

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงของ
ทีเทเนียมที่เคลือบบนเส้นใย PA-6 ที่ปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตและเคลือบด้วย
เทคนิคโซล-สเปร์ย์โคตติง



T107866

นางสาวจิตรลดา เอี่ยมวิริยวัฒน์
นายดิลกพันธุ์ เขาวกุลพัฒนา
นางสาวอุไร จันทรหนองสรวง

มท.
จ ๕๑ ก
๒๕๕๐

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 107866
- 8 ส.ย. 2553
วัน,เดือน,ปี.....

b. 12214115
i.

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา ๒๕๕๐

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**STUDY OF PHOTOCATALYTIC ACTIVITY OF TITANIUM (IV) OXIDE
COATED ELECTROSPUN POLYAMIDE-6 FIBER MATS**



**MISS JITRADA AUIMVIRIYAVAT
MR. DILOKPHUN YAOWAKULPATTANA
MISS URAI CHANNONGSRAUNG**

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIALFULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF
SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2007**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การศึกษาความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงของทีเทเนียที่เคลือบบนเส้นใย PA-6 ที่ปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตและเคลือบด้วยเทคนิคโซล-สเปรย์โคทติ้ง

นักศึกษา นางสาวจิตรลดา เอี่ยมวิริยาววัฒน์ รหัส 47050054
นายดิลกพันธุ์ เยาวกุลพัฒนา รหัส 47050064
นางสาวอุไร จันทรหนองสรวง รหัส 47050108

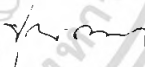

ภาควิชา เคมี
สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม


ปีการศึกษา 2550

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.ดร.พิชญ์ สุภผล

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ		ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	ผศ.ดร.วันฉัตร ชื่นชม	
กรรมการ	ผศ.ดร.ปุณณมา ศิริพันธ์โนน	
กรรมการ	รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด	


(ผศ.ดร. ชลช จารุสุทธิรักษ์)
หัวหน้าภาควิชา

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง

การศึกษาศักยภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงของทิเทเนียมที่เคลือบบนเส้นใย PA-6 ที่ปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตและเคลือบด้วยเทคนิคโซล-สเปรย์โคทติ้ง

ชื่อ

น.ส.จิตรลดา เขียมวิริยวัฒน์ รหัส 47050054
 นายดิลกพันธุ์ เขาวกุลพัฒนา รหัส 47050064
 น.ส.อุไร จันทรหนองสรวง รหัส 47050108

คณะ

วิทยาศาสตร์

สาขาวิชา

เคมีอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา

2550

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. อธิพิณ แจ่มชัด

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

รศ.ดร. พิชญ์ ศุภผล (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

บทคัดย่อ

ทิเทเนียม (IV) ออกไซด์หรือทิเทเนียม (TiO_2) เป็นที่ทราบกันดีว่ามีสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ดี ในงานวิจัยนี้จึงได้มีความพยายามศึกษาศักยภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของทิเทเนียมที่เตรียมโดยวิธีใหม่ โดยในขั้นแรกทำการเตรียมเส้นใยพอลิเอไมด์-6 ขนาดเล็กมากเป็นแผ่นเส้นใยที่ไม่ถักทอ (Non-woven mat) ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning) เพื่อใช้เป็นแผ่นรองรับ (Substrate) ของทิเทเนียม โดยขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยพอลิเอไมด์-6 ที่เตรียมได้มีขนาดเท่ากับ 127.3 nm ในขั้นต่อไปนำเส้นใยพอลิเอไมด์-6 ที่เตรียมได้ไปทำการเคลือบผิวทิเทเนียมด้วยสารละลายทิเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ออกไซด์ (TTIP) 97% โดยใช้เทคนิคโซล-สเปรย์โคทติ้ง (Sol-spray coating) จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของเส้นใยที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค SEM พบว่าชั้นทิเทเนียมที่เคลือบอยู่บนเส้นใยมีการแตก เนื่องจากการระเหยของตัวทำละลายทำให้เกิดการหดตัวของชั้นทิเทเนียมและจากการศึกษาความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD พบว่าผลึกของทิเทเนียมยังอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) หลังจากนั้นทำการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยที่เตรียมได้ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogenperoxide, H_2O_2) ที่ 90°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และนำไปศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM พบว่าชั้นของทิเทเนียมนั้นหลุดออกเหลือเพียงชั้นที่มีการยึดติดกับเส้นใย และจากการศึกษาด้วยเทคนิค XRD พบว่าเริ่มมีพีค (Peak) เกิดขึ้นที่ 25.3° , 37.8° , 48.1° , 53.9° และ 55.0° ใน 2 Theta ซึ่งจะตรงกับพีคของอนาเทส (Anatase) แล้วจึงนำเส้นใยที่ทำการปรับปรุง

พื้นผิวแล้วมาทำการบ่ม (Aging) ในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 5, 6 และ 7 วัน แล้วนำไปทำการศึกษาลักษณะด้วยเทคนิค SEM พบว่าชั้นของทิเทเนียนั้นหลุดออกเหลือเพียงชั้นที่มีการยึดติดกับเส้นใย และจากเทคนิค XRD พบว่ามีผลึกอนาเทสเกิดขึ้น โดยแผ่นเส้นใยที่ใช้เวลาในการบ่ม 7 วัน มีความสูงของพีค (Intensity) สูงที่สุด หลังจากนั้นนำเส้นใยที่เตรียมได้มาทำการศึกษาศามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยจะนำไปทดสอบการสลายตัวของเมทิลีนบลู (Methylene blue) พบว่าแผ่นเส้นใยที่เตรียมได้สามารถสลายเมทิลีนบลูได้ โดยแผ่นเส้นใยที่ใช้เวลาในการบ่ม 7 วัน สามารถสลายเมทิลีนบลูได้มากที่สุด แสดงว่าแผ่นเส้นใยที่ทำการบ่มที่เวลา 7 วันนั้นมีความเป็นอนาเทสมากที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Study of Photocatalytic Activity of Titanium (IV) Oxide Coated Electrospun Polyamide-6 Fiber Mats		
Name	Miss Jitrada Auimviriyavat	ID No.	47050054
	Mr. Dilokphun Yaowakulpattana	ID No.	47050064
	Miss Urai Channongsraung	ID No.	47050108
Faculty of Science	Chemistry		
Program	Industrial Chemistry		
Academic Year	2007		
Special Project Advisor	Assoc. Prof. Dr. Ittipol Jangchud		
Special Project Co-advisor	Assoc. Prof. Dr. Pitt Supaphol		

Abstract

Titanium (IV) oxide or titania (TiO_2) has been known to be an excellent catalyst in the field of photocatalysis. In this work electrospinning and sol-gel spray-coating techniques were incorporated to produce titania-coated electrospun polyamide-6 (PA-6) fiber mats. The electrospun PA-6 fiber mats used as a substrate were firstly prepared by electrospinning of 34% w/v of PA-6 in 85% formic acid solution at a fixed electrostatic DC potential of 21 kV with a fixed distance between the needle and the collector at 10 cm. The obtained fibers were smooth with no formation of beads. Average diameter of the fibers was 127.3 nm. Amorphous titania gel was introduced on the surface of PA-6 fiber mats by sol-spray coating with 97% titanium tetraisopropoxide (TTIP) solution. Then, treatment of the titania layer on the electrospun PA-6 fiber mats can be carried out by soaking with 30% hydrogen peroxide solution at 90 °C for 3 h. It was found that the amorphous titania gel layer covered on the surface of PA-6 fiber mats was appeared to peel off. Only the layer adjacent to the fiber surface adhered well. After that, well-crystallized anatase titania coated on electrospun PA-6 fiber mats was then produced simply through a subsequent hot water aging at 95 °C for different aging times, i.e., 5, 6 and 7 days. Finally, The photocatalytic activity of the titania coated on electrospun

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความอนุเคราะห์จากบุคคลต่าง ๆ ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย ได้แก่

รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด และ รศ.ดร.พิชญ์ สุภผล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ กรุณาให้แนวคิดและคำแนะนำในการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งสละเวลา ตลอดจนแก้ไขปัญหาต่าง ๆ มาโดยตลอด จนโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษนี้ได้แก่ ผศ.ดร.ปยุตต์มา ศิริพันธ์โนน และ ผศ.ดร.วันฉัตร ชื่นชม ที่ให้คำชี้แนะและแก้ไขข้อบกพร่องของโครงการพิเศษนี้

พี่สันติ ตั้งประภา นักศึกษาปริญญาเอกสาขาเคมีประยุกต์ ภาควิชาเคมี สจล. ที่ช่วยชี้แนะแนวทางและคำแนะนำในการดำเนินโครงการวิจัย

เหล่าคณาจารย์ภาควิชาเคมีทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้ ซึ่งช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชา และประสบการณ์ให้แก่ข้าพเจ้าทั้งหลาย

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้การสนับสนุนทั้งด้านทุนวิจัย สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ รวมทั้งเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการของภาควิชาเคมีทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดระยะเวลาการทำโครงการวิจัยครั้งนี้

เหล่าเพื่อนๆชาวเคมีอุตสาหกรรม รุ่นที่ 23 ทุกคนที่ให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือทุกอย่าง

ขอขอบพระคุณทุกท่านที่หากมิได้เอ่ยนาม ในการช่วยเหลือด้านต่าง ๆ จนโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าทุกคน ที่ให้กำเนิด เลี้ยงดู อบรม แนะนำสั่งสอนและให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

จิตรลดา เขียมวิริยวัฒน์

ดิลกพันธุ์ เขียวกุลพัฒนา

อุไร จันทรหนองสรวง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	ก
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของทีเทเนียม (IV) ออกไซด์.....	4
2.2 กระบวนการโซล-เจล.....	6
2.2.1 กระบวนการ ดิป-โคทติ้ง.....	11
2.3 กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต.....	11
2.3.1 ความเป็นมา.....	11
2.3.2 การปั่นเส้นใยระดับนาโนด้วยไฟฟ้าสถิต.....	13
2.3.2.1 โครงสร้างและสมบัติของเส้นใยระดับนาโน.....	16
2.3.2.2 การประยุกต์ใช้การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต.....	17
2.4 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของพอลิเอไมด์-6.....	18
2.5 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	19
2.5.1 ปฏิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน	
ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	23
2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิส (Photocatalyst).....	24
2.5.3 คลื่นแสงที่พบในแสงอาทิตย์.....	26
การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
บทที่ 3 การทดลอง.....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 สารเคมี.....	30
3.2 อุปกรณ์.....	30
3.3 การทดลอง.....	31
3.3.1 การเตรียมเส้นใยพอลิเอไมด์-6 ด้วยไฟฟ้าสถิต.....	31
3.3.2 การเคลือบผิวเส้นใยพอลิเอไมด์-6 ด้วยสารละลายทีเทเนียม (IV) ไฮโซเปอร์ออกไซด์.....	32
3.3.3 การปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยพอลิเอไมด์-6 ที่เคลือบด้วยทีเทเนียม.....	33
3.3.4 การบ่มเส้นใยพอลิเอไมด์-6 ที่เคลือบผิวด้วยทีเทเนียมและ ทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยใช้น้ำร้อน.....	33
3.4 การเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันของเมทิลีนบลู.....	34
3.5 แผนผังการทดลอง.....	36
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	37
4.1 การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต.....	37
4.2 กระบวนการโซล-สเปรย์โคทติ้ง.....	39
4.3 การปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยพอลิเอไมด์-6 ที่เคลือบด้วยทีเทเนียม.....	41
4.4 การบ่มด้วยน้ำร้อน.....	43
4.5 การเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน.....	48
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	50
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	50
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานในอนาคต.....	50
เอกสารอ้างอิง.....	51
ภาคผนวก.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์แบบรูโพลีและแบบอนาเทส.....	5
2.2 การเปลี่ยนสถานะจากซิลเป็นเจล.....	6
2.3 สรุปกระบวนการซิล-เจลและผลิตภัณฑ์รูปแบบต่างๆ.....	8
2.4 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์แก้วจากกระบวนการซิล-เจล.....	9
2.5 การใช้ประโยชน์กระบวนการซิล-เจล.....	10
2.6 แผนภาพแสดงกระบวนการ ดิป-โคทติ้ง.....	11
2.7 แผนภาพแสดงการเกิดTaylor cone จากกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต.....	12
2.8 การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต.....	15
2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเทคนิคตรวจวิเคราะห์กับขนาดของเส้นใย.....	16
2.10 แผนภาพแสดงการเกิดปฏิกิริยาไฟโตออกซิเดชันของทีเทเนียโดยใช้แสงยูวี.....	22
2.11 ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าในการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (reduction potential) ของคูโลหะสัมพันธ์กับระดับพลังงานของคอนดักชันแบนด์และวาเลนซ์แบนด์ของไททาเนียมไดออกไซด์ที่ pH 0.....	23
3.1 การตั้งเครื่องมือสำหรับการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต.....	32
3.2 ดังปฏิกรณ์ยูวี.....	35
3.3 แผนผังแสดงการทดลอง.....	36
4.1 ภาพ SEM ของเส้นใย PA-6 ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต.....	38
4.2 การกระจายตัวของขนาดเส้นใย PA-6 ที่ได้จากเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต.....	39
4.3 ภาพ SEM ของเส้นใย PA-6 ที่ถูกสเปรย์ด้วย TTIP 97%	40
4.4 กราฟ XRD ของเส้นใย PA-6 หลังผ่านการสเปรย์ (Spray) ด้วยทีเทเนีย (ก่อนการบ่ม).....	41
4.5 ภาพ SEM ของเส้นใย PA-6 เคลือบด้วยสารละลายทีเทเนียเมเตดตระไอโซเปอร์ออกไซด์ (TTIP) 97% ถูกนำไปทำปฏิกิริยากับสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 30%.....	42
4.6 กราฟ XRD เส้นใย PA-6 เคลือบด้วยสารละลายทีเทเนียเมเตดตระไอโซเปอร์ออกไซด์ (TTIP) 97% ถูกนำไปทำปฏิกิริยากับสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 30%.....	43
4.7 ภาพ SEM ของเส้นใย PA-6 ที่เคลือบด้วยทีเทเนียหลังจากปรับปรุงพื้นผิวและทำการบ่มในน้ำที่อุณหภูมิ 95 °C ที่เวลา 5 วัน.....	44

4.8 ภาพ SEM ของเส้นใย PA-6 ที่เคลือบด้วยทิตาเนียมหลังจากปรับปรุงพื้นผิวและ
 ทำการบ่มในน้ำที่อุณหภูมิ 95 °C ที่เวลา 6 วัน.....45

4.9 ภาพ SEM ของเส้นใย PA-6 ที่เคลือบด้วยทิตาเนียมหลังจากปรับปรุงพื้นผิวและ
 ทำการบ่มในน้ำที่อุณหภูมิ 95 °C ที่เวลา 7 วัน.....46

4.10 กราฟแสดงความเป็นอนาเทสของเส้นใยที่เคลือบด้วยทิตาเนียมที่เวลาต่างๆ.....47

4.11 แสดงผลการสลายตัวของเมทิลีนบลู (Methylene blue) ที่เวลาต่างๆ.....48



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตาราง

หน้า

2.1 สมบัติความเป็นผลึกของ อนุภาค บรูคไลท์ และ รูไลท์.....	4
2.2 ตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่ใช้ในรูปแบบในการปั้นด้วยไฟฟ้าสถิต	15
2.3 แสดงสมบัติต่างๆของไนลอน	18



