# การปรับปรุงสมบัติการหน่วงไฟของผ้าฝ้ายโดยการกราฟต์ด้วยมอนอเมอร์ที่มีฟอสฟอรัส-ไนโตรเจน

นายคทาหัสต์ ถนอมวงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2556
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5372214523

# IMPROVEMENT OF FLAME RETARDING PROPERTY OF COTTON FABRIC BY GRAFTING WITH PHOSPHORUS-NITROGEN CONTAINING MONOMER

Mr. Katahut Thanomwong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Petrochemistry and Polymer Science
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การปรับปรุงสมบัติการหน่วงไฟของผ้าฝ้ายโดยการกราฟต์ด้วยมอนอเมอร์ที่มีฟอสฟอรัส-ไนโตรเจน |
| โดย | นายคทาหัสต์ ถนอมวงศ์ |
| สาขาวิชา | ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวรรณ พันธุมนาวิน |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง |

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรินทร ชวศิริ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวรรณ พันธุมนาวิน)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลรัตน์ ตระการพฤกษ์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เติมศักดิ์ ศรีศิรินทร์)

คทาหัสต์ ถนอมวงศ์ : การปรับปรุงสมบัติการหน่วงไฟของผ้าฝ้ายโดยการกราฟต์ด้วยมอนอเมอร์ที่มีฟอสฟอรัส-ไนโตรเจน. (IMPROVEMENT OF FLAME RETARDING PROPERTY OF COTTON FABRIC BY GRAFTING WITH PHOSPHORUS-NITROGEN CONTAINING MONOMER) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.วรวรรณ พันธุมนาวิน, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง, 55 หน้า.

ในปัจจุบันสารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสและไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบมีการใช้งานเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการมีอยู่ของไนโตรเจนในโครงสร้างจะทำให้เกิดการทำงานร่วมกันกับฟอสฟอรัสและช่วยให้มีประสิทธิภาพการหน่วงไฟที่ดีขึ้น งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติการหน่วงไฟของผ้าฝ้ายโดยใช้อาร์กอนพลาสมาเหนี่ยวนำให้เกิดกระบวนการกราฟต์มอนอเมอร์หน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสและไนโตรเจนที่มีชื่อว่า 3-เมทิล-3-บิวทีนิลฟินิล-4-อะมิโนฟินิลฟอสโฟรามิเดต (MPAP) เพื่อเพิ่มความคงทนของสารหน่วงไฟหลังจากผ่านการใช้งานหรือการซักล้าง ผลการทดลองพบว่าการกราฟต์ด้วยสารหน่วงไฟ MPAP สามารถปรับปรุงสมบัติการหน่วงไฟของผ้าฝ้ายให้ดีขึ้น (ทำให้ได้ค่า LOI สูงสุดเป็น 28 เปอร์เซ็นต์) และการเพิ่มความเข้มข้นมอนอเมอร์สารหน่วงไฟจะทำให้ปริมาณสารหน่วงไฟที่กราฟต์ติดไปลงบนผ้ามีค่าสูงขึ้นซึ่งจะส่งผลให้ค่า LOI มีค่าสูงตามไปด้วย นอกจากนี้ถ่านคาร์บอนที่เหลือจากการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสของผ้าฝ้ายที่ผ่านการกราฟต์ (37.9 เปอร์เซ็นต์) ยังมีปริมาณที่มากกว่าผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ผ่านการกราฟต์ (3.5 เปอร์เซ็นต์) อีกด้วย อย่างไรก็ตามผ้าที่กราฟต์ด้วยสารหน่วงไฟทำให้สมบัติเชิงกลมีค่าลดลงแต่ไม่มากจนส่งผลต่อการใช้งาน และผ้าที่กราฟต์ด้วยสารหน่วงไฟหลังผ่านการซักล้างแล้วยังคงให้ค่า LOI ที่มากกว่าผ้าฝ้ายเปล่า

สาขาวิชา ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2556 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

# # 5372214523 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE
KEYWORDS: PHOSPHORAMIDATE; FLAME RETARDANT; COTTON; LOI

KATAHUT THANOMWONG: IMPROVEMENT OF FLAME RETARDING PROPERTY OF COTTON FABRIC BY GRAFTING WITH PHOSPHORUS-NITROGEN CONTAINING MONOMER. ADVISOR: ASST. PROF. WORAWAN BHANTHUMNAVIN, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST. PROF. BOONCHOAT PAOSAWATYANYONG, Ph.D., 55 pp.

