมด์ปฐมภูมิ และเอไมด์ทุติยภูมิจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณเคราตินทางการค้าในสูตรสารเคลือบหนังไฟเพิ่มขึ้น

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราติน (KE) ที่ความเข้มข้นต่างกันสูตรที่ไม่มีสารช่วยผนึกและสูตรที่มีสารช่วยผนึก แสดงในรูปที่ 4.64 และ 4.65 พบว่า FT-IR สเปกตรัมของของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราตินที่ความเข้มข้นต่างกัน ทั้งสูตรที่ไม่มีสารช่วยผนึกและสูตรที่มีสารช่วยผนึก แสดงหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกัน ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่แสดงลักษณะทางเคมีของเคราตินเช่นเดียวกับผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยเคราตินทางการค้า คือ N-H (3300 cm^{-1}), เอไมด์ปฐมภูมิ (RC(O)NH_2) (1635 cm^{-1}) และเอไมด์ทุติยภูมิ ($\text{RC(O)NHR}'$) (1525 cm^{-1}) [68] ร่วมกับหมู่ฟังก์ชันที่แสดงลักษณะทางเคมีของผ้าฝ้าย คือ O-H ($3550\text{--}3100\text{ cm}^{-1}$), -CH_2 ($2980\text{--}2800\text{ cm}^{-1}$), C-O-C (1160 cm^{-1}) และ C-O (1030 cm^{-1}) [71] โดยความเข้มของพีคเอไมด์ปฐมภูมิ และเอไมด์ทุติยภูมิจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินในสูตรสารเคลือบหนังไฟเพิ่มขึ้น

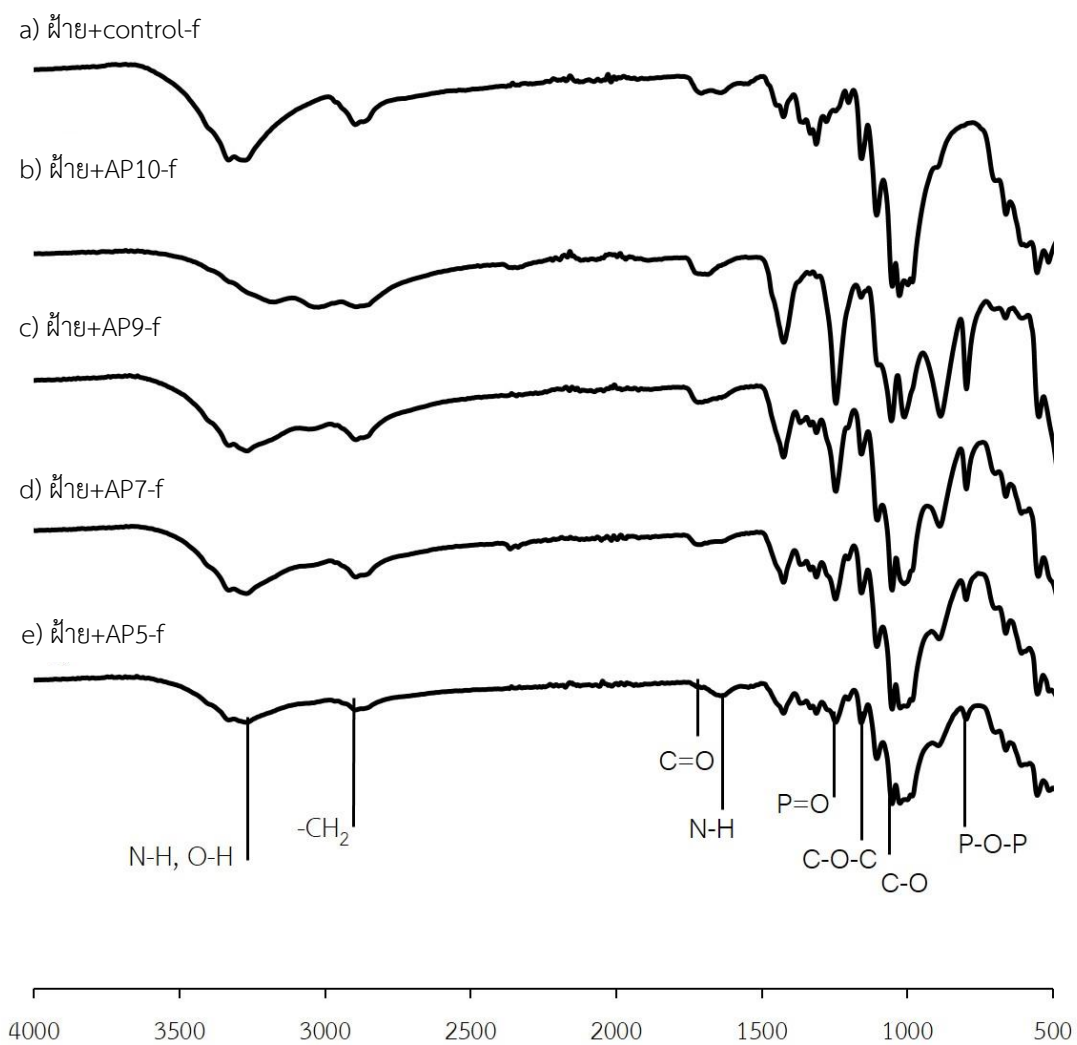
ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินที่ความเข้มข้นต่างกันสูตรที่ไม่มีสารช่วยผนึกและสูตรที่มีสารช่วยผนึก แสดงในรูปที่ 4.66-4.69 พบว่า FT-IR สเปกตรัมของของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินที่ความเข้มข้นต่างกัน ทั้งสูตรที่ไม่มีสารช่วยผนึกและสูตรที่มีสารช่วยผนึก จะแสดงหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกัน ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่แสดงลักษณะทางเคมีของผ้าฝ้าย คือ O-H ($3550\text{--}3100\text{ cm}^{-1}$), -CH_2 ($2980\text{--}2800\text{ cm}^{-1}$), C-H (1429 cm^{-1}), C-O-C (1160 cm^{-1}) และ C-O (1030 cm^{-1}) [71] หมู่ฟังก์ชันที่แสดงลักษณะทางเคมีของเคราติน คือ N-H (3300 cm^{-1}), เอไมด์ปฐมภูมิ (RC(O)NH_2) (1635 cm^{-1}) และเอไมด์ทุติยภูมิ ($\text{RC(O)NHR}'$) (1525 cm^{-1}) [68] และหมู่ฟังก์ชันที่แสดงลักษณะทางเคมีของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต คือ แสดงหมู่ฟังก์ชัน P=O (1256 cm^{-1}) และ P-O-P (800 cm^{-1}) [69] โดยความเข้มของพีค P=O และ P-O-P จะเพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณ Exolit AP423 ในสูตรสารหนังไฟเพิ่มขึ้น และความเข้มของพีคเอไมด์ปฐมภูมิ และเอไมด์ทุติยภูมิจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีเคราตินในสูตรสารหนังไฟเพิ่มขึ้น โดยสารสกัดหยาบเคราตินจะแสดงความเข้มของพีคเอไมด์ปฐมภูมิ และเอไมด์ทุติยภูมิมากกว่าเคราตินทางการค้า เนื่องจากสารสกัดหยาบเคราตินเกิดการจับตัวเป็นก้อนบนผิวของผ้าฝ้ายทำให้สามารถตรวจเจอหมู่ฟังก์ชันได้มากกว่าเคราตินทางการค้า ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ทำให้กระจายตัวบนผิวผ้าฝ้ายได้ดีกว่า



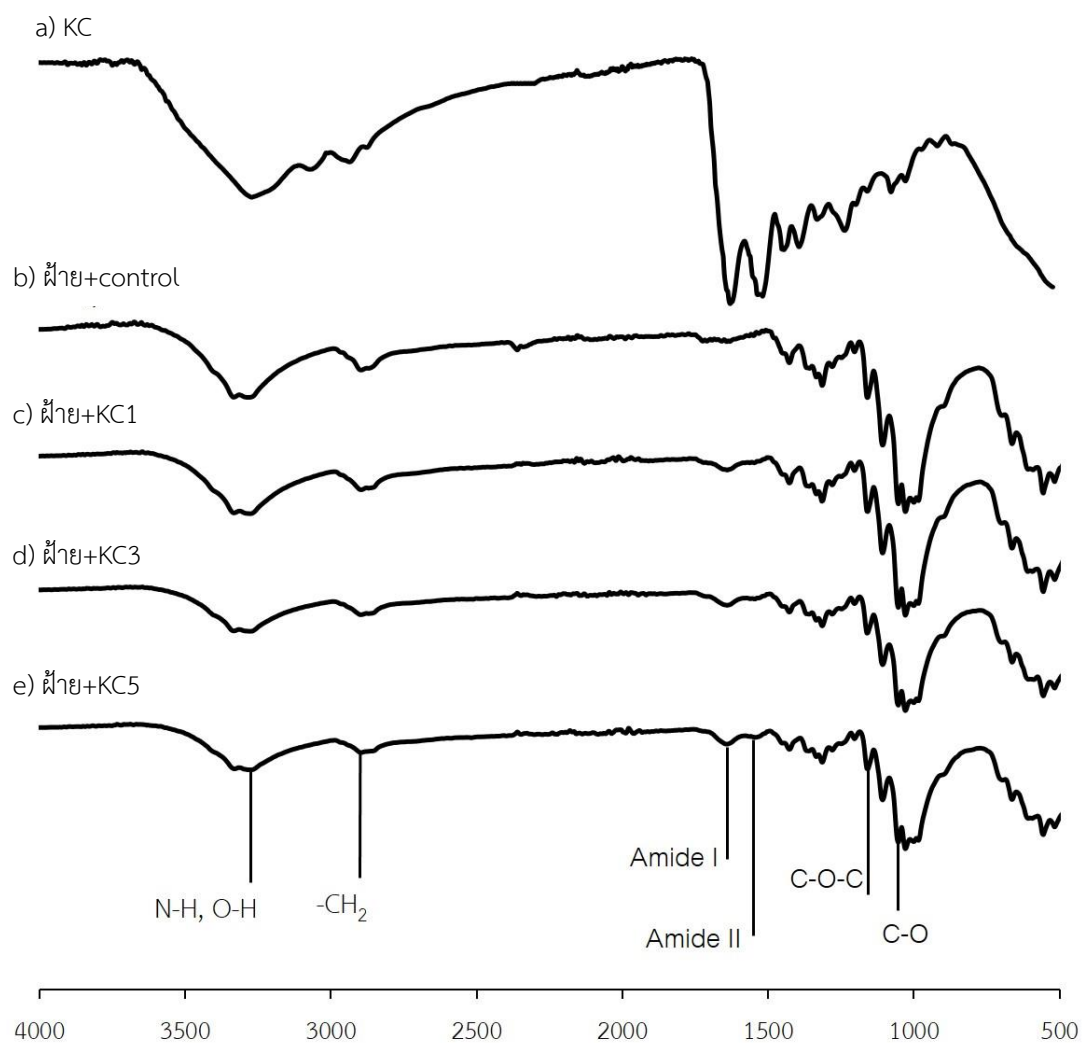
รูปที่ 4.59 FT-IR สเปกตรัมของ a) ฝ้ายที่ไม่ผ่านการตกแต่ง b) ฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบควบคุม สูตรที่ไม่มีสารช่วยผนึก (control) c) ฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบควบคุม สูตรที่มีสารช่วยผนึก (control-f)



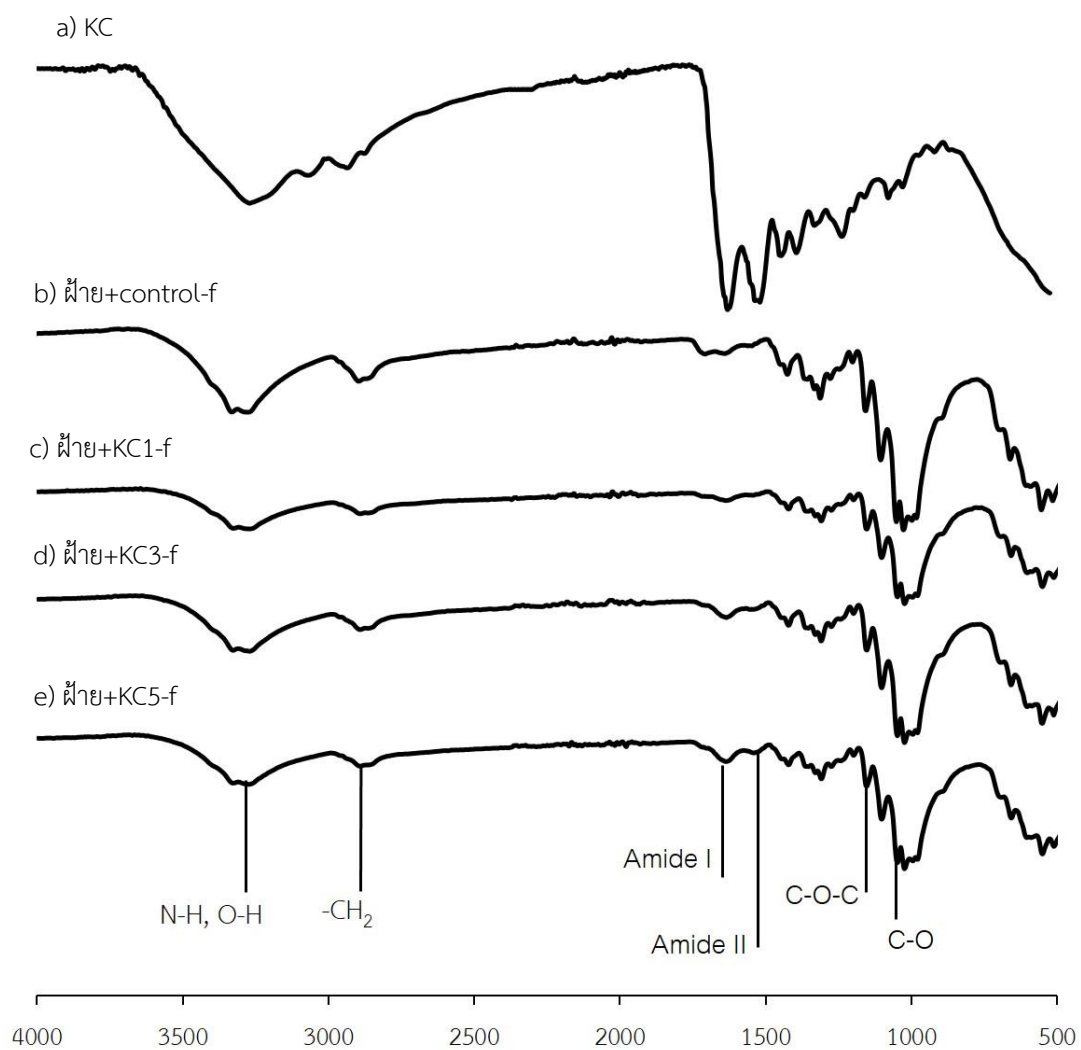
รูปที่ 4.60 FT-IR สเปกตรัมของ a) ฝ้ายที่ตกแต่งด้วย control และฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ที่ความเข้มข้นต่างกัน สูตรที่ไม่มีสารช่วยผนึก b) AP10 c) AP9 d) AP7 และ e) AP5



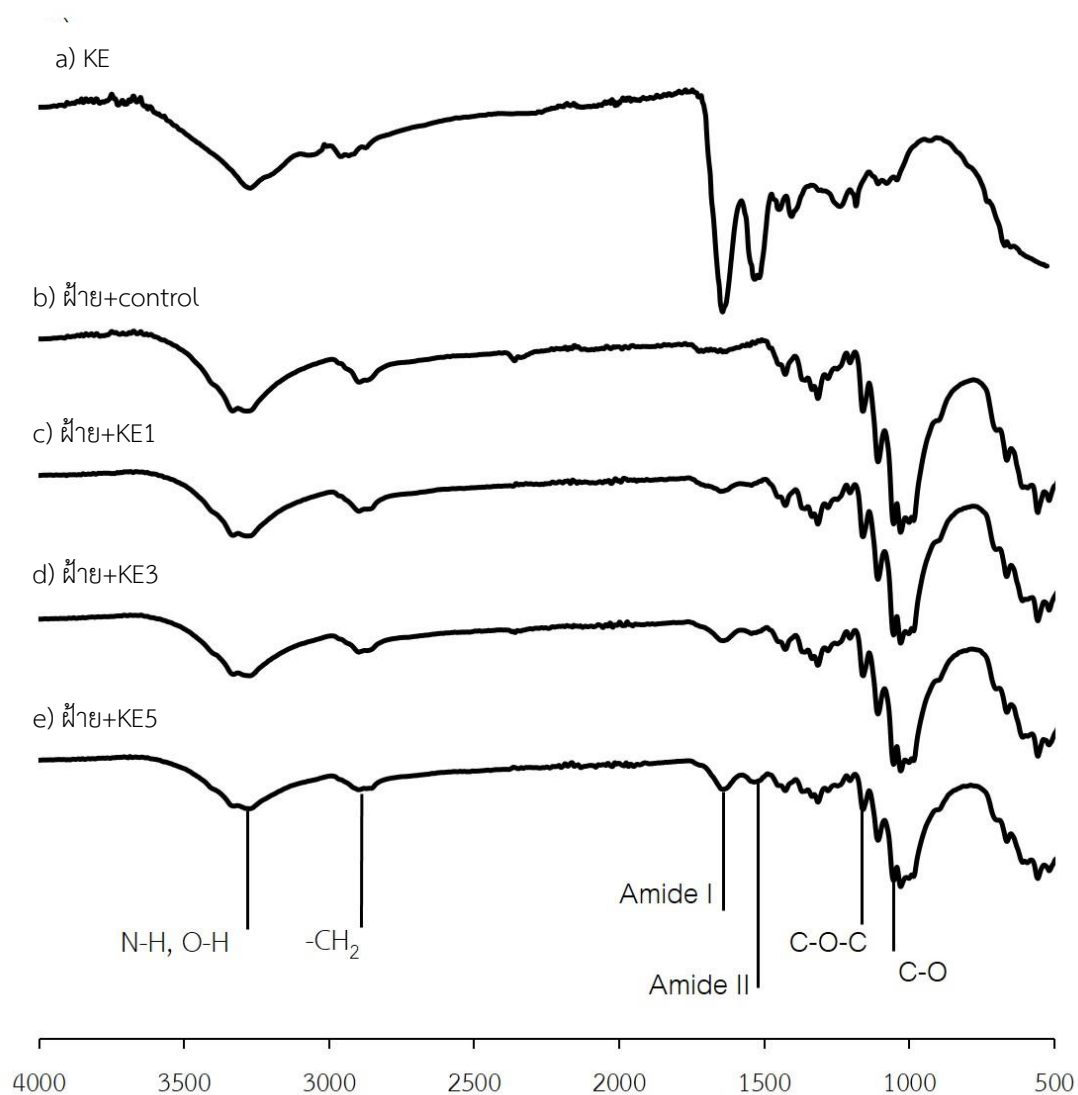
รูปที่ 4.61 FT-IR สเปกตรัมของ a) ฝ้ายที่ตกแต่งด้วย control-f และฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ที่ความเข้มข้นต่างกัน สูตรที่มีสารช่วยผนึก b) AP10-f c) AP9-f d) AP7-f และ e) AP5-f



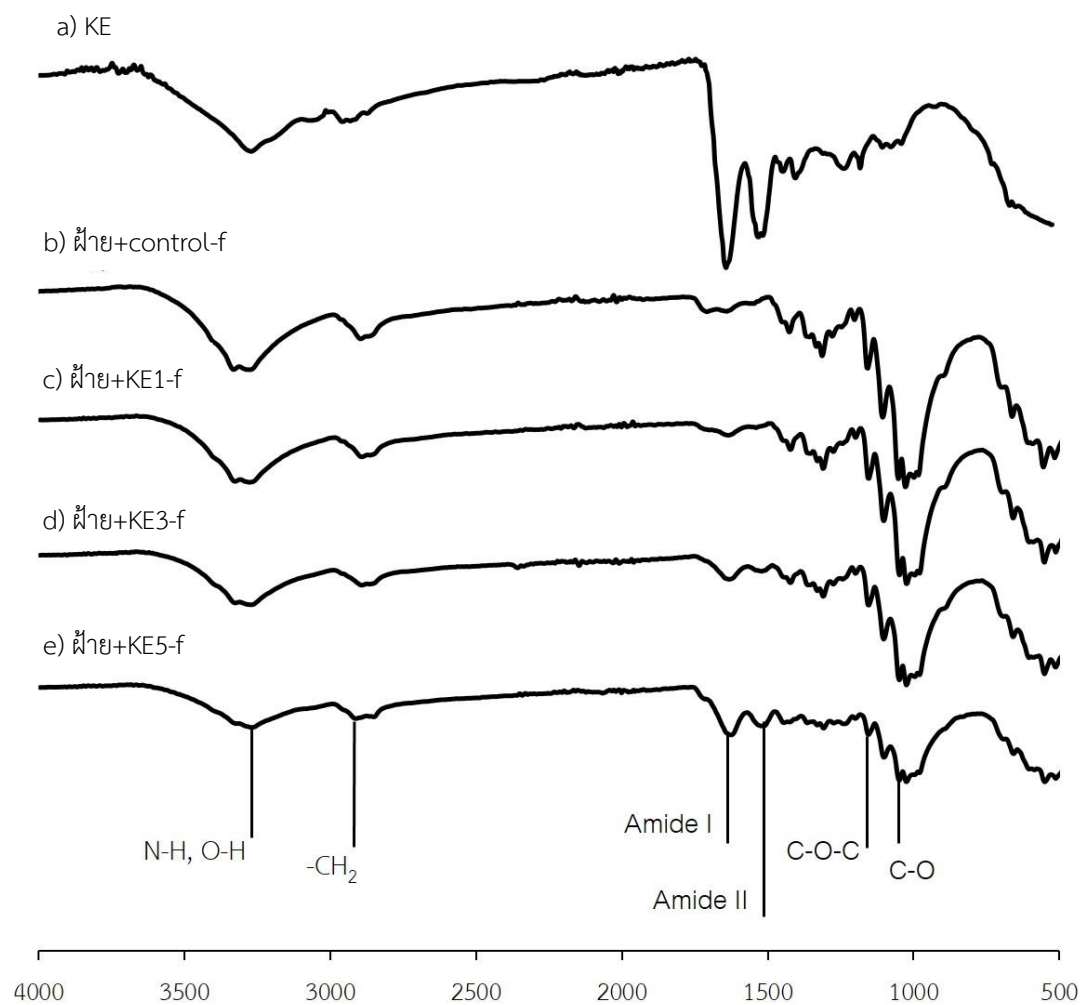
รูปที่ 4.62 FT-IR สเปกตรัมของ a) เคราตินทางการค้า (KC) b) ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย control และผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยเคราตินทางการค้า ที่ความเข้มข้นต่างกัน สูตรที่ไม่มีสารช่วยผนึก c) KC1 d) KC3 และ e) KC5



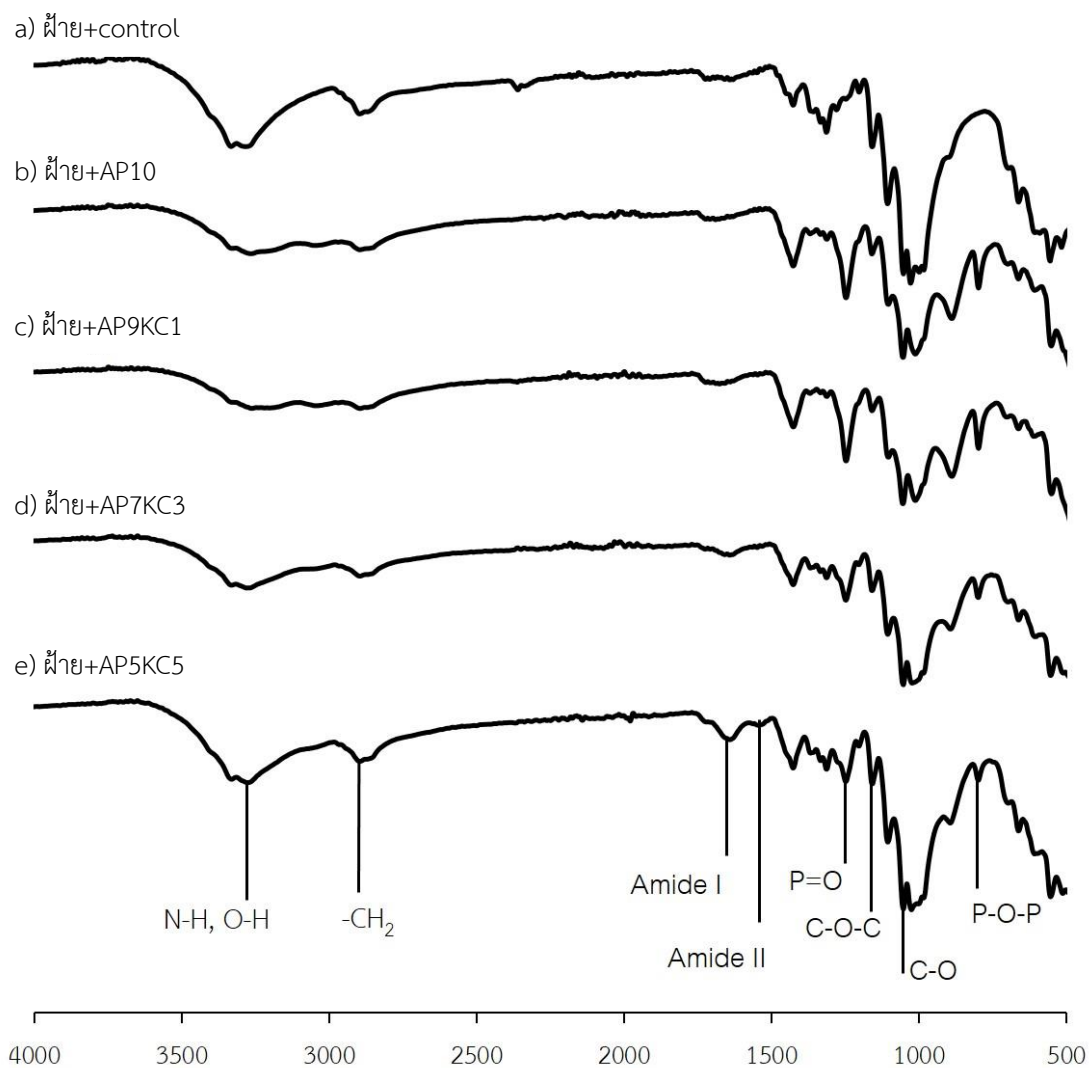
รูปที่ 4.63 FT-IR สเปกตรัมของ a) เคราตินทางการค้า (KC) b) ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย control-f และ ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยเคราตินทางการค้า ที่ความเข้มข้นต่างกัน สูตรที่มีสารช่วยผนึก c) KC1-f d) KC3-f และ e) KC5-f



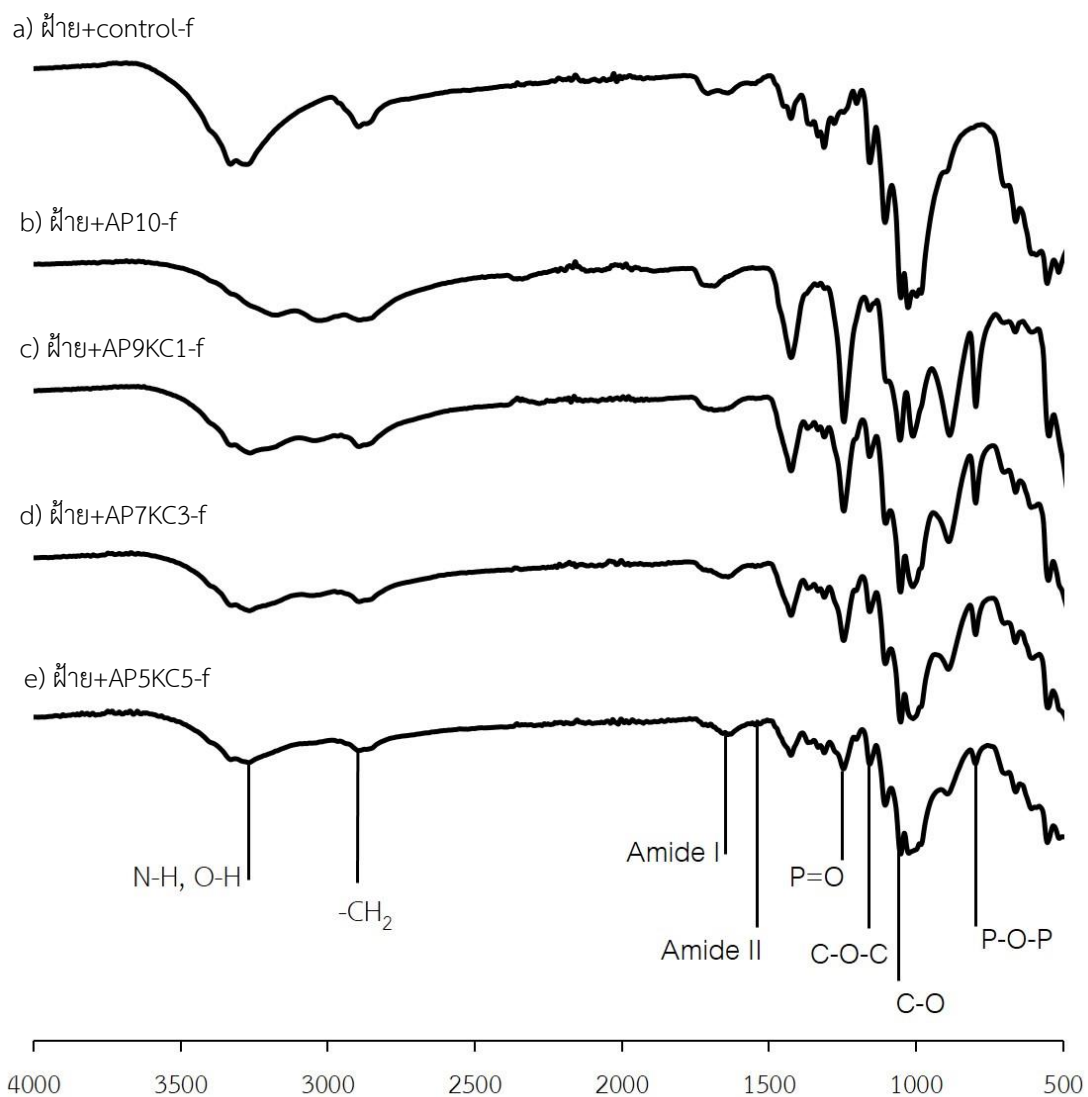
รูปที่ 4.64 FT-IR สเปกตรัมของ a) สารสกัดหยาบเคราติน (KE) b) ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย control และผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราติน ที่ความเข้มข้นต่างกัน สูตรที่ไม่มีสารช่วยย่น c) KE1 d) KE3 และ e) KE5



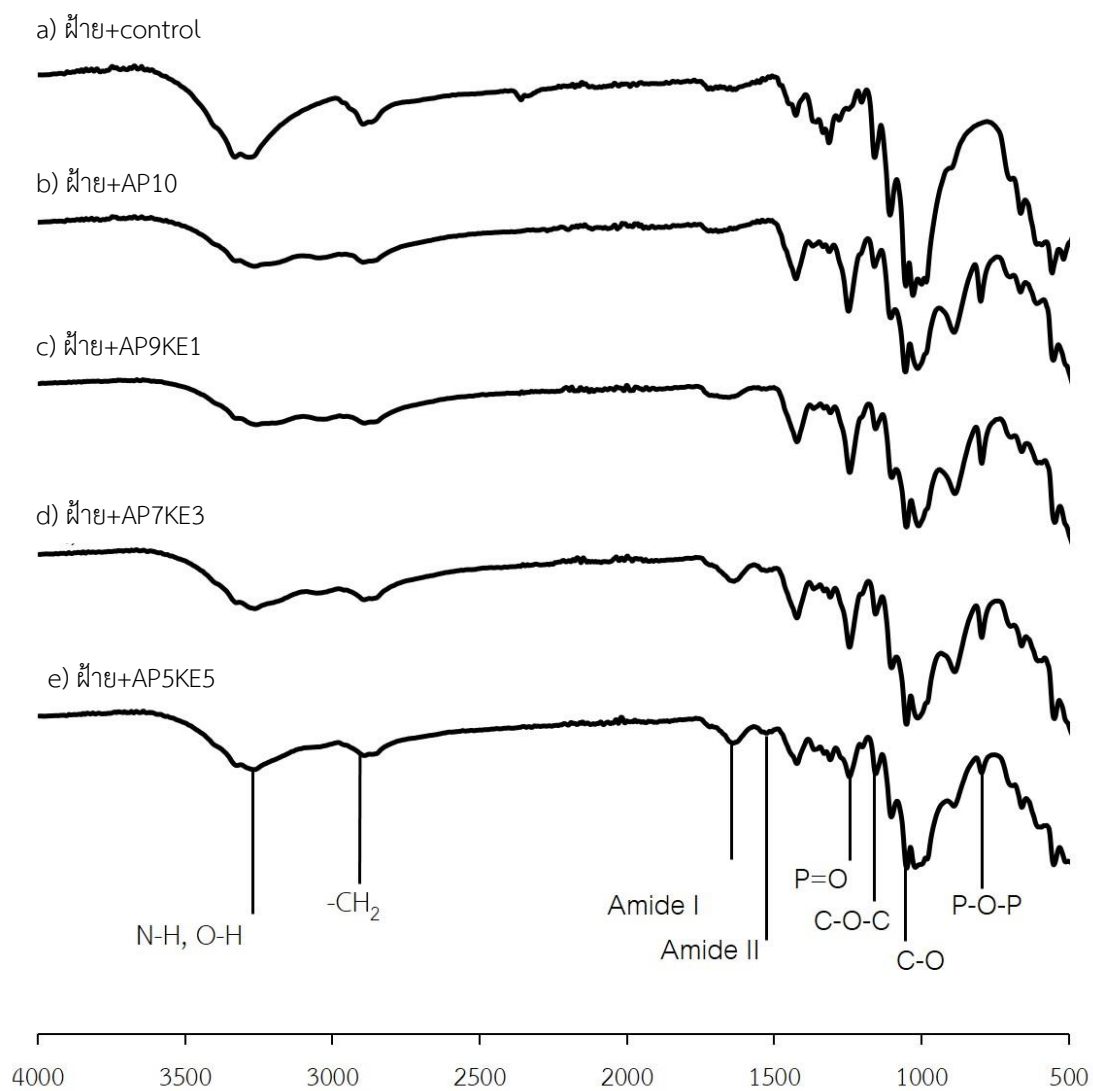
รูปที่ 4.65 FT-IR สเปกตรัมของ a) สารสกัดหยาบเคราติน (KE) b) ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย control-f และผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราติน ที่ความเข้มข้นต่างกัน ที่มีสารช่วยผนึก c) KE1-f d) KE3-f และ e) KE5-f



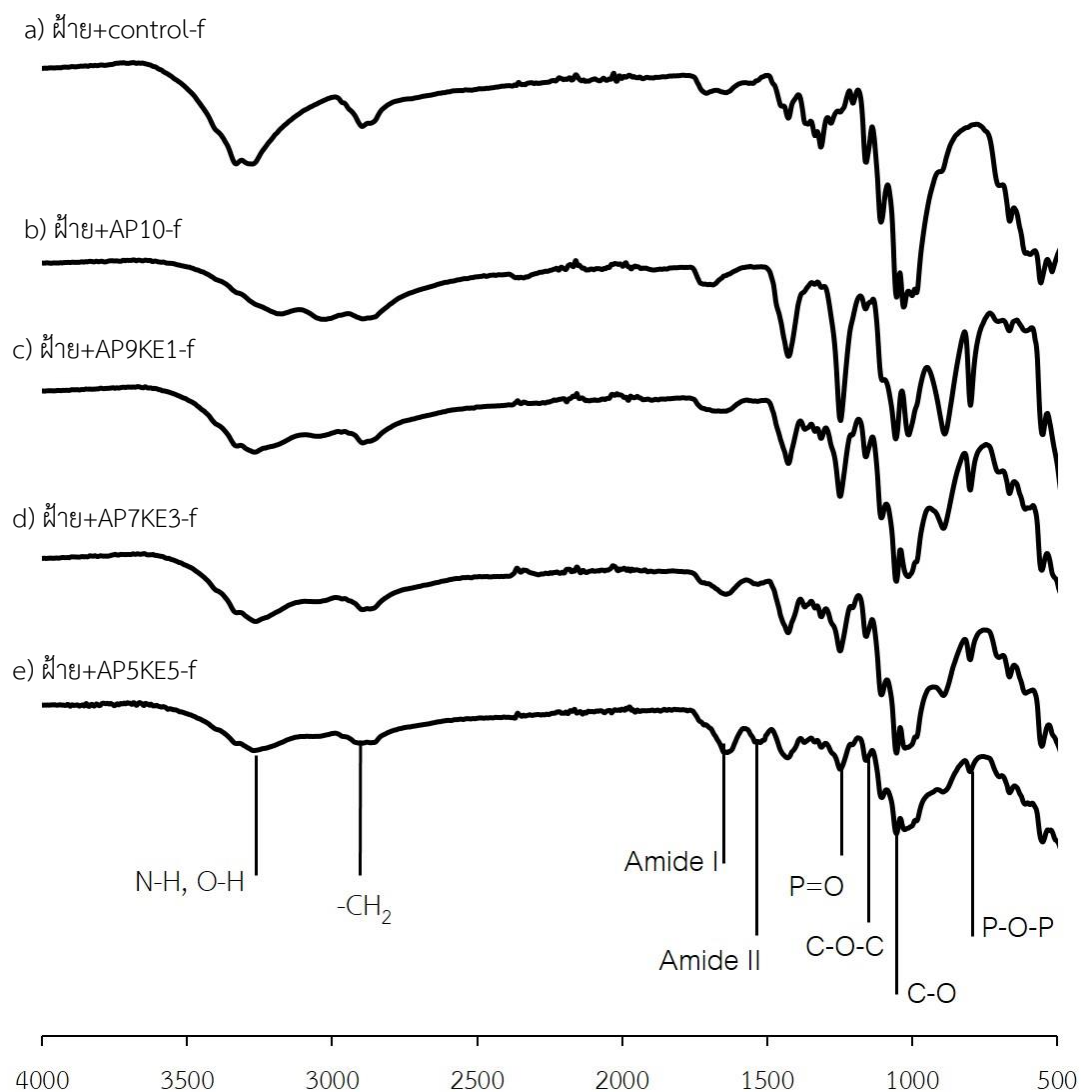
รูปที่ 4.66 FT-IR สเปกตรัมของ a) ฝ้ายที่ตกแต่งด้วย control และฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า (KC) สูตรต่าง ๆ สูตรที่ไม่มีสารช่วยพนิก b) AP10 c) AP9KC1 d) AP7KC3 และ e) AP5KC5



รูปที่ 4.67 FT-IR สเปกตรัมของ a) ฝ้ายที่ตกแต่งด้วย control-f และฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า (KC) สูตรต่าง ๆ สูตรที่มีสารช่วยผืน b) AP10-f c) AP9KC1-f d) AP7KC3-f และ e) AP5KC5-f



รูปที่ 4.68 FT-IR สเปกตรัมของ a) ฝ้ายที่ตกแต่งด้วย control และฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราติน (KE) สูตรต่าง ๆ ที่ไม่มีสารช่วยผนึก b) AP10 c) AP9KE1 d) AP7KE3 และ e) AP5KE5



รูปที่ 4.69 FT-IR สเปกตรัมของ a) ฝ้ายที่ตกแต่งด้วย control-f และฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราดิน (KE) สูตรต่าง ๆ ที่มีสารช่วยผนึก b) AP10-f c) AP9KE1-f d) AP7KE3-f และ e) AP5KE5-f

4.2.2.5 การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเทคนิค TGA

การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟสำหรับงานวิจัยนี้จะเลือกวิเคราะห์เฉพาะผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน (เคราตินทางการค้า (KC) และสารสกัดหยาบเคราติน (KE)) ในสูตรที่มีสารช่วยฉนิกเท่านั้น เนื่องจากผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสูตรนี้จะแสดงหมู่ฟังก์ชันของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตและเคราตินชัดเจนกว่าผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสูตรที่ไม่มีสารช่วยฉนิก ซึ่งแสดงถึงความสามารถของสารเคลือบหน่วงไฟที่สามารถเคลือบผ้าฝ้ายได้ดี นอกจากนี้เมื่อนำผ้าฝ้ายทั้ง 2 สูตรไปทดสอบความสามารถในการหน่วงไฟ ยังพบว่าผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบหน่วงไฟในสูตรที่มีสารช่วยฉนิกจะมีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟมากกว่าสูตรที่ไม่มีสารช่วยฉนิกอีกด้วย

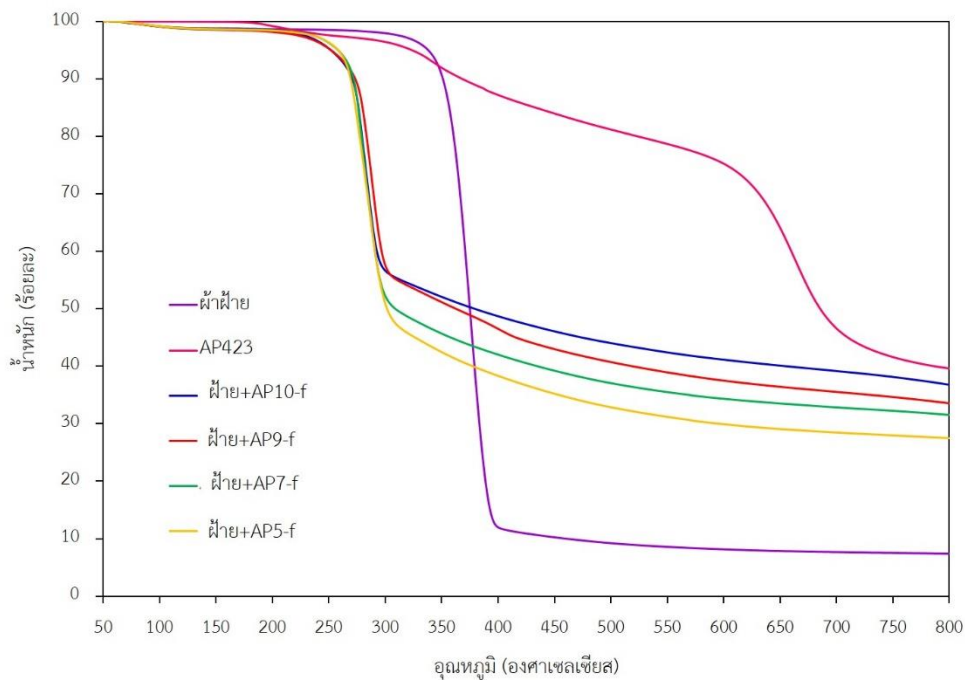
การสลายตัวทางความร้อนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วย Exolit AP423 ในสูตรที่มีสารช่วยฉนิก แสดงในรูปที่ 4.70 และ 4.71 พบว่าผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ทุกความเข้มข้นจะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 260 องศาเซลเซียสซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิที่ผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟเริ่มสลายตัวมาก (~350 องศาเซลเซียส) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตสลายตัวไปเป็นพอลิฟอสฟอริกแอซิด (polyphosphoric acid) พร้อมทั้งปลดปล่อยแก๊สแอมโมเนียซึ่งเป็นแก๊สติดไฟยากออกมา เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปฏิกิริยาการสลายตัวยังดำเนินต่อไปเป็นกรดพอสฟอริก ซึ่งกรดที่เกิดขึ้นนี้จะทำหน้าที่เป็นสารเร่งปฏิกิริยาการขจัดน้ำตรงหมู่ไฮดรอกซิลคาร์บอนตำแหน่งที่ 6 แอนไฮโดรกลูโคสซึ่งเป็นหน่วยย่อยของเซลลูโลสส่งผลให้ปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลลดลงและเกิดเป็นพันธะคู่ซึ่งพันธะคู่นี้จะถูกเปลี่ยนแปลงด้วยปฏิกิริยาเรดิคัล (radical reaction) เกิดเป็นชั้นของชาร์ที่ผิวผ้าฝ้าย [30, 69] โดยมีปริมาณชาร์ที่เหลืออยู่มากกว่าร้อยละ 27 เมื่อปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตเพิ่มขึ้นผ้าฝ้ายจะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำลง และปริมาณชาร์ที่เกิดขึ้นก็เพิ่มขึ้นด้วย โดยผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย AP10-f ยังเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำที่สุด และมีปริมาณชาร์ที่เหลืออยู่สูงที่สุดอีกด้วย ในขณะที่ผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟมีปริมาณชาร์ที่เหลืออยู่น้อยมากเพียงร้อยละ 7.3

สำหรับการสลายตัวทางความร้อนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วยเคราตินทางการค้าในสูตรที่มีสารช่วยฉนิก แสดงในรูปที่ 4.72 และ 4.73 และการสลายตัวทางความร้อนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารสกัดหยาบเคราตินในสูตรที่มีสารช่วยฉนิก แสดงในรูปที่ 4.74 และ 4.75 พบว่าผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยเคราตินทั้ง 2 แบบจะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิช่วง 317-330 องศาเซลเซียส แล้วปลดปล่อยแก๊สแอมโมเนียและแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งเป็นแก๊สติดไฟยากออกมา [15] โดยผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยเคราตินทางการค้าจะมีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวสูงกว่าผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราติน อย่างไรก็ตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของเคราตินทางการค้าไม่ได้ทำให้ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งมีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวสูงขึ้น ในขณะที่เมื่อปริมาณของสารสกัดหยาบเคราตินเพิ่มขึ้นพบว่าทำให้ผ้าฝ้ายที่ตกแต่ง