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ทิตาเนียม (IV) ออกไซด์ (Titanium (IV) oxide) หรือทิตาเนียม (Titania, TiO_2) เป็นวัสดุที่สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย และยังเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสง (Photocatalysis) ที่ดี ทิตาเนียมเป็นวัสดุกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ที่ดีเพราะมีช่องพลังงานในการกระตุ้น (Band gap) ที่กว้างซึ่งเป็นสมบัติที่น่าสนใจ นอกจากนี้ยังมีสมบัติในด้านอื่นๆ เช่น ดัชนีหักเหแสงสูง สัมประสิทธิ์การดูดซับต่ำ และยังใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงในการสลายตัวของสารประกอบอินทรีย์จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างเช่น การกำจัดมลพิษจากสารอินทรีย์ [1] ทิตาเนียมในทางการค้าที่นิยมใช้อย่างมากจะอยู่ในรูปเม็ดสีขาว เพราะมีความสามารถในการกระเจิงแสงสูงสุดโดยไม่เกิดการดูดซับ ไม่เป็นพิษ เจือยต่อปฏิกิริยาเคมี และไม่นำไฟฟ้า เนื่องจากมีค่าคงที่การนำไฟฟ้าต่ำ

ผลึกของทิตาเนียมสามารถแบ่งเป็น 3 ประเภทดังนี้ รูไทล์ (Rutile) อนาเทส (Anatase) และ บรูคไคท์ (Brookite) รูไทล์มีความเสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic) โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง ส่วนอนาเทสมีสมบัติเป็นสารกึ่งเสถียร (Metastable) ที่อุณหภูมิสูง ทั้งรูไทล์และอนาเทสมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) ขณะที่บรูคไคท์มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออโธโรมบิก (Orthorhombic) ซึ่งสามารถพบได้ภายใต้สภาวะที่เป็นไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) หรือพบในแร่ธาตุธรรมชาติ [2] โดยอนาเทสสามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายตัวด้วยแสงและจากพลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากมีสมบัติเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยแสง (Photoactivity) สูง [3]

ทิตาเนียมที่มีขนาดอนุภาคในระดับนาโน (Nanoparticle) จะมีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีต่างจากขนาดปกติ ทำให้ความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเพราะไม่เพียงมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นแต่ยังมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติที่พื้นผิว

ทิตาเนียม (IV) ออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคในระดับนาโนมีนัยสำคัญต่อพฤติกรรมทางเคมีและทางกายภาพ โดยอนุภาคระดับนาโนของทิตาเนียมมีความเฉพาะเจาะจงของพื้นที่ผิว เสถียรภาพทางเคมีและความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมีสูงซึ่งสมบัติต่างๆ มีความสัมพันธ์กับขนาดอนุภาคโดยการดูดซับสารประกอบอินทรีย์บนพื้นผิวของผลึกอนาเทสจะขึ้นกับขนาดอนุภาค แม้ว่า

ทิตาเนียม (IV) ออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคในระดับนาโนจะมีประโยชน์หลากหลาย แต่การนำ

อนุภาคที่มีขนาดเล็กๆ มาใช้ประโยชน์ยังทำได้ยาก จึงได้มีการทดลองนำเส้นใยที่ประกอบด้วย ทีเทเนียที่มีขนาดอนุภาคในระดับนาโนมาประยุกต์ใช้

ในงานวิจัยก่อนหน้าได้มีการนำเทคนิค โซล-เจล ดิป-โคทติ้ง (Sol-gel dip-coating) [4] มาใช้ในการควบคุมสมบัติของทีเทเนียม (IV) ออกไซด์ โดยเทคนิคโซล-เจลจะให้สมบัติทางเคมีที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Chemical homogeneity) และสามารถสังเคราะห์โครงสร้างของทีเทเนียในรูปแบบผลึกอนาเทสที่เสถียรที่อุณหภูมิต่ำได้ เนื่องจากทีเทเนียในรูปอสัณฐาน (Amorphous) จะมีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงที่ไม่ดี จึงต้องทำให้ทีเทเนียอยู่ในรูปผลึกอนาเทสโดยการทำไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) หรือการบำบัดด้วยความร้อน (Heat treatment) ที่อุณหภูมิสูง [5]

ในโครงการพิเศษนี้ได้ใช้เทคนิค โซล-สเปรย์โคทติ้ง (Sol-spray coating) ร่วมกับเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning process) ทำให้ได้เส้นใยพอลิเอไมด์-6 (Polyamide-6) ที่เคลือบด้วยทีเทเนีย โดยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นวิธีที่ง่ายและนิยมใช้อย่างแพร่หลายสำหรับการสร้างเส้นใยขนาดเล็ก โดยเส้นใยจะถูกเหนี่ยวนำให้ตกลงบนพื้นผิวเครื่องที่ใช้เก็บรวบรวม (Collector) เกิดเป็นเส้นใยไม่ถักทอ (Non-woven fibers) ซึ่งมีพื้นที่ผิวสูงและสัมพันธ์กับรูพรุนที่มีขนาดเล็ก เส้นใยที่มีความยืดหยุ่นจะมีพื้นที่ผิวสูง เส้นใยพอลิเอไมด์-6 จะถูกใช้เป็นตัวรองรับ (Substrate) ในการเคลือบผิวด้วยทีเทเนีย การประยุกต์ใช้เทคนิคโซล-สเปรย์โคทติ้งเพื่อเคลือบผิวฟิล์มบางลงบนตัวรองรับ ทีเทเนียเจลจะถูกทำให้เป็นผลึกอนาเทสโดยทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) ตามด้วยการบ่ม (Aging) ในน้ำร้อน จากนั้นจึงทำการศึกษาความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงของอนาเทสที่เตรียมได้โดยวัดจากค่าการสลายตัวของเมทิลีนบลู (Methylene blue) โครงการพิเศษนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อนำเส้นใยพอลิเอไมด์-6 ที่เคลือบผิวด้วยทีเทเนียประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เช่น การใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง การกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียและอากาศ

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อเตรียมทีเทเนียที่เคลือบบนเส้นใย PA-6 ที่ปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตและเคลือบด้วยเทคนิคโซล-สเปรย์โคทติ้ง (Sol-spray coating) พร้อมทั้งศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมี
2. ศึกษาการประยุกต์ใช้งานของทีเทเนียที่เคลือบบนเส้นใย PA-6 ที่ปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตและเคลือบด้วยเทคนิคโซล-สเปรย์โคทติ้ง ในด้านการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงในการสลายตัวของสารประกอบอินทรีย์

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้
2. ศึกษาสมบัติทางเคมีและกายภาพ ของ Polyamide-6 ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย Hydrogen peroxide และผ่านการบ่มในน้ำร้อน รวมทั้งศึกษาสัณฐานวิทยาของเส้นใยด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) และศึกษาความเป็นผลึกด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)
3. ศึกษาความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงของทีเทเนียที่เตรียมได้จากการสลายตัวของเมทิลีนบลู

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเตรียมทีเทเนียที่เคลือบบนเส้นใย PA-6 ที่ปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตและเคลือบด้วยเทคนิคโซล-สเปรย์โคทติ้ง ในด้านการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงได้
2. สามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ทิตเนียม (Ti) ส่วนใหญ่มักพบในรูปสารประกอบโคออดิเนต (Coordinate) กับสารอื่นๆ เช่น ไฮโดรเจน ไนโตรเจน โบรอน คาร์บอน และออกซิเจน ทิตเนียมหรือทิตเนียม (IV) ออกไซด์ เป็นสารประกอบที่สำคัญในเชิงพาณิชย์ จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าสมบัติทางกายภาพและเคมีของทิตเนียมที่หลากหลายขึ้นกับวิธีการเตรียม

2.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของทิตเนียม [6]

