

การปรับปรุงสมบัติของพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ด้วยกระบวนการทางรังสี  
สำหรับการประยุกต์ด้านสิ่งทอป้องกัน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PROPERTY IMPROVEMENT OF POLYPROPYLENE SPUNBOND VIA RADIATION PROCESS  
FOR PROTECTIVE TEXTILE APPLICATION



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Petrochemistry and Polymer Science  
Field of Study of Petrochemistry and Polymer Science

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงสมบัติของพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ด้วย
โดย	กระบวนการทางรังสี สำหรับการประยุกต์ด้านสิ่งทอป้องกัน
สาขาวิชา	นายคอลิต ถิ่นเกาะแก้ว
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โปธิยะราช
	ดร.ธัญชัย พิรุณพันธ์
	ดร.นภเชต จีรบรรพงศา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.กาวิ ศรีกุลกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โปธิยะราช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ดร.ธัญชัย พิรุณพันธ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ดร.นภเชต จีรบรรพงศา)

..... กรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.นพิตา ทิพย์ธีระนันท์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตนพล มงคลรัตนาสีทธิ์)

คอลิต ถิ่นเกาะแก้ว : การปรับปรุงสมบัติของพอลิโพรพิลีนสปันบอนด์ด้วยกระบวนการทางรังสี สำหรับการประยุกต์ด้านสิ่งทอป้องกัน. ( PROPERTY IMPROVEMENT OF POLYPROPYLENE SPUNBOND VIA RADIATION PROCESS FOR PROTECTIVE TEXTILE APPLICATION) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.ประณัฐ โภธิยะราช, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.ธัญชัย พิรุณพันธ์,ดร.นภเขต จีรวรรพสา

งานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงสมบัติพอลิโพรพิลีนสปันบอนด์สำหรับประยุกต์ด้านสิ่งทอป้องกัน ด้วยการนำไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลตและอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มากราฟต์ลงบนพอลิโพรพิลีนสปันบอนด์ด้วยการฉายรังสีแกมมาแทนการใช้กระบวนการทางเคมีแบบดั้งเดิม เพื่อให้ผ้ามีสมบัติสะท้อนน้ำ ต่อด้านรังสียูวี และยับยั้งแบคทีเรีย การวิจัยขั้นแรกเป็นการศึกษาผลของความเข้มข้นของมอนอเมอร์ ชนิดของตัวทำละลาย บรรยากาศที่ใช้ และปริมาณรังสีต่อระดับขั้นของการกราฟต์ไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลต จากการวิเคราะห์คุณลักษณะเบื้องต้นพบว่าสัณฐานวิทยาและโครงสร้างทางเคมีของพอลิโพรพิลีนสปันบอนด์เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากปฏิกิริยาการกราฟต์ ส่วนการทดสอบความสามารถในการป้องกันน้ำพบว่ามุมสัมผัสของน้ำ มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเป็น 125 องศา ในขั้นต่อมาเป็นการกราฟต์อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลต โดยเริ่มจากการตัดแปรพื้นผิวของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ก่อนนำไปกราฟต์ลงบนพอลิโพรพิลีนสปันบอนด์ จากการศึกษาพบว่า สามารถตัดแปรอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อให้พื้นผิวสามารถเกิดอันตรกิริยาได้ดีขึ้น พอลิโพรพิลีนสปันบอนด์ที่ผ่านการกราฟต์แสดงสมบัติในการสะท้อนน้ำด้วยมุมสัมผัสของน้ำประมาณ 120 องศา สามารถต่อด้านรังสียูวีได้ดีโดยมีค่า UPF เท่ากับ 122-124 อีกทั้งยังสามารถยับยั้งแบคทีเรียได้ดี สังเกตจากบริเวณโซนใส (inhibition zone) ที่ชัดเจน จากผลการศึกษาดังกล่าวสามารถนำไปใช้เป็นต้นแบบของเทคโนโลยีการพัฒนาสมบัติของผ้าเพื่อใช้ในงานด้านสิ่งทอป้องกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สาขาวิชา ปีโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิ ลายมือชื่อนิสิต .....

เมอร์

ปีการศึกษา 2563 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 6270010723 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORD: PP spunbond; Gamma irradiation; Water repellent; UV resistance;  
Antibacteria

Korlid Thinkohkaew : PROPERTY IMPROVEMENT OF POLYPROPYLENE SPUNBOND VIA RADIATION PROCESS FOR PROTECTIVE TEXTILE APPLICATION. Advisor: Prof. PRANUT POTIYARAJ, Ph.D. Co-advisor: Thananchai Piroonpan, D.Eng., Noppakhate Jiraborvornpongsa, Ph.D.

In this work, multi-properties of polypropylene (PP) spunbond were improved by grafting 2,2,2-Trifluoroethyl methacrylate (TFEM) and titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) on to the fabrics with the gamma irradiation as an alternative to the conventional chemical process. The improved properties including hydrophobicity, antibacterial, and UV protection. The first part of the experiment investigates the effects of monomer concentration, solvent type, atmospheric condition, and irradiation dose on the degree of grafting. As characterized by SEM and FTIR, the appearance and chemical characteristic of the grafted fabrics were completely altered compared to the original fabric as a result of grafting reaction. The grafted fabrics illustrated impressively high water contact angle of 125 degree. For the next part, PP spunbond was grafted with TiO<sub>2</sub> nanoparticles and TFEM. The TiO<sub>2</sub> nanoparticle was first functionalized with maleic anhydride (MAH) in order to facilitate interaction between surfaces, before grafting procedure. The results demonstrated that the modified TiO<sub>2</sub> offered an excellent surface reaction between PP spunbond. Additionally, the grafted fabrics illustrated impressively high water contact angle of around 120 degree, UV resistance with UPF value of 122-124, and an explicit occurrence of inhibition zone on antibacterial test. It was remarkable to note that the grafted fabric in this work exhibited the attractive potential as protective clothing for used in medical, industrial, and outdoor applications.

Field of Study: Petrochemistry and Polymer Science Student's Signature .....

Academic Year: 2020 Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีโดยได้รับความร่วมมือ ความช่วยเหลือ และการสนับสนุนจากบุคคลหลายท่านและหลายหน่วยงาน ข้าพเจ้าในฐานะผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่กรุณาให้คำแนะนำและคำปรึกษาตลอด รวมทั้งข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์จนงานวิจัยเสร็จสมบูรณ์ ดังรายนามต่อไปนี้

- 1) ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โปธิยะราช ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 2) ดร.ธนัญชัย พิรุณพันธ์ ศูนย์กระบวนการทางรังสีเพื่อการดัดแปรพอลิเมอร์และนาโนเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- 3) ดร.นภเขต จีรบรรพงศา สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำสาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวก รวมถึงดูแลความปลอดภัยตลอดการทำงานวิจัย ขอขอบพระคุณภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อีกทั้งภาควิชาวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้อเพื่อให้ใช้สถานที่ เครื่องมือวิทยาศาสตร์ต่าง ๆ และสารเคมี

ขอขอบพระคุณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเพื่อให้ใช้เครื่องมือวิทยาศาสตร์ขั้นสูงและให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างสำหรับการนำไปทดสอบ

สุดท้ายนี้ต้องขอขอบพระคุณบุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการทำให้งานวิจัยเล่มนี้สำเร็จและสมบูรณ์ นายณพวรรติ โตมะโน เพื่อนสนิทที่คอยช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการทำวิจัยขอขอบพระคุณกำลังใจจากครอบครัว อาจารย์ทุกท่าน เพื่อนทุกคน และอีกหลายท่านที่ได้กล่าวถึงที่นี่ คุณงามความดีที่พึงจะได้รับจากการทำงานเล่มนี้ ผู้จัดทำขอมอบให้บุคคลที่กล่าวมาทั้งหมดทั้งสิ้น

คอลิต ถิ่นเกาะแก้ว

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์.....	4
2.1 รังสีแกมมา.....	4
2.2 การฉายรังสีแกมมาในพอลิเมอร์.....	6
2.2.1 การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของพอลิเมอร์.....	7
2.3 กระบวนการพอลิเมอไรเซชัน.....	10
2.3.1 ปฏิกริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเติม.....	10
2.3.2 ปฏิกริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น.....	11
2.4 พอลิเมอไรเซชันด้วยการฉายรังสีแกมมา.....	12
2.4.1 กลไกการเกิดพอลิเมอไรเซชัน.....	12
2.4.2 เทคนิคในการฉายรังสีเพื่อให้เกิดพอลิเมอไรเซชัน.....	14

2.4.2.1 Simultaneous irradiation technique.....	14
2.4.2.2 Pre-irradiation technique.....	15
2.5 สปันบอนด์นอนวูฟเวน (spunbond nonwovens) .....	16
2.6 ไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลต (trifluoroethyl methacrylate) .....	18
2.7 อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide; TiO <sub>2</sub> ) .....	19
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	24
3.1 วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง.....	24
3.1.1 วัสดุและสารเคมี .....	24
3.1.2 อุปกรณ์ .....	25
3.2 วิธีการทดลอง.....	25
3.2.1 การกราฟต์ไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์บนพอลิโพรพิลีนสปันบอนด์ .....	25
3.2.2 การกราฟต์อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์.....	27
3.2.2.1 การตัดแปรรโครงสร้างของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	27
3.2.2.2 กระบวนการกราฟต์พอลิเมอร์โรเซชัน .....	28
3.2.3 การกราฟต์อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ และไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลต มอ นอเมอร์บนพอลิโพรพิลีนสปันบอนด์ .....	28
3.2.4 การวัดมุมสัมผัสของน้ำ (water contact angle).....	28
3.2.5 การวัดความสามารถในการซึมผ่านของอากาศ (air permeability).....	29
3.2.6 การวัดสี (color measurement) .....	29
3.2.7 การวัดความแข็งตึงของผ้า (fabric stiffness).....	29
3.2.8 การทดสอบความสามารถในการสะท้อนน้ำ .....	29
3.2.9 การวัดความคงทนต่อการซัก (washing durability) .....	30
3.2.10 การทดสอบสมบัติการต้านรังสียูวีของผ้า (UV resistance) .....	30
3.2.11 การทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (antimicrobial activity).....	30



3.3 การศึกษาสมบัติและลักษณะเฉพาะ .....	31
3.3.1 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR).....	31
3.3.2 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM).....	31
3.3.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic force microscope; AFM).....	31
3.3.4 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope; TEM) .....	32
3.3.5 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) .....	32
3.3.6 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเนื่องจากความร้อน (Thermogravimetric Analyzer; TGA).....	32
3.3.8 การทดสอบด้านแรงดึง (tensile test) .....	32
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	33
4.1 ผลการศึกษาการกราฟต์ไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลตลงบนพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ .....	33
4.1.1 ระดับขั้นของการกราฟต์ (degree of grafting).....	33
4.1.2 โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันทางเคมี.....	35
4.1.3 ลักษณะสัณฐานวิทยา.....	36
4.1.4 ความแข็งตึงของผ้า (fabric stiffness) .....	37
4.1.5 ความสามารถในการซึมผ่านของอากาศ (air permeability) และสี (color measurement).....	37
4.1.6 มุมสัมผัสของน้ำ (water contact angle).....	38
4.1.7 ความคงทนต่อแรงดันน้ำ (water injection test).....	39
4.1.8 ความคงทนต่อการซัก (washing durability).....	40

4.2 ผลการศึกษาการกราฟต์ไทเทเนียมไดออกไซด์ และไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลต ลงบนพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์.....	41
4.2.1 ผลการศึกษาการดัดแปรไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	41
4.2.1.1 โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันเคมี .....	41
4.2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิว โดยใช้เทคนิค X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) .....	42
4.2.1.3 โครงสร้างผลึก โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD) .....	43
4.2.1.4 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารเนื่องจากความร้อน (Thermogravimetric Analyzer; TGA).....	44
4.2.1.5 ลักษณะสัณฐานวิทยา โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) .....	45
4.2.1.6 ลักษณะสัณฐานวิทยา โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope; TEM).....	46
4.2.2 ผลการศึกษาสมบัติเบื้องต้นของพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ที่ผ่านการกราฟต์.....	47
4.2.2.1 ระดับขั้นของการกราฟต์ (Degree of grafting) .....	47
4.2.2.2 โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันทางเคมี .....	48
4.2.2.3 ลักษณะสัณฐานวิทยา.....	49
4.2.2.4 มุมสัมผัสของน้ำ (water contact angle) .....	51
4.2.2.5 สมบัติเชิงกลของโดยวิเคราะห์ที่ความทนต่อแรงดึง.....	52
4.2.2.6 ความสามารถในการซึมผ่านของอากาศ (air permeability) และสมบัติการต้านรังสียูวีของผ้า (UV resistance).....	53
4.2.2.7 สมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของผ้า (antimicrobial activity) .....	54
4.2.2.8 ความคงทนต่อการซัก (washing durability) .....	55
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	57
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	57

5.2 ข้อเสนอแนะ .....	58
บรรณานุกรม.....	59
ภาคผนวก ก.....	69
ภาคผนวก ข.....	78
ภาคผนวก ค.....	83
ประวัติผู้เขียน.....	84



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 ความยาวดัดโค้ง และความแข็งแรงดัดโค้งของผ้า.....	37
ตารางที่ 4.2 ความสามารถในการซึมผ่านของอากาศ และค่าสีของผ้า .....	38
ตารางที่ 4.3 ความสามารถในการซึมผ่านของอากาศ และค่าการต้านรังสียูวีของผ้า (UPF) .....	54



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 รังสีจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	4
รูปที่ 2.2 การสลายตัวของโคบอลต์-60 .....	5
รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงของพอลิเมอร์เมื่อมีการฉายรังสี .....	7
รูปที่ 2.4 ลักษณะของโคพอลิเมอร์แบบกราฟต์ .....	8
รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาการกราฟต์ที่เกิดขึ้นจากการฉายรังสี.....	8
รูปที่ 2.6 ลักษณะของเส้นใยพอลิโพรพิลีนก่อนและหลังการกราฟต์ ตามลำดับ .....	9
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างของปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเติม .....	10
รูปที่ 2.8 ขั้นริเริ่มสายโซ่ (chain initiation).....	11
รูปที่ 2.9 ขั้นแพร่ขยายสายโซ่ (chain propagation).....	11
รูปที่ 2.10 ขั้นสิ้นสุดปฏิกิริยา (chain termination).....	11
รูปที่ 2.11 ตัวอย่างการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น.....	12
รูปที่ 2.12 ขั้นริเริ่มสายโซ่ (chain initiation) เมื่อฉายรังสี.....	13
รูปที่ 2.13 ขั้นแพร่ขยายสายโซ่ (chain propagation) เมื่อฉายรังสี.....	13
รูปที่ 2.14 ขั้นสิ้นสุดปฏิกิริยาแบบ combination.....	14
รูปที่ 2.15 ขั้นสิ้นสุดปฏิกิริยาแบบ disproportionation .....	14
รูปที่ 2.16 Simultaneous irradiation technique .....	14
รูปที่ 2.17 การกราฟต์แบบ peroxidation .....	15
รูปที่ 2.18 การกราฟต์แบบ trapped radical .....	16
รูปที่ 2.19 ขั้นตอนการผลิตผ้าสปันบอนด์นอนวูฟเวน .....	17
รูปที่ 2.20 การตัดแปรร่วม PET โดยกระบวนการ ATRP .....	18
รูปที่ 2.21 กลไกการกราฟต์ TFEM ลงบนพอลิโพรพิลีนสปันบอนด์ .....	19

รูปที่ 2.22 โครงสร้างผลึกของอนุภาค $TiO_2$ .....	20
รูปที่ 2.23 กลไกในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์.....	21
รูปที่ 2.24 กลไกการตัดแปรไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ .....	21
รูปที่ 2.25 ลักษณะของ bidentate binding.....	22
รูปที่ 2.26 ลักษณะสัณฐานของอนุภาค $TiO_2$ ก่อนและหลังการตัดแปร.....	22
รูปที่ 2.27 การกราฟต์ TFEM ร่วมกับนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์.....	23
รูปที่ 3.1 เครื่องฉายรังสีแกมมาจากแหล่งกำเนิดรังสีโคบอลต์-60 ยี่ห้อ Gammacell 220 .....	26
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการกราฟต์ไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์บนพอลิโพรพิลีนสปันบอนด์	27
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการตัดแปรอนุภาค $TiO_2$ .....	28
รูปที่ 4.1 ระดับขั้นของการกราฟต์ (ก) ผลของความเข้มข้นของมอนอเมอร์ บรรยากาศ และชนิดของ ตัวทำละลาย (ข) ปริมาณรังสี และ (ค) ประสิทธิภาพของการกราฟต์ .....	34
รูปที่ 4.2 FTIR spectrum ของ (ก) พอลิโพรพิลีนสปันบอนด์ ไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลต และพอลิ โพรพิลีนสปันบอนด์ที่ผ่านการกราฟต์ (ข) อัตราส่วนความเข้มของพีค FTIR ที่ $I_{1740(C=O)}/I_{2920(C-H)}$ ...	35
รูปที่ 4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยา (SEM image) ของ (ก) pristine PP spunbond, grafted PP spunbond with (ข) 10% TFEM, (ค) 15% TFEM, (ง) 20% TFEM, (จ) 25% TFEM และ (ฉ) 30% TFEM .....	36
รูปที่ 4.4 ค่ามุมสัมผัสของน้ำบนผ้าที่ผ่านการกราฟต์ที่ (ก) ความเข้มข้นของมอนอเมอร์ที่ต่างกันในแต่ละ ชนิดของสารละลายที่ใช้, (ข) ปริมาณรังสีต่าง ๆ และ (ค) เทียบกับเวลาที่สัมผัสน้ำเพื่อดูการซึม .	39
รูปที่ 4.5 ความคงทนต่อแรงดันน้ำของสปันบอนด์.....	40
รูปที่ 4.6 มุมสัมผัสของน้ำเมื่อหลังซักของผ้าที่ผ่านการกราฟต์.....	40
รูปที่ 4.7 FTIR spectrum ของอนุภาค $TiO_2$ ก่อนและหลังตัดแปร .....	41
รูปที่ 4.8 XPS spectra ของอนุภาค $TiO_2$ ก่อนและหลังตัดแปร; (ก) wide scan, high resolution ของ (ข) C1s, (ค) Ti2p, and (ง) O1s.....	43
รูปที่ 4.9 XRD pattern ของอนุภาค $TiO_2$ ก่อนและหลังตัดแปร.....	44
รูปที่ 4.10 TGA curves ของอนุภาค $TiO_2$ ก่อนและหลังตัดแปร .....	45

รูปที่ 4.11 ลักษณะสัณฐานวิทยา (SEM images) ของอนุภาค $\text{TiO}_2$ ก่อนและหลังดัดแปร.....	46
รูปที่ 4.12 ลักษณะสัณฐานวิทยา (TEM images) ของอนุภาค $\text{TiO}_2$ ก่อนและหลังดัดแปร.....	47
รูปที่ 4.13 ระดับชั้นของการกราฟต์ของอนุภาค $\text{TiO}_2$ ที่ผ่านการดัดแปรบนพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ .....	48
รูปที่ 4.14 FTIR spectrum ของพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์และโพรพิลีนสปีนบอนด์ที่ผ่านการกราฟต์ .....	49
รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดของ (ก) PP spunbond, (ข) PP spunbond-g- $\text{TiO}_2$ , (ค) PP spunbond-g-TFEM และ (ง) PP spunbond-g- $\text{TiO}_2$ /TFEM .....	50
รูปที่ 4.16 ลักษณะพื้นผิวจากเทคนิค AFM ของ (ก) PP spunbond, (ข) PP spunbond-g- $\text{TiO}_2$ , (ค) PP spunbond-g-TFEM และ (ง) PP spunbond-g- $\text{TiO}_2$ /TFEM .....	51
รูปที่ 4.17 ค่ามุมสัมผัสของน้ำ (ก) บนพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ และโพรพิลีนสปีนบอนด์ที่ผ่านการ กราฟต์และ (ข) เทียบกับเวลาที่สัมผัสน้ำ.....	52
รูปที่ 4.18 สมบัติด้านแรงดึงของพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์และโพรพิลีนสปีนบอนด์ที่ผ่านการกราฟต์ .....	53
รูปที่ 4.19 ผลการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ก่อนและหลังการกราฟต์ ตาม มาตรฐานทดสอบ AATCC 147 .....	55
รูปที่ 4.20 ค่า UPF ต่อรอบของการซัก .....	56

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

วัสดุสิ่งทอถือเป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายและได้มีการพัฒนาต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน หนึ่งในผลิตภัณฑ์ที่กำลังได้รับความสนใจมากที่สุดในตอนนี้คือ สิ่งทอเพื่อการป้องกัน (protective clothing) อันเนื่องมาจากสถานการณ์การแพร่ระบาดของเชื้อโรค COVID-19 ที่ผ่านมานั้นเอง ในช่วงระหว่างการระบาดที่เป็นวงกว้างมีการขาดแคลนชุดเพื่อการป้องกันส่วนบุคคลเป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดความพยายามพัฒนาชุดเพื่อการป้องกันส่วนบุคคลให้มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้นเพื่อเป็นการเตรียมความพร้อมหากเกิดสถานการณ์โรคระบาดขึ้นอีกดังเช่นที่ผ่านมา ซึ่งชุดเพื่อการป้องกัน ควรมีสมบัติหลักคือ การสะท้อนน้ำ (water repellent) นอกจากนี้แล้ว การพัฒนาสมบัติพิเศษอื่น อีก อาทิ การยับยั้งแบคทีเรีย (anti-bacterial) การต้านรังสียูวี (UV resistance) ถือเป็นหนึ่งกลยุทธ์ในการสร้างความแปลกใหม่ ที่จะช่วยดึงดูดผู้บริโภคและเพิ่มมูลค่าในการพัฒนาผลิตภัณฑ์สิ่งทอนั้นได้ [1]

ผ้าอโนวูฟเวน (nonwoven fabrics) เป็นวัสดุสิ่งทอที่มีความสำคัญ และมีความต้องการสูง เนื่องจากสามารถดัดแปรให้มีลักษณะและสมบัติที่หลากหลายเพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งานที่แตกต่างกันได้ [2] หนึ่งในผ้าอโนวูฟเวนที่เป็นที่รู้จักและถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายนั้นคือ พอลิโพรพิลีนสปันบอนด์ (polypropylene spunbond) โดยพอลิโพรพิลีนสปันบอนด์ ถือเป็นผ้าอโนวูฟเวนที่ผลิตได้ง่ายที่สุด มีต้นทุนต่ำ มีสมบัติเชิงกลที่ดีมาก มีน้ำหนักเบา ให้ความอบอุ่น และระบายอากาศได้ดี [3, 4] การนำมาใช้งานส่วนใหญ่ เช่น กระเป๋าผ้า ผ้าม่าน หน้ากากอนามัย เป็นต้น อย่างไรก็ตามการนำผ้าชนิดนี้มาเพิ่มขอบเขตการใช้งานให้มากยิ่งขึ้น นั่นคือ การประยุกต์ใช้เป็นชุดเพื่อการป้องกัน ซึ่งถือเป็นสิ่งที่น่าสนใจและเหมาะกับการต่อยอดผลิตภัณฑ์สิ่งทอให้พัฒนาต่อไปได้

เมื่อกล่าวถึงสมบัติสิ่งทอที่มีลักษณะเป็นชุดเพื่อการป้องกันแล้ว สมบัติเด่นที่จำเป็น คือ การสะท้อนน้ำ การทำให้ผ้ามีสมบัติสะท้อนน้ำนั้นอาศัยหลักการเรื่องแรงตึงผิว ด้วยการตกแต่งผ้าด้วยสารที่มีแรงตึงผิวต่ำ [5] ไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลตพอลิเมอร์ เป็นสารที่มีแรงตึงผิวต่ำ นิยมนำมาใช้งานเพื่อการตกแต่งให้สิ่งทอสามารถสะท้อนน้ำและน้ำมันได้ดีเยี่ยม ทนต่อสารเคมีและความคงทนต่อสภาพอากาศ [6, 7] โดยลักษณะการทำงานของสารชนิดนี้คือ การลดแรงตึงผิวของผ้า ทำให้แรงดึงดูด



ระหว่างโมเลกุลน้ำกับโมเลกุลบนผิวของผ้ามีน้อยกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำ ส่งผลให้น้ำรวมตัวกันแล้วไหลออกจากผ้าในที่สุด [8-10] ดังนั้นสารชนิดนี้ถือเป็นพอลิเมอร์ที่เหมาะสมในการเพิ่มสมบัติการสะท้อนน้ำให้แก่ผ้า ซึ่งโดยปกติแล้วการทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้สามารถอยู่บนพื้นผิวของผ้าได้นั้นสามารถทำได้หลากหลายวิธีเช่น การเคลือบ (coating) [11] การทรีตด้วยพลาสมา (plasma treatment) [12] หรือการฉายรังสีเพื่อกระตุ้นให้เกิดการกราฟต์ (radiation-induced grafting polymerization) จากเทคนิคต่าง ๆ ดังกล่าว การฉายรังสีเพื่อกระตุ้นให้เกิดการกราฟต์ ถือเป็นเทคนิคทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจที่สุด โดยวิธีการนี้เป็นวิธีที่สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ให้มีสมบัติเฉพาะเจาะจงกับการใช้งาน [13] นอกจากนี้แล้วยังถือเป็นวิธีการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และมีข้อดีหลายประการ เช่น เป็นวิธีที่ง่าย ประหยัดพลังงาน ต้นทุนต่ำ และไม่มีสารปนเปื้อนที่เกี่ยวข้องกับสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยา [14-16] และจากองค์ความรู้เบื้องต้นทางพอลิเมอร์ การกราฟต์สามารถกระตุ้นได้โดยการฉายรังสี เช่น รังสีแกมมา (gamma rays) ลำอิเล็กตรอน (electron beams) รังสีอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet; UV) และพลาสมา (plasma treatment) จากวิธีการทางเคมีรังสีดังกล่าว พบว่าการฉายรังสีแกมมาเป็นหนึ่งในวิธีการที่สะดวกและมีประสิทธิภาพที่สุด เนื่องจากสามารถสร้างตำแหน่งที่ว่างไวต่อปฏิกิริยาได้ง่าย [17]

หากจะกล่าวถึงการเพิ่มสมบัติในการต่อต้านรังสียูวี และการยับยั้งแบคทีเรียของผ้า สามารถทำได้โดยการตรึงอนุภาคนาโนของโลหะออกไซด์ลงบนผ้า เช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) และ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) [1, 18-21] ในบรรดาโลหะออกไซด์เหล่านี้พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นโลหะออกไซด์ที่มีเสถียรภาพทางเคมีที่ดี ไม่เป็นพิษ มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ และสามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง (photocatalyst) ได้ [22, 23] จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการนำอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มาตรึงบนผ้านั้น ทำได้หลากหลายวิธี คือ การเคลือบ (coating) โซล-เจล (sol-gel) และการทำให้เกิดประจุบนพื้นผิว (surface charge effect) เป็นต้น [24-27] อย่างไรก็ตามการใช้วิธีการเหล่านี้ยังคงประสบปัญหา นั่นคือ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์กับพื้นผิวของผ้าที่ต่ำ ความคงทนต่อการใช้งานต่ำ และทำให้ความสามารถในการซึมผ่านของอากาศต่ำ ดังนั้นเพื่อเป็นการต่อยอดและพัฒนา งานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะแก้ปัญหาโดยใช้เทคนิคการกราฟต์พอลิเมอร์เซชัน อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาโครงสร้างของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าไม่มีส่วนที่สามารถสร้างพันธะกับพื้นผิวของผ้าได้ ดังนั้นจึงต้องดัดแปรอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ให้มี พันธะ C=C บนพื้นผิว โดยการทำปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชันกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ก่อนขั้นตอนการกราฟต์ [28]

จากที่กล่าวมาข้างต้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยชิ้นนี้ โดยงานวิจัยชิ้นนี้เลือกที่นำสารฟลูออโรพอลิเมอร์และอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ดัดแปร มากราฟต์ลงบนพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ โดยใช้รังสีแกมมากระตุ้นให้เกิดการกราฟต์ จากนั้นศึกษาและพัฒนาสมบัติในการสะท้อนน้ำ (water repellence) ต่อด้านรังสียูวี (UV resistance) และการยับยั้งแบคทีเรีย (anti-bacterial) เพื่อประยุกต์เป็นชุดสิ่งทอเพื่อการป้องกันที่มีสมบัติเชิงหน้าที่หลากหลาย (multifunctional protective textile)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ปรับปรุงสมบัติการสะท้อนน้ำ การต้านรังสียูวี และการยับยั้งแบคทีเรียของพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์โดยการกราฟต์ไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลตร่วมกับนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคการฉายรังสีแกมมา

1.2.2 ศึกษาความเหมาะสมในการใช้งานเป็นสิ่งทอเพื่อการป้องกันของพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ที่ได้รับการปรับปรุงสมบัติ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการกราฟต์ ประกอบด้วย ปริมาณความเข้มข้นของมอนอเมอร์ (monomer concentration) ปริมาณของรังสีแกมมา (irradiation dose) ระบบบรรยากาศที่ใช้ และชนิดของสารละลาย

1.3.2 ศึกษาปริมาณของความเข้มข้นของมอนอเมอร์ (10%, 15%, 20%, 25% และ 30%) ที่ส่งผลต่อระดับขั้นของการกราฟต์ของพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์

1.3.3 ศึกษาการดัดแปรอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้อัตราส่วนของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อมาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็น 1:1, 1:1.5 และ 1:2 จากนั้นศึกษาการกราฟต์อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์

1.3.4 ศึกษาประสิทธิภาพในการกันน้ำ ประสิทธิภาพการต่อต้านรังสียูวี และการยับยั้งแบคทีเรีย ของพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D5946, AATCC 183-2004 และ AATCC 147 ตามลำดับ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

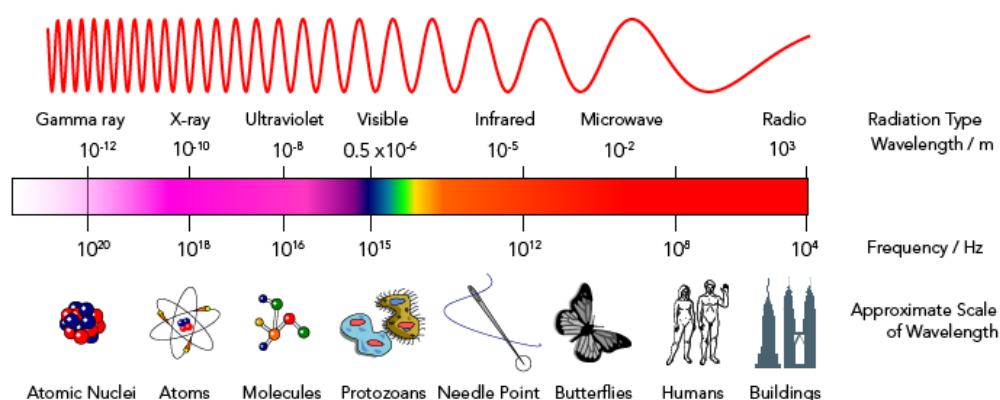
ได้พอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ ที่มีสมบัติเหมาะสมสำหรับงานด้านสิ่งทอเพื่อการป้องกัน

## บทที่ 2

### วารสารปริทรรศน์

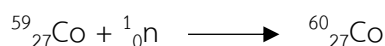
#### 2.1 รังสีแกมมา

รังสีแกมมาเป็นกัมมันตภาพรังสี (radioactivity) ที่เกิดจากภาวะความไม่เสถียรภายในนิวเคลียสของอะตอมของธาตุที่เป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี (radioisotope elements) ถูกค้นพบโดย พอล อูริช วิลลาร์ด (Paul Ulrich Villard) นักฟิสิกส์ฝรั่งเศส วิลลาร์ด โดยได้ค้นพบรังสีแกมมาจากการศึกษากัมมันตภาพรังสีที่ออกมาจากเรเดียม ซึ่งรังสีแกมมานี้ ถือเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความยาวคลื่นสั้นที่สุดในสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การที่มีความยาวคลื่นสั้นนี้ จึงทำให้รังสีแกมมาเป็นรังสีที่มีอำนาจทะลุทะลวงสูง สามารถทะลุผ่านสิ่งกีดขวางได้ดี อีกทั้งไม่สามารถเบี่ยงเบนในสนามไฟฟ้าได้ เนื่องจากไม่มีประจุและมวล ดังนั้นรังสีนี้จึงสามารถทำให้เกิดอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ได้ ถ้าขาดการควบคุมที่มีประสิทธิภาพ [29, 30]