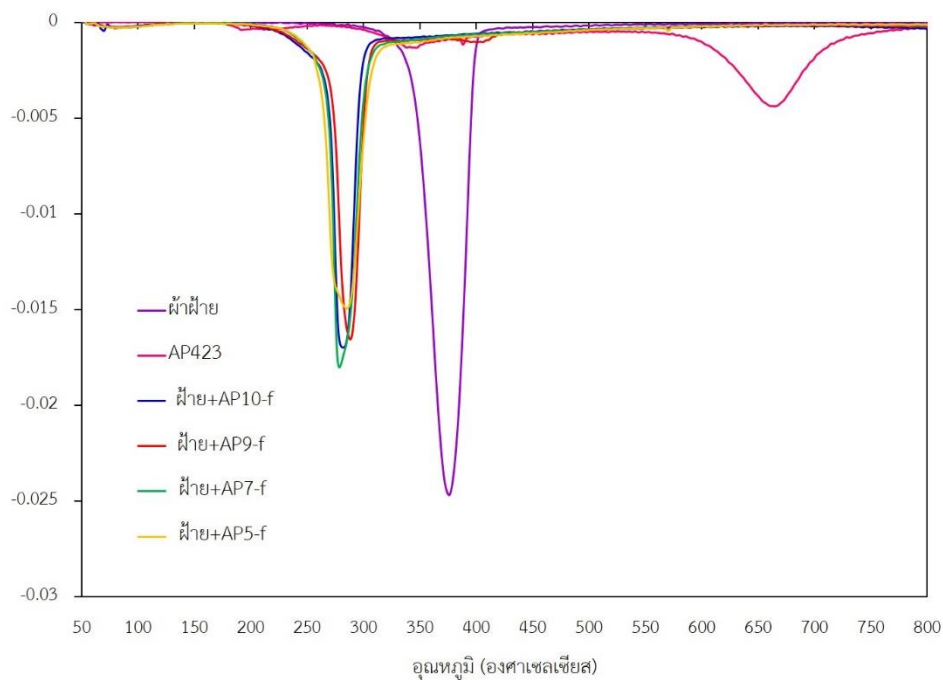
มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวสูงขึ้น มีปริมาณชาร์ที่เหลือเพิ่มขึ้น มีข้อสังเกตว่าผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วยเคราตินทั้ง 2 แบบมีปริมาณชาร์ที่เหลืออยู่นั้นน้อยกว่าผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตมาก

ส่วนการสลายตัวทางความร้อนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้าในสูตรที่มีสารช่วยผืนิก แสดงในรูปที่ 4.76 และ 4.77 และการสลายตัวทางความร้อนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราตินในสูตรที่มีสารช่วยผืนิก แสดงในรูปที่ 4.78 และ 4.79 พบว่าผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินจะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิช่วง 266-270 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมินี้แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (Exolit AP423) [69] สลายตัวแล้วปล่อยแก๊สแอมโมเนียออกมาในขณะที่เคราตินก็สลายตัวแล้วปล่อยแก๊สแอมโมเนียจากการสลายตัวของกรดอะมิโนในโครงสร้างโปรตีนและแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากการสลายตัวของพันธะไดซัลไฟด์ในโครงสร้างเคราติน [15] ซึ่งเป็นแก๊สติดไฟยากออกมา เป็นที่น่าสนใจว่าผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทั้งแบบทางการค้าและสารสกัดหยาบเคราตินให้ผลของปริมาณชาร์ที่เหลือมากกว่าผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการตกแต่งและมากกว่าผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ที่ความเข้มข้นเท่ากันเพียงอย่างเดียว แสดงว่าการมีเคราติน (มี N ในโครงสร้าง) อยู่ในสูตรเคลือบหน่วงไฟที่มีแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (มี P ในโครงสร้าง) จะเสริม (synergistic effect) ให้ Exolit AP423 มีประสิทธิภาพในการเกิดชาร์มากขึ้นเนื่องจาก N ทำหน้าที่เป็น nucleophile จึงทำให้เกิดการสร้างพันธะระหว่าง P กับ N (พันธะ P-N) นอกจากนี้ N ยังเพิ่มสภาพความเป็นบวก (electrophilicity) ให้แก่ P ช่วยให้ฟอสฟอริกแอซิดที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อนของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตทำปฏิกิริยา phosphorylation กับเซลลูโลสได้ง่ายขึ้นโดยการทำปฏิกิริยากับ ไฮดรอกซิลคาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของแอนไฮโดรกลูโคสซึ่งจะสามารถขจัดน้ำออกจากโมเลกุลของเซลลูโลส (cellulose dehydration) เพื่อสร้างชั้นชาร์ และยังสามารถปลดปล่อยแก๊สไนโตรเจน แก๊สแอมโมเนีย และแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์มาเจือจางแก๊สที่ติดไฟ [55, 59]

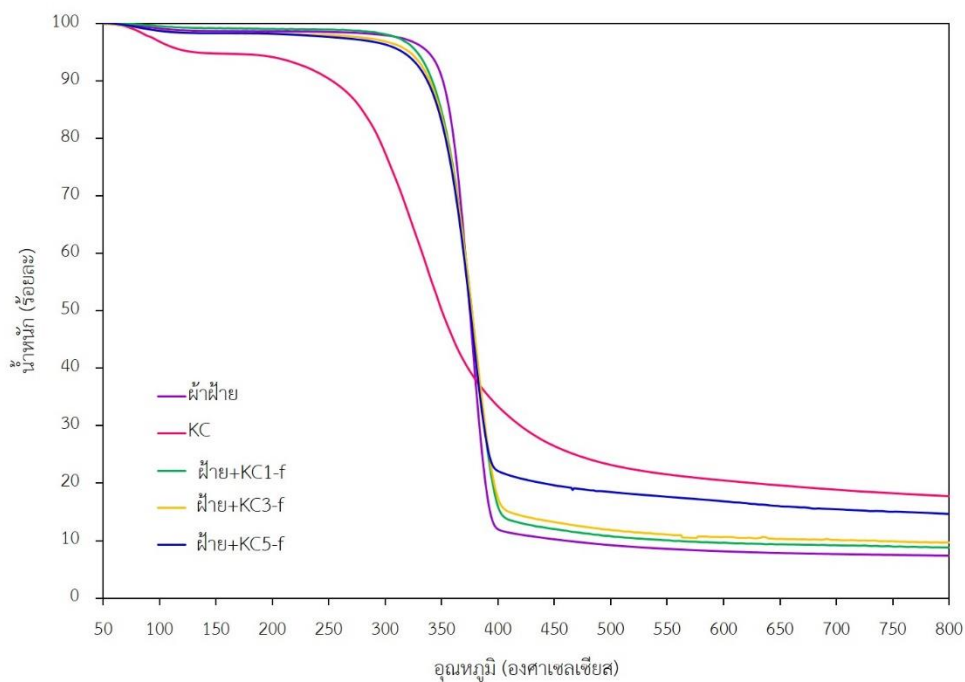
เมื่อเปรียบเทียบผลของเคราตินที่ต่างกันและที่ความเข้มข้นเท่ากันต่อปริมาณชาร์ที่เหลือพบว่าสารสกัดหยาบเคราตินที่ตกแต่งบนผ้าฝ้ายร่วมกับ Exolit AP423 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 ยังคงให้ปริมาณชาร์ที่เหลือสูงถึงร้อยละ 35.3 ซึ่งมากกว่าของเคราตินทางการค้าที่ตกแต่งบนผ้าฝ้ายร่วมกับ Exolit AP423 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 (ร้อยละ 30.9) และใกล้เคียงกับปริมาณชาร์ที่เหลือของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 เพียงอย่างเดียว (ร้อยละ 36.8) แสดงว่าสารสกัดหยาบเคราตินมีประสิทธิภาพในการสร้างชาร์มากกว่าเคราตินทางการค้า



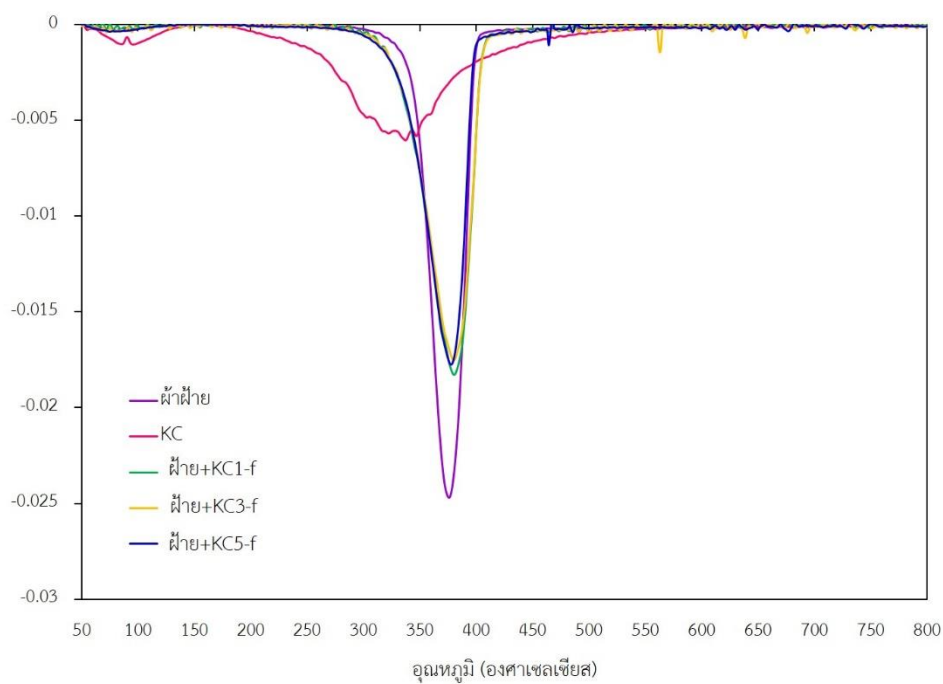
รูปที่ 4.70 TGA เทอร์โมแกรมภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วย Exolit AP423 สูตรที่มีสารช่วยพ่น



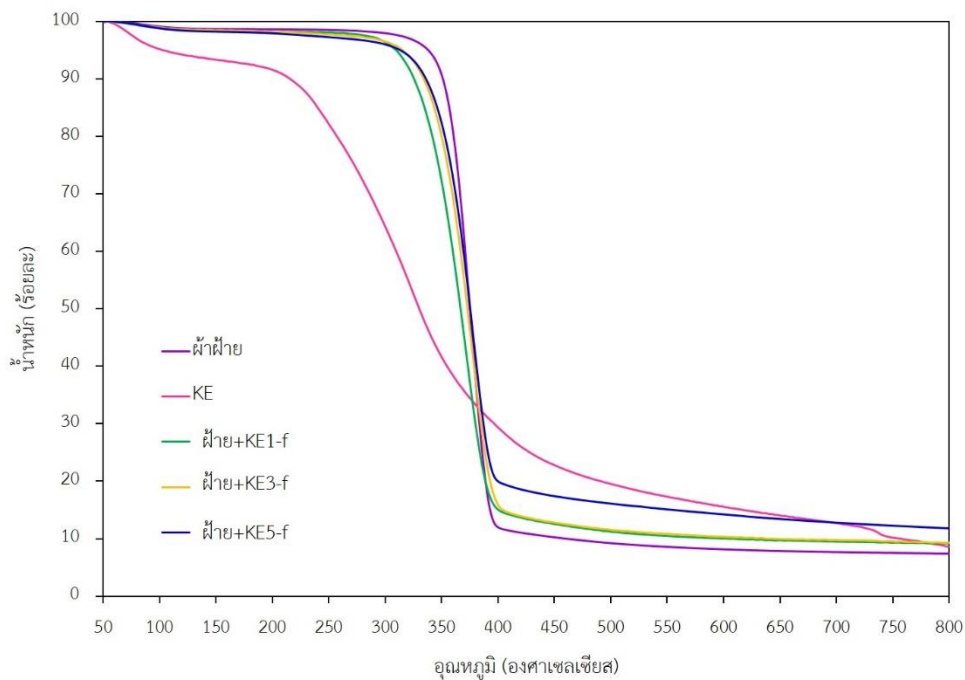
รูปที่ 4.71 DTG เทอร์โมแกรมภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วย Exolit AP423 สูตรที่มีสารช่วยพ่น



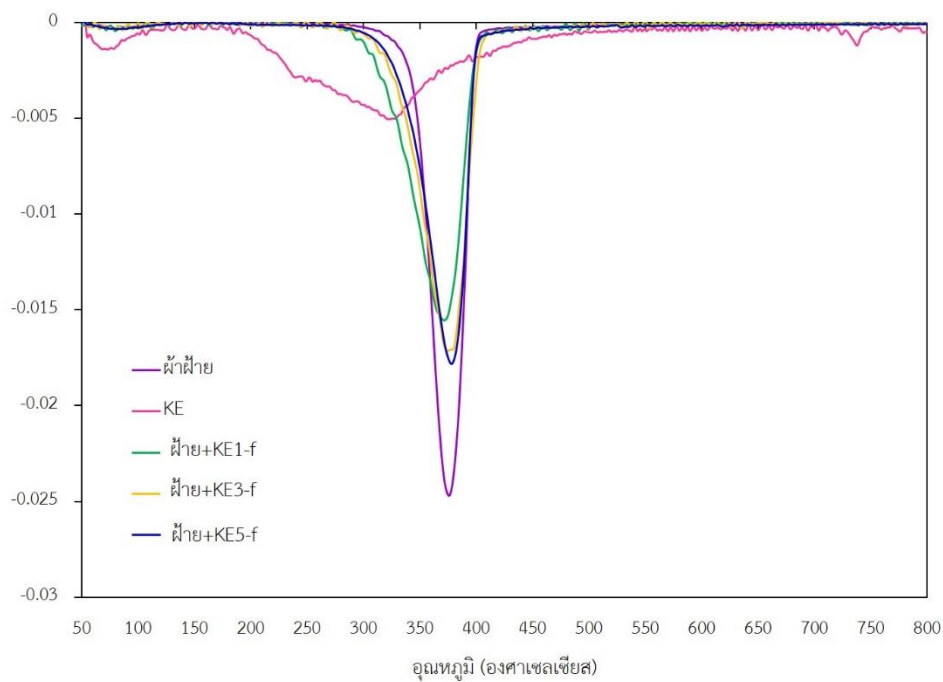
รูปที่ 4.72 TGA เทอร์โมแกรมภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วยเคราดิน
ทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยผนึก



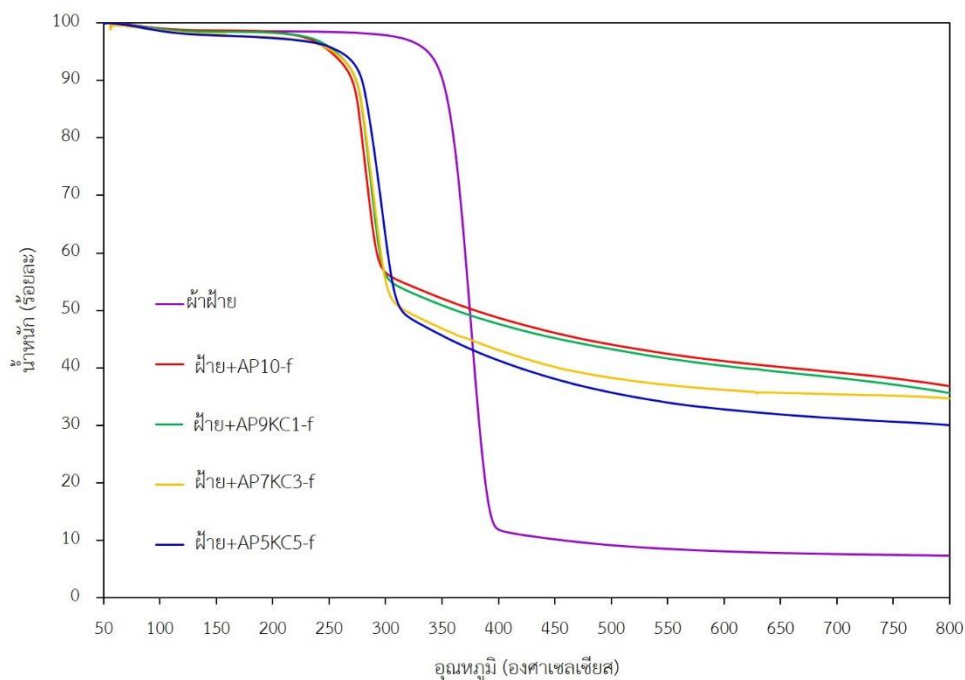
รูปที่ 4.73 DTG เทอร์โมแกรมภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วยเคราดิน
ทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยผนึก



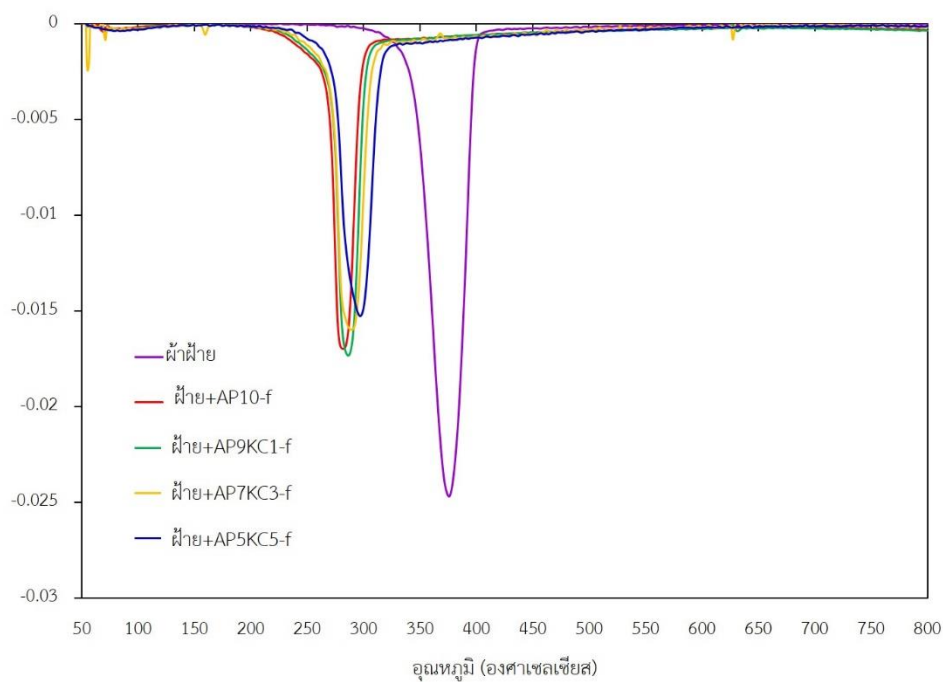
รูปที่ 4.74 TGA เทอร์โมแกรมภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหนังไฟด้วยสารสกัด
หยาบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผนึก



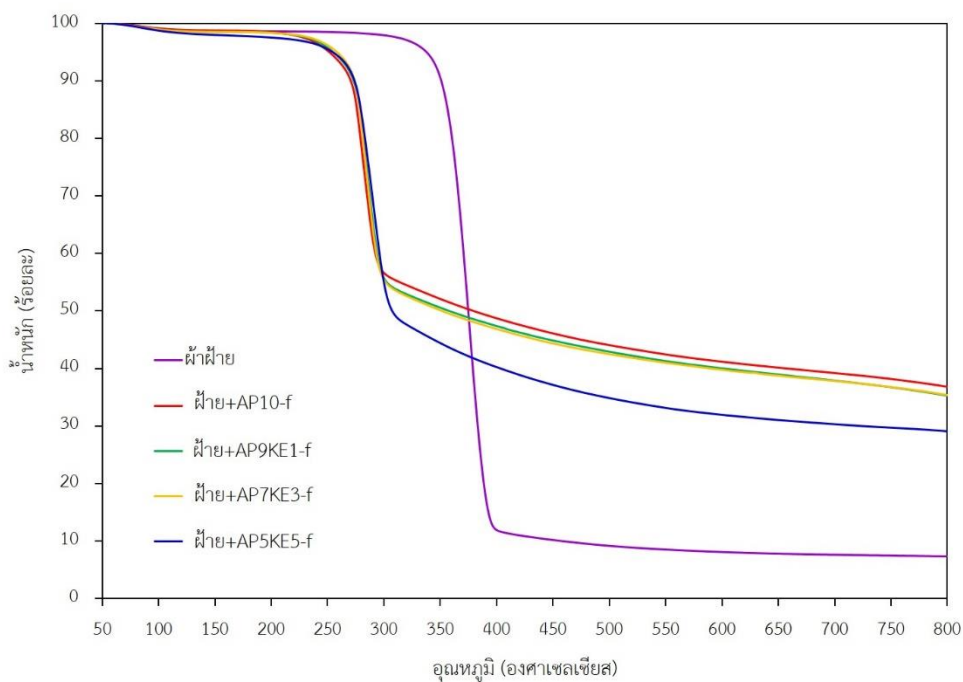
รูปที่ 4.75 DTG เทอร์โมแกรมภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหนังไฟด้วยสารสกัด
หยาบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผนึก



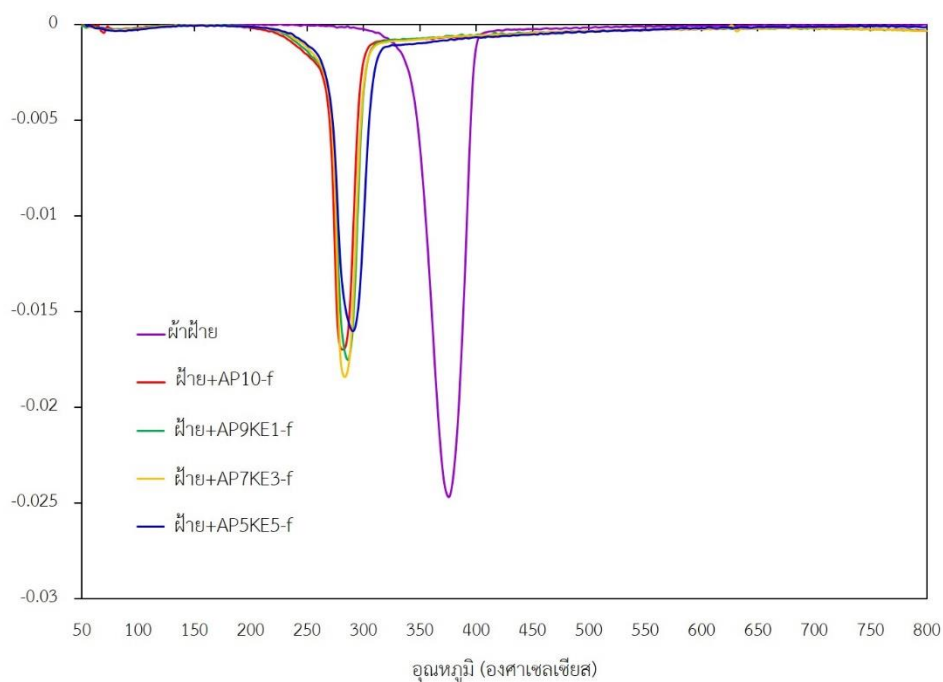
รูปที่ 4.76 TGA เทอร์โมแกรมภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยผนิก



รูปที่ 4.77 DTG เทอร์โมแกรมภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยผนิก



รูปที่ 4.78 TGA เทอร์โมแกรมภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผนึก



รูปที่ 4.79 DTG เทอร์โมแกรมภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผนึก

4.2.2.6 ความสามารถในการหน่วงไฟของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตร่วมกับเคราติน

4.2.2.6.1 ความสามารถในการหน่วงไฟของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ ตามมาตรฐาน UL94-VTM

การศึกษาความสามารถในการหน่วงไฟตามมาตรฐาน UL94-VTM ของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit 423 ร่วมกับเคราติน 2 ชนิด คือ เคราตินทางการค้า (KC) และสารสกัดหยาบเคราติน (KE) ที่สกัดด้วย 1,2-อีเทนไดโทออล (EDT) 4 ชั่วโมง ซึ่งเป็นภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเคราตินที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยจะควบคุมปริมาณสารหน่วงไฟร้อยละ 10 เนื่องจากเป็นปริมาณที่น้อยที่สุดของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตที่สามารถหน่วงไฟได้จากการทดสอบความสามารถในการหน่วงไฟของ Exolit AP423 ตามมาตรฐาน UL94-VTM และให้ค่า VTM-0 โดยการเตรียมสารเคลือบ 2 สูตร คือ สูตรที่ไม่มีสารช่วยผืนิกและสูตรที่มีสารช่วยผืนิก เพื่อศึกษาสูตรสารเคลือบหน่วงไฟที่มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟและการนำไปใช้งานมากที่สุด

ก. สูตรเคลือบหน่วงไฟที่ไม่มีสารช่วยผืนิก

การหน่วงไฟของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารหน่วงไฟ Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า และสารสกัดหยาบเคราตินในสูตรที่ไม่มีสารช่วยผืนิก แสดงในตารางที่ 4.16 พบว่าผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟและผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบควบคุมที่ไม่มีสารหน่วงไฟ (control) มีเวลาการลามไฟหลังนำแหล่งกำเนิดไฟออก (afterflame time) นานมากกว่า 30 วินาที ขึ้นไป หลังจากเปลวไฟดับแล้วยังมีการคุ้แดงเกิดขึ้น (afterglow time) นานมากกว่า 30 วินาที ขึ้นไปเช่นกัน และสุดท้ายเหลือเพียงขี้เถ้า ด้วยเหตุนี้จึงไม่สามารถจัดชั้นความสามารถในการหน่วงไฟตามมาตรฐาน UL94-VTM ได้ ผลการทดสอบนี้ชี้ให้เห็นว่าผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการตกแต่งไม่สามารถหน่วงไฟได้เลย นอกจากนี้ยังยืนยันว่าสารเคลือบควบคุมที่ไม่มีสารหน่วงไฟ (control) ไม่มีผลในการหน่วงไฟผ้าฝ้าย

ในขณะที่ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 เพียงอย่างเดียวที่ความเข้มข้นต่างๆทุกสูตรมีชาร์เกิดขึ้นภายหลังการเผาไหม้ afterflame time ลดลง ในขณะที่ afterglow time เพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณ Exolit AP423 เพิ่มขึ้น Exolit AP423 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 เป็นปริมาณที่มากพอที่จะทำให้ afterflame time สั้นลงเพียงแค่ว่า 2.24 วินาที และเมื่อไฟดับลง พบว่ามีการคุ้แดงเกิดขึ้น โดย afterglow time นานประมาณ 10 วินาที มีชาร์เกิดขึ้น และสามารถจัดชั้นความสามารถในการหน่วงไฟตามมาตรฐาน UL94-VTM ได้ในระดับ VTM-0 ซึ่งเป็นระดับที่ดีที่สุด แสดงว่าสารเคลือบที่มี Exolit AP423 ร้อยละ 10 เป็นปริมาณน้อยที่สุดที่ทำให้ผ้าฝ้ายสามารถหน่วงไฟได้ ดับไฟแล้วดับเองได้ (self-extinguishment)

อย่างไรก็ตามเมื่อผ้าฝ้ายตกแต่งห่วงไฟด้วย Exolit AP423 ที่ความเข้มข้นน้อยกว่าร้อยละ 10 ร่วมกับทั้งคราตินทางการค้าและสารสกัดหยาบคราติน ผ้าฝ้ายแสดง afterflame time สั้นกว่าผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 เพียงอย่างเดียวที่ความเข้มข้นเท่ากัน แต่ afterglow time กลับนานกว่าเล็กน้อย มีชาร์เกิดขึ้น สามารถจัดชั้นความสามารถในการห่วงไฟตามมาตรฐาน UL94-VTM ได้ในระดับ VTM-0 ซึ่งเป็นระดับที่ดีที่สุด และระดับ VTM-1 ซึ่งเป็นระดับปานกลาง โดยผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ที่ความเข้มข้นน้อยกว่าร้อยละ 9 และ 7 ร่วมกับคราตินทางการค้าที่ความเข้มข้น 1 และ 3 ตามลำดับ มีค่า VTM-0 และ VTM-1 ตามลำดับ ในขณะที่จะมีค่า VTM-0 ทั้งคู่หากร่วมกับสารสกัดหยาบคราติน

สำหรับผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยคราตินทางการค้าหรือสารสกัดหยาบคราตินเพียงอย่างเดียวพบว่าที่ทุกความเข้มข้น มี afterflame time ประมาณ 30 วินาทีขึ้นไป หลังจากเปลวไฟดับก็เกิดการคุแดง มี afterglow time นานมากประมาณ 40 วินาทีขึ้นไป เปลวไฟลามถึงระยะ 125 มิลลิเมตร และสุดท้ายเหลือเพียงขี้เถ้า ไม่สามารถจัดชั้นความสามารถในการห่วงไฟตามมาตรฐาน UL94-VTM ได้

ข. สูตรเคลือบห่วงไฟที่มีสารช่วยฉนวน

การห่วงไฟของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารห่วงไฟ Exolit AP423 ร่วมกับคราตินทางการค้าและสารสกัดหยาบคราตินในสูตรที่มีสารช่วยฉนวน แสดงในตารางที่ 4.17 พบว่าผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟและผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบควบคุมที่ไม่มีสารห่วงไฟ (control-f) แสดงพฤติกรรมการติดไฟเหมือนกับผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสูตรเคลือบห่วงไฟที่ไม่มีสารช่วยฉนวนที่กล่าวมาข้างต้น มีการลามไฟหลังนำแหล่งกำเนิดไฟออก มีการคุแดงหลังเปลวไฟดับ และสุดท้ายเหลือเพียงขี้เถ้า ไม่สามารถจัดชั้นความสามารถในการห่วงไฟตามมาตรฐาน UL94-VTM ได้ เช่นเดียวกันผลการทดสอบนี้ชี้ให้เห็นว่าผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการตกแต่งไม่สามารถห่วงไฟได้เลย นอกจากนี้ยังยืนยันว่าสารเคลือบควบคุมที่ไม่มีสารห่วงไฟ (control-f) ไม่มีผลในการห่วงไฟผ้าฝ้าย

ในทำนองเดียวกัน ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยคราตินทางการค้าหรือสารสกัดหยาบคราตินเพียงอย่างเดียวและมีสารช่วยฉนวนพบว่าต่างก็แสดงพฤติกรรมการติดไฟเหมือนกับผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยคราตินและไม่มีสารช่วยฉนวนที่กล่าวมาข้างต้น กล่าวคือมีการลามไฟหลังนำแหล่งกำเนิดไฟออก มีการคุแดงหลังเปลวไฟดับ เพียงแต่ระยะเวลาการลามไฟและการคุแดงสั้นกว่าสูตรที่ไม่มีสารช่วยฉนวนเล็กน้อย เปลวไฟลามถึงระยะ 125 มิลลิเมตรและสุดท้ายเหลือเพียงขี้เถ้า ไม่สามารถจัดชั้นความสามารถในการห่วงไฟตามมาตรฐาน UL94-VTM ได้

สำหรับผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 เพียงอย่างเดียวที่ความเข้มข้นต่างๆทุกสูตรและมีสารช่วยฉนวน แสดงพฤติกรรมการติดไฟเหมือนกับผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 เพียงอย่าง

เดี่ยวและไม่มีสารช่วยพนักดั่งที่กล่าวมาข้างต้น กล่าวคือมีการลามไฟหลังนำแหล่งกำเนิดไฟออก มีการคุ้แดงหลังเปลวไฟดับ เพียงแต่ระยะเวลาการลามไฟและการคุ้แดงสั้นกว่าสูตรที่ไม่มีสารช่วยพนักเล็กน้อยและมีชาร์เกิดขึ้นภายหลังการเผาไหม้ เช่นเดียวกัน Exolit AP423 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 เป็นปริมาณที่มากพอที่ทำให้ผ้าฝ้ายมีชั้นความสามารถในการหน่วงไฟตามมาตรฐาน UL94-VTM ได้ ในระดับ VTM-0 ซึ่งเป็นระดับที่ดีที่สุด ในขณะที่ความเข้มข้นน้อยกว่านี้ ถึงแม้จะเกิดชาร์ แต่ afterflame time ยังนานจนไม่สามารถจัดชั้นความสามารถในการหน่วงไฟตามมาตรฐาน UL94-VTM ได้ แสดงว่าสารเคลือบที่มี Exolit AP423 ร้อยละ 10 เป็นปริมาณน้อยที่สุดที่ทำให้ผ้าฝ้ายสามารถหน่วงไฟได้ ดัดไฟแล้วดับเองได้ (self-extinguishment)

ส่วนผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วย Exolit AP423 ที่ความเข้มข้นน้อยกว่าร้อยละ 10 ร่วมกับทั้งคราตินทางการค้าและสารสกัดหยาบคราตินในสูตรที่มีสารช่วยพนักพบว่าผ้าฝ้ายแสดงพฤติกรรมการติดไฟเหมือนกับผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับทั้งคราตินทางการค้าและสารสกัดหยาบคราตินในสูตรที่ไม่มีสารช่วยพนักดั่งที่กล่าวมาข้างต้น แต่ยังมีส่วนยกระดับให้ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วย Exolit AP423 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 7 ร่วมกับคราตินทางการค้าร้อยละ 3 มีระดับชั้นความสามารถในการหน่วงไฟตามมาตรฐาน UL94-VTM ดีขึ้น จาก VTM-1 เป็น VTM-0 กล่าวคือผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ที่ความเข้มข้นน้อยกว่าร้อยละ 9 และ 7 ร่วมกับคราตินทางการค้าหรือสารสกัดหยาบคราตินที่ความเข้มข้น 1 และ 3 ตามลำดับ มีค่า VTM-0 โดยผ้าฝ้ายมี afterflame time และ afterglow time สั้นกว่าผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วย Exolit AP423 ร่วมกับทั้งคราตินทางการค้าหรือสารสกัดหยาบคราตินและมีสารช่วยพนักเล็กน้อย มีชาร์เกิดขึ้น อาจสรุปได้ว่าสารช่วยพนัก จะช่วยให้สารยีนานาโนพอลิยูรีเทนเกิดการเชื่อมขวางเป็นฟิล์มเคลือบสารหน่วงไฟให้ติดบนผ้าฝ้ายส่งผลให้ผ้าฝ้ายมีความสามารถในการหน่วงไฟมากกว่าสูตรที่ไม่มีสารช่วยพนัก

ตารางที่ 4.16 การหน่วงไฟของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารหน่วงไฟ Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า (KC) และสารสกัดหยาบเคราติน (KE) สูตรที่ไม่มีสารช่วยพ่นิก ตามมาตรฐาน UL94-VTM

ผ้าฝ้ายที่ตกแต่ง	Afterflame time (s) (t_1)	Afterglow time (s) (t_3)	125mm. mark	Dripping	Residue	VTM
ไม่ตกแต่ง	36.66	32.60	มี	ไม่มี	ซี้เถ้า	ไม่มี
control	31.12	35.78	มี	ไม่มี	ซี้เถ้า	ไม่มี
AP5	17.62	0	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
AP7	19.26	0	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
AP9	9.40	8.44	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
AP10	2.24	10.82	ไม่มี	ไม่มี	ชาร์	VTM-0
AP9KC1	1.26	16.20	ไม่มี	ไม่มี	ชาร์	VTM-0
AP7KC3	10.58	0	ไม่มี	ไม่มี	ชาร์	VTM-1
AP5KC5	12.82	2.60	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
AP9KE1	1.24	15.20	ไม่มี	ไม่มี	ชาร์	VTM-0
AP7KE3	7.66	2.48	ไม่มี	ไม่มี	ชาร์	VTM-0
AP5KE5	18.74	0	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
KC1	33.12	59.34	มี	ไม่มี	ซี้เถ้า	ไม่มี
KC3	31.12	79.46	มี	ไม่มี	ซี้เถ้า	ไม่มี
KC5	29.60	56.36	มี	ไม่มี	ซี้เถ้า	ไม่มี
KE1	32.68	49.44	มี	ไม่มี	ซี้เถ้า	ไม่มี
KE3	32.28	49.12	มี	ไม่มี	ซี้เถ้า	ไม่มี
KE5	30.40	43.62	มี	ไม่มี	ซี้เถ้า	ไม่มี

1stAfterflame time (s) (t_1) คือ ระยะเวลาการลามไฟของตัวอย่าง หลังนำเปลวไฟออก ในครั้งที่ 1
 Afterglow time (s) (t_3) คือ ระยะเวลาการคุแดงของตัวอย่าง หลังการลามไฟดับลง
 125 mm mark คือ การลามไฟทั้งแบบมีเปลวไฟและไม่มีเปลวไฟถึงระยะที่กำหนดไว้ 125 มิลลิเมตร
 Dripping คือ การลุกติดไฟของสำลีจากประกายไฟ หรือการหลอมหยดของชิ้นตัวอย่าง
 VTM คือ การวัดความสามารถในการหน่วงไฟของชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน UL94-VTM

ตารางที่ 4.17 การหน่วงไฟของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารหน่วงไฟ Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า (KC) และสารสกัดหยาบเคราติน (KE) สูตรที่มีสารช่วยผนึ่ง ตามมาตรฐาน UL94-VTM

ผ้าฝ้ายที่ตกแต่ง	Afterflame time (s) (t_1)	Afterglow time (s) (t_3)	125mm. mark	Dripping	Residue	VTM
ไม่ตกแต่ง	36.66	32.60	มี	ไม่มี	ซี้เถ้า	ไม่มี
control-f	28.72	40.10	มี	ไม่มี	ซี้เถ้า	ไม่มี
AP5-f	17.76	0	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
AP7-f	13.30	0	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
AP9-f	12.12	17.30	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
AP10-f	0.66	5.34	ไม่มี	ไม่มี	ชาร์	VTM-0
AP9KC-f1	0.68	13.04	ไม่มี	ไม่มี	ชาร์	VTM-0
AP7KC3-f	2.80	10.68	ไม่มี	ไม่มี	ชาร์	VTM-0
AP5KC5-f	16.36	0	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
AP9KE1-f	0.70	18.68	ไม่มี	ไม่มี	ชาร์	VTM-0
AP7KE3-f	2.90	11.30	ไม่มี	ไม่มี	ชาร์	VTM-0
AP5KE5-f	14.92	0	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
KC1-f	30.18	34.84	มี	ไม่มี	ซี้เถ้า	ไม่มี
KC3-f	28.10	39.26	มี	ไม่มี	ซี้เถ้า	ไม่มี
KC5-f	26.78	41.70	มี	ไม่มี	ซี้เถ้า	ไม่มี
KE1-f	31.22	24.44	มี	ไม่มี	ซี้เถ้า	ไม่มี
KE3-f	29.60	36.38	มี	ไม่มี	ซี้เถ้า	ไม่มี
KE5-f	28.00	35.14	มี	ไม่มี	ซี้เถ้า	ไม่มี

1stAfterflame time (s) (t_1) คือ ระยะเวลาการลามไฟของตัวอย่าง หลังนำเปลวไฟออก ในครั้งที่ 1

Afterglow time (s) (t_3) คือ ระยะเวลาการคุแดงของตัวอย่าง หลังการลามไฟดับลง

125 mm mark คือ การลามไฟทั้งแบบมีเปลวไฟและไม่มีเปลวไฟถึงระยะที่กำหนดไว้ 125 มิลลิเมตร

Dripping คือ การลุกติดไฟของสำลีจากประกายไฟ หรือการหลอมหยดของชิ้นตัวอย่าง

VTM คือ การวัดความสามารถในการหน่วงไฟของชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน UL94-VTM

4.2.2.6.2 ลักษณะทางกายภาพของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ ตามมาตรฐาน UL94-VTM

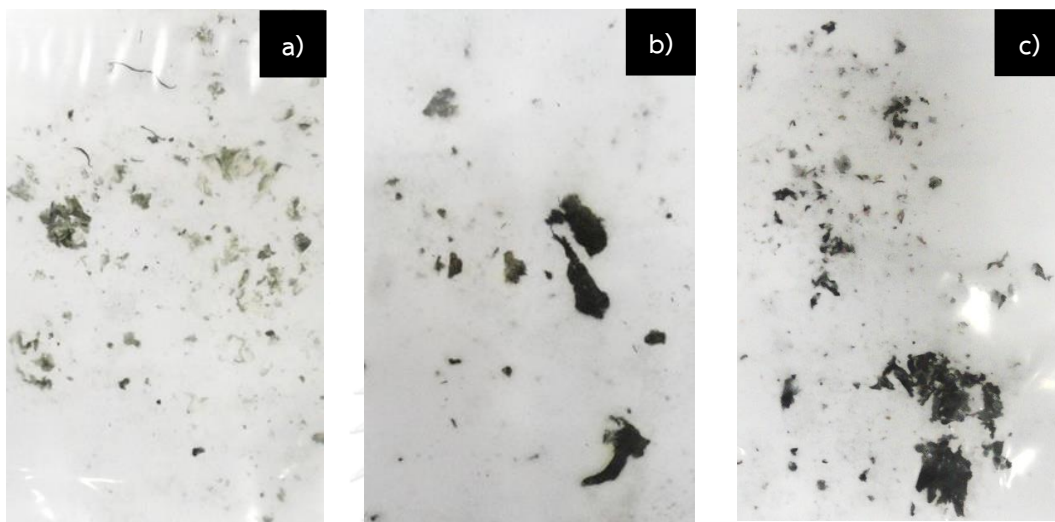
ลักษณะทางกายภาพของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ไม่ผ่านการตกแต่งและตกแต่งห่วงไฟด้วยสารเคลือบห่วงไฟควบคุมในสูตรที่ไม่มีสารช่วยฉนิก (control) และในสูตรที่มีสารช่วยฉนิก (control-f) แสดงในรูปที่ 4.80 พบว่าผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟหลังการเผาไหม้จะให้เชื้อเพลิงส่วนผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วยสารเคลือบห่วงไฟ control และ control-f หลังการเผาไหม้จะให้เชื้อเพลิงต่ำ

ลักษณะทางกายภาพของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ในสูตรที่ไม่มีสารช่วยฉนิก และสูตรที่มีสารช่วยฉนิก แสดงในรูปที่ 4.81 และ 4.86 ตามลำดับ พบว่า ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร้อยละ 5 และ 7 (AP5 และ AP7) จะถูกเผาไหม้และเกิดชาร์ตตลอดชิ้นตัวอย่าง ในขณะที่ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร้อยละ 10 (AP10) จะเกิดการเผาไหม้และเกิดชาร์ตไม่ถึงระยะที่กำหนดไว้ 125 มิลลิเมตร (VTM-0) โดยผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย AP10 มีความยาวชาร์ต 8 เซนติเมตร ซึ่งมากกว่าผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย AP10-f ที่มีความยาวชาร์ต 4.3 เซนติเมตร เนื่องจากสารช่วยฉนิกอาจช่วยให้สารยึดนาโนพอลิยูรีเทนเกิดการเชื่อมขวางเป็นฟิล์มเคลือบสารห่วงไฟให้ติดบนผ้าฝ้ายดีขึ้นส่งผลให้ผ้าฝ้ายมีความสามารถในการห่วงไฟมากกว่าสูตรที่ไม่มีสารช่วยฉนิก

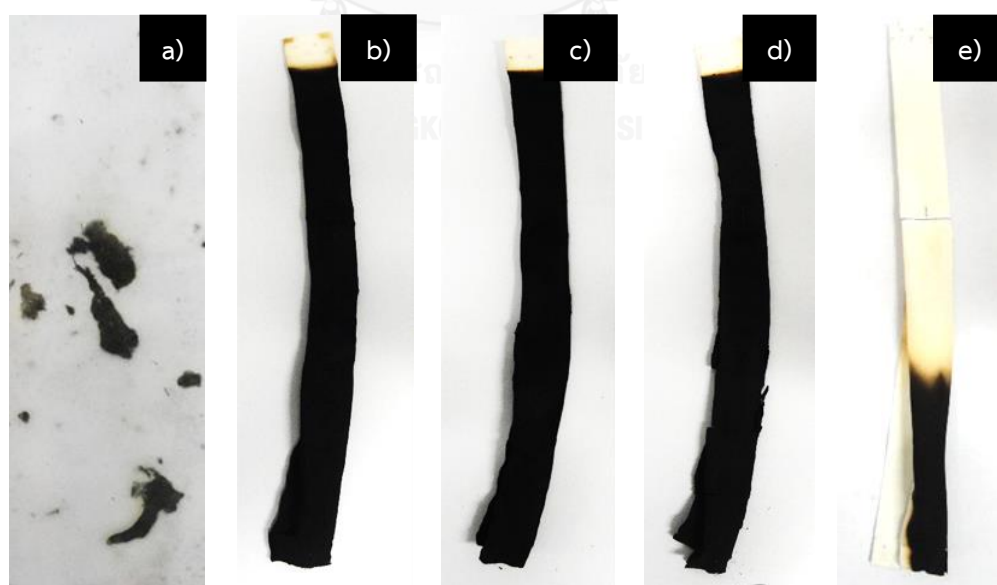
ลักษณะทางกายภาพของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับคราตินทางการค้า ในสูตรที่ไม่มีสารช่วยฉนิกและสูตรที่มีสารช่วยฉนิก แสดงในรูปที่ 4.82 และ 4.87 ตามลำดับ พบว่า ผ้าฝ้ายจะมีการเผาไหม้และเกิดชาร์ตเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ Exolit AP423 ในสารเคลือบห่วงไฟลดลง โดยผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย AP9KC1 และ AP7KC3 มีความยาวชาร์ต 9 และ 9.5 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย AP9KC1-f และ AP7KC3-f ที่มีความยาวชาร์ต 7 และ 9 เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนลักษณะทางกายภาพของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบคราติน สูตรที่ไม่มีสารช่วยฉนิกและสูตรที่มีสารช่วยฉนิก แสดงในรูปที่ 4.83 และ 4.88 ตามลำดับ พบว่า ผ้าฝ้ายจะมีการเผาไหม้และเกิดชาร์ตเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณ Exolit AP423 ในสารเคลือบห่วงไฟลดลงเช่นเดียวกับการตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับคราตินทางการค้า โดยผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย AP9KC1 และ AP7KC3 มีความยาวชาร์ต 8 และ 9.5 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย AP9KC1-f และ AP7KC3-f ที่มีความยาวชาร์ต 6 และ 9 เซนติเมตร ตามลำดับ

ลักษณะทางกายภาพของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วยคราตินทางการค้าในสูตรที่ไม่มีสารช่วยฉนิกและสูตรที่มีสารช่วยฉนิก แสดงในรูปที่ 4.84 และ 4.89 ตามลำดับ และลักษณะทางกายภาพของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบคราตินในสูตรที่ไม่มีสารช่วยฉนิก

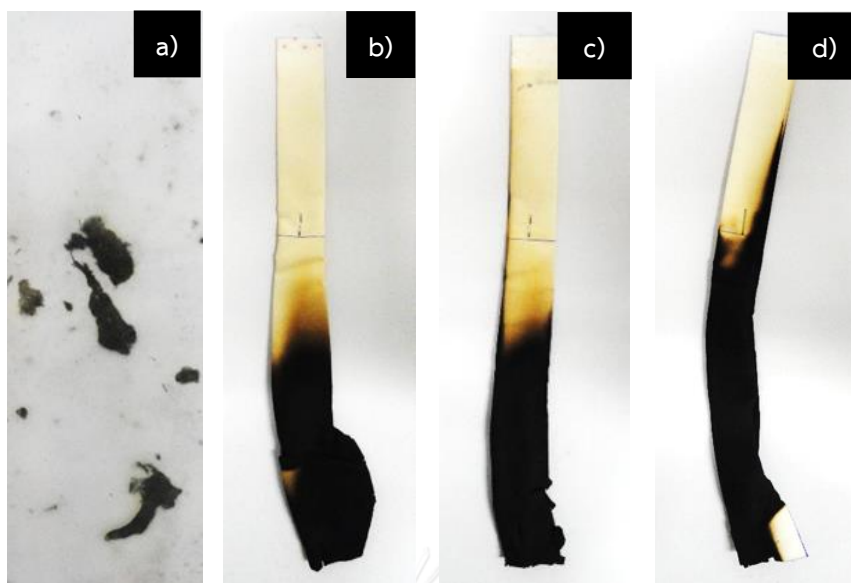
และสูตรที่มีสารช่วยผนึก แสดงในรูปที่ 4.85 และ 4.90 ตามลำดับ พบว่า ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย
 เคราตินจะเผาไหม้และเกิดขี้เถ้าสีดำ โดยขี้เถ้าของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราตินจะมี
 ความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเคราตินเพิ่มขึ้นแสดงว่าสารสกัดหยาบเคราตินสามารถช่วยเพิ่มความ
 คงทนต่อความร้อนของผ้าฝ้ายได้



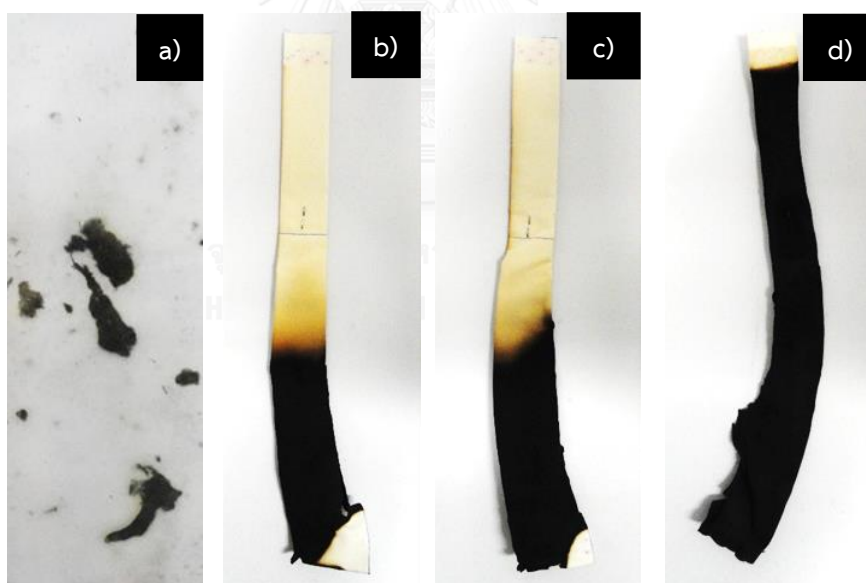
รูปที่ 4.80 ภาพถ่ายของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) ไม่ตกแต่งห่วงไฟ b) ตกแต่งด้วย
 control และ c) ตกแต่งด้วย control-f



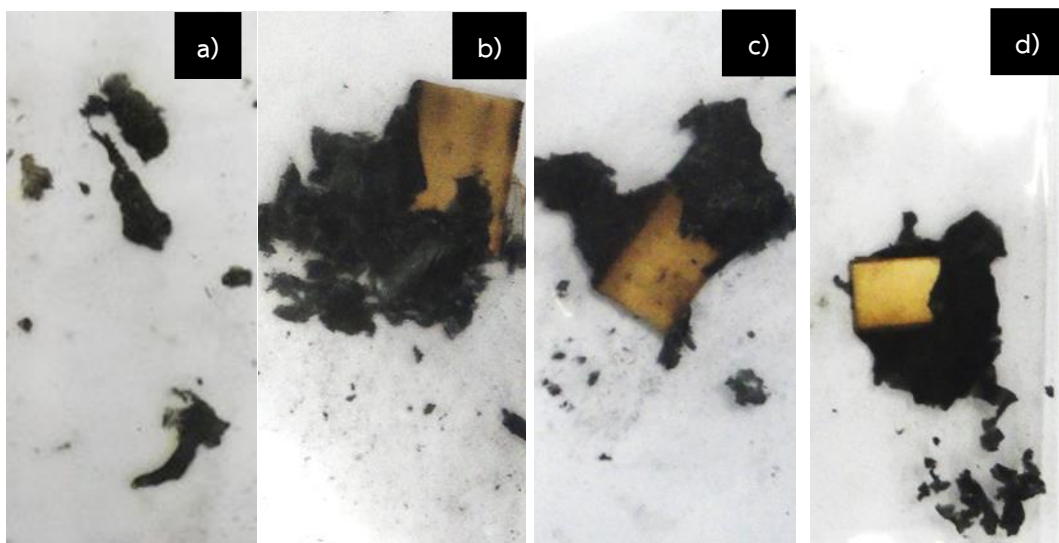
รูปที่ 4.81 ภาพถ่ายของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control และตกแต่งด้วย Exolit
 AP423 ที่ความเข้มข้นต่างๆ สูตรที่ไม่มีสารช่วยผนึก b) AP5 c) AP7 d) AP9 และ
 e) AP10



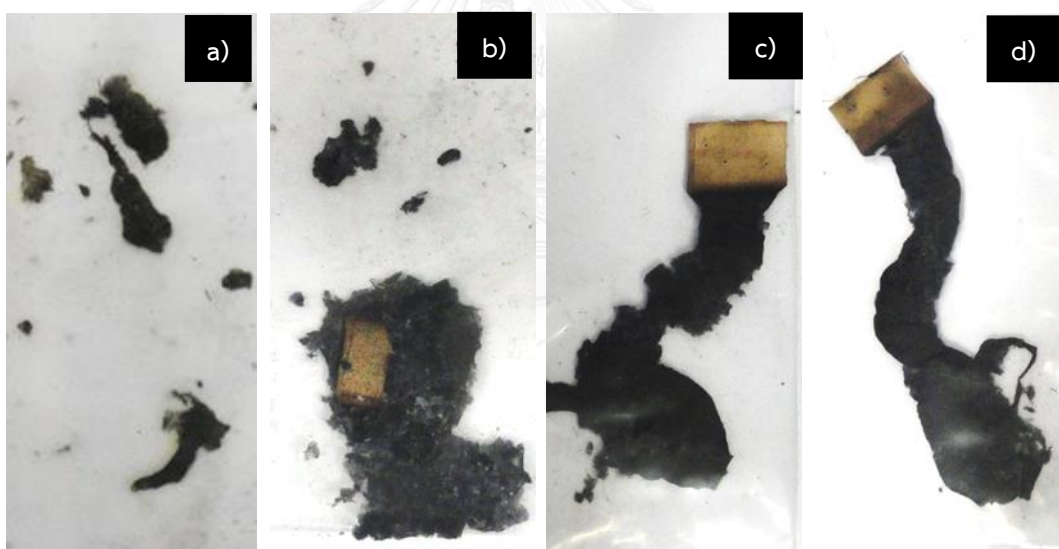
รูปที่ 4.82 ภาพถ่ายของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control และตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับคราตินทางการค้า สูตรที่ไม่มีสารช่วยพ่นิก b) AP9KC1 c) AP7KC3 และ d) AP5KC5



รูปที่ 4.83 ภาพถ่ายของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control และตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบคราติน สูตรที่ไม่มีสารช่วยพ่นิก b) AP9KE1 c) AP7KE3 และ d) AP5KE5



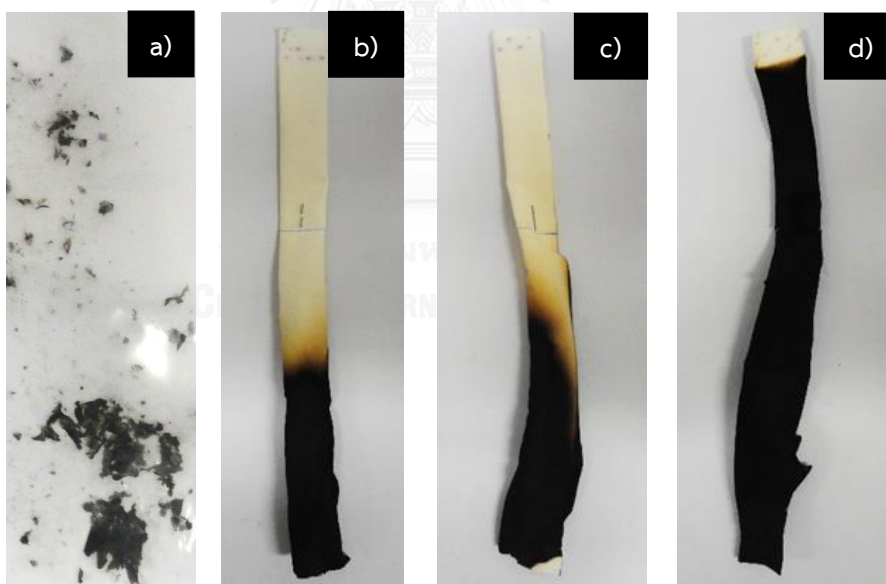
รูปที่ 4.84 ภาพถ่ายของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control และตกแต่งด้วยเซราติน
ทางการค้าที่ความเข้มข้นต่างๆ สูตรที่ไม่มีสารช่วยผนึก b) KC1 c) KC3 และ d) KC5



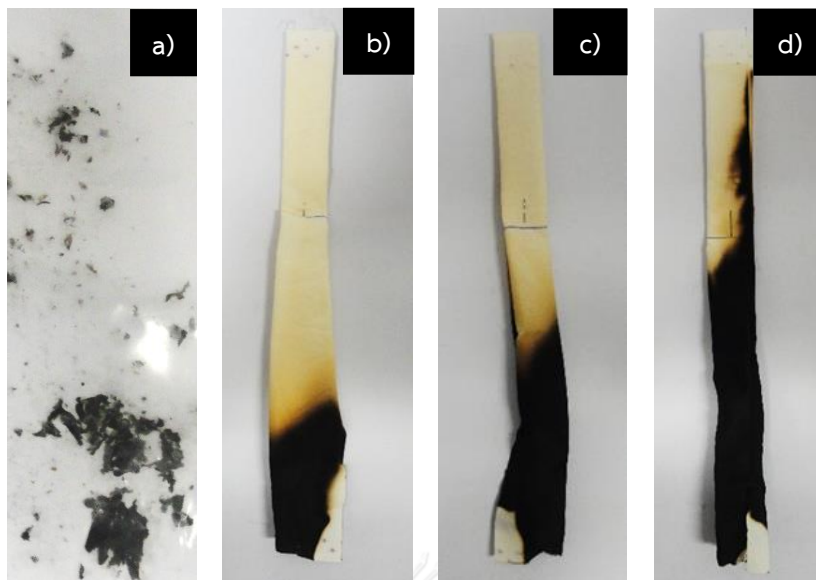
รูปที่ 4.85 ภาพถ่ายของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control และตกแต่งด้วยสารสกัด
หยาดเซราตินที่ความเข้มข้นต่างๆ สูตรที่ไม่มีสารช่วยผนึก b) KE1 c) KE3 และ d) KE5



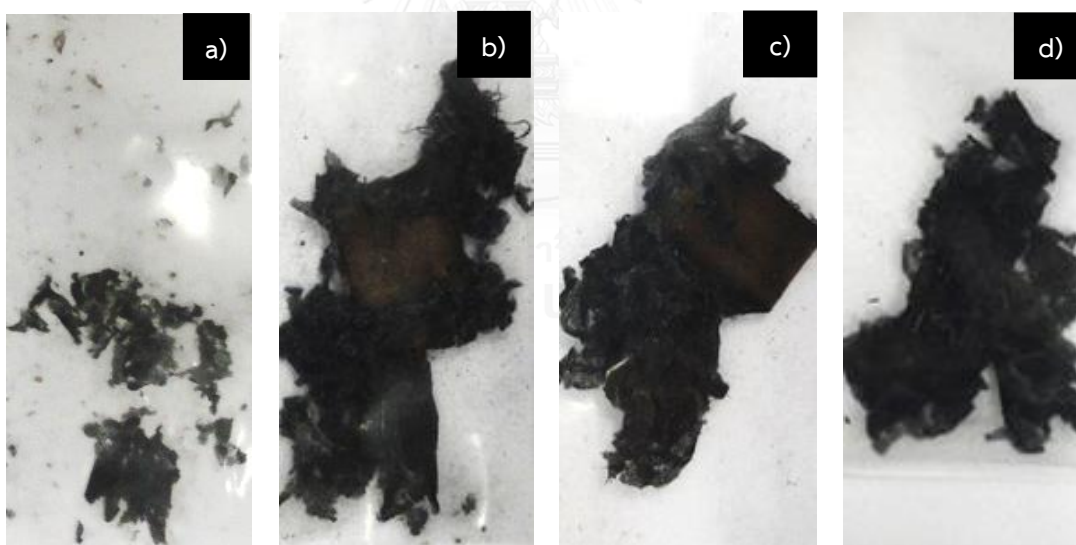
รูปที่ 4.86 ภาพถ่ายของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วย Exolit AP423 ที่ความเข้มข้นต่างๆ สูตรที่มีสารช่วยฟีนิก b) AP5-f c) AP7-f d) AP9-f และ e) AP10-f



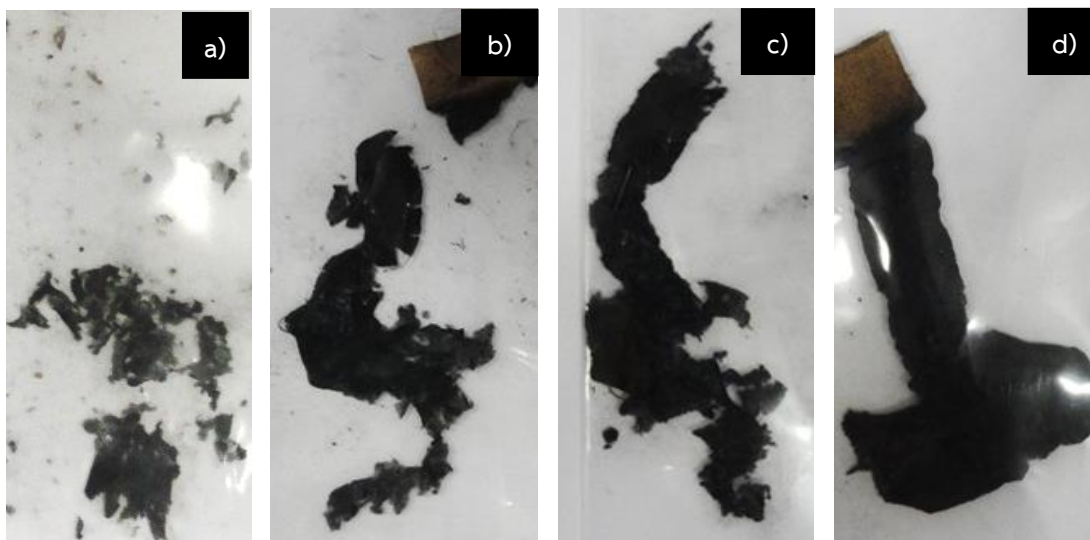
รูปที่ 4.87 ภาพถ่ายของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับคราดินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยฟีนิก b) AP9KC1-f c) AP7KC3-f และ d) AP5KC5-f



รูปที่ 4.88 ภาพถ่ายของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผืนิก b) AP9KE1-f c) AP7KE3-f และ d) AP5KE5-f



รูปที่ 4.89 ภาพถ่ายของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วยเคราตินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยผืนิก b) KC1-f c) KC3-f และ d) KC5-f



รูปที่ 4.90 ภาพถ่ายของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยฉนิก b) KE1-f c) KE3-f และ d) KE5-f

4.2.2.6.3 ค่า LOI ของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ

การทดสอบหาค่า LOI ของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟจะเลือกทดสอบเฉพาะผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน (เคราตินทางการค้า (KC) และสารสกัดหยาบเคราติน (KE)) ในสูตรที่มีสารช่วยฉนิกที่สามารถหน่วงไฟได้ตามมาตรฐาน UL94-VTM เท่านั้น

ค่า LOI ของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า และสารสกัดหยาบเคราตินในสูตรที่มีสารช่วยฉนิก แสดงในตารางที่ 4.18 พบว่าผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟมีค่า LOI เพียง 18.0 ซึ่งเท่ากับผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบควบคุม (control-f) แสดงว่าสารเคลือบควบคุมไม่มีผลต่อการหน่วงไฟของผ้าฝ้าย ในขณะที่ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 เพียงอย่างเดียว ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 (AP10-f) มีค่า LOI เท่ากับ 26.6 ซึ่งก็บ่งชี้ว่ามีความสามารถในการหน่วงไฟที่ดี แต่เมื่อนำผ้าฝ้ายมาตกแต่งด้วย Exolit AP423 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 9, 7 และ 5 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราตินที่ความเข้มข้นร้อยละ 1, 3 และ 5 ตามลำดับ (AP9KE1-f, AP7KE3-f และ AP5KE5-f) พบว่ามีค่า LOI เท่ากับ 34.4, 34.0 และ 30.2 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่สูงทีเดียวบ่งบอกได้ว่าผ้าฝ้ายมีการหน่วงไฟที่ดีมาก ซึ่งให้เห็นว่าสารสกัดหยาบเคราตินมีประสิทธิภาพในการเสริมการหน่วงไฟของ Exolit AP423 ได้ โดยแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (Exolit AP423) [61] สลายตัวแล้วปล่อยแก๊สแอมโมเนียออกมาในขณะที่เคราตินก็สลายตัวแล้วปล่อยแก๊สแอมโมเนียและแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ [15] ซึ่งเป็นแก๊สติดไฟยากออกมาซึ่งจะเจือจางออกซิเจนในอากาศ ทำให้ต้องใช้ออกซิเจนปริมาณมากเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ขึ้น นอกจากนี้ N ในโครงสร้าง

เคราติน จะเสริมให้ Exolit AP423 ที่มี P ในโครงสร้างมีประสิทธิภาพในการเกิดชาร์มากขึ้น (synergistic effect) ดังได้กล่าวในหัวข้อ 4.2.2.5 [55, 59]

อย่างไรก็ตามผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟด้วย Exolit AP423 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 9, 7 และ 5 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราตินที่ความเข้มข้นร้อยละ 1, 3 และ 5 ตามลำดับ (AP9KC1-f, AP7KC3-f และ AP5KC5-f) พบว่ามีค่า LOI เท่ากับ 27.8, 23.7 และ 25.0 ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับค่า LOI ของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 เพียงอย่างเดียว ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 (AP10-f) เท่ากับ 26.6 แสดงว่าเคราตินทางการค้าสามารถเสริมการห่วงไฟของ Exolit AP423 ได้เล็กน้อยเท่านั้น

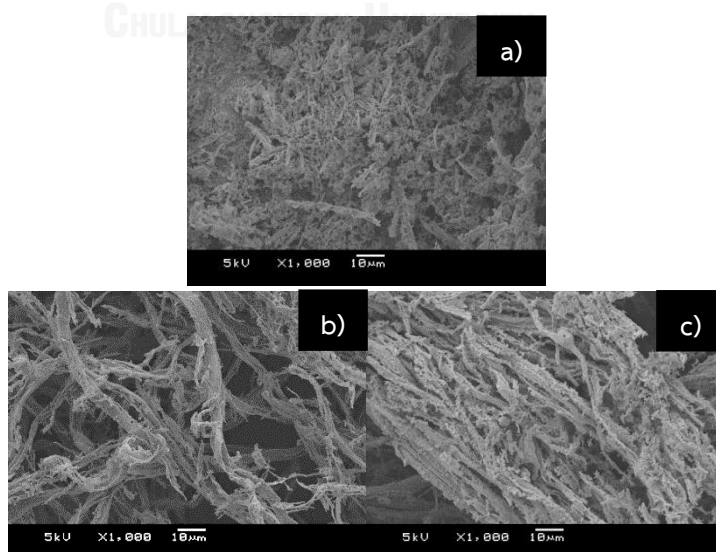
ตารางที่ 4.18 ค่า LOI ของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า (KC) และสารสกัดหยาบเคราติน (KE) สูตรที่มีสารช่วยพนัก ตามมาตรฐาน ASTM D2863-06A

ผ้าฝ้ายที่ตกแต่ง	ค่า LOI
ไม่ตกแต่ง	18.0
control-f	18.0
AP10-f	26.6
AP9KC1-f	27.8
AP7KC3-f	23.7
AP5KC5-f	25.0
AP9KE1-f	34.4
AP7KE3-f	34.0
AP5KE5-f	30.2

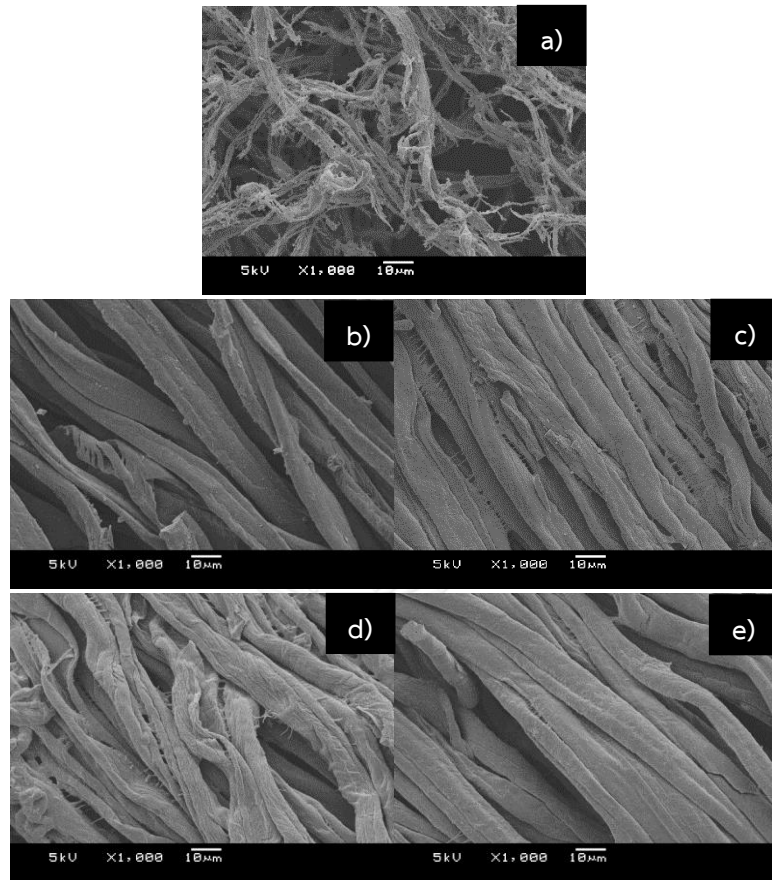
4.2.2.7 ลัทธิฐานวิทยาวิทยาของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟหลังการเผาไหม้ตามมาตรฐาน UL94-VTM

ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ไม่ได้ตกแต่งห่วงไฟและตกแต่งด้วยสารเคลือบควบคุมสูตรที่ไม่มีสารช่วยผืนิก (control) และสูตรที่มีสารช่วยผืนิก (control-f) ที่กำลังขยาย 1000 แสดงในรูปที่ 4.91 พบว่าผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ตกแต่งห่วงไฟจะถูกทำลายหลังการเผาไหม้อย่างรุนแรงจนไม่เหลือลักษณะเส้นใย ในขณะที่ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบควบคุมจะถูกทำลายหลังการเผาไหม้อย่างรุนแรงเช่นกัน แต่ยังสามารถรักษาลักษณะของเส้นใยไว้ได้

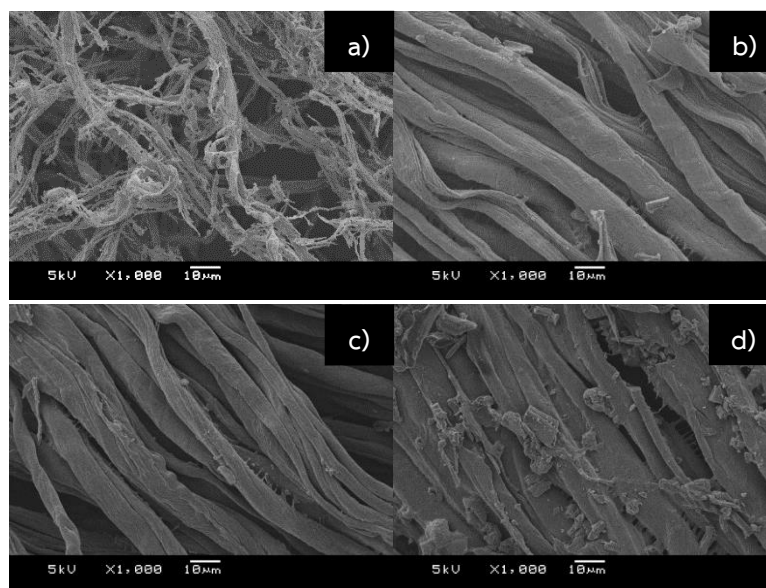
ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 และเคราติน สูตรที่ไม่มีสารช่วยผืนิก ที่มีปริมาณสารห่วงไฟต่างกัน แสดงในรูปที่ 4.92-4.96 และภาพ SEM ของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 และเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผืนิก ที่มีปริมาณสารห่วงไฟต่างกัน แสดงในรูปที่ 4.97-4.101 พบว่า ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ทั้งสูตรที่ไม่มีสารช่วยผืนิกและสูตรที่มีสารช่วยผืนิก สามารถรักษาลักษณะของเส้นใยได้หลังการเผาไหม้ได้มากขึ้น เมื่อปริมาณ Exolit AP423 เพิ่มขึ้น ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้าหลังการเผาไหม้ เส้นใยจะถูกทำลายมากขึ้น เมื่อปริมาณ Exolit AP423 ลดลง ส่วนผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราตินหลังการเผาไหม้จะมีการสร้างชาร์ปคลุมเส้นใย เมื่อปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินเพิ่มขึ้นจะมีชั้นชาร์ปมากขึ้น นอกจากนี้ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยเคราตินหลังการเผาไหม้ เส้นใยจะถูกทำลายอย่างรุนแรง แต่ยังสามารถรักษาลักษณะของเส้นใยไว้ได้ โดยจะมีการแตกออกของเส้นใยเป็นเส้นใยขนาดเล็กเช่นเดียวกับผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบควบคุม



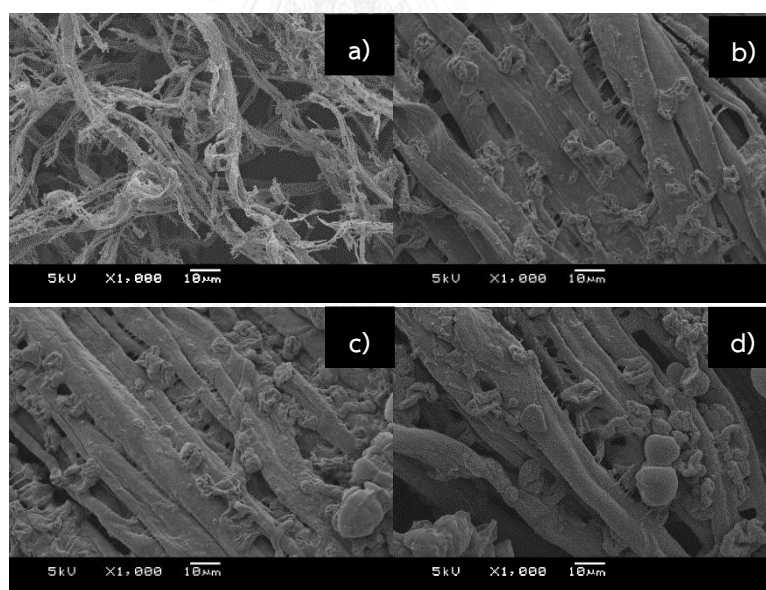
รูปที่ 4.91 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) ไม่ผ่านการตกแต่ง b) control และ c) control-f ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



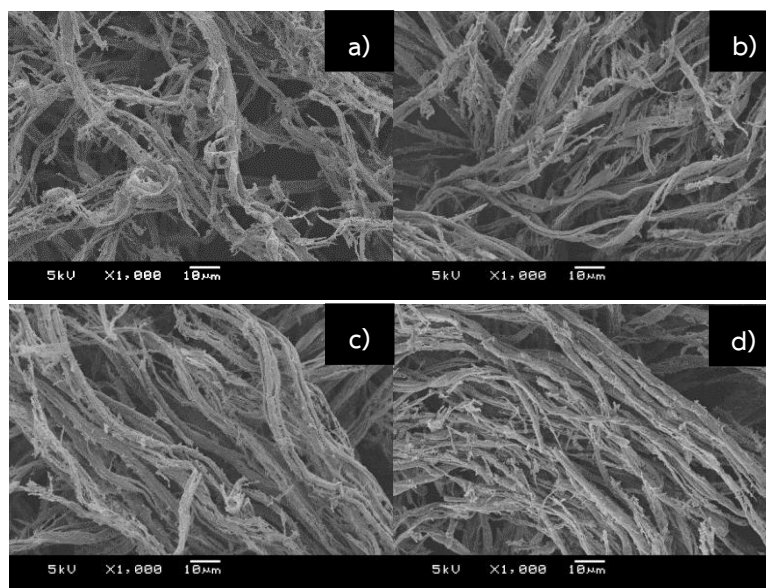
รูปที่ 4.92 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายหลังการเผาไอน้ำที่ตกแต่งด้วย a) control และตกแต่งด้วย Exolit AP423 สูตรที่ไม่มีสารช่วยผนิก b) AP5 c) AP7 d) AP9 และ e) AP10 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



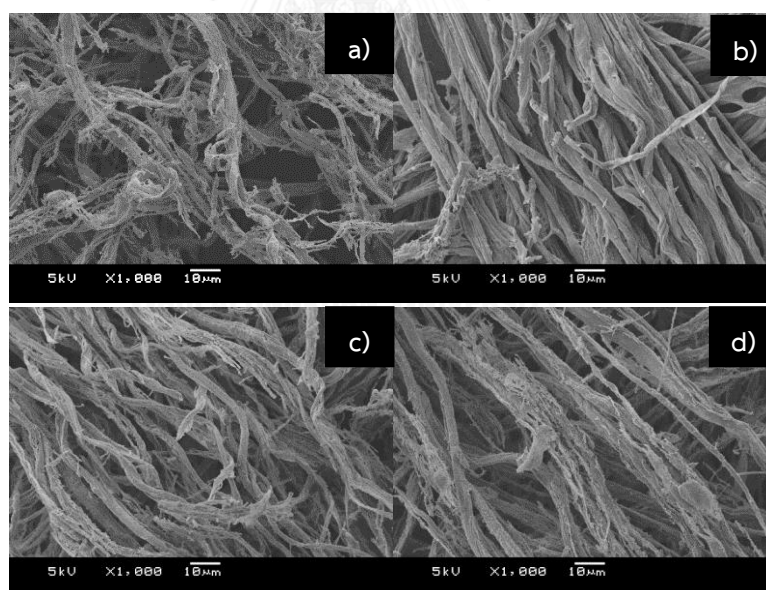
รูปที่ 4.93 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control และตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า สูตรที่ไม่มีสารช่วยพนัก b) AP9KC1 c) AP7KC3 และ d) AP5KC5 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



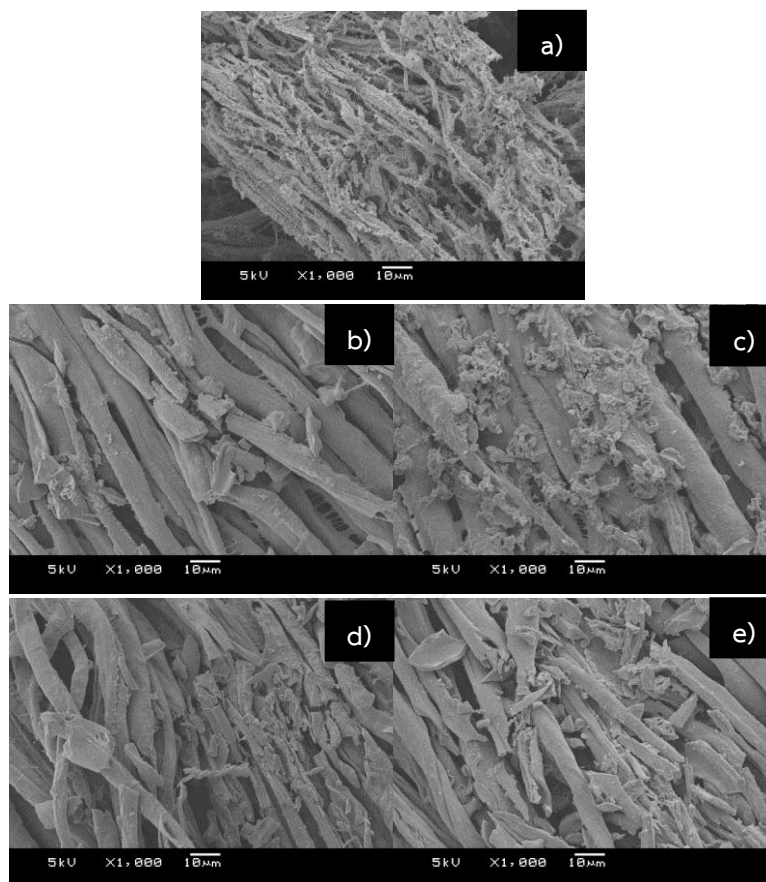
รูปที่ 4.94 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ผ่านการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control และตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่ไม่มีสารช่วยพนัก b) AP9KE1 c) AP7KE3 และ d) AP5KE5 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



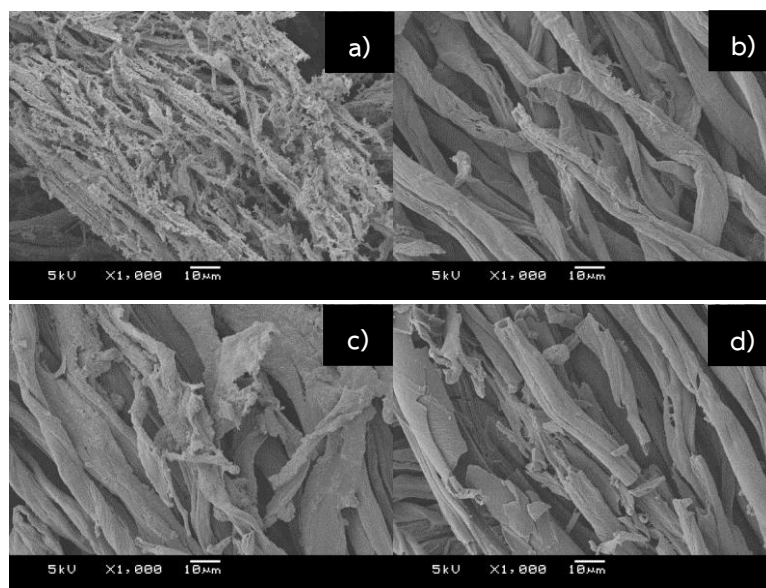
รูปที่ 4.95 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control และตกแต่งด้วยเคราตินทางการค้า สูตรที่ไม่มีสารช่วยผนึก b) KC1 c) KC3 และ d) KC5 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



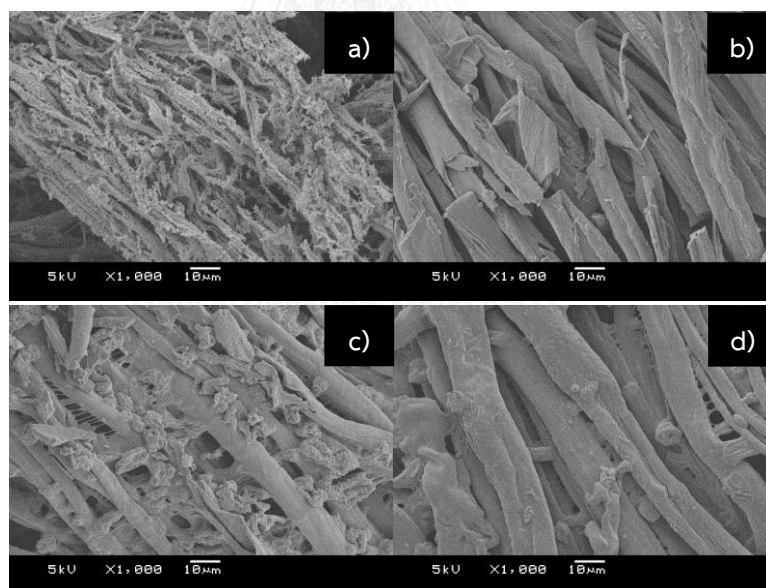
รูปที่ 4.96 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ผ่านการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control และตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่ไม่มีสารช่วยผนึก b) KE1 c) KE3 และ d) KE5 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



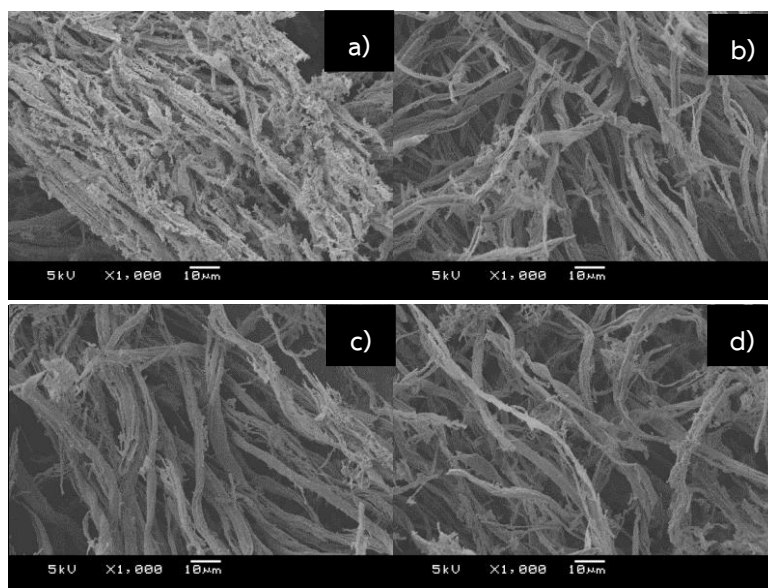
รูปที่ 4.97 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วย Exolit AP423 สูตรที่มีสารช่วยผนึก b) AP5-f c) AP7-f d) AP9-f และ e) AP10-f ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



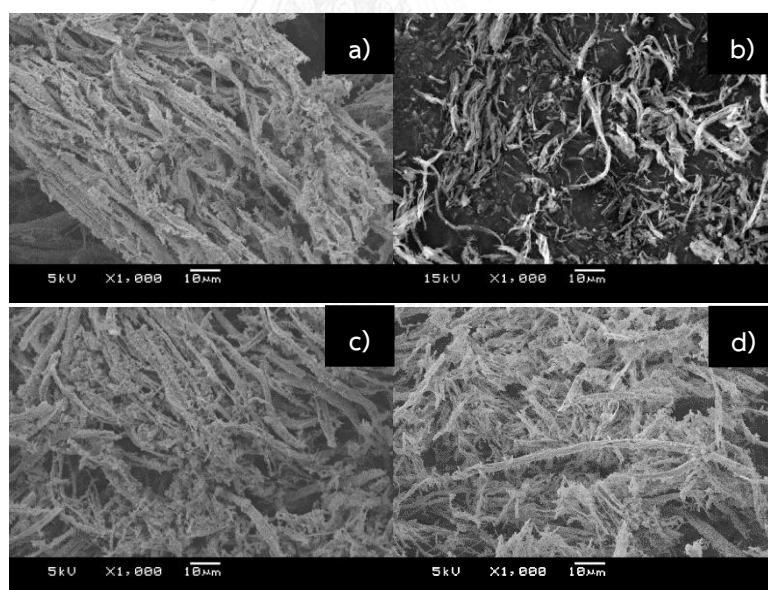
รูปที่ 4.98 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยพนัก b) AP9KC1-f c) AP7KC3-f และ d) AP5KC5-f ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 4.99 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ผ่านการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยพนัก b) AP9KE1-f c) AP7KE3-f และ d) AP5KE5-f ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 4.100 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายหลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วย
 เคราตินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยผนึก b) KC1-f c) KC3-f และ d) KC5-f ที่กำลังขยาย
 1000 เท่า



รูปที่ 4.101 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ผ่านการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วย
 สารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผนึก b) KE1-f c) KE3-f และ d) KE5-f
 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

4.2.2.8 ความทนแรงดึงของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ

การศึกษาความทนแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D5035-06 [66] ของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วย Exolit 423 ร่วมกับเคราติน 2 ชนิด คือ เคราตินทางการค้า (KC) และสารสกัดหยาบเคราติน (KE) สูตรที่มีสารช่วยผนิก เนื่องจากเป็นสูตรสารเคลือบหน่วงไฟที่มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟผ้าฝ้าย โดยสารเคลือบหน่วงไฟที่นำมาตกแต่งบนผ้าฝ้ายจะส่งผลให้ความแข็งแรงของผ้าฝ้ายเปลี่ยนแปลง จึงต้องมีการทดสอบความทนแรงดึงของผ้าฝ้าย เพื่อศึกษาสูตรสารเคลือบหน่วงไฟที่มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟและการใช้งานมากที่สุด

ความทนแรงดึงของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผนิก แสดงในตารางที่ 4.19 พบว่าผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย control-f จะมีค่าความทนแรงดึง ณ จุดขาด (Breaking force) 121.31 นิวตัน ซึ่งน้อยกว่าผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการตกแต่ง (170.65 นิวตัน) แสดงว่าสารเคลือบ control-f ทำให้ผ้าฝ้ายมีความแข็งแรงลดลง โดยผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วย Exolit AP423 จะมีค่าความทนแรงดึง ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ Exolit AP423 เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเคราตินจะมีค่าความทนแรงดึง ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเคราตินเพิ่มขึ้น ส่วนผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินจะมีค่าความทนแรงดึง ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเคราตินเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย AP5KC5-f จะมีค่าความทนแรงดึง ณ จุดขาด 168.99 นิวตัน ซึ่งใกล้เคียงกับผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการตกแต่ง (170.65 นิวตัน) เนื่องจากเคราตินทางการค้าสามารถกระจายตัวในสารเคลือบได้ดี จึงเกิดชั้นสารเคลือบที่บางและสามารถเสริมความแข็งแรงได้ ทำให้ความทนแรงดึงเพิ่มขึ้น ดังนั้นผ้าฝ้ายจะมีความทนแรงดึงลดลงเล็กน้อย เมื่อตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารเคลือบหน่วงไฟ Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน

ตารางที่ 4.19 ความทนแรงดึงของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วย Exolit AP423 ร่วมกับ
เคราติน สูตรที่มีสารช่วยผืนิก ตามมาตรฐาน ASTM D5035-06

ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย	Breaking force (N)	Elongation at break (%)
ไม่ตกแต่ง	170.65	13.22
control-f	121.31	11.95
AP5-f	130.90	12.69
AP7-f	131.50	13.14
AP9-f	153.61	14.23
AP10-f	155.42	13.45
AP9KC1-f	140.81	12.80
AP7KC3-f	160.08	13.93
AP5KC5-f	168.99	13.24
AP9KE1-f	136.24	12.21
AP7KE3-f	144.42	12.30
AP5KE5-f	150.11	12.63
KC1-f	133.10	12.84
KC3-f	133.60	13.21
KC5-f	160.65	14.29
KE1-f	122.79	14.05
KE3-f	131.43	12.93
KE5-f	159.70	13.18

Breaking force คือ แรงดึง ณ จุดขาด (นิวตัน)

Elongation at break คือ ร้อยละการยืดของชิ้นทดสอบที่จุดขาด

4.2.2.9 สภาพแข็งตึงดัดโค้งหรือความแข็งกระด้างของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ

การศึกษาสภาพแข็งตึงดัดโค้งหรือความแข็งกระด้างตามมาตรฐาน BS 2471 [67] ของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วย Exolit 423 ร่วมกับเคราติน 2 ชนิด คือ เคราตินทางการค้า (KC) และสารสกัดหยาบเคราติน (KE) สูตรที่มีสารช่วยผนึก เนื่องจากเป็นสูตรสารเคลือบหน่วงไฟที่มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟผ้าฝ้าย โดยสารเคลือบหน่วงไฟที่นำมาตกแต่งบนผ้าฝ้ายจะส่งผลให้ผ้าฝ้ายมีความกระด้างมากขึ้น จึงต้องมีการทดสอบสภาพแข็งตึงดัดโค้งของผ้าฝ้าย เพื่อศึกษาสูตรสารเคลือบหน่วงไฟที่มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟและการใช้งานมากที่สุด