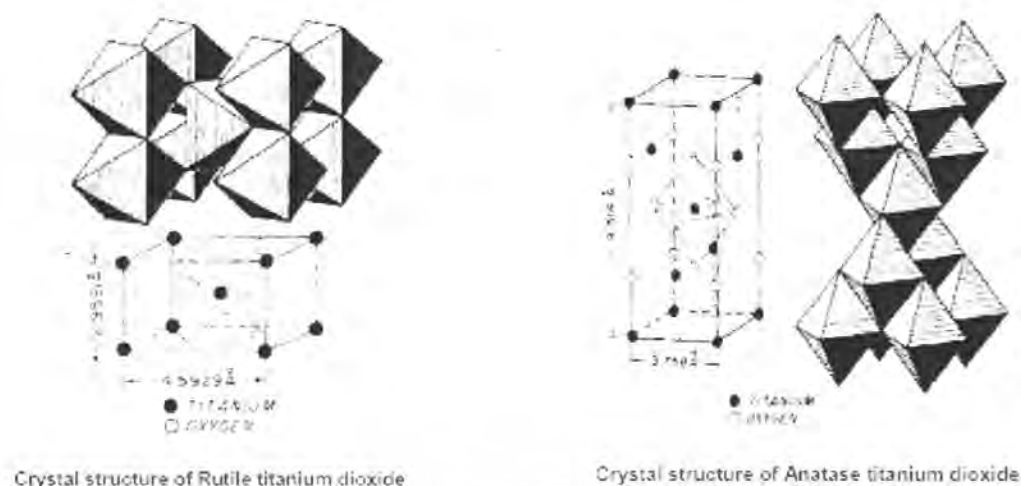
ทิตเนียม (IV) ออกไซด์ที่รู้จักในนามทิตเนียมหรือทิตเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นวัสดุที่ได้จากการสังเคราะห์หรือโดยทั่วไปพบตามธรรมชาติในรูปผลึก 3 ชนิด ดังนี้

1. อนาเทส (Anatase) ซึ่งมีความเสถียรที่อุณหภูมิต่ำ
2. บรูคไคท์ (Brookite) โดยทั่วไปพบได้เฉพาะในธรรมชาติ
3. รูไทล์ (Rutile) ผลึกจะมีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง หรือพบได้ในหินภูเขาไฟ (Igneous rocks)

สมบัติต่างๆของผลึกทิตเนียมทั้ง 3 ชนิดแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติความเป็นผลึกของ อนาเทส บรูคไคท์ และรูไทล์ [6]

	Anatase	Brookite	Rutile
Crystal structure	Tetragonal	Orthorhombic	Tetragonal
Density, (g/cm^3)	3.9	4.0	4.23
Hardness, (Mohs scale)	5.5 - 6.0	5.5 - 6.0	7.0 - 7.5
Lattice parameters, (nm)			
a	0.3758	0.9166	0.4584
b	-	0.5436	-
c	0.9514	0.5135	2.953



รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์แบบรูไทล์และแบบอนาเทส [18]

โดยทั่วไปผลึกของไทเทเนียม (IV) ออกไซด์ที่สำคัญคือ อนาเทส และรูไทล์ ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของเตตระโกนอล มีสมบัติทางกายภาพ เช่น ดัชนีการหักเหของแสง (Refractive index) สามารถวัดได้จากความเป็นผลึก อย่างไรก็ตามในด้านการนำไปประยุกต์ใช้งานนั้นยังมีไม่มาก ความเป็นผลึกนั้นถือว่าน้อยมากเนื่องจากการจัดเรียงตัวแบบสุ่มของอนุภาคขนาดเล็กมีอยู่มาก จากสมบัติที่น่าสนใจคือ การมีช่องว่างของระดับพลังงาน (Bandgap) ในช่วงกว้าง มีความโปร่งใส มีสัมประสิทธิ์ในการดูดซับต่ำ [7]

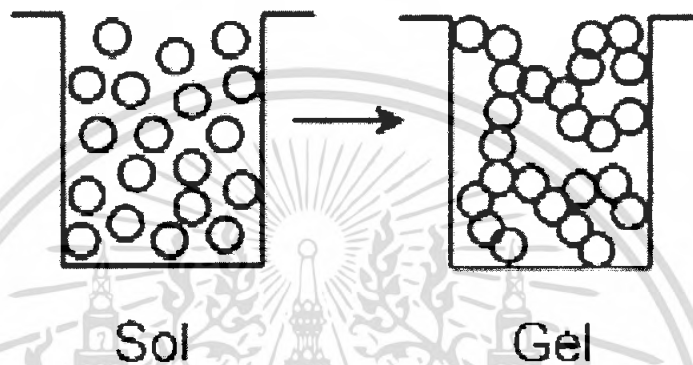
ไทเทเนียม (IV) ออกไซด์มีความเสถียรต่ออุณหภูมิ (จุดหลอมเหลวเท่ากับ 1855 °C) และมีความต้านทานต่อสารเคมีที่ดี เมื่อทำการให้ความร้อนภายใต้สภาวะสุญญากาศ ไทเทเนียม (IV) ออกไซด์จะคลายออกซิเจนแล้วเปลี่ยนเป็น $TiO_{0.97}$ ที่มีสีน้ำเงินเข้มแต่สามารถเปลี่ยนกลับมาเป็นสีขาวตามเดิมได้เมื่อทำการให้ความร้อนในสภาวะบรรยากาศปกติ [8]

ผลึกอนาเทสเป็นที่รู้จักกันดีว่ามีสมบัติเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาโดยใช้แสงที่ดี (Photocatalyst) เช่น มีความสามารถในการออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) สูง ไม่เป็นพิษ และมีความเสถียรทางแสง จากสมบัติต่างๆ เหล่านี้จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานได้หลายประเภท เช่น การทำให้น้ำบริสุทธิ์, การกำจัดแบคทีเรีย, แผ่นดับกลิ่น, แผ่นป้องกันสิ่งสกปรกในครัว (Soilproofing household furnishing plate) และเส้นใยดับกลิ่น ได้มีความพยายามที่จะหลีกเลี่ยงการใช้ไทเทเนียมที่มีลักษณะเป็นผงเนื่องจากจะเกิดการแยกสถานะจากสารแขวนลอยหลังจากเกิดปฏิกิริยาที่มีแสงเป็นตัวเร่ง จึงได้มีการพัฒนาวิธีการนำไทเทเนียมมาเคลือบบนตัวรองรับ (Substrate) เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

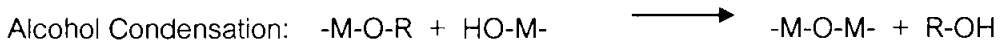
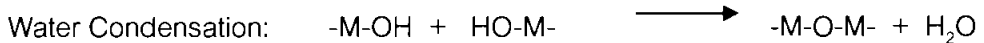
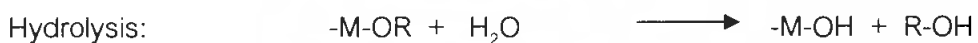
2.2 กระบวนการ โซล-เจล (Sol-gel process) [9]

กระบวนการโซล-เจลเป็นกระบวนการผลิตที่มีประโยชน์หลายอย่างในการผลิตเซรามิก และแก้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง โดยทั่วไปกระบวนการ โซล-เจล เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวที่เรียกว่า "โซล" ซึ่งส่วนมากอยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.1-1 ไมครอน เป็นของแข็งที่เรียกว่า "เจล"



รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนสถานะจากโซลเป็นเจล

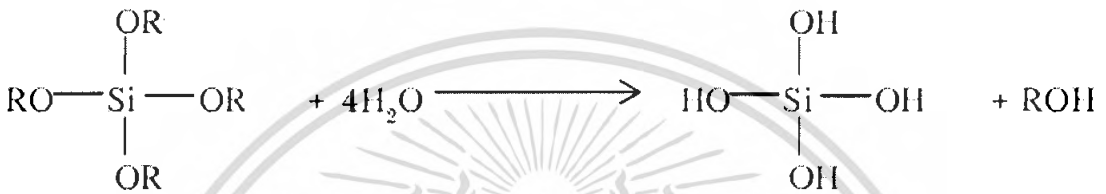
ปฏิกิริยาที่สำคัญในกระบวนการโซล-เจลมี 3 ปฏิกิริยา คือ ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) การควบแน่นน้ำ (Water condensation) และ การควบแน่นแอลกอฮอล์ (Alcohol condensation) ดังสมการ มีปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ pH ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนมวลของน้ำและโลหะ และอุณหภูมิ ดังนั้นการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ในสภาวะที่ต่างกันจะทำให้โซลและเจลที่ได้มีสมบัติและโครงสร้างต่างกัน