Since phosphorus-nitrogen containing flame retardant has been shown to have a synergistic effect between nitrogen and phosphorus which enhances the efficiency of fire resistance. This thesis is focused on the improvement of fire resistance of cotton. This has been carried out by argon plasma induced graft copolymerization of phosphorus–nitrogen containing monomer, namely 3-methyl-3-butenylphenyl-4-aminophenyl phosphoramidate (MPAP) onto cotton to achieve a durable flame retardant after usage or washing. Our results revealed that cotton fabric grafted with MPAP can improve the flame resistance property (the highest LOI value = 28%) of cotton which is originally 18%. The increase in monomer concentration leads to an increase in percentage of grafting on the fabrics and LOI value. In addition, the percentage of remaining residue from the thermal decomposition at 600°C of grafted fabric (37.9%) is higher than the original of cotton (3.5%). Although a decrease of mechanical property of grafted fabric was observed, the grafted fabric can be utilized. Moreover, grafted fabric after washing also showed the higher LOI value than cotton fabric.

Field of Study: Petrochemistry and Polymer Science
Academic Year: 2013

Student's Signature .....
Advisor's Signature .....
Co-Advisor's Signature .....

# กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์นี้ จะสำเร็จลุล่วงมิได้ถ้าหากขาดความช่วยเหลือ ความร่วมมือ ตลอดจนคำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่ผู้จัดทำจากบุคคลและองค์กรต่าง ๆ

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวรรณ พันธุมนาวิน อาจารย์ที่ปรึกษาและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม สำหรับความรู้และคำแนะนำต่างๆ ที่นำมาใช้เป็นแนวทางในการทำวิจัย และความช่วยเหลือต่างๆ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ที่สนับสนุนทุนในการทำงานวิจัยนี้

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรินทร ชวศิริ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลรัตน์ ตระการพฤกษ์และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เติมศักดิ์ ศรีคิรินทร์ ที่ได้ให้ความกรุณาอย่างยิ่งในการเป็นคณะกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงการให้คำแนะนำเพื่อแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ท้ายที่สุดขอขอบพระคุณครอบครัวที่ให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง รวมถึงสมาชิกของห้องปฏิบัติการพลาสมาและผู้ที่มีอุปการะคุณทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวนามในนี้ที่ได้มีส่วนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จได้

# สารบัญ

หน้า


บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญภาพ ..... ฏ

บทที่ 1 ..... 1

บทนำ ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ..... 2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย ..... 2

บทที่ 2 ..... 3

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ..... 3

2.1 ฝ้าย ..... 3

2.2 การเผาไหม้ของวัสดุสิ่งทอ ..... 5

2.3 การหน่วงไฟ ..... 6

2.3.1 กลไกการหน่วงไฟ ..... 6

2.3.1.1 การขัดขวางทางกายภาพ ..... 6

2.3.1.2 การขัดขวางทางเคมี ..... 7

2.3.2 สารหน่วงไฟ ..... 7

2.3.2.1 สารหน่วงไฟที่มีเฮโลเจนเป็นองค์ประกอบ ..... 7

2.3.2.2 สารหน่วงไฟที่เป็นสารอนินทรีย์ ..... 9

2.3.2.3 สารหน่วงไฟที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ..... 10