ความแข็งตึงดัดโค้งของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผนึก แสดงในตารางที่ 4.20 พบว่าผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย control-f จะมีค่าสภาพแข็งตึงดัดโค้ง 12.14 มิลลิกรัม·เซนติเมตร ซึ่งมากกว่าผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการตกแต่ง (9.60 มิลลิกรัม·เซนติเมตร) แสดงว่าสารเคลือบ control-f ทำให้ผ้าฝ้ายมีความกระด้างเพิ่มขึ้น โดยผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วย Exolit AP423 จะมีค่าสภาพแข็งตึงดัดโค้งเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ Exolit AP423 เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเคราตินจะมีค่าสภาพแข็งตึงดัดโค้งเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเคราตินเพิ่มขึ้น แต่การตกแต่งผ้าฝ้ายด้วยสารสกัดหยาบเคราตินจะทำให้ผ้ามีความกระด้างมากกว่าเคราตินทางการค้าเมื่อตกแต่งในปริมาณที่เท่ากัน เนื่องจากสารสกัดหยาบเคราตินเกิดการจับตัวกันทำให้เกิดชั้นสารเคลือบที่หนาผ้าฝ้ายจึงมีความกระด้างมากขึ้น ในขณะที่เคราตินทางการค้าจะสามารถกระจายตัวในสารเคลือบได้ดีกว่าทำให้เกิดชั้นสารเคลือบที่บางกว่าผ้าฝ้ายจึงมีความกระด้างน้อยกว่า ส่วนผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินจะมีค่าสภาพแข็งตึงดัดโค้งเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเคราตินเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่การตกแต่งผ้าฝ้ายด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราตินจะทำให้ผ้ามีความกระด้างมากกว่าการตกแต่งร่วมกับเคราตินทางการค้าเมื่อตกแต่งในปริมาณที่เท่ากันเช่นเดียวกับผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วยเคราติน ดังนั้นผ้าฝ้ายจะมีความกระด้างเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารหน่วงไฟในสารเคลือบ และปริมาณเคราตินในสารเคลือบหน่วงไฟ Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.20 ความแข็งตึงดัดโค้งของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟด้วย Exolit AP423 ร่วมกับ
 เคราติน สูตรที่มีสารช่วยพ่นิก ตามมาตรฐาน BS 2471

ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย	ระยะดัดโค้ง (เซนติเมตร)	ค่าสภาพแข็งตึงดัดโค้ง (มิลลิกรัม·เซนติเมตร)
ไม่ตกแต่ง	1.98	9.60
control-f	2.12	12.14
AP5-f	1.95	10.08
AP7-f	2.02	11.81
AP9-f	2.27	18.05
AP10-f	2.60	27.42
AP9KC1-f	2.32	19.27
AP7KC3-f	2.48	23.43
AP5KC5-f	2.53	24.06
AP9KE1-f	2.28	18.81
AP7KE3-f	2.80	34.25
AP5KE5-f	2.85	33.57
KC1-f	2.20	14.69
KC3-f	2.38	19.49
KC5-f	2.57	25.02
KE1-f	2.63	23.74
KE3-f	2.68	27.24
KE5-f	2.72	30.07

4.2.3 การตกแต่งห่วงไฟด้วยแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตร่วมกับเคราตินบนผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์

การตกแต่งห่วงไฟผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ด้วย Exolit 423 ร่วมกับเคราติน 2 ชนิด คือ เคราตินทางการค้า (KC) และสารสกัดหยาบเคราติน (KE) สูตรที่มีสารช่วยผนึก เนื่องจากเป็นสูตรสารเคลือบห่วงไฟที่มีประสิทธิภาพในการห่วงไฟผ้าฝ้าย จึงต้องการศึกษาประสิทธิภาพการห่วงไฟผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ด้วยสารเคลือบสูตรนี้ โดยจะควบคุมปริมาณสารห่วงไฟร้อยละ 10 เนื่องจากเป็นปริมาณที่น้อยที่สุดของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตที่สามารถห่วงไฟได้จากการทดสอบความสามารถในการห่วงไฟของ Exolit AP423 ตามมาตรฐาน UL94-VTM และให้ค่า VTM-0

4.2.3.1 ลักษณะทางกายภาพของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟ

4.2.3.1.1 สีของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟ

ผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นผ้าที่ทอด้วยเส้นด้ายฝ้ายสลับกับเส้นด้ายพอลิเอสเทอร์เป็นลวดลายในตัว โดยสีของผ้าจะเป็นสีเขียวย่อนเกิดจากเส้นด้ายสีเขียวและขาวทอสลับกัน เมื่อตกแต่งห่วงไฟผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์อาจทำให้สีของผ้าเปลี่ยนได้ จึงต้องมีการวัดสีของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์หลังการตกแต่ง เพื่อศึกษาสูตรสารเคลือบห่วงไฟที่มีประสิทธิภาพในการห่วงไฟและการใช้งานมากที่สุด

สีของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินสูตรที่มีสารช่วยผนึก แสดงในตารางที่ 4.21 พบว่าค่าความแตกต่างของสี (DE^*) ของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบ control-f ($DE^*=0.68$) จะมีค่ามากขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการตกแต่ง ($DE^*=0$) ผ้าจึงมีสีใกล้เคียงกับผ้าที่ไม่ผ่านการตกแต่ง ผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 จะมีค่า DE^* เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณ Exolit AP423 เพิ่มขึ้น โดยผ้าจะมีสีเหลืองลดลงเล็กน้อย เนื่องจากค่า $YI-E313$ ซึ่งเป็นค่าดัชนีความเหลืองมีค่าลดลง ผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยเคราตินทางการค้าจะมีค่า DE^* ลดลง เมื่อปริมาณเคราตินทางการค้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่า $YI-E313$ เพิ่มขึ้น ส่วนผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า เมื่อปริมาณเคราตินทางการค้าเพิ่มขึ้นจะมีสีใกล้เคียงกับผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ไม่ตกแต่งห่วงไฟเช่นกัน ในขณะที่ผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราตินจะมีค่า DE^* เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินเพิ่มขึ้น จะมีสีที่เข้มขึ้นจนเป็นสีน้ำตาล เนื่องจากค่า $+L^*$ ซึ่งเป็นค่าแสดงความสว่างของสีมีค่าลดลงเล็กน้อย และค่า $YI-E313$ เพิ่มขึ้นมาก เมื่อปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินเพิ่มขึ้น ส่วนผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราติน เมื่อปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินเพิ่มขึ้นจะมีสีที่เข้มขึ้นจนเป็นสีน้ำตาลเช่นกัน

ตารางที่ 4.21 สีของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ (T/C) ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผืน

ผ้า T/C ที่ตกแต่ง	L*	a*	b*	DE*	WI-CIE	YI-E313
ไม่ตกแต่ง	78.59	-1.69	14.88	0	N/A	29.26
control-f	78.82	-1.82	14.68	0.68	N/A	28.70
AP5-f	79.00	-1.94	14.84	0.70	N/A	28.84
AP7-f	79.83	-1.95	14.10	1.71	N/A	27.24
AP9-f	80.09	-1.86	14.41	1.75	N/A	27.82
AP10-f	81.04	-1.82	13.57	2.97	N/A	26.05
AP9KC1-f	80.45	-1.85	14.09	2.21	N/A	27.14
AP7KC3-f	80.03	-1.74	14.35	1.71	N/A	27.83
AP5KC5-f	78.77	-1.84	14.98	0.40	N/A	29.25
KC1-f	78.61	-1.86	14.86	0.57	N/A	29.06
KC3-f	78.60	-1.77	15.06	0.47	N/A	29.52
KC5-f	78.65	-1.76	15.11	0.32	N/A	29.61
AP9KE1-f	80.68	-1.58	14.04	2.43	N/A	27.23
AP7KE3-f	79.40	-0.85	14.87	1.41	N/A	29.77
AP5KE5-f	76.27	0.21	17.01	3.48	N/A	35.69
KE1-f	78.38	-1.48	14.75	0.58	N/A	29.26
KE3-f	77.39	-1.05	15.81	1.46	N/A	31.93
KE5-f	75.68	-0.09	17.03	3.76	N/A	35.65

L* คือ ค่าความสว่าง โดยค่า +L* แสดงถึงสีขาว จนไปถึง -L* แสดงถึงสีดำ จาก CIE Lab

a* คือ สีจากเขียว (-a*) ไปจนถึงแดง (+a*) จาก CIE Lab

b* คือ สีจากน้ำเงิน (-b*) ไปเหลือง (+b*) จาก CIE Lab

DE* คือ ค่าความแตกต่างของสี จาก CIE Lab

WI-CIE คือ ค่าดัชนีความขาว (CIE whiteness index)

YI-E313 คือ ค่าดัชนีความเหลือง (Yellowness index, ASTM Method E313)

4.2.3.1.2 ความหนาของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ

ผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นผ้าที่ทอด้วยเส้นด้ายฝ้ายสลับกับเส้นด้ายพอลิเอสเตอร์เป็นลวดลายในตัว มีสีเขียวยอ่อนเกิดจากเส้นด้ายสีเขียวและขาวทอสลับกัน และมีความหนาประมาณ 0.46 มิลลิเมตร เมื่อตกแต่งหน่วงไฟผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์อาจทำให้ความหนาของผ้าเพิ่มขึ้นซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความกระด้างและลักษณะทางกายภาพอื่น ๆ จึงต้องมีการวัดความหนาของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์หลังการตกแต่ง เพื่อศึกษาสูตรสารเคลือบหน่วงไฟที่มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟและการใช้งานมากที่สุด

ความหนาของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน สูตรที่มีสารช่วยฉีก แสดงในตารางที่ 4.22 พบว่าเมื่อตกแต่งหน่วงไฟผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ด้วยสารเคลือบหน่วงไฟสูตรที่มีสารช่วยฉีกจะทำให้ผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์มีความหนาประมาณ 0.54 มิลลิเมตร ซึ่งมีความหนาเพิ่มขึ้นจากผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ได้ตกแต่งหน่วงไฟร้อยละ 17.39 โดยความหนาของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อปริมาณสารหน่วงไฟเพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณเคราตินในสารเคลือบหน่วงไฟ Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินเพิ่มขึ้น

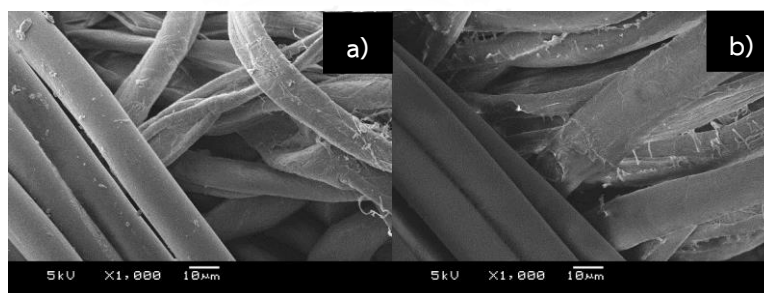
ตารางที่ 4.22 ความหนาของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผนึก

ผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ ที่ตกแต่งด้วย	%add on	ความหนา (mm.)
ไม่ตกแต่ง	0	0.46
control-f	1.47	0.53
AP5-f	5.82	0.53
AP7-f	6.41	0.53
AP9-f	7.33	0.54
AP10-f	7.98	0.56
AP9KC1-f	8.62	0.54
AP7KC3-f	8.06	0.53
AP5KC5-f	8.01	0.53
AP9KE1-f	8.93	0.55
AP7KE3-f	8.53	0.55
AP5KE5-f	8.61	0.57
KC1-f	2.83	0.51
KC3-f	3.50	0.52
KC5-f	4.03	0.53
KE1-f	2.64	0.55
KE3-f	3.07	0.55
KE5-f	3.64	0.55

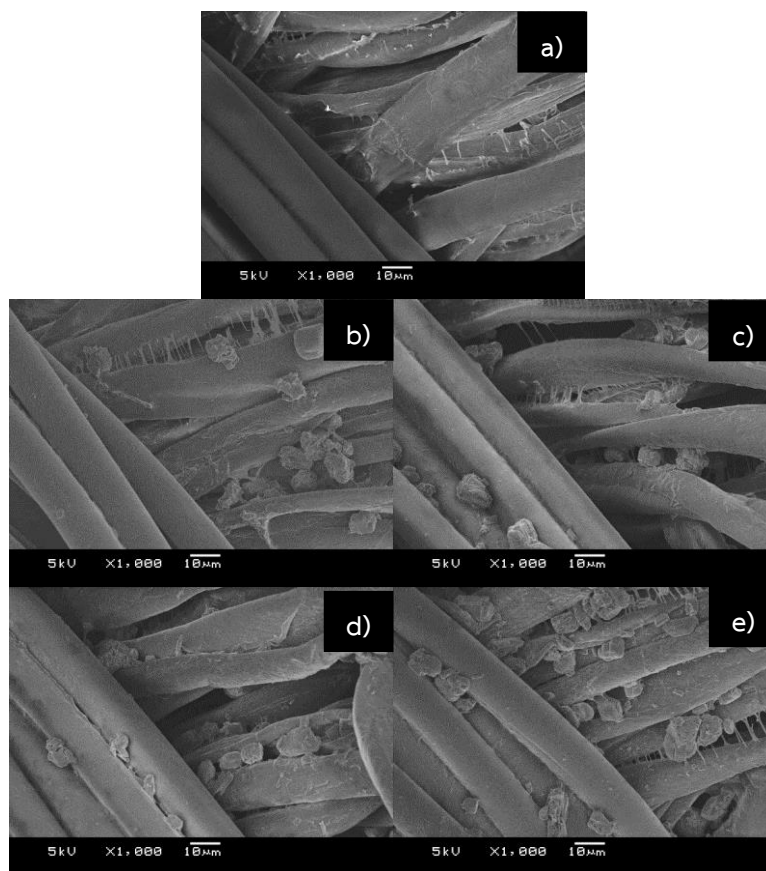
4.2.3.2 ลัทธิฐานวิทยาวิทยาของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ

ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ก่อนและหลังตกแต่งด้วยสารเคลือบควบคุมสูตรที่มีสารช่วยฉีก (control-f) ที่กำลังขยาย 1000 แสดงในรูปที่ 4.102 พบว่าผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์จะมีลักษณะเส้นใย 2 ชนิด คือ เส้นใยฝ้ายมีลักษณะแบน ผิวไม่เรียบ และมีการบิดเกลียว ส่วนเส้นใยพอลิเอสเทอร์มีลักษณะผิวเรียบสม่ำเสมอ ผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วย control-f จะมีสารเคลือบบนเส้นใยและมีการยึดออกของสารเคลือบเพื่อยึดระหว่างเส้นใย โดยเฉพาะบนส่วนที่เป็นเส้นใยฝ้าย แสดงว่าสารเคลือบสามารถเคลือบบนเส้นใยฝ้ายได้ดีกว่าเส้นใยพอลิเอสเทอร์

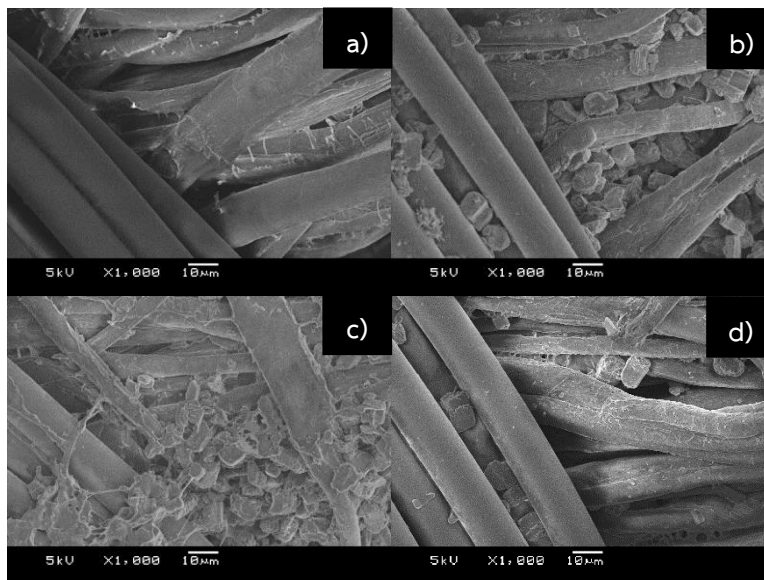
ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 และเคราติน สูตรที่มีสารช่วยฉีก ที่มีปริมาณสารหน่วงไฟต่างกัน แสดงในรูปที่ 4.103-4.107 พบว่า อนุภาคของ Exolit AP423 มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก โดยอนุภาคของ Exolit AP423 จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ Exolit AP423 ในสารหน่วงไฟเพิ่มขึ้น ส่วนเคราตินทางการค้าจะสามารถกระจายตัวได้ดีในสารเคลือบ เนื่องจากเคราตินทางการค้าสามารถละลายน้ำได้ (Hydrolyzed keratin) จึงมีลักษณะของสารเคลือบบนผิวของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์บาง ๆ เมื่อปริมาณเคราตินทางการค้าเพิ่มขึ้น สารเคลือบบนผิวของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์จะมองเห็นได้ชัดเจนขึ้น ในขณะที่สารสกัดหยาบเคราตินจะมีการจับตัวกันเป็นก้อนและกระจายตัวได้น้อยในสารเคลือบ เนื่องจากอนุภาคของสารสกัดหยาบเกิดการเชื่อมขวางของพันธะไดซัลไฟด์อีกครั้งหลังการสกัด (re-crosslink) จึงไม่ละลายน้ำ เมื่อปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินเพิ่มขึ้น การจับตัวเป็นก้อนของสารสกัดหยาบเคราตินจะเพิ่มขึ้น



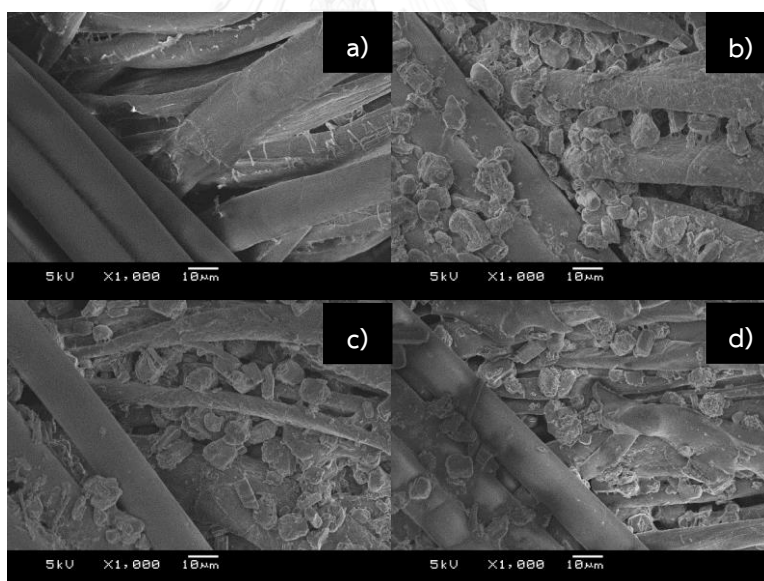
รูปที่ 4.102 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วย a) ไม่ผ่านการตกแต่ง และ b) control-f ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



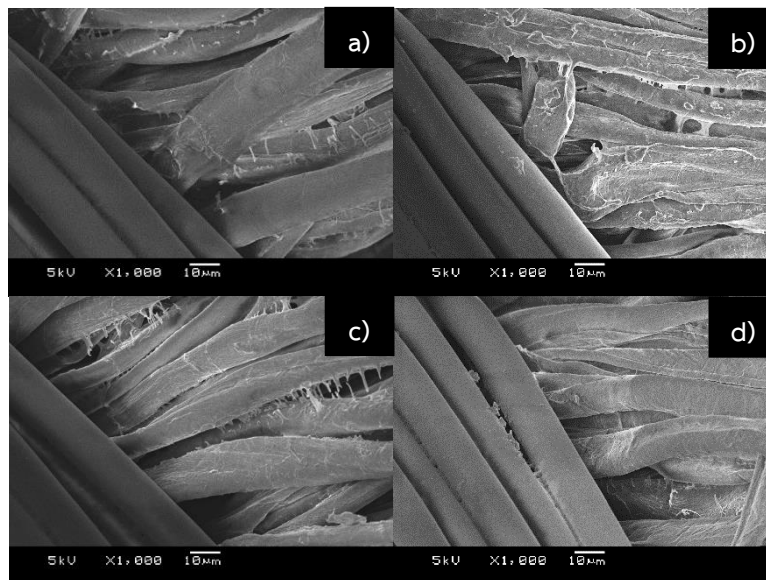
รูปที่ 4.103 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วย Exolit AP423 สูตรที่มีสารช่วยพ่น b) AP5-f c) AP7-f d) AP9-f และ e) AP10-f ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



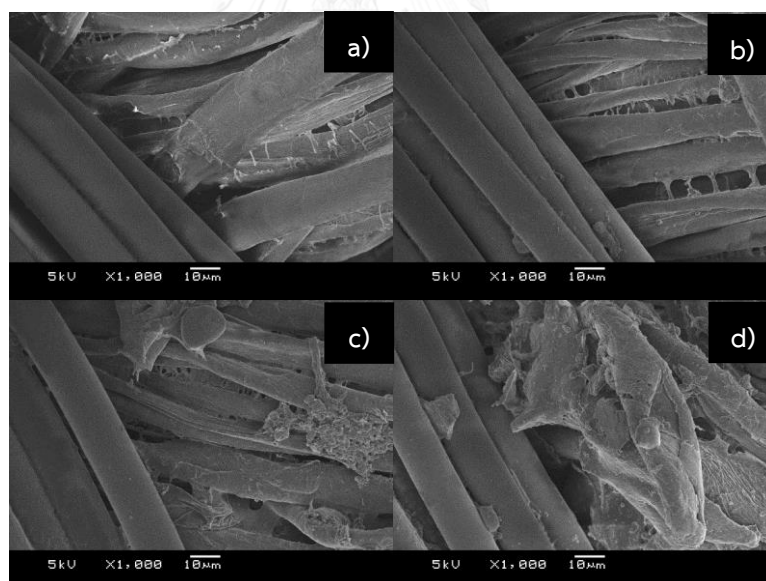
รูปที่ 4.104 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคลือบดินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยผนึก b) AP9KC1-f c) AP7KC3-f และ e) AP5KC5-f ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 4.105 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคลือบดิน สูตรที่มีสารช่วยผนึก b) AP9KE1-f c) AP7KE3-f และ d) AP5KE5-f ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 4.106 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วย
 เคราตินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยพนิก b) KC1-f c) KC3-f และ d) KC5-f ที่กำลังขยาย
 1000 เท่า



รูปที่ 4.107 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วย
 สารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยพนิก b) KE1-f c) KE3-f และ d) KE5-f
 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

4.2.3.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ที่ความเข้มข้นต่างกัน สูตรที่มีสารช่วยผืนิก แสดงในรูปที่ 4.108 พบว่า FT-IR สเปกตรัมของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบควบคุมสูตรที่มีสารช่วยผืนิก (control-f) แสดงหมู่ฟังก์ชันที่แสดงลักษณะทางเคมีของผ้าฝ้าย คือ O-H ($3550-3100\text{ cm}^{-1}$), $-\text{CH}_2$ ($2980-2800\text{ cm}^{-1}$), C-H (1429 cm^{-1}), C-O-C (1160 cm^{-1}) และ C-O (1030 cm^{-1}) [71] และหมู่ฟังก์ชันที่แสดงลักษณะทางเคมีของผ้าพอลิเอสเทอร์ คือ C=O (1730 cm^{-1}), C-O-C (1160 cm^{-1}) และ C-O (1030 cm^{-1}) [72] โดยการเคลือบสารเคลือบควบคุมสูตรที่มีสารช่วยผืนิกลงบนผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ไม่ทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันใหม่ขึ้นบนผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ โดยผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ความเข้มข้นต่างกัน แสดงหมู่ฟังก์ชันที่แสดงลักษณะทางเคมีของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต คือ P=O (1256 cm^{-1}) และ P-O-P (800 cm^{-1}) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกับหมู่ฟังก์ชันของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตในงานวิจัยของ Wang และคณะ [69] โดยความเข้มของพีค P=O และ P-O-P จะเพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณ Exolit AP423 ในสูตรสารหน่วงไฟเพิ่มขึ้น และความเข้มของพีค O-H ($3550-3100\text{ cm}^{-1}$) และ C=O (1730 cm^{-1}) จะลดลง เนื่องจากเกิดการเชื่อมขวางกันของ Exolit AP423 กับผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์

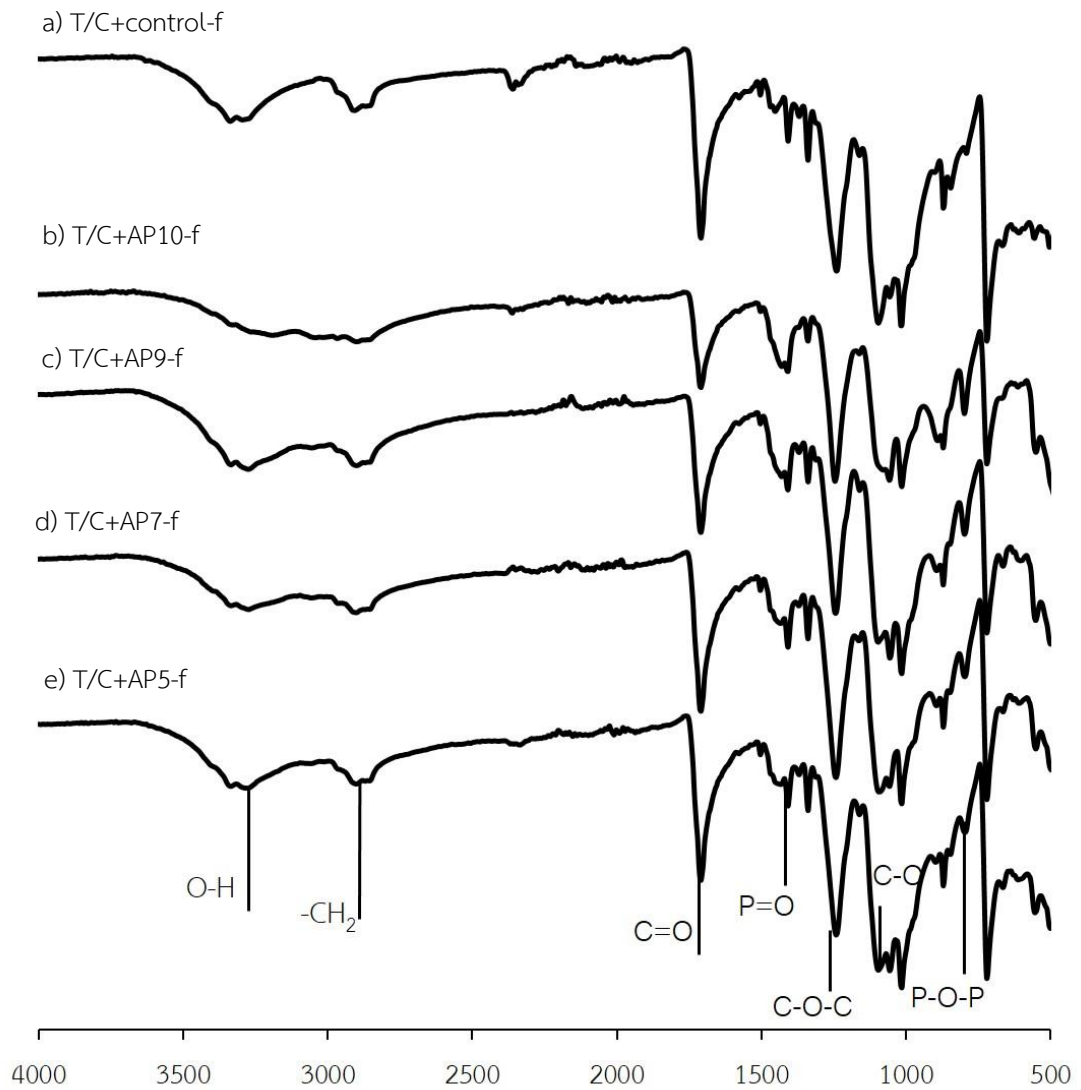
ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยเคราตินทางการค้า (KC) ที่ความเข้มข้นต่างกัน สูตรที่มีสารช่วยผืนิก แสดงในรูปที่ 4.109 พบว่า FT-IR สเปกตรัมของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยเคราตินทางการค้าที่ความเข้มข้นต่างกัน แสดงหมู่ฟังก์ชันที่แสดงลักษณะทางเคมีของเคราติน คือ เอไมด์ปฐมภูมิ (primary amide, $\text{RC}(\text{O})\text{NH}_2$) (1635 cm^{-1}) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกับหมู่ฟังก์ชันของเคราตินจากขนสัตว์ในงานวิจัยของ Xu และคณะ [68] โดยความเข้มของพีคเอไมด์ปฐมภูมิจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณเคราตินทางการค้าในสูตรสารหน่วงไฟเพิ่มขึ้น

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราติน (KE) ที่ความเข้มข้นต่างกัน สูตรที่มีสารช่วยผืนิก แสดงในรูปที่ 4.110 พบว่า FT-IR สเปกตรัมของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราตินที่ความเข้มข้นต่างกันแสดงหมู่ฟังก์ชันที่แสดงลักษณะทางเคมีของเคราติน คือ เอไมด์ปฐมภูมิ ($\text{RC}(\text{O})\text{NH}_2$) (1635 cm^{-1}) และเอไมด์ทุติยภูมิ ($\text{RC}(\text{O})\text{NHR}'$) (1525 cm^{-1}) [68] โดยความเข้มของพีคเอไมด์ปฐมภูมิ และเอไมด์ทุติยภูมิจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินในสูตรสารเคลือบหน่วงไฟเพิ่มขึ้น

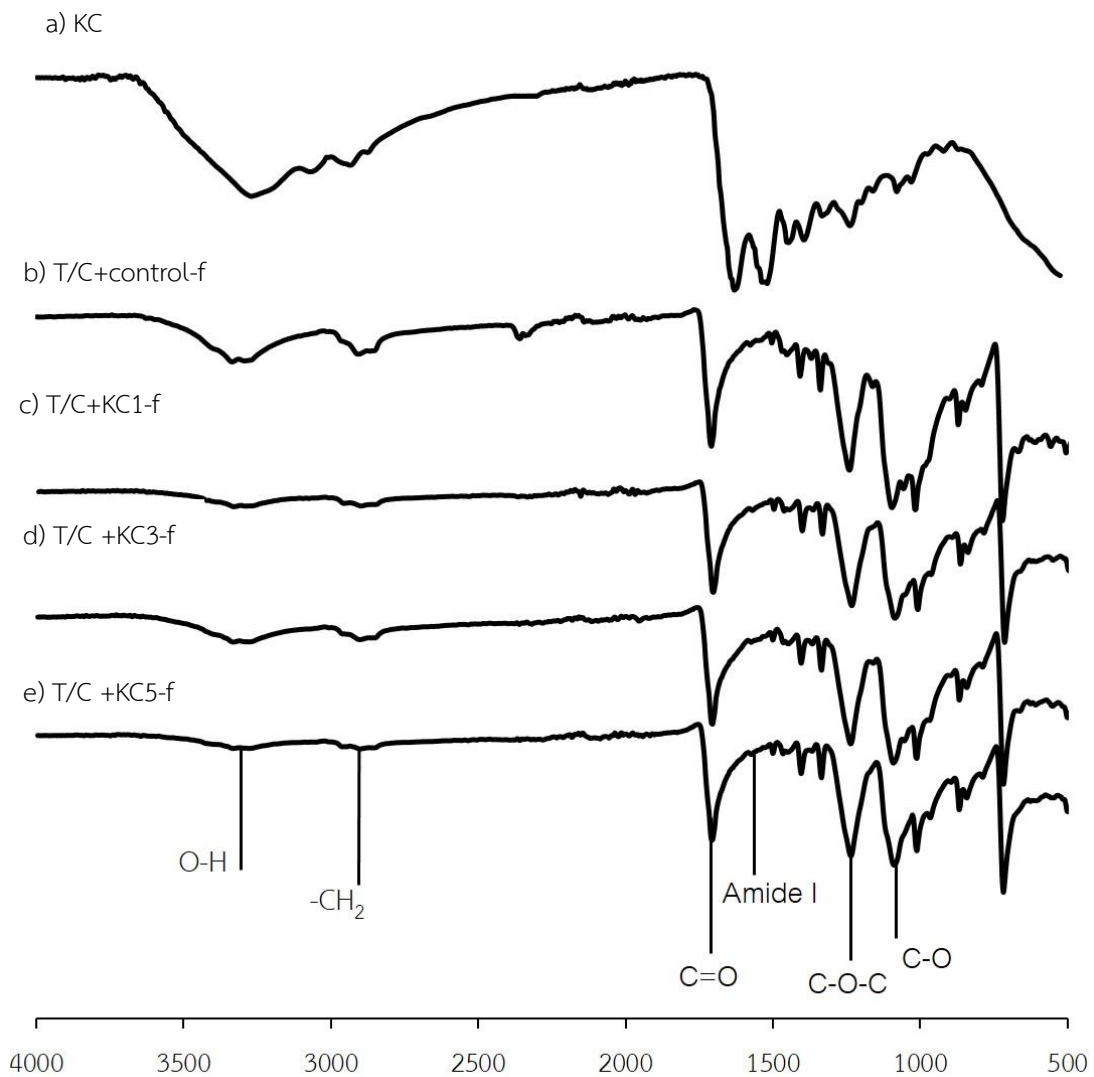
ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินที่ความเข้มข้นต่างกัน สูตรที่มีสารช่วยผืนิก แสดงในรูปที่ 4.111 และ 4.112 พบว่า FT-IR สเปกตรัมของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน (เคราติน

ทางการค้า (KC) และสารสกัดหยาบเคราติน (KE) ที่ความเข้มข้นต่างกันจะแสดงหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกัน คือ เอไมด์ปฐมภูมิ (RC(O)NH_2) (1635 cm^{-1}) [68] ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่แสดงลักษณะทางเคมีของเคราติน และหมู่ฟังก์ชันที่แสดงลักษณะทางเคมีของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต คือ P=O (1256 cm^{-1}) และ P-O-P (800 cm^{-1}) [72] แต่ผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราตินจะแสดงหมู่ฟังก์ชันที่แสดงลักษณะทางเคมีของเคราตินเพิ่มขึ้นมา คือ เอไมด์ทุติยภูมิ ($\text{RC(O)NHR}'$) (1525 cm^{-1}) [68] โดยความเข้มของพีค P=O และ P-O-P จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณ Exolit AP423 ในสูตรสารหน่วงไฟเพิ่มขึ้น และความเข้มของพีคเอไมด์ปฐมภูมิ และเอไมด์ทุติยภูมิจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีเคราตินในสูตรสารหน่วงไฟเพิ่มขึ้น โดยสารสกัดหยาบเคราตินจะแสดงความเข้มของพีคเอไมด์ปฐมภูมิ และเอไมด์ทุติยภูมิมากกว่าเคราตินทางการค้า เนื่องจากสารสกัดหยาบเคราตินเกิดการจับตัวเป็นก้อนบนผิวของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ทำให้สามารถตรวจเจอหมู่ฟังก์ชันได้มากกว่าเคราตินทางการค้า ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ทำให้กระจายตัวบนผิวผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ได้ดีกว่า

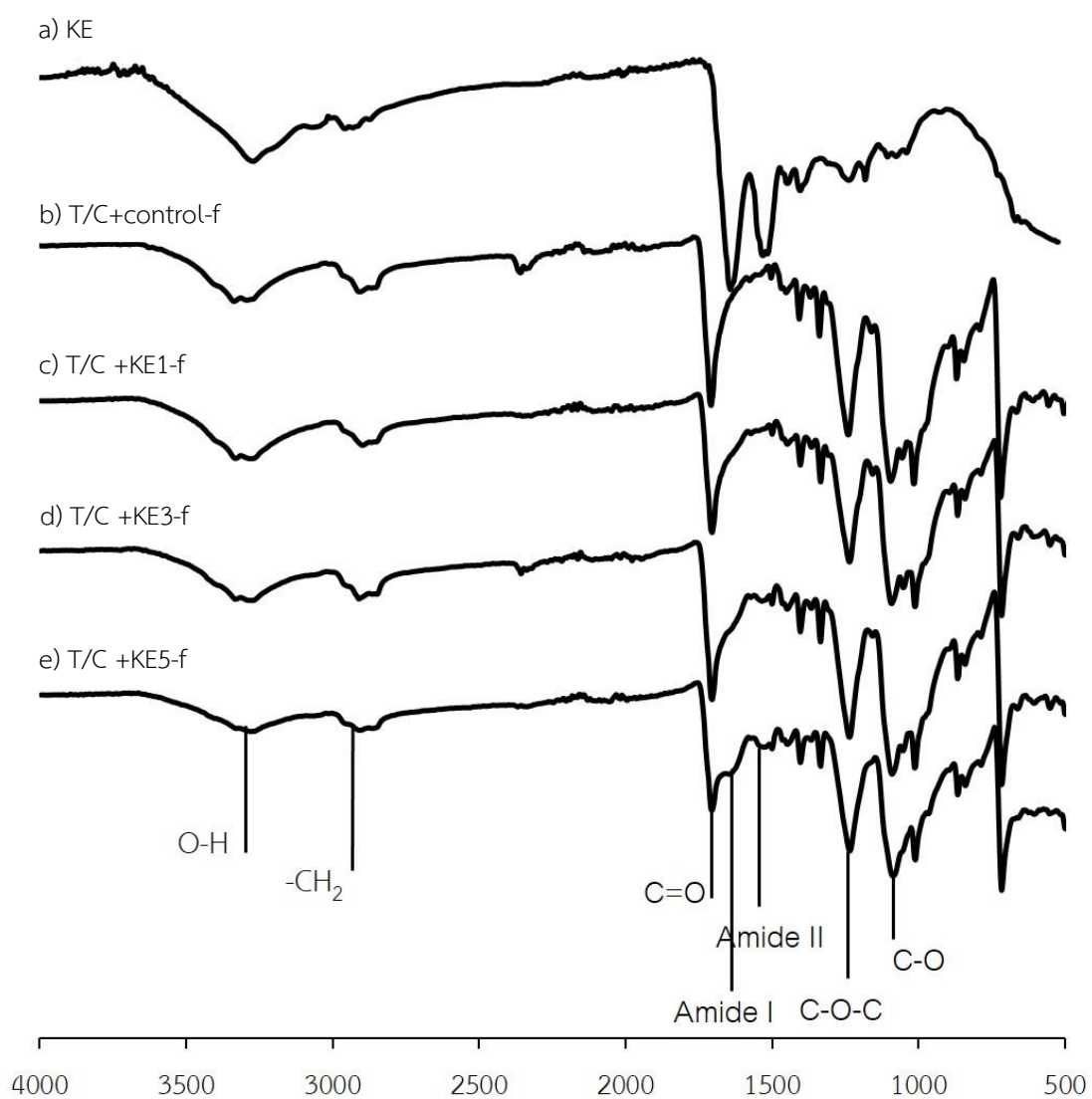




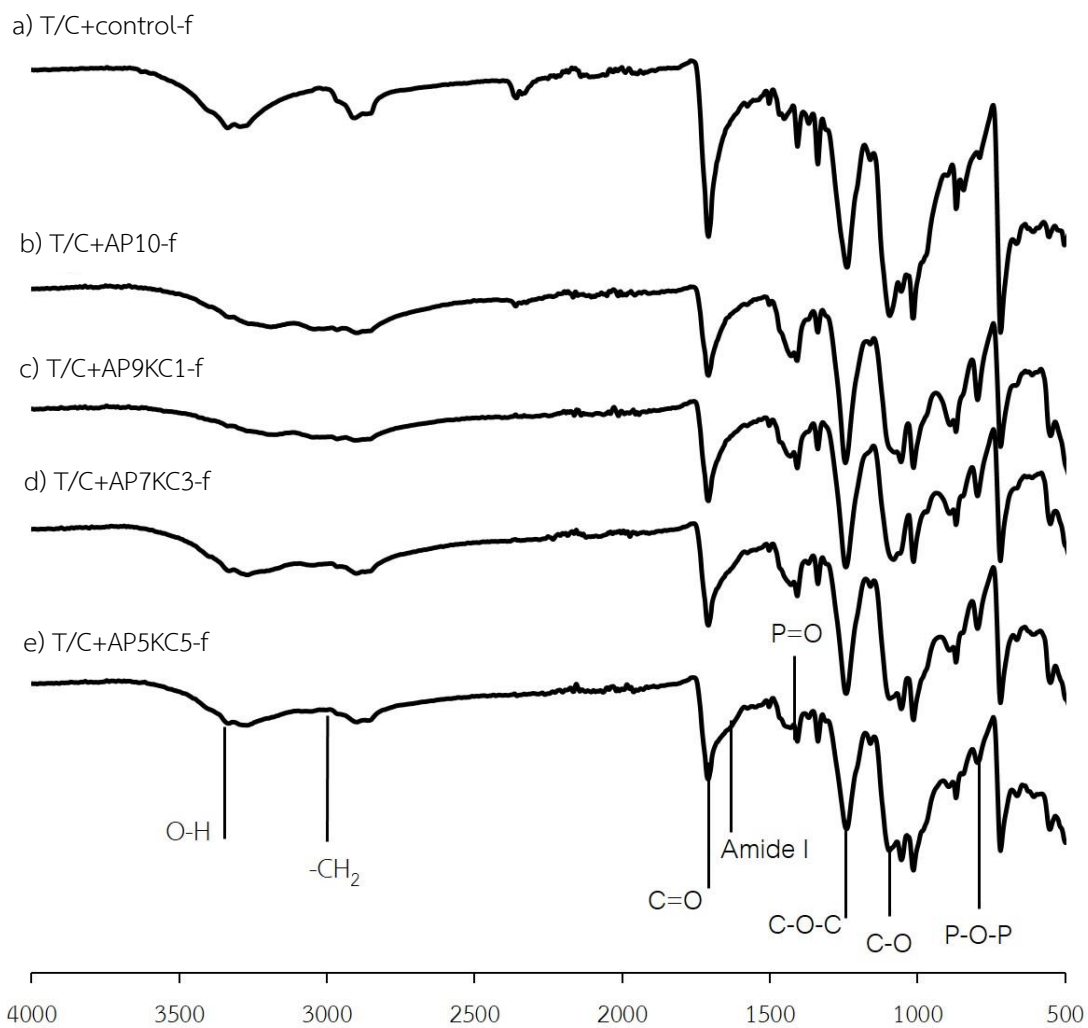
รูปที่ 4.108 FT-IR สเปกตรัมของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ (T/C) ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วย Exolit AP423 ที่ความเข้มข้นต่างกัน สูตรที่มีสารช่วยย้อม b) AP10-f c) AP9-f d) AP7-f และ e) AP5-f



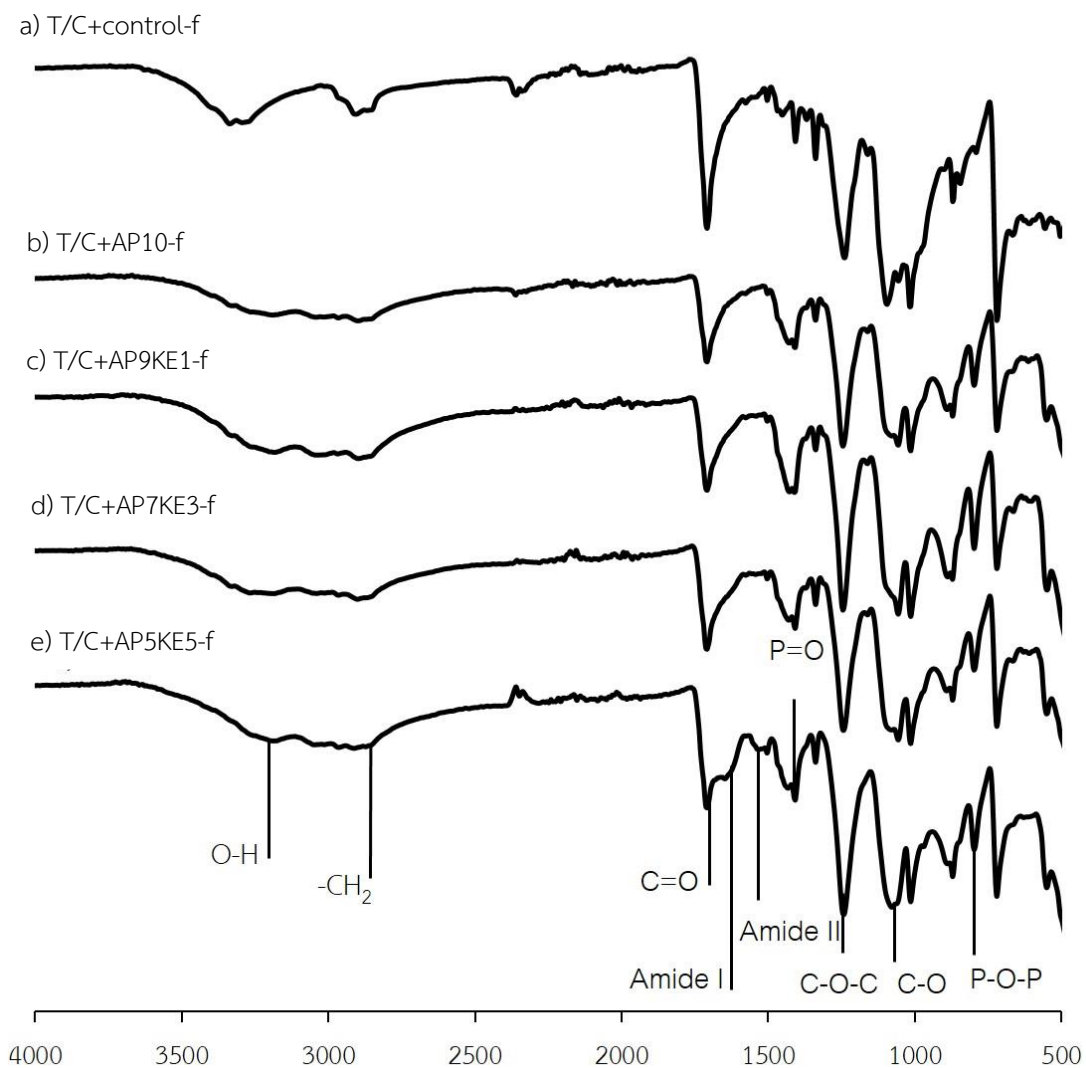
รูปที่ 4.109 FT-IR สเปกตรัมของ a) เคราตินทางการค้า (KC) ผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ (T/C) ที่ ตกแต่งด้วย b) control-f และตกแต่งด้วยเคราตินทางการค้า (KC) ที่ความเข้มข้น ต่างกัน สูตรที่มีสารช่วยพริก c) KC1-f d) KC3-f และ e) KC5-f