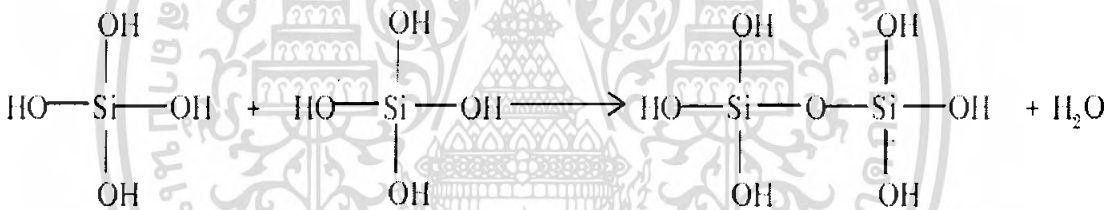
เมื่อ M แทนโลหะ ได้แก่ Si, Zr, Ti, Al, Sn, Ce และ OR แทน alkoxy group

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

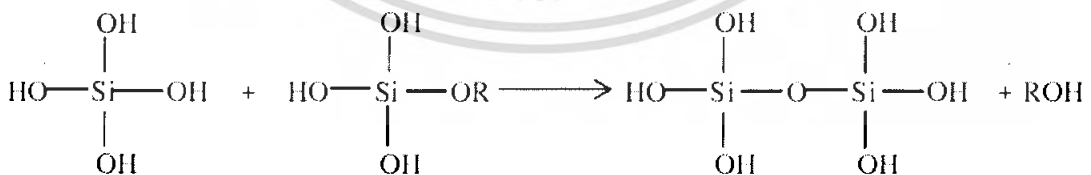
ขั้นตอนแรกของการทำ คือการผสมสารตั้งต้น (Precursor) กับน้ำ สารตั้งต้นที่นิยมใช้ในกระบวนการโซล-เจลเป็นสารประกอบโลหะและกึ่งโลหะที่ล้อมรอบด้วยลิแกนด์ที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เช่น แอลคอกไซด์ของโลหะ (Metal alkoxide) เป็นสารตั้งต้นที่ได้รับความนิยมสูง เนื่องจากทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดี เช่น เตตระเมทอกซีไซเลน (Tetramethoxysilane, TMOS) และเตตระเอทอกซีไซเลน (Tetraethoxysilane, TEOS) ส่วนแอลคอกไซด์ (Alkoxide) ชนิดอื่น เช่น อะลูมิเนต (Aluminate) ทิทาเนต (Titanate) และ บอเรต (Borate) มีใช้กันแพร่หลายโดยมักใช้ร่วมกับ TEOS เช่น $\text{Si}(\text{OR})_4$ ซึ่ง R คือ CH_3 (TMOS), C_2H_5 (TEOS) หรือ C_3H_7 จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยน้ำดังสมการ



และในขณะเดียวกันก็จะเกิดปฏิกิริยาควบแน่นน้ำ (Water condensation) ดังนี้

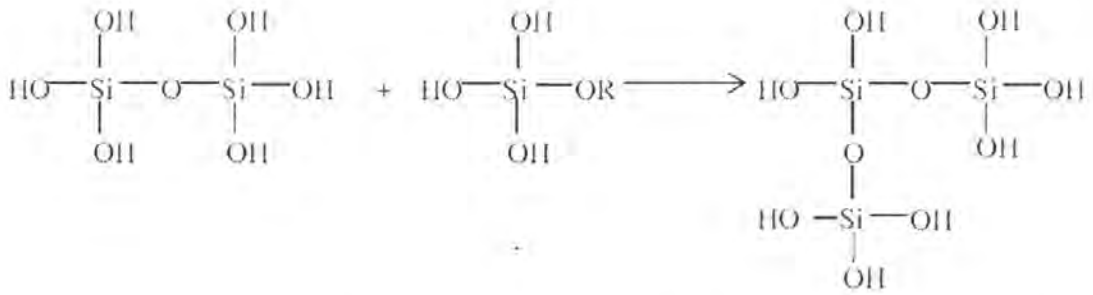


หรือปฏิกิริยาควบแน่นแอลกอฮอล์ (Alcohol condensation) ดังนี้

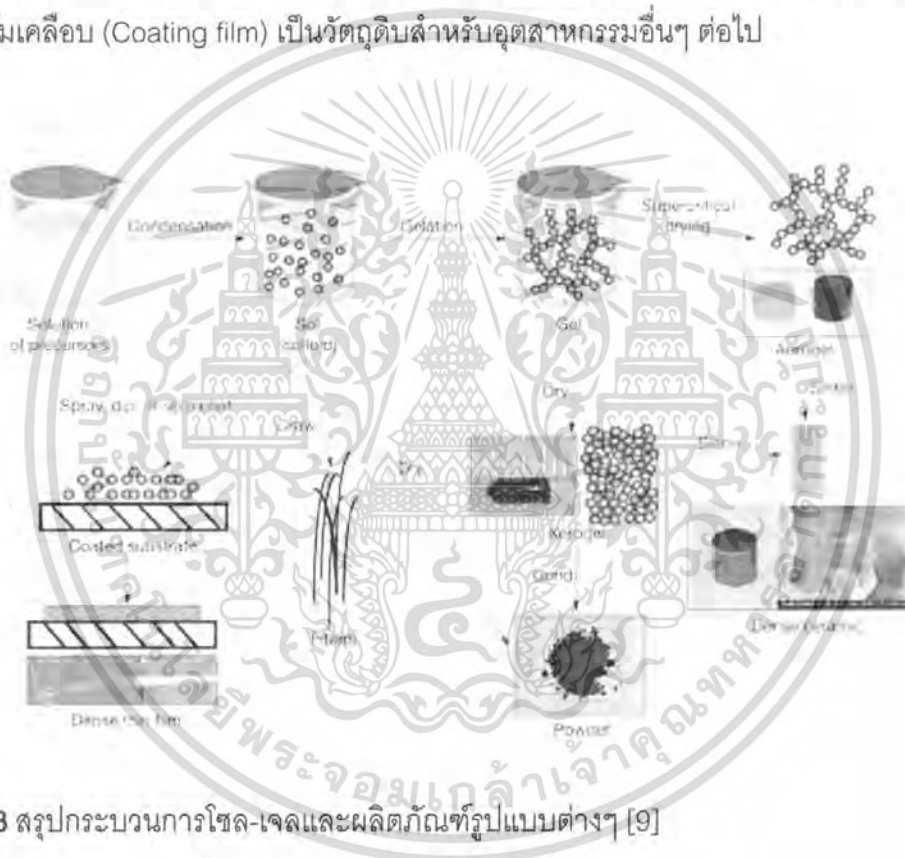


สารประกอบที่เกิดขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาควบแน่น (Condensation) ต่อไปจนกลายเป็นโครงร่างแหซิลิกา (Silica Network) อยู่ในสภาวะที่เรียกว่าเจล (Gel) จึงเรียกปฏิกิริยาดังกล่าวว่าปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน (Poly condensation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ในกระบวนการผลิตทั้งจากสภาวะที่เป็นโซลและเจลเมื่อเข้าสู่กระบวนการทำให้แห้งจะได้ผลิตภัณฑ์รูปแบบต่างๆ เช่น เส้นใย (Fiber) แอโรเจล (Aerogel) ซีโรเจล (Xerogel) ผง (Powder) และฟิล์มเคลือบ (Coating film) เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมอื่นๆ ต่อไป



รูปที่ 2.3 รูปกระบวนการโซล-เจลและผลิตภัณฑ์รูปแบบต่างๆ [9]

การนำเทคโนโลยีโซล-เจล มาใช้ประโยชน์สามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น ผงละเอียด ฟิล์มบาง เส้นใย และวัสดุก้อน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆต่อไป เช่น แก้วซิลิกา สารเคลือบป้องกันการสึกกร่อน การสะท้อนแสง และการเกาะติดผิวของน้ำ เป็นต้น เทคโนโลยีโซล-เจลจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการผลิตสารหรือวัสดุที่มีสมบัติเฉพาะตัวหรือต้องการความบริสุทธิ์สูงหรือแม้แต่การผลิตสารหรือวัสดุทดแทนการใช้แร่หรือทรัพยากรธรรมชาติหายากและมีอยู่จำกัดเป็นวัตถุดิบ เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการโซล-เจลจะมีความบริสุทธิ์สูงเนื่องจากการเตรียมสารหรือวัสดุในระดับโมเลกุลทำให้สามารถกำหนดสมบัติต่างๆ ที่