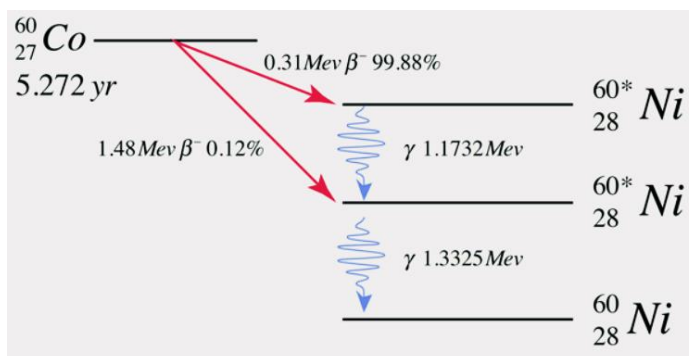


รูปที่ 2.1 รังสีจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [31]

รังสีแกมมา เกิดจากสลายตัวของสารกัมมันตรังสี เช่น ธาตุเรเดียม ธาตุโคบอลต์-60 (Co-60) โดยปกติการฉายรังสีแกมมา นิยมใช้แหล่งกำเนิดจากโคบอลต์-60 เนื่องจากมีราคาถูกเมื่อเทียบกับไอโซโทปอื่น ๆ และมีครึ่งชีวิตที่พอเหมาะ คือ 5.272 ปี มีความคงทนภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีปริมาณรังสีสูงและสามารถใช้งานได้ แม้กระทั่งในอุณหภูมิสูงถึง 1,000 องศาเซลเซียส โคบอลต์-60 ผลิตได้เองจากการนำโคบอลต์-59 ไปอาบรังสีนิวตรอน (neutron activation) ในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ดังนี้ [32]



โคบอลต์-60 ให้รังสีแกมมา 2 โฟตอนต่อการสลายตัวหนึ่งนิวเคลียสโดยพลังงานโฟตอนทั้งสองเท่ากับ 1.17 MeV และ 1.33 MeV ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 หรือคิดเฉลี่ยให้พลังงานโฟตอน 2.5 MeV ต่อการสลายตัวหนึ่งครั้ง ในกระบวนการฉายรังสีทางอุตสาหกรรมจะใช้ต้นกำเนิดโคบอลต์-60 ที่ให้ความแรงรังสีระดับหมื่นหรือแสนคูรี ลักษณะของต้นกำเนิดอาจเป็นแท่งทรงกระบอกเป็นแผ่น เป็นเม็ดบรรจุในท่อเหล็กกล้าไร้สนิมหรือแบบอื่น ๆ [33]



รูปที่ 2.2 การสลายตัวของโคบอลต์-60 [34]

มาตรวัด (measure) ที่เกี่ยวข้อง เมื่อต้องปฏิบัติงานเกี่ยวกับรังสีแกมมา ได้แก่ [35, 36]

1) เอกซ์โพเชอร์ (exposure) เป็นการวัดความแรงของสนามรังสี ณ ตำแหน่งใด ๆ ในอากาศด้วยเครื่องสำรวจรังสี (survey meter) โดยใช้วิธีการวัดปริมาณของประจุ โดยวัดที่การแตกตัวเป็นไอออนของโมเลกุลในมวลจำนวนหนึ่งของอากาศ (ionization) ซึ่งก็คือ ผลรวมของไอออนที่มีประจุเดียวกันที่เกิดขึ้นในมวลของอากาศ 1 หน่วย ที่โฟตอนปฏิสัมพันธ์ (interacting photons) ถูกดูดกลืนอย่างสมบูรณ์ในมวลนั้น เดิมใช้หน่วยวัดเป็น เรินต์เกน (roentgen: R) โดยกำหนดว่า ๑ เรินต์เกน หมายถึง ปริมาณรังสีเอกซ์ หรือรังสีแกมมาที่สามารถทำให้อากาศ 1 cm<sup>3</sup> ที่อุณหภูมิ 0°C ความดัน 760 mmHg แตกตัวเป็นไอออน เกิดประจุไฟฟ้า 1 อีเอสยู (esu: electrostatic unit) ปัจจุบันใช้หน่วยคูลอมบ์ต่อกิโลกรัมของอากาศ เมื่อเทียบกับหน่วยเรินต์เกน (R) แล้ว จะได้  $1 R = 2.58 \times 10^{-4} C/kg_{air}$  ข้อดีของการวัดรังสีในหน่วยนี้คือ สามารถวัดได้โดยตรงด้วย เครื่องสำรวจรังสี แต่ก็มีข้อจำกัดว่าใช้วัดได้เฉพาะ สนามรังสีในอากาศเท่านั้น

2) ปริมาณรังสี (dose) หรือ ปริมาณรังสีดูดกลืน (absorbed dose) คือ ปริมาณพลังงานที่วัตถุตัวกลางดูดกลืนไว้เมื่อได้รับรังสี เดิมเคยใช้หน่วยเป็น แร็ด (rad: radiation absorbed dose) โดยกำหนดว่า 1 แร็ด หมายถึง ปริมาณรังสีดูดกลืนจำนวน 100 เอิร์ก ต่อกรัมของมวลสาร ปัจจุบันใช้หน่วยเอสไอว่า เกรย์ (Gy) โดยกำหนดว่า 1 เกรย์ หมายถึง ปริมาณรังสีดูดกลืนจำนวน 1 จูลต่อกิโลกรัมของมวลสาร หรือ  $1 Gy = 1 J/kg$  เมื่อเทียบกับหน่วยแร็ดแล้ว จะได้  $1 Gy = 100 rads$

3) ปริมาณรังสีสมมูล (equivalent dose) เป็นผลรวมของปริมาณรังสีดูดกลืนในเนื้อเยื่อ หรืออวัยวะใด ๆ ของมนุษย์ หลังจากปรับเทียบการก่อดอันตรายของรังสีทุกชนิดที่อวัยวะนั้นได้รับ โดยเทียบกับการก่อดอันตรายของรังสีแกมมา เดิมเคยใช้หน่วยเป็น เร็ม (rem: roentgen equivalent man) โดยกำหนดว่า 1 เร็ม หมายถึง ปริมาณรังสีที่ก่อให้เกิดผลทางชีวภาพเทียบเท่ากับผลที่เกิดจากรังสีเอกซ์ หรือรังสีแกมมา 1 แร็ด ปัจจุบันใช้หน่วย เอสไอเป็นซีเวิร์ต (Sv) ซึ่ง  $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rems}$  การที่ต้องมีหน่วยวัดปริมาณรังสีสมมูลขึ้นมา เนื่องจากมีการค้นพบว่ารังสีแต่ละชนิด แม้จะถ่ายเทพลังงานในจำนวนที่เท่ากันให้แก่อวัยวะใดอวัยวะหนึ่ง ผลปรากฏว่าอวัยวะเหล่านั้นมีความเสียหายที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ เพราะรังสีแต่ละชนิดมีคุณภาพในการก่อดอันตรายที่แตกต่างกัน และมีการกระจายของสารกัมมันตรังสีในอวัยวะต่างกัน การวัดปริมาณรังสีสมมูลนี้ใช้ในงานด้านการป้องกันรังสี การออกแบบด้านวิศวกรรมศาสตร์ ด้านกฎหมาย และด้านบริหาร

4) อัตราปริมาณรังสี (dose rate) เป็นการวัดว่าได้รับปริมาณรังสีรวดเร็วเพียงใด โดยมักแสดงด้วยหน่วย เรินต์เกินต่อชั่วโมง (R/hr) มิลลิเรินต์เกินต่อชั่วโมง (mR/hr) เร็มต่อชั่วโมง (rem/hr) มิลลิเร็มต่อชั่วโมง (mrem/hr) การทราบอัตราปริมาณรังสีช่วยให้สามารถ คำนวณปริมาณรังสีที่ได้รับในเวลาช่วงหนึ่งได้ ยกตัวอย่าง สมมติว่า อัตราปริมาณรังสีเท่ากับ 0.8 เร็มต่อชั่วโมง ผู้ที่ปฏิบัติงานในบริเวณนี้นาน 2 ชั่วโมง ก็จะได้รับปริมาณรังสีเท่ากับ 1.6 เร็ม

## 2.2 การฉายรังสีแกมมาในพอลิเมอร์

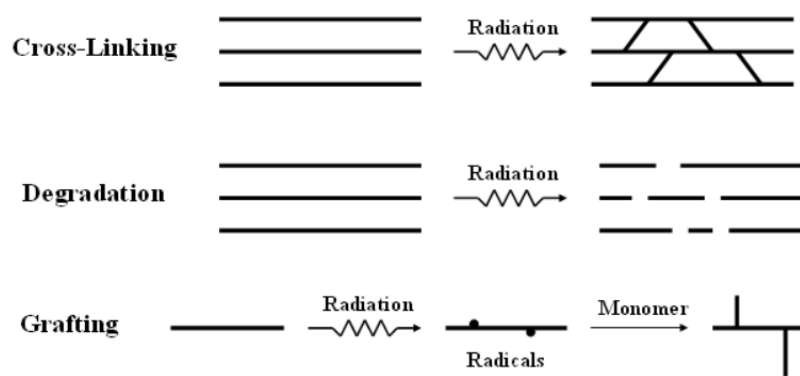
เมื่อนำพอลิเมอร์ไปฉายรังสี พลังงานจากรังสีแกมมา (gamma rays) จะถูกถ่ายโอนไปสู่พอลิเมอร์ ซึ่งพลังงานนี้สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี หรือการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของพอลิเมอร์ได้ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเหล่านี้ สามารถแบ่งชนิดออกได้ดังต่อไปนี้ [37]

1) cross-linking เป็นการเชื่อมขวาง หรือ ครอบสลิงก์ คือ การเกิดพันธะเคมีที่ก่อให้เกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ กลายเป็นโครงร่างที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น โดยทั่วไปแล้วการเชื่อมขวางจะช่วยปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ให้ดีขึ้น เช่น ความแข็งแรง ความเหนียว ความคงทนต่อสารเคมี และสมบัติสำคัญอื่น ๆ เช่น การบวมน้ำ เป็นต้น

2) degradation เป็นการทำให้พอลิเมอร์เสื่อมสภาพ หรือทำให้พันธะเคมีในโมเลกุลของพอลิเมอร์แตกสลาย ส่งผลทำให้สายโซ่พอลิเมอร์สั้นลง และมีน้ำหนักโมเลกุลลดลง อีกทั้งยังส่งผลให้ขั้นตอนการขึ้นรูปพอลิเมอร์สามารถทำได้ง่ายขึ้น และมีประโยชน์อย่างมากต่อพอลิเมอร์บางชนิด เช่น เทฟลอน (TEFLON: polytetrafluoroethylene, PTFE) ที่ไม่สามารถลดน้ำหนักโมเลกุลได้ด้วยวิธีอื่น

3) grafting เป็นการต่อมอนอเมอร์ต่างชนิดเข้ากับพอลิเมอร์ที่สนใจ เมื่อนำไปฉายรังสี หมู่ฟังก์ชัน (functional group) บางส่วน อาจหลุดจากสายโซ่ของพอลิเมอร์ ทำให้ ผน.ตำแหน่ง

นั้นเกิดเป็นตำแหน่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (active site) ซึ่งอาจจะเป็นอนุมูลอิสระ หรือไอออนก็ได้ และกลายเป็นจุดตั้งต้นของปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ (polymerization) ของมอนอเมอร์ ก่อให้เกิดเป็นสายโซ่ของพอลิเมอร์เส้นใหม่ที่เกาะอยู่บนพอลิเมอร์เส้นเดิม ซึ่งเป็นวิธีการที่มีประโยชน์อย่างมาก สำหรับการดัดแปรพื้นผิวของพอลิเมอร์



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงของพอลิเมอร์เมื่อมีการฉายรังสี [37]

### 2.2.1 การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของพอลิเมอร์

ในการปรับปรุงหรือดัดแปรสมบัติของพอลิเมอร์ นักวิจัยส่วนใหญ่มักจะทำให้เกิดการกราฟต์ (grafting) เกิดขึ้นเนื่องจากการนำมอนอเมอร์หรือพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน มาฉายรังสี ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้พอลิเมอร์หลักเป็นสายโซ่หลักเป็นโฮโมพอลิเมอร์ (พอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์) และเติมมอนอเมอร์อีกชนิดลงไปคือ ฟลูออรีนเมทาคริเลต จึงทำให้เกิดเป็นพอลิเมอร์ในลักษณะที่เรียกว่า โคพอลิเมอร์แบบกราฟต์ (graft copolymers)

โคพอลิเมอร์แบบกราฟต์เกิดจากการมีจุดว่องไวต่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นในสายโซ่หลักที่ไม่ใช่อยู่ ณ ตำแหน่งปลายสายโซ่ แล้วเติมมอนอเมอร์อีกชนิดหนึ่งลงไป วิธีที่ใช้กันมากคือใช้รังสีแกมมา ทำให้เกิดการดึงอะตอมไฮโดรเจนออกจากสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้เกิดอนุมูลอิสระภายในโมเลกุล จากนั้นเติมมอนอเมอร์อีกชนิดลงไปเมื่อทำปฏิกิริยากับตำแหน่งของอนุมูลอิสระนั้น ซึ่งข้อที่ยุ่งยากของวิธีการนี้ คือโฮโมพอลิเมอร์หรือมอนอเมอร์ชนิดแรกอาจจะเข้ามารวมตัวกันที่จุดว่องไวแทนที่จะเป็นมอนอเมอร์อีกชนิด ซึ่งอาจแก้ไขได้ด้วยการฉายแสงที่สายโซ่พอลิเมอร์ที่บรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจน เช่นไนโตรเจน จากนั้นเติมมอนอเมอร์ชนิดที่สองเข้าไปด้วยเลย ปัจจัยที่สำคัญที่สุดคือต้องเลือกมอนอเมอร์ชนิดแรกที่ไม่ค่อยว่องไว แต่เมื่อกลายเป็นพอลิเมอร์แล้วจะว่องไวต่อรังสีและเกิดอนุมูลอิสระได้มาก ส่วนอีกวิธีหนึ่งอาจเตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างตัวริเริ่มปฏิกิริยากับสายโซ่พอลิเมอร์ในสารละลายมอนอเมอร์ชนิดที่สอง ปฏิกิริยาจะเกิดจุดว่องไวโดยการหลุดออกของอะตอมไฮโดรเจน แล้วมอนอเมอร์ชนิดที่สองจะเข้ารวมที่จุดว่องไวต่อไปได้ วิธีนี้เรียกว่า transfer

grafting โดยใช้หลักของปฏิกิริยาการย้ายสายโซ่ ส่วนปัญหาที่พบในการเตรียมโคพอลิเมอร์แบบกราฟต์ คือมักจะเกิดโฮโมพอลิเมอร์ที่กิ่งสาขาด้วย และในบางครั้งสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีอนุภาคลิอิสระไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้น ในกรณีนี้จะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของตัวริเริ่มที่ใช้นั่นเอง [38] ลักษณะของโคพอลิเมอร์แบบกราฟต์มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะของโคพอลิเมอร์แบบกราฟต์

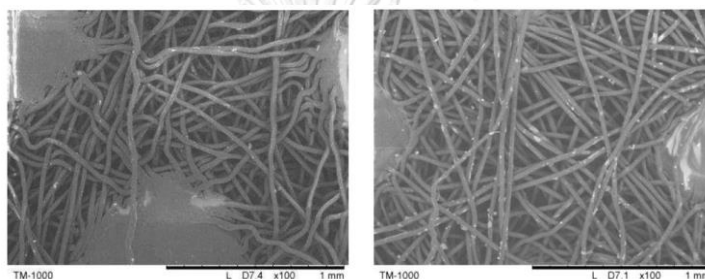
เทคนิคการกราฟต์โดยการฉายรังสีแกมมาสามารถทำให้เกิดอนุมูลอิสระได้โดยตรงจากพอลิเมอร์ และมอนอเมอร์ที่ใช้ หรือจากสารประกอบอื่นที่อยู่รวมกันเป็นสายโซ่โมเลกุลดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยเกิดจากการต่อเติมมอนอเมอร์จำนวน  $m$  โมเลกุลเข้าด้วยกัน โดยมีปลายหนึ่งเป็นด้านที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ซึ่งอาจเป็นสารที่มีบทบาทในการรับหรือถ่ายโอนกับด้านที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาที่มาจากสายโซ่โมเลกุลอื่น ๆ โดยสารนี้อาจเป็นได้ทั้งมอนอเมอร์ ตัวริเริ่มปฏิกิริยา หรือโมเลกุลของพอลิเมอร์ก็ได้ การกราฟต์ที่มีพอลิเมอร์ และโฮโมพอลิเมอร์เป็นโมเลกุลสุดท้าย โดยทั่วไปแล้วจะไม่ก่อให้เกิดลูกโซ่อีก ซึ่งอัตราของปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ด้วยรังสีจะขึ้นอยู่กับปริมาณรังสี ชนิดและปริมาณของมอนอเมอร์ อีกทั้งยังขึ้นอยู่กับบรรยากาศที่ใช้ทำปฏิกิริยา ชนิดของสารละลายที่ใช้ในระบบการกราฟต์ เป็นต้น



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาการกราฟต์ที่เกิดขึ้นจากการฉายรังสี

โดยทั่วไปแล้วการกราฟต์ด้วยการฉายรังสี ไม่เพียงแต่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของพอลิเมอร์เท่านั้น แต่ยังมีส่งผลทำให้ลักษณะทางกายภาพของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไปอีกด้วย ดังในงานวิจัยของ Xia และคณะ [4] ได้กราฟต์กรดอะคริลิกลงบนพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ด้วยการฉายรังสีอิเล็กตรอนเพื่อตัดแปรให้ผ้ามีสมบัติในการชอบน้ำที่ดีขึ้น อีกทั้งได้ศึกษาปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อระดับขั้นของการกราฟต์ จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อกราฟต์แล้ว ลักษณะของเส้นใยที่ได้จะ

มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม กล่าวคือจะมีลักษณะพื้นผิวที่ไม่เรียบเมื่อเทียบกับเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการกราฟต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 สำหรับเปอร์เซ็นต์การกราฟต์พบว่า ปัจจัยของความเข้มข้นของกรดอะคริลิกที่ 8% และปริมาณรังสีที่ใช้ 40 กิโลเกรย์ แสดงระดับขั้นของการกราฟต์และความชอบน้ำของผ้ามีค่าสูงสุด นอกจากนี้แล้วยังพบว่า ค่าความแข็งแรงในการแตกหัก (breaking strength) เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของระดับขั้นของการกราฟต์ แต่ลดลงตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการที่ปริมาณรังสีสูงเกินไป อาจทำให้พอลิเมอร์เกิดการ degradation ได้ ดังนั้นพอลิพรพิลีนสปีนบอนด์สามารถดัดแปรได้อย่างง่ายโดยกระบวนการทางรังสี โดยมีปัจจัยหลัก 2 ประการที่ส่งผลต่อระดับขั้นของการกราฟต์นั่นคือ ความเข้มข้นของมอนอเมอร์ และปริมาณรังสีที่ใช้



รูปที่ 2.6 ลักษณะของเส้นใยพอลิพรพิลีนก่อนและหลังการกราฟต์ ตามลำดับ

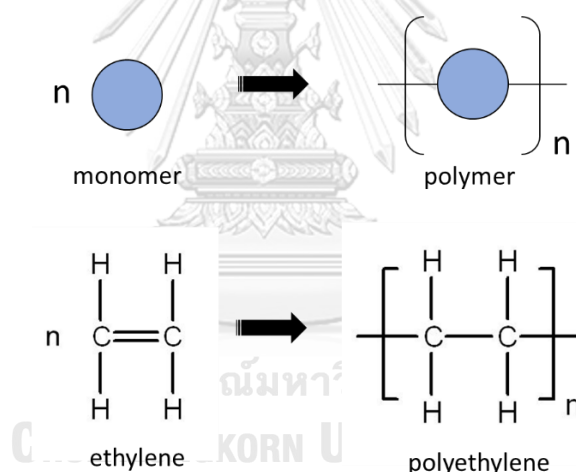
นอกจากนี้แล้วยังได้มีการศึกษาต่อเนื่องถึง ปัจจัยที่ส่งผลต่อระดับขั้นของการกราฟต์ นั่นคืออัตราปริมาณรังสีที่ใช้ ดังในงานวิจัยของ Shiraiishi และคณะ [39] ได้ศึกษาการกราฟต์ไวนิลมอนอเมอร์ลงบนเส้นใยฝ้าย ด้วยการฉายรังสีแกมมาจากโคบอลต์-60 เปรียบเทียบกับรังสีจากลำแสงอิเล็กตรอน จากผลการศึกษาพบว่า การฉายด้วยรังสีแกมมานั้น อัตราปริมาณรังสีที่สูงจะส่งผลต่อระดับขั้นของการกราฟต์ กล่าวคือเมื่อเพิ่มปริมาณรังสี จะทำให้ระดับขั้นของการกราฟต์เพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้าปริมาณรังสีมากกว่า 0.5 Mrad กลับพบว่าค่าระดับขั้นของการกราฟต์ลดต่ำลง อันเป็นผลมาจากการ degradation ของพอลิเมอร์ แต่เมื่อเติมเอทิลีนไกลคอล ไดเมทาอะครีเลต (ethylene glycol dimethacrylate) ในปริมาณที่เล็กน้อย ส่งผลทำให้ค่าให้ค่าระดับขั้นของการกราฟต์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีการเกิดการเชื่อมกันระหว่างสายโซ่เพิ่มมากขึ้นนั่นเอง ส่วนการใช้รังสีจากอิเล็กตรอนพบว่าถ้าปริมาณรังสีเกิน 5 Mrad ก็แสดงผลเช่นเดียวกันกับการใช้รังสีแกมมา โดยในงานวิจัยนี้ก็ได้นำเส้นใยฝ้ายที่ผ่านการกราฟต์มาทดสอบสมบัติ พบว่าเส้นใยฝ้ายนี้จะมีคุณสมบัติที่เพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งยังมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุได้ดี



## 2.3 กระบวนการพอลิเมอไรเซชัน

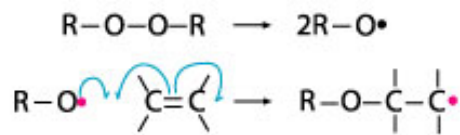
ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเป็นกระบวนการทางเคมีในการสังเคราะห์พอลิเมอร์จากมอนอเมอร์ โดยกระบวนการดังกล่าวเป็นการสร้างพันธะโคเวเลนต์ระหว่างอะตอมคาร์บอน ซึ่งการเชื่อมต่อนี้ โมเลกุลเล็ก ๆ ดังกล่าวมาเชื่อมต่อกันจนมีขนาดโมเลกุลที่มีความยาวมากขึ้น โดยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันสามารถออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

**2.3.1 ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเติม** เป็นปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอไรเซชันขั้นพื้นฐานที่พบมากที่สุด ในอุตสาหกรรมการผลิตพอลิเมอร์ ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นการสร้างพันธะโคเวเลนต์ระหว่างอะตอมของคาร์บอนจนทำให้พอลิเมอร์มีขนาดน้ำหนักโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้น โดยส่วนมากแล้วพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากวิธีการนี้มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก นั่นหมายความว่ามีความสามารถในการคืนกลับรูปเดิมได้เมื่อให้ความร้อน กลไกการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเติม สามารถเขียนเป็นสมการเคมีง่าย ๆ และตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งจากปฏิกิริยาดังกล่าวนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนย่อยดังนี้ [40]



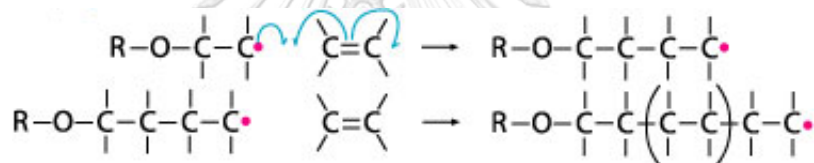
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างของปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเติม

1) ขั้นริเริ่มสายโซ่ (chain initiation) ถือเป็นการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นเช่นเดียวกับกระบวนการให้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหลาย โดยในระหว่างการเกิดปฏิกิริยานี้ สารริเริ่มปฏิกิริยาจะถูกกระตุ้นให้แตกตัวเป็นอนุมูลอิสระที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยา ซึ่งหมายถึงกลุ่มของอิเล็กตรอนที่มีอิเล็กตรอนขาดคู่หรืออิเล็กตรอนอิสระ จะทำให้เกิดพันธะโคเวเลนต์กับโมเลกุลอื่นที่มีอิเล็กตรอนขาดคู่เช่นเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2.8



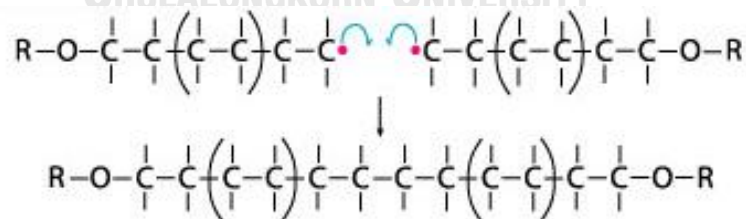
รูปที่ 2.8 ขั้นริเริ่มสายโซ่ (chain initiation) [41]

2) ขั้นแผ่ขยายสายโซ่ (chain propagation) เป็นกระบวนการที่ต่อเนื่องจากช่วงเริ่มต้น ซึ่งถือว่าเป็นการเชื่อมต่อกันของพอลิเมอร์จนมีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยที่พันธะคู่ของมอนอเมอร์ในตำแหน่งแรกและตำแหน่งสุดท้ายที่ถูกกระตุ้นให้มีความไวด้วยการใช้อิทธิพลของอนุมูลอิสระ สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากันจนทำให้พอลิเมอร์มีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ระดับพลังงานโดยรวมของระบบลดลงเรื่อย ๆ และการดำเนินไปของปฏิกิริยาจะเป็นไปอย่างต่อเนื่องจนกว่าปริมาณของมอนอเมอร์ในระบบจะหมดลงหรือมีการใส่ตัวยับยั้งปฏิกิริยาลงไปในระบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ขั้นแผ่ขยายสายโซ่ (chain propagation) [41]

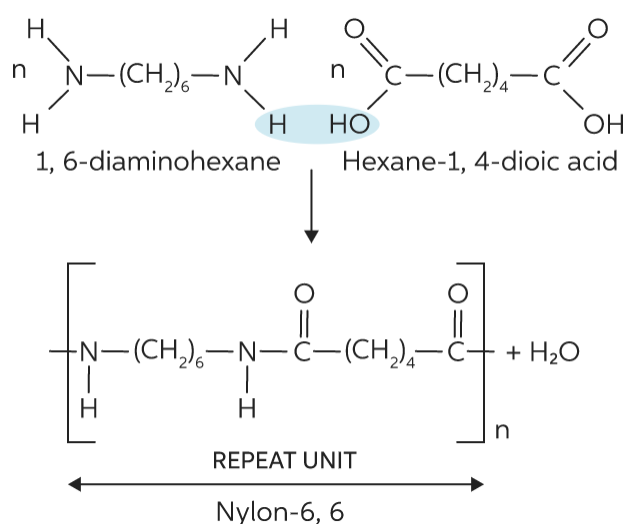
3) ขั้นสิ้นสุดปฏิกิริยา (chain termination) เป็นช่วงที่ทำให้ปฏิกิริยาพอลิเมอร์สิ้นสุดลงซึ่งจะมีการเติมสารเพื่อยับยั้งการทำงานของอนุมูลอิสระลงไปในระบบซึ่งถือว่าเป็นกระบวนการสุดท้ายของการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์เช่นดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.10 ขั้นสิ้นสุดปฏิกิริยา (chain termination) [41]

**2.3.2 ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไซคลิกแบบควบแน่น** เป็นปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไซคลิกที่มอนอเมอร์สามารถรวมตัวกันเองด้วยปฏิกิริยาการควบแน่นของหมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างกัน 2 ชนิด ซึ่งพอลิเมอร์ที่สามารถเตรียมได้จากวิธีนี้ต้องมีโครงสร้างในระดับโมเลกุลและหมู่ฟังก์ชันที่เหมาะสมและมีความเป็นไปได้ในการทำปฏิกิริยาระหว่างกันด้วย ซึ่งในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์นั้นอาจมีการควบคุม

อุณหภูมิ ความดันและการเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมลงไปในระบบด้วย เพื่อให้มอนอเมอร์มีประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยากันได้ในภาวะที่เหมาะสม พอลิเมอร์ที่สามารถสังเคราะห์ได้จากกระบวนการนี้นั้นจะเป็นเทอร์โมเซต ซึ่งหมายความว่าไม่มีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงสภาพด้วยการใช้ความร้อน รูปที่ 2.11 เป็นตัวอย่างของการทำปฏิกิริยากันระหว่างมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นแอลกอฮอล์และกรดคาร์บอกซิลิก นอกจากนี้แล้วปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นจะทำให้ได้ผลพลอยได้ที่ออกมาจากปฏิกิริยาด้วยเช่น  $H_2O$ ,  $HCl$ ,  $CH_3OH$  ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลขนาดเล็ก [40, 42]



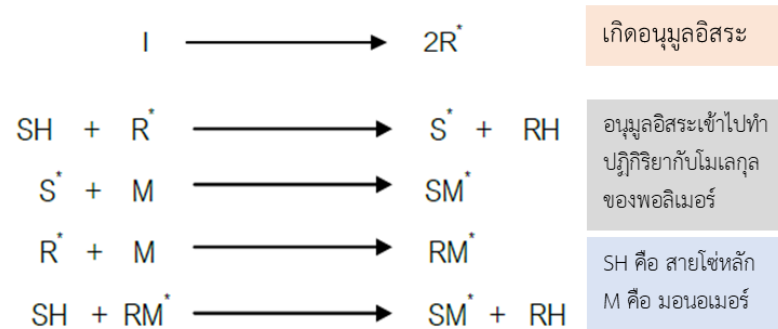
รูปที่ 2.11 ตัวอย่างการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น

## 2.4 พอลิเมอไรเซชันด้วยการฉายรังสีแกมมา

### 2.4.1 กลไกการเกิดพอลิเมอไรเซชัน

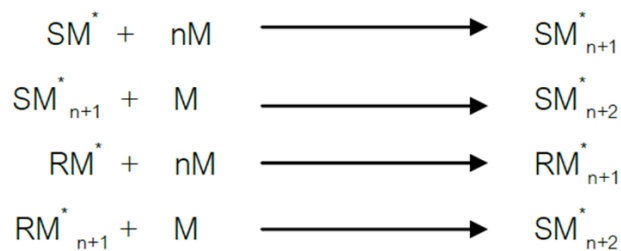
เมื่อนำพอลิเมอร์มาฉายรังสีแกมมา ภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์จะถูกกระตุ้นให้แตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ หรือไอออนได้ ซึ่งกระบวนการพอลิเมอไรเซชันจะเป็นแบบอนุมูลอิสระหรือไอออน ขึ้นอยู่กับสมบัติของมอนอเมอร์และเงื่อนไขอื่น ๆ แต่ส่วนใหญ่จะเป็นพอลิเมอไรเซชันแบบอนุมูลอิสระเพราะไอออนจะเสถียร และเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้ดีเฉพาะในภาวะอุณหภูมิต่ำ ๆ เท่านั้น [38] ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันด้วยรังสีแกมมาจะประกอบไปด้วยกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

1. ขั้นริเริ่มสายโซ่ (chain initiation) เมื่อฉายรังสี พลังงานจากรังสีจะเหนี่ยวนำให้เกิดอนุมูลอิสระบนสายโซ่ของพอลิเมอร์ จากนั้นอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของพอลิเมอร์ในทันที [42] ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ขั้นริเริ่มสายโซ่ (chain initiation) เมื่อฉายรังสี

2. ขั้นแพร่ขยายสายโซ่ (chain propagation) ในขั้นตอนนี้เป็นการเพิ่มปริมาณของมอนอเมอร์ โดยอนุมูลอิสระที่ได้จากขั้นริเริ่มสายโซ่ จะทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์โมเลกุลที่สอง สาม สี่ ไปเรื่อย ๆ ได้เป็นอนุมูลพอลิเมอร์ที่สายยาวขึ้น [42] ดังรูปที่ 2.13