2.3.2.4 สารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ ..... 10

2.3.2.5 สารหน่วงไฟประเภทอินทูเมสเซนต์ ..... 12

2.3.3 การใช้สารหน่วงไฟในเส้นใย ..... 13

2.4 พลาสมา ..... 14

หน้า

2.4.1 คำจำกัดความของพลาสมา ..... 14
2.4.2 การดัดแปรพื้นผิวของวัสดุสิ่งทอโดยพลาสมา ..... 15
2.5 เทคนิคการวิเคราะห์ผ้า ..... 15
2.5.1 เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ..... 15
2.5.2 เทคนิคแอทเทนนูเอเทตโทท้ลรีเฟลกซันฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทร สโกปี ..... 16
2.5.3 เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกอนาลิซิส ..... 16
2.5.4 การทดสอบสมบัติการหน่วงไฟด้วยเทคนิค Limiting oxygen index ..... 17
2.5.5 เทคนิคอิเล็กตรอนโพรบไมโครอนาลิซิส ..... 18
2.5.6 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง ..... 18
2.6 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ..... 18
บทที่ 3 ..... 23
ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย ..... 23
3.1 สารเคมี ..... 23
3.2 การสังเคราะห์มอนอเมอร์สารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสและไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ..... 24
3.2.1 การสังเคราะห์ 3-เมทิล-3-บิวทีนิลฟินิล-4-อะมิโนฟินิลฟอสโฟรามิเดต (MPAP) ..... 24
3.2.2 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของมอนอเมอร์สารหน่วงไฟ ..... 25
3.3 การปรับปรุงสมบัติการหน่วงไฟของผ้าฝ้ายโดยการเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาการกราฟต์ของสารหน่วงไฟลงไปบนพื้นผิวของผ้าฝ้าย ..... 25
3.3.1 ระบบให้กำเนิดพลาสมา ..... 25
3.3.2 การกราฟต์สารหน่วงไฟ MPAP ลงบนพื้นผิวของผ้าฝ้าย ..... 26
3.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์และการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อนของผ้าฝ้ายที่ผ่านการกราฟต์ด้วยมอนอเมอร์ของสารหน่วงไฟ ..... 27
3.4.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผ้าฝ้ายก่อนและหลังการกราฟต์ด้วยสารหน่วงไฟลงไปบนพื้นผิว ..... 27
3.4.2 ทดสอบความคงทนต่อการซักล้างของสารหน่วงไฟที่กราฟต์ลงบนพื้นผิวของผ้าฝ้าย ..... 29
บทที่ 4 ..... 30
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง ..... 30

หน้า

4.1 การสังเคราะห์และทดสอบเอกลักษณ์เพื่อยืนยันโครงสร้างทางเคมีของสารหน่วงไฟ MPAP.. 30

4.2 การปรับปรุงสมบัติการหน่วงไฟของผ้าฝ้ายโดยการเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาการกราฟต์ของสารหน่วงไฟลงไปบนพื้นผิวของผ้าฝ้าย ..... 31

4.2.2 ผลของการปรับเปลี่ยนระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการอาบพลาสมาที่มีผลต่อปริมาณสารหน่วงไฟที่กราฟต์ติดลงบนผ้าฝ้าย ..... 33

4.2.3 ผลของการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายมอนอเมอร์สารหน่วงไฟที่มีผลต่อปริมาณสารหน่วงไฟที่กราฟต์ติดลงบนผ้าฝ้าย..... 35

4.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์และการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อนของผ้าฝ้ายที่ผ่านการกราฟต์ด้วยมอนอเมอร์ของสารหน่วงไฟ ..... 36

4.3.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์เพื่อยืนยันการกราฟต์ติดของสารหน่วงไฟบนพื้นผิวของผ้าฝ้าย . 36