ต้องการได้จึงควรนับเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมเคมี เทคโนโลยี

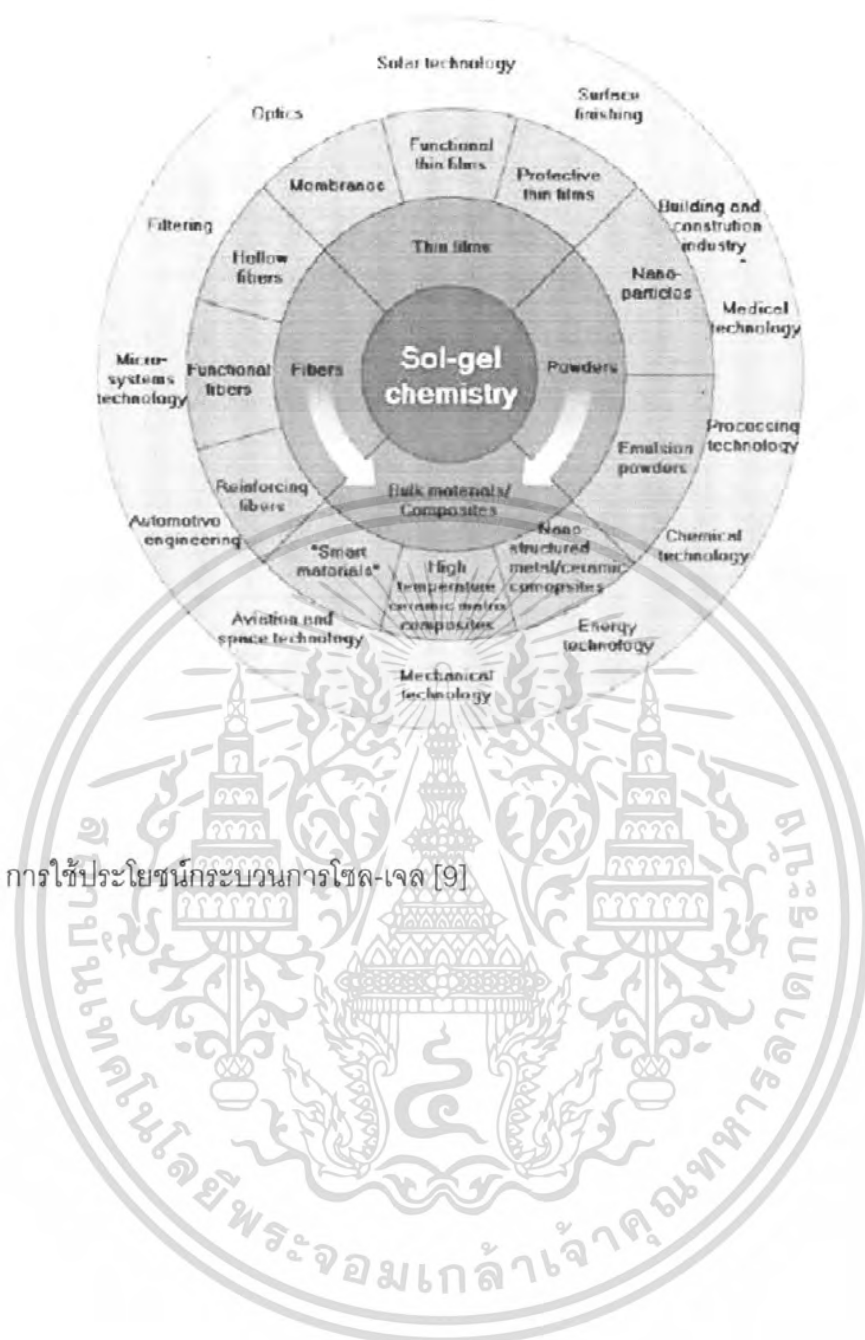
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงาน อุตสาหกรรมรถยนต์และอุตสาหกรรมเซรามิก เป็นต้น การนำเทคโนโลยีโซล-เจล มาใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรมยังต้องศึกษาในรายละเอียดเกี่ยวกับสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียม และลักษณะหรือสมบัติของสารหรือวัสดุที่ต้องการ ซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตามแนวโน้มการนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาใช้ในเชิงพาณิชย์มีความเป็นไปได้สูง เนื่องจากกระบวนการโซล-เจลเป็นเทคโนโลยีที่ทำให้คุณสมบัติของวัสดุทำได้ตั้งแต่ห้องปฏิบัติการจนถึงระดับอุตสาหกรรมซึ่งสามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคได้จริง



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์แก้วจากกระบวนการโซล-เจล [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 การใช้ประโยชน์กระบวนการโซล-เจล [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 กระบวนการ ดิป-โคทติ้ง (Dip-coating) [10]

กระบวนการ ดิป-โคทติ้งเป็นวิธีการเปลี่ยนของเหลวให้เป็นเจล แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. ทำการจุ่มตัวอย่างลงในสารละลาย
2. ทำการจุ่มในแนวตั้งและรอให้สารละลายเกิดการเคลือบที่ผิว
3. ดึงตัวอย่างขึ้นในแนวตั้งด้วยความเร็วคงที่ แล้วทิ้งให้แห้งในอากาศจะได้เป็นฟิล์มบาง

เคลือบบนผิวตัวอย่าง



รูปที่ 2.6 ภาพแสดงกระบวนการ ดิป-โคทติ้ง [11]

2.3 กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning Process) [7]

2.3.1 ความเป็นมา

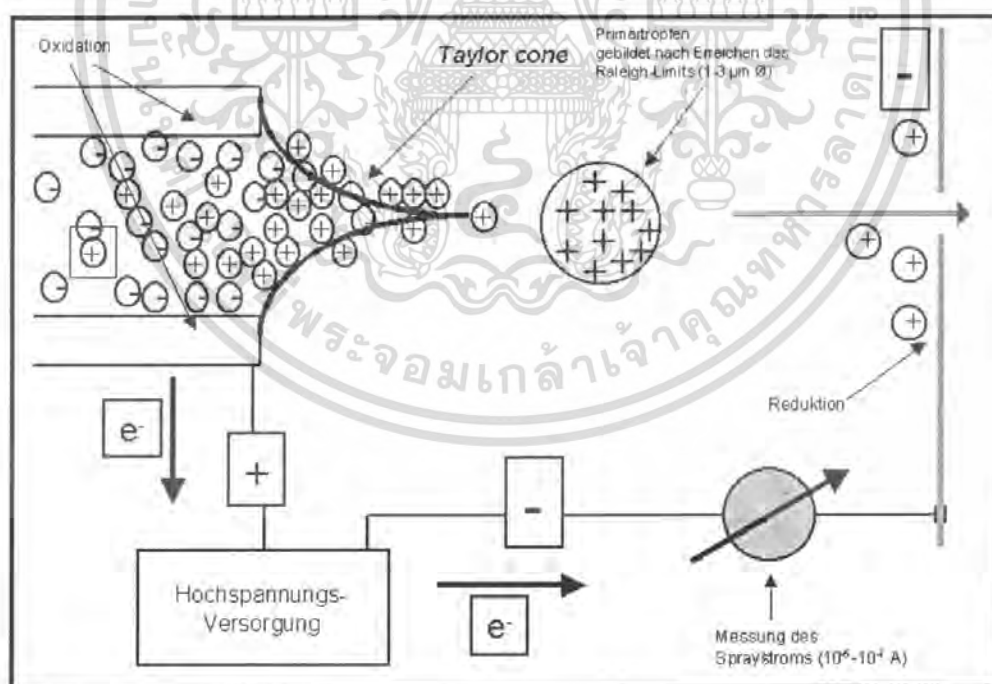
กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นวิธีการผลิตเส้นใยระดับนาโน เส้นใยจะถูกฉีดพ่นออกมาเมื่อแรงทางไฟฟ้าเอาชนะแรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์หลอมเหลว การเกิดเป็นเส้นใยจะผ่านการดึงยืดออกเป็นเส้นและจะเกิดเป็นเกลียวพุ่งออกมาเป็นเส้นใยขนาดเล็ก การเกิดเส้นใยเกิดจากตัวทำละลายระเหยหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงของแข็งจะได้เป็นเส้นใยแบบไม่ถักทอ (Non-woven fabric)