รูปที่ 4.110 FT-IR สเปกตรัมของ a) สารสกัดหยาบเคราติน (KE) ผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ (T/C) ที่ ตกแต่งด้วย b) control-f และตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราติน (KE) ที่ความเข้มข้น ต่างกัน สูตรที่มีสารช่วยพนัก c) KE1-f d) KE3-f และ e) KE5-f



รูปที่ 4.111 FT-IR สเปกตรัมของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ (T/C) ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และ ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า (KC) สูตรต่าง ๆ สูตรที่มีสารช่วย ผนัง b) AP10-f c) AP9KC1-f d) AP7KC3-f และ e) AP5KC5-f



รูปที่ 4.112 FT-IR สเปกตรัมของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ (T/C) ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และ ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาดเขราตินทาง (KE) สูตรต่าง ๆ สูตรที่มี สารช่วยย่น b) AP10-f c) AP9KE1-f d) AP7KE3-f และ e) AP5KE5-f

4.2.3.4 ความสามารถในการหน่วงไฟของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผืนิก ตามมาตรฐาน UL94-VTM

งานวิจัยนี้ได้เลือกศึกษาความสามารถในการหน่วงไฟตามมาตรฐาน UL94-VTM ของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ (T/C) ที่ตกแต่งด้วย Exolit 423 ร่วมกับเคราติน 2 ชนิด คือ เคราตินทางการค้า (KC) และสารสกัดหยาบเคราติน (KE) ในสูตรที่มีสารช่วยผืนิก โดยจะควบคุมปริมาณสารหน่วงไฟร้อยละ 10 เนื่องจากเป็นปริมาณที่น้อยที่สุดของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตที่สามารถหน่วงไฟได้ที่ได้จากการทดสอบความสามารถในการหน่วงไฟของ Exolit AP423 ตามมาตรฐาน UL94-VTM [44] และให้ค่า VTM-0

การหน่วงไฟของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยสารหน่วงไฟ Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้าและสารสกัดหยาบเคราตินสูตรที่มีสารช่วยผืนิก แสดงในตารางที่ 4.23 พบว่าผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟมี afterflame time 75.78 วินาที afterglow time 1.96 วินาที เมื่อเผาไหม้หมดจะได้ชาร์ และไม่สามารถจัดชั้นความสามารถในการหน่วงไฟตามมาตรฐาน UL94-VTM ได้ เนื่องจากมีการลามไฟถึงระยะ 125 มิลลิเมตร ส่วนผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบควบคุม (control-f) มี afterflame time 81.3 วินาที และ afterglow time 14.74 วินาที ซึ่งมากกว่าผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ตกแต่งหน่วงไฟ เมื่อเผาไหม้หมดจะได้ชาร์ และไม่สามารถจัดความสามารถในการหน่วงไฟตามมาตรฐาน UL94-VTM ได้ เช่นเดียวกับผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ตกแต่งหน่วงไฟ แสดงว่าผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย control-f ไม่มีผลในการหน่วงไฟ การที่ผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟหรือตกแต่งด้วยสารเคลือบควบคุมที่ไม่มีสารหน่วงไฟไม่หดหนีไฟหรือเกิดการหลอมหยุดเมื่อโดนความร้อนจากเปลวไฟ ทั้ง ๆ ที่มีส่วนผสมของพอลิเอสเตอร์ไม่ได้ถูกเผาไหม้จนหมดแต่กลับมีชาร์เกิดขึ้นทั้งที่มีส่วนผสมของฝ้ายนั้น พฤติกรรมดังกล่าวเรียกว่า Scaffolding effect ที่ส่วนที่เป็นพอลิเอสเตอร์จะหลอมอยู่บนส่วนที่เป็นฝ้ายแล้วเกิดการติดไฟขึ้น [2]

สำหรับผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 จะมีพฤติกรรมการเผาไหม้ที่มี afterflame time ลดลง เมื่อมีปริมาณ Exolit AP423 เพิ่มขึ้น และไม่มีการคุ้แดงหลังนำเปลวไฟออกเมื่อเผาไหม้หมดจะเกิดชาร์ และไม่สามารถจัดชั้นความสามารถในการหน่วงไฟตามมาตรฐาน UL94-VTM ได้ เนื่องจากมีการลามไฟถึง 125 มิลลิเมตร ยกเว้นผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย AP10-f มี afterflame time 0.8 วินาที afterglow time 5.6 วินาที และไม่มีมีการลามไฟถึง 125 มิลลิเมตร สามารถจัดชั้นความสามารถในการหน่วงไฟตามมาตรฐาน UL94-VTM ได้ค่า VTM-0 แสดงว่าผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย AP10-f เป็น Exolit AP423 ปริมาณน้อยที่สุดที่สามารถหน่วงไฟได้ ในขณะที่ผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินจะมี

afterflame time เฉลี่ยประมาณ 87 วินาที ซึ่งมากกว่าผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ตกแต่งห่วงไฟ และ control-f แต่ไม่มีการคุ้แดงหลังนำเปลวไฟออก นอกจากนี้ผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยเคราตินจะมี afterflame time และ afterglow time มากกว่าผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ตกแต่งห่วงไฟ และ control-f อีกด้วย ไม่สามารถจัดชั้นความสามารถในการห่วงไฟตามมาตรฐาน UL94-VTM ได้ ดังนั้นสารเคลือบห่วงไฟ Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินไม่เหมาะที่จะนำมาปรับปรุงสมบัติห่วงไฟของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์



ตารางที่ 4.23 การหน่วงไฟของของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ (T/C) ที่ตกแต่งด้วยสารหน่วงไฟ Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน สูตรที่มีสารช่วยฉนึก ตามมาตรฐาน UL94-VTM

ผ้า T/C ที่ตกแต่ง	Afterflame time (s) (t_1)	Afterglow time (s)(t_3)	125mm. mark	Dripping	Residue	VTM
ไม่ตกแต่ง	75.78	1.96	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
control-f	81.30	14.74	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
AP5-f	85.90	0	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
AP7-f	89.40	0	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
AP9-f	57.64	0	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
AP10-f	0.80	5.60	ไม่มี	ไม่มี	ชาร์	VTM-0
AP9KC1-f	78.82	0.24	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
AP7KC3-f	85.42	0	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
AP5KC5-f	90.34	0	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
AP9KE1-f	80.72	0	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
AP7KE3-f	95.46	0	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
AP5KE5-f	90.48	0	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
KC1-f	80.70	18.20	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
KC3-f	84.64	15.46	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
KC5-f	88.02	13.08	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
KE1-f	79.94	7.94	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
KE3-f	80.86	14.42	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี
KE5-f	88.14	7.96	มี	ไม่มี	ชาร์	ไม่มี

1stAfterflame time (s) (t_1) คือ ระยะเวลาการลามไฟของตัวอย่าง หลังนำเปลวไฟออก ในครั้งที่ 1

Afterglow time (s) (t_3) คือ ระยะเวลาการคุแแดงของตัวอย่าง หลังการลามไฟดับลง

125 mm mark คือ การลามไฟทั้งแบบมีเปลวไฟและไม่มีเปลวไฟถึงระยะที่กำหนดไว้ 125 มิลลิเมตร

Dripping คือ การลุกติดไฟของสำลีจากประกายไฟ หรือการหลอมหยดของชิ้นตัวอย่าง

VTM คือ การวัดความสามารถในการหน่วงไฟของชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน UL94-VTM

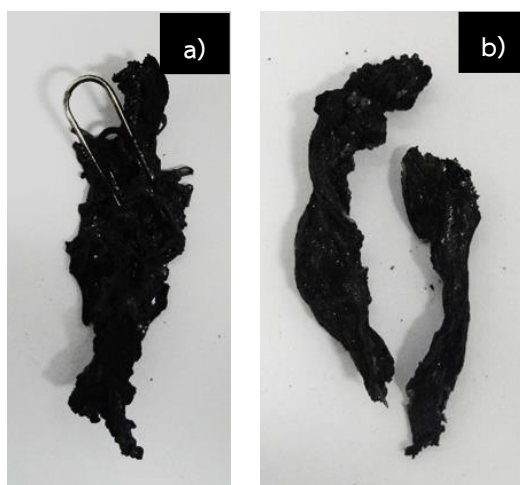
4.2.3.5 ลักษณะทางกายภาพของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ ตามมาตรฐาน UL94-VTM

ลักษณะทางกายภาพของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ ที่ไม่ผ่านการตกแต่งและตกแต่งห่วงไฟด้วยสารเคลือบควบคุม สูตรที่มีสารช่วยฉนิก (control-f) แสดงในรูปที่ 4.113 พบว่า ผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ทั้งที่ไม่ผ่านการตกแต่งและตกแต่งห่วงไฟด้วย control-f หลังการเผาไหม้ จะให้ชาร์สีดำ เพราะ จากการเกิด scaffolding ในกระบวนการเผาไหม้

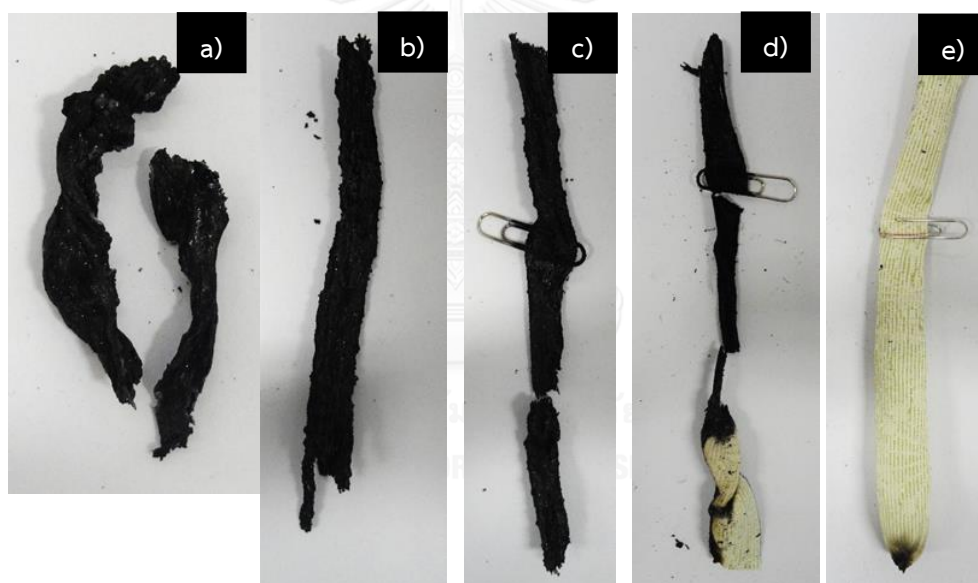
ลักษณะทางกายภาพของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบ Exolit AP423 สูตรที่มีสารช่วยฉนิก แสดงในรูปที่ 4.114 พบว่า ผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร้อยละ 5-9 จะถูกเผาไหม้และเกิดชาร์ตลอดชิ้นตัวอย่าง ในขณะที่ผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร้อยละ 10 จะเกิดการเผาไหม้และเกิดชาร์ไม่ถึงระยะที่กำหนดไว้ 125 มิลลิเมตร (VTM-0) โดยมีความยาวชาร์ 1.5 เซนติเมตร

ลักษณะทางกายภาพของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบ Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน สูตรที่มีสารช่วยฉนิก แสดงในรูปที่ 4.115 และ 4.116 พบว่า ผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบ Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทุกสูตร จะถูกเผาไหม้และเกิดชาร์ตลอดชิ้นตัวอย่าง

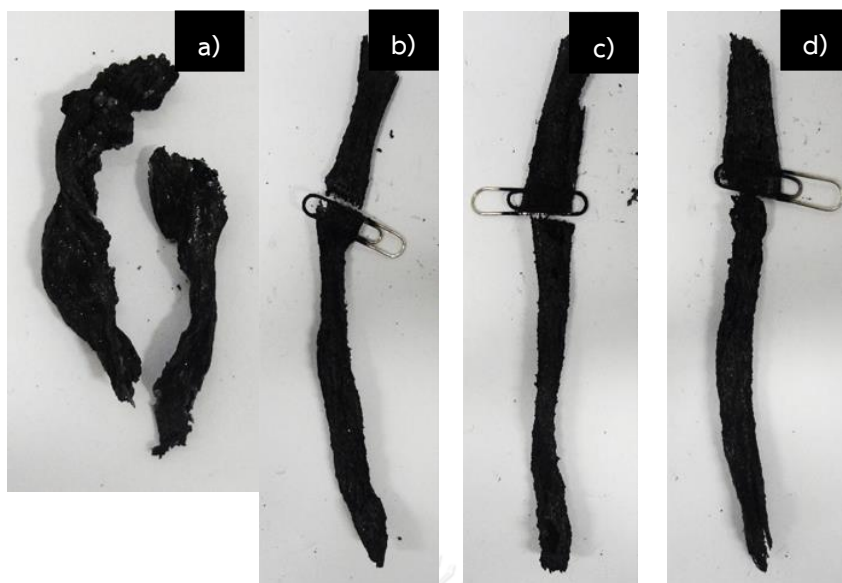
ลักษณะทางกายภาพของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบเคราตินสูตรที่มีสารช่วยฉนิก แสดงในรูปที่ 4.117 และ 4.118 พบว่า ผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบเคราตินจะถูกเผาไหม้และเกิดชาร์สีดำตลอดชิ้นตัวอย่าง โดยชาร์ที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณน้อยกว่าชาร์ของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน



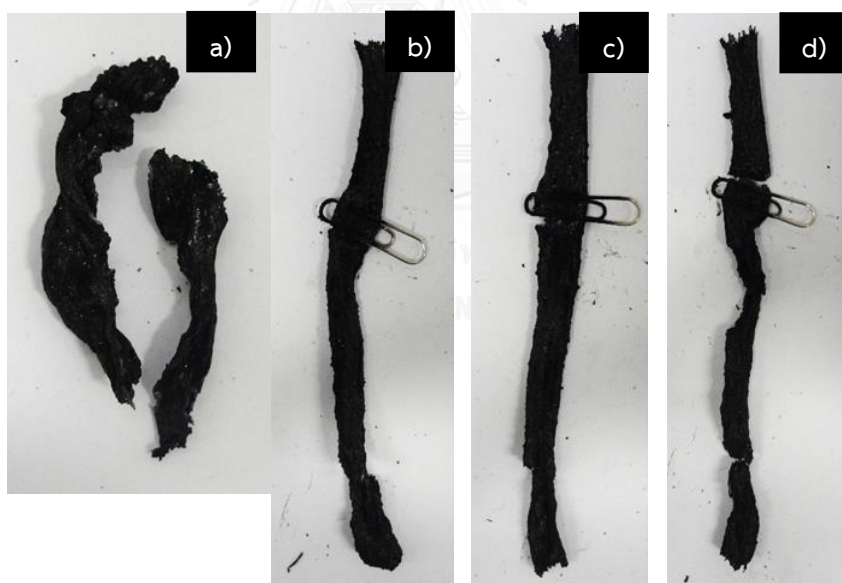
รูปที่ 4.113 ภาพถ่ายของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ a) ไม่ตกแต่งห่วงไฟ และ b) ตกแต่งด้วย control-f



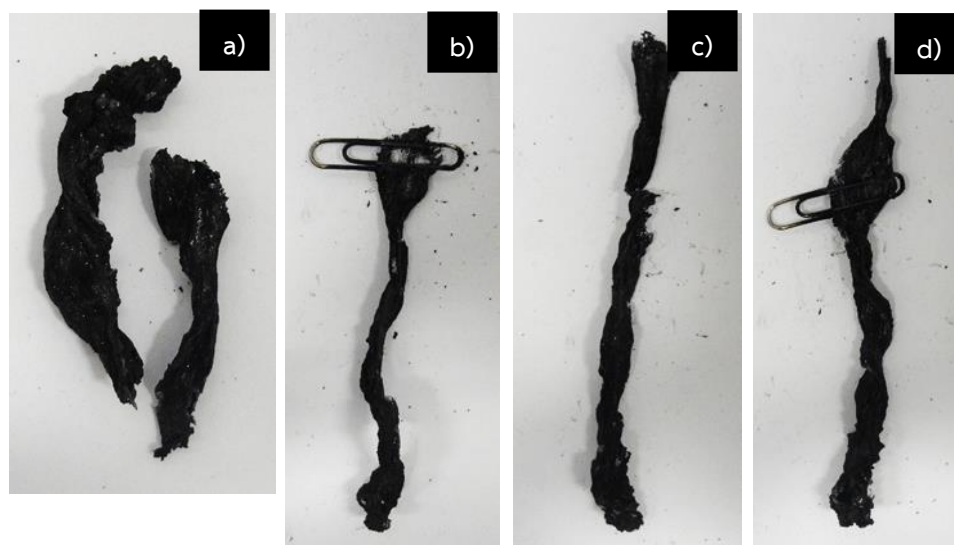
รูปที่ 4.114 ภาพถ่ายของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และ ตกแต่งด้วย Exolit AP423 สูตรที่มีสารช่วยพ่น b) AP5-f c) AP7-f d) AP9-f และ e) AP10-f



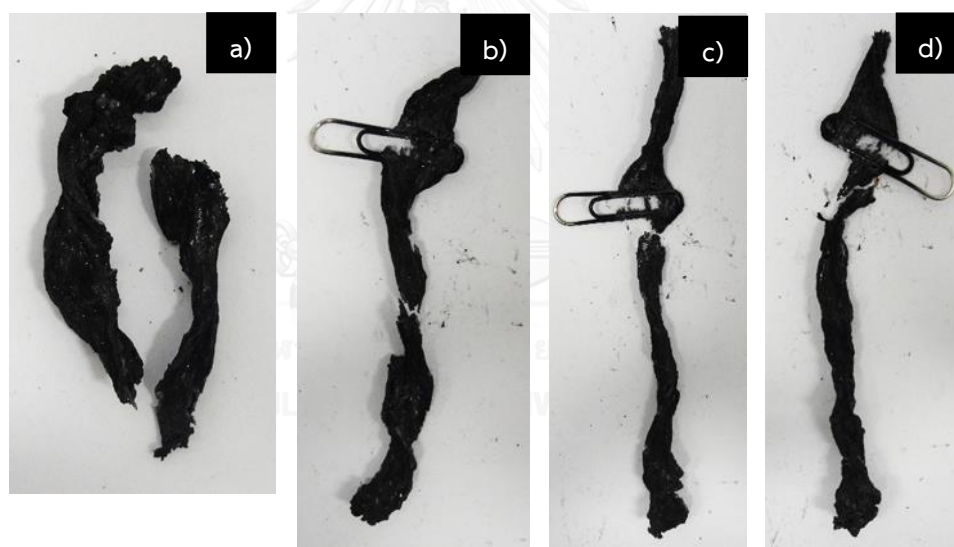
รูปที่ 4.115 ภาพถ่ายของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และ ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยฉีก b) AP9KC1-f c) AP7KC3-f และ d) AP5KC5-f



รูปที่ 4.116 ภาพถ่ายของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และ ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยฉีก b) AP9KE1-f c) AP7KE3-f และ d) AP5KE5-f



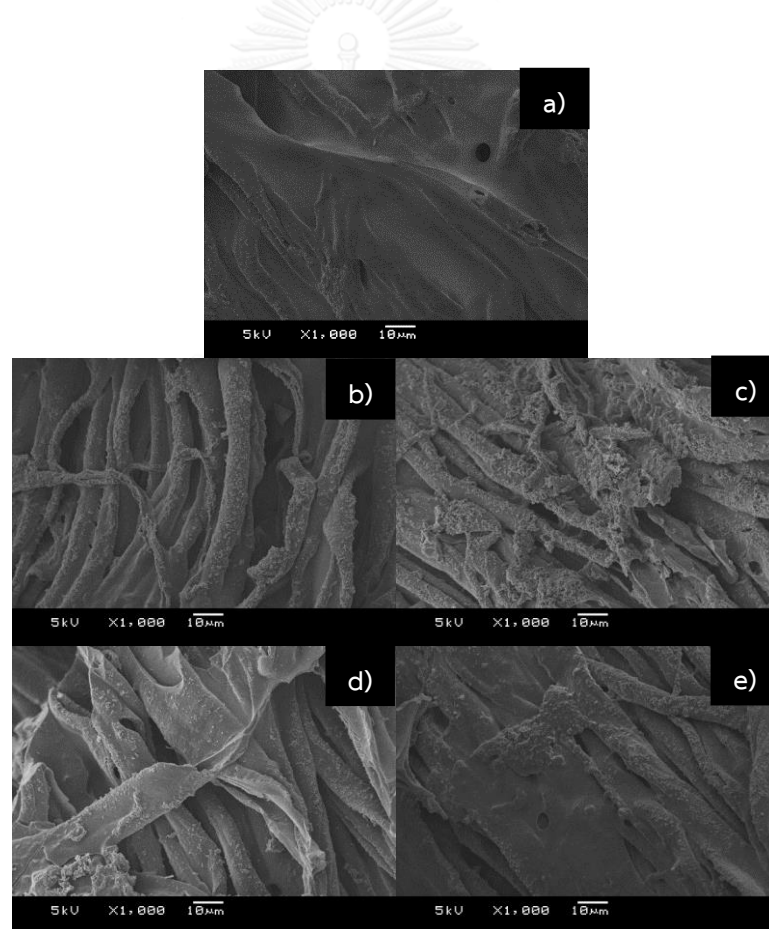
รูปที่ 4.117 ภาพถ่ายของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และ ตกแต่งด้วยเคราตินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยพ่น b) KC1-f c) KC3-f และ d) KC5-f



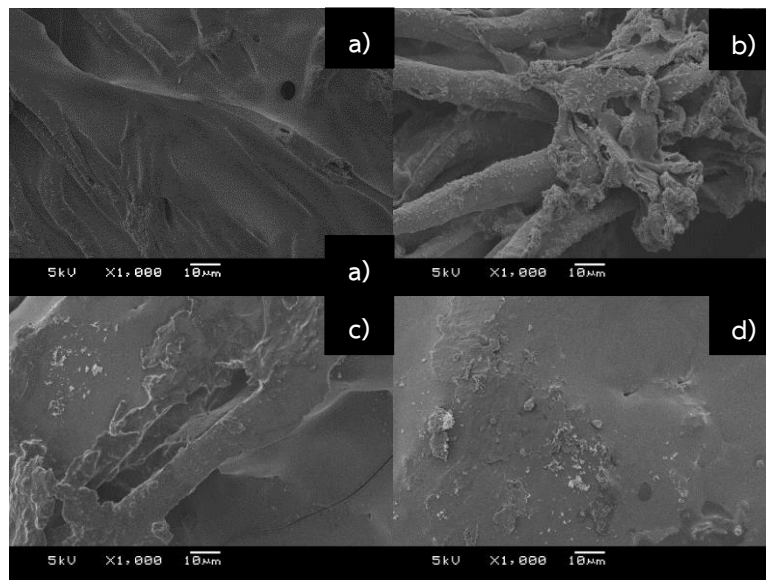
รูปที่ 4.118 ภาพถ่ายของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และ ตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยพ่น b) KE1-f c) KE3-f และ d) KE5-f

4.2.3.6 ลัทธิฐานวิทยาวิทยาของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟหลังการเผาไหม้ตามมาตรฐาน UL94-VTM

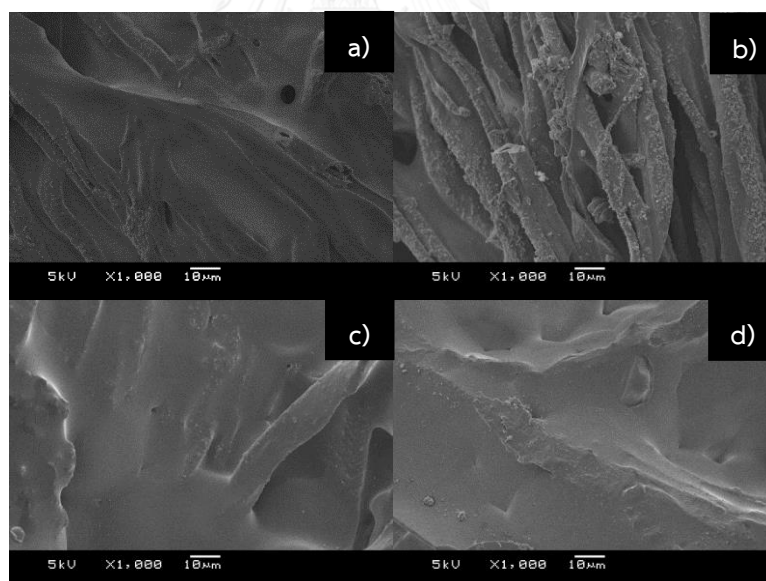
ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 และ เคราติน สูตรที่ไม่มีสารช่วยฉนิก ที่มีปริมาณสารหน่วงไฟต่างกัน แสดงในรูปที่ 4.119-4.123 พบว่า ผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบควบคุม (control-f) จะมีการหลอมของเส้นใยพอลิเอสเทอร์ห่อหุ้มส่วนที่เป็นเส้นใยฝ้ายไว้เกิดเป็น Scaffold ขึ้น ส่วนผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 จะแสดงลักษณะของเส้นใยฝ้ายโดยไม่เกิดพอลิเอสเทอร์หลอมห่อหุ้มแบบ Scaffold อาจเกิดจากการปลดปล่อยแก๊สติดไฟยากและไอน้ำของ Exolit AP423 ที่เคลือบบนเส้นใยฝ้ายในปริมาณมาก ทำให้พอลิเอสเทอร์หลอมห่อหุ้มเส้นใยฝ้ายได้น้อยลง การเกิด Scaffold ของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์จะเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณ Exolit AP423 ในสารหน่วงไฟลดลง



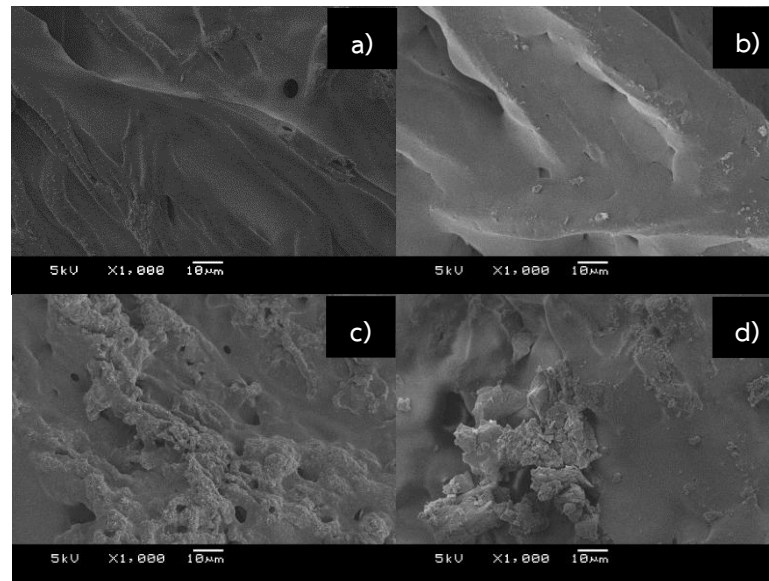
รูปที่ 4.119 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเทอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วย Exolit AP423 สูตรที่มีสารช่วยฉนิก b) AP5-f c) AP7-f d) AP9-f และ e) AP10-f ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



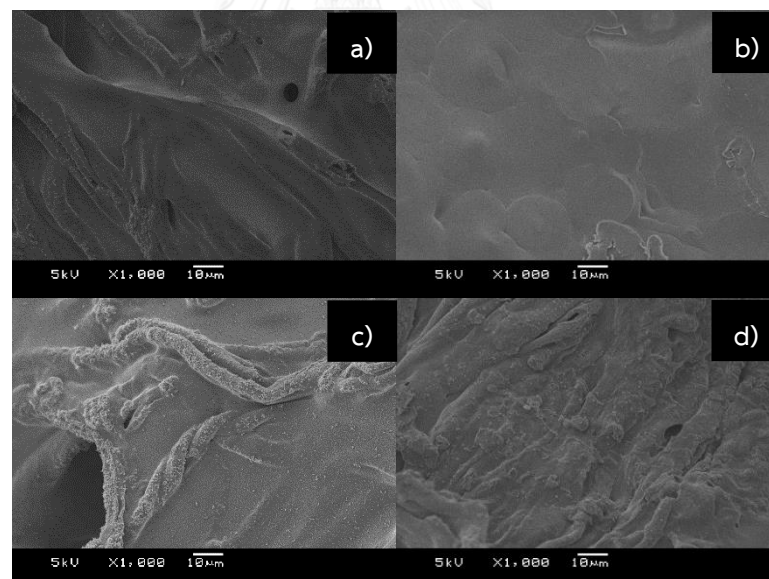
รูปที่ 4.120 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยผืนิก b) AP9KC1-f c) AP7KC3-f และ d) AP5KC5-f ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 4.121 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผืนิก b) AP9KE1-f c) AP7KE3-f และ d) AP5KE5-f ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 4.122 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วยเคราตินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยพ่น b) KC1-f c) KC3-f และ d) KC5-f ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 4.123 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยพ่น b) KE1-f c) KE3-f และ d) KE5-f ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

4.2.4 การตกแต่งห่วงไฟด้วยแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตร่วมกับเคราตินบนผ้าพอลิเอสเตอร์

การตกแต่งห่วงไฟผ้าพอลิเอสเตอร์ด้วย Exolit 423 ร่วมกับเคราติน 2 ชนิด คือ เคราตินทางการค้า (KC) และสารสกัดหยาบเคราติน (KE) สูตรที่มีสารช่วยผืนก เนื่องจากเป็นสูตรสารเคลือบห่วงไฟที่มีประสิทธิภาพในการห่วงไฟผ้าฝ้าย จึงต้องการศึกษาประสิทธิภาพการห่วงไฟผ้าพอลิเอสเตอร์ด้วยสารเคลือบสูตรนี้ โดยจะควบคุมปริมาณสารห่วงไฟร้อยละ 10 เนื่องจากเป็นปริมาณที่น้อยที่สุดของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตที่สามารถห่วงไฟได้จากการทดสอบความสามารถในการห่วงไฟของ Exolit AP423 ตามมาตรฐาน UL94-VTM และให้ค่า VTM-0

4.2.4.1 ลักษณะทางกายภาพของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟ

4.2.4.1.1 สีของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟ

ผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นผ้าทอลวดลายในตัวและมีสีส้มอมชมพู (peach) เมื่อตกแต่งห่วงไฟผ้าพอลิเอสเตอร์อาจทำให้สีของผ้าเปลี่ยนได้ จึงต้องมีการวัดสีของผ้าหลังการตกแต่งเพื่อศึกษาสูตรสารเคลือบห่วงไฟที่มีประสิทธิภาพในการห่วงไฟและการใช้งานมากที่สุด

สีของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบ Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินสูตรที่มีสารช่วยผืนก แสดงในตารางที่ 4.24 พบว่าค่าความแตกต่างของสี (DE^*) ของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบ control-f ($DE^*=0.69$) จะมีค่ามากขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ผ่านการตกแต่ง ($DE^*=0$) ผ้าจึงมีสีใกล้เคียงกับผ้าที่ไม่ผ่านการตกแต่ง ผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบ Exolit AP423 จะมีค่า DE^* เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อปริมาณ Exolit AP423 เพิ่มขึ้น โดยผ้าจะมีสีเหลืองลดลงเล็กน้อย เนื่องจากค่า YI-E313 ซึ่งเป็นค่าดัชนีความเหลืองมีค่าลดลงเล็กน้อย ผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบเคราตินจะมีค่า DE^* เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณเคราตินเพิ่มขึ้น แต่ผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบสารสกัดหยาบเคราตินจะมีสีที่เข้มขึ้นจนเป็นสีน้ำตาล เนื่องจากค่า $+L^*$ ซึ่งเป็นค่าแสดงความสว่างของสีมีค่าลดลง และค่า $+a^*$ ซึ่งเป็นค่าแสดงสีแดงมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินเพิ่มขึ้น

ส่วนผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบ Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า เมื่อปริมาณเคราตินทางการค้าเพิ่มขึ้นจะมีสีใกล้เคียงกับผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ตกแต่งห่วงไฟเช่นเดียวกับผ้าที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบเคราตินทางการค้า ในขณะที่ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบ Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราติน เมื่อปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินเพิ่มขึ้น จะมีสีที่เข้มขึ้นจนเป็นสีน้ำตาลเช่นเดียวกับผ้าที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบสารสกัดหยาบเคราติน

ตารางที่ 4.24 สีของผ้าพอลิเอสเตอร์ (PET) ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบ Exolit AP423 ร่วมกับคราติน สูตรที่มีสารช่วยผนึก

ผ้า PET ที่ตกแต่ง	L*	a*	b*	DE*	WI-CIE	YI-E313
ไม่ตกแต่ง	84.43	2.09	14.62	0	N/A	30.47
control-f	84.31	2.21	15.14	0.69	N/A	31.55
AP5-f	84.92	2.22	15.17	0.58	N/A	31.44
AP7-f	85.29	2.22	14.77	0.60	N/A	30.62
AP9-f	85.50	2.10	14.70	0.78	N/A	30.35
AP10-f	85.59	2.09	13.92	1.12	N/A	28.91
AP9KC1-f	85.30	1.96	14.03	0.87	N/A	29.07
AP7KC3-f	84.98	2.16	14.95	0.42	N/A	30.98
AP5KC5-f	84.47	2.09	15.21	0.66	N/A	31.52
KC1-f	84.72	2.14	15.70	1.09	N/A	32.37
KC3-f	101.70	2.49	19.03	1.50	N/A	39.10
KC5-f	83.78	2.14	16.60	2.20	N/A	34.23
AP9KE1-f	85.20	2.44	14.93	0.61	N/A	31.12
AP7KE3-f	82.64	3.29	16.78	3.20	N/A	35.92
AP5KE5-f	78.29	4.68	18.63	7.99	N/A	42.06
KE1-f	82.64	2.95	16.44	2.87	N/A	35.01
KE3-f	80.83	3.60	18.08	5.40	N/A	39.12
KE5-f	78.12	4.65	19.59	8.63	N/A	43.81

L* คือ ค่าความสว่าง โดยค่า +L* แสดงถึงสีขาว จนไปถึง -L* แสดงถึงสีดำ จาก CIE Lab

a* คือ สีจากเขียว (-a*) ไปจนถึงแดง (+a*) จาก CIE Lab

b* คือ สีจากน้ำเงิน (-b*) ไปเหลือง (+b*) จาก CIE Lab

DE* คือ ค่าความแตกต่างของสี จาก CIE Lab

WI-CIE คือ ค่าดัชนีความขาว (CIE whiteness index)

YI-E313 คือ ค่าดัชนีความเหลือง (Yellowness index, ASTM Method E313)

4.2.4.1.2 ความหนาของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟ

ผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นผ้าทอลวดลายในตัว มีสีส้มอมชมพู (peach) และมีความหนาประมาณ 0.50 มิลลิเมตร เมื่อตกแต่งห่วงไฟผ้าพอลิเอสเตอร์อาจทำให้ความหนาของผ้าเพิ่มขึ้นซึ่งจะส่งผลต่อความกระด้างและลักษณะทางกายภาพอื่น ๆ จึงต้องมีการวัดความหนาของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการตกแต่ง เพื่อศึกษาสูตรสารเคลือบห่วงไฟที่มีประสิทธิภาพในการห่วงไฟและการใช้งานมากที่สุด

ความหนาของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบ Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผนึก แสดงในตารางที่ 4.25 พบว่าเมื่อตกแต่งห่วงไฟผ้าพอลิเอสเตอร์ด้วยสารเคลือบห่วงไฟสูตรที่มีสารช่วยผนึกจะทำให้ผ้าพอลิเอสเตอร์มีความหนาประมาณ 0.55 มิลลิเมตร ซึ่งมีความหนาเพิ่มขึ้นจากผ้าฝ่ายผสมพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ได้ตกแต่งห่วงไฟร้อยละ 10 โดยความหนาของผ้าพอลิเอสเตอร์จะมีค่ามากที่สุด (0.56 มิลลิเมตร) เมื่อตกแต่งด้วยสารเคลือบที่มีสารสกัดหยาบเคราตินร้อยละ 5



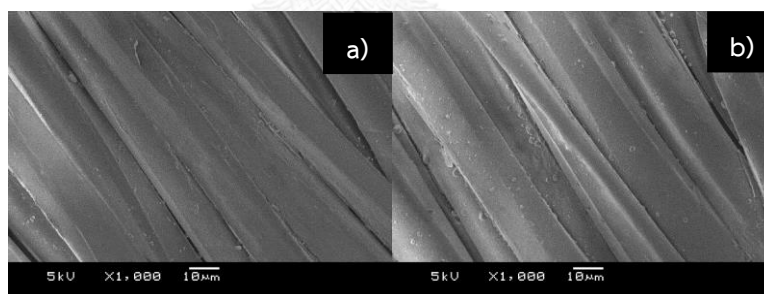
ตารางที่ 4.25 ความหนาของผ้าพอลิเอสเตอร์ (PET) ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบ Exolit AP423 ร่วมกับ
 เคราติน สูตรที่มีสารช่วยผนึก

ผ้า PET ที่ตกแต่งด้วย	% add on	ความหนา (mm)
ไม่ตกแต่ง	0	0.5
control-f	2.67	0.55
AP5-f	4.96	0.55
AP7-f	5.18	0.55
AP9-f	6.19	0.55
AP10-f	9.09	0.55
AP9KC1-f	8.49	0.55
AP7KC3-f	8.77	0.55
AP5KC5-f	9.72	0.55
AP9KE1-f	7.45	0.55
AP7KE3-f	8.64	0.55
AP5KE5-f	9.29	0.55
KC1-f	2.73	0.55
KC3-f	3.93	0.55
KC5-f	6.32	0.55
KE1-f	4.24	0.55
KE3-f	4.36	0.55
KE5-f	5.50	0.56

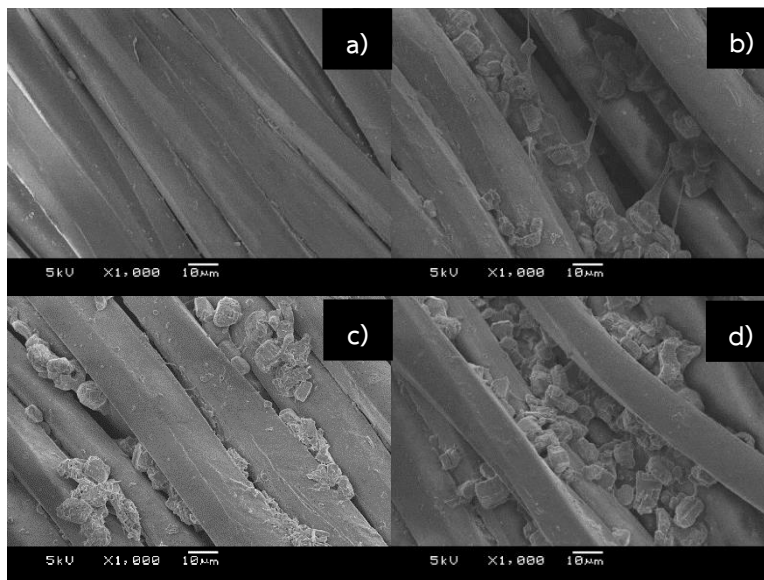
4.2.4.2 ลัทธิฐานวิทยาวิทยาของผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟ

ภาพ SEM ของผ้าพอลิเอสเทอร์ก่อนและหลังตกแต่งด้วยสารเคลือบควบคุมสูตรที่มีสารช่วยผืน (control-f) ที่กำลังขยาย 1000 แสดงในรูปที่ 4.124 พบว่าผ้าพอลิเอสเทอร์จะมีลักษณะเส้นใยผิวเรียบสม่ำเสมอ ผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วย control-f จะมีสารเคลือบบนเส้นใยเล็กน้อยและไม่มีการยึดออกของสารเคลือบเพื่อยึดระหว่างเส้นใย

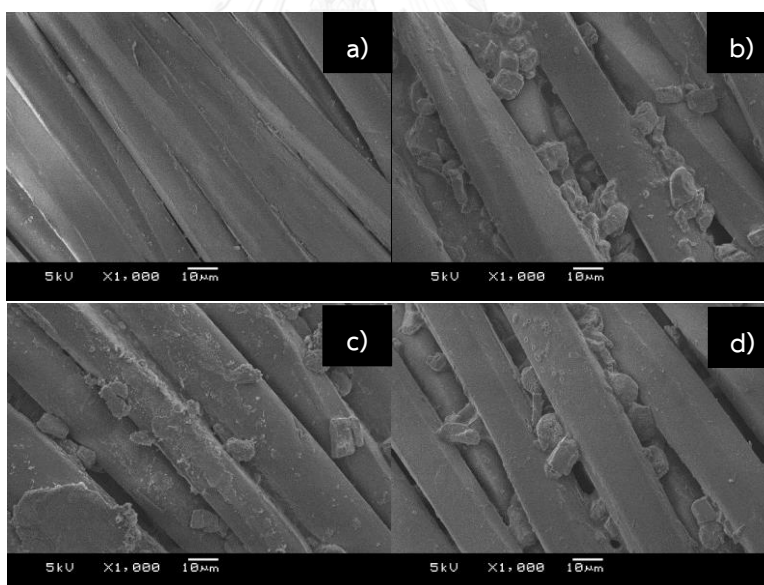
ภาพ SEM ของผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบ Exolit AP423 และเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผืน ที่มีปริมาณสารหน่วงไฟต่างกัน แสดงในรูปที่ 4.125-4.129 พบว่า อนุภาคของ Exolit AP423 มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก อนุภาคของ Exolit AP423 จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ Exolit AP423 ในสารหน่วงไฟเพิ่มขึ้น ส่วนเคราตินทางการค้าจะสามารถกระจายตัวได้ดีในสารเคลือบเนื่องจากเคราตินทางการค้าสามารถละลายน้ำได้ (Hydrolyzed keratin) จึงมีลักษณะของสารเคลือบบนผิวของผ้าพอลิเอสเทอร์บาง ๆ เมื่อปริมาณเคราตินทางการค้าเพิ่มขึ้น สารเคลือบบนผิวของผ้าพอลิเอสเทอร์จะมองเห็นได้ชัดเจนขึ้น ในขณะที่สารสกัดหยาบเคราตินจะมีการจับตัวกันเป็นก้อนและกระจายตัวได้น้อยในสารเคลือบ เนื่องจากอนุภาคของสารสกัดหยาบเกิดการเชื่อมขวางของพันธะไดซัลไฟด์อีกครั้งหลังการสกัด (re-crosslink) จึงไม่ละลายน้ำ เมื่อปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินเพิ่มขึ้น การจับตัวเป็นก้อนของสารสกัดหยาบเคราตินจะเพิ่มขึ้น



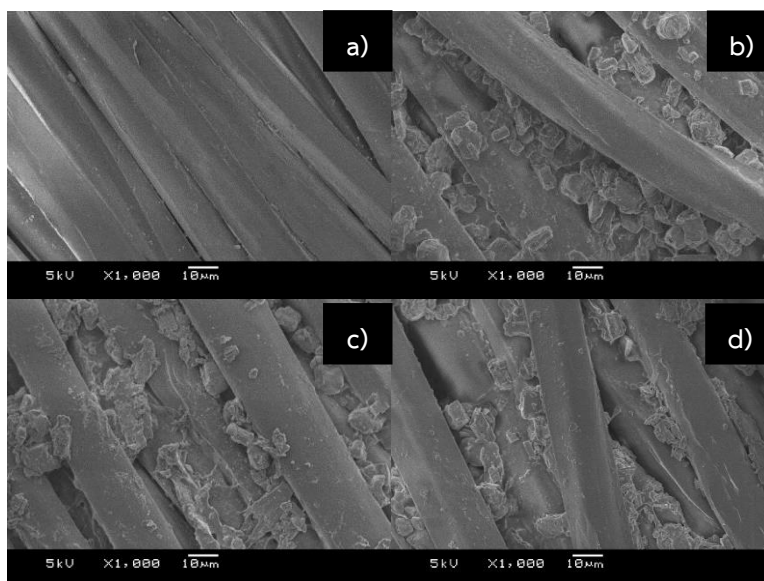
รูปที่ 4.124 ภาพ SEM ของผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วย a) ไม่ผ่านการตกแต่ง และ b) control-f ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