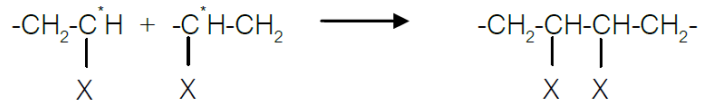


n แทนจำนวนหน่วยของมอนอเมอร์ที่รวมเข้าไปในโซ่ของพอลิเมอร์

รูปที่ 2.13 ขั้นแพร่ขยายสายโซ่ (chain propagation) เมื่อฉายรังสี

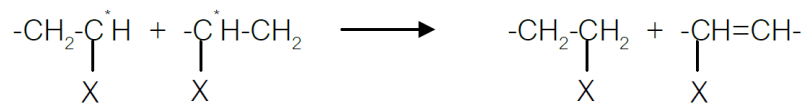
3. ขั้นสิ้นสุดปฏิกิริยา (chain termination) เป็นปฏิกิริยาของอนุมูลพอลิเมอร์ที่หมดความว่องไว หรือหมดความสามารถในการทำปฏิกิริยาต่อไปได้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ

1) แบบ combination จะเกิดขึ้นเมื่ออนุมูลอิสระของพอลิเมอร์มีระดับพลังงานต่ำ สายโซ่พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาแบบนี้จะมีน้ำหนักโมเลกุลเป็นสองเท่า ซึ่งเกิดจากน้ำหนักรวมของอนุมูลพอลิเมอร์ในแต่ละตัวที่รวมกัน [42]



รูปที่ 2.14 ชั้นสิ้นสุดปฏิกิริยาแบบ combination [32]

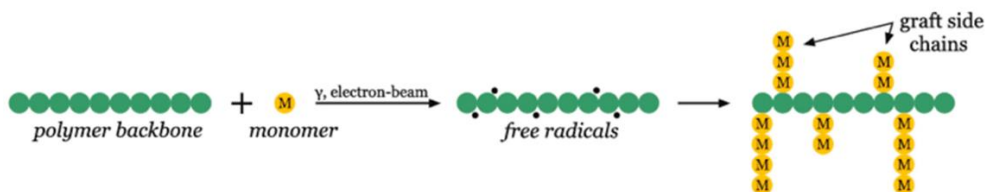
2) แบบ disproportionation เป็นการสิ้นสุดของอนุกรมพอลิเมอร์เนื่องจากการแบ่งหรือแยกสองโมเลกุลที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเป็นสองโมเลกุลที่ไม่สามารถทำปฏิกิริยากันต่อไปได้อีก [32]



รูปที่ 2.15 ชั้นสิ้นสุดปฏิกิริยาแบบ disproportionation [32]

## 2.4.2 เทคนิคในการฉายรังสีเพื่อให้เกิดพอลิเมโรไซเซชัน

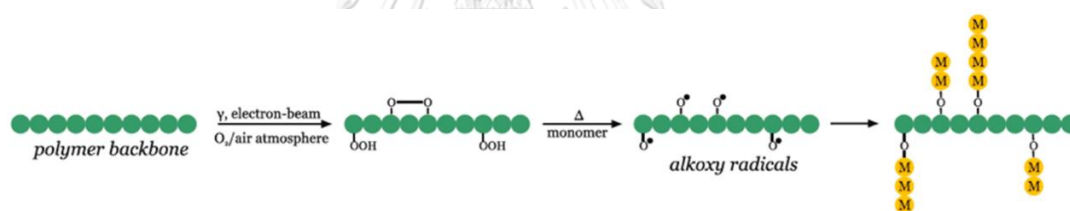
**2.4.2.1 Simultaneous irradiation technique** ถือเป็นเทคนิคพื้นฐานของกระบวนการพอลิเมโรไซเซชันด้วยรังสี เนื่องจากสามารถเตรียมได้ง่ายและมีประสิทธิภาพสูง ซึ่งวิธีการของเทคนิคนี้คือ พอลิเมอร์และมอนอเมอร์จะถูกฉายรังสีพร้อม ๆ กัน ด้วยการนำพอลิเมอร์แช่ลงในสารละลายมอนอเมอร์นั่นเอง ปัจจัยที่สำคัญที่สุดของเทคนิคนี้คือ การกระจายตัวของมอนอเมอร์เข้าไปภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดว่าปฏิกิริยาจะสามารถเกิดได้ที่พื้นผิวของพอลิเมอร์หรือเกิดได้ทั่วทั้งปริมาตรของพอลิเมอร์ นอกจากนี้แล้วปัจจัยที่อาจส่งผลต่อกระบวนการพอลิเมโรไซเซชันคือ อุณหภูมิ ภาวะบรรยากาศที่ใช้ (ภาวะออกซิเจน ภาวะสุญญากาศ หรือภาวะบรรยากาศไนโตรเจน) อัตราปริมาณรังสี และปริมาณรังสี เป็นต้น เมื่อพอลิเมอร์ถูกฉายรังสี หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญจะหลุดออกจากโมเลกุล แล้วเกิดอนุมูลอิสระที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ณ ตำแหน่งหนึ่ง ส่วนมอนอเมอร์เมื่อได้รับรังสีจะเกิดอนุมูลอิสระขึ้นที่ตำแหน่งพันธะคู่ของมอนอเมอร์ จากนั้นจะเกิดการกราฟต์พอลิเมโรไซเซชันในที่สุด [33, 38, 43] ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 Simultaneous irradiation technique [44]

**2.4.2.2 Pre-irradiation technique** ถือเป็นเทคนิคที่ไม่ค่อยนิยมเพราะเนื่องจากมีความซับซ้อน และยุ่งยาก ซึ่งวิธีการคือ นำพอลิเมอร์ไปฉายรังสีก่อนเพื่อให้เกิดตำแหน่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาหรืออนุมูลอิสระภายในโมเลกุล จากนั้นจึงค่อยนำพอลิเมอร์ที่ฉายรังสีแล้วมาทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ที่สนใจอีกครั้ง โดยเทคนิคนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอนคือ peroxidation และ trapped radical โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) การกราฟต์แบบ peroxidation เทคนิคนี้ทำโดยการนำพอลิเมอร์ไปฉายรังสีในภาวะบรรยากาศออกซิเจน โมเลกุลของพอลิเมอร์จะดูดกลืนพลังงานของรังสีทำให้เกิดเป็น hydroperoxides หรือ diperoxide และโมเลกุลของพอลิเมอร์ถูกกระตุ้นให้อยู่ในภาวะกระตุ้นแล้วแตกตัวออกเป็นอนุมูลอิสระ โดยอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นนี้มีความเสถียรสูงทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ได้ ดังนั้นหลังขั้นตอนจากฉายรังสี จะนำมอนอเมอร์มารวมกับพอลิเมอร์ ซึ่งมอนอเมอร์นั้นอาจอยู่ในรูปของสารละลาย แล้วจึงให้ความร้อนกับระบบภายใต้ภาวะบรรยากาศออกซิเจน ซึ่งจะ ทำให้ peroxides เกิดการแตกตัวเป็น hydroxyl radical เกิดเป็นพอลิเมอร์โซ่สั้นของมอนอเมอร์บนสายโซ่หลักพอลิเมอร์ ทำให้ได้ผลลัพธ์สุดท้ายเป็นกราฟต์โคพอลิเมอร์เกิดขึ้น [33, 38, 43] ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การกราฟต์แบบ peroxidation [44]

2) การกราฟต์แบบ trapped radical เทคนิคนี้ทำโดยการนำพอลิเมอร์ไปฉายรังสีที่อุณหภูมิต่ำ ภายใต้ภาวะสุญญากาศ (vacuum) ซึ่งจะทำให้เกิดอนุมูลอิสระภายในสายโซ่หลักของพอลิเมอร์เป็นแบบ trapped ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ถ้าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature;  $T_g$ ) ของพอลิเมอร์ต่ำ จะทำให้ระยะเวลาในการเกิด trapped บนสายโซ่ของพอลิเมอร์นานขึ้น โดย trapped ที่เกิดขึ้นนี้จะมีควมว่องไวต่อปฏิกิริยาที่สูงมาก ปัจจัยที่สำคัญต่อการเกิด trapped คือความสามารถในการแพร่กระจายของมอนอเมอร์ ถ้ามอนอเมอร์สามารถแพร่กระจายเข้าไปในสายโซ่ของพอลิเมอร์ได้มาก ก็จะทำให้มีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างมอนอเมอร์และ trapped เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้แล้ว อีกหนึ่งปัจจัยที่อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเกิด trapped คืออุณหภูมิขณะฉายรังสี ซึ่งถ้าต้องการให้ประสิทธิภาพของการเกิด trapped สูงขึ้นขณะฉายรังสี จะต้องควบคุมอุณหภูมิให้ต่ำ อีกทั้งจำนวนอนุมูลอิสระที่เพิ่มขึ้นมีความสัมพันธ์กับปริมาณรังสีโดยตรง [33, 38, 43]

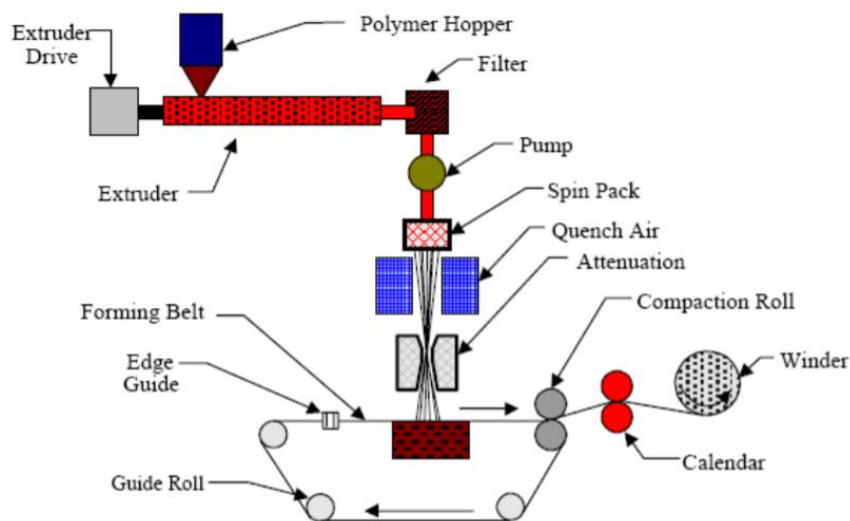


รูปที่ 2.18 การกราฟต์แบบ trapped radical [44]

## 2.5 สปันบอนด์นอนวูฟเวน (spunbond nonwovens)

ผ้าสปันบอนด์นอนวูฟเวน เป็นผ้าที่เกิดจากการขึ้นรูปเส้นใยจากเม็ดพลาสติกโดยตรง โดยการหลอมเม็ดพลาสติกด้วยเครื่องหลอมอัดรีด (extruder) แล้วอัดพอลิเมอร์หลอมผ่านหัวฉีดเส้นใย เพื่อให้เป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง จากนั้นโรยลงบนสายพานเพื่อขึ้นรูปเป็นแผ่น ซึ่งแตกต่างจากผ้าทอหรือผ้าถัก โดยทั่วไปที่มีการขึ้นรูปเส้นใยให้เป็นเส้นด้ายก่อนแล้วจึงนำไปขึ้นรูปเป็นผ้า โครงสร้างของผ้าชนิดนี้ เมื่อนำไปส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะเห็นเป็นเส้นใยพาดสานกันไปมาในทุกทิศทาง ดังนั้นนอนวูฟเวนประเภทนี้จึงทำจากเส้นใยประดิษฐ์เท่านั้นไม่สามารถใช้เส้นใยธรรมชาติในการขึ้นรูปได้ พอลิเมอร์ส่วนใหญ่ที่ใช้ได้แก่ พอลิโพรพิลีน พอลิเอสเตอร์ ไนลอน และพอลิยูรีเทน เป็นต้น [45]

โดยในขั้นตอนการผลิต เริ่มจากการขึ้นรูปแผ่น (web formation) ซึ่งเป็นขั้นตอนการกระจายและโรยเส้นใยลงบนวัสดุรองรับเพื่อทำให้เป็นแผ่น (web) โดยเส้นใยที่ใช้ได้ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติกแล้วจึงโรยขึ้นรูปเป็นแผ่น จากนั้นยึดเส้นใยในแผ่น (bonding process) เป็นขั้นตอนการยึดตรึงเส้นใยในแผ่นไว้ด้วยกันเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของแผ่น สามารถทำได้โดยใช้ความร้อน (thermal bonding) เช่น ใช้ลูกกลิ้งร้อน (hot calendars) และลมร้อน (hot air) เพื่อให้บางส่วนของเส้นใย มีการหลอมและยึดติดกัน แล้วทำให้เย็นตัวลง การใช้ลูกกลิ้งร้อนจะทำให้แผ่นนอนวูฟเวนที่ได้มีลักษณะเป็นแผ่นแบน ต่อมาตกแต่งสำเร็จ (finishing process) ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายเพื่อเพิ่มลักษณะและสมบัติพิเศษอื่นๆ ให้แผ่นนอนวูฟเวน เช่น การย้อมสี เพิ่มความนุ่ม กลิ่นหอม สัมผัสความนูน สมบัติหน่วงไฟ ป้องกันไฟฟ้าสถิต เป็นต้น [45, 46] โดยขั้นตอนการผลิตสามารถสรุปได้ดังในรูปที่ 2.19



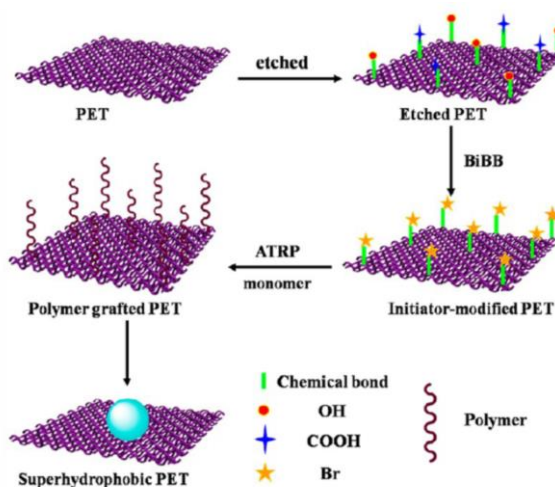
รูปที่ 2.19 ขั้นตอนการผลิตผ้าสปันบอนด์นอนวูฟเวน [46]

ผ้าสปันบอนด์สามารถออกแบบให้มีลักษณะและสมบัติที่หลากหลายเพื่อให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่แตกต่างกันไป ซึ่งลักษณะและสมบัติที่หลากหลายของนอนวูฟเวนนี้เกิดจากการเลือกใช้เส้นใยที่มีอยู่หลากหลายชนิดทั้งเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยประดิษฐ์ผสมผสานกับกระบวนการขึ้นรูปนอนวูฟเวนที่สามารถทำได้หลายเทคนิค นอนวูฟเวนมีกระบวนการผลิตที่รวดเร็ว อีกทั้งสามารถผลิตได้ในปริมาณมากและต้นทุนการผลิตต่ำ จึงสามารถใช้สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ใช้แล้วทิ้ง (disposable) ได้ และในปัจจุบัน มีนักวิจัยหลายคนได้นำผ้าสปันบอนด์มาดัดแปรและปรับปรุงให้มีสมบัติตามที่ต้องการได้ เช่น Xia และคณะ [4] ได้เพิ่มสมบัติความชอบน้ำ (hydrophilicity) ให้แก่พอลิโพรพิลีนสปันบอนด์ โดยการกราฟต์กรดอะคริลิกด้วยเทคนิคการฉายลำแสงอิเล็กตรอน (electron beam), Ghafoor และคณะ [47] ได้พัฒนาเมมเบรนแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange membrane) โดยการกราฟต์สไตรีนมอนอเมอร์ลงบนพอลิโพรพิลีนสปันบอนด์ อีกทั้ง Hagazy [48] ได้กราฟต์กรดอะคริลิกลงบนผ้าสปันบอนด์แล้วได้พัฒนาเป็นวัสดุดูดซับ (adsorbent material) โลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ ทางคณะผู้วิจัยได้สังเกตเห็นว่ายังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับการกราฟต์ไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลตลงบนพอลิโพรพิลีนสปันบอนด์ โดยเทคนิคการฉายรังสี เพื่อให้ผ้ามีสมบัติในการสะท้อนต่อต้านรังสียูวี และยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย เป็นต้น โดยคาดว่าจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นชุดเพื่อการป้องกันได้ ซึ่งรายละเอียดอื่น ๆ จะกล่าวในลำดับถัดไป



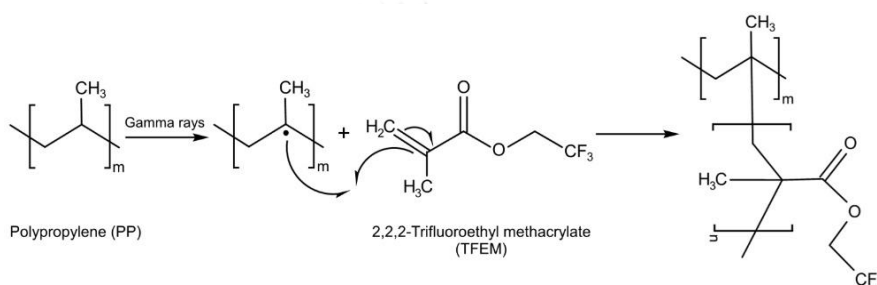
## 2.6 ไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลต (trifluoroethyl methacrylate)

ในการดัดแปรสมบัติของพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ สามารถทำได้โดยการกราฟต์พอลิเมอร์ไฮโดรโฟบิกด้วยเทคนิคการฉายรังสีแกมมา โดยในงานวิจัยนี้เลือกที่จะนำ 2,2,2-Trifluoroethyl methacrylate (TFEM) มากราฟต์ลงบนสปีนบอนด์เพื่อให้มีสมบัติกันน้ำ ซึ่ง TFEM เป็นมอนอเมอร์ที่มีปริมาณฟลูออรีน 34% สามารถสังเคราะห์ได้โดยปฏิกิริยาของ 2,2,2-trifluoroethanol และ methacryloyl chloride ซึ่ง homopolymer ของ TFEM (PTFEM) ถือเป็นพอลิเมอร์อสังฐานที่โปร่งใส อีกทั้งมีความสามารถในการกันน้ำและคราบสกปรกได้สูงเนื่องจากมีฟลูออรีนอยู่ในสายโซ่ด้านข้าง การนำใช้งานส่วนใหญ่ มักใช้ในงานเคลือบผิว เพราะมีเสถียรภาพทางความร้อนและทางเคมีที่ดีเยี่ยม ทนทานต่อสภาพอากาศ กันน้ำและน้ำมันได้ดี นอกจากนี้แล้วยังมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า [49] โดยในปัจจุบัน ได้มีการนำสาร TFEM มาดัดแปรสมบัติของผ้า ดังในงานวิจัยของ Xue และคณะ [6] ได้ดัดแปรผ้าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) โดยอาศัยการกราฟต์ 2,2,2-ไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลต ผ่านกระบวนการ atom transfer radical polymerization (ATRP) โดยใช้รังสีอินฟราเรดกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไฮโดรโฟบิกขึ้น ซึ่งขั้นตอนและวอร์การทั้งหมดแสดงในรูปที่ 2.20 จากผลการศึกษาพบว่า ผ้าที่ได้มีสมบัติไม่ชอบน้ำยิ่งยวด (superhydrophobic) เนื่องจากมีค่ามุมสัมผัสของน้ำสูงถึง  $160^\circ$  มีความคงทนต่อสารเคมีต่าง ๆ ได้ดี นอกจากนี้แล้วยังสามารถคงสภาพความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดได้ตั้งอยู่หลังจากการขัดถูอย่างรุนแรง และผ่านการฉายรังสี UV เป็นเวลานาน ในทางกลับกัน การใช้วิธี ATRP เป็นวิธีการที่ยุ่งยากและซับซ้อน ต้องมีการใช้สารเคมีอื่น ๆ อีกเช่น ตัวริเริ่มปฏิกิริยา ตัวถ่ายโอนอนุมูลอิสระ และตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น ซึ่งถือเป็นข้อจำกัดอย่างหนึ่งของวิธีการนี้



รูปที่ 2.20 การดัดแปรผ้า PET โดยกระบวนการ ATRP

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ สนใจในการใช้รังสีแกมมาเพื่อกระตุ้นให้เกิดการกราฟต์ เพราะเป็นวิธีที่ง่าย ให้ประสิทธิภาพสูง ไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีเช่น ตัวเร่งปฏิกิริยา หรือตัวริเริ่มปฏิกิริยา เป็นต้น อีกทั้งสามารถทำให้เกิดตำแหน่งอนุมูลอิสระได้ง่าย สำหรับกลไกการกราฟต์ TFEM บนพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ เมื่อพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ถูกฉายด้วยรังสีแกมมา พลังงานจากรังสีจะถ่ายทอดไปยังโมเลกุลของพอลิเมอร์ สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ ทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (free radical) จากนั้นอนุมูลอิสระจะถ่ายทอดไปยัง TFEM ณ ตำแหน่ง C=C ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา แล้วจะเกิดการกราฟต์ขึ้นในที่สุด ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาสามารถทำนายได้ดังรูปที่ 2.21



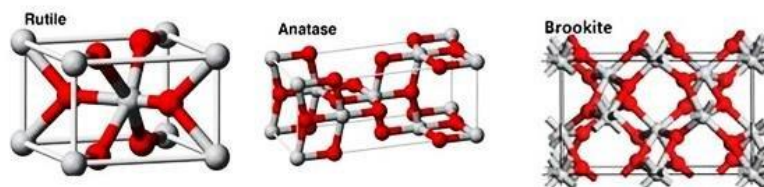
รูปที่ 2.21 กลไกการกราฟต์ TFEM ลงบนพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์

## 2.7 อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide; TiO<sub>2</sub>)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide; TiO<sub>2</sub>) เป็นสารสีที่มีสีขาวมีประโยชน์สำหรับการใช้งานได้หลากหลายเนื่องจากไม่มีกลิ่นและมีความสามารถในการดูดซับ ในปัจจุบันได้มีการนำเอาอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิต ผลิตภัณฑ์อาหารเสริม สีสผสมอาหาร ยาสีฟัน ผลิตภัณฑ์บำรุงผิว เครื่องสำอาง ครีมกันแดด และผลิตภัณฑ์อื่นอีกมาก แต่มีการใช้กันมากในการผลิตสารกันแดดเนื่องจากนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) เป็นสารกึ่งตัวนำ สามารถดูดกลืนแสงในช่วงรังสียูวีได้ดี นอกจากนี้แล้วยังมีดัชนีหักเหแสงสูง มีเสถียรภาพทางเคมี มีความแข็งแรงสูง เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง (photocatalyst) และยังสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ [50, 51]

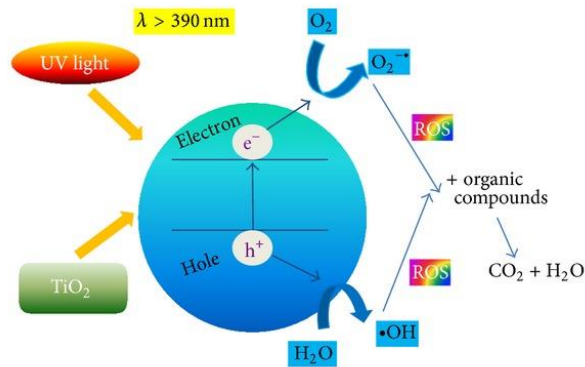
อย่างที่ทราบกันดีว่าอนุภาค TiO<sub>2</sub> เป็นสารประกอบกึ่งโลหะที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโลหะไทเทเนียมและออกซิเจน มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 79.9 g/mol จุดหลอมเหลว 1,830°C และจุดเดือด 2,500 °C โดยทั่วไปแล้ว อนุภาค TiO<sub>2</sub> มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ คือ anatase, rutile, และ brookite ดังแสดงในรูปที่ 2.22 โดยปกติจะพบอนุภาค TiO<sub>2</sub> แบบ anatase และ rutile ซึ่งโครงสร้างผลึกแบบทั้งสองแบบให้สมบัติที่แตกต่างกันออกไปดังต่อไปนี้

- 1) โครงสร้างผลึกแบบ anatase สามารถเปลี่ยนโครงสร้างเป็นแบบ rutile ได้ที่อุณหภูมิสูง
- 2) โครงสร้างผลึกแบบ anatase ให้ประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงที่ดีกว่าโครงสร้างผลึกแบบ rutile เนื่องจากโครงสร้างผลึกแบบ anatase สามารถเกิดการรวมตัวกันใหม่ของคู่อิเล็กตรอนและช่องว่างอิเล็กตรอนได้ในอัตราที่ต่ำกว่า เพราะมีแถบช่องว่างพลังงานที่มากกว่าโครงสร้างผลึกแบบ rutile
- 3) โครงสร้างผลึกแบบ anatase สามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า ทำให้บนพื้นผิวมี hydroxyl radical ที่มากกว่า
- 4) โครงสร้างผลึกแบบ anatase สามารถดูดกลืนแสงได้ในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 384 nm ในขณะที่โครงสร้างผลึกแบบ rutile สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 410 nm ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง [52]



รูปที่ 2.22 โครงสร้างผลึกของอนุภาค  $\text{TiO}_2$

ปัจจุบันได้มีการนำอนุภาค  $\text{TiO}_2$  มาประยุกต์ใช้ในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในทางการแพทย์ อุตสาหกรรม ทางเกษตร และอื่น ๆ เนื่องจากผลการทดสอบสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  สามารถทำลายและฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ ได้แก่ แบคทีเรียและเชื้อราให้กลายเป็นสารที่ไม่เป็นอันตรายได้ โดยกลไกในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ เริ่มจากการที่อนุภาค  $\text{TiO}_2$  ถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นที่ให้พลังงานมากกว่าแถบช่องว่างพลังงาน ไปกระตุ้นอิเล็กตรอนที่แถบเวเลนซ์ให้เคลื่อนที่ไปยังแถบการนำไฟฟ้า ทำให้เกิดเป็นช่องว่างอิเล็กตรอน จากนั้นช่องว่างอิเล็กตรอนนี้จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับน้ำ และหมู่ไฮดรอกซิล ( $\text{OH}$ ) เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\text{OH}^*$ ) ซึ่งถือเป็นตัวออกซิไดส์ที่รุนแรงมาก สามารถทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์แตกตัวกลายเป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ส่วนอิเล็กตรอนจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับออกซิเจน และคาร์บอนในสารอินทรีย์ จนเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน ( $\text{O}_2^-$ ) และคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ตามลำดับ ดังนั้นสามารถบอกได้ว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นนี้สามารถเข้าไปย่อยสลายเชื้อราหรือแบคทีเรียได้ โดยเมื่ออนุภาค  $\text{TiO}_2$  ถูกกระตุ้นด้วยแสง อนุภาค  $\text{TiO}_2$  ที่อยู่ในน้ำซึ่งมีประจุบวกจะเข้าไปทำลายผนังเซลล์ของเชื้อราหรือแบคทีเรียที่มีประจุลบ ทำให้เซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์เหล่านั้นเกิดความเสียหายและตายในที่สุด [52, 53] ดังแสดงในรูปที่ 2.23



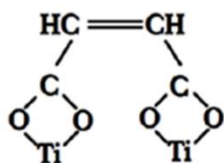
รูปที่ 2.23 กลไกในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ [54]

ในกระบวนการนำไทเทเนียมไดออกไซด์กราฟต์ติดอยู่บนผิวของผ้า นั้น ต้องตัดแปรให้บนพื้นผิวมีหมู่ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา นั่นคือต้องทำให้มีพันธะ C=C บนพื้นผิวโดยการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันร่วมกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.24



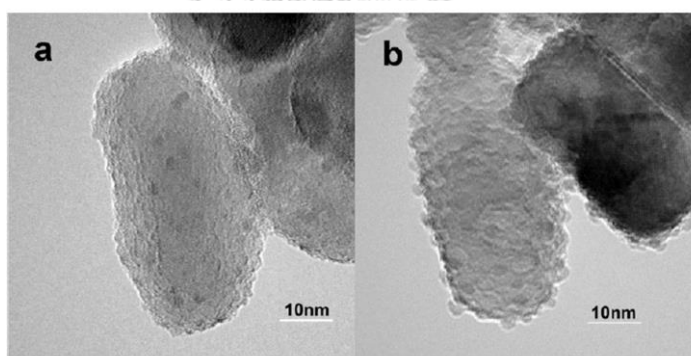
รูปที่ 2.24 กลไกการตัดแปรไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ [55]

ซึ่งการตัดแปรอนุภาคไทเทเนียมด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในลักษณะดังกล่าว Castillo และคณะ [55] ได้อธิบายไว้ว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์และมาเลอิกแอนไฮไดรด์ มีลักษณะเป็นแบบ bidentate binding ดังแสดงในรูปที่ 2.25 นอกจากนี้แล้วสามารถทำนายได้ว่าการที่มีมาเลอิกแอนไฮไดรด์ อยู่บริเวณพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้ความสามารถในการดูดกลืนรังสียูวีได้ดีขึ้น อีกทั้งยังทำให้ค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (band gap) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ แคบลงด้วย ซึ่งคาดว่าความเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ อาจมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นอีกด้วย



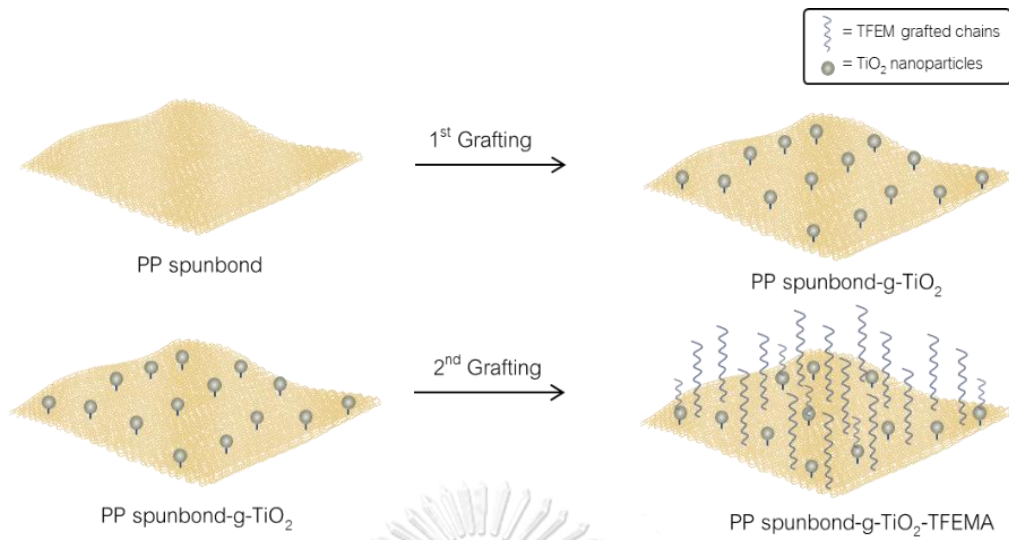
รูปที่ 2.25 ลักษณะของ bidentate binding

นอกจากนี้แล้ว Yu และคณะ [28] ยังให้ผลการศึกษาในการดัดแปรนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ พบว่าลักษณะสัณฐานจากการวิเคราะห์ TEM จะมีลักษณะกลุ่มก้อนเล็ก ๆ ล้อมรอบบริเวณอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.26 นั้นแสดงถึงกลุ่มของมาเลอิกนั้นเอง และวิธีดังกล่าวไม่ส่งผลทำให้โครงสร้างผลึกเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถบอกได้ว่าการที่โครงสร้างผลึกไม่เปลี่ยนแปลงไปนั้น ไม่ส่งผลทำให้สมบัติอื่น ๆ เช่น การเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงต่อต้านรังสียูวี และยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 2.26 ลักษณะสัณฐานของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ก่อนและหลังการดัดแปร

หลังจากดัดแปรอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์แล้ว ก็นำมากราฟต์ลงบนพอลิไพโรพิลีนสปีนบอนด์ หลังจากนั้นนำมากราฟต์ด้วยสาร TFEM ในรอบที่สอง โดยลักษณะที่เกิดการกราฟต์สามารถทำนายได้ดังในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 การกราฟต์ TFEM ร่วมกับนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์



### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง

##### 3.1.1 วัสดุและสารเคมี

- 3.1.1.1 พอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ (ขนาด 50 grams/m<sup>2</sup>)  
[Narula Nonwoven Co., Ltd., Thailand]
- 3.1.1.2 2,2,2-ไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลต (2,2,2-Trifluoroethyl methacrylate):  
ความบริสุทธิ์ 99% [Sigma-Aldrich, Germany]
- 3.1.1.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide; NaOH) : มวลโมเลกุล 40 g/mol  
[Qrec, New Zealand]
- 3.1.1.4 มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride) : มวลโมเลกุล 98.06 g/mol  
[Sigma-Aldrich, Germany]
- 3.1.1.5 ไซลีน (xylene) : มวลโมเลกุล 106.16 g/mol  
[Qrec, New Zealand]
- 3.1.1.6 เตตระไฮโดรฟูแรน (tetrahydrofuran; THF) : มวลโมเลกุล 72.11 g/mol  
[Qrec, New Zealand]
- 3.1.1.7 ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (dimethyl sulfoxide; DMSO) : ความบริสุทธิ์ 99%  
[Qrec, New Zealand]
- 3.1.1.8 แอซีโตน (acetone) : มวลโมเลกุล 58.08 g/mol  
[Ajax Finechem, Pty, Ltd.]
- 3.1.1.9 นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide nanoparticles; TiO<sub>2</sub> NPs) :  
ขนาดอนุภาค 20 nm [Degussa P25, Germany]
- 3.1.1.10 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide; H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) : ความเข้มข้น 30%  
[Qrec, New Zealand]
- 3.1.1.11 กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid; HCl) : ความเข้มข้น 37%  
[Qrec, New Zealand]
- 3.1.1.12 แอนไฮไดรด์ โซเดียมแอซีเตท (anhydrous sodium acetate) : มวลโมเลกุล  
106.16 g/mol [Laba, India]
- 3.1.1.13 น้ำปราศจากไอออน (deionized water; DI water)

### 3.1.2 อุปกรณ์

- 3.1.2.1 ปีกเกอร์ (beaker) ขนาด 50, 100, 200 และ 600 มิลลิลิตร
- 3.1.2.2 กระบอกตวง (cylinder) ขนาด 100 มิลลิลิตร
- 3.1.2.3 กรวยแยกสาร (separatory funnel) ขนาด 100 มิลลิลิตร
- 3.1.2.4 ขวดไวแอล (vial) ขนาด 20 และ 100 มิลลิลิตร
- 3.1.2.4 แท่งแก้วคนสาร (stirring rod)
- 3.1.2.5 แท่งแม่เหล็กกวนสาร (magnetic stirring bar)
- 3.1.2.6 ช้อนตักสาร (spatula)
- 3.1.2.7 อลูมิเนียมฟอยล์ (aluminum foil)
- 3.1.2.8 เครื่องชั่งสาร (analytical balance) [Ohaus, USA]
- 3.1.2.9 เครื่องกวนสาร (stirring machine) [IKA-Werke, Germany]
- 3.1.2.10 ตู้อบลมร้อน (hot air dryer) [Fisher Scientific, USA]

## 3.2 วิธีการทดลอง

### 3.2.1 การกราฟต์ไทรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์บนพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์

เริ่มจากการเตรียมมอนอเมอร์โดยนำ 2,2,2-ไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลตที่ยังไม่บริสุทธิ์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตรใส่ในกรวยแยกสารขนาด 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายไฮโดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1N ผสมลงไป เขย่าซ้ำจนเห็นการแยกเฟสของชั้นสารเกิดขึ้น ให้แยกสารทั้งสองเฟสออกจากกันโดยค่อย ๆ เปิดวาล์วของกรวยแยกสาร เพื่อให้สารไหลลงมายังปีกเกอร์ที่รองรับไว้ ขั้นตอนนีถือเป็นขั้นตอนการกำจัดสารยับยั้ง (inhibitor) ที่ผสมอยู่ในฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ เนื่องจากสารดังกล่าวอาจขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีในขั้นถัดไป จากนั้นเป็นขั้นตอนการกราฟต์โดยเริ่มจากนำพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ขนาด 10 x 5 เซนติเมตร มาล้างด้วยแอสีโทนให้สะอาด แล้วนำมาบรรจุลงในปีกเกอร์ เติม 2,2,2-ไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลตที่ความเข้มข้น 10 15 20 25 และ 30 % (v/v) ที่เตรียมจากสารละลายเทตระไฮโดรฟูแรนและโดเมทิลซัลฟอกไซด์ แล้วนำมาบรรจุลงในขวดไวแอล จากนั้นนำไปผ่านแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 10 นาที นำไปฉายรังสีแกมมาที่อุณหภูมิห้องโดยใช้ปริมาณรังสี 10 15 20 25 และ 30 กิโลเกรย์ (kGy) ณ ศูนย์กระบวนการทางรังสีเพื่อการตัดแปรรพอลิเมอร์และนาโนเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ด้วยเครื่องฉายรังสีแกมมาจากแหล่งกำเนิดรังสีโคบอลต์-60 ยี่ห้อ Gammacell 220 ดังแสดงในรูปที่ 3.1 หลังจากฉายรังสีแล้วนำชิ้นงานที่ได้ไปล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนและแอสีโทน แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสจนแห้งและน้ำหนักคงที่เพื่อคำนวณระดับขั้นของการกราฟต์ และประสิทธิภาพของการกราฟต์โดยใช้สมการที่ 3.1 [56] และ 3.2 [57] ตามลำดับ



$$\text{Grafting degree (\%)} = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100 \quad (3.1)$$

$$\text{Grafting efficiency (\%)} = \frac{W_1 - W_0}{W_2 - W_1} \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ  $W_0$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนกราฟต์

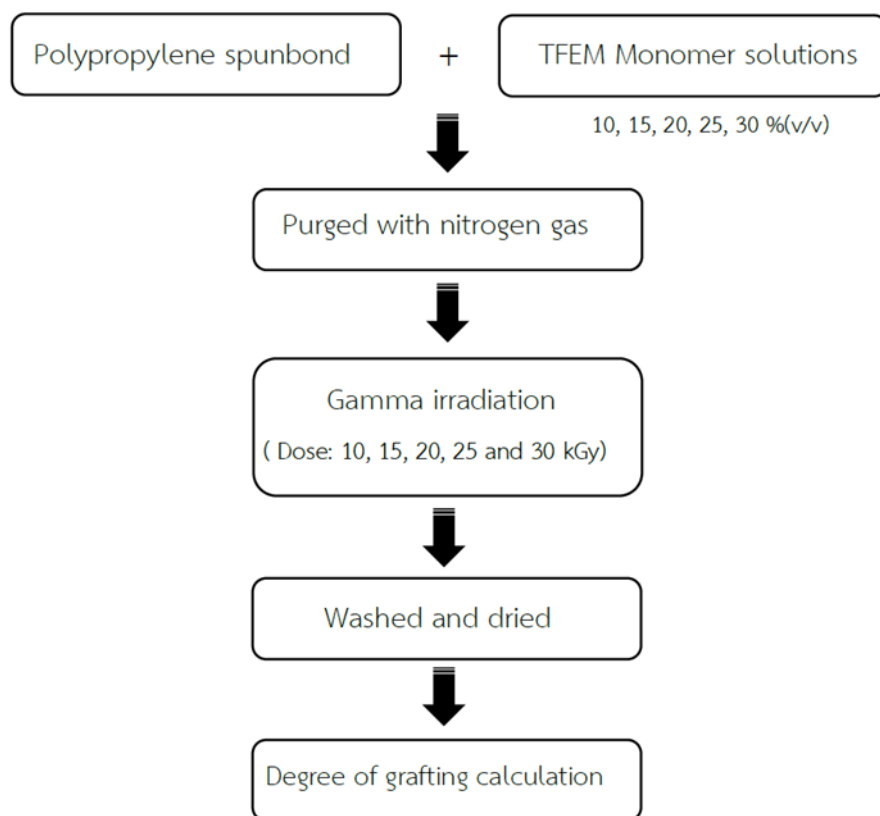
$W_1$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังกราฟต์

$W_2$  คือ น้ำหนักของไตรฟลูออโรเอทิล เมทาคริเลตที่ใช้

โดย ระดับขั้นของการกราฟต์ (grafting degree) หมายถึงสัดส่วนของการเกิดปฏิกิริยาการกราฟต์ต่อปริมาณพอลิเมอร์ที่ใช้ และประสิทธิภาพในการกราฟต์ (grafting efficiency) หมายถึงสัดส่วนของการเกิดปฏิกิริยาการกราฟต์ต่อปริมาณมอนอเมอร์ที่ใช้ [32]



รูปที่ 3.1 เครื่องฉายรังสีแกมมาจากแหล่งกำเนิดรังสีโคบอลต์-60 ยี่ห้อ Gammacell 220

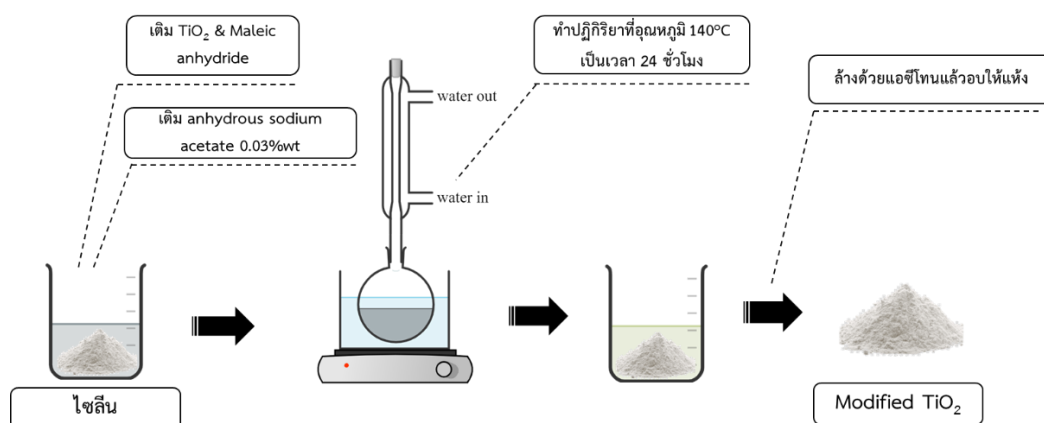


รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการกราฟต์ไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริลेटมอนอเมอร์บนพอลิโพรพิลีนสปันบอนด์

### 3.2.2 การกราฟต์อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

#### 3.2.2.1 การดัดแปรโครงสร้างของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของ  $\text{TiO}_2$  NPs กับ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA) เพื่อให้เกิดพันธะ C=C บนพื้นผิวของ  $\text{TiO}_2$  [28] ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยเริ่มจากการนำผง  $\text{TiO}_2$ -P25 และมาเลอิกแอนไฮไดรด์ อัตราส่วนของ  $\text{TiO}_2$  : MA ที่ 1:1 1:1.5 และ 1:2 เติมลงไปนในสารละลายไซลีน 300 มิลลิลิตร ที่ประกอบไปด้วยแอนไฮดรัสโซเดียมแอซีเตต 0.1 กรัม จากนั้นนำของผสมมาทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ  $140^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อเสร็จสิ้นปฏิกิริยานำสารที่ได้ไปล้างด้วยเอซีโตนแล้วอบให้แห้ง



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการดัดแปรอนุภาค  $\text{TiO}_2$

### 3.2.2.2 กระบวนการกราฟต์พอลิเมอร์ไรเซชัน

ในขั้นตอนนี้เป็นการหาปริมาณที่เหมาะสมในการกราฟต์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการดัดแปรแล้วของทั้ง 3 ภาวะที่เตรียมได้จากการทดลองที่ 3.2.2.1 โดยใช้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ดัดแปรที่ 10 20 30 40 and 50 g/L แขนวลอยในเอทานอลในทุก ๆ ภาวะ จากนั้นนำมา pad ลงบนผ้า แล้วบรรจุลงในหลอดทดลองพร้อมกับพอลิโพรพิลีนสปันบอนด์ขนาด 10 x 5 เซนติเมตร ซึ่งแต่ละหลอดปิดปากหลอดด้วยฝาปิด จากนั้นนำไปผ่านแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 10 นาที และนำไปฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 10 15 20 25 และ 30 กิโลเกรย์ หลังจากฉายรังสีแล้วนำชิ้นงานที่ได้ไปกำจัดมอนอเมอร์ที่ไม่เกิดปฏิกิริยา โดยการล้างด้วยเอทานอลแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนแห้งและน้ำหนักคงที่ จากนั้นชิ้นงานที่ผ่านการกราฟต์แล้วมาคำนวณระดับชั้นของการกราฟต์โดยใช้สมการที่ 3.1

### 3.2.3 การกราฟต์อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ และไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลต มอนอเมอร์บนพอลิโพรพิลีนสปันบอนด์

เริ่มจากการกราฟ  $\text{TiO}_2$  ในครั้งแรกโดยใช้ภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองที่ 3.2.2.2 จากนั้นกราฟต์รอบที่สองด้วยการใช้ไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลต (TFEM) โดยใช้ภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองที่ 3.2.1

### 3.2.4 การวัดมุมสัมผัสของน้ำ (water contact angle)

การทดสอบวัดมุมสัมผัส ด้วยเครื่อง Contact angle measurement (OCA20) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D5946 เพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการซึมน้ำของชิ้นงาน โดยใช้ไมโครปิเปต (micropipette) หยดน้ำ DI ลงบนชิ้นงานซึ่งติดตั้งอยู่บนแท่นวางที่สามารถปรับตำแหน่งและระยะ

โพกัสได้ จากนั้นปรับโพกัสของภาพให้ชัดเจน และบันทึกภาพด้วยกล้อง CCD นำรูปที่บันทึกได้ไปประมวลผลเพื่อหาค่าคุณสมบัติของน้ำผ่านโปรแกรมในคอมพิวเตอร์

### 3.2.5 การวัดความสามารถในการซึมผ่านของอากาศ (air permeability)

การทดสอบการซึมผ่านของอากาศใช้เครื่อง Shirley air permeability tester (M021A, SDL ATLAS, UK) ตามมาตรฐาน ISO 9237 ซึ่งนำชิ้นงานตัวอย่างมาวัดปริมาณการไหลผ่านของอากาศในหน่วยลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที ที่ความดัน 100 Pa โดยชิ้นงานตัวอย่างถูกจับยึดด้วย clamp คิดเป็นพื้นที่หน้าตัด  $20 \text{ cm}^2$  ทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย

### 3.2.6 การวัดสี (color measurement)

ผลของการฉายรังสีต่อสีของผ้าของผ้าสปันบอนด์ถูกตรวจสอบโดยการวัดค่าความขาว (whiteness index) และความแตกต่างของสี (color difference;  $\Delta E$ ) ตามวิธีการทดสอบมาตรฐาน CIE โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์รุ่น Macbeth ColorEye 7000 (X-Rite Pantone, USA) ในโหมดสะท้อนแสง (reflectance) โดยใช้พอร์ต SAV (0.30 นิ้ว) ทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย

### 3.2.7 การวัดความแข็งตึงของผ้า (fabric stiffness)

ความแข็งตึงของผ้า คือแนวโน้มของผ้าที่สามารถคงสภาพได้โดยไม่ต้องมีการพยุ่งใด ๆ วัดโดยใช้เครื่องวัดความแข็งตึงแข็งตึงของผ้า รุ่น M003B, SDL atlas, UK ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D1388 ตัดผ้าขนาด 25 มม. x 200 มม. แล้วนำมาวางบนแท่นวาง และทับผ้าด้วยแถบวัดระยะการโค้งงอ จากนั้นเลื่อนแถบวัดระยะออกไปโดยประมาณความเร็ว 120 mm/min แล้วสังเกตปลายผ้าที่มองในกระจกตัดกับเส้นอ้างอิง จึงอ่านค่าความยาวโค้งงอ ณ จุดนั้น ซึ่งค่าความยาวที่ได้ จะนำมาคำนวณหาค่าความแข็งตึงแข็งตึงของผ้าดังสมการที่ 3.2 [58]

$$G = 0.1MC^3 \quad (3.2)$$

โดย G คือ ความแข็งตึงแข็งตึงของผ้า (mg-cm)

M คือ น้ำหนักของผ้าต่อหน่วยพื้นที่ ( $\text{g/m}^2$ )

C คือ ความยาวโค้งงอ (cm)

### 3.2.8 การทดสอบความสามารถในการสะท้อนน้ำ

ทดสอบโดยการจำลอง water injection ด้วยการฉีดน้ำโดยใช้กระบอกเข็มฉีดยาขนาด 10 มิลลิลิตร ลงบนผ้าที่ไม่ผ่านการกราฟต์เทียบกับผ้าที่ผ่านการกราฟต์ เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการสะท้อนน้ำ โดยให้ระยะห่างระหว่างผ้าและหัวฉีดมีค่าเป็น 5 เซนติเมตร อีกทั้งให้หัวฉีดทำมุมกับผ้าเป็นมุม 45 องศา โดยในการฉีดแต่ละครั้งให้ดันจนสุดกระบอก แล้วบันทึกภาพ

### 3.2.9 การวัดความคงทนต่อการซัก (washing durability)

สมบัติความคงทนต่อการซักของผ้า ทดสอบโดยใช้มาตรฐานการทดสอบ AATCC 61-2006 No.2A [28] โดยตัวอย่างถูกซักในเครื่อง Gyrowash รุ่น one batch 815/8 (James H.Heal, England) ที่อุณหภูมิ 49° C หมุนด้วยความเร็ว 40 รอบต่อนาที ในการซักจะเอทานอล และผงซักฟอกมาตรฐานที่ปริมาตร 120 มิลลิลิตร ความเข้มข้น 0.15 wt% พร้อมลูกบอลสแตนเลส 50 ลูก ซึ่งรอบการซักหนึ่งรอบ (45 นาที) เทียบเคียงได้กับการซักโดยทั่วไปประมาณห้าครั้ง หลังจากซักผ้าแล้วนำมาล้างคราบผงซักฟอกออกและทำให้แห้งที่ 60 ° C จากนั้นนำไปทดสอบวัดมุมสัมผัสของน้ำ และสมบัติการป้องกันรังสียูวี เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการกราฟต์ต่อไป

### 3.2.10 การทดสอบสมบัติการต้านรังสียูวีของผ้า (UV resistance)

ทดสอบโดยใช้เครื่อง UV-VIS-NIR spectrophotometer (Cary5000, Agilent Technologies, USA) ซึ่งค่าการส่องผ่านของแสงที่ได้จะนำมาคำนวณหาค่าความสามารถในการป้องกันแสงได้ (ultraviolet protection factor; UPF) ตามมาตรฐานการทดสอบ AATCC 183-2004 ดังสมการที่ 3.3 [59]

$$UPF = \frac{\sum_{290}^{400} E(\lambda) S(\lambda) \Delta(\lambda)}{\sum_{290}^{400} E(\lambda) T(\lambda) S(\lambda) \Delta(\lambda)} \quad (3.3)$$

โดย  $E(\lambda)$  คือ ค่าความเข้มรังสีที่มีผลกระทบต่อผิวหนังมนุษย์

$S(\lambda)$  คือ ความเข้มแสงเชิงสเปกตรัมของรังสีดวงอาทิตย์

$T(\lambda)$  คือ ค่าการส่องผ่านของแสงผ่านชิ้นตัวอย่างที่สามารถวิเคราะห์ได้

$\Delta(\lambda)$  คือ ความยาวคลื่นที่ใช้ทดสอบ, nm

### 3.2.11 การทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (antimicrobial activity)

สมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของผ้าที่ ทดสอบโดยใช้วิธี parallel streak ตามมาตรฐาน AATCC 147 ตัวอย่างผ้าที่ใช้ทดสอบต้องมีขนาด 25 x 50 มิลลิเมตร ในงานวิจัยนี้ได้ใช้แบคทีเรียชนิด *Escherichia coli* เป็นเชื้อทดสอบ โดยเฉพาะเลี้ยงเชื้อในอาหาร nutrient broth (NB) และบ่มในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นหัวเชื้อถูกเตรียมในปริมาณ 1.0 มล. ในอาหาร NB แล้วนำไปเจือจางด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 9.0 มล. ต่อมาป้ายเป็นลักษณะเส้นตรงขนานกัน 5 เส้น บนผิวอาหารเลี้ยงเชื้อที่แข็งแล้ว (Nutrient Agar; NA) ในจานเพาะเชื้อ ที่ไว้ประมาณ 3 ถึง 5 นาทีเพื่อให้ส่วนผิวหน้าของอาหารเลี้ยงเชื้อแห้ง จากนั้นนำตัวอย่างผ้าที่เตรียมไว้มาวางทับบนเชื้อที่เตรียมไว้ แล้วบ่มในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นจะ

สังเกตเห็นบริเวณที่ไม่มีแถบที่เรียเกิดขึ้น (inhibition zone) ความกว้างเฉลี่ยของบริเวณนั้นสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 3.4 [60]

$$W = \frac{T-D}{2} \quad (3.4)$$

โดย W คือ ความกว้างเฉลี่ยของบริเวณที่ไม่มีแถบที่เรียเกิดขึ้น (mm)

T คือ ความกว้างของผ้ารวมกับบริเวณที่ไม่มีแถบที่เรียเกิดขึ้น (mm)

D คือ ความกว้างของผ้า (mm)

### 3.3 การศึกษาสมบัติและลักษณะเฉพาะ

#### 3.3.1 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารที่เป็นองค์ประกอบในวัสดุ โดยใช้เครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) ยี่ห้อ Thermo scientific รุ่น Nicolet iS50 โดยทดสอบสารตัวอย่างที่ย่านความถี่  $400-4000 \text{ cm}^{-1}$  ความละเอียดที่  $\pm 4 \text{ cm}^{-1}$  และจำนวนของการสแกนเท่ากับ 3 สำหรับผ้าสแปนบอนด์ก่อนและหลังกระบวนการกราฟต์ ใช้โหมด Micro-Attenuated Total Reflectance (Micro-ATR) ในการทดสอบ ส่วน  $\text{TiO}_2$  ก่อนและหลังการดัดแปรใช้โหมด Transmission ในการทดสอบ โดยบดสารตัวอย่างเข้ากับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ก่อนทดสอบ

#### 3.3.2 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

การศึกษาโครงสร้างและสัณฐานวิทยาโดยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-IT500HR กำลังขยาย 500 เท่าสำหรับผ้า และ 30,000 เท่าสำหรับ  $\text{TiO}_2$  ศักย์เร่งอิเล็กตรอน 10 กิโลโวลต์ โดยชิ้นงานนำไปเคลือบทองก่อนการวิเคราะห์

#### 3.3.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic force microscope; AFM)

การศึกษาสัณฐานวิทยาและความเรียบของพื้นผิวของสแปนบอนด์ที่ผ่านการกราฟต์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม รุ่น Nanoscope IV โดยใช้โหมด contact ในการวิเคราะห์ความสูงต่ำของพื้นผิวดตัวอย่างในระดับนาโนเมตร ขนาดของตัวอย่างที่ใช้ประมาณ  $10 \times 10$  มิลลิเมตร

### 3.3.4 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope; TEM)

การศึกษาโครงสร้างและสัณฐานวิทยาของ  $\text{TiO}_2$  โดยกล้อง transmission electron microscopy (TEM; HITACHI, S4800, Japan) ศักย์เร่งอิเล็กตรอน 200 กิโลโวลต์ โดยเตรียมชิ้นงาน  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  NPs และ functionalized  $\text{TiO}_2$  แขนงลอยในเอทานอล และวางบน copper net จากนั้นทำให้แห้งด้วยสุญญากาศก่อนการวิเคราะห์

### 3.3.5 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)

การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของ  $\text{TiO}_2$  หลังจากตัดแปร ด้วยเครื่อง X-ray photoelectron spectrometer รุ่น AXIS Ultra DLD (Kratos analytical, Manchester UK) โดยใช้ Monochromatic Al  $K\alpha$  เป็นแหล่งกำเนิดที่ 1.4 keV ภายใต้ความดัน  $5 \times 10^{-9}$  torr โดยวิเคราะห์ narrow scan ณ ของตำแหน่ง C1s, O1s, และ Ti2p

### 3.3.6 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเนื่องจากความร้อน (Thermogravimetric Analyzer; TGA)

การวิเคราะห์น้ำหนักของสารเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ใช้เทคนิค Thermo Gravimetric Analysis (TGA) ด้วยเครื่องมือทดสอบยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น TGA/DSC<sup>3+</sup>, Switzerland โดยทดสอบที่อุณหภูมิในช่วง 30 องศาเซลเซียส ถึง 700 องศาเซลเซียส และอัตราการเพิ่มขึ้นของความร้อนอยู่ที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีในบรรยากาศไนโตรเจน วางตัวอย่างบนจานขนาดเล็กซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด น้ำหนักที่หายไปนั้น เกิดมาจากการระเหย หรือ การย่อยสลาย

### 3.3.8 การทดสอบด้านแรงดึง (tensile test)

ศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ผ่านการกราฟต์ โดยวิเคราะห์ความทนแรงดึงตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D5035 โดยใช้เครื่องทดสอบยี่ห้อ Tinius Olsen รุ่น H50KS ใช้ขนาดตัวอย่างเท่ากับ 25 มม. x 150 มม. ความหนาประมาณ 0.65 มม. ระยะห่างระหว่าง clamp อยู่ที่ 70 มม. และใช้ crosshead speed 300 mm/min โดยทดลองซ้ำ 5 ครั้ง

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการกราฟต์ไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลตลงบนพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ และศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยากราฟต์พอลิเมอโรเซชัน พร้อมทั้งศึกษาสมบัติที่เกี่ยวข้องต่อการนำไปใช้งานในเบื้องต้น จากนั้นศึกษาการกราฟต์ไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลตร่วมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ตัดแปรลงบนพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ เพื่อให้มีสมบัติในการต้านรังสียูวีและการต้านแบคทีเรีย โดยผลการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ดังต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการศึกษาการกราฟต์ไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลตลงบนพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์

##### 4.1.1 ระดับขั้นของการกราฟต์ (degree of grafting)

การทดลองส่วนนี้เป็นการหาภาวะที่เหมาะสมในการกราฟต์ โดยมีปัจจัยที่ส่งผลต่อการกราฟต์ คือ ความเข้มข้นของสารไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลต บรรยากาศ ชนิดของตัวทำละลาย และปริมาณรังสี โดยเปรียบเทียบจากระดับขั้นของการกราฟต์

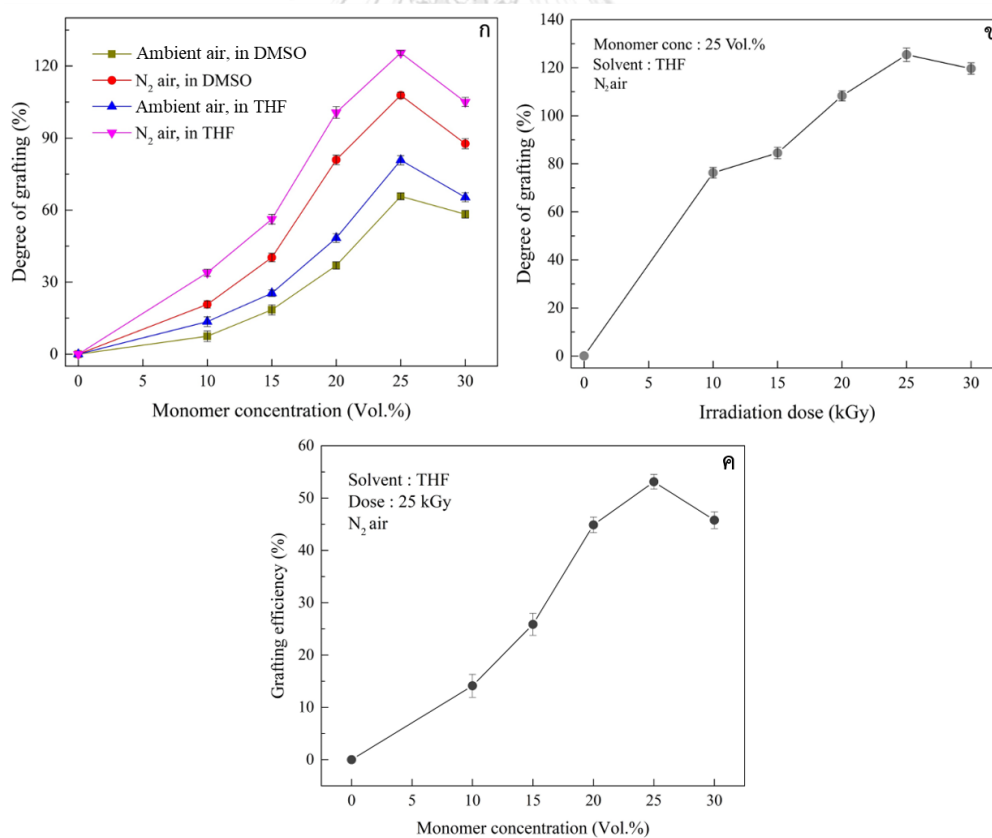
รูปที่ 4.1ก แสดงผลของความเข้มข้นของไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลตต่อระดับขั้นของการกราฟต์ พบว่าระดับขั้นของการกราฟต์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น โดยมีระดับขั้นของกราฟต์สูงที่สุดที่ความเข้มข้นของไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลต 25%(v/v) แต่ที่ความเข้มข้น 30%(v/v) ระดับขั้นของการกราฟต์กลับต่ำลง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอโรเซชันระหว่างไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลตด้วยกันเองแทนที่จะเกิดการกราฟต์ลงบนพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ ดังนั้นระดับขั้นของการกราฟต์จึงลดลง [4] นอกจากนี้แล้วยังได้ศึกษาถึงบรรยากาศที่ส่งผลต่อระดับขั้นของการกราฟต์ พบว่าการกราฟต์ในภาวะบรรยากาศปกติ (ambient air) ทำให้ระดับขั้นของการกราฟต์มีค่าต่ำกว่าในบรรยากาศไนโตรเจน ( $N_2$  air) เนื่องจากในบรรยากาศมีออกซิเจนที่ทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวยับยั้งปฏิกิริยา โดยจะเข้าทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจากสายโซ่พอลิโพรพิลีนเพื่อสร้างเปอร์ออกไซด์ จากนั้นกลายเป็นอนุมูลอิสระที่เสถียร ซึ่งอนุมูลอิสระที่เสถียรนี้ไม่สามารถทำให้ปฏิกิริยาเกิดการแผ่ขยายสายโซ่ไปได้ ดังนั้นภาวะบรรยากาศไนโตรเจนจึงเป็นบรรยากาศที่เหมาะสมในกระบวนการกราฟต์พอลิเมอโรเซชัน [61, 62] นอกจากนี้รูปที่ 4.1ก ยังแสดงถึงผลของตัวทำละลายต่อระดับขั้นของการกราฟต์ ผลการศึกษาพบว่าเมื่อใช้เตตระไฮโดรฟลูอเรน (THF) เป็นตัวทำละลาย ระดับขั้นของการกราฟต์สูงกว่าเมื่อใช้ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (DMSO) เป็นตัวทำละลาย เนื่องจากค่าการละลายของไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลตมีค่าใกล้เคียงกับ THF มากกว่า DMSO อีกทั้งโครงสร้างทางเคมีของ THF มีลักษณะเป็นแบบวง (heterocyclic) ในขณะที่ DMSO เป็นสายโซ่ตรง ซึ่งโครงสร้างแบบวงมีความเสถียรต่ออนุมูลอิสระมากกว่าโครงสร้างโซ่ตรง กล่าวคือ ในโครงสร้างแบบวง



จำเป็นต้องใช้พลังงานในการแตกพันธะที่สูงมาก ทำให้สารละลายชนิดนี้ไม่เกิดปฏิกิริยากับมอนอเมอร์หรือพอลิเมอร์ที่อยู่ในระบบ ดังนั้นผลที่ได้จึงแสดงให้เห็นว่า THF เป็นตัวทำละลายที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบการกราฟต์ [63]

รูปที่ 4.1 ข แสดงผลของปริมาณรังสี (radiation dose) ต่อระดับขั้นของการกราฟต์ ผลการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณรังสีเพิ่มขึ้น ระดับขั้นของการกราฟต์เพิ่มขึ้นในช่วงแรก จากนั้นมีค่าลดลง โดยมีระดับขั้นการกราฟต์สูงสุดที่สุดที่ปริมาณรังสี 25 kGy เป็นที่น่าสังเกตว่า การที่ระดับขั้นของการกราฟต์ลดลงที่ปริมาณรังสีสูงนั้นเป็นผลมาจากการสลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ [64] อีกทั้งอาจเกิดการสลายตัวของไตรฟลูออโรเอทิล เมทาคริเลตได้อีกด้วย