4.3.1.1 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา..... 36

4.3.1.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน ..... 37

4.3.1.2 การตรวจสอบปริมาณฟอสฟอรัสที่อยู่บนพื้นผิว..... 38

4.3.2 การทดสอบสมบัติเชิงกลของผ้าฝ้ายที่ผ่านการกราฟต์ด้วยสารหน่วงไฟ..... 39

4.3.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของผ้าฝ้ายหลังผ่านการกราฟต์ด้วยสารหน่วงไฟ..... 40

4.3.2.1 การสลายตัวทางความร้อน ..... 40

4.3.2.2 ความสามารถในการหน่วงไฟของผ้าฝ้ายที่ผ่านการกราฟต์ด้วยสารหน่วงไฟ. 43

4.3.4 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของถ่านคาร์บอนที่เหลือจากการเผาไหม้ ..... 47

บทที่ 5 ..... 49

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... 49

5.1 สรุปผลการทดลอง..... 49

5.2 ข้อเสนอแนะ..... 49

รายการอ้างอิง ..... 51

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ..... 55

# สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2. 1 องค์ประกอบทางเคมีของใยฝ้าย ..... 4

ตารางที่ 2. 2 พลังงานที่ใช้ในการแตกออกของพันธะคาร์บอน-เฮโลเจน ..... 8

ตารางที่ 2. 3 ตัวอย่างองค์ประกอบของสารหน่วงไฟอินทูเมสเซนต์ ..... 12

ตารางที่ 2. 4 ตัวอย่างค่า LOI ของเส้นใยต่างๆ ..... 17

ตารางที่ 2. 5 แสดงค่า LOI ของผ้าฝ้ายที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารหน่วงไฟที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนและให้ปริมาณของฟอสฟอรัสคงที่ ..... 19

ตารางที่ 2. 6 ค่า LOI ของผ้าฝ้ายที่ผ่านการกราฟต์ด้วยสารหน่วงไฟหลังจากผ่านการจำลองการซักล้างในงานวิจัยของ Tsafack และ Levalois-Grqtzmacher ..... 21

ตารางที่ 2. 7 ค่า LOI ของผ้าพอลิอะคริโลไนไตรล์ที่ผ่านการกราฟต์ด้วยสารหน่วงไฟก่อนและหลังจำลองการซักล้าง ..... 22

ตารางที่ 2. 8 ค่า LOI ของผ้าไหมที่ผ่านการกราฟต์ด้วยสารหน่วงไฟ DEAEP และ DEAEPN ก่อนและหลังจำลองการซักล้าง ..... 22

ตารางที่ 2. 9 ค่า LOI ของผ้าฝ้ายและผ้าไหมที่ผ่านการกราฟต์ด้วยสารหน่วงไฟ MEDP และ MPBP ก่อนและหลังการซักล้าง ..... 22

ตารางที่ 4. 1 ความต้านทานต่อแรงดึงที่เปลี่ยนแปลงไปของผ้าฝ้ายที่ผ่านการกราฟต์ด้วยสารหน่วงไฟ MPAP ..... 39

ตารางที่ 4. 2 แสดงผลจากเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกอนาลิซิสของผ้าฝ้ายและผ้าฝ้ายที่ผ่านการกราฟต์ด้วยสารหน่วงไฟ ..... 43

ตารางที่ 4. 3 ผลของความเข้มข้นมอนอเมอร์สารหน่วงไฟต่อปริมาณสารหน่วงไฟที่กราฟต์ติดบนพื้นผิวของผ้าฝ้ายรวมไปถึงปริมาณของฟอสฟอรัสที่มีอยู่บนพื้นผิวของผ้าฝ้ายและค่า LOI ที่เกิดขึ้น. 43

ตารางที่ 4. 4 ตารางเปรียบเทียบปริมาณสารหน่วงไฟที่กราฟต์ติดบนพื้นผิวของผ้าฝ้ายและค่า LOI ของสารหน่วงไฟ MEDP และ MPAP ..... 44

ตารางที่ 4. 5 ปริมาณสารหน่วงไฟที่กราฟต์ติดบนพื้นผิวของผ้าฝ้ายและค่า LOI ทั้งก่อนและหลังผ่านการจำลองการซักล้างเป็นจำนวน 50 รอบ ..... 45