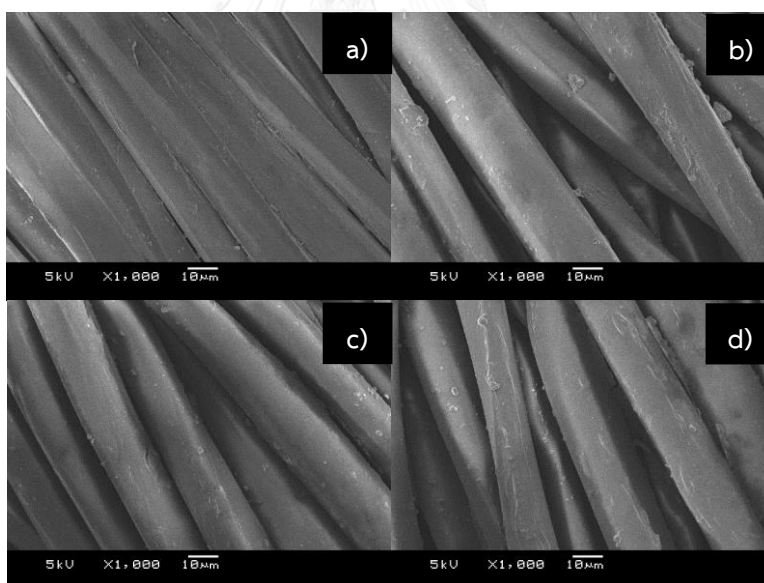
รูปที่ 4.125 ภาพ SEM ของผ้าพอลิเอทเธอร์ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วย Exolit AP423 สูตรที่มีสารช่วยผืนึก b) AP5-f c) AP7-f และ d) AP9-f ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



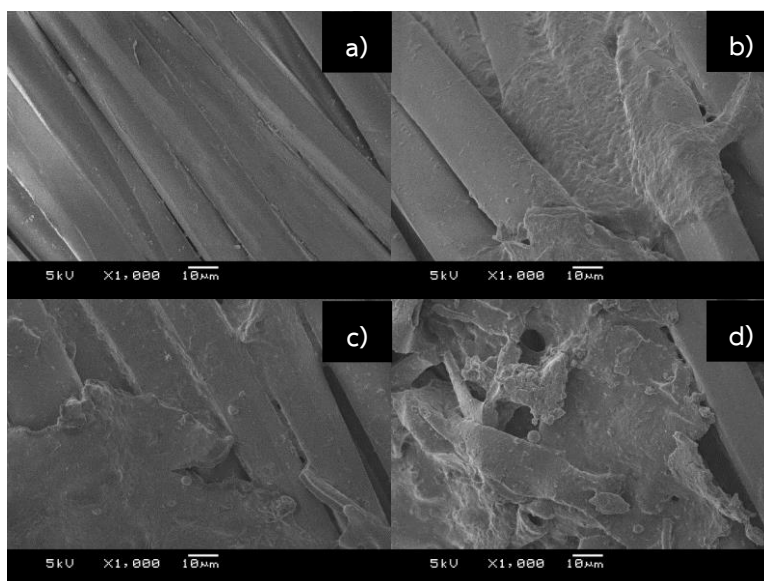
รูปที่ 4.126 ภาพ SEM ของผ้าพอลิเอทเธอร์ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยผืนึก b) AP9KC1-f c) AP7KC3-f และ d) AP5KC5-f ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 4.127 ภาพ SEM ของผ้าพอลิเอทเธอร์ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผืนิก b) AP9KE1-f c) AP7KE3-f และ d) AP5KE5-f ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 4.128 ภาพ SEM ของผ้าพอลิเอทเธอร์ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วยเคราตินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยผืนิก b) KC1-f c) KC3-f และ d) KC5-f ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 4.129 ภาพ SEM ของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผนึก b) KE1-f c) KE3-f และ d) KE5-f ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

4.2.4.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟ

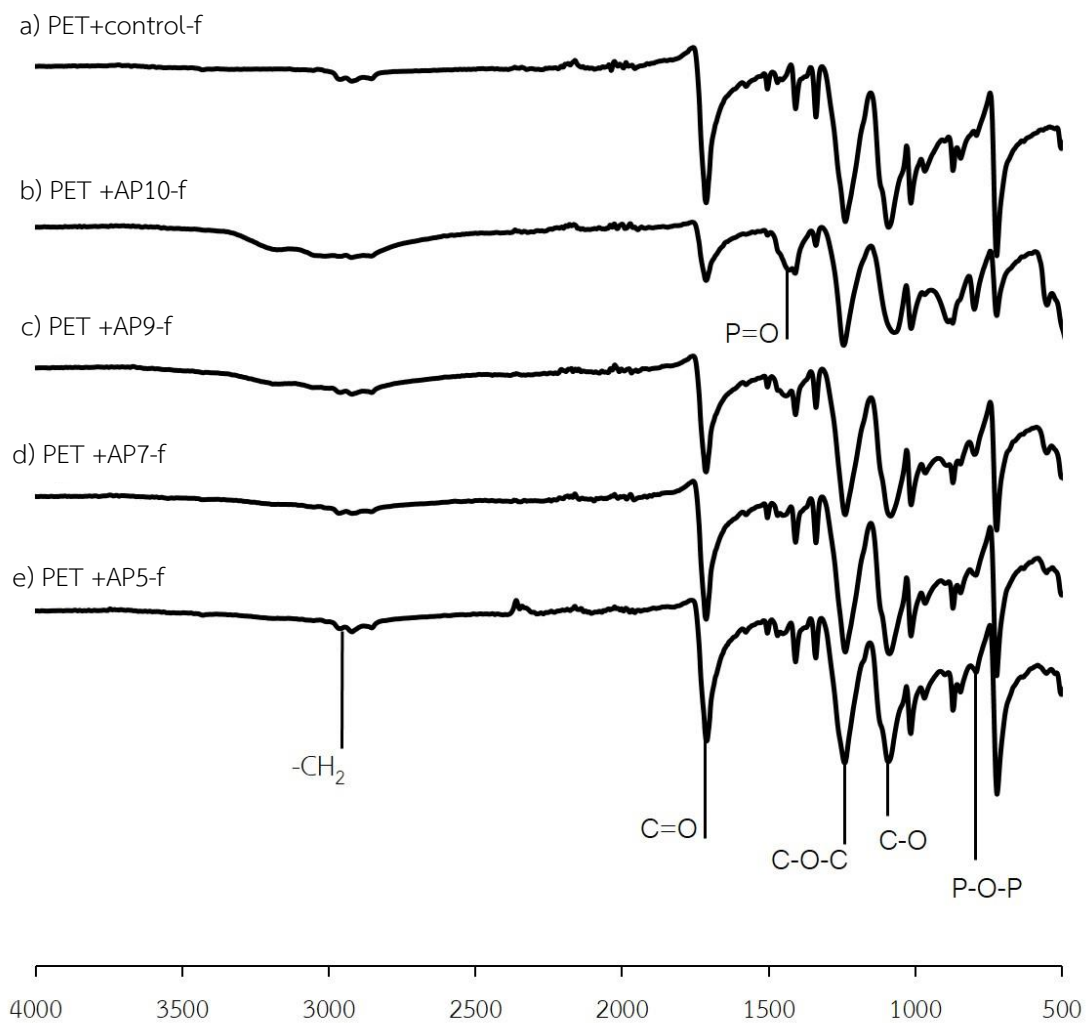
ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ที่ความเข้มข้นต่างกัน สูตรที่มีสารช่วยผนึก แสดงในรูปที่ 4.130 พบว่า FT-IR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบควบคุมสูตรที่มีสารช่วยผนึก (control-f) แสดงหมู่ฟังก์ชันที่แสดงลักษณะทางเคมีของผ้าพอลิเอสเตอร์ คือ -CH_2 ($2980\text{-}2800\text{ cm}^{-1}$), C=O (1730 cm^{-1}), C-O-C (1160 cm^{-1}) และ C-O (1030 cm^{-1}) [72] โดยการเคลือบสารเคลือบควบคุม สูตรที่มีสารช่วยผนึกลงบนผ้าพอลิเอสเตอร์ไม่ทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันใหม่ขึ้นบนผ้าพอลิเอสเตอร์ โดยผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ความเข้มข้นต่างกัน แสดงหมู่ฟังก์ชันที่แสดงลักษณะทางเคมีของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต คือ P=O (1256 cm^{-1}) และ P-O-P (800 cm^{-1}) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกับหมู่ฟังก์ชันของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตในงานวิจัยของ Wang และคณะ [58] โดยความเข้มของพีค P=O และ P-O-P จะเพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณ Exolit AP423 ในสูตรสารห่วงไฟเพิ่มขึ้น และความเข้มของพีค C=O (1730 cm^{-1}) จะลดลง เนื่องจากเกิดการเชื่อมขวางกันของ Exolit AP423 กับผ้าพอลิเอสเตอร์

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยเคราตินทางการค้า (KC) ที่ความเข้มข้นต่างกัน สูตรที่มีสารช่วยผนึก แสดงในรูปที่ 4.131 พบว่า FT-IR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยเคราตินทางการค้าที่ความเข้มข้นต่างกัน แสดงหมู่ฟังก์ชันที่แสดงลักษณะทางเคมีของเคราติน คือ เอไมด์ปฐมภูมิ (primary amide, RC(O)NH_2) (1635 cm^{-1}) ซึ่งเป็นหมู่

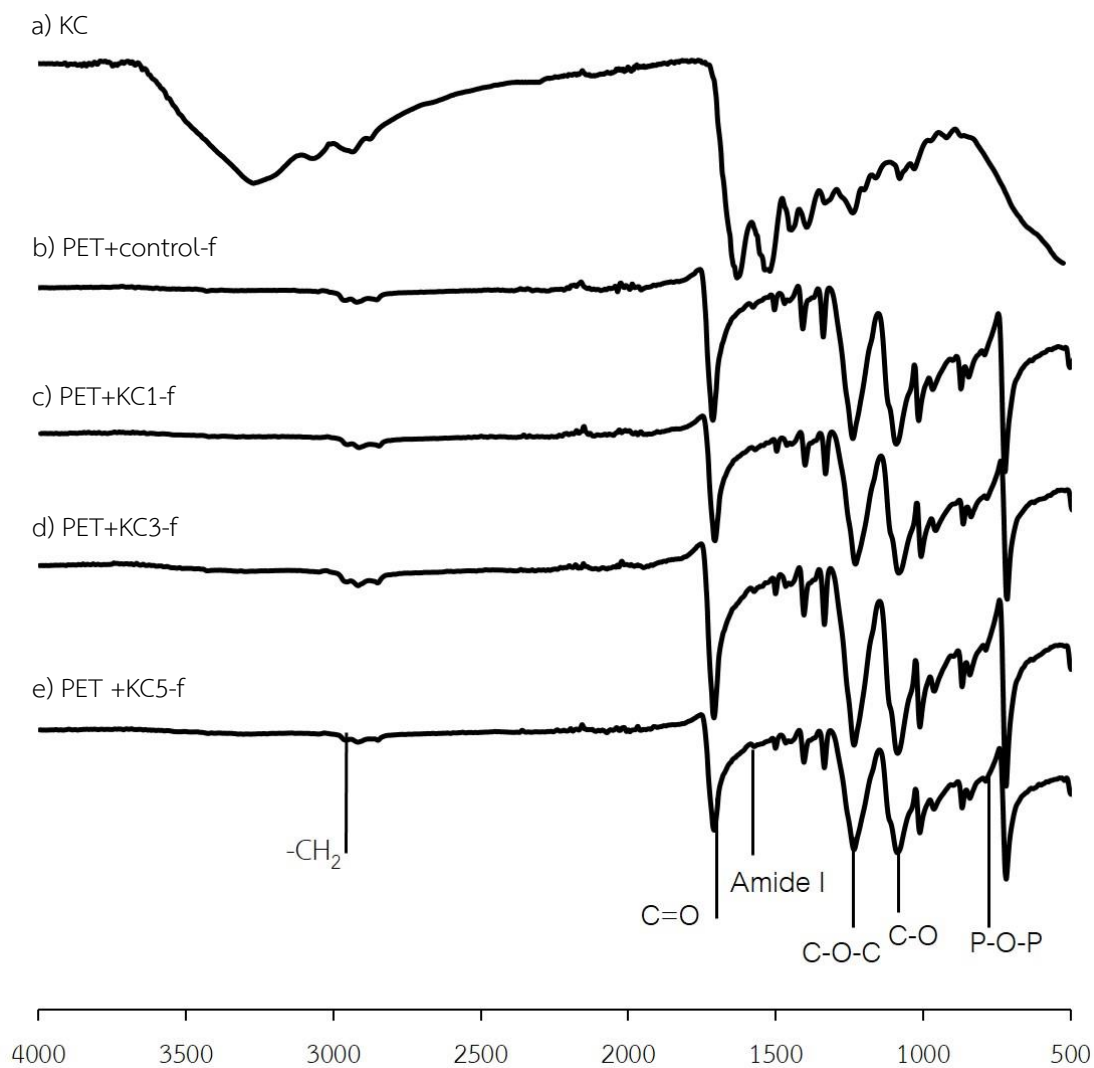
ฟังก์ชันที่เหมือนกับหมู่ฟังก์ชันของเคราตินจากขนสัตว์ในงานวิจัยของ Xu และคณะ [68] โดยความเข้มของพีคเอไมด์ปฐมภูมิจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณเคราตินทางการค้าในสูตรสารหน่วงไฟเพิ่มขึ้น

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราติน (KE) ที่ความเข้มข้นต่างกัน แสดงในรูปที่ 4.132 พบว่า FT-IR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราตินที่ความเข้มข้นต่างกันแสดงหมู่ฟังก์ชันที่แสดงลักษณะทางเคมีของเคราติน คือ เอไมด์ปฐมภูมิ (RC(O)NH_2) (1635 cm^{-1}) และเอไมด์ทุติยภูมิ ($\text{RC(O)NHR}'$) (1525 cm^{-1}) [68] โดยความเข้มของพีคเอไมด์ปฐมภูมิ และเอไมด์ทุติยภูมิจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินในสูตรสารหน่วงไฟเพิ่มขึ้น

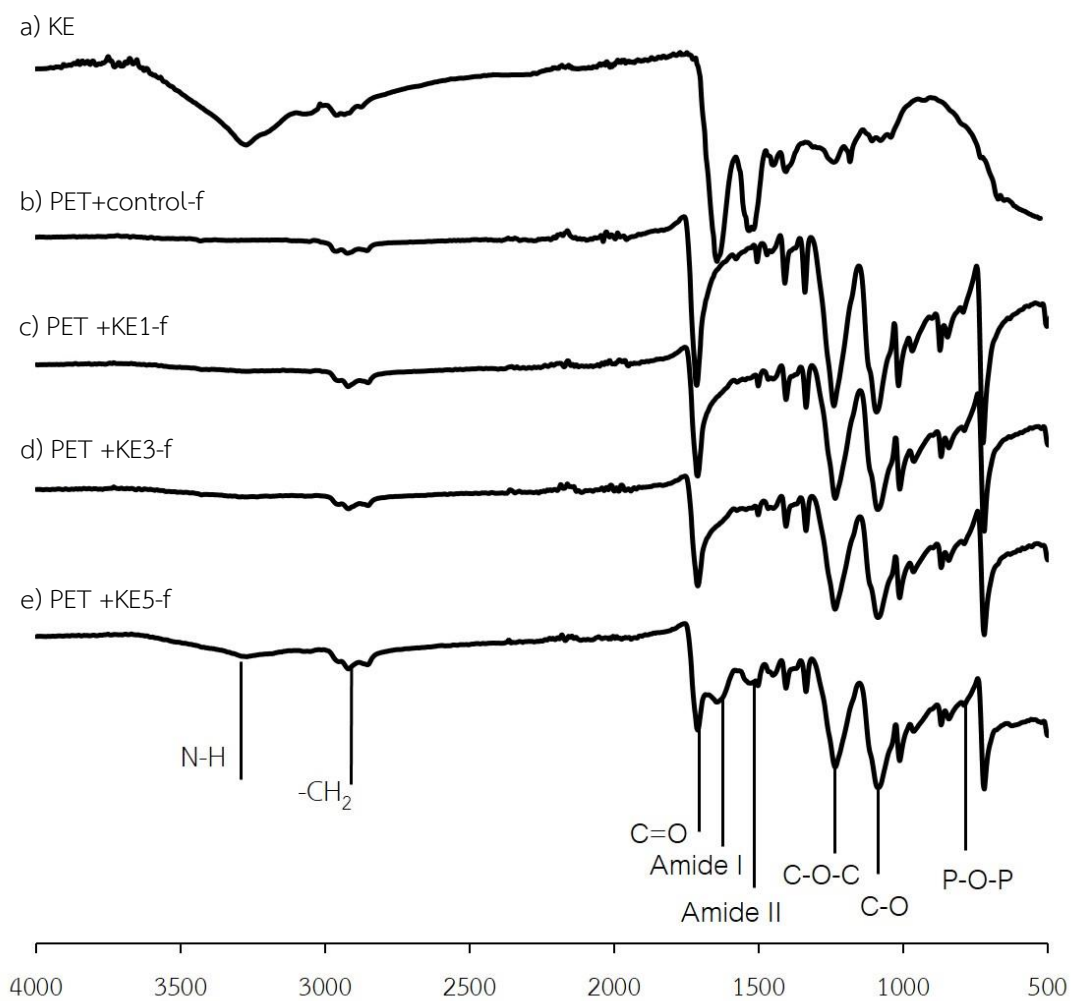
ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินที่ความเข้มข้นต่างกัน แสดงในรูปที่ 4.133 และ 4.134 พบว่า FT-IR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน (เคราตินทางการค้า (KC) และสารสกัดหยาบเคราติน (KE)) ที่ความเข้มข้นต่างกันจะแสดงหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกัน คือ เอไมด์ปฐมภูมิ (RC(O)NH_2) (1635 cm^{-1}) [68] ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่แสดงลักษณะทางเคมีของเคราติน และหมู่ฟังก์ชันที่แสดงลักษณะทางเคมีของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต คือ แสดงหมู่ฟังก์ชัน P=O (1256 cm^{-1}) และ P-O-P (800 cm^{-1}) [72] แต่ผ้าพอลิเอสเทอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราตินจะแสดงหมู่ฟังก์ชันที่แสดงลักษณะทางเคมีของเคราตินเพิ่มขึ้นมา คือ เอไมด์ทุติยภูมิ ($\text{RC(O)NHR}'$) (1525 cm^{-1}) [68] โดยความเข้มของพีค P=O และ P-O-P จะเพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณ Exolit AP423 ในสูตรสารหน่วงไฟเพิ่มขึ้น และความเข้มของพีคเอไมด์ปฐมภูมิ และเอไมด์ทุติยภูมิจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีเคราตินในสูตรสารหน่วงไฟเพิ่มขึ้น โดยสารสกัดหยาบเคราตินจะแสดงความเข้มของพีคเอไมด์ปฐมภูมิ และเอไมด์ทุติยภูมิมากกว่าเคราตินทางการค้า เนื่องจากสารสกัดหยาบเคราตินเกิดการจับตัวเป็นก้อนบนผิวของผ้าพอลิเอสเทอร์ทำให้สามารถตรวจเจอหมู่ฟังก์ชันได้มากกว่าเคราตินทางการค้า ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ทำให้กระจายตัวบนผิวผ้าพอลิเอสเทอร์ได้ดีกว่า



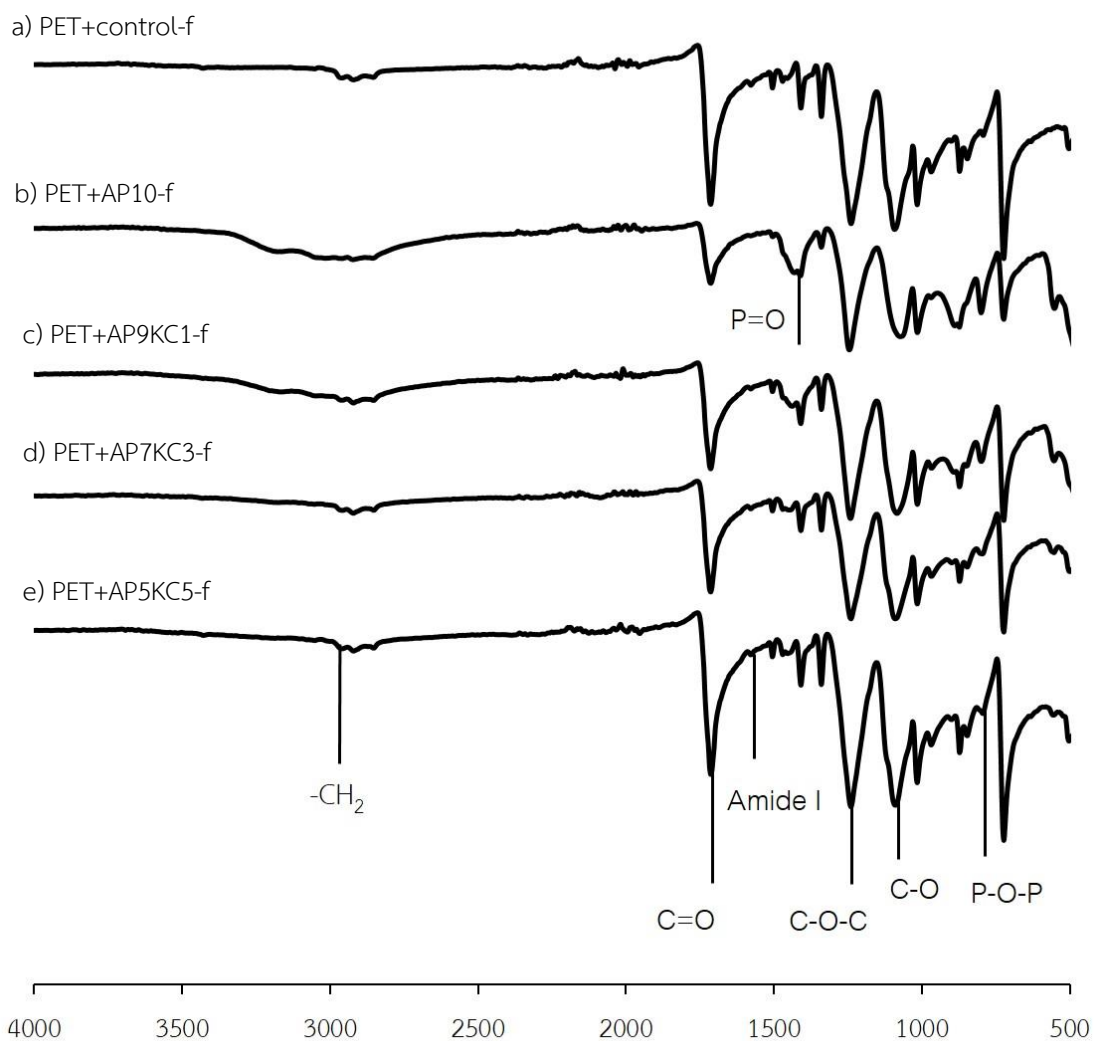
รูปที่ 4.130 FT-IR สเปกตรัมของผ้าพอลิเอสเตอร์ (PET) ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วย Exolit AP423 ที่ความเข้มข้นต่างกัน สูตรที่มีสารช่วยพริ้ง b) AP10-f c) AP9-f d) AP7-f และ e) AP5-f



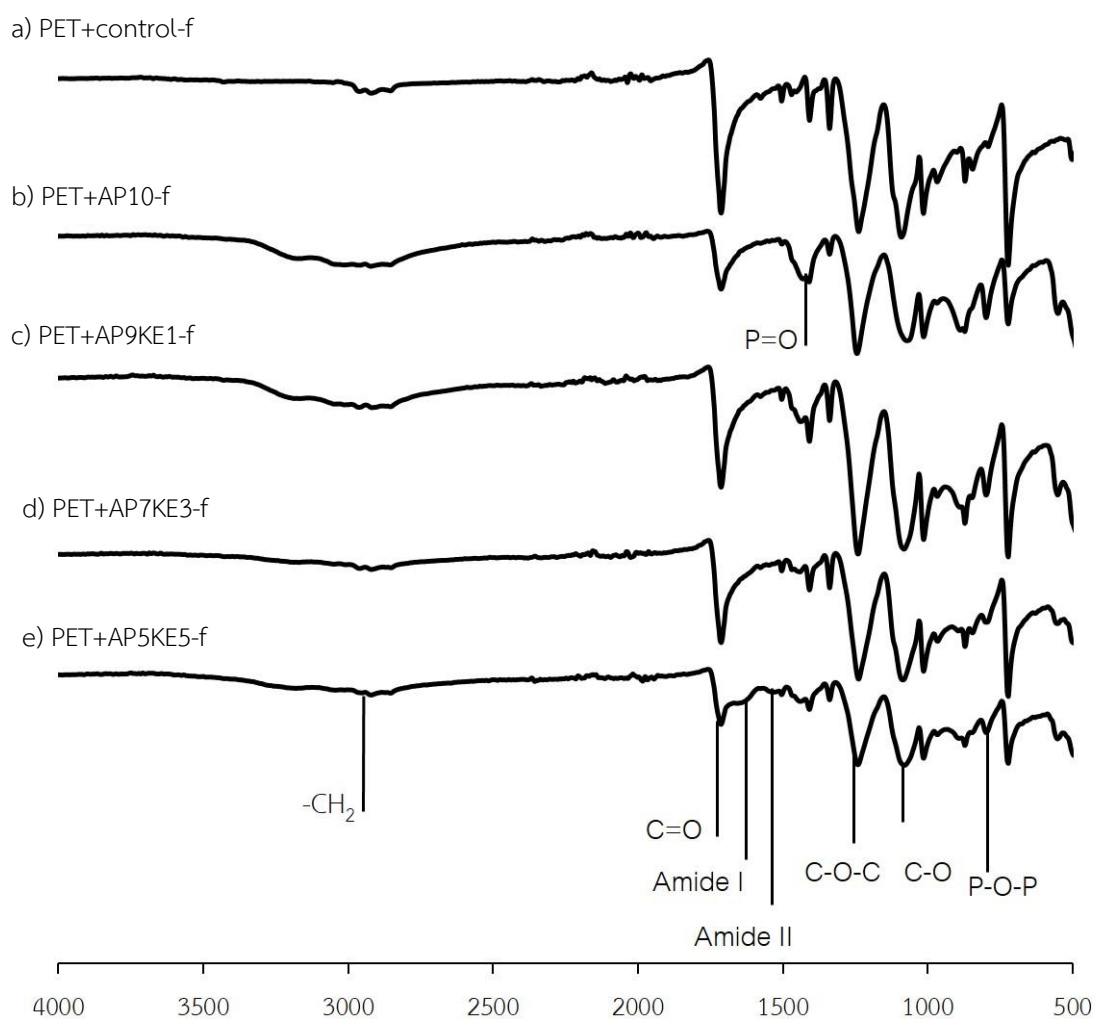
รูปที่ 4.131 FT-IR สเปกตรัมของ a) เคราตินทางการค้า (KC) ผ้าพอลิเอสเตอร์ (PET) ที่ตกแต่งด้วย b) control-f และตกแต่งด้วยเคราตินทางการค้า ที่ความเข้มข้นต่างกัน สูตรที่มีสารช่วยผืนิก c) KC1-f d) KC3-f และ e) KC5-f



รูปที่ 4.132 FT-IR สเปกตรัมของ a) สารสกัดหยาบเคราติน (KE) ผ่าพอลิเอสเทอร์ (PET) ที่ตกแต่งด้วย b) control-f และตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราติน ที่ความเข้มข้นต่างกัน สูตรที่มีสารช่วยผนึก c) KE1-f d) KE3-f และ e) KE5-f



รูปที่ 4.133 FT-IR สเปกตรัมของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ (PET) ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า (KC) ที่ความเข้มข้นต่างกัน สูตรที่มีสารช่วยพนัก b) AP10-f c) AP9KC1-f d) AP7KC3-f และ e) AP5KC5-f



รูปที่ 4.134 FT-IR สเปกตรัมของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ (PET) ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาดเขราตินทาง (KE) ที่ความเข้มข้นต่างกัน สูตรที่มีสารช่วยผนึก b) AP10-f c) AP9KE1-f d) AP7KE3-f และ e) AP5KE5-f

4.2.4.4 ความสามารถในการหน่วงไฟของผ้าพอลิเอสเตอร์ ตามมาตรฐาน UL94-VTM

งานวิจัยนี้ได้เลือกศึกษาความสามารถในการหน่วงไฟตามมาตรฐาน UL94-VTM ของผ้าพอลิเอสเตอร์ (PET) ที่ตกแต่งด้วย Exolit 423 ร่วมกับเคราติน 2 ชนิด คือ เคราตินทางการค้า (KC) และสารสกัดหยาบเคราติน (KE) ในสูตรที่มีสารช่วยฉีก โดยควบคุมปริมาณสารหน่วงไฟร้อยละ 10 เนื่องจากเป็นปริมาณที่น้อยที่สุดของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตที่สามารถหน่วงไฟได้ที่ได้จากการทดสอบความสามารถในการหน่วงไฟของ Exolit AP423 ตามมาตรฐาน UL94-VTM และให้ค่า VTM-0 โดยพฤติกรรมการเผาไหม้ของผ้าพอลิเอสเตอร์จะเกิดการหลอมหยุดขณะเผาไหม้ และมีการพาเปลวไฟไปสู่วัสดุรองรับจากการหลอมหยุดทำให้วัสดุรองรับเกิดการเผาไหม้ต่อไป ดังนั้นในการวิเคราะห์การหน่วงไฟจะพิจารณาเวลาที่เกิดการหลอมหยุดครั้งแรกซึ่งเป็นการพาเปลวไฟไปสู่วัสดุรองรับด้วย ถ้าเวลาหลอมหยุดครั้งแรกเกิดขึ้นเร็วการลามไฟไปยังวัสดุรองรับก็จะเกิดเร็วด้วย

การหน่วงไฟของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยสารหน่วงไฟ Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินสูตรที่มีสารช่วยฉีก แสดงในตารางที่ 4.26 ผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ผ่านการตกแต่งหน่วงไฟมี afterflame time 16.46 วินาที ไม่มีการคุ้แดงหลังนำเปลวไฟออก โดยเวลาที่เกิดการหลอมหยุดครั้งแรก 11.28 วินาที ไม่สามารถจัดชั้นความสามารถในการหน่วงไฟตามมาตรฐาน UL94-VTM ได้ เนื่องจากมีการหลอมหยุดเกิดขึ้น ส่วนผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบควบคุม (control-f) มี afterflame time 26.16 วินาที ไม่มีการคุ้แดงหลังนำเปลวไฟออก เวลาที่เกิดการหลอมหยุดครั้งแรก 12.92 วินาที ซึ่งมากกว่ากว่าผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ตกแต่งหน่วงไฟเล็กน้อย ไม่สามารถจัดชั้นความสามารถในการหน่วงไฟตามมาตรฐาน UL94-VTM ได้ เนื่องจากมีการหลอมหยุดเกิดขึ้นเช่นเดียวกัน แสดงว่าผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย control-f ไม่มีผลในการหน่วงไฟ

สำหรับผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 จะมี afterflame time เฉลี่ยประมาณ 35 วินาที และไม่มีการคุ้แดงหลังนำเปลวไฟออก เมื่อเผาไหม้หมดจะเกิดซาร์ ไม่มีการลามไฟถึง 125 มิลลิเมตร และไม่สามารถจัดชั้นความสามารถในการหน่วงไฟตามมาตรฐาน UL94-VTM ได้ เนื่องจากเกิดการหลอมหยุดเกิดขึ้น โดยผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย AP10-f เวลาที่เกิดการหลอมหยุดครั้งแรก 42.35 วินาที ซึ่งเป็นเวลานานที่สุดก่อนเกิดการหลอมหยุด ในขณะที่ผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้าจะมี afterflame time เพิ่มขึ้น และมีเวลาที่เกิดการหลอมหยุดครั้งแรกเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณ Exolit AP423 เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยเคราตินจะมี afterflame time และเวลาที่เกิดการหลอมหยุดครั้งแรกมากกว่าผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ตกแต่งหน่วงไฟ และ control-f อีกด้วย ไม่สามารถจัดชั้นความสามารถในการหน่วงไฟตามมาตรฐาน UL94-VTM ได้ ดังนั้นสารเคลือบหน่วงไฟ Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินไม่เหมาะที่จะนำมาปรับปรุงสมบัติหน่วงไฟของผ้าพอลิเอสเตอร์

ตารางที่ 4.26 การหน่วงไฟของผ้าพอลิเอสเตอร์ (PET) ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบ Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า (KC) และสารสกัดหยาบเคราติน (KE) สูตรที่มีสารช่วยพ่นิก ตามมาตรฐาน UL94-VTM

ผ้า PET ที่ตกแต่ง	Afterflame time (s) (t_1)	Afterglow time (s)(t_3)	125mm. mark	1 st Dripping (s)	Residue	VTM
ไม่ตกแต่ง	16.46	0	ไม่มี	11.28	ชาร์	ไม่มี
control-f	26.16	0	มี	12.92	ชาร์	ไม่มี
AP5-f	34.06	0	ไม่มี	26.14	ชาร์	ไม่มี
AP7-f	32.58	0	ไม่มี	25.70	ชาร์	ไม่มี
AP9-f	39.74	0	ไม่มี	34.78	ชาร์	ไม่มี
AP10-f	33.92	0.68	ไม่มี	42.35	ชาร์	ไม่มี
AP9KC1-f	31.44	0	ไม่มี	35.60	ชาร์	ไม่มี
AP7KC3-f	33.10	0.82	ไม่มี	35.63	ชาร์	ไม่มี
AP5KC5-f	20.06	0.8	มี	23.60	ชาร์	ไม่มี
AP9KE1-f	21.04	0	ไม่มี	28.22	ชาร์	ไม่มี
AP7KE3-f	23.78	1.52	ไม่มี	26.90	ชาร์	ไม่มี
AP5KE5-f	36.92	0	ไม่มี	31.92	ชาร์	ไม่มี
KC1-f	22.26	0	มี	8.90	ชาร์	ไม่มี
KC3-f	35.08	0	มี	10.12	ชาร์	ไม่มี
KC5-f	43.96	0.96	มี	28.22	ชาร์	ไม่มี
KE1-f	39.52	0	มี	19.00	ชาร์	ไม่มี
KE3-f	29.4	0	มี	16.18	ชาร์	ไม่มี
KE5-f	23.6	0	มี	16.28	ชาร์	ไม่มี

1stAfterflame time (s) (t_1) คือ ระยะเวลาการลามไฟของตัวอย่าง หลังนำเปลวไฟออก ในครั้งที่ 1

Afterglow time (s) (t_3) คือ ระยะเวลาการคุแแดงของตัวอย่าง หลังการลามไฟดับลง

125 mm mark คือ การลามไฟทั้งแบบมีเปลวไฟและไม่มีเปลวไฟถึงระยะที่กำหนดไว้ 125 มิลลิเมตร

Dripping คือ การลุกติดไฟของสำลีจากประกายไฟ หรือการหลอมหยดของชิ้นตัวอย่าง

VTM คือ การวัดความสามารถในการหน่วงไฟของชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน UL94-VTM

4.2.3.5 ลักษณะทางกายภาพของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ ตามมาตรฐาน UL94-VTM

ลักษณะทางกายภาพของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ไม่ผ่านการตกแต่งและตกแต่งด้วยสารเคลือบควบคุม สูตรที่มีสารช่วยฉีก (control-f) แสดงในรูปที่ 4.135 พบว่าผ้าพอลิเอสเตอร์ทั้งที่ไม่ผ่านการตกแต่งและตกแต่งด้วย control-f หลังการเผาไหม้จะแสดงลักษณะของผ้าที่เกิดการหลอมหยดของพอลิเอสเตอร์หลอมเหลว โดยผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วย control-f จะเกิดเขม่าสีดำตลอดชิ้นตัวอย่าง

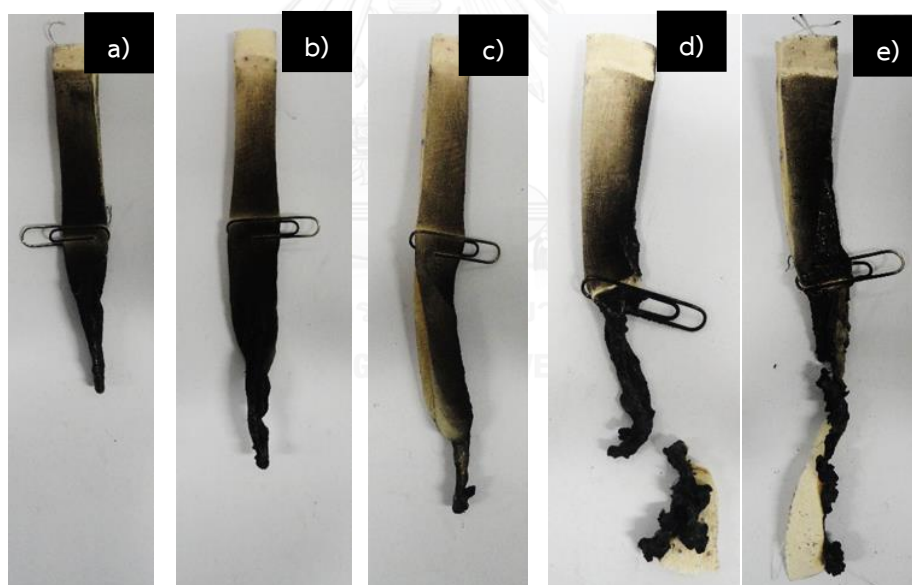
ลักษณะทางกายภาพของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบ Exolit AP423 สูตรที่มีสารช่วยฉีก แสดงในรูปที่ 4.136 พบว่า ผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย AP5-f และ AP7-f จะถูกเผาไหม้และจะแสดงลักษณะของผ้าที่เกิดการหลอมหยดของพอลิเอสเตอร์หลอมเหลว ในขณะที่ผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย AP9-f และ AP10-f จะเกิดซาร์ที่พองออกจากการเกิด intumescent ของ Exolit AP423 นอกจากนี้ผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบหน่วงไฟทุกสูตรจะเกิดเขม่าสีดำตลอดชิ้นตัวอย่าง

ลักษณะทางกายภาพของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบ Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน สูตรที่มีสารช่วยฉีก แสดงในรูปที่ 4.137 และ 4.138 พบว่า ผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบเคราตินทุกสูตร ยกเว้น AP5KC5-f จะเกิดซาร์ที่พองออกจากการเกิด intumescent ของ Exolit AP423 ร่วมกับเคราติน นอกจากนี้การตกแต่งด้วยสารเคลือบ Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้าจะทำให้เกิดเขม่าน้อยลง

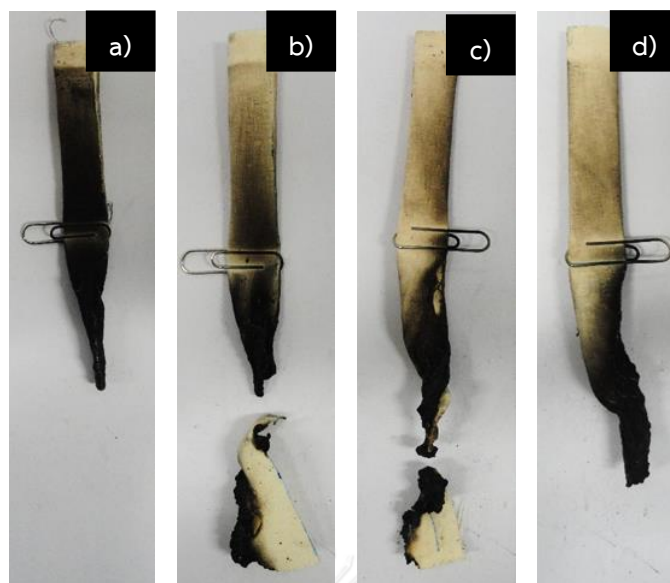
ลักษณะทางกายภาพของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยฉีก แสดงในรูปที่ 4.139 และ 4.140 พบว่า ผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยสารเคลือบเคราตินหลังการเผาไหม้จะแสดงลักษณะของผ้าที่เกิดการหลอมหยดของพอลิเอสเตอร์หลอมเหลว โดยการตกแต่งด้วยสารเคลือบเคราตินทางการค้าจะทำให้เกิดเขม่าน้อยกว่าการตกแต่งด้วยสารเคลือบสารสกัดหยาบเคราติน



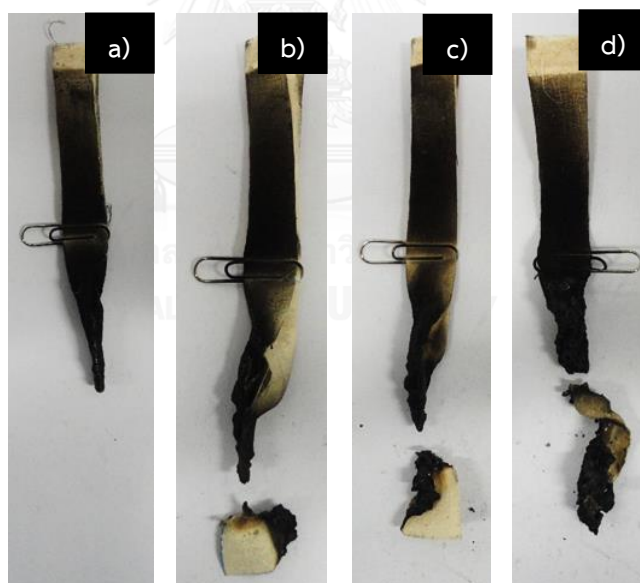
รูปที่ 4.135 ภาพถ่ายของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) ไม่ตกแต่ง และ b) control-f



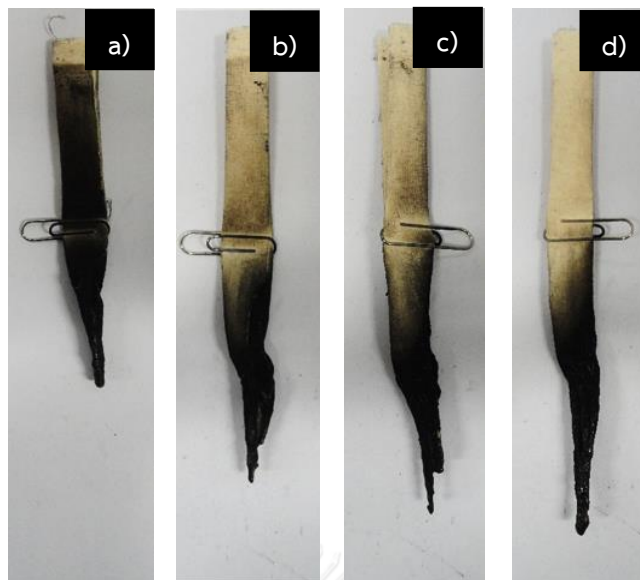
รูปที่ 4.136 ภาพถ่ายของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วย Exolit AP423 สูตรที่มีสารช่วยฉนิก b) AP5-f c) AP7-f d) AP9-f และ e) AP10-f



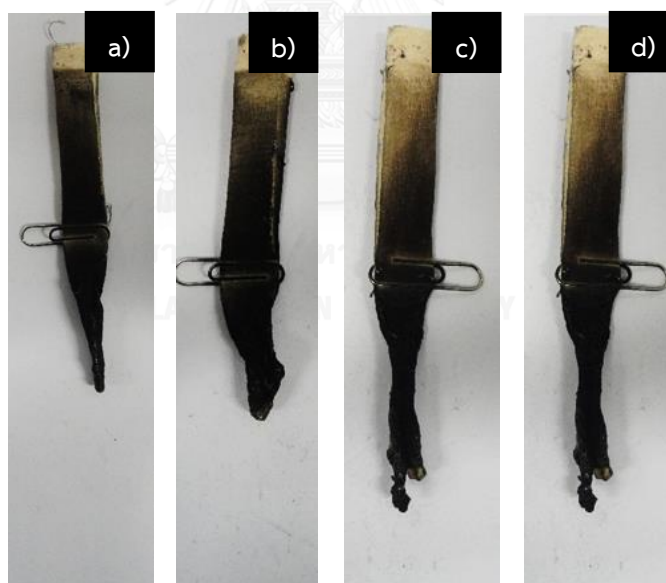
รูปที่ 4.137 ภาพถ่ายของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยพ่น b) AP9KC1-f c) AP7KC3-f และ d) AP5KC5-f



รูปที่ 4.138 ภาพถ่ายของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยพ่น b) AP9KE1-f c) AP7KE3-f และ d) AP5KE5-f



รูปที่ 4.139 ภาพถ่ายของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วยเคราตินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยผนึก b) KC1-f c) KC3-f และ d) KC5-f

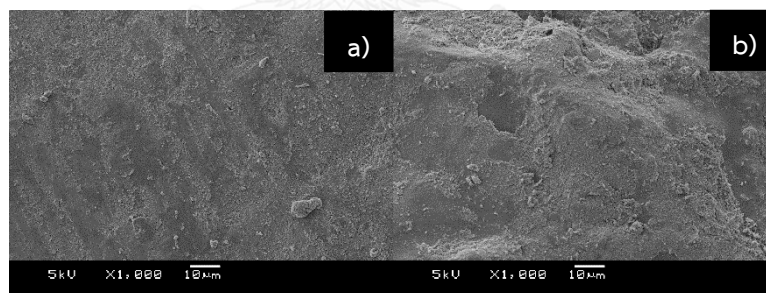


รูปที่ 4.140 ภาพถ่ายของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผนึก b) KE1-f c) KE3-f และ d) KE5-f