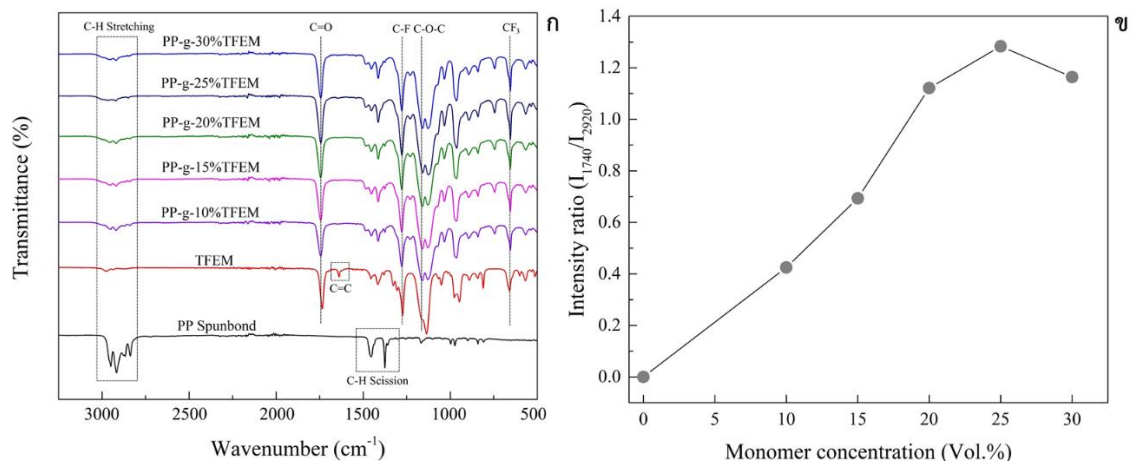
นอกจากนี้แล้วเมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพในการกราฟต์ (grafting efficiency) ดังในรูปที่ 4.1 ค พบว่าประสิทธิภาพในการกราฟต์มีค่าสูงขึ้นตามความเข้มข้นของมอนอเมอร์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าประสิทธิภาพของการกราฟต์ที่เกิดขึ้นนี้ เป็นค่าที่บ่งบอกถึงเปอร์เซ็นต์การมีอยู่ของไตรฟลูออโรเอทิล เมทาคริเลตบนพื้นผิวของผ้า ซึ่งมีค่าเท่ากับ 14%, 26%, 45%, 53% และ 46% ตามความเข้มข้นของมอนอเมอร์ที่ 10, 15, 20, 25 และ 30 (Vol.%) ตามลำดับ



**รูปที่ 4.1** ระดับขั้นของการกราฟต์ (ก) ผลของความเข้มข้นของมอนอเมอร์ บรรยากาศ และชนิดของตัวทำละลาย (ข) ปริมาณรังสี และ (ค) ประสิทธิภาพของการกราฟต์

#### 4.1.2 โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันทางเคมี

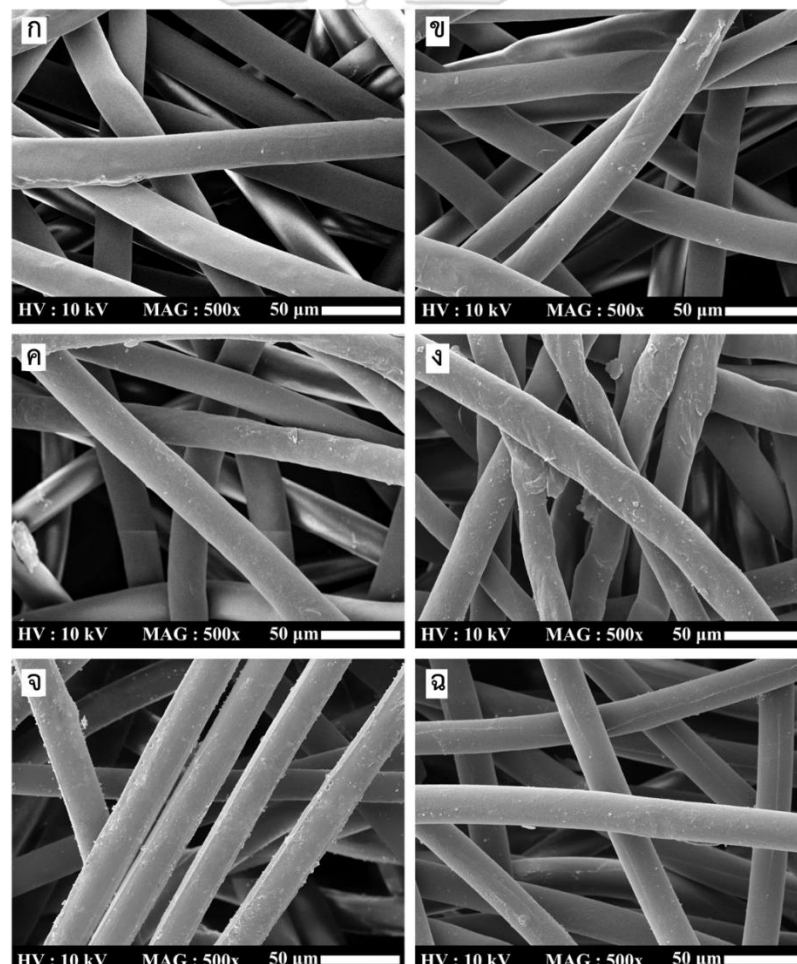
รูปที่ 4.2 แสดงผลการศึกษาโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค ATR-FTIR ของพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ก่อนและหลังการกราฟต์ พบพีกที่ปรากฏในช่วงเลขคลื่น 2840-3000  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึง C-H stretching ที่เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของพอลิโพรพิลีน นอกจากนี้พีกที่เลขคลื่น 1455 และ 1376  $\text{cm}^{-1}$  ยังแสดงถึง C-H scission ซึ่งเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของพอลิโพรพิลีนอีกด้วย [65, 66] หลังจากการกราฟต์แล้ว พบพีกใหม่ที่ปรากฏในเลขคลื่น 1745 1280 1162 และ 654  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึงการสันแบบยึด-หดของหมู่ C=O C-F C-O and  $\text{CF}_3$  ตามลำดับ [67] ซึ่งพีกใหม่ที่ปรากฏขึ้นนี้ เป็นพีกของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของโพลีไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลต เมื่อเปรียบเทียบกับ TFEM แสดงให้เห็นว่ามีการหายไปของพีก C=C ที่เลขคลื่น 1650  $\text{cm}^{-1}$  อย่างเห็นได้ชัด [68] ซึ่งเป็นการบ่งบอกว่าไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลต สามารถเกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์เชนบนพื้นผิวของพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ได้สำเร็จ กล่าวคือ การที่ไม่สามารถพบพันธะคู่ในไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลตนี้ได้ เนื่องจากพันธะคู่เหล่านี้มีการแตกตัวและทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นบนสายโซ่ของพอลิโพรพิลีน นอกจากนี้ได้ศึกษาอัตราส่วนความเข้มของพีก FTIR โดยวิเคราะห์ความเข้มของพีกที่เลขคลื่น 1740  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีกของกลุ่มคาร์บอนิล (C=O) ที่เป็นองค์ประกอบใน TFEM ต่อความเข้มของพีกที่เลขคลื่น 2920  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีกของกลุ่ม C-H จะเห็นว่าอัตราส่วนความเข้มของพีก FT-IR เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของมอนอเมอร์ และมีค่าสูงสุดที่ 25 Vol% ซึ่งผลการศึกษานี้มีความเกี่ยวข้องและสัมพันธ์กันกับระดับชั้นของการกราฟต์ในผลการทดลองที่แสดงในหัวข้อที่ 4.1.1



รูปที่ 4.2 FTIR spectrum ของ (ก) พอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ ไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลต และพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ที่ผ่านการกราฟต์ (ข) อัตราส่วนความเข้มของพีก FTIR ที่  $I_{1740(\text{C=O})}/I_{2920(\text{C-H})}$

#### 4.1.3 ลักษณะสัณฐานวิทยา

รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนสปันบอนด์ก่อนและหลังการกราฟต์ไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลตที่ความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่าเส้นใยของสปันบอนด์ที่ยังไม่ผ่านการกราฟต์มีความเรียบสม่ำเสมอ โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 26.6 ไมโครเมตร หลังจากผ่านการกราฟต์แล้ว สังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่าบริเวณพื้นผิวของเส้นใยก่อนขรุขระและไม่สม่ำเสมอ โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 28.2 28.5 28.6 29.3 และ 28.9 ไมโครเมตร ตามลำดับ จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าความขรุขระของเส้นใยและการเพิ่มขึ้นของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยนั้น เกิดจากการสะสมของพอลิเมอร์ที่กราฟต์ลงบนผิวของเส้นใย และสามารถยืนยันได้อีกว่าพอลิไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลต สามารถเกิดปฏิกิริยาการกราฟต์ลงบนพื้นผิวของพอลิโพรพิลีนสปันบอนด์ได้ [69]



รูปที่ 4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยา (SEM image) ของ (ก) pristine PP spunbond, grafted PP spunbond with (ข) 10% TFEM, (ค) 15% TFEM, (ง) 20% TFEM, (จ) 25% TFEM และ (ฉ) 30% TFEM

#### 4.1.4 ความแข็งตึงของผ้า (fabric stiffness)

ความแข็งตึงของผ้าถือเป็นแนวโน้มของผ้าที่จะอยู่ตัวได้โดยไม่ต้องมีการพุงใด ๆ วัดโดยใช้ความยาวดัดโค้ง (bending length) และความแข็งแรงดัดโค้ง (flexural rigidity) ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยพบว่าความแข็งตึงของสปีนบอนด์เปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญหลังจากการกราฟต์ และเมื่อความเข้มข้นของมอนอเมอร์เพิ่มขึ้น ความแข็งแรงดัดโค้งก็มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากมอนอเมอร์ถูกกราฟต์ลงบนสายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรพิลีนได้มากขึ้นนั่นเอง ซึ่งการกราฟต์บนพื้นผิวของเส้นใยส่งผลทำให้สปีนบอนด์มีความแข็งตึงเพิ่มขึ้น [70]

ตารางที่ 4.1 ความยาวดัดโค้ง และความแข็งแรงดัดโค้งของผ้า

ผ้าตัวอย่าง	ความยาวดัดโค้ง (cm)	ความแข็งแรงดัดโค้ง(mg-cm)
PP spunbond	4.13	35.31
PP spunbond-g-10%TFEM	4.23	37.84
PP spunbond-g-15%TFEM	4.27	38.93
PP spunbond-g-20%TFEM	4.31	40.03
PP spunbond-g-25%TFEM	4.36	41.44
PP spunbond-g-30%TFEM	4.30	39.75

#### 4.1.5 ความสามารถในการซึมผ่านของอากาศ (air permeability) และสี (color measurement)

การศึกษาความสามารถในการซึมผ่านของอากาศของพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ก่อนและหลังการกราฟต์ โดยได้เลือกใช้ สปีนบอนด์ที่ผ่านการกราฟต์จากภาวะการกราฟต์ที่ความเข้มข้นของมอนอเมอร์ 25 (%v/v) เตรียมในสารละลาย THF ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ปริมาณรังสี 25 kGy ผลที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยพบว่า ความสามารถในการซึมผ่านของอากาศของสปีนบอนด์ที่ผ่านการกราฟต์มีค่าลดต่ำลง อันเนื่องมาจากการเพิ่มของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่แสดงจาก SEM ดังปรากฏก่อนหน้านี้นี้ แต่อย่างไรก็ตามความแตกต่างเพียงเล็กน้อยนี้ไม่ได้ทำให้การระบายอากาศเสียไปเมื่อนำมาประยุกต์ใช้เป็นชุดเพื่อการป้องกัน อีกทั้งยังพบว่าการใช้เทคนิคการกราฟต์ในงานวิจัยนี้ทำให้การซึมผ่านของอากาศลดลงน้อยกว่าเทคนิคการเคลือบแบบดั้งเดิมที่ปรากฏในงานวิจัยของ Li และคณะ [71]

ส่วนการวัดสีของสปีนบอนด์ในงานวิจัยนี้ แบ่งการวัดออกเป็น 2 แบบคือ ดัชนีความขาว (whiteness index) และ ความต่างของสี (color difference;  $\Delta E$ ) จากผลการศึกษาพบว่า ค่าความขาวของผ้าลดลงเล็กน้อยหลังจากการกราฟต์ TFEM อันเนื่องจากการแตกสลายของโซ่พอลิเมอร์ (degradation) [72] ทำให้ผ้ามีความเหลืองเกิดขึ้นเล็กน้อย อย่างไรก็ตามค่าความขาวที่เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย ไม่ได้ทำให้สีของผ้าผิดเพี้ยนไปเมื่อมีความจำเป็นในการย้อมสี ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้จาก ค่าความแตกต่างของสี ( $\Delta E$ ) โดยค่า  $\Delta E$  ของผ้าที่ผ่านการกราฟต์มีค่าต่ำกว่า 1.0 ซึ่งหมายความว่าความแม่นยำของสียังคงสภาพไว้ดีอยู่ และสายตามนุษย์ไม่สามารถแยกความต่างนี้ออกได้ [73] ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่ากระบวนการกราฟต์ที่เกิดจากรังสีในงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำให้สีของผ้าเปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญ

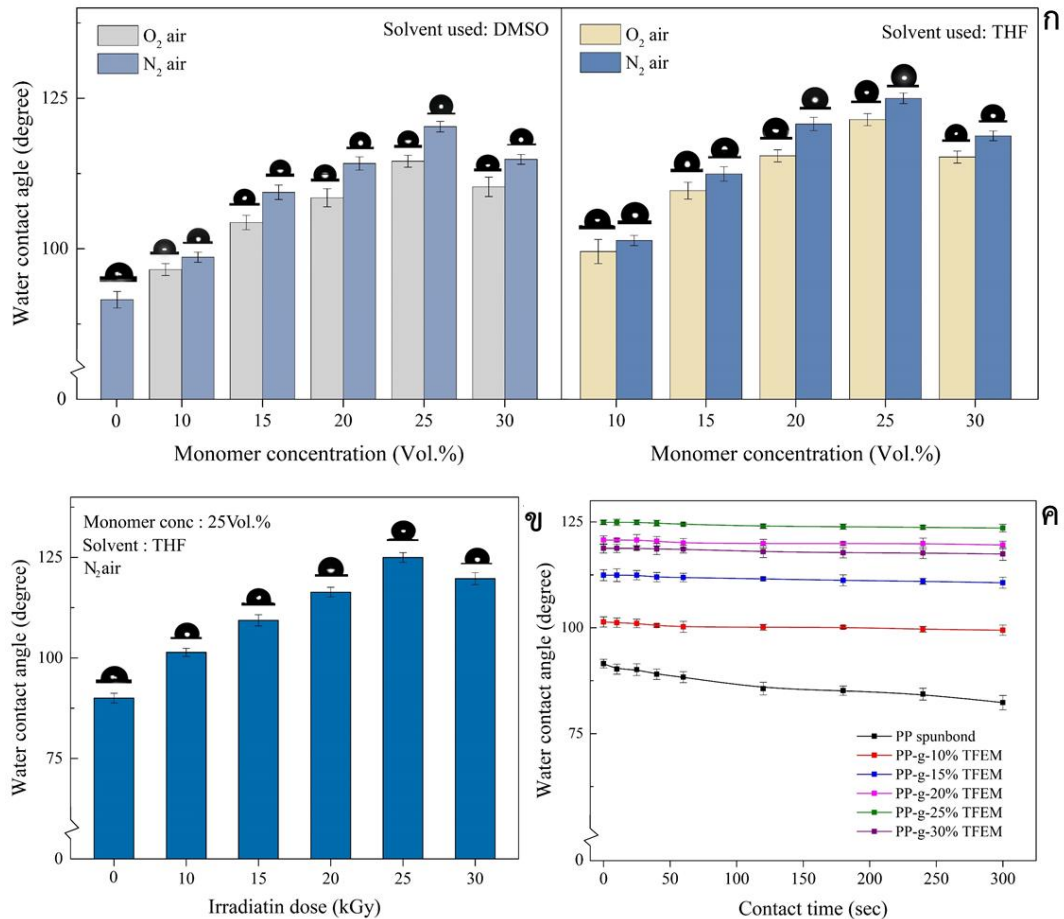
ตารางที่ 4.2 ความสามารถในการซึมผ่านของอากาศ และค่าสีของผ้า

สมบัติ	ตัวอย่าง	สปีนบอนด์ก่อนการกราฟต์	สปีนบอนด์หลังการกราฟต์
Air permeability (L/m <sup>2</sup> /s)		1302	1096
Whiteness index (%)		69.34	65.36
$\Delta E$		-	0.95

#### 4.1.6 มุมสัมผัสของน้ำ (water contact angle)

การวัดมุมสัมผัสของน้ำ (water contact angle) เป็นการวัดความสามารถในการเปียกของพื้นผิววัสดุ จากผลการทดสอบดังรูปที่ 4.4 พบว่าในทุกชิ้นงานแสดงสมบัติความไม่ชอบน้ำ โดยสังเกตเห็นได้ว่าค่ามุมสัมผัสของน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ TFEM เพิ่มขึ้น และถึงค่าสูงสุดที่ความเข้มข้น 25 vol.% ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนและใช้ THF เป็นตัวทำละลาย (รูปที่ 4.4ก) นอกจากนี้แล้วค่ามุมสัมผัสของน้ำจะมีค่าสูงสุดเมื่อใช้ปริมาณรังสีที่ 25 kGy (รูปที่ 4.4ข) จากข้อมูลเหล่านี้จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่ามีความสอดคล้องกับระดับขั้นของการกราฟต์ โดยมีแนวโน้มในแบบเดียวกัน การเพิ่มขึ้นของมุมสัมผัสนี้ยังสามารถอธิบายได้ถึงการเปลี่ยนแปลงของพลังงานบนพื้นผิวของผ้าที่เกิดจากการกราฟต์ของไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลต [74] ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ความไม่ชอบน้ำบนพื้นผิวของผ้า สามารถปรับปรุงได้โดยการควบคุมความเข้มข้นของโมโนเมอร์ที่ใช้ บรรยากาศปริมาณรังสี และชนิดของตัวทำละลาย นอกจากนี้แล้ว จากรูปที่ 4.4ค ยังได้ศึกษาความคงทนเบื้องต้น

ในสมบัติความไม่ชอบน้ำของผ้าเทียบกับระยะเวลาที่สัมผัสกับน้ำ เพื่อดูว่าน้ำที่อยู่บนพื้นผิวของผ้าสามารถซึมได้มากน้อยเพียงใด จากผลการศึกษาพบว่า ผ้าที่ผ่านการกราฟต์ยังคงรักษาสมบัติไม่ชอบน้ำสูง น้ำไม่สามารถซึมได้ และมีมุมสัมผัสลดลงเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับผ้าที่ไม่ได้ผ่านการกราฟต์

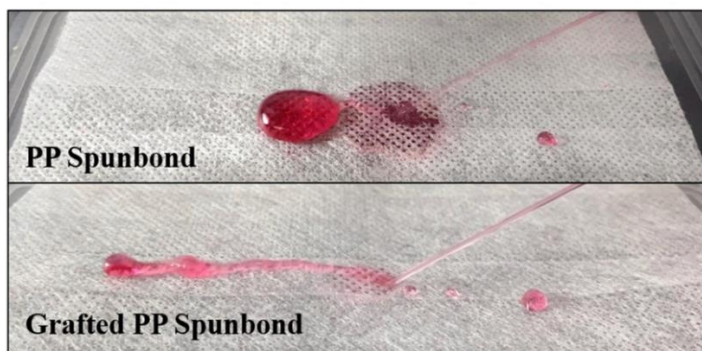


รูปที่ 4.4 ค่ามุมสัมผัสของน้ำบนผ้าที่ผ่านการกราฟต์ที่ (ก) ความเข้มข้นของมอนอเมอร์ที่ต่างกันในแต่ละชนิดของสารละลายที่ใช้, (ข) ปริมาณรังสีต่าง ๆ และ (ค) เทียบกับเวลาที่สัมผัสน้ำเพื่อดูการซึม

#### 4.1.7 ความคงทนต่อแรงดันน้ำ (water injection test)

จากรูปที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันน้ำของผ้าที่ผ่านการกราฟต์และไม่ได้ผ่านการกราฟต์ โดยได้นำผ้าจากภาวะการกราฟต์ที่ดีที่สุด (TFEM 25 Vol.%) มาทดสอบ จากผลการศึกษาพบว่าผ้าที่ไม่ผ่านการกราฟต์ น้ำสามารถดันทะลุและติดอยู่บนพื้นผิว ในขณะที่ผ้าที่ผ่านการกราฟต์แรงดันน้ำที่ฉีดลงไปจะดันออกมาในทิศทางตรงกันข้ามอย่างต่อเนื่อง ซึ่งลักษณะดังกล่าวเป็นการแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการสะท้อนน้ำที่ดี (water repellency) ของผ้า

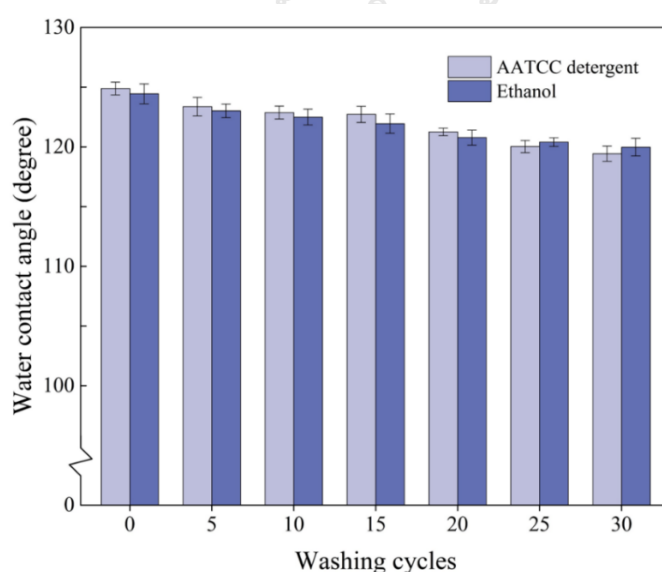
นั่นเอง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า การกราฟต์ไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลตลงบนพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ในงานวิจัยนี้ มีประสิทธิภาพสูงเพียงพอที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นชุดเพื่อการป้องกันได้



รูปที่ 4.5 ความคงทนต่อแรงดันน้ำของสปีนบอนด์

#### 4.1.8 ความคงทนต่อการซัก (washing durability)

รูปที่ 4.6 แสดงผลการศึกษาคงทนต่อการซัก โดยวัดมุมสัมผัสของน้ำหลังจากการซักเป็นระยะเวลา 30 รอบ โดยได้นำผ้าจากภาวะการกราฟต์ที่ดีที่สุด (TFEM 25 Vol.%) มาทดสอบ ผลการศึกษพบว่า มุมสัมผัสน้ำลดลงเล็กน้อยเมื่อรอบการซักเพิ่มขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการซักในผงซักฟอกมาตรฐาน หรือเอทานอลก็ตาม และเป็นที่น่าสังเกตว่าความไม่ชอบน้ำของผ้าที่ผ่านการกราฟต์จะยังคงอยู่หลังจากซักจำนวน 30 รอบ หรือสามารถกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าการกันน้ำของผ้ายังคงอยู่ได้ดี ดังนั้น การกราฟต์ไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลตลงบนพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ โดยการใช้รังสีแกมมานั้นประสบความสำเร็จ และยังสร้างผ้าที่กันน้ำแบบใช้ซ้ำได้ดีอีกด้วย



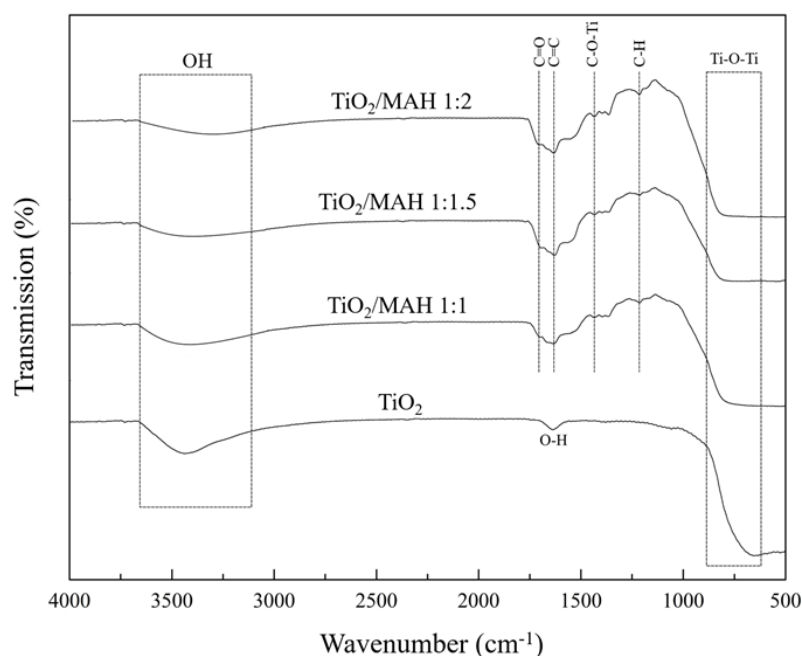
รูปที่ 4.6 มุมสัมผัสของน้ำเมื่อหลังซักของผ้าที่ผ่านการกราฟต์

## 4.2 ผลการศึกษาการกราฟต์ไทเทเนียมไดออกไซด์ และไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลต ลงบนพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์

### 4.2.1 ผลการศึกษาการดัดแปรไทเทเนียมไดออกไซด์

#### 4.2.1.1 โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันเคมี

รูปที่ 4.7 แสดงผลการศึกษาโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ก่อนและหลังดัดแปรด้วยเทคนิค FTIR ผลการศึกษาพบว่า อนุภาค  $\text{TiO}_2$  แสดงพีกของ O-H stretching และ O-H bending ที่เลขคลื่น  $3000\text{-}3500\text{ cm}^{-1}$  และ  $1640\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ อีกทั้งพีกหลักของ  $\text{TiO}_2$  นั่นคือ Ti-O-Ti vibration [75] ได้ปรากฏให้เห็นที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $450\text{-}900\text{ cm}^{-1}$  หลังจากดัดแปรอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MAH) พบพีกใหม่ที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $1720$ ,  $1632$ ,  $1420$  และ  $1212\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึง C=O stretching, C=C stretching, C-O-Ti stretching และ C-H bending ตามลำดับ [55, 76] นอกจากนี้ยังพบว่าพีกของ O-H stretching มีค่าการดูดกลืนที่ลดลงเมื่อมีปริมาณของ MAH สูงขึ้น ซึ่งเกิดจากการแทนที่ของ maleic acid group บนพื้นผิว  $\text{TiO}_2$  ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่า MAH สามารถทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับ  $\text{TiO}_2$  ได้สำเร็จ หรือสามารถกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า บนพื้นผิวของ  $\text{TiO}_2$  มีพันธะ C=C เกิดขึ้น ซึ่งเหมาะกับการนำไปกราฟต์ลงบนพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ต่อไปได้



รูปที่ 4.7 FTIR spectrum ของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ก่อนและหลังดัดแปร



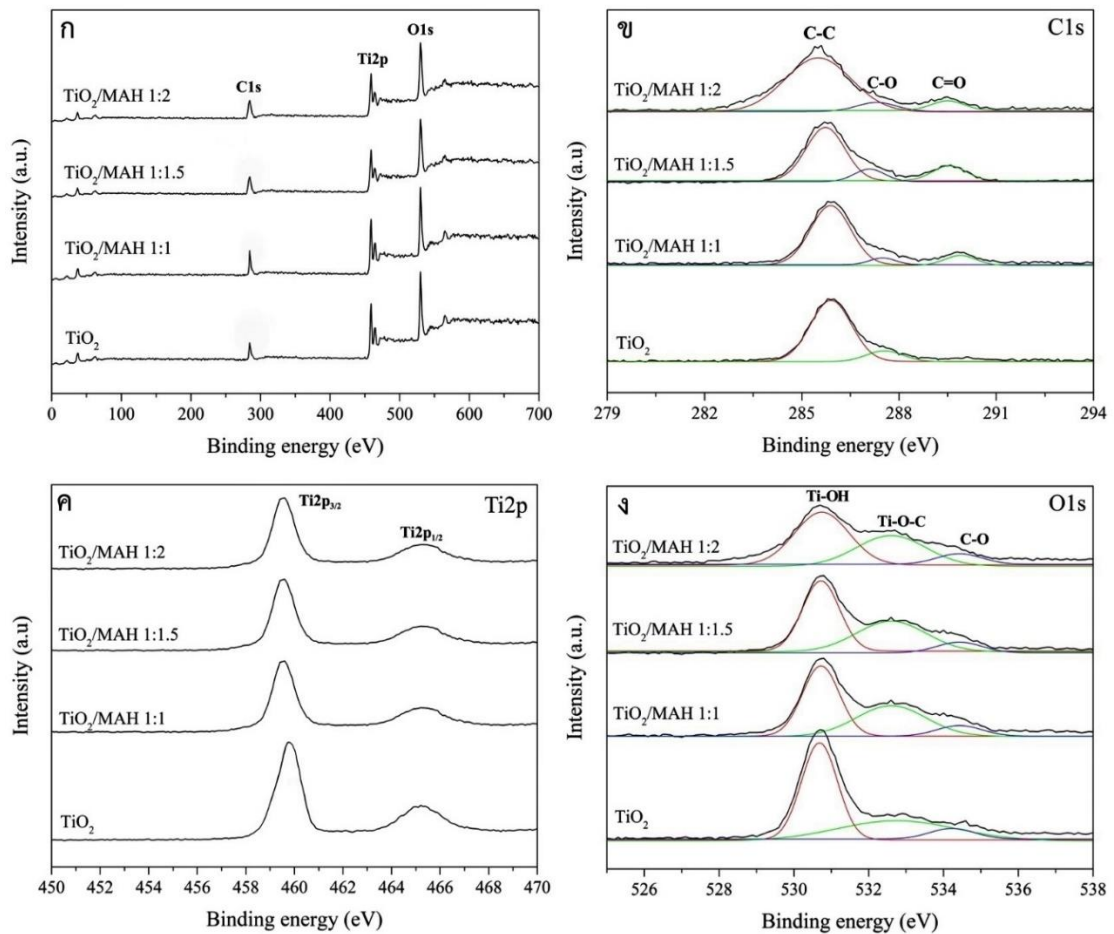
#### 4.2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิว โดยใช้เทคนิค X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)

รูปที่ 4.8 แสดงองค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ก่อนและหลังดัดแปร จากผลการศึกษาพบว่า สเปกตรัมแบบ wide scan ของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ก่อนและหลังดัดแปร (รูปที่ 4.9ก) ปรากฏพีกหลัก 3 พีกคือ  $\text{Ti}2p$ ,  $\text{O}1s$  และ  $\text{C}1s$  อีกทั้งยังสังเกตเห็นได้ว่าพีก  $\text{C}1s$  ของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  หลังดัดแปรมีความเข้มของพีกเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MAH) ซึ่งสามารถบอกได้ว่า MAH มีโอกาสที่จะเข้ามาทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวของ  $\text{TiO}_2$  ได้ [77]

รูปที่ 4.8ข แสดงสเปกตรัม  $\text{C}1s$  แบบ high resolution จะเห็นได้ว่าอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ก่อนดัดแปร แสดงพีก  $\text{C-O}$  ซึ่งอาจเกิดจากการที่ตัวอย่างสัมผัสกับบรรยากาศ โมเลกุลของคาร์บอนจึงอาจปนเปื้อนหรือปกคลุมบนพื้นผิวของตัวอย่างได้ [78] สำหรับสเปกตรัม  $\text{C}1s$  ของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  หลังดัดแปร สามารถแบ่งพีกเป็น 3 พีก ที่ระดับพลังงานประมาณ 286.1, 287.6, และ 289.7 eV อันเป็นลักษณะพีกของพันธะ  $\text{C-C}$ ,  $\text{C-O}$ , และ  $\text{C=O}$  ตามลำดับ ซึ่งลักษณะของพีกที่เกิดขึ้นดังกล่าว มาจากโครงสร้างของ MAH ที่เกาะอยู่บนพื้นผิวของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  [79]

รูปที่ 4.8ค แสดงสเปกตรัม  $\text{Ti}2p$  แบบ high resolution จะสังเกตเห็นพีกหลัก 2 พีกคือ  $\text{Ti}2p_{3/2}$  และ  $\text{Ti}2p_{1/2}$  ที่ระดับพลังงานประมาณ 459.5 และ 465.2 eV ตามลำดับ [80] นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าระดับพลังงานของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  หลังดัดแปร มีแนวโน้มลดน้อยลง อันเนื่องจากการมีพันธะ  $\text{Ti-O-C}$  เกิดขึ้น [55] ซึ่งสามารถยืนยันได้จากสเปกตรัมของ  $\text{O}1s$

รูปที่ 4.8ง แสดงสเปกตรัม  $\text{O}1s$  แบบ high resolution สามารถแบ่งพีกเป็น 3 พีก ที่ระดับพลังงานประมาณ 530.7, 532.7 และ 534.6 eV อันเป็นลักษณะพีกของพันธะ  $\text{Ti-OH}$ ,  $\text{Ti-O-C}$ , และ  $\text{C-O}$  ตามลำดับ [81] นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าปริมาณของ MAH ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้พีกของ  $\text{Ti-O-C}$  และ  $\text{C-O}$  มีความเข้มพีกมากยิ่งขึ้น อีกทั้งผลดังกล่าวมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า สามารถดัดแปรอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ด้วย MAH เพื่อให้มีพันธะ  $\text{C=C}$  บนพื้นผิวของ  $\text{TiO}_2$  ได้สำเร็จ

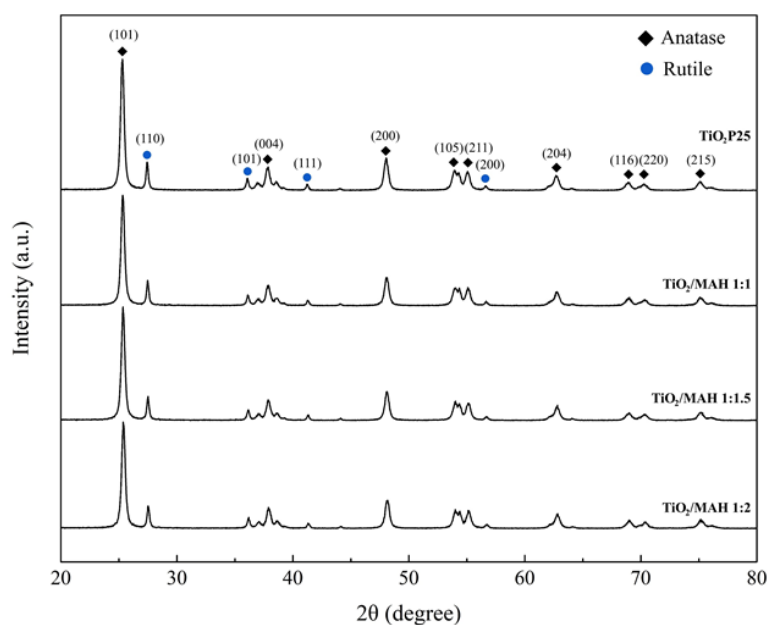


รูปที่ 4.8 XPS spectra ของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ก่อนและหลังดัดแปร; (ก) wide scan, high resolution ของ (ข) C1s, (ค) Ti2p, and (ง) O1s.