ตารางที่ 4. 6 ปริมาณสารหน่วงไฟที่กราฟต์ติดหลังผ่านการซักล้างที่ได้จากการคำนวณการหลุดออกของพาราฟินิลลีนไดอะมีนเทียบกับที่ได้จากการทดลองจริง ..... 46

# สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2. 1 โครงสร้างของใยฝ้าย ..... 4

ภาพที่ 2. 2 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส ..... 5

ภาพที่ 2. 3 กระบวนการเผาไหม้ของวัสดุ ..... 6

ภาพที่ 2. 4 กลไกการหน่วงไฟของสารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบในโคพอลิเมอร์ของเมทาคริเลต ..... 11

ภาพที่ 2. 5 แผนภูมิแสดงวิธีการเติมสารหน่วงไฟลงในเส้นใย ..... 13

ภาพที่ 2. 6 แสดงพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของวัสดุที่เกิดขึ้นจากเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกอนาลิซิส ..... 16

ภาพที่ 2. 7 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบค่า LOI ..... 18

ภาพที่ 2. 8 โครงสร้างเคมีของมอนอเมอร์สารหน่วงไฟในงานวิจัยของ Gaan และคณะ ..... 19

ภาพที่ 2. 9 โครงสร้างเคมีของมอนอเมอร์สารหน่วงไฟที่ถูกกราฟต์ลงไปบนพื้นผิวของผ้าฝ้ายในงานวิจัยของ Tsafack และ Levalois-Grqtzmacher ..... 20

ภาพที่ 3. 1 สมการการสังเคราะห์ 3-เมทิล-3-บิวทีนิลฟีนิล-4-อะมิโนฟีนิล ฟอสโฟรามิเดต (MPAP)24

ภาพที่ 3. 2 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการอาบพลาสมา ..... 25

ภาพที่ 3. 3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของบริษัท JEOL รุ่น JSM-6480LV ..... 27

ภาพที่ 3. 4 แอทเทนนูเอเทตโททัลรีเฟลกชันฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ รุ่น Nicolet iS10 ATR-FTIR ของบริษัท Thermo Fisher Scientific ..... 28

ภาพที่ 3. 5 อิเล็กตรอนโพรบไมโครอนาลิซิส ของบริษัท JEOL รุ่น JXA-8100/8200 ..... 28

ภาพที่ 3. 6 Oxygen index tester ของบริษัท Stanton Redcroft ..... 29

ภาพที่ 4. 1 โครงสร้างทางเคมีของ 3-เมทิล-3-บิวทีนิลฟีนิล-4-อะมิโนฟีนิลฟอสโฟรามิเดต (MPAP) 30

ภาพที่ 4. 2 สเปกตรัมจากเทคนิค $^{1}$H NMR ของสารหน่วงไฟ MPAP ..... 31

ภาพที่ 4. 3 สเปกตรัมจากเทคนิค ATR-IR ของสารหน่วงไฟ MPAP ..... 32

ภาพที่ 4. 4 ปริมาณของสารหน่วงไฟที่กราฟต์ติดลงบนผ้าฝ้ายโดยใช้กำลังวัตต์ที่ 100-150 วัตต์ (ความดันเป็น 0.5 ทอร์ และระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการอาบพลาสมาเป็น 15 นาที) ..... 33

ภาพที่ 4. 5 ปริมาณของสารหน่วงไฟที่กราฟต์ติดลงบนผ้าฝ้ายโดยใช้ระยะเวลาในการอาบพลาสมาเป็น 10-30 นาที (ความดันเป็น 0.5 ทอร์ และกำลังวัตต์ที่ใช้เป็น 150 วัตต์) ..... 34