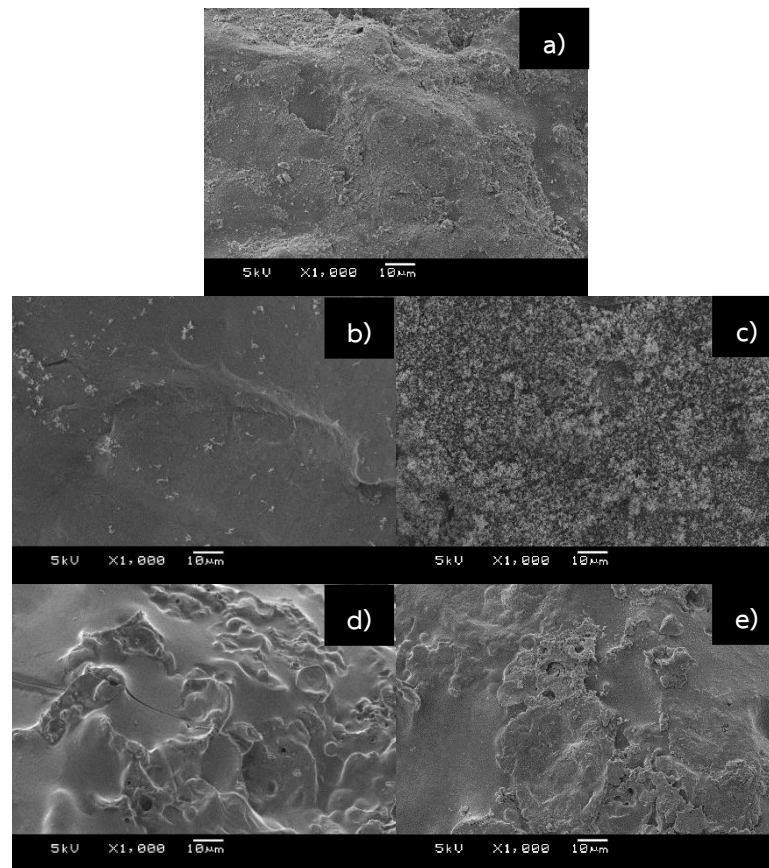
4.2.4.6 ลัทธิฐานวิทยาวิทยาของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ผ่านการตกแต่งห่วงไฟหลังการเผาไหม้ตามมาตรฐาน UL94-VTM

ภาพ SEM ของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ไม่ได้ตกแต่งห่วงไฟและตกแต่งด้วยสารเคลือบควบคุมสูตรที่มีสารช่วยผนึก (control-f) ที่กำลังขยาย 1000 แสดงในรูปที่ 4.141 พบว่าผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ได้ตกแต่งห่วงไฟและที่ตกแต่งด้วย control-f หลังการเผาไหม้ เส้นใยจะหลอมรวมกันเป็นจันไม่มีลักษณะของเส้นใย

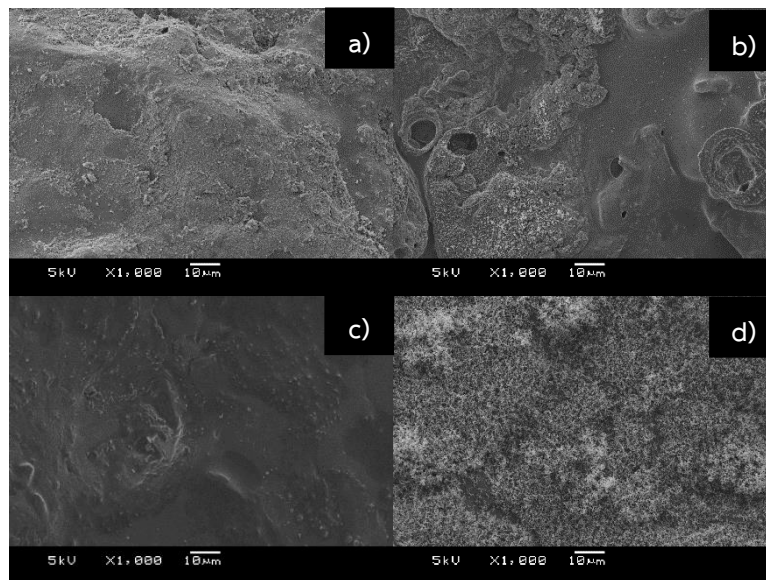
ภาพ SEM ของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 และเคราตินสูตรที่มีสารช่วยผนึก ที่มีปริมาณสารห่วงไฟต่างกัน แสดงในรูปที่ 4.142-4.146 พบว่า ผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 จะแสดงลักษณะผิวพอลิเอสเตอร์หลอมที่ขรุขระ เนื่องจากการปลดปล่อยแก๊สติดไฟยากขณะเผาไหม้ โดยลักษณะผิวที่ขรุขระจะเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณ Exolit AP423 ในสารห่วงไฟเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วย AP5KE5-f จะแสดงรูขนาดใหญ่บนผิวพอลิเอสเตอร์หลอมซึ่งน่าจะเกิดจากการปลดปล่อยแก๊สติดไฟยากของสารห่วงไฟทั้ง 2 ชนิด ส่วนผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ตกแต่งด้วยเคราตินหลังการเผาไหม้ เส้นใยจะหลอมรวมกันเป็นจันไม่มีลักษณะของเส้นใยเช่นเดียวกับผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่ได้ตกแต่งห่วงไฟและที่ตกแต่งด้วย control-f หลังการเผาไหม้



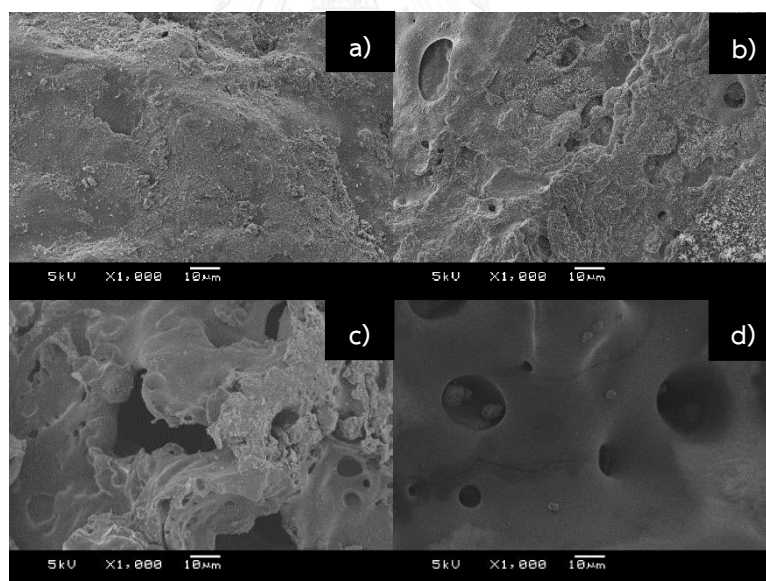
รูปที่ 4.141 ภาพ SEM ของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) ไม่ตกแต่ง และ b) control-f ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



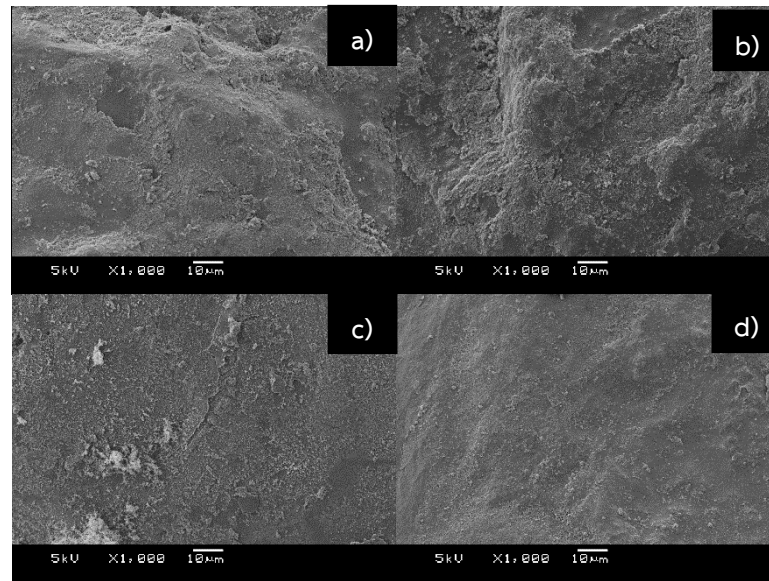
รูปที่ 4.142 ภาพ SEM ของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วย Exolit AP423 สูตรที่มีสารช่วยฟลัก b) AP5-f c) AP7-f d) AP9-f และ e) AP10-f ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



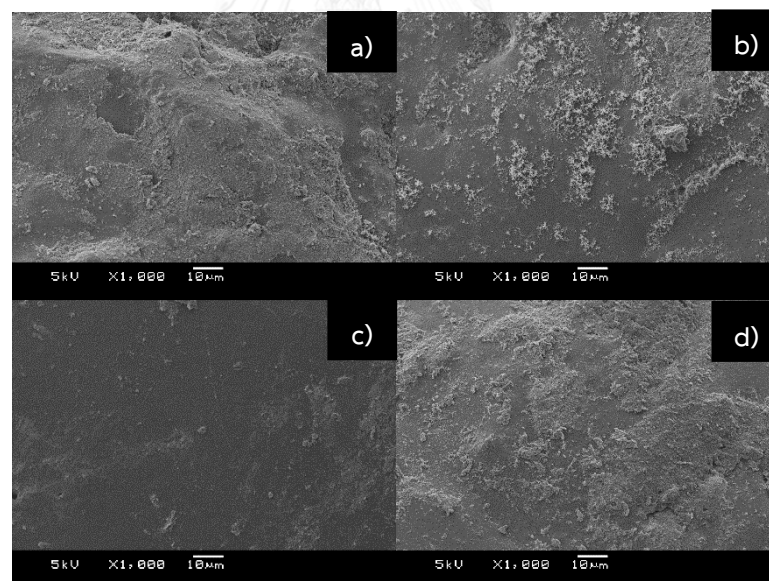
รูปที่ 4.143 ภาพ SEM ของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับคราตินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยผืนิก b) AP9KC1-f c) AP7KC3-f และ d) AP5KC5-f ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 4.144 ภาพ SEM ของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบคราติน สูตรที่มีสารช่วยผืนิก b) AP9KE1-f c) AP7KE3-f และ d) AP5KE5-f ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 4.145 ภาพ SEM ของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วยเคราตินทางการค้า สูตรที่มีสารช่วยผนึก b) KC1-f c) KC3-f และ d) KC5-f ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 4.146 ภาพ SEM ของผ้าพอลิเอสเตอร์หลังการเผาไหม้ที่ตกแต่งด้วย a) control-f และตกแต่งด้วยสารสกัดหยาบเคราติน สูตรที่มีสารช่วยผนึก b) KE1-f c) KE3-f และ d) KE5-f ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการสกัดสารสกัดหยาบเคราะห์จากเส้นผมมนุษย์ด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยใช้สารรีดิวซ์ที่ต่างกันและภาวะที่แตกต่างกัน แล้วนำสารสกัดหยาบเคราะห์ที่ได้มาตกแต่งแห้งไฟร่วมกับแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตทางการค้าด้วยวิธีการเคลือบแบบปาดอย่างผ่านสกรีนลงบนผ้าทอ 3 ชนิด คือ ผ้าฝ้าย ผ้าพอลิเอสเตอร์ และผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบสูตรสารเคลือบสูตรที่ไม่มีสารช่วยผนึกและสูตรที่มีสารช่วยผนึก เพื่อให้สารแห้งไฟมีประสิทธิภาพในการแห้งไฟ และการใช้งานมากที่สุด สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 การสกัดเคราะห์จากเส้นผมมนุษย์

1. อุณหภูมิและความดันที่เหมาะสมในการสกัดเคราะห์จากเส้นผมมนุษย์ คือ การสกัดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันบรรยากาศ เนื่องจากการสกัดเคราะห์ด้วยสารละลาย Shindai สามารถสกัดเคราะห์ได้ปริมาณมากขึ้น เมื่อเพิ่มเวลาในการสกัดนานขึ้น

2. สารรีดิวซ์และเวลาที่เหมาะสมในการสกัดเคราะห์จากเส้นผมมนุษย์ คือ การสกัดด้วย 1,2-อีเทนไดโทล ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ยูเรีย ความเข้มข้น 5 โมลาร์ และไทโอยูเรีย ความเข้มข้น 2.6 โมลาร์ pH 8.5 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เนื่องจากสามารถสกัดสารสกัดหยาบเคราะห์ได้สูงถึงร้อยละ 61.89 และมีปริมาณโปรตีนในสารสกัดหยาบสูงถึงร้อยละ 68.52 และใช้เวลาในการสกัดน้อยที่สุด จึงเป็นวิธีการสกัดสารสกัดหยาบเคราะห์จากเส้นผมมนุษย์ที่มีประสิทธิภาพที่สุด เนื่องจากการประหยัดเวลาและเชื้อเพลิงในการสกัดเคราะห์ และได้ปริมาณสารสกัดหยาบเคราะห์มากที่สุด

ดังนั้นสารสกัดหยาบที่สกัดด้วยสารรีดิวซ์ 1,2-อีเทนไดโทล ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จึงเหมาะสำหรับนำไปตกแต่งแห้งไฟร่วมกับแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตทางการค้า เพื่อปรับปรุงสมบัติแห้งไฟของผ้าทอ และลดปริมาณการใช้แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตทางการค้า

5.1.2 การตกแต่งผนังไฟผ้าทอด้วยเคราตินร่วมกับแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต ด้วยวิธีการเคลือบแบบปาดยางผ่านสกรีน

1. แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตทางการค้าที่เหมาะสมในการใช้ตกแต่งผนังไฟร่วมกับเคราตินคือ Exolit AP423 ซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็ก (ประมาณ 20 ไมโครเมตร) เนื่องจากมีเสถียรภาพทางความร้อนดีกว่า Exolit AP422 (ประมาณ 50 ไมโครเมตร) โดย Exolit AP423 มีอัตราการสลายตัวทางความร้อนเร็วกว่า Exolit AP422 เนื่องจาก Exolit AP423 มีขนาดอนุภาคเล็ก (สายโซ่โมเลกุลสั้น) ทำให้มีการสลายตัวเร็วกว่า Exolit AP422 จึงปลดปล่อยแก๊สติดไฟยากออกมาได้รวดเร็วกว่า กลไกการผนังไฟจึงเกิดขึ้นเร็วและมีประสิทธิภาพกว่า Exolit AP422

2. Exolit AP423 และเคราตินสามารถใช้เป็นสารผนังไฟสำหรับตกแต่งผ้าฝ้ายด้วยวิธีการเคลือบแบบปาดยางได้ โดยผ้าฝ้ายที่ตกแต่งผนังไฟด้วย Exolit AP423 ร้อยละ 9 และ 7 ร่วมกับเคราตินร้อยละ 1 และ 3 ตามลำดับ สามารถผนังไฟได้ดี และให้ค่า VTM-0 นอกจากนี้ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งผนังไฟด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราตินยังให้ค่า LOI สูงถึง 34.4 (AP9KE1-f) แสดงว่าเคราตินมีประสิทธิภาพในการเสริมการผนังไฟของ Exolit AP423 ให้ Exolit AP423 มีประสิทธิภาพในการเกิดขาร์มากขึ้น นอกจากนี้สารช่วยฉนวน จะช่วยให้สารยึดนาโนพอลิยูรีเทนเกิดการเชื่อมขวางเป็นฟิล์มเคลือบผนังไฟให้ติดบนผ้าฝ้ายส่งผลให้ผ้าฝ้ายมีความสามารถในการผนังไฟมากกว่าสูตรที่ไม่มีสารช่วยฉนวน

3. Exolit AP423 และเคราตินไม่สามารถใช้เป็นสารผนังไฟสำหรับตกแต่งผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์และผ้าพอลิเอสเตอร์ด้วยวิธีการเคลือบแบบปาดยางได้ เนื่องจากไม่สามารถจัดชั้นค่าความสามารถในการผนังไฟได้ จึงไม่สามารถปรับปรุงสมบัติผนังไฟของผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์และผ้าพอลิเอสเตอร์ได้

ดังนั้น Exolit AP423 และเคราตินสามารถใช้เป็นสารผนังไฟในการตกแต่งผนังไฟผ้าฝ้ายให้มีประสิทธิภาพในการผนังไฟที่ดีได้ โดยการใช้เคราตินร่วมกับ Exolit AP423 สามารถลดปริมาณการใช้ Exolit AP423 ได้มากที่สุดร้อยละ 3 โดยยังสามารถจัดชั้นค่าความสามารถในการผนังไฟได้ VTM-0

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรพอกสีเส้นผมมนุษย์ก่อนการนำมาสกัดเคราติน เพื่อให้ได้สารสกัดหยาบเคราตินที่มีสีอ่อนลง ทำให้มีความเหมาะสมในการตกแต่งบนผ้าทอมากขึ้น เนื่องจากไม่ทำให้สีของผ้าเปลี่ยนไปหลังการตกแต่ง

2. ควรวิเคราะห์และควบคุมปริมาณธาตุซัลเฟอร์และไนโตรเจนในสารตกแต่งห่วงไฟ เพื่อศึกษาปริมาณและอัตราส่วนของธาตุทั้งสองที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการห่วงไฟ

3. ควรศึกษาและปรับปรุงให้เคราตินและแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตให้สามารถยึดติดบนผ้าฝ้ายได้ดี เพื่อเพิ่มความคงทนต่อการซักล้างของสารห่วงไฟ

4. ควรศึกษาการประยุกต์เคราตินเป็นองค์ประกอบสารห่วงไฟระบบอินทนูเมสเซนต์ เนื่องจากความสามารถในการปลดปล่อยแก๊สติดไฟยากของเคราติน สามารถใช้เป็นสารทำให้เกิดโฟม (blowing agent) ได้



รายการอ้างอิง

1. สถิติสาธารณสุขไทย ปี 2557. [cited 2559 21 มีนาคม]; Available from: http://122.155.1.145/inner.directing-6.191/cms/menu_4469/2015.1/.
2. Horrocks, A.R. and D. Price, *Fire retardant materials*. 2001, England: Woodhead publishing limited.
3. Lewin, M., *Unsolved problems and unanswered questions in flame retardance of polymers*. Polymer Degradation and Stability, 2005. 88: p. 13-19.
4. worldometers. *Current World Population*. 2016 [cited 2016 22 March]; Available from: <http://www.worldometers.info/world-population/#total>.
5. Rouse, J.G. and M.E.V. Dyke, *A Review of Keratin-Based Biomaterials for Biomedical Applications*. Materials, 2010. 3: p. 999-1014.
6. Hill, P., H. Brantley, and M.V. Dyke, *Some properties of keratin biomaterials: Kerateines*. Biomaterials, 2010. 31: p. 585–593.
7. Teresa, K.-K. and B. Justyna, *Review Biodegradation of keratin waste: Theory and practical aspects*. Waste Management, 2011. 31: p. 1689–1701.
8. Richter, J.R., et al., *Structure–property relationships of meta-kerateine biomaterials derived from human hair*. Acta Biomaterialia, 2012. 8: p. 274–281.
9. Dickerson, R.E. and I. Gels, *The Structure and Action of Proteins*. 1969, New York: Harper & Row.
10. ศุภศิษฏ์ อรุณรุ่งสวัสดิ์, ชีวเคมีพื้นฐาน *Fundamentals of Biochemistry*. 2552, กรุงเทพฯ: บริษัทสำนักพิมพ์ท็อป จำกัด.
11. *protein folding*. [cited 2016 22 March]; Available from: http://www.nature.com/horizon/proteinfolding/background/images/importance_f3.gif.
12. Coulombe, P.A. and M.B. Omary, *‘Hard’ and ‘soft’ principles defining the structure, function and regulation of keratin intermediate filaments*. Current Opinion in Cell Biology, 2002. 14: p. 110–122.

13. ดาววัลย์ ฉิมภู, ชีวเคมี. 2553, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
14. Patthy, L.s., *Protein Evolution*. 2008: blackwell Publishing Ltd.
15. Brebu, M. and I. Spiridon, *Thermal degradation of keratin waste*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2011. 91: p. 288–295.
16. *Cysteine*. [cited 2016 25 May].
17. *L-Cystine*. [cited 2016 25 May].
18. Popescu, C. and H. Höcker, *Hair—the most sophisticated biological composite material*. Chemical Society Reviews, 2007. 36: p. 1282–1291.
19. วินิตา บัณฑิต, อรศรี รมยะนันท์, and สุจินต์ อึ้งถาวร, *วิทยาอิสโต 2: อวัยวะในระบบ*. 2535, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
20. Zahn, H., *Progress report on hair keratin research*. International Journal of Cosmetic Science, 2002. 24: p. 163-169.
21. Mathison, G.E., *The microbiological decomposition of keratin*. Annales de la Societe belge de medecine tropicale, 1964. 44: p. 767-792.
22. Bio-Rad Laboratories, I., *Important Factors Influencing Protein Solubility for 2-D Electrophoresis*, in *BioRadiations* 2004. p. 30-32.
23. *Hydrogen bonds in Protein*. 2016 [cited 2016 20 May]; Available from: http://mandevillehigh.stpsb.org/teachersites/laura_decker/protein_hydrogen_bond.jpg.
24. Houk, J. and G.M. Whitesides, *Structure-Reactivity Relations for Thiol-Disulfide Interchange*. Journal of the American Chemical Society, 1987. 109: p. 6825-6836.
25. *2-Mercaptoethanol*. [cited 2016 25 March]; Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/2-Mercaptoethanol>.
26. *Thioglycolic acid*. [cited 2016 25 March]; Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Thioglycolic_acid.
27. *1,2-Ethanedithiol*. [cited 2016 25 March]; Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/1,2-Ethanedithiol>.
28. TIAN, C.M., H.Z.G. Z. LI, and J.Z. XU, *Study on the Thermal Degradation of Flame Retardant Wools*. JOURNAL OF FIRE SCIENCES, 2003. 21: p. 155-162.

29. Horacek, H. and R. Grabner, *Advantages of flame retardants based on nitrogen compounds*. *Polymer Degradation and Stability* 1996. 54: p. 205-215.
30. Laoutid, F., et al., *New prospects in flame retardant polymer materials: From fundamentals to nanocomposites*. *Materials Science and Engineering R*, 2009. 63: p. 100–125.
31. Mather, R.R. and R.H. Wardman, *The Chemistry of Textile Fibres*. 2011: RSC Publishing.
32. อุดมกิจเดชา, ว., วิทยาศาสตร์เส้นใย. 2543: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
33. *Chemical structure of cellulose* [cited 2016 5 April]; Available from: www.researchgate.net.
34. Kandola, B.K., et al., *Flame-retardant treatments of cellulose and their influence on the mechanism of cellulose pyrolysis* *Journal of Macromolecular Science - Reviews in Macromolecular Chemistry & Physics*, 1996. 36(4): p. 721-794.
35. Mamleev, V., S. Bourbigot, and J. Yvon, *Kinetic analysis of the thermal decomposition of cellulose: The main step of mass loss*. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2007. 80 p. 151–165.
36. Patwardhan, P.R., et al., *Product distribution from fast pyrolysis of glucose-based carbohydrates*. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2009. 86 p. 323–330.
37. *Types of Spinning (Man-Made Fibers)*. [cited 2016 20 April]; Available from: <http://textileengineerr.blogspot.com/2010/10/types-of-spinning-man-made-fibers.html>.
38. Levchik, S.V. and E.D. Weil, *A review on thermal decomposition and combustion of thermoplastic polyesters*. *POLYMERS FOR ADVANCED TECHNOLOGIES*, 2004. 15: p. 691–700.
39. *Fire triangle*. [cited 2016 25 April]; Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Fire_triangle.
40. *ammonium polyphosphate*. [cited 2016 25 April]; Available from: <http://www.sinoharvest.com/products/Ammonium-polyphosphate.shtml>.

41. *ammonium polyphosphate description*. [cited 2016 25 April]; Available from: <http://www.specialchem4polymers.com/tc/ammonium-polyphosphate/index.aspx?id=description>.
42. วิเชียร จิระกรานนท์ and นงเยาว์ จิระกรานนท์, การพิมพ์สกรีน (*Screen Printing Techniques*). 2546: อูษาการพิมพ์.
43. อรุษา สรวารี, สารเคลือบผิว (สี วาร์นิช และแล็กเกอร์). 2544: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
44. Inc., U.L., *UL94 Tests for Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances*. 2006: Underwriters Laboratories Inc.
45. O'DONNELL, J. and E.O.P. THOMPSON, *STUDIES ON REDUCED WOOL*. Australian Journal of Biological Sciences, 1964. 17: p. 973-989.
46. DAY, T.H., *INTERSPECIFIC VARIATION IN THE HAIR PROTEINS*. Comparative Biochemistry and Physiology, 1972. 43B: p. 361-367.
47. KON, R., et al., *Analysis of the damaged components of permed hair using biochemical technique*. Journal of Cosmetic Science, 1998. 49: p. 13-22.
48. NAKAMURA, A., et al., *A Rapid Extraction Procedure of Human Hair Proteins and Identification of Phosphorylated Species*. Biological and Pharmaceutical Bulletin, 2002. 25(5): p. 569—572.
49. Goddard, D.R. and L. Michaelis, *A STUDY ON KERATIN*. The Journal of Biological Chemistry, 1934. 106: p. 605-614.
50. Zoccola, M., Annalisa Aluigi, and C. Tonin, *Characterisation of keratin biomass from butchery and wool industry wastes*. Journal of Molecular Structure, 2009 938: p. 35–40.
51. Reichl, S., *Films based on human hair keratin as substrates for cell culture and tissue engineering*. Biomaterials, 2009 30: p. 6854–6866.
52. Prasong, S. and T. Wasan, *Preparation and Characterization of Hair Keratin/Gelatin Blend Films*. Pakistan Journal of Biological Sciences, 2011. 14(5): p. 351-356.
53. Reichl, L., S. Reichl, and C.C. Müller-Goymann, *Keratin film made of human hair as a nail plate model for studying drug permeation*. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 2011. 78 p. 432–440.

54. ธนาวัฒน์ ชัยวุฒินันท์, การสกัดเคราตินจากขนไก่เพื่อใช้ตกแต่งห่วงใยไฟสำหรับผ้าฝ้าย, in วัสดุศาสตร์. 2002, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ.
55. Gaan, S. and G. Sun, *Effect of nitrogen additives on thermal decomposition of cotton*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2009. 84 p. 108–115.
56. Liu, W., L. Chen, and Y.-Z. Wang, *A novel phosphorus-containing flame retardant for the formaldehyde-free treatment of cotton fabrics*. Polymer Degradation and Stability 2012. 97 p. 2487-2491.
57. Charuchinda, S., K. Srikulkit, and T. Mowattana, *Co-application of Sodium Polyphosphate and Chitosan to Improve Flame Retardancy of Cotton Fabric*. The Journal of Scientific Research Chulalongkorn University, 2005. 30(1): p. 97-107.
58. Wu, W. and C.Q. Yang, *Comparison of different reactive organophosphorus flame retardant agents for cotton. Part II: Fabric flame resistant performance and physical properties*. Polymer Degradation and Stability 2007. 92: p. 363-369.
59. Sabyasachi Gaan a, G.S.a., *, Katherine Hutches a, Mark H Engelhard, *Effect of nitrogen additives on flame retardant action of tributyl phosphate: Phosphorus-nitrogen synergism*. Polymer Degradation and Stability 2008. 93: p. 99-108.
60. Nam, S., et al., *Effect of urea additive on the thermal decomposition kinetics of flame retardant greige cotton nonwoven fabric*. Polymer Degradation and Stability 2012. 97: p. 738-746.
61. *Exolit® AP 422*. [cited 2016 20 May].
62. *Exolit® AP 423*. [cited 2016 20 May].
63. *Quick Start™ Bradford Protein Assay*. Bio-Rad Laboratories, Inc. p. 1-36.
64. *A Guide to Polyacrylamide Gel Electrophoresis and Detection*. Bio-Rad Laboratories, Inc. p. 1-47.
65. *ISO 105-E04:2013 Textiles -- Tests for colour fastness -- Part E04: Colour fastness to perspiration*. 2013, TC/SC.
66. Int'l, A., *ASTM D 5035 – 06 Standard Test Method for Breaking Force and Elongation of Textile Fabrics (Strip Method)*. 2008, ASTM Int'l. p. 1-7.

67. TCI/24, BS 2471:2005 *Textiles. Woven fabrics. Determination of mass per unit length and mass per unit area*. 2005, TCI/24. p. 1-10.
68. Xu, W., et al., *Modification of wool fiber using steam explosion*. European Polymer Journal 2006. 42: p. 2168–2173.
69. Wang, W., et al., *Preparation and characterization of microencapsulated ammonium polyphosphate with UMF and its application in WPCs*. Construction and Building Materials 2014. 65: p. 151–158.
70. *A review of application of ammonium polyphosphate as intumescent flame retardant in thermoplastic composites*. Composites 2016. 84(Part B): p. 155-174.
71. Chung, C., M. Lee, and E.K. Choe, *Characterization of cotton fabric scouring by FT-IR ATR spectroscopy*. Carbohydrate Polymers 2004. 58: p. 417–420.
72. *Surface modification of polyester fabric using polyvinyl alcohol in alkaline medium*. Indian Journal of Fibre & Textile Research, 2012. 37: p. 287-291.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 ปริมาณสารสกัดหยาบเคราดินที่สกัดด้วย Shindai ที่ภาวะต่างๆ

Pressure	Temp.	Time (hr)	batch	% yield	mean	SD	
atm	Tr	4	1	30.02	28.93	2.78	
			2	31.00			
			3	25.77			
		6	1	34.28	27.87	5.79	
			2	23.00			
			3	26.34			
		8	1	31.49	29.37	3.08	
			2	25.84			
			3	30.77			
	50°C		4	1	37.50	32.27	4.71
				2	30.93		
				3	28.36		
6			1	37.59	33.11	4.06	
			2	29.69			
			3	32.05			
8			1	39.82	34.26	4.87	
			2	30.77			
			3	32.18			

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย Shindai ที่ภาวะต่างๆ

Pressure	Temp.	Time (hr)	batch	% yield	mean	SD
atm	70°C	4	1	35.87	31.80	4.37
			2	27.19		
			3	32.35		
		6	1	29.55	26.73	2.71
			2	26.50		
			3	24.15		
		8	1	22.69	21.92	2.95
			2	24.41		
			3	18.67		
low	Tr	4	1	33.00	31.26	1.69
			2	31.15		
			3	29.62		
		6	1	31.57	29.61	2.37
			2	30.28		
			3	26.97		
		8	1	31.43	28.50	3.32
			2	24.90		
			3	29.18		
	50°C	4	1	10.51	7.00	3.21
			2	4.21		
			3	6.27		

ตารางที่ ก.2 ปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดโดยไม่มีสารรีดิวซ์ (UT) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

Time (hr)	batch	%yield	mean	SD
4	1	0.92	1.34	0.72
	2	0.92		
	3	2.17		
24	1	2.12	2.28	0.45
	2	2.79		
	3	1.92		
48	1	4.55	4.38	0.14
	2	4.28		
	3	4.32		
72	1	9.41	6.66	2.49
	2	4.57		
	3	5.99		
84	1	3.99	4.09	0.38
	2	3.77		
	3	4.51		

ตารางที่ ก.3 ปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย Shindai ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

Time (hr)	batch	% yield	mean	SD
4	1	37.50	32.26	4.71
	2	30.93		
	3	28.36		
24	1	38.81	35.08	3.72
	2	35.06		
	3	31.38		
48	1	39.66	37.07	2.26
	2	35.56		
	3	35.98		
72	1	50.20	48.25	1.90
	2	48.18		
	3	46.39		
84	1	38.34	46.63	10.54
	2	58.50		
	3	43.05		

ตารางที่ ก.4 ปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย TA pH2 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

Time (hr)	batch	%yield	mean	SD
4	1	24.22	21.61	3.39
	2	17.78		
	3	22.82		
24	1	22.82	23.70	1.48
	2	22.86		
	3	25.41		
48	1	28.34	31.88	7.07
	2	27.29		
	3	40.02		
72	1	41.82	37.35	5.88
	2	39.54		
	3	30.69		
84	1	24.12	25.94	1.74
	2	27.58		
	3	26.13		

ตารางที่ ก.5 ปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย TA pH8.5 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

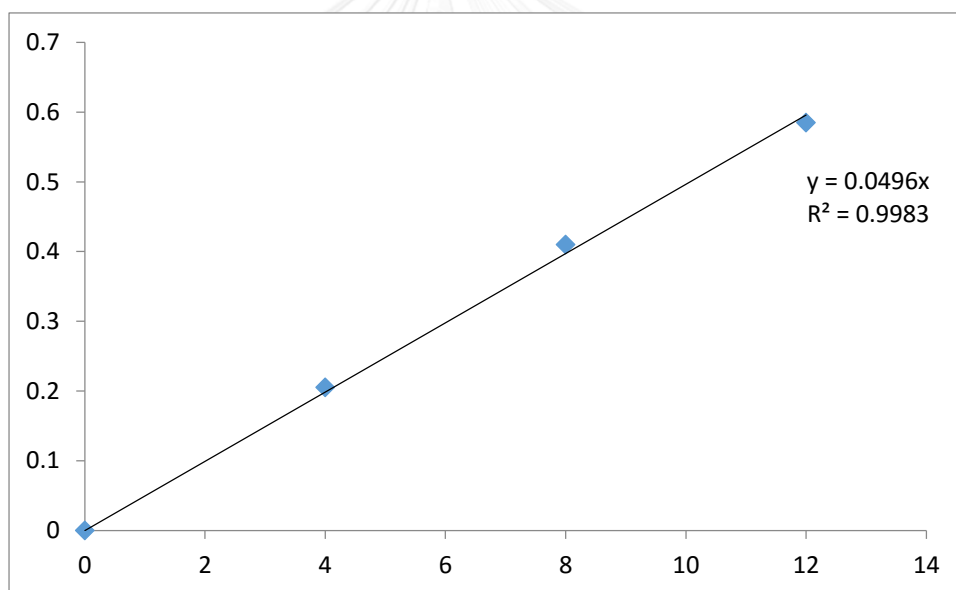
Time (hr)	batch	%yield	mean	SD
4	1	35.16	32.38	2.99
	2	32.76		
	3	29.22		
24	1	32.20	29.75	2.67
	2	30.14		
	3	26.90		
48	1	32.36	29.43	6.06
	2	33.46		
	3	22.46		
72	1	29.58	35.13	6.33
	2	33.80		
	3	42.02		
84	1	44.52	44.77	10.93
	2	33.96		
	3	55.82		

ตารางที่ ก.6 ปริมาณสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย EDT ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

Time (hr)	Batch	% yield	mean	SD
4	1	57.70	61.89	4.09
	2	62.08		
	3	65.88		
24	1	42.90	41.01	10.70
	2	29.50		
	3	50.64		
48	1	30.82	35.84	4.42
	2	35.84		
	3	39.64		
72	1	38.52	33.99	9.13
	2	23.48		
	3	39.96		
84	1	37.86	34.21	3.71
	2	30.44		
	3	34.32		

ตารางที่ ก.7 ค่า absorbance ของโปรตีนมาตรฐาน

protein ug/100ul	1 st OD (595 nm)	2 nd OD (595 nm)	mean OD (mean OD (1 st & 2 nd) – blank) (595 nm)
0 (blank)	0.51	0.52	0
4	0.75	0.69	0.21
8	0.91	0.94	0.41
12	1.12	1.08	0.59
16	1.25	1.22	0.72
20	1.40	1.39	0.88



รูปที่ ก.1 กราฟปริมาณโปรตีนของโปรตีนมาตรฐาน (standard curve)

ตารางที่ ก.8 ค่า absorbance ของเคราตินทางการค้า (KC)

Test conc. (ug/100ul)	test	OD (595 nm)
16	1 st	0.13
	2 nd	0.12
	3 rd	0.13
20	1 st	0.10
	2 nd	0.11
	3 rd	0.11

ตารางที่ ก.9 ค่า absorbance ของสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดโดยไม่มีสารรีดิวซ์ (UT) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

Time (hr)	Test conc. (ug/100ul)	test	OD (595 nm)
4	16	1 st	0.03
		2 nd	0.01
		3 rd	0.02
	20	1 st	0.03
		2 nd	0.02
		3 rd	0.02
24	16	1 st	0.17
		2 nd	0.17
		3 rd	0.18
	20	1 st	0.17
		2 nd	0.19
		3 rd	0.18

ตารางที่ ก.9 (ต่อ) ค่า absorbance ของสารสกัดหยาดเขราตินที่สกัดโดยไม่มีสารรีดิวซ์ (UT) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

Time (hr)	Test conc. (ug/100ul)	test	OD (595 nm)
48	16	1 st	0.19
		2 nd	0.19
		3 rd	0.19
	20	1 st	0.26
		2 nd	0.25
		3 rd	0.25
72	16	1 st	0.15
		2 nd	0.17
		3 rd	0.18
	20	1 st	0.18
		2 nd	0.21
		3 rd	0.21
84	16	1 st	0.23
		2 nd	0.25
		3 rd	0.22
	20	1 st	0.25
		2 nd	0.28
		3 rd	0.28

ตารางที่ ก.10 ค่า absorbance ของสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย Shindai ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

Time (hr)	Test conc. (ug/100ul)	test	OD (595 nm)
4	16	1 st	0.17
		2 nd	0.15
		3 rd	0.16
	20	1 st	0.17
		2 nd	0.19
		3 rd	0.18
24	16	1 st	0.23
		2 nd	0.23
		3 rd	0.22
	20	1 st	0.33
		2 nd	0.30
		3 rd	0.32
48	16	1 st	0.42
		2 nd	0.46
		3 rd	0.43
	20	1 st	0.51
		2 nd	0.57
		3 rd	0.52

ตารางที่ ก.10 (ต่อ) ค่า absorbance ของสารสกัดหยาบเคราดินที่สกัดด้วย Shindai ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

Time (hr)	Test conc. (ug/100ul)	test	OD (595 nm)
72	16	1 st	0.33
		2 nd	0.23
		3 rd	0.28
	20	1 st	0.30
		2 nd	0.30
		3 rd	0.32
84	16	1 st	0.09
		2 nd	0.10
		3 rd	0.10
	20	1 st	0.12
		2 nd	0.13
		3 rd	0.12

ตารางที่ ก.11 ค่า absorbance ของสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย TA pH2 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

Time (hr)	Test conc. (ug/100ul)	test	OD (595 nm)
4	16	1 st	0.23
		2 nd	0.26
		3 rd	0.24
	20	1 st	0.36
		2 nd	0.34
		3 rd	0.37
24	16	1 st	0.37
		2 nd	0.35
		3 rd	0.35
	20	1 st	0.43
		2 nd	0.44
		3 rd	0.38
48	16	1 st	0.14
		2 nd	0.15
		3 rd	0.25
	20	1 st	0.23
		2 nd	0.22
		3 rd	0.23

ตารางที่ ก.11 (ต่อ) ค่า absorbance ของสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย TA pH2 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

Time (hr)	Test conc. (ug/100ul)	test	OD (595 nm)
72	16	1 st	0.06
		2 nd	0.11
		3 rd	0.10
	20	1 st	0.16
		2 nd	0.17
		3 rd	0.16
84	16	1 st	0.04
		2 nd	0.04
		3 rd	0.07
	20	1 st	0.07
		2 nd	0.08
		3 rd	0.06

ตารางที่ ก.12 ค่า absorbance ของสารสกัดหยาบเคราดินที่สกัดด้วย TA pH8.5 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

Time (hr)	Test conc. (ug/100ul)	test	OD (595 nm)
4	16	1 st	0.04
		2 nd	0.06
		3 rd	0.05
	20	1 st	0.06
		2 nd	0.07
		3 rd	0.08
24	16	1 st	0.07
		2 nd	0.03
		3 rd	0.08
	20	1 st	0.09
		2 nd	0.12
		3 rd	0.12
48	16	1 st	0.10
		2 nd	0.13
		3 rd	0.14
	20	1 st	0.14
		2 nd	0.15
		3 rd	0.15

ตารางที่ ก.12 (ต่อ) ค่า absorbance ของสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย TA pH8.5 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

Time (hr)	Test conc. (ug/100ul)	test	OD (595 nm)
72	16	1 st	0.10
		2 nd	0.12
		3 rd	0.11
	20	1 st	0.19
		2 nd	0.20
		3 rd	0.20
84	16	1 st	0.22
		2 nd	0.23
		3 rd	0.23
	20	1 st	0.28
		2 nd	0.30
		3 rd	0.29

ตารางที่ ก.13 ค่า absorbance ของสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย EDT ที่อุณหภูมิ
องศาเซลเซียส

Time (hr)	Test conc. (ug/100ul)	test	OD (595 nm)
4	16	1 st	0.45
		2 nd	0.50
		3 rd	0.47
	20	1 st	0.61
		2 nd	0.57
		3 rd	0.58
24	16	1 st	0.37
		2 nd	0.33
		3 rd	0.39
	20	1 st	0.59
		2 nd	0.58
		3 rd	0.54
48	16	1 st	0.35
		2 nd	0.35
		3 rd	0.40
	20	1 st	0.39
		2 nd	0.37
		3 rd	0.38

ตารางที่ ก.13 (ต่อ) ค่า absorbance ของสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย EDT ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

Time (hr)	Test conc. (ug/100ul)	test	OD (595 nm)
72	16	1 st	0.38
		2 nd	0.40
		3 rd	0.38
	20	1 st	0.45
		2 nd	0.46
		3 rd	0.45
84	16	1 st	0.16
		2 nd	0.17
		3 rd	0.19
	20	1 st	0.20
		2 nd	0.19
		3 rd	0.20

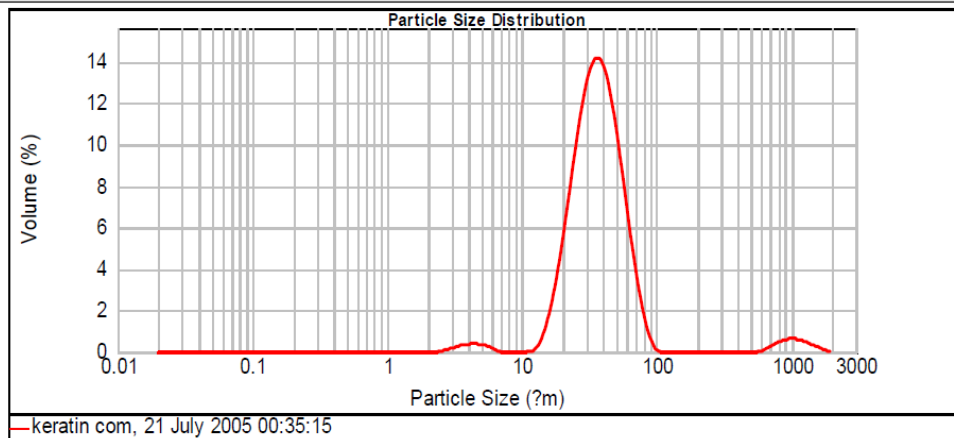
ตารางที่ ก.14 ปริมาณโปรตีนในสารสกัดหยาบเคราติน

Time (hr)	UT		Shindai		TA2		TA8.5		EDT	
	yield	SD	yield	SD	yield	SD	yield	SD	yield	SD
4	7.12	1.32	21.65	1.69	38.14	3.91	2.18	1.02	68.52	2.81
24	10.20	3.62	34.57	2.55	49.98	3.17	22.63	2.46	59.47	8.28
48	17.00	2.02	62.70	3.16	25.86	5.67	28.16	1.18	48.56	5.68
72	18.96	4.02	37.90	5.44	15.53	4.18	23.31	1.97	54.34	2.18
84	33.00	1.05	13.68	0.73	7.12	1.86	32.32	2.32	23.61	1.91

ภาคผนวก ข

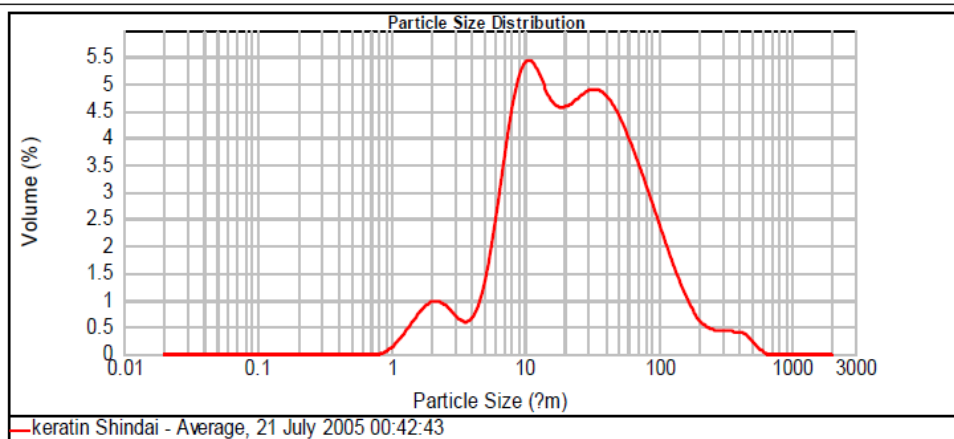
การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของเคราตินทางการค้า และสารสกัดหยาบเคราติน โดยใช้เทคนิค Laser Particle Size Analyzer (LPSA)

Concentration: 0.0538 %Vol	Span : 1.154	Uniformity: 1.21	Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.198 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 30.228 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 69.518 um	
d(0.1): 20.823 um	d(0.5): 35.881 um	d(0.9): 62.213 um	



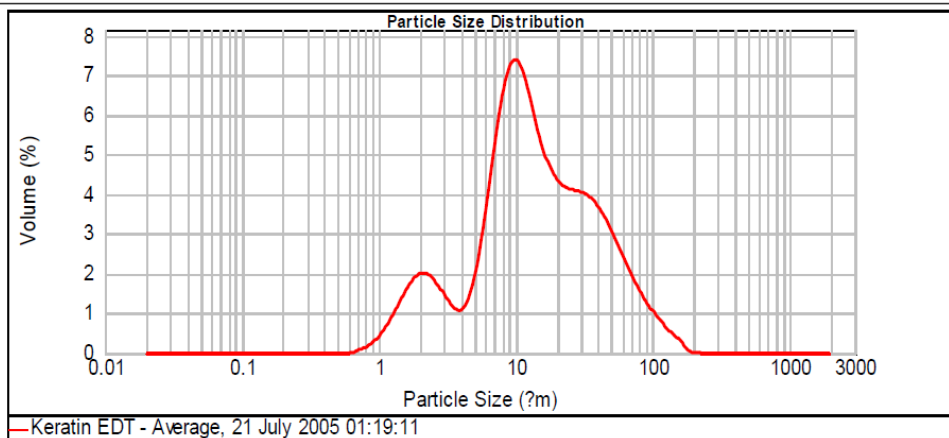
รูปที่ ข.1 การกระจายขนาดอนุภาคของเคราตินทางการค้า