เส้นใยพอลิเมอร์ขนาดเล็กระดับนาโนสามารถเตรียมได้จากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กกว่าเส้นใยที่ใช้ในการทำสิ่งทอทั่วไป เส้นใยที่มีขนาดเล็กนี้จะมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักอยู่ในช่วง $10 \text{ m}^2/\text{g}$ (เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 500 nm) ถึง $1000 \text{ m}^2/\text{g}$ (เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 50 nm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนเนื้อหาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นใยพอลิเมอร์ขนาดเล็กระดับนาโนจะนำไปใช้งานหลายอย่าง เช่น การกรอง และงานในทางการแพทย์ ยังมีความเป็นไปได้ในการทำโซลาร์เซลล์ (Solar cell) และกระจกเงาที่ใช้ในอวกาศ แล้วยังนำไปใช้กับพวกยากำจัดแมลง โครงสร้างของอวัยวะ และใช้เป็นวัสดุเสริมแรง

การฉีดพ่นด้วยแรงไฟฟ้าสถิตได้มีนักวิจัยอธิบายเกี่ยวกับการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต เป็นเวลามากกว่า 100 ปี Lord Rayleigh ได้ศึกษาเกี่ยวกับความไม่เสถียรของหยดของเหลวในสนามไฟฟ้า โดยเขาได้แสดงไว้ว่าเมื่อแรงทางไฟฟ้าเอาชนะแรงตึงผิวของของเหลวแล้วจะถูกฉีดพ่นออกมา ในปี 1952 Vonnegut และ Neubauer ได้ทำการหยดของไอน้ำที่มีขนาดใหญ่เปลี่ยนเป็นหยดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.1 มิลลิเมตรโดยใช้กระแสไฟฟ้า 5 ถึง 10 กิโลโวลต์จากหลอดคาปิลารี การทดลองนี้เป็นการเตรียมการกระจายตัวของระดับนาโนในบรรยากาศซึ่งอนุภาคจะมีรัศมีระดับไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลางของหยดที่ออกมาจะมีการตอบสนองที่ไวต่อแรงทางไฟฟ้า Watchel และคณะได้เตรียมอิมัลชันของน้ำมันในน้ำโดยมีขนาดของอนุภาคประมาณ 0.5 ถึง 1.6 ไมครอน ในปี 1960 Taylor ได้ศึกษาการแตกตัวของหยดน้ำในสนามไฟฟ้าเมื่อพื้นผิวที่เป็นครึ่งวงกลมที่อยู่ตรงหัวเข็มจะจัดตัวเป็นทรงกรวยรู้จักกันเป็นทรงกรวยเทเลอร์ (Taylor cone)



รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงการเกิด Taylor cone จากกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การปั่นเส้นใยระดับนาโนด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning of Nanofibers)

การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่เป็นที่รู้จักในการแรงไฟฟ้าขับเคลื่อนทำให้เกิดเป็นเส้นใย การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตอย่างง่ายนั้นจะใช้เครื่องมือที่ไม่ซับซ้อน จากการเพิ่มขึ้นของสนามเมื่อแรงไฟฟ้าสถิตผลักเอาชนะแรงตึงผิวและประจุของของเหลวที่พุ่งออกมาจากหัวเข็มสารละลาย พอลิเมอร์ที่ถูกปล่อยออกมาจะเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว พร้อมกับระเหยตัวทำละลายด้วย และจะจัดเรียงตัวแบบสุ่มบนพื้นผิวที่รองรับ ในกรณีพอลิเมอร์เหลวพอลิเมอร์จะแข็งตัวทันทีที่สัมผัสกับอากาศซึ่งจะถูกรวบรวมโดยเครื่องรวบรวม (Collector)

แรงผลักทางคูลอมบ์ (Coulombic repulsion force) ระหว่างประจุที่เหมือนกันของพอลิเมอร์ที่ถูกสร้างในสารละลายพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์หลอมเหลว ที่ปล่อยออกจากหัวที่มีความไม่เสถียรของหยดที่เป็นครึ่งวงกลมของสารละลายพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์หลอมเหลวที่อยู่ปลายเข็มซึ่งในที่สุดจะเกิดเป็นหยดเล็กๆ ที่มีรูปร่างเป็นกรวย ถ้าเพิ่มค่าสนามไฟฟ้าสถิตมากกว่าค่าวิกฤตแรงผลักแบบคูลอมบ์ก็จะมากกว่าแรงตึงผิว ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการพุ่งออกมาของสารละลายพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ไหลออกมาอย่างต่อเนื่อง สามารถวาดภาพของการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตได้ดังรูปภาพที่ 2.8

มี 6 แรงหลักๆ ที่กระทำกับสารที่ฉีดออกมา ได้แก่ [13]

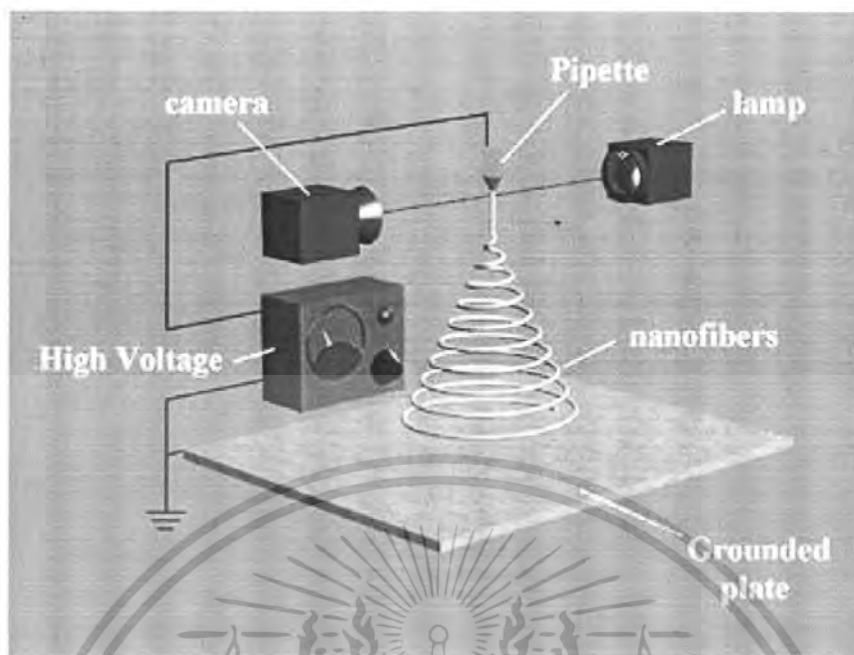
1. แรงโน้มถ่วง (Gravimetric forces)
2. แรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic forces) ที่พาสารจากหัวเข็มไปยังเป้าหมาย
3. แรงผลักแบบคูลอมบ์ (Coulombic forces) ซึ่งพยายามผลักประจุที่ใกล้เคียงภายในสารละลายที่ถูกฉีดออกมา ซึ่งจะทำให้เกิดการขยายของสารที่ฉีดออกมาระหว่างพุ่งไปสู่เป้าหมาย
4. แรงวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic force) ซึ่งพยายามปกป้องกระแสของพอลิเมอร์ไม่ถูกขยายออก
5. แรงตึงผิว (Surface tensions) ซึ่งจะกระทำกับแรงขยายออกของผิวสารละลายพอลิเมอร์
6. แรงลาก (Drag force) จากการเสียดสีระหว่างประจุของสารละลายพอลิเมอร์กับอากาศโดยรอบ

ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตเส้นใยด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ได้แก่ [14]

1. น้ำหนักโมเลกุล การกระจายของน้ำหนักโมเลกุล และโครงสร้างของพอลิเมอร์
2. สมบัติของสารละลาย (ความหนืด, การนำไฟฟ้า และแรงตึงผิว)
3. ศักย์ไฟฟ้า อัตราการไหล และความเข้มข้น
4. ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นรองรับ
5. อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วของอากาศ
6. การเคลื่อนที่ของแผ่นรองรับ