หน้า

ภาพที่ 4. 6 ปริมาณของสารหน่วงไฟที่กราฟต์ติดลงบนผ้าฝ้ายโดยใช้ความเข้มข้นของมอนอเมอร์สารหน่วงไฟเป็น 100-300 g/L (ความดันเป็น 0.5 ทอร์ กำลังวัตต์ที่ใช้เป็น 150 วัตต์ และระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการอาบพลาสมาเป็น 15 นาที ) ..... 35

ภาพที่ 4. 7 ภาพถ่ายจากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) แสดงพื้นผิวของผ้าฝ้ายเปล่าและ (ข) แสดงพื้นผิวของผ้าฝ้ายที่ผ่านการกราฟต์ด้วยสารหน่วงไฟ..... 36

ภาพที่ 4. 8 อินฟราเรดสเปกตรัม (ก) แสดงหมู่ฟังก์ชันที่พบในผ้าฝ้ายเปล่า (ข) แสดงหมู่ฟังก์ชันที่พบในมอนอเมอร์หน่วงไฟ MPAP และ (ค) แสดงหมู่ฟังก์ชันที่พบในผ้าฝ้ายที่ผ่านการกราฟต์ด้วยสารหน่วงไฟ ..... 37

ภาพที่ 4. 9 แผนภาพการกระจายตัวของอะตอมฟอสฟอรัสบนพื้นผิวของผ้าฝ้ายที่ผ่านการกราฟต์ด้วยสารหน่วงไฟที่ความเข้มข้น (ก) 100 g/L (ข) 200 g/L และ (ค) 300 g/L..... 38

ภาพที่ 4. 10 เทอร์โมแกรมแสดงพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของสารหน่วงไฟ MPAP..... 40

ภาพที่ 4. 11 สมการการสลายตัวทางความร้อนในขั้นแรกของสารหน่วงไฟ MPAP ..... 40

ภาพที่ 4. 12 สมการการสลายตัวทางความร้อนในขั้นที่สองของสารหน่วงไฟ MPAP..... 41

ภาพที่ 4. 13 เทอร์โมแกรมแสดงพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของผ้าฝ้ายและผ้าฝ้ายที่ผ่านการกราฟต์ด้วยสารหน่วงไฟ ..... 41

ภาพที่ 4. 14 สมการการสลายตัวทางความร้อนในขั้นที่สองของผ้าฝ้ายที่ผ่านการกราฟต์ด้วยสารหน่วงไฟ MPAP..... 42

ภาพที่ 4. 15 Derivative ของเทอร์โมแกรมแสดงพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของผ้าฝ้ายและผ้าฝ้ายที่ผ่านการกราฟต์ด้วยสารหน่วงไฟ ..... 42

ภาพที่ 4. 16 แสดงการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของสารหน่วงไฟที่ผ่านการจำลองการซักล้าง..... 45

ภาพที่ 4. 17 อินฟราเรดสเปกตรัม (ก) แสดงหมู่ฟังก์ชันที่พบในผ้าฝ้ายที่กราฟต์ด้วยสารหน่วงไฟหลังจากผ่านการซักล้าง สเปกตรัม (ข) แสดงหมู่ฟังก์ชันที่พบในผ้าฝ้ายที่กราฟต์ด้วยสารหน่วงไฟก่อนผ่านการซักล้าง และสเปกตรัม (ค) แสดงหมู่ฟังก์ชันที่พบในสารหน่วงไฟ MPAP ..... 46

ภาพที่ 4. 18 ภาพถ่ายจากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) และ (ข) จะเป็นลักษณะพื้นผิวของถ่านคาร์บอนของผ้าฝ้ายเปล่าที่กำลังขยาย 100 เท่า และ 3000 เท่า ตามลำดับ (ค) และ (ง) จะเป็นลักษณะพื้นผิวของถ่านคาร์บอนของผ้าฝ้ายที่กราฟต์ด้วยสารหน่วงไฟที่กำลังขยาย 100 เท่า และ 3000 เท่า ตามลำดับ..... 47