#### 4.2.1.3 โครงสร้างผลึก โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD)

รูปที่ 4.9 แสดงผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  จากผลการศึกษาพบว่าปรากฏพีก ณ มุม  $2\theta$  ประมาณ  $25.2^\circ$   $37.8^\circ$   $47.9^\circ$   $54.0^\circ$  และ  $62.6^\circ$  แสดงถึงโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส และมีระนาบผลึกเป็น (101) (004) (200) (106) and (204) ตามลำดับ [82] นอกจากนี้แล้วยังสังเกตเห็นได้ว่าอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ที่ดัดแปรแล้วไม่ปรากฏพีกอื่น เป็นการยืนยันว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่เกิดขึ้นไม่ได้ส่งผลต่อโครงสร้างผลึกของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  แต่อย่างใด [55] และสามารถอนุมานได้ว่าสมบัติของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ไม่เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย นอกจากนี้แล้วอาจกล่าวได้อีกว่า MAH เข้าไปทำปฏิกิริยาในโครงสร้างของ  $\text{TiO}_2$  ที่มีผลึกแบบอนาเทส สังเกตได้จากระนาบ 101 ของอนาเทสที่มีความเข้มของพีกลดลงนั่นเอง [83] สำหรับขนาดผลึกที่คำนวณได้จาก XRD โดย

อาศัยสูตรการคำนวณของ Debye-Scherrer formula;  $D = K\lambda / \beta \cos\theta$ , โดย D คือขนาดของผลึก, K คือ shape factor = 0.9,  $\lambda$  คือความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ (1.54178 Å),  $\beta$  คือความสูงที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่ง (the full width at half maximum; FWHM) ของพีคที่สูงที่สุด (101) และ  $\theta$  คือมุมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ [84] จากผลการคำนวณพบว่า ขนาดผลึกของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  มีค่าเท่ากับ 20.7 nm ในขณะที่อนุภาค  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการตัดแปร มีค่าเป็น  $22.3 \pm 0.8$  nm

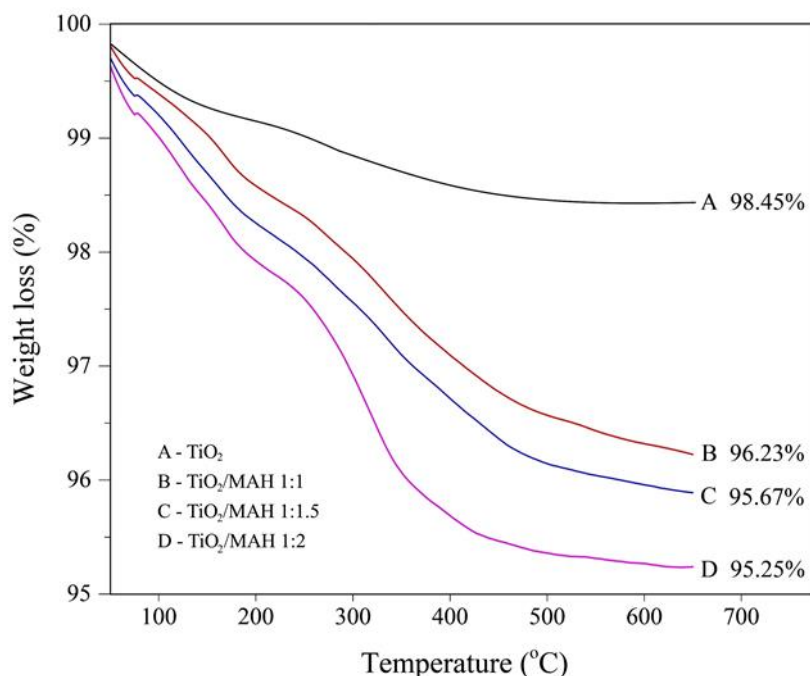


รูปที่ 4.9 XRD pattern ของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ก่อนและหลังตัดแปร

#### 4.2.1.4 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารเนื่องจากความร้อน (Thermogravimetric Analyzer; TGA)

รูปที่ 4.10 แสดงผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  เนื่องจากความร้อน โดยใช้เทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) โดยแสดงให้เห็นว่ามีการลดลงของน้ำหนักเกิดขึ้นที่ 2 ช่วงอุณหภูมิ เริ่มตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิห้องไปจนถึง 200 องศาเซลเซียส ในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุประมาณร้อยละ 10 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้เกิดจากการระเหยของน้ำ และความชื้นบนพื้นผิวของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ในช่วงที่สองของการเปลี่ยนแปลงนั้นจะเกิดการสลายตัวของหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นองค์ประกอบบนพื้นผิวของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  [85, 86] นอกจากนี้สามารถสังเกตเห็นได้ว่าอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการตัดแปร มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำลง เป็นผลมาจากการสลายตัวของกลุ่มมาเลอิกที่เกาะอยู่บนพื้นผิวของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  [55] อีกทั้ง ยัง

พบว่าน้ำหนักคงเหลือของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ก่อนและหลังการดัดแปรมีค่าที่ไม่เท่ากัน นั้นแสดงถึงการที่ มาเลอิกแอนไฮไดรด์สามารถเข้ามาเกาะอยู่บนพื้นผิวได้นั่นเอง

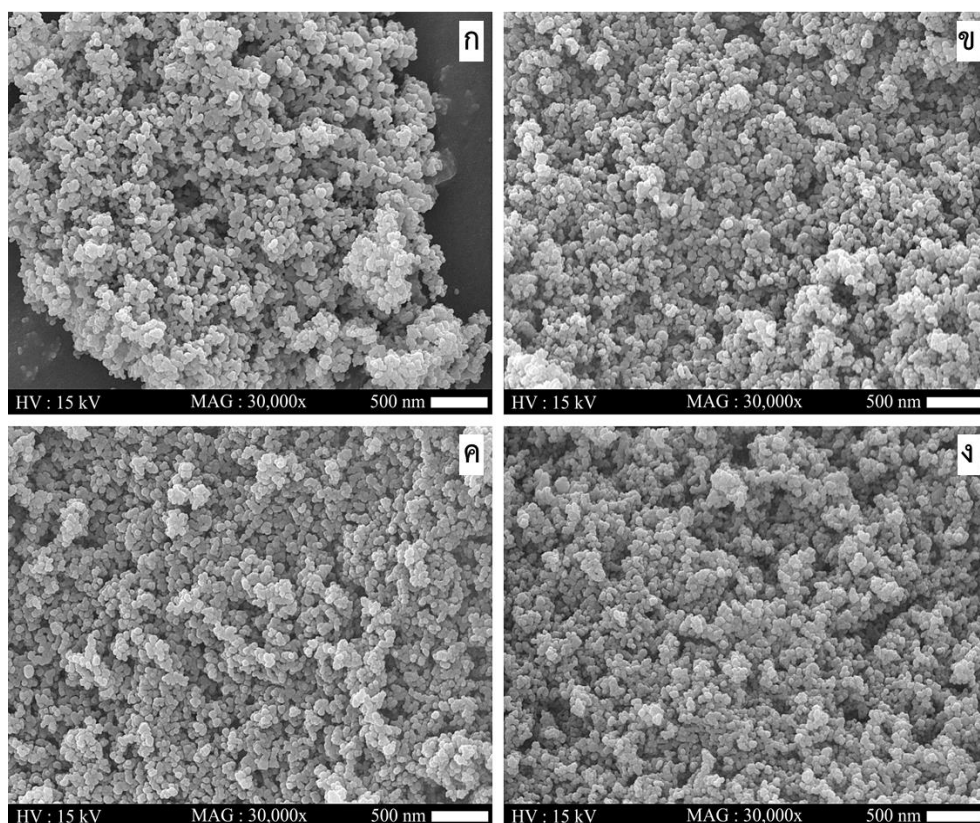


รูปที่ 4.10 TGA curves ของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ก่อนและหลังดัดแปร

#### 4.2.1.5 ลักษณะสัณฐานวิทยา โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(Scanning Electron Microscope; SEM)

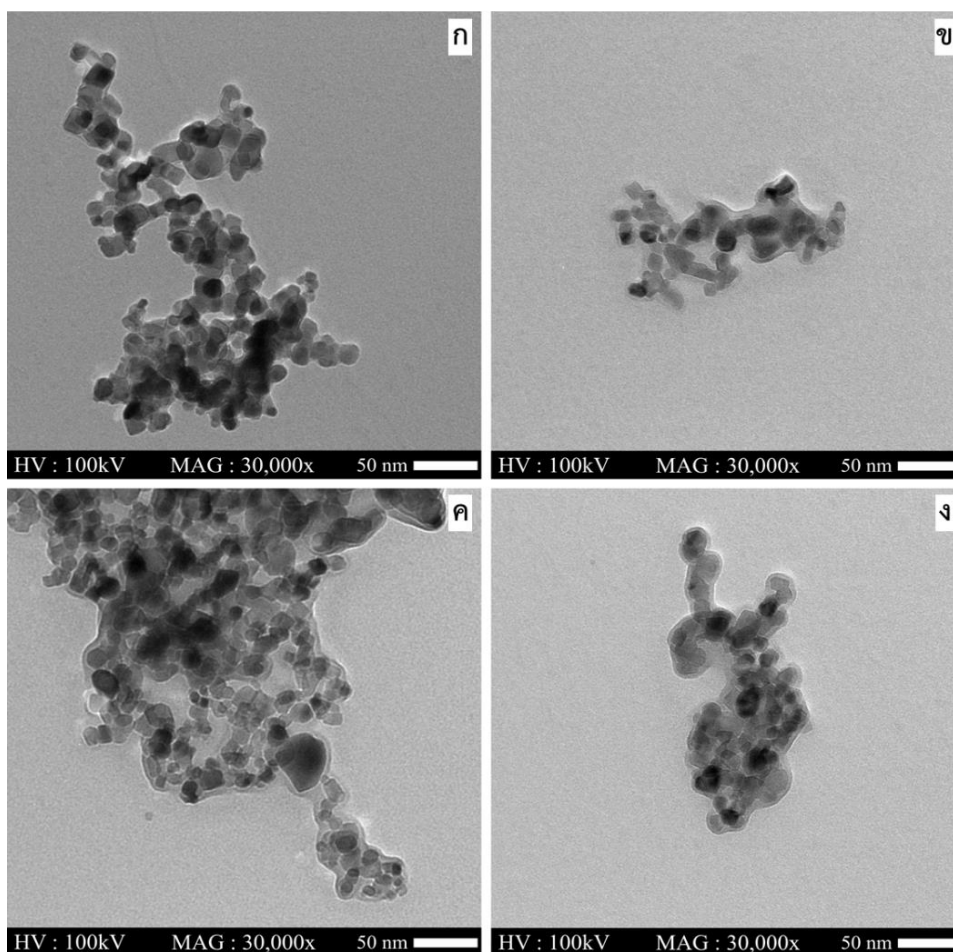
รูปที่ 4.11 แสดงผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ก่อนและหลังดัดแปรด้วยเทคนิค SEM พบว่า อนุภาคมีสัณฐานเป็นทรงกลม ขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงประมาณ 20-25 นาโนเมตร และสามารถสังเกตเห็นว่าอนุภาคบางส่วนมีการเกาะกลุ่มกัน นอกจากนี้ไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนในแง่ขนาดหรือสัณฐานวิทยาของ  $\text{TiO}_2$  ที่ถูกดัดแปร เมื่อเทียบกับ  $\text{TiO}_2$  ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าการดัดแปร  $\text{TiO}_2$  ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ไม่ส่งผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของ  $\text{TiO}_2$  ซึ่งการที่ลักษณะสัณฐานไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม จึงไม่ส่งผลให้สมบัติของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ในการต่อต้านรังสียูวี และยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเปลี่ยนแปลงไปด้วย [65]



รูปที่ 4.11 ลักษณะสัณฐานวิทยา (SEM images) ของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ก่อนและหลังตัดแปรร

#### 4.2.1.6 ลักษณะสัณฐานวิทยา โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope; TEM)

จากรูปที่ 4.12 แสดงผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ก่อนและหลังตัดแปรรด้วยเทคนิค TEM พบว่าลักษณะสัณฐานวิทยาของ  $\text{TiO}_2$  มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่ค่อนข้างสม่ำเสมอและมีลักษณะเป็นทรงกลม โดยมีขนาดอนุภาคประมาณ 20 นาโนเมตร หลังจากตัดแปรรอนุภาค  $\text{TiO}_2$  จะสังเกตเห็นลักษณะของชั้นฟิล์มบางอยู่บนอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเกาะติดแบบหลายชั้น (multilayer attachment) ของกลุ่มกรดมาเลอิก บนพื้นผิวของ  $\text{TiO}_2$  [28, 87] โดยลักษณะข้างต้น สามารถใช้เป็นผลยืนยันได้อีกว่าสามารถตัดแปรรอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ได้สำเร็จ นอกจากนี้ ขนาดอนุภาคของ  $\text{TiO}_2$  ที่ถูกตัดแปรร เพิ่มขึ้นเป็น 22-24 นาโนเมตร จากผลที่ได้ดังกล่าวมีความสอดคล้องและตรงกันกับการศึกษาโดยเทคนิค SEM และ XRD



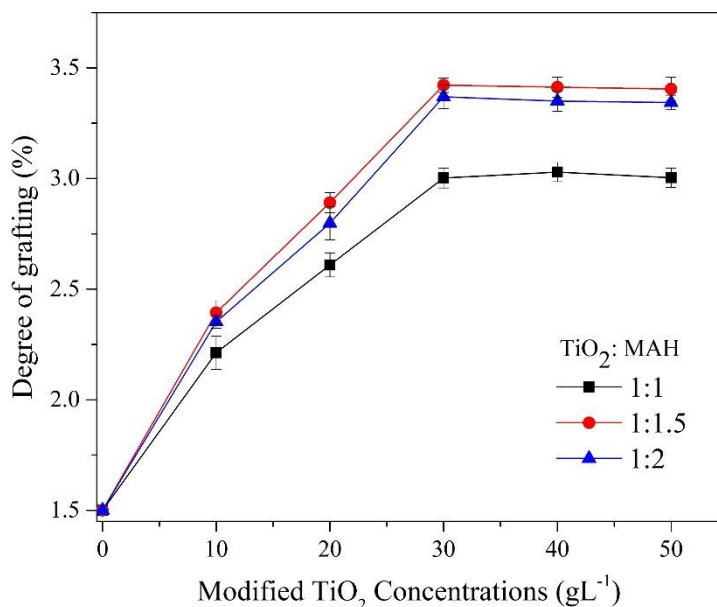
รูปที่ 4.12 ลักษณะสัณฐานวิทยา (TEM images) ของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ก่อนและหลังตัดแปรร

#### 4.2.2 ผลการศึกษาสมบัติเบื้องต้นของพอลิพรพิลีนสปีนบอนด์ที่ผ่านการกราฟต์

##### 4.2.2.1 ระดับขั้นของการกราฟต์ (Degree of grafting)

รูปที่ 4.13ก แสดงระดับขั้นของการกราฟต์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการตัดแปรรงบนพอลิพรพิลีนสปีนบอนด์ จากผลการศึกษาพบว่าอนุภาค  $\text{TiO}_2/\text{MAH}$  1:1.5 ให้ระดับขั้นของการกราฟต์สูงที่สุด เนื่องมาจากการที่ปริมาณของมาเลอิกแอนไฮไดรด์อยู่ในค่าที่เหมาะสม มีตำแหน่งของ  $\text{C}=\text{C}$  ที่ไม่มากและน้อยเกินไป ในทางตรงกันข้าม อนุภาค  $\text{TiO}_2/\text{MAH}$  1:1 แสดงระดับขั้นของการกราฟต์ที่ต่ำที่สุด อาจเป็นเพราะตำแหน่งของ  $\text{C}=\text{C}$  ที่น้อยเกินไป นอกจากนี้แล้วเมื่อพิจารณาถึงปริมาณของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ที่ใช้ เห็นได้ว่า ระดับขั้นของการกราฟต์เพิ่มขึ้นตามปริมาณของอนุภาค และมีค่าคงที่เมื่อปริมาณตั้งแต่ 30 g/L ซึ่งลักษณะดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อปริมาณที่มากเกินไป อนุภาค  $\text{TiO}_2$  จะกระจุกตัวกันมากขึ้น ซึ่งอนุภาคอาจเกิดปฏิกิริยากันเองได้ ทำให้ไม่เกาะบนผ้าเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง ดังนั้นจึงเลือก  $\text{TiO}_2/\text{MAH}$  1:1.5 ที่ปริมาณ 30g/L มากกราฟต์และศึกษา

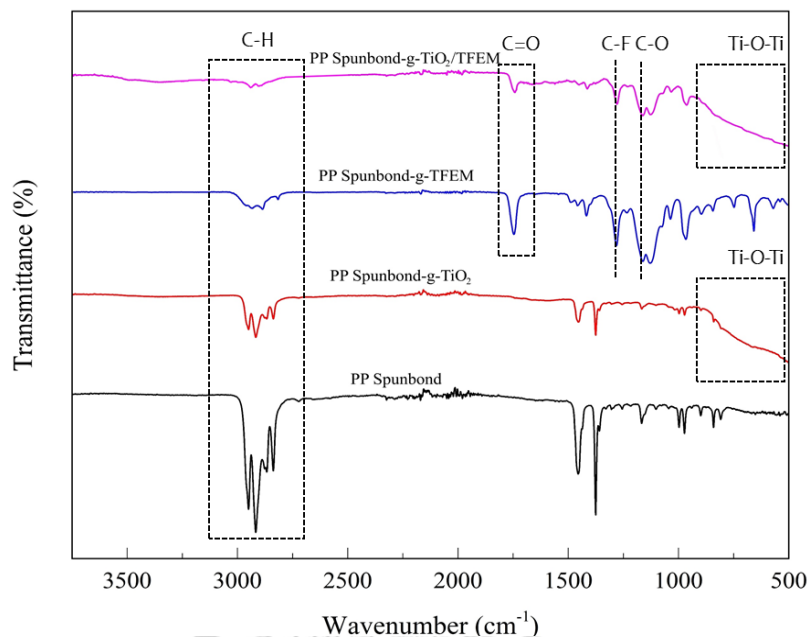
สมบัติต่อไป เมื่อได้ภาวะที่เหมาะสมในการกราฟต์  $\text{TiO}_2$  แล้ว หลังจากนั้นได้กราฟต์ TFEM และพบว่าระดับชั้นของการกราฟต์มีค่าเท่ากับ  $124 \pm 3 \%$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.1.1



รูปที่ 4.13 ระดับชั้นของการกราฟต์ของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการดัดแปรบนพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์

#### 4.2.2.2 โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันทางเคมี

รูปที่ 4.14 แสดงผลการศึกษาโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค ATR-FTIR ของพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ก่อนและหลังกระบวนการกราฟต์ สำหรับพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์พบพีกที่ปรากฏในช่วงเลขคลื่น  $2840\text{-}3000 \text{ cm}^{-1}$  แสดงถึง C-H stretching ที่เป็น นอกจากนี้พีกที่เลขคลื่น  $1455$  และ  $1376 \text{ cm}^{-1}$  ยังแสดงถึง C-H scission เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของพอลิโพรพิลีนอีกด้วย [65, 66] หลังจากกราฟต์อนุภาค  $\text{TiO}_2$  และ TFEM พบพีกใหม่ปรากฏที่เลขคลื่น  $1745$ ,  $1280$ ,  $1162$ ,  $654 \text{ cm}^{-1}$  แสดงถึงการสั่นแบบยืด-หดของหมู่ C=O, C-F, C-O and  $\text{CF}_3$  ตามลำดับ [67] ซึ่งพีกใหม่ที่ปรากฏขึ้นนี้ เป็นพีกของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของพอลิไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลต อีกทั้งยังพบพีกของ Ti-O-Ti vibration [75] ปรากฏที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $450\text{-}900 \text{ cm}^{-1}$  ดังนั้นผลที่ได้ดังกล่าวเป็นการยืนยันว่า อนุภาค  $\text{TiO}_2$  และ TFEM ถูกกราฟต์ลงบนพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์

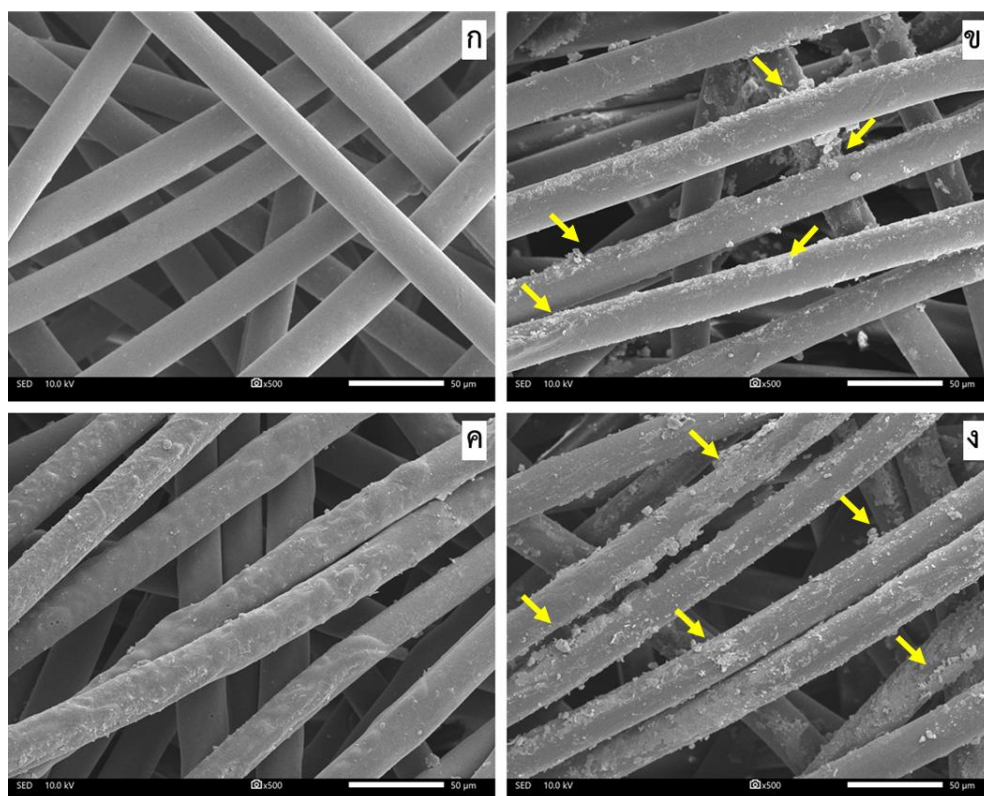


รูปที่ 4.14 FTIR spectrum ของโพลีโพรพิลีนสปันบอนด์และโพรพิลีนสปันบอนด์ที่ผ่านการกราฟต์

#### 4.2.2.3 ลักษณะสัณฐานวิทยา

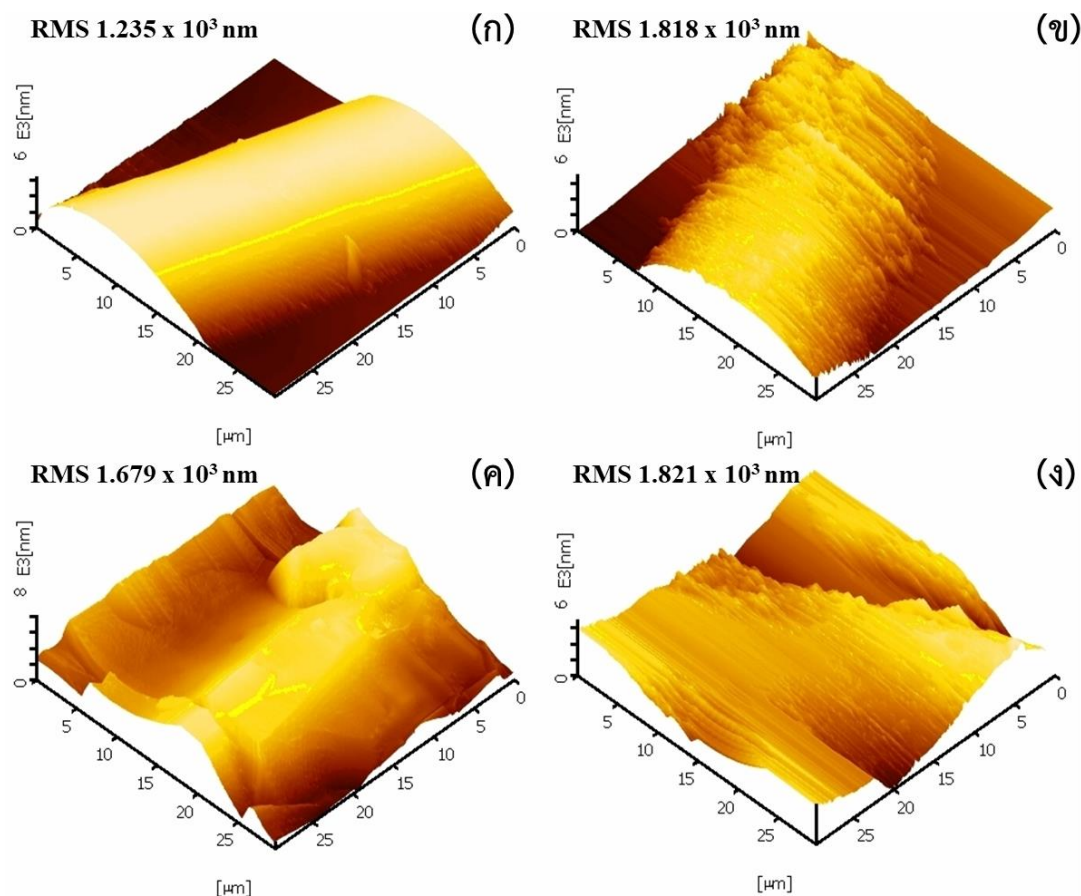
จากรูปที่ 4.15 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของโพลีโพรพิลีนสปันบอนด์ ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการกราฟต์ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) จากภาพแสดงให้เห็นว่าการกราฟต์ TFEM และอนุภาค  $\text{TiO}_2$  เกิดขึ้นบนพื้นผิวของผ้าอย่างชัดเจน โดยเส้นใยของโพลีโพรพิลีนสปันบอนด์ มีพื้นผิวที่เรียบมาก หลังจากกราฟต์ สังเกตเห็นพื้นผิวในลักษณะที่หยาบและไม่สม่ำเสมอซึ่งเกิดจากการกราฟต์ของ TFEM (รูปที่ 1ค) นอกจากนี้ยังสังเกตได้อย่างชัดเจนว่า  $\text{TiO}_2$  ถูกกราฟต์ลงบนพื้นผิวของผ้าเช่นกัน ตัวอย่างของบริเวณที่เห็น  $\text{TiO}_2$  ดังที่ลูกศรกำกับ (รูปที่ 1ข, ง)





รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดของ (ก) PP spunbond, (ข) PP spunbond-g-TiO<sub>2</sub>, (ค) PP spunbond-g-TFEM และ (ง) PP spunbond-g-TiO<sub>2</sub>/TFEM

นอกจากนี้แล้วลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิพรพิลีนสปีนบอนด์ ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการกราฟต์ ได้ศึกษาเพิ่มเติมโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic force microscope; AFM) จากผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.16 พบว่าลักษณะพื้นผิวของพอลิพรพิลีนสปีนบอนด์มีความเรียบ และสม่ำเสมอ (รูปที่ 4.16ก) สำหรับพอลิพรพิลีนที่ผ่านการกราฟต์ด้วยไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลต พบว่าลักษณะพื้นผิวมีความขรุขระ และไม่เรียบเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.16ค) นอกจากนี้แล้ว เป็นที่น่าสังเกตว่าการกราฟต์อนุภาค TiO<sub>2</sub> ลงบนผ้า ส่งผลทำให้ความขรุขระของพื้นผิวเพิ่มขึ้นอย่างมาก และลักษณะที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า island-like nanostructures [88] ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของอนุภาค TiO<sub>2</sub> (รูปที่ 4.16ข, 4.16ง) ดังนั้น สามารถบอกได้ว่าอนุภาค TiO<sub>2</sub> และ TFEM ส่งผลให้ลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิพรพิลีนสปีนบอนด์เปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน อีกทั้งยังสังเกตเห็นได้ว่าค่า surface roughness ( $R_{RMS}$ ) ของผ้าที่ผ่านการกราฟต์มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากพื้นผิวมีความขรุขระเพิ่มขึ้นนั่นเอง นอกจากนี้แล้ว จากผลการศึกษาด้วยเทคนิค AFM มีความสอดคล้องกันกับผลการศึกษาด้วยเทคนิค SEM อย่างเห็นได้ชัด

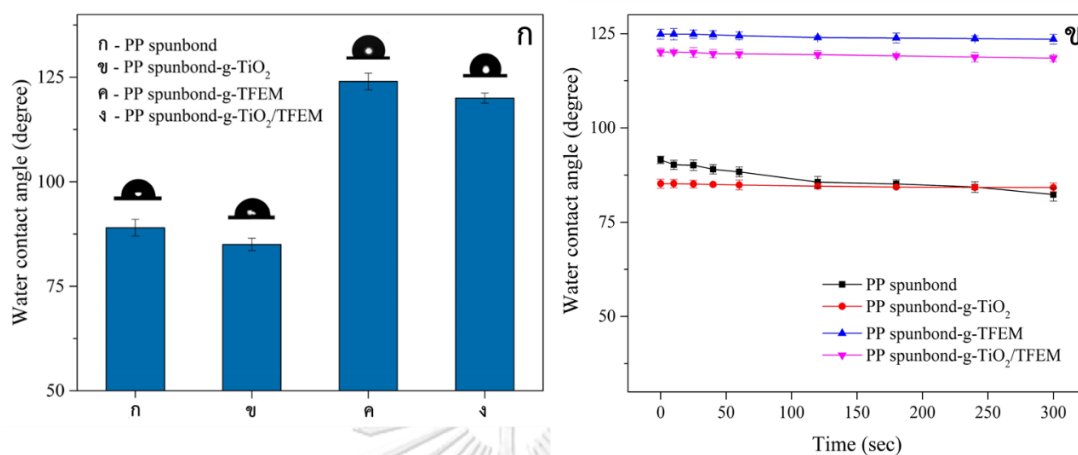


รูปที่ 4.16 ลักษณะพื้นผิวจากเทคนิค AFM ของ (ก) PP spunbond, (ข) PP spunbond-g-TiO<sub>2</sub>, (ค) PP spunbond-g-TFEM และ (ง) PP spunbond-g-TiO<sub>2</sub>/TFEM