Concentration: 0.0264 %Vol	Span : 3.977	Uniformity: 1.42	Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.504 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 11.912 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 43.085 um	
d(0.1): 6.117 um	d(0.5): 22.585 um	d(0.9): 95.942 um	



รูปที่ ข.2 การกระจายขนาดอนุภาคของสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย 2-เมอร์แคปโทเอทานอล (Shindai) 48 ชั่วโมง

Concentration: 0.0130 %Vol	Span : 3.977	Uniformity: 1.21	Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.819 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 7.327 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 22.309 um	
d(0.1): 2.675 um	d(0.5): 12.755 um	d(0.9): 53.394 um	



รูปที่ ข.3 การกระจายขนาดอนุภาคของสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย 1,2-อีเทนไดโทอล (EDT) 4 ชั่วโมง

ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค.1 การสลายตัวทางความร้อนของเคราตินทางการค้าและสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วยสารรีดิวซ์ต่างกัน

ตัวอย่าง	T _{onset} (°C)	T _{max} (°C)	ปริมาณชาร์ (ร้อยละ)
เคราตินทางการค้า (KC)	247	334	17.7
สารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย UT 84 ชั่วโมง	237	280	5.88
สารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย Shindai 48 ชั่วโมง	202	310	10.5
สารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย TA pH 2, 24 ชั่วโมง	222	330	4.2
สารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย TA pH 8.5, 84 ชั่วโมง	236	305	7.3
สารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย EDT 4 ชั่วโมง	220	336	8.6

T_{onset} คือ อุณหภูมิเริ่มสลายตัวทางความร้อน (องศาเซลเซียส)

T_{max} คือ อุณหภูมิที่มีอัตราการสลายตัวทางความร้อนมากที่สุด (องศาเซลเซียส)

ปริมาณชาร์ คือ ปริมาณชาร์ที่เหลืออยู่หลังการสลายตัวทางความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส (ร้อยละ)

ตารางที่ ค.2 การสลายตัวทางความร้อนของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตที่มีขนาดอนุภาคต่างกัน

ตัวอย่าง	T _{onset1} (°C)	T _{onset2} (°C)	T _{onset3} (°C)	T _{max3} (°C)	ปริมาณชาร์ (ร้อยละ)
Exolit AP422	315	622	ไม่มี	686	21.8
Exolit AP423	176	315	607	665	39.6

T_{onset1} คือ อุณหภูมิเริ่มสลายตัวทางความร้อนขั้นที่ 1 (องศาเซลเซียส)

T_{onset2} คือ อุณหภูมิเริ่มสลายตัวทางความร้อนขั้นที่ 2 (องศาเซลเซียส)

T_{onset3} คือ อุณหภูมิเริ่มสลายตัวทางความร้อนขั้นที่ 3 (องศาเซลเซียส)

T_{max3} คือ อุณหภูมิที่มีอัตราการสลายตัวทางความร้อนมากที่สุดของการสลายตัวทางความร้อนขั้นที่ 3 (องศาเซลเซียส)

ปริมาณชาร์ คือ ปริมาณชาร์ที่เหลืออยู่หลังการสลายตัวทางความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส (ร้อยละ)

ตารางที่ ค.3 การสลายตัวทางความร้อนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วย Exolit AP423

ตัวอย่าง	T _{onset} (°C)	T _{max} (°C)	ปริมาณชาร์ (ร้อยละ)
ผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการตกแต่ง	348	375	7.3
Exolit AP423	176	665	39.6
ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย AP10-f	259	282	36.8
ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย AP9-f	260	287	33.6
ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย AP7-f	264	277	31.5
ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย AP5-f	267	284	27.5

T_{onset} คือ อุณหภูมิเริ่มสลายตัวทางความร้อน (องศาเซลเซียส)

T_{max} คือ อุณหภูมิที่มีอัตราการสลายตัวทางความร้อนมากที่สุด (องศาเซลเซียส)

ปริมาณชาร์ คือ ปริมาณชาร์ที่เหลืออยู่หลังการสลายตัวทางความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส (ร้อยละ)

ตารางที่ ค.4 การสลายตัวทางความร้อนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วยเคราตินทางการค้า

ตัวอย่าง	T _{onset} (°C)	T _{max} (°C)	ปริมาณชาร์ (ร้อยละ)
ผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการตกแต่ง	348	375	7.3
เคราตินทางการค้า (KC)	247	334	17.7
ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย KC1-f	330	378	8.6
ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย KC3-f	330	378	9.7
ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย KC5-f	327	377	14.6

T_{onset} คือ อุณหภูมิเริ่มสลายตัวทางความร้อน (องศาเซลเซียส)

T_{max} คือ อุณหภูมิที่มีอัตราการสลายตัวทางความร้อนมากที่สุด (องศาเซลเซียส)

ปริมาณชาร์ คือ ปริมาณชาร์ที่เหลืออยู่หลังการสลายตัวทางความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส (ร้อยละ)

ตารางที่ ค.5 การสลายตัวทางความร้อนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งห่วงไฟด้วยเคราตินทางการค้า

ตัวอย่าง	T _{onset} (°C)	T _{max} (°C)	ปริมาณชาร์ (ร้อยละ)
ผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการตกแต่ง	348	375	7.3
สารสกัดหยาบเคราติน (KE)	220	336	8.6
ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย KE1-f	317	370	9.2
ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย KE3-f	326	373	9.3
ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย KE5-f	330	377	11.8

T_{onset} คือ อุณหภูมิเริ่มสลายตัวทางความร้อน (องศาเซลเซียส)

T_{max} คือ อุณหภูมิที่มีอัตราการสลายตัวทางความร้อนมากที่สุด (องศาเซลเซียส)

ปริมาณชาร์ คือ ปริมาณชาร์ที่เหลืออยู่หลังการสลายตัวทางความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส (ร้อยละ)

ตารางที่ ค.6 การสลายตัวทางความร้อนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราดินทางการค้า

ตัวอย่าง	T _{onset} (°C)	T _{max} (°C)	ปริมาณชาร์ (ร้อยละ)
ผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการตกแต่ง	348	375	7.3
ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย AP10-f	259	282	36.8
ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย AP9KC1-f	268	286	35.5
ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย AP7KC3-f	268	289	30.9
ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย AP5KC5-f	275	296	30.0

T_{onset} คือ อุณหภูมิเริ่มสลายตัวทางความร้อน (องศาเซลเซียส)

T_{max} คือ อุณหภูมิที่มีอัตราการสลายตัวทางความร้อนมากที่สุด (องศาเซลเซียส)

ปริมาณชาร์ คือ ปริมาณชาร์ที่เหลืออยู่หลังการสลายตัวทางความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส (ร้อยละ)

ตารางที่ ค.7 การสลายตัวทางความร้อนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งหน่วงไฟด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราดิน

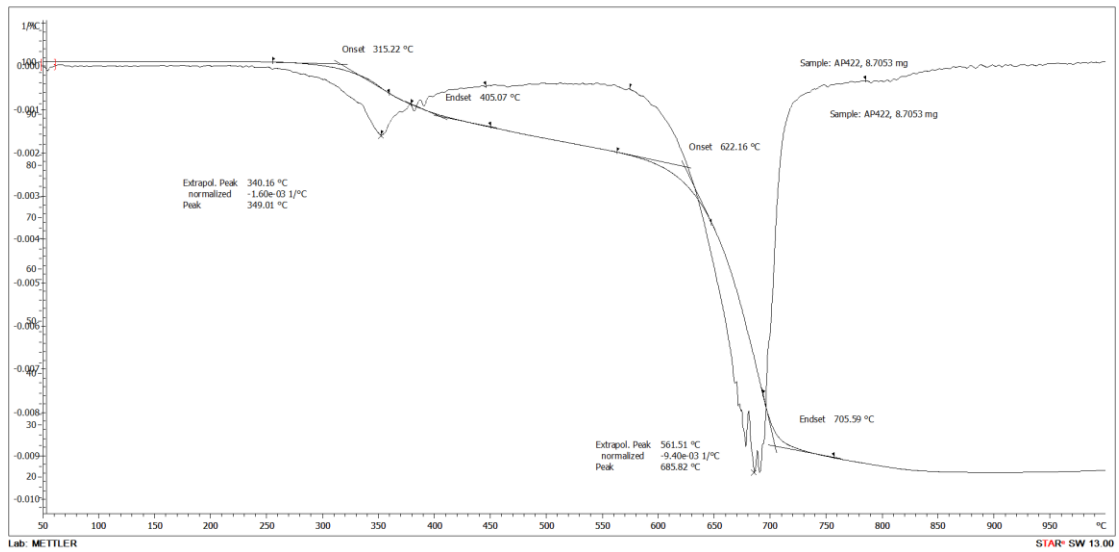
ตัวอย่าง	T _{onset} (°C)	T _{max} (°C)	ปริมาณชาร์ (ร้อยละ)
ผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการตกแต่ง	348	375	7.3
ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย AP10-f	259	282	36.8
ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย AP9KE1-f	266	286	35.2
ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย AP7KE3-f	270	283	35.3
ผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย AP5KE5-f	270	290	29.0

T_{onset} คือ อุณหภูมิเริ่มสลายตัวทางความร้อน (องศาเซลเซียส)

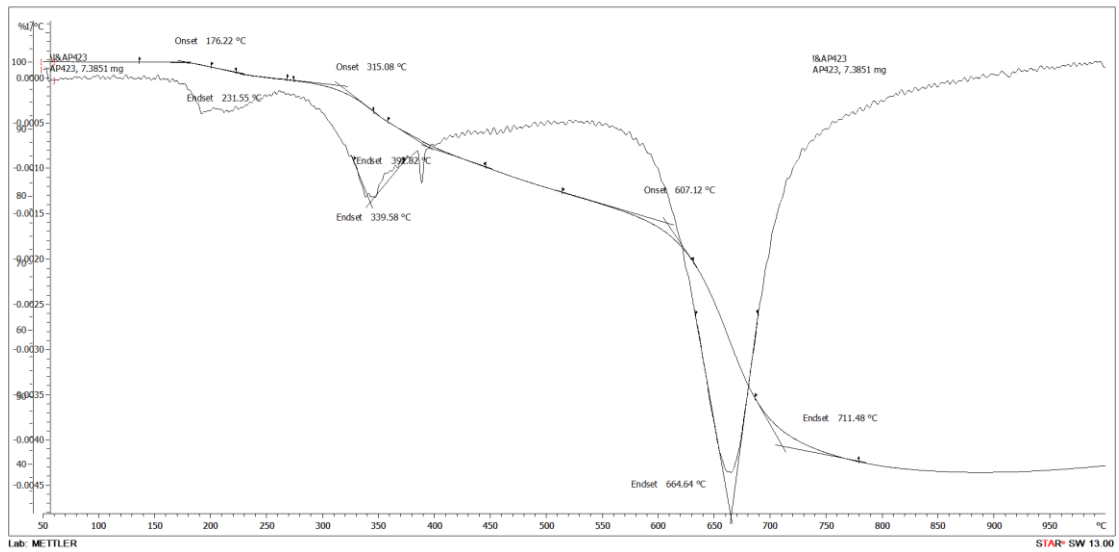
T_{max} คือ อุณหภูมิที่มีอัตราการสลายตัวทางความร้อนมากที่สุด (องศาเซลเซียส)

ปริมาณชาร์ คือ ปริมาณชาร์ที่เหลืออยู่หลังการสลายตัวทางความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส (ร้อยละ)

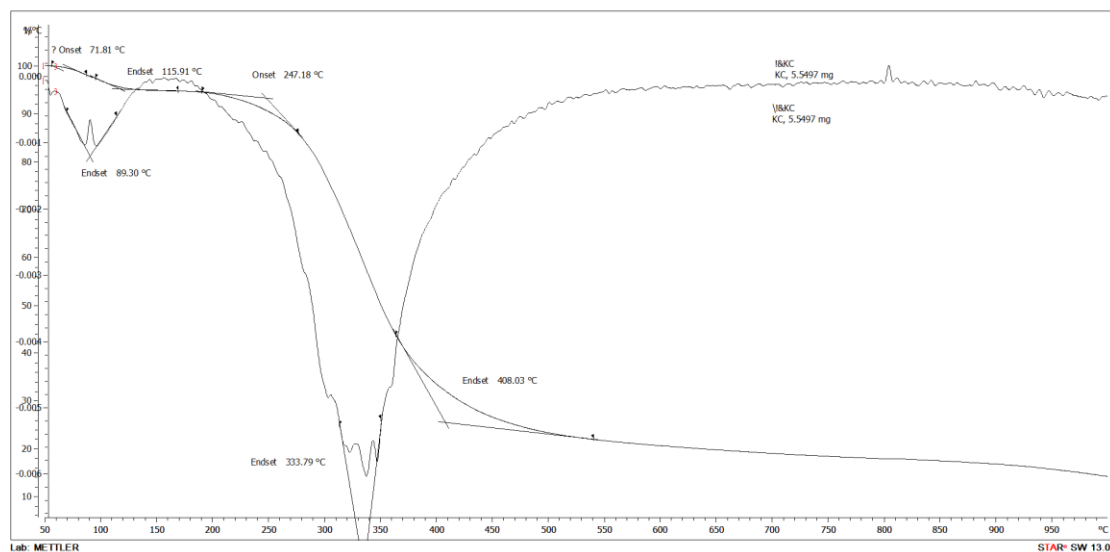
เสถียรภาพทางความร้อนของ Exolit AP422



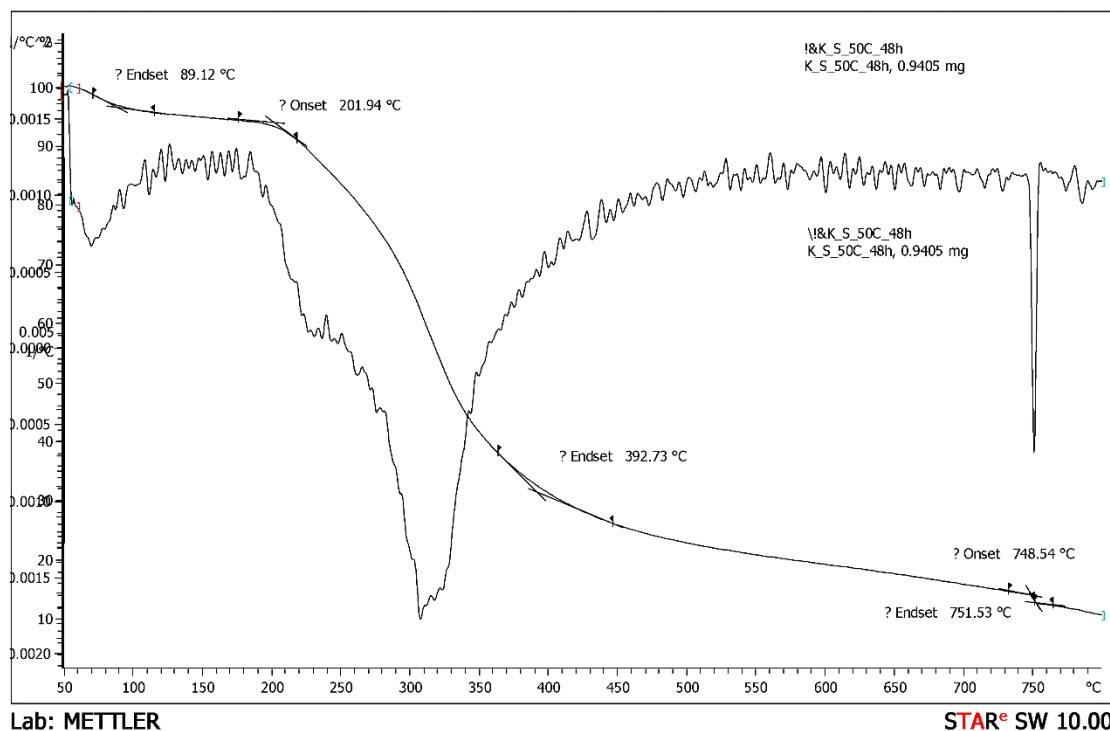
เสถียรภาพทางความร้อนของ Exolit AP423



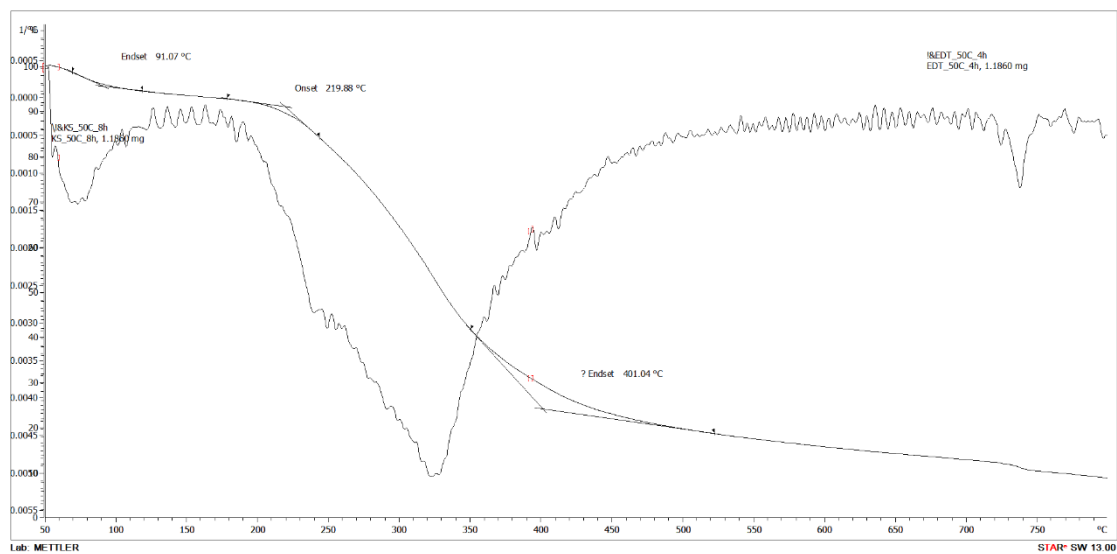
เสถียรภาพทางความร้อนของเคราตินทางการค้า (KC)



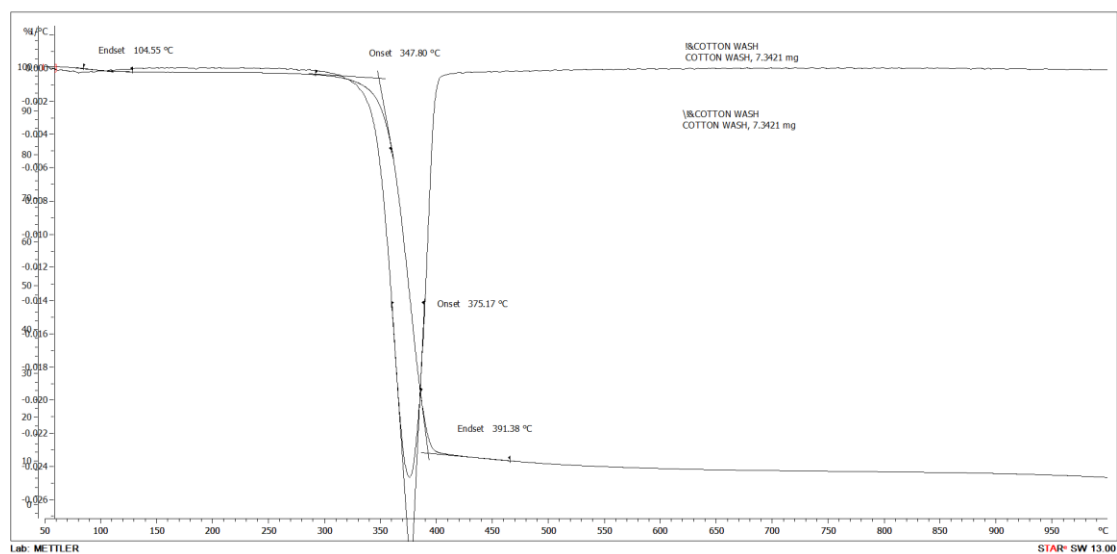
เสถียรภาพทางความร้อนของสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย Shindai



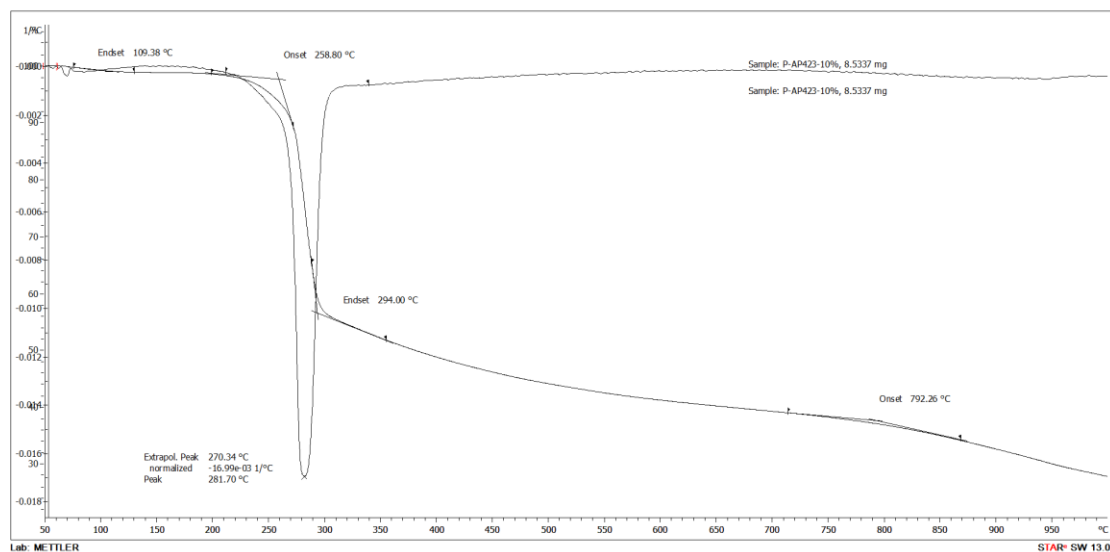
เสถียรภาพทางความร้อนของสารสกัดหยาบเคราตินที่สกัดด้วย 1,2-อีเทนไดโพล



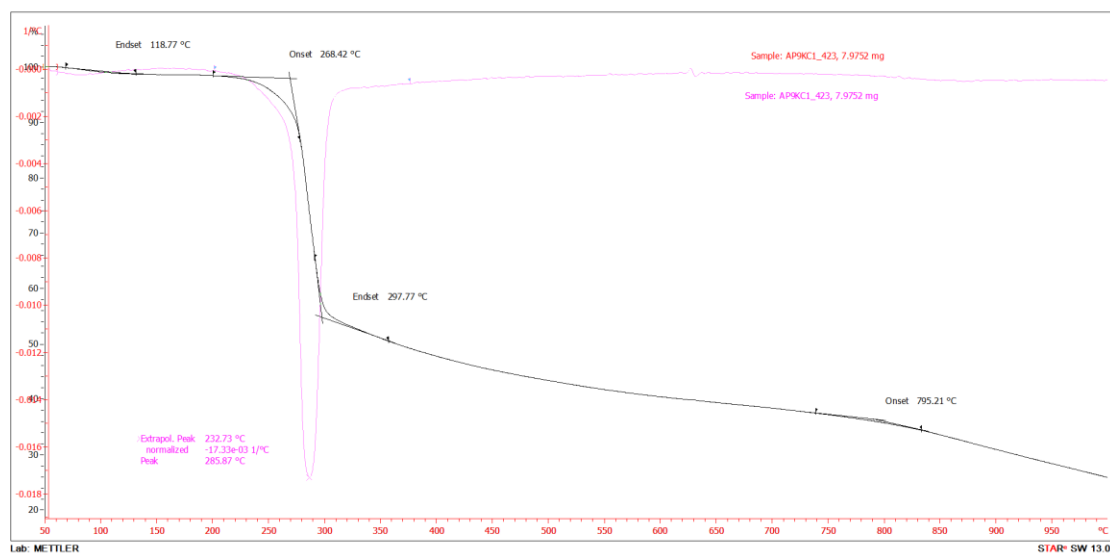
เสถียรภาพทางความร้อนของผ้าฝ้าย



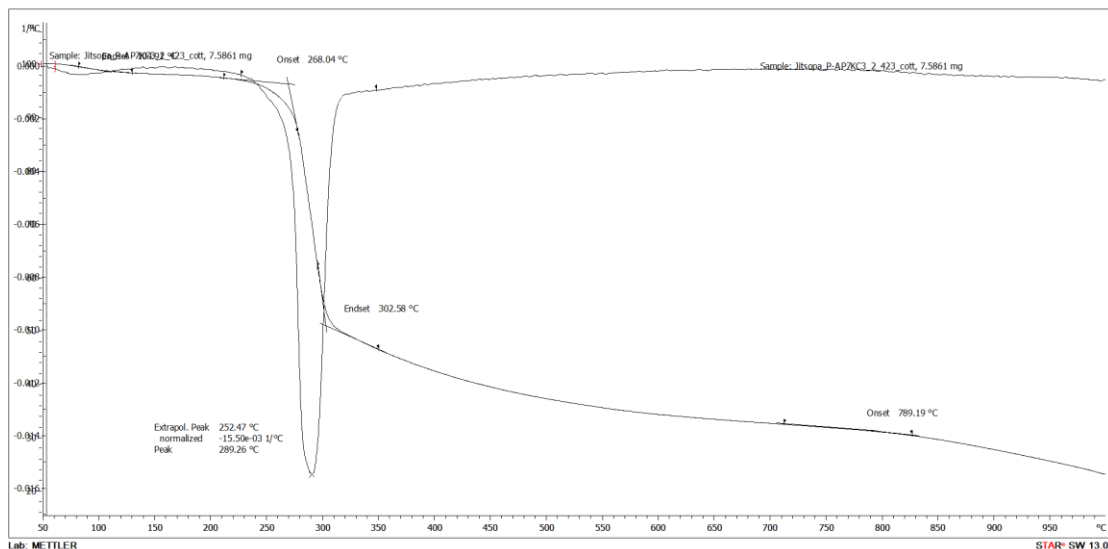
เสถียรภาพทางความร้อนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร้อยละ 10



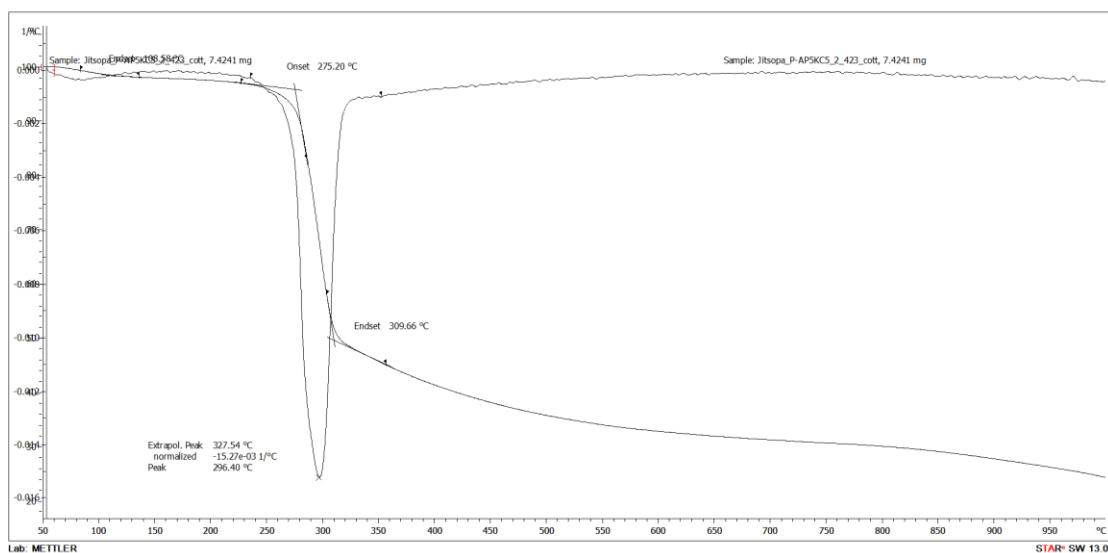
เสถียรภาพทางความร้อนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า อัตราส่วน AP9KC1



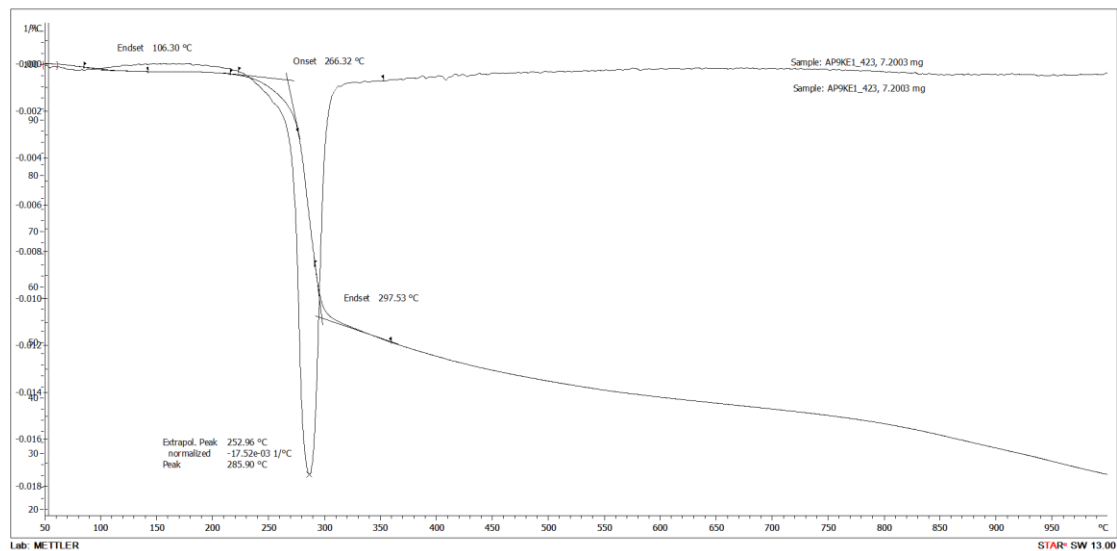
เสถียรภาพทางความร้อนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า
อัตราส่วน AP7KC3



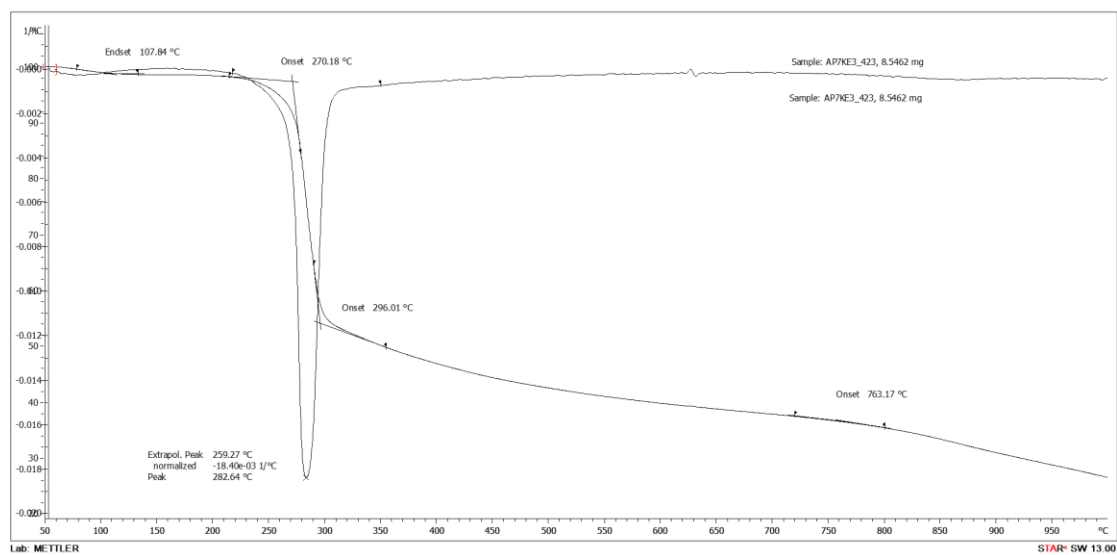
เสถียรภาพทางความร้อนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า
อัตราส่วน AP5KC5



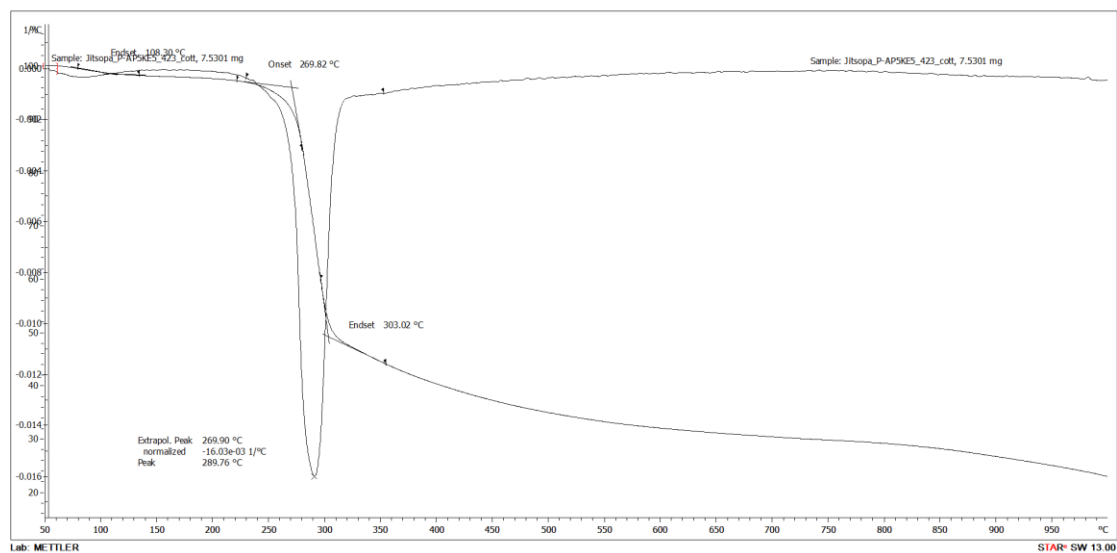
เสถียรภาพทางความร้อนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราติน
อัตราส่วน AP9KE1



เสถียรภาพทางความร้อนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาบเคราติน
อัตราส่วน AP7KE3



เสถียรภาพทางความร้อนของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัดหยาดเขราติน
อัตราส่วน AP5KE5





ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อาคารสถาบัน 3 ชั้น 3 จุฬาลงกรณ์ 62 ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร. (662) 218-8032, 218-8101 โทรสาร (662) 218-8032, 254-0211

SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL RESEARCH EQUIPMENT CENTRE CHULALONGKORN UNIVERSITY

CHULALONGKORN SOI 62 PHAYA-THAI ROAD PHATUMWAN BANGKOK 10330 THAILAND TEL. (662) 218-8032, 218-8101 FAX : (662) 218-8032, 254-0211

รายงานเลขที่ 359/2559

หน้า 1/1

รายงานผลการวิเคราะห์


รหัสตัวอย่าง	ตามชื่อตัวอย่าง
ประเภทตัวอย่าง	ผ้า
เจ้าของตัวอย่าง	จิตต์โสภา เฉลียวศักดิ์
ที่อยู่	ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
วิธีการทดสอบ	ASTM D2863 - 06A
เครื่องมือทดสอบ	Limiting Oxygen Index test : LOI
วันที่ทดสอบ	27 พฤษภาคม 2559
ผู้ทำการทดสอบ	นายศุภศิศิลป์ ดาราสุรีย์

ผลการทดสอบ

ชื่อตัวอย่าง	ผลการทดสอบ (%O ₂)
Control - F Cotton	18.0
AP10 - F - 423 Cotton	26.6
AP9KC1 - F Cotton	27.8
AP7KC3 - F Cotton	23.7
AP5KC5 - F Cotton	25.0
AP9KE1 - F Cotton	34.4
AP7KE3 - F Cotton	34.0
AP5KE5 - F Cotton	30.2
Cotton Uncoat	18.0
KC5% Padding	19.0
KE 5% Padding	20.0


(นายศุภศิศิลป์ ดาราสุรีย์)
ผู้ทดสอบ


(นางสุนันท์ รังษิญาณส่อง)
หัวหน้าฝ่ายวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ


(รศ.ดร.อมร เพชรสม)
ผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือฯ

หมายเหตุ ผลการทดสอบที่ได้รับนี้เป็นผลการทดสอบเฉพาะตัวอย่างที่ทำการทดสอบจาก
ศูนย์เครื่องมือฯ เท่านั้น

อป/อพ

ภาคผนวก จ

ตารางที่ จ.1 ความทนแรงดึงของผ้าฝ้ายก่อนและหลังตกแต่งด้วยสารเคลือบควบคุม (control-f)

ตัวอย่าง	breaking force (N)	Elongation (%)
cotton un		
ทดสอบครั้งที่ 1	177.40	13.12
ทดสอบครั้งที่ 2	179.79	13.79
ทดสอบครั้งที่ 3	171.30	12.98
ทดสอบครั้งที่ 4	151.39	12.49
ทดสอบครั้งที่ 5	173.37	13.72
ค่าเฉลี่ย	170.65	13.22
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	10.08	0.48
control-f		
ทดสอบครั้งที่ 1	123.36	11.85
ทดสอบครั้งที่ 2	107.93	11.13
ทดสอบครั้งที่ 3	130.09	12.54
ทดสอบครั้งที่ 4	128.26	12.11
ทดสอบครั้งที่ 5	116.91	12.12
ค่าเฉลี่ย	121.31	11.95
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	8.10	0.47

ตารางที่ จ.2 ความทนแรงดึงของผ้าฝ้ายหลังตกแต่งหน่วงไฟด้วย Exolit AP423

ตัวอย่าง	breaking force (N)	Elongation (%)
AP5-f		
ทดสอบครั้งที่ 1	135.13	12.52
ทดสอบครั้งที่ 2	131.95	12.22
ทดสอบครั้งที่ 3	134.78	12.58
ทดสอบครั้งที่ 4	126.26	12.84
ทดสอบครั้งที่ 5	126.37	13.26
ค่าเฉลี่ย	130.90	12.69
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	3.90	0.35
AP7-f		
ทดสอบครั้งที่ 1	140.78	13.32
ทดสอบครั้งที่ 2	127.07	12.72
ทดสอบครั้งที่ 3	130.01	13.45
ทดสอบครั้งที่ 4	131.83	13.20
ทดสอบครั้งที่ 5	127.80	12.99
ค่าเฉลี่ย	131.50	13.14
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	4.93	0.26
AP9-f		
ทดสอบครั้งที่ 1	155.36	14.26
ทดสอบครั้งที่ 2	149.02	14.32
ทดสอบครั้งที่ 3	161.19	14.45
ทดสอบครั้งที่ 4	151.14	14.05
ทดสอบครั้งที่ 5	151.33	14.04
ค่าเฉลี่ย	153.61	14.23
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	4.31	0.16

ตารางที่ จ.2 (ต่อ) ความทนแรงดึงของผ้าฝ้ายหลังตกแต่งหน่วงไฟด้วย Exolit AP423

ตัวอย่าง	breaking force (N)	Elongation (%)
AP10-f		
ทดสอบครั้งที่ 1	167.95	13.52
ทดสอบครั้งที่ 2	154.32	12.78
ทดสอบครั้งที่ 3	161.42	13.49
ทดสอบครั้งที่ 4	137.42	13.26
ทดสอบครั้งที่ 5	155.96	14.18
ค่าเฉลี่ย	155.42	13.45
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	10.18	0.45



ตารางที่ จ.3 ความทนแรงดึงของผ้าฝ้ายหลังตกแต่งหน่วงไฟด้วย Exolit AP423 ร่วมกับเคราตินทางการค้า

ตัวอย่าง	breaking force (N)	Elongation (%)
AP9KC1-f		
ทดสอบครั้งที่ 1	144.03	12.26
ทดสอบครั้งที่ 2	152.68	13.58
ทดสอบครั้งที่ 3	138.90	12.91
ทดสอบครั้งที่ 4	129.01	12.58
ทดสอบครั้งที่ 5	139.44	12.65
ค่าเฉลี่ย	140.81	12.80
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	7.70	0.44
AP7KC3-f		
ทดสอบครั้งที่ 1	170.79	14.32
ทดสอบครั้งที่ 2	162.91	14.16
ทดสอบครั้งที่ 3	158.91	13.92
ทดสอบครั้งที่ 4	151.92	13.44
ทดสอบครั้งที่ 5	155.89	13.79
ค่าเฉลี่ย	160.08	13.93
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	6.45	0.30
AP5KC5-f		
ทดสอบครั้งที่ 1	177.68	13.03
ทดสอบครั้งที่ 2	176.29	13.64
ทดสอบครั้งที่ 3	171.17	13.44
ทดสอบครั้งที่ 4	160.07	13.03
ทดสอบครั้งที่ 5	159.71	13.05
ค่าเฉลี่ย	168.99	13.24
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	7.73	0.25

ตารางที่ จ.4 ความทนแรงดึงของผ้าฝ้ายหลังตกแต่งหน่วงไฟด้วย Exolit AP423 ร่วมกับสารสกัด
หยาบเคราติน

ตัวอย่าง	breaking force (N)	Elongation (%)
AP9KE1-f		
ทดสอบครั้งที่ 1	145.80	12.58
ทดสอบครั้งที่ 2	125.89	11.82
ทดสอบครั้งที่ 3	141.98	12.62
ทดสอบครั้งที่ 4	142.02	12.65
ทดสอบครั้งที่ 5	125.52	11.39
ค่าเฉลี่ย	136.24	12.21
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	8.71	0.52
AP7KE3-f		
ทดสอบครั้งที่ 1	153.49	12.46
ทดสอบครั้งที่ 2	141.52	12.45
ทดสอบครั้งที่ 3	144.51	12.67
ทดสอบครั้งที่ 4	142.56	11.92
ทดสอบครั้งที่ 5	140.00	12.00
ค่าเฉลี่ย	144.42	12.30
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	4.77	0.29
AP5KE5-f		
ทดสอบครั้งที่ 1	153.27	12.85
ทดสอบครั้งที่ 2	152.89	12.87
ทดสอบครั้งที่ 3	145.37	12.44
ทดสอบครั้งที่ 4	150.91	12.85
ทดสอบครั้งที่ 5	148.13	12.12
ค่าเฉลี่ย	150.11	12.63
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2.99	0.30

ตารางที่ จ.5 ความทนแรงดึงของผ้าฝ้ายหลังดกแต่งหน่วงไฟด้วยเคราตินทางการค้า

ตัวอย่าง	breaking force (N)	Elongation (%)
KC1-f		
ทดสอบครั้งที่ 1	131.78	12.85
ทดสอบครั้งที่ 2	139.39	12.72
ทดสอบครั้งที่ 3	139.71	13.52
ทดสอบครั้งที่ 4	128.70	13.12
ทดสอบครั้งที่ 5	125.91	11.98
ค่าเฉลี่ย	133.10	12.84
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	5.59	0.51
KC3-f		
ทดสอบครั้งที่ 1	140.56	11.33
ทดสอบครั้งที่ 2	131.26	13.38
ทดสอบครั้งที่ 3	136.09	13.51
ทดสอบครั้งที่ 4	122.40	14.05
ทดสอบครั้งที่ 5	137.70	13.78
ค่าเฉลี่ย	133.60	13.21
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	6.36	0.97
KC5-f		
ทดสอบครั้งที่ 1	166.06	13.99
ทดสอบครั้งที่ 2	155.59	13.79
ทดสอบครั้งที่ 3	164.74	14.04
ทดสอบครั้งที่ 4	158.49	14.80
ทดสอบครั้งที่ 5	158.34	14.85
ค่าเฉลี่ย	160.65	14.29
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	4.04	0.44

ตารางที่ จ.6 ความทนแรงดึงของผ้าฝ้ายหลังตกแต่งหน่วยไฟด้วยสารสกัดหยาบเคราติน

ตัวอย่าง	breaking force (N)	Elongation (%)
KE1-f		
ทดสอบครั้งที่ 1	121.63	12.26
ทดสอบครั้งที่ 2	122.58	13.31
ทดสอบครั้งที่ 3	123.13	13.13
ทดสอบครั้งที่ 4	117.17	12.79
ทดสอบครั้งที่ 5	129.44	13.18
ค่าเฉลี่ย	122.79	12.93
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	3.93	0.38
KE3-f		
ทดสอบครั้งที่ 1	141.47	13.18
ทดสอบครั้งที่ 2	131.47	13.51
ทดสอบครั้งที่ 3	130.88	13.38
ทดสอบครั้งที่ 4	127.70	13.24
ทดสอบครั้งที่ 5	125.65	12.58
ค่าเฉลี่ย	131.43	13.18
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	5.45	0.32
KE5-f		
ทดสอบครั้งที่ 1	160.53	13.65
ทดสอบครั้งที่ 2	155.61	14.52
ทดสอบครั้งที่ 3	164.06	14.74
ทดสอบครั้งที่ 4	155.37	12.75
ทดสอบครั้งที่ 5	162.91	14.59
ค่าเฉลี่ย	159.70	14.05
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	3.62	0.76

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวจิตต์โสภา เฉลียวศักดิ์ เกิดเมื่อวันที่ 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2528 สำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งทอ จากคณะ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปีการศึกษา 2550 หลังจากนั้นสำเร็จ การศึกษาในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และ เทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2553 จากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ ภาควิชาวัสดุ ศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2553

ผลงานตีพิมพ์

Chaliewsak, J., Prousoontorn, M. and Charuchinda, S. (2016). Synergistic Effect of Ammonium Polyphosphate and Human Hair Keratin on Thermal and Flame Retardant Properties of Cotton Fabric. Jurnal Teknologi. รวการตีพิมพ์

Chaliewsak, J. and Charuchinda, S. (2013). Extraction of Keratins from Human Hair at Low Pressure and Their Characterization. Advanced Materials Research 747: 694-697.