#### 4.2.2.4 มุมสัมผัสของน้ำ (water contact angle)

รูปที่ 4.17ก แสดงผลการศึกษา มุมสัมผัสของน้ำ พบว่า พอลิโพรพิลีนสปันบอนด์ มีมุมสัมผัสของน้ำ  $89 \pm 2$  องศา สำหรับ PP spunbond-g-TFEM มีมุมสัมผัสน้ำเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ( $124 \pm 2$ ) ซึ่งเป็นผลมาจาก TFEM มีสมบัติในการกั้นน้ำได้ดีเยี่ยม [89] นอกจากนี้แล้วสามารถสังเกตเห็นได้ว่าการกราฟต์ TiO<sub>2</sub> บนพื้นผิวของพอลิโพรพิลีนสปันบอนด์ (PP spunbond-g-TiO<sub>2</sub>) ทำให้มุมสัมผัสน้ำลดลงเล็กน้อย อาจเป็นเพราะหมู่ OH ที่หลงเหลืออยู่บนพื้นผิวของ TiO<sub>2</sub> อีกทั้ง PP spunbond-g-TiO<sub>2</sub>/TFEM ก็ยังคงแสดงให้เห็นว่ามุมสัมผัสน้ำลดลงเล็กน้อยเช่นกัน ลักษณะดังกล่าวสามารถนำมาอธิบายเพิ่มเติมได้ว่าพื้นผิวของอนุภาค TiO<sub>2</sub> ไม่ได้ถูกปิดทับโดย TFEM ทั้งหมด [28] นอกจากนี้ยังสามารถบอกได้ว่าการกราฟต์ TiO<sub>2</sub> ใน PP spunbond-g-TiO<sub>2</sub>/TFEM ไม่ได้ทำให้ความสามารถในการกั้นน้ำลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับ PP spunbond-g-TFEM กล่าวคือ ยังคงมีสมบัติความไม่ชอบน้ำสูงอยู่ นอกจากนี้แล้ว จากรูปที่ 4.17ข ยังได้ศึกษาความคงทนเบื้องต้นใน

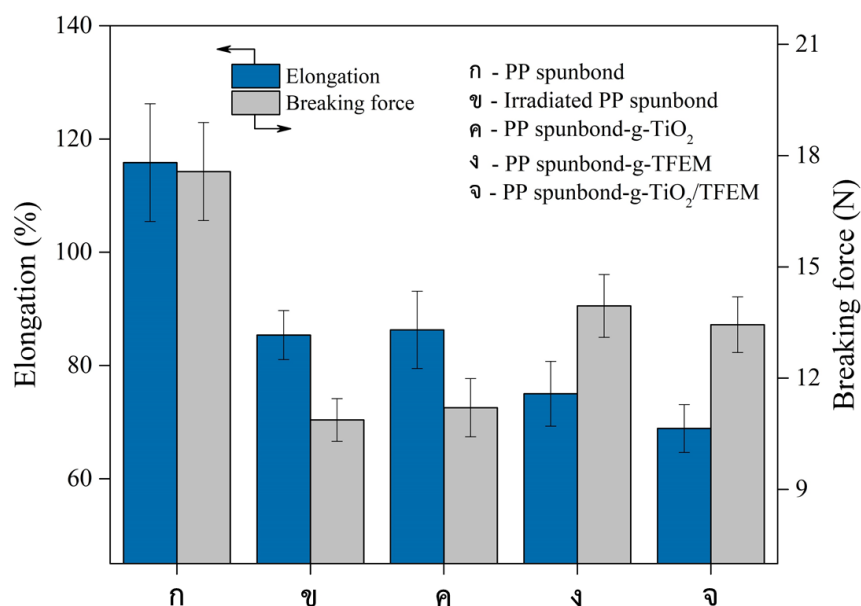
สมบัติความไม่ชอบน้ำของผ้าเทียบกับระยะเวลาที่สัมผัสกับน้ำ จากผลการศึกษพบว่า ผ้าที่ผ่านการกราฟต์ยังคงรักษาสมบัติไม่ชอบน้ำสูง และมีมุมสัมผัสลดลงเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับผ้าที่ไม่ได้ผ่านการกราฟต์ ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับผลการทดลองที่ 4.1.5 (รูปที่ 4.4ค)



รูปที่ 4.17 ค่ามุมสัมผัสของน้ำ (ก) บนพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ และโพรพิลีนสปีนบอนด์ที่ผ่านการกราฟต์และ (ข) เทียบกับเวลาที่สัมผัสน้ำ

#### 4.2.2.5 สมบัติเชิงกลของโดยวิเคราะห์ที่ความทนต่อแรงดึง

รูปที่ 4.18 แสดงผลการศึกษสมบัติเชิงกลของโดยวิเคราะห์ที่ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (% elongation at break) และ แรงที่ใช้ ณ จุดขาด (breaking force) จากผลการศึกษพบว่า การยืดตัวและแรงแตกหักมีค่าลดลงหลังจากการฉายรังสี (Irradiated PP spunbond) ซึ่งเป็นผลมาจากการย่อยสลายของสายโซ่พอลิโพรพิลีน (chain scission) [90] และเมื่อกราฟต์ จะเห็นได้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความยืดสูงสุด ณ จุดขาดและแรงที่ใช้ ณ จุดขาด ของ PP spunbond-g-TiO<sub>2</sub> เมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ที่ฉายรังสี (irradiated PP spunbond) สำหรับ PP spunbond-g-TFEM พบว่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดลดลงและแรงที่ใช้ ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อพอลิเมอร์ชนิดอื่นถูกกราฟต์ลงบนผ้า ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ของผ้าเกิดการเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น ส่งผลต่อความสามารถในการยืดตัว [91] และสำหรับ PP spunbond-g-TiO<sub>2</sub>/TFEM แสดงให้เห็นว่าทั้งความยืดสูงสุด ณ จุดขาดและแรงที่ใช้ ณ จุดขาดลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ PP spunbond-g-TFEM เนื่องจากการย่อยสลายของสายโซ่พอลิโพรพิลีน (degradation) ยังคงเกิดขึ้นเมื่อมีการใช้รังสีสองครั้ง



รูปที่ 4.18 สมบัติด้านแรงดึงของพอลิโพรพิลีนสปันบอนด์และโพรพิลีนสปันบอนด์ที่ผ่านการกราฟต์

#### 4.2.2.6 ความสามารถในการซึมผ่านของอากาศ (air permeability) และสมบัติการต้านรังสียูวีของผ้า (UV resistance)

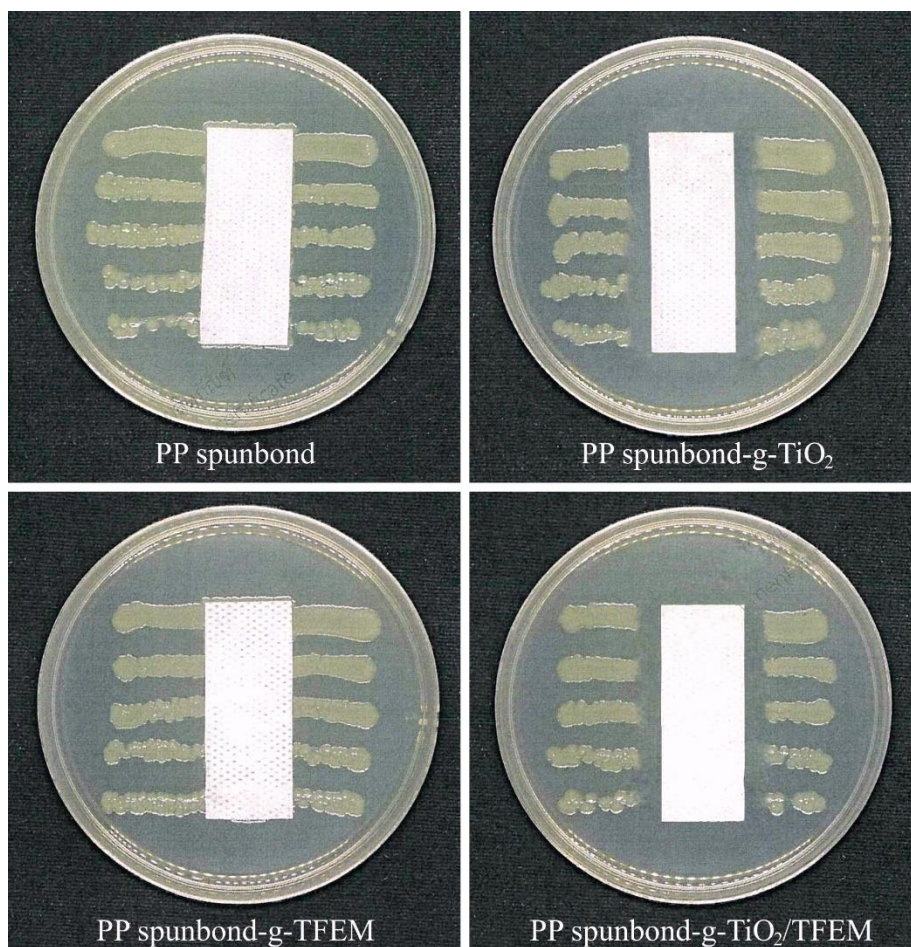
ตารางที่ 4.3 แสดงผลการศึกษาศักยภาพความสามารถในการซึมผ่านของอากาศและค่าการต้านรังสียูวีของผ้าวัดเป็นหน่วย UPF พบว่าความสามารถในการซึมผ่านของอากาศของผ้าที่ผ่านการกราฟต์มีค่าต่ำกว่าผ้าที่ไม่ได้ผ่านการกราฟต์ ซึ่งเกิดจากการปกคลุมของอนุภาค TiO<sub>2</sub> และ TFEM บนพื้นผิวของผ้า อย่างไรก็ตามความแตกต่างเล็กน้อยนี้ไม่ได้ทำให้ความสามารถในการระบายอากาศลดลงเมื่อใช้เป็นชุดเพื่อการป้องกัน ตามมาตรฐานการทดสอบ ISO 9237 ที่มีการกำหนดค่าการซึมผ่านของอากาศ ต้องมีค่าตั้งแต่ 910 L/m<sup>2</sup>/s ขึ้นไปจึงสามารถนำมาใช้เป็นชุดป้องกันได้สำหรับค่า UPF (UV protection factor) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการป้องกันรังสียูวี ซึ่งโดยทั่วไป เสื้อผ้าที่มีค่า UPF มากกว่า 50 จะแสดงสมบัติการป้องกันรังสียูวีได้ดีเยี่ยม [59] จากผลการศึกษาพบว่า PP spunbond และ PP spunbond-g-TFEM มีการป้องกันรังสียูวีได้ดีระดับหนึ่ง โดยมีค่า UPF เท่ากับ 28 และ 32 ตามลำดับ และเมื่อกราฟต์อนุภาค TiO<sub>2</sub> บนพื้นผิวของผ้า พบว่าสามารถป้องกันรังสี UV ได้สูง โดยมีค่า UPF สูงถึง 122-124 ซึ่งเป็นค่าที่สูงมาก สามารถบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการต้านรังสียูวีได้ในระดับดีเยี่ยม

ตารางที่ 4.3 ความสามารถในการซึมผ่านของอากาศ และค่าการต้านรังสียูวีของผ้า (UPF)

ผ้าตัวอย่าง	ค่าการซึมผ่านของอากาศ (L/m <sup>2</sup> /s)	UPF
PP spunbond	1302	28 ± 2
PP spunbond-g-TiO <sub>2</sub>	1168	124 ± 1
PP spunbond-g-TFEM	1096	32 ± 2
PP spunbond-g- TiO <sub>2</sub> /TFEM	1080	122 ± 2

#### 4.2.2.7 สมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของผ้า (antimicrobial activity)

สมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ที่ผ่านการกราฟต์ ได้ทดสอบโดยการวิเคราะห์การเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียชนิด *Escherichia coli* รอบ ๆ ผ้าโดยใช้วิธี parallel streak method ตามมาตรฐาน AATCC 147 จากรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่า พอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ และพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ที่กราฟต์ด้วยไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลต (PP spunbond-g-TFEM) ไม่มีคุณสมบัติในการต้านเชื้อแบคทีเรีย อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการกราฟต์อนุภาค TiO<sub>2</sub> ลงบนผ้า สามารถทำให้ผ้ามีสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ สังเกตได้จากการมีโซนใส (inhibition zone) เกิดขึ้นบริเวณรอบผ้า ซึ่งเป็นบริเวณที่ไม่มี การเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย อีกทั้งยังสามารถวัดขนาดโซนใสของตัวอย่างผ้า PP spunbond-g-TiO<sub>2</sub> และ PP spunbond-g-TiO<sub>2</sub>/TFEM ได้เท่ากับ 6±0.86 and 7±0.13 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งกลไกในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของ TiO<sub>2</sub> สามารถอธิบายได้คือ เมื่ออนุภาค TiO<sub>2</sub> ถูกกระตุ้นด้วยแสง จะเกิดเป็นไทเทเนียมไอออนซึ่งมีประจุบวก เข้าไปทำลายผนังเซลล์ของเชื้อแบคทีเรียที่มีประจุลบ ทำให้เซลล์ของเชื้อแบคทีเรียเกิดความเสียหาย นอกจากนี้ไทเทเนียมไอออนยังเข้าไปทำลายกรดดีออกซีไรโบนิวคลีอิก (DNA) และ กรดไรโบนิวคลีอิก (RNA) ทำให้แบคทีเรียไม่สามารถแบ่งตัวได้ อีกทั้งยังเข้าไปทำลายโปรตีนสำคัญอื่น ๆ ภายในโครงสร้าง เช่น โปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการหายใจของเซลล์ ส่งผลให้ระบบโครงสร้างภายในไม่สามารถทำงานได้ และตายในที่สุด [53]

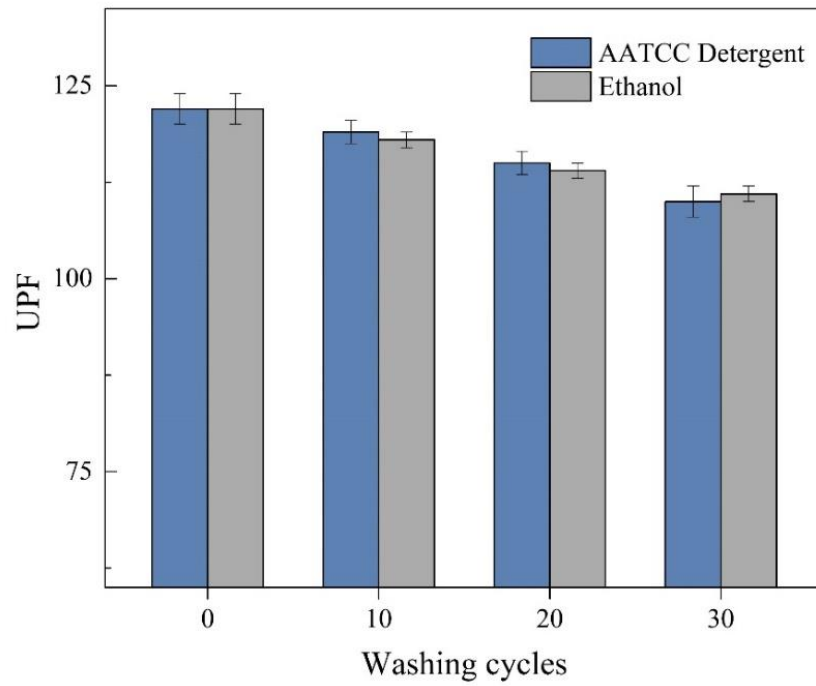


รูปที่ 4.19 ผลการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของพอลิโพรพิลีนสปันบอนด์ก่อนและหลังการกราฟต์ ตามมาตรฐานทดสอบ AATCC 147

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.2.2.8 ความคงทนต่อการซัก (washing durability)

ผลการศึกษาความคงทนต่อการซักของผ้าที่ผ่านการกราฟต์ (PP spunbond-g-  $\text{TiO}_2$ /TFEM) ตามมาตรฐาน AATCC 61-2006 ด้วยผงซักฟอกมาตรฐาน (0.15 wt%) และเอทานอล แสดงในรูปที่ 4.20 พบว่าค่า UPF ของทั้งการซักในผงซักฟอก และเอทานอล มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อรอบการซักเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการที่อนุภาค  $\text{TiO}_2$  บางส่วนที่อยู่บนพื้นผิวได้หลุดออกไป อย่างไรก็ตามค่า UPF ของผ้าที่ผ่านการกราฟต์ยังคงมีค่าสูงถึงประมาณ 112 หลังจากการซัก 30 รอบ ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าการกราฟต์  $\text{TiO}_2$  และ TFEM ลงบนพอลิโพรพิลีนสปันบอนด์ โดยการฉายรังสีแกมมานั้นประสบความสำเร็จ และยังสามารถสร้างพอลิโพรพิลีนสปันบอนด์ที่มีสมบัติสะท้อนน้ำ ต่อด้านรังสียูวี และยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย แบบใช้ซ้ำได้อีกด้วย



รูปที่ 4.20 ค่า UPF ต่อรอบของการซัก



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้ ในส่วนแรกได้กราฟต์ไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลต ลงบนพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ เพื่อปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำให้ดียิ่งขึ้น จากผลการศึกษาพบว่า ระดับชั้นของการกราฟต์ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของมอนอเมอร์ที่ใช้ ชนิดของตัวทำละลาย บรรยากาศที่ใช้ และปริมาณรังสี โดยภาวะที่เหมาะสมคือ ความเข้มข้นของมอนอเมอร์ 25 Vol.% ในตัวทำละลาย THF ภายใต้ไนโตรเจนเป็นบรรยากาศ โดยมีปริมาณรังสี 25 kGy จากผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR และ SEM ยืนยันว่าเกิดปฏิกิริยาการกราฟต์ขึ้น นอกจากนี้ผ้าที่ผ่านการกราฟต์ยังมีลักษณะไม่ชอบน้ำสูงโดยมีมุมสัมผัสน้ำเพิ่มขึ้นถึง 125 องศา คิดเป็น 39% เมื่อเปรียบเทียบกับผ้าที่ไม่ผ่านการกราฟต์ และยังแสดงถึงสมบัติการสะท้อนน้ำได้อย่างชัดเจน อีกทั้งยังมีความคงทนต่อการซักถึง 30 รอบ สำหรับผลความสามารถในการซึมผ่านของอากาศมีค่าลดลง 19% และการวัดสีมีค่าความขาวลดลง 6% ซึ่งการลดลงดังกล่าวไม่ได้ส่งผลให้สมบัติของผ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ ผ้าที่ได้ยังมีความสบายในการสวมใส่ และมีลักษณะของสีปรากฏไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

สำหรับงานวิจัยในส่วนที่สองเป็นการกราฟต์ไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลต ร่วมกับอนุภาค  $\text{TiO}_2$  โดยได้ตัดแปรอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ก่อนกราฟต์ จากผลการศึกษาพบว่าสามารถตัดแปรอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ได้สำเร็จโดยยืนยันจากผล FTIR, TGA และ XPS และเมื่อวิเคราะห์จากผล XRD ยังพบว่าการตัดแปรดังกล่าวไม่ส่งผลให้โครงสร้างผลึก และสมบัติสำคัญอื่นของ  $\text{TiO}_2$  เปลี่ยนแปลงไป เมื่อกราฟต์อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ตัดแปรลงบนผ้าแล้วพบว่า ระดับชั้นของการกราฟต์ขึ้นอยู่กับปริมาณของ  $\text{TiO}_2$  ที่ใช้ และ ปริมาณรังสี โดยภาวะที่เหมาะสมคือ ปริมาณของ  $\text{TiO}_2$  ที่ 30 g/L และปริมาณรังสีที่ 25 kGy หลังจากกราฟต์ร่วมกับไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลตโดยใช้ภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองในส่วนแรก พบว่า พอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ที่ผ่านการกราฟต์ แสดงถึงสมบัติในการสะท้อนน้ำ (water repellence) ที่มีมุมสัมผัสน้ำ 122 องศา สมบัติการต้านรังสียูวี (UV resistance) ที่ค่า UPF เท่ากับ 122-124 อีกทั้งยังแสดงสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (antimicrobial activity) ได้ดี สังเกตได้จากบริเวณโซนใส (inhibition zone)

จากผลการศึกษาสมบัติของพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์ที่ผ่านการกราฟต์ด้วยไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลต ร่วมกับอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ดังกล่าว ทำให้ทราบว่าผ้าที่ได้มีความเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์เป็นชุดสิ่งทอเพื่อการป้องกันได้ ไม่ว่าจะเป็นชุดเพื่อการป้องกันด้านการแพทย์ หรือชุดเพื่อการป้องกันกลางแจ้งที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม เป็นต้น



## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรขยายผลการศึกษาต่อในเรื่องของการกราฟต์พอลิเมอไรเซชันโดยใช้รังสีหรือลำแสงชนิดอื่นเพิ่มเติม เช่น ลำแสงอิเล็กตรอน รังสียูวี รังสีเอ็กซ์ เป็นต้น อีกทั้งการกราฟต์พอลิเมอไรเซชันเทียบกับผ้าชนิดอื่น เช่น ผ้าฝ้าย ผ้าไนลอน ผ้าพอลิเอสเตอร์ เป็นต้น ในด้านการทดสอบสมบัติของผ้าควรมีการทดสอบความต้านทานแรงดันทะลุ (bursting strength) เพิ่มเติม นอกจากนี้ อาจทดลองใช้ออนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดอื่น เช่น ซิงค์ออกไซด์ คอปเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น เพื่อเป็นการเปรียบเทียบสมบัติการต้านรังสียูวีและยับยั้งแบคทีเรีย



## บรรณานุกรม

1. Xue, C.-H., et al., *UV-durable superhydrophobic textiles with UV-shielding properties by coating fibers with ZnO/SiO<sub>2</sub> core/shell particles*. *Nanotechnology*, 2011. 22(41): p. 415603.
2. Xie, H., et al. *Weathering-Aging and UV Degradation of Polypropylene Spunbond Nonwovens*. in *Advanced Materials Research*. 2012. Trans Tech Publ.
3. Kansal, H., *Experimental investigation of properties of polypropylene and non-woven spunbond fabric*. *JOSR. J. Polym. Text. Eng.(IOSR-JPTE)*, 2016. 3(5): p. 08-14.
4. Xia, L., P. Xi, and B.W. Cheng. *The influence of acrylic acid irradiation grafting to the hydrophilicity of polypropylene spunbonded nonwovens*. in *Advanced Materials Research*. 2013. Trans Tech Publ.
5. Xue, C.-H., et al., *Fabrication of superhydrophobic cotton fabrics by grafting of POSS-based polymers on fibers*. *Applied Surface Science*, 2019. 465: p. 241-248.
6. Xue, C.-H., et al., *Fabrication of robust and antifouling superhydrophobic surfaces via surface-initiated atom transfer radical polymerization*. *ACS applied materials & interfaces*, 2015. 7(15): p. 8251-8259.
7. Zhang, D., et al., *Preparation and surface properties study of novel fluorine-containing methacrylate polymers for coating*. *Materials*, 2018. 11(11): p. 2258.
8. Lee, S., J.-S. Cho, and G. Cho, *Antimicrobial and blood repellent finishes for cotton and nonwoven fabrics based on chitosan and fluoropolymers*. *Textile Research Journal*, 1999. 69(2): p. 104-112.
9. Montazer, M. and F. Rangchi, *Simultaneous antimicrobial, water and blood repellent finishing of disposal nonwovens using ctab and fluorochemical*. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 2009. 19(2): p. 128-132.
10. Schellenberger, S., et al., *Highly fluorinated chemicals in functional textiles can be replaced by re-evaluating liquid repellency and end-user requirements*. *Journal of cleaner production*, 2019. 217: p. 134-143.
11. Cerkez, I., et al., *Antimicrobial surface coatings for polypropylene nonwoven fabrics*. *Reactive and Functional Polymers*, 2013. 73(11): p. 1412-1419.

12. BUČEK, A., et al., *Acrylic acid plasma treatment of polypropylene nonwoven fabric*. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 2016.
13. Fasce, L.A., et al., *Poly (acrylic acid) surface grafted polypropylene films: Near surface and bulk mechanical response*. 2008.
14. Hu, M.-X., Q. Yang, and Z.-K. Xu, *Enhancing the hydrophilicity of polypropylene microporous membranes by the grafting of 2-hydroxyethyl methacrylate via a synergistic effect of photoinitiators*. *Journal of Membrane Science*, 2006. 285(1-2): p. 196-205.
15. Kavakli, P.A., et al., *Radiation-induced grafting of dimethylaminoethylmethacrylate onto PE/PP nonwoven fabric*. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2007. 265(1): p. 204-207.
16. Madrid, J.F., et al., *RAFT-mediated graft polymerization of glycidyl methacrylate in emulsion from polyethylene/polypropylene initiated with  $\gamma$ -radiation*. *Journal of Applied Polymer Science*, 2017. 134(36): p. 45270.
17. Sehgal, T. and S. Rattan, *Graft-copolymerization of N-vinyl-2-pyrrolidone onto isotactic polypropylene film by gamma radiation using peroxidation method*. 2010.
18. Harish, S., et al., *Controlled structural and compositional characteristic of visible light active ZnO/CuO photocatalyst for the degradation of organic pollutant*. *Applied Surface Science*, 2017. 418: p. 103-112.
19. Lv, D., et al., *Ecofriendly electrospun membranes loaded with visible-light-responding nanoparticles for multifunctional usages: highly efficient air filtration, dye scavenging, and bactericidal activity*. *ACS applied materials & interfaces*, 2019. 11(13): p. 12880-12889.
20. Ouyang, W., et al., *Ultrafine hollow TiO<sub>2</sub> nanofibers from core-shell composite fibers and their photocatalytic properties*. *Composites Communications*, 2018. 9: p. 76-80.
21. Zhou, S., et al., *Facile fabrication of hybrid PA6-decorated TiO<sub>2</sub> fabrics with excellent photocatalytic, anti-bacterial, UV light-shielding, and super hydrophobic properties*. *RSC advances*, 2017. 7(83): p. 52375-52381.

22. Pavasupree, S., S.T. Dubas, and R. Rangkupan, *Surface modification of polypropylene non-woven fibers with TiO<sub>2</sub> nanoparticles via layer-by-layer self assembly method: Preparation and photocatalytic activity*. Journal of Environmental Sciences, 2015. 37: p. 59-66.
23. Zhu, X., et al., *Fabrication of Multifunctional Filters via Online Incorporating Nano-TiO<sub>2</sub> into Spun-Bonded/Melt-Blown Nonwovens for Air Filtration and Toluene Degradation*. Macromolecular Materials and Engineering, 2019. 304(12): p. 1900350.
24. Abidi, N., L. Cabrales, and E. Hequet, *Functionalization of a cotton fabric surface with titania nanosols: applications for self-cleaning and UV-protection properties*. ACS applied materials & interfaces, 2009. 1(10): p. 2141-2146.
25. Jiang, X., et al., *Cotton fabric coated with nano TiO<sub>2</sub>-acrylate copolymer for photocatalytic self-cleaning by in-situ suspension polymerization*. Applied Surface Science, 2011. 257(20): p. 8451-8456.
26. Lee, J.A., et al., *Highly reactive multilayer-assembled TiO<sub>2</sub> coating on electrospun polymer nanofibers*. Advanced Materials, 2009. 21(12): p. 1252-1256.
27. Montazer, M., E. Pakdel, and A. Behzadnia, *Novel feature of nano-titanium dioxide on textiles: Antifeltting and antibacterial wool*. Journal of Applied Polymer Science, 2011. 121(6): p. 3407-3413.
28. Yu, M., et al., *Laundry durability of photocatalyzed self-cleaning cotton fabric with TiO<sub>2</sub> nanoparticles covalently immobilized*. ACS applied materials & interfaces, 2013. 5(9): p. 3697-3703.
29. Beamsmile. รังสีแกมมา (*gamma ray*). 2561 [cited 2564 30 April]; Available from: <http://gammaraysatitpm.blogspot.com/2018/08/gamma-ray.html>
30. สิริวรรณ พงษ์สถิตย์, การศึกษาการกราฟต์มาเลอิก แอนไฮโดรด์บนยางธรรมชาติโดยการฉายรังสีแกมมา. 2558, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
31. Erdogan, S. *Gamma Rays: Helper or Hazard?* 2019 [cited 2021 30 April]; Available from: <https://letstalkscience.ca/educational-resources/stem-in-context/gamma-rays-helper-or-hazard>.

32. อูรารักษ์ จันทะวงษ์, การสังเคราะห์และการพิสูจน์เอกลักษณ์พอลิเมอร์ดูดซึมมากจากการกราฟต์พอลิอะคริลาไมด์ลงบนคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสโดยการฉายรังสีแกมมาเพื่อควบคุมการปลดปล่อยเคมีเกษตร. 2554, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
33. ฉัตริยะ ศรีปี, การกราฟต์เส้นใยไหมด้วยเมทิลเมทาครีเลตโดยฉายรังสีแกมมาพร้อมกับอะครีเลตโมโนเมอร์บางชนิด. 2547, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
34. Nave, C.R. *Cobalt-60*. 2000 [cited 2021 01 May]; Available from: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Nuclear/betaex.html>.
35. วิจิต เกษคุปต์, รังสี, in สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯ เล่มที่ 38. 2556.
36. สุรศักดิ์ พงศ์พันธุ์สุข. มาตรการวัดเกี่ยวกับผลทางชีวภาพของการรับรังสี. 2554 [cited 2564 01 May]; Available from: <http://www0.tint.or.th/nkc/nkc55/content55/nstkc55-012.html>.
37. เกศินี เหมวิเชียร และ พริยชาติ สุวรรณมาลา. การปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ด้วยรังสี. [cited 2564 01 May]; Available from: <http://www0.tint.or.th/nkc/nkc5003/nkc5003f.html>.
38. อนูรัตน์ โพธิ์หล้า, การเตรียมวัสดุดูดซับน้ำ โดยการกราฟต์ฟางข้าวด้วยกรดอะคริลิกโดยการฉายรังสีแกมมา. 2553, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
39. Shiraishi, N., J. Williams, and V. Stannett, *The radiation grafting of vinyl monomers to cotton fabrics—I Methacrylic acid to terry cloth towelling*. Radiation Physics and Chemistry (1977), 1982. 19(1): p. 73-78.
40. ศรุต อำนวยโยธิน, พอลิเมอร์และการประยุกต์. พิมพ์ครั้งที่ 1 ed. 2558, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
41. Bishop, M. *Addition (Chain-Growth) Polymers*. 2013 [cited 2021 03/05]; Available from: [http://preparatorychemistry.com/Bishop\\_Addition\\_Polymers.htm](http://preparatorychemistry.com/Bishop_Addition_Polymers.htm).
42. แคทลียา ปัทมพรหม, พอลิเมอร์พื้นฐานสำหรับวิศวกรเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 1 ed. 2557, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
43. Odian, G., *Principles of polymerization*. 2004: John Wiley & Sons.
44. Ashfaq, A., et al., *Polymerization Reactions and Modifications of Polymers by Ionizing Radiation*. Polymers, 2020. 12(12): p. 2877.
45. จุริรัตน์ ประสาร, นอนวูพเวณ: ผ้าไม่ถักไม่ทอ, in *Textile Tomorrow*. 2552, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
46. Lim, H., *A review of spunbond process*. Journal of Textile and Apparel, Technology and Management, 2010. 6(3).

47. Ghafoor, B., et al., *Synthesis of cation exchange membrane from polypropylene fabric using simultaneous radiation grafting*. Journal of Space Technology, 2017. 7(1): p. 20-25.
48. Hegazy, D.E.-S., *Selectivity of acrylic acid radiation grafted non-woven polypropylene sheets towards some heavy metals ions*. Open Journal of Polymer Chemistry, 2012. 2(1): p. 6.
49. Liu, X., et al., *Grafting modification of ramie fibers with poly (2, 2, 2-trifluoroethyl methacrylate) via reversible addition-fragmentation chain transfer (RAFT) polymerization in supercritical carbon dioxide*. Reactive and Functional Polymers, 2010. 70(12): p. 972-979.
50. Maabong, K., et al., *Natural pigments as photosensitizers for dye-sensitized solar cells with TiO<sub>2</sub> thin films*. International Journal of Renewable Energy Research (IJRER), 2015. 5(2): p. 501-506.
51. Yadav, A., et al., *Functional finishing in cotton fabrics using zinc oxide nanoparticles*. Bulletin of materials Science, 2006. 29(6): p. 641-645.
52. หทัยทิพย์ พันธุ์ชิตดา, การสังเคราะห์ท่อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนเพื่อฆ่าเชื้อราที่ทำให้เกิดโรคใบร่วงของต้นยางพารา. 2556, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
53. Li, M., et al., *Study on anti-fungal activity of nitrogen-doped TiO<sub>2</sub> nanophotocatalyst under visible light irradiation*. Chinese Chemical Letters, 2010. 21(1): p. 117-121.
54. Kolmas, J., E. Groszyk, and D. Kwiatkowska-Różycka, *Substituted hydroxyapatites with antibacterial properties*. BioMed research international, 2014. 2014.
55. Del Castillo, P.C.H., S.R. Manuel, and F. Ruiz, *An Easy and Efficient Method to Functionalize Titanium Dioxide Nanoparticles with Maleic Anhydride*. 2014.
56. Cai, H., et al., *Synthesis and characterization of thermo-and pH-sensitive hydrogels based on Chitosan-grafted N-isopropylacrylamide via  $\gamma$ -radiation*. Radiation Physics and Chemistry, 2005. 74(1): p. 26-30.
57. Ibrahim, N.A., et al., *Graft copolymerization of methyl methacrylate onto oil palm empty fruit bunch fiber using H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Fe<sup>2+</sup> as an initiator*. Journal of applied polymer science, 2003. 89(8): p. 2233-2238.

58. Haji Musa, A., et al., *Analysis and comparison of thickness and bending measurements from fabric Touch tester (FTT) and standard methods*. Autex research journal, 2018. 18(1): p. 51-60.
59. Grifoni, D., et al., *Laboratory and outdoor assessment of UV protection offered by flax and hemp fabrics dyed with natural dyes*. Photochemistry and Photobiology, 2009. 85(1): p. 313-320.
60. Badr, A.A., *Anti-microbial and durability characteristics of socks made of cotton and regenerated cellulosic fibers*. Alexandria engineering journal, 2018. 57(4): p. 3367-3373.
61. Pengfei, L., Z. Maolin, and W. Jilan, *Study on radiation-induced grafting of styrene onto chitin and chitosan*. Radiation Physics and Chemistry, 2001. 61(2): p. 149-153.
62. Singh, V., P. Kumar, and R. Sanghi, *Use of microwave irradiation in the grafting modification of the polysaccharides—A review*. Progress in polymer science, 2012. 37(2): p. 340-364.
63. Rath, S., et al., *Effect of solvents in radiation-induced grafting of 4-vinyl pyridine onto fluorinated ethylene propylene copolymer*. Journal of applied polymer science, 2008. 108(6): p. 4065-4071.
64. Cai, R., et al., *Radiation induced graft polymerization of a fluorinated acrylate onto fabric*. Radiation Physics and Chemistry, 2012. 81(9): p. 1354-1356.
65. Hernández-Aguirre, O.A., et al., *Surface modification of polypropylene membrane using biopolymers with potential applications for metal ion removal*. Journal of Chemistry, 2016. 2016.
66. Xu, A.-h., et al., *Preparation and surface properties of poly (2, 2, 2-trifluoroethyl methacrylate) coatings modified with methyl acrylate*. Journal of Coatings Technology and Research, 2016. 13(5): p. 795-804.
67. Hinchiranan, N., et al., *2, 2, 2-Trifluoroethyl methacrylate-graft-natural rubber: Synthesis and application as compatibilizer in natural rubber/fluoroelastomer blends*. Materials Chemistry and Physics, 2013. 139(2-3): p. 689-698.
68. Zhang, S., et al., *Synthesis, characterization and properties of a novel fluorinated methacrylate polymer*. Journal of Fluorine Chemistry, 2011. 132(11): p. 915-919.

69. Ting, T.M. and M.M. Nasef, *Modification of polyethylene-polypropylene fibers by emulsion and solvent radiation grafting systems for boron removal*. *Fibers and Polymers*, 2017. 18(6): p. 1048-1055.
70. Javid, A., et al., *Engineering of surface properties of polypropylene nonwovens through oxygen plasma for enhanced color yield of pigment prints*. *Pigment & Resin Technology*, 2019.
71. Li, C., Z. Li, and X. Ren, *Preparation and characterization of polyester fabrics coated with TiO<sub>2</sub>/Benzotriazole for UV protection*. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2019. 577: p. 695-701.
72. Abiona, A.A. and A.G. Osinkolu, *Gamma-irradiation induced property modification of polypropylene*. *International Journal of Physical Sciences*, 2010. 5(7): p. 960-967.
73. Keraité, G., B. Sivakova, and J. Kiuberis, *Investigation of the impact of organic and inorganic halides on the ageing stability of paper with iron gall ink*. *chemija*, 2017. 28(3): p. 137-147.
74. Deng, B., et al., *Laundering durability of superhydrophobic cotton fabric*. *Advanced Materials*, 2010. 22(48): p. 5473-5477.
75. Natarajan, K., et al., *Rutile phase dominant TiO<sub>2</sub> formed by thermal treatment and its high photocatalytic activity under narrow spectrum ultraviolet light emitting diodes*. *Materials Research Express*, 2018. 6(1): p. 015049.
76. Xiang, B., G. Jiang, and J. Zhang, *Surface modification of TiO<sub>2</sub> nanoparticles with silane coupling agent for nanocomposite with poly (butyl acrylate)*. *Plastics, Rubber and Composites*, 2015. 44(4): p. 148-154.
77. Zhu, M., et al., *Enhanced photovoltaic performance of dye-sensitized solar cells (DSSCs) using graphdiyne-doped TiO<sub>2</sub> photoanode*. *Journal of Materials Science*, 2019. 54(6): p. 4893-4904.
78. Koking, P., O. Thumthan, and S. Noothongkaew. *Effect of DI Water Content on the Growth of Anatase TiO<sub>2</sub> Nanotubes Synthesized by Anodization Process*. in *Key Engineering Materials*. 2018. Trans Tech Publ.



79. Xiao, S., et al., *Layer-by-layer assembly of polyelectrolyte multilayer onto PET fabric for highly tunable dyeing with water soluble dyestuffs*. *Polymers*, 2017. 9(12): p. 735.
80. Wu, W., et al., *Preparation and photocatalytic activity analysis of nanometer TiO<sub>2</sub> modified by surfactant*. *Nanomaterials and Nanotechnology*, 2018. 8: p. 1847980418781973.
81. Zhi, L., et al., *Surface modification of the TiO<sub>2</sub> particles induced by  $\gamma$  irradiation*. *Nuclear Science and Techniques* 2014. 24(S1): p. 10305-S010305.
82. Azami, M., et al., *N-doped TiO<sub>2</sub> synthesised via microwave induced photocatalytic on RR4 dye removal under LED light irradiation*. *Sains Malays*, 2017. 46(8): p. 1309-1316.
83. Johansson, E., et al., *Comparing surface binding of the maleic anhydride anchor group on single crystalline anatase TiO<sub>2</sub> (101),(100), and (001) surfaces*. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2010. 114(35): p. 15015-15020.
84. Patterson, A., *The Scherrer formula for X-ray particle size determination*. *Physical review*, 1939. 56(10): p. 978.
85. Martins, N.C., et al., *N-doped carbon quantum dots/TiO<sub>2</sub> composite with improved photocatalytic activity*. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2016. 193: p. 67-74.
86. Subramanian, A. and H.-W. Wang, *Effect of hydroxyl group attachment on TiO<sub>2</sub> films for dye-sensitized solar cells*. *Applied surface science*, 2012. 258(20): p. 7833-7838.
87. Zapata-Tello, D., et al., *Chemical modification of titanium dioxide nanoparticles with dicarboxylic acids to mediate the UV degradation in polyethylene films*. *Polymer Bulletin*, 2020. 77(12): p. 6409-6431.
88. Wei, Q., et al., *Characterization of nonwoven material functionalized by sputter coating of copper*. *Surface and Coatings Technology*, 2008. 202(12): p. 2535-2539.
89. Kadoma, Y., *Kinetic polymerization behavior of fluorinated monomers for dental use*. *Dental materials journal*, 2010: p. 1008310072-1008310072.
90. Keene, B., et al., *Characterization of degradation of polypropylene nonwovens irradiated by  $\gamma$ -ray*. *Journal of Applied Polymer Science*, 2014. 131(4).

91. Hassan, M.M. and J.R. McLaughlin, *Multi-functional wool fabrics by graft-copolymerisation with polystyrene sulphonate: their enhanced fire retardancy, mechanical properties, and stain-resistance*. *New Journal of Chemistry*, 2018. 42(23): p. 18919-18927.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## ภาคผนวก ก

## การกราฟต์ไทรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลต บนพอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์

ตารางที่ ก-1 ระดับชั้นของการกราฟต์ (degree of grafting) ที่ความเข้มข้นมอนอเมอร์ สารละลาย และบรรยากาศที่แตกต่างกัน ณ ปริมาณรังสี 25 kGy

ความเข้มข้นของ มอนอเมอร์ (Vol.%)	ระดับชั้นของการกราฟต์ (%)				
	สารละลาย DMSO		สารละลาย THF		
	in O <sub>2</sub>	in N <sub>2</sub>	in O <sub>2</sub>	in N <sub>2</sub>	
10	6.965	19.672	12.987	31.847	
	7.764	23.930	15.540	34.454	
	7.668	18.609	12.109	35.463	
	ค่าเฉลี่ย	7.466	20.737	13.545	33.921
	SD	0.436	2.816	1.782	1.866
15	17.453	38.657	23.543	57.937	
	19.363	40.664	25.570	56.344	
	18.545	41.387	27.073	54.334	
	ค่าเฉลี่ย	18.454	40.236	25.395	56.205
	SD	0.958	1.414	1.771	1.805
20	37.726	79.643	47.453	100.453	
	35.345	80.354	48.560	99.970	
	37.744	82.706	49.123	101.359	
	ค่าเฉลี่ย	36.939	80.901	48.379	100.594
	SD	1.380	1.603	0.849	0.705
25	65.332	107.353	81.364	123.860	
	66.453	105.363	79.453	126.453	
	65.434	110.633	81.505	125.935	
	ค่าเฉลี่ย	65.740	107.783	80.774	125.416
	SD	0.620	2.661	1.146	1.372
30	59.032	89.353	65.343	104.450	
	58.220	86.834	64.873	106.440	
	57.546	86.744	65.815	104.123	
	ค่าเฉลี่ย	58.266	87.644	65.344	105.004
	SD	0.744	1.481	0.471	1.254

ตารางที่ ก-2 ระดับขึ้นของการกราฟต์ (degree of grafting) ที่ปริมาณรังสีต่าง ๆ ณ 25 Vol.% ของ ความเข้มข้นของมอนอเมอร์ในสารละลาย THF ที่บรรยากาศไนโตรเจน

ปริมาณรังสี (kGy)	ระดับขึ้นของการกราฟต์ (%)
10	75.374
	77.453
	76.025
	ค่าเฉลี่ย
SD	1.063
15	82.984
	84.356
	86.262
	ค่าเฉลี่ย
SD	1.646
20	106.734
	109.540
	108.533
	ค่าเฉลี่ย
SD	1.422
25	126.432
	125.323
	124.493
	ค่าเฉลี่ย
SD	0.973
30	118.435
	119.034
	121.488
	ค่าเฉลี่ย
SD	1.618

ตารางที่ ก-3 ค่าความยาวดัดโค้งของผ้า (bending length)

ทดสอบ ครั้งที่	ความเข้มข้นของมอนอเมอร์ (Vol.%)					
	0	10	15	20	25	30
1	4.1	4.18	4.2	4.21	4.3	4.25
2	4.15	4.17	4.19	4.23	4.28	4.22
3	4.15	4.2	4.18	4.21	4.25	4.24
ค่าเฉลี่ย	4.13	4.18	4.19	4.22	4.28	4.24
SD	0.03	0.02	0.01	0.01	0.03	0.02

ตารางที่ ก-4 ค่าความแข็งแรงดัดโค้ง (flexural rigidity)

ตัวอย่าง	ความยาวดัดโค้งเฉลี่ย (cm)	ความแข็งแรงดัดโค้ง (g-cm)	ความแข็งแรงดัดโค้ง (mg-cm)
PP spunbond	4.13	0.035222499	35.22
PP spunbond-g-10%TFEM	4.23	0.037843484	37.84
PP spunbond-g-15%TFEM	4.27	0.038927242	38.93
PP spunbond-g-20%TFEM	4.31	0.040031496	40.03
PP spunbond-g-25%TFEM	4.36	0.041440928	41.44
PP spunbond-g-30%TFEM	4.30	0.0397535	39.75

ตารางที่ ๓-5 ค่าดัชนีความขาว (whiteness index) และความต่างของสี (color difference;  $\Delta E$ )

ตัวอย่าง	ดัชนีความขาว (%)	ความต่างของสี
PP spunbond	69.34	-
PP spunbond-g-10%TFEM	64.56	0.89
PP spunbond-g-15%TFEM	64.97	0.9
PP spunbond-g-20%TFEM	65.11	0.92
PP spunbond-g-25%TFEM	65.36	0.95
PP spunbond-g-30%TFEM	65.76	0.96

ตารางที่ ๓-6 ค่ามุมสัมผัสของน้ำ (water contact angle) ของตัวอย่างที่ความเข้มข้นมอนอเมอร์ สารละลาย และบรรยากาศที่แตกต่างกัน ณ ปริมาณรังสี 25 kGy

ตัวอย่าง	มุมสัมผัสของน้ำ (องศา)			
	DMSO		THF	
	in O <sub>2</sub>	in N <sub>2</sub>	in O <sub>2</sub>	in N <sub>2</sub>
PP spunbond-g-10%TFEM	95.47	97.43	98.43	101.39
	96.67	99.21	99.11	100.22
	97.49	99.16	101.08	102.52
	ค่าเฉลี่ย	96.54	98.60	99.54
SD	1.01	1.01	1.38	1.15
PP spunbond-g-15%TFEM	103.54	107.36	108.43	111.39
	104.36	109.43	109.12	112.40
	105.16	111.35	111.41	113.49
	ค่าเฉลี่ย	104.35	109.38	109.65
SD	0.81	1.99	1.56	1.05
PP spunbond-g-20%TFEM	108.43	113.82	115.04	120.86
	107.43	112.94	114.86	121.45
	109.53	115.75	116.40	119.83
	ค่าเฉลี่ย	108.46	114.17	115.43
SD	1.05	1.44	0.84	0.82

ตัวอย่าง	มุมสัมผัสของน้ำ (องศา)			
	DMSO		THF	
	in O <sub>2</sub>	in N <sub>2</sub>	in O <sub>2</sub>	in N <sub>2</sub>
PP spunbond-g-25%TFEM	113.55	120.43	121.95	124.45
	114.55	118.98	120.04	125.98
	115.53	121.45	122.34	124.53
	ค่าเฉลี่ย	114.54	120.29	121.45
	SD	0.99	1.24	1.23
PP spunbond-g-30%TFEM	110.43	113.75	116.49	117.65
	109.99	114.33	114.84	118.55
	110.43	116.50	114.37	120.08
	ค่าเฉลี่ย	110.29	114.86	115.23
	SD	0.26	1.45	1.12

ตารางที่ ก-7 ค่ามุมสัมผัสของน้ำ (water contact angle) ของตัวอย่างที่ปริมาณรังสีต่าง ๆ ณ 25 Vol.% ของ ความเข้มข้นของมอนอเมอร์ในสารละลาย THF ที่บรรยากาศไนโตรเจน

ปริมาณรังสี (kGy)	มุมสัมผัสของน้ำ (องศา)	
0	91.37	
	90.11	
	92.24	
	ค่าเฉลี่ย	91.24
	SD	1.07
10	101.63	
	100.54	
	101.96	
	ค่าเฉลี่ย	101.38
	SD	0.75



ปริมาณรังสี (kGy)	มุมสัมผัสของน้ำ (องศา)
15	109.11
	108.94
	109.98
	ค่าเฉลี่ย 109.34
	SD 0.56
20	115.32
	116.43
	117.34
	ค่าเฉลี่ย 116.36
	SD 1.01
25	124.53
	125.01
	125.42
	ค่าเฉลี่ย 124.99
	SD 0.44
30	118.44
	119.03
	121.67
	ค่าเฉลี่ย 119.71
	SD 1.72

ตารางที่ ก-8 ค่ามุมสัมผัสของน้ำเทียบกับระยะเวลา

Contact time (s)	มุมสัมผัสของน้ำ (องศา)					
	PP spunbond	PP-g-10%TFEM	PP-g-15%TFEM	PP-g-20%TFEM	PP-g-25%TFEM	PP-g-30%TFEM
0	90.52	101.33	112.33	120.43	124.98	118.66
	91.93	101.92	112.21	120.84	124.78	118.98
	92.16	100.88	112.73	120.87	124.91	118.64
ค่าเฉลี่ย	91.54	101.38	112.43	120.71	124.89	118.76
SD	0.89	0.52	0.27	0.24	0.10	0.19

Contact time (s)	มุมสัมผัสของน้ำ (องศา)						
	PP spunbond	PP-g-10%TFEM	PP-g-15%TFEM	PP-g-20%TFEM	PP-g-25%TFEM	PP-g-30%TFEM	
10	90.32	101.21	112.76	120.38	125.11	118.55	
	89.66	101.65	112.80	120.87	124.67	119.02	
	90.72	100.78	111.72	120.89	124.89	118.70	
	ค่าเฉลี่ย	90.23	101.21	112.43	120.71	124.89	118.76
	SD	0.53	0.44	0.61	0.29	0.22	0.24
25	90.12	101.01	112.47	120.13	125.12	118.49	
	89.99	101.24	112.54	120.45	124.76	119.02	
	90.25	100.81	112.26	121.56	124.79	118.76	
	ค่าเฉลี่ย	90.12	101.02	112.43	120.71	124.89	118.76
	SD	0.13	0.22	0.15	0.75	0.20	0.27
40	89.43	100.66	111.94	120.55	124.89	118.43	
	89.32	100.45	111.67	120.11	124.76	119.01	
	88.34	100.53	112.29	120.70	124.51	118.34	
	ค่าเฉลี่ย	89.03	100.55	111.97	120.45	124.72	118.59
	SD	0.60	0.11	0.31	0.30	0.19	0.36
60	88.55	100.55	111.65	119.46	124.10	118.36	
	88.12	100.34	111.84	119.89	125.10	118.95	
	88.36	99.81	112.12	120.62	124.16	118.36	
	ค่าเฉลี่ย	88.34	100.23	111.87	119.99	124.45	118.56
	SD	0.22	0.38	0.24	0.58	0.56	0.34
120	85.34	100.33	111.54	119.74	123.87	117.65	
	85.76	100.14	111.43	119.98	123.66	117.87	
	85.80	99.83	111.66	119.97	124.41	118.41	
	ค่าเฉลี่ย	85.64	100.10	111.54	119.89	123.98	117.98
	SD	0.25	0.25	0.12	0.14	0.39	0.39
180	85.83	100.11	111.42	119.88	123.78	117.84	
	85.34	100.12	111.20	119.83	123.77	117.74	
	84.30	100.13	110.99	119.95	124.06	117.63	
	ค่าเฉลี่ย	85.16	100.12	111.20	119.89	123.87	117.74
	SD	0.78	0.01	0.22	0.06	0.16	0.10

Contact time (s)	มูมสัมผัสของน้ำ (องศา)						
	PP spunbond	PP-g-10%TFEM	PP-g-15%TFEM	PP-g-20%TFEM	PP-g-25%TFEM	PP-g-30%TFEM	
240	84.63	99.44	110.46	119.83	123.77	117.60	
	84.33	99.67	111.07	119.56	123.67	117.46	
	84.00	99.84	111.36	120.21	123.75	117.91	
	ค่าเฉลี่ย	84.32	99.65	110.97	119.87	123.73	117.66
	SD	0.32	0.20	0.46	0.33	0.05	0.23
300	82.35	99.32	110.85	119.87	123.58	117.45	
	82.44	99.41	110.38	119.34	123.55	117.66	
	82.18	99.57	110.68	119.46	123.52	117.19	
	ค่าเฉลี่ย	82.32	99.43	110.64	119.56	123.55	117.43
	SD	0.14	0.13	0.23	0.28	0.03	0.24

ตารางที่ ก-9 ค่ามูมสัมผัสของน้ำหลังจากทำการซัก

Washing cycle	มูมสัมผัสของน้ำ (องศา)		
	ซักด้วยผงซักฟอก	ซักด้วยเอทานอล	
0	124.76	124.55	
	124.98	124.24	
	124.93	124.53	
	ค่าเฉลี่ย	124.89	124.44
	SD	0.12	0.17
5	123.54	123.45	
	123.45	123.11	
	123.12	122.50	
	ค่าเฉลี่ย	123.37	123.02
	SD	0.22	0.48

Washing cycle	มุมสัมผัสของน้ำ (องศา)	
	ซักด้วยผงซักฟอก	ซักด้วยเอทานอล
10  ค่าเฉลี่ย SD	122.76	122.78
	122.79	122.22
	123.06	122.50
	122.87	122.50
SD	0.17	0.28
15  ค่าเฉลี่ย SD	122.87	121.97
	122.27	121.44
	123.02	122.44
	122.72	121.95
SD	0.40	0.50
20  ค่าเฉลี่ย SD	121.54	120.88
	121.34	120.77
	120.90	120.69
	121.26	120.78
SD	0.33	0.10
25  ค่าเฉลี่ย SD	120.09	120.33
	120.44	120.22
	119.56	120.65
	120.03	120.40
SD	0.44	0.22
30  ค่าเฉลี่ย SD	119.32	119.43
	119.54	119.34
	119.43	121.17
	119.43	119.98
SD	0.11	1.03

## ภาคผนวก ข

การกราฟต์อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ และไตรฟลูออโรเอทิลเมทาคริเลต บน  
พอลิโพรพิลีนสปีนบอนด์

ตารางที่ ข-1 ระดับขั้นของการกราฟต์ (degree of grafting) ที่ปริมาณของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ที่แตกต่างกัน ณ ปริมาณรังสี 25 kGy

ปริมาณ $\text{TiO}_2$ (g/L)	ระดับขั้นของการกราฟต์ (%)		
	$\text{TiO}_2/\text{MAH}$ 1:1	$\text{TiO}_2/\text{MAH}$ 1:1.5	$\text{TiO}_2/\text{MAH}$ 1:2
10	2.220	2.387	2.34
	2.227	2.376	2.434
	2.191	2.417	2.281
ค่าเฉลี่ย	2.213	2.394	2.35176
SD	0.019	0.021	0.077
20	2.610	2.887	2.66
	2.609	2.900	2.78
	2.609	2.886	2.954
ค่าเฉลี่ย	2.609	2.891	2.798
SD	0.001	0.008	0.148
30	3.010	3.450	3.32
	3.004	3.330	3.33
	2.993	3.485	3.457
ค่าเฉลี่ย	3.002	3.422	3.369
SD	0.009	0.081	0.076
40	3.026	3.470	3.33
	3.027	3.360	3.3
	3.034	3.409	3.420
ค่าเฉลี่ย	3.029	3.413	3.35004
SD	0.005	0.055	0.063
50	3.010	3.410	3.365
	3.002	3.390	3.44
	2.998	3.413	3.225
ค่าเฉลี่ย	3.003	3.404	3.34343
SD	0.006	0.012	0.109

ตารางที่ ข-2 ค่ามุมสัมผัสของน้ำ (water contact angle)

ตัวอย่าง	มุมสัมผัสของน้ำ (องศา)	
PP spunbond	90.11	
	89.43	
	89.80	
	ค่าเฉลี่ย	89.78
	SD	0.34
PP spunbond-g-TiO <sub>2</sub>	84.65	
	85.01	
	85.85	
	ค่าเฉลี่ย	85.17
	SD	0.62
PP spunbond-g-TFEM	124.11	
	124.22	
	124.66	
	ค่าเฉลี่ย	124.33
	SD	0.29
PP spunbond-g-TiO <sub>2</sub> /TFEM	119.65	
	120.34	
	121.06	
	ค่าเฉลี่ย	120.35
	SD	0.71

ตารางที่ 3-3 ค่าสมบัติเชิงกลโดยวิเคราะห์ที่ความทนต่อแรงดึง

ตัวอย่าง	Elongation (%)	Breaking force (N)
PP spunbond	120.43	17.54
	117.44	16.98
	121.62	17.67
	122.44	16.23
	97.22	19.43
ค่าเฉลี่ย	115.83	17.57
SD	10.58	1.18
Irradiated PP spunbond	90.43	10.45
	89.42	10.99
	85.55	11.02
	79.44	11.89
	82.06	10.01
ค่าเฉลี่ย	85.38	10.87
SD	4.70	0.71
PP spunbond-g-TiO <sub>2</sub>	94.43	11.74
	91.11	11.34
	83.33	10.60
	81.43	10.23
	81.12	12.10
ค่าเฉลี่ย	86.29	11.20
SD	6.10	0.78
PP spunbond-g-TFEM	77.69	13.56
	78.43	13.91
	72.82	13.98
	79.32	13.14
	66.74	15.15
ค่าเฉลี่ย	75.00	13.95
SD	5.26	0.75

ตัวอย่าง	Elongation (%)	Breaking force (N)
PP spunbond-g-TiO <sub>2</sub> /TFEM	65.13	13.95
	71.44	13.98
	69.33	13.50
	64.32	13.71
	74.16	12.07
ค่าเฉลี่ย	68.88	13.44
SD	4.17	0.79

ตารางที่ ข-4 ค่าโซนใส (inhibition zone) ที่เกิดขึ้นบริเวณพอลิโพรพิลีนสปันบอนด์

ตัวอย่าง	Inhibition zone (mm)
PP spunbond	0.00
	0.00
	0.00
	0.00
	0.00
ค่าเฉลี่ย	0.00
SD	0.00
PP spunbond-g-TiO <sub>2</sub>	6.55
	6.75
	5.75
	6.35
	0.53
ค่าเฉลี่ย	6.35
SD	0.53
PP spunbond-g-TFEM	0.00
	0.00
	0.00
	0.00
	0.00
ค่าเฉลี่ย	0.00
SD	0.00
PP spunbond-g-TiO <sub>2</sub> /TFEM	6.98
	7.35
	7.27
	7.20
	0.19
ค่าเฉลี่ย	7.20
SD	0.19



ตารางที่ ข-5 ค่า UPF ต่อรอบของการซัก

Washing cycle	ค่า UPF	
	ซักด้วยผงซักฟอก	ซักด้วยเอทานอล
0	123.00	
	124.00	
ค่าเฉลี่ย	119.00	
SD	122.00	
	2.65	
10	118.00	119.00
	120.00	118.00
	121.00	117.00
ค่าเฉลี่ย	119.00	118.00
SD	1.53	1.00
20	117.00	115.00
	115.00	113.00
	113.00	114.00
ค่าเฉลี่ย	115.00	114.00
SD	2.00	1.00
30	110.00	110.00
	112.00	111.00
	108.00	112.00
ค่าเฉลี่ย	110.00	111.00
SD	2.00	1.00

ภาคผนวก ค  
งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

Surfaces and Interfaces 24 (2021) 101125

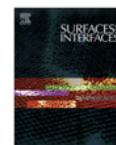


ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Surfaces and Interfaces

journal homepage: [www.sciencedirect.com/journal/surfaces-and-interfaces](http://www.sciencedirect.com/journal/surfaces-and-interfaces)



Radiation induced graft polymerization of fluorinated methacrylate onto polypropylene spunbond nonwoven fabric.

K. Thinkohkaew<sup>a,\*</sup>, T. Piroonpan<sup>b,c</sup>, N. Jiraborvornpongsa<sup>d</sup>, P. Potiyaraj<sup>c,e</sup>

<sup>a</sup> Multidisciplinary Program in Petrochemistry and Polymer Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

<sup>b</sup> Center of Radiation Processing for Polymer Modification and Nanotechnology, Department of Materials Science, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10990, Thailand

<sup>c</sup> Department of Materials Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

<sup>d</sup> Metallurgy and Materials Science Research Institute, Chulalongkorn University, Soi Chula 12, Phayathai Road, Patumwan, Bangkok 10330, Thailand

<sup>e</sup> Center of Excellence on Petrochemical and Materials Technology, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

ARTICLE INFO

Keywords:

Polypropylene spunbond  
Graft-polymerization  
Gamma irradiation  
Highly hydrophobic.

ABSTRACT

Radiation-induced grafting technique is one of the most promising methods to improve functional properties of textile materials. This work reports the grafting of 2,2,2-trifluoroethyl methacrylate (TFEM) onto polypropylene (PP) spunbond nonwoven fabric via gamma irradiation to improve its hydrophobicity. The effects of monomer concentration, solvent type, atmospheric condition, and irradiation dose on the degree of grafting were investigated. As characterized by SEM, FTIR, and NMR, the appearance and chemical characteristic of grafted fabric were completely altered compared to the original fabric. The grafted fabrics illustrated impressively high water contact angle of 125 degree. Moreover, the grafted fabrics maintained great hydrophobicity after the tests of chemical, thermal, UV, mechanical, and washing durability. These results suggested that grafting of 2,2,2-trifluoroethyl methacrylate onto PP spunbond offered a potential method to generate reusable hydrophobic fabrics.

1. Introduction

In recent years, the development of textile materials with a highly hydrophobic property has been the focus of researchers to find applications as water resistant apparel and would generally be useful in many areas such as in technical, industrial, medical, as well as for everyday life uses [1-2]. In the field of textile materials, nonwoven fabrics have attracted great attention for those development due to their quite good properties and widely used in both advanced applications and daily necessities [3]. One of the most well-known nonwoven fabrics is polypropylene (PP) spunbond. The use of PP spunbond offers many advantages, such as low cost, simple processes, high mechanical properties, lightweight, warmth, nice air permeability, and low moisture regains [4-5]. However, PP spunbond fabric has low hydrophobicity, which provides poor water resistance and water repellent property, as reported by Montazer and Rangchi [6]. It is thus usually unsatisfactory to use PP spunbond as water resistant apparel. Consequently, surface modifications of PP spunbond were used to address this issue. In this context, several methods have been conducted, such as coating [7], plasma treatment [8], and radiation-induced grafting. Among these techniques,

radiation-induced grafting was often used due to its ease and high efficiency while the harmful chemicals can be avoided. This technique hence becomes the focus of the present research works [9-13].

Radiation-induced grafting has been considered as an effective way for the surface modification of textile materials. It appears as an economical and environmentally clean technique to impart a variety of functional groups to a polymer without the use of initiators or catalysts harmful to human skin [14-15]. From the fundamental point of view, graft polymerization can be initiated by using gamma rays, electron beams, ultraviolet (UV), and plasma treatment. Among the different radiochemical methods, gamma irradiation is one of the most convenient and effective methods, because it is easy to create a radical site [16].

In this research, we interests in grafting of 2,2,2-Trifluoroethyl methacrylate (TFEM) onto PP spunbond due to its excellent water and oil repellency, chemical resistance, as well as weatherability [17]. These outstanding properties can further improve the hydrophobicity of PP spunbond for potentially use in reusable water resistant apparel such as face masks, medical gown, and outdoor protective clothing. Therefore, the main objective of this research is to improve hydrophobicity of PP

\* Corresponding Author.

E-mail address: [Korlid.tkk@gmail.com](mailto:Korlid.tkk@gmail.com) (K. Thinkohkaew).

<https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.101125>

Received 13 January 2021; Received in revised form 30 March 2021; Accepted 1 April 2021  
2468-0230/© 2021 Elsevier B.V. All rights reserved.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายคอลิต ถิ่นเกาะแก้ว
วัน เดือน ปี เกิด	02 กุมภาพันธ์ 2540
สถานที่เกิด	ภูเก็ต
ที่อยู่ปัจจุบัน	1 หมู่ 5 ถ.เทพกระษัตรี ต.เกาะแก้ว อ.เมือง จ.ภูเก็ต 83000
ผลงานตีพิมพ์	Thinkohkaew, K., Rodthongkum, N., & Ummartyotin, S. (2020). Coconut husk ( <i>Cocos nucifera</i> ) cellulose reinforced poly vinyl alcohol-based hydrogel composite with control-release behavior of methylene blue. <i>Journal of Materials Research and Technology</i> , 9(3), 6602-6611.  Thinkohkaew, K., Piroonpan, T., Jiraborvornpongsa, N., & Potiyaraj, P. (2021). Radiation induced graft polymerization of fluorinated methacrylate onto polypropylene spunbond nonwoven fabric. <i>Surfaces and Interfaces</i> , 24, 101125.