หนึ่งในปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่เกี่ยวกับการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตคือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย โดยจะขึ้นอยู่กับขนาดของพอลิเมอร์ในตอนเริ่มแรก ซึ่งก็คือปริมาณของพอลิเมอร์ที่อยู่ในลำฉีดยาออกมา ในระหว่างที่สารละลายกำลังเดินทางจะเกิดการขยายตัวเนื่องจากการให้ความต่างศักย์เข้าไป โดยทั่วไปถ้าให้ความต่างศักย์ที่สูงกว่าจะทำให้พ่นสารละลายออกมามาก ซึ่งทำให้เส้นใยมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ขึ้น

ปัญหาอื่นๆ ที่พบในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตก็คือ เม็ดหรือก้อนพอลิเมอร์ที่เรียกว่า "บีด" (Beads) ที่มีขนาดใหญ่ในเส้นใยนาโนพอลิเมอร์ โดยพบว่าความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์มีผลต่อเม็ดบีด ถ้าความเข้มข้นของพอลิเมอร์สูงจะได้เม็ดบีดที่น้อยกว่าการเติมเกลือลงไปมีผลทำให้ความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิวของสารละลายที่ฉีดยาออกมาระหว่างการปั่นเส้นใยสูงขึ้น ซึ่งประจุนี้จะทำให้สารที่ฉีดยาออกมาเพิ่มขึ้น แรงยึดออกที่เพิ่ม ขึ้นจะกำหนดลำที่ฉีดยาออกมาภายใต้สนามไฟฟ้า มีผลทำให้บีดเล็กลงและเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง



รูปที่ 2.8 การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต [14]

มีพอลิเมอร์จำนวนมากที่สามารถเป็นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต สังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของงานวิจัยทั่วโลก ตัวอย่างของพอลิเมอร์บางตัวที่มีความสำคัญต่อการปั่นเส้นใยแสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่ใช้ขึ้นรูปในการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต [15]

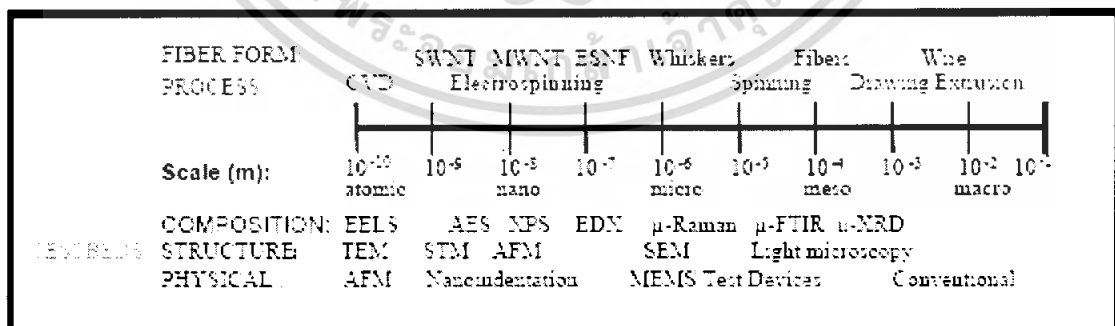
พอลิเมอร์	ตัวทำละลาย
Rayon	Caustic soda
Acrylic resin	Dimethyl formamide
PE, PPE	Melted
PEO	Water
PPTA Zkevar	98% sulfuric acid
Polyester	1:1 dichromethane : trifluoroacetic acid
PAN and Pitch	Dimethyl formamide (DMF)
DNA	70 : 30 water : ethanol (DMF)
Styrene-butadiene-styrene triblock	75 : 25 tetrahydrofuran/dimethylformamide
PVDF	DMF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PLA	Chloroform
Bombyx mori silk, spider silk	Formic acid
PAN/PEO	Chloroform
HEMA	50 : 50 formic acid/ethanol
CNT/PAN	DMF
GNP/PAN	DMF
Polyurethane	DMF
Nylon-6	95 : 5 HFIP/DMF
Poly(ethylene-co-vinyl alcohol)	2-propanol/water

2.3.2.1 โครงสร้างและสมบัติของเส้นใยระดับเล็ก

ลักษณะพิเศษของเส้นใยขนาดเล็กระดับนาโนต้องการตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือจำนวนมาก รูปภาพที่ 2.9 แสดงถึงเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับลักษณะเส้นใยขนาดต่างๆ สำหรับเส้นใยขนาดเล็กระดับนาโน Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งที่ได้รับคามนิยมมากที่สุดที่ใช้วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและศึกษาสัณฐานวิทยา Kim และ Reneker [18] แสดงตัวอย่างรูปภาพตัดขวางของเส้นใยโดยใช้ SEM



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเทคนิคตรวจวิเคราะห์กับขนาดของเส้นใย [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2.3.2.2 การประยุกต์ใช้การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

เส้นใยระดับนาโนสามารถสังเคราะห์ได้จากพอลิเมอร์หลากหลายชนิด และพอลิเมอร์ทางชีวภาพซึ่งใช้ทำเนื้อเยื่อทางวิศวกรรม (Tissue engineering) อวัยวะเทียม (Artificial organ application) ระบบนำส่งยา (Drug delivery) และการทำผ้าพันแผล (Wound dressing)

วัสดุที่เลือกใช้ต้องมีความเข้ากันได้ในทางชีวภาพ วิธีการดั้งเดิมที่ใช้ในการทำเส้นใยต้องใช้อุปกรณ์หลายอย่างจนไม่สามารถใช้งานได้จริง การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นวิธีที่สะดวกในการทำเส้นใยระดับนาโน ซึ่งใช้วัสดุเพียงเล็กน้อยในการผลิต

หนึ่งในการประยุกต์ใช้เส้นใยในทางชีวภาพคือ การทำโครงร่างสำหรับใช้กับกระดูกกล้ามเนื้อ เส้นเลือด และเนื้อเยื่ออื่นๆ เซลล์และเนื้อเยื่อที่เกิดขึ้นใหม่สามารถเจริญเติบโตได้บนโครงร่าง สิ่งหนึ่งที่เป็นไปได้คือการนำเส้นใยใส่ลงใน Biosuits mesh network ที่มีขนาดเล็กพอที่จะจับเชื้อแอนแทรกซ์ (Anthrax) ที่มีขนาด 5 ไมครอนได้

นอกจากนี้เส้นใยระดับนาโนที่มีค่าความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูงยังประยุกต์ใช้เป็นวัสดุในการทำกระสวยอวกาศซึ่งค่าความแข็งแรงต่อน้ำหนักที่สูงเป็นสิ่งจำเป็น

พื้นที่ในการกรองมีนัยสำคัญในการประยุกต์ใช้เส้นใยระดับนาโน เนื่องจากพื้นที่ผิวที่ใหญ่กว่าและมีรูพรุนเล็กกว่าเส้นใยที่ผ่านอากาศร้อนด้วยความเร็วสูง (Melt blown (MB) webs) โครงสร้างที่มีรูพรุนและพื้นที่ผิวสูงจะสามารถประยุกต์ใช้ในด้านกรองได้อย่างสมบูรณ์ สามารถใช้กรองอากาศและน้ำเพื่อกักจับอนุภาคที่ไม่ต้องการหรือดักจับอนุภาคด้วยแรงไฟฟ้าสถิตเนื่องจากพื้นที่ผิวที่สูง เส้นใยระดับนาโนแบบไม่ถักทอสามารถประยุกต์ใช้ในด้านกรองได้อย่างกว้างขวาง เช่น ตัวกรองแอโรซอล (Aerosol filters) หน้ากากอนามัย (Facemasks) และการดักจับสิ่งสกปรกที่เสื้อผ้า ในปัจจุบันชุดทหารได้มีการพัฒนาและออกแบบให้มีความสามารถในการป้องกันสารเคมีและชีวภาพโดยเพิ่มชั้นเส้นใยระดับนาโนลงไประหว่างชั้นด้านข้างของร่างกายกับเส้นใยคาร์บอน

การทำยาฆ่าแมลงสำหรับพืช โดยทำการปั่นเส้นใยลงบนพืชโดยตรงด้วยแรงไฟฟ้าและการไหลเวียนของอากาศ (Air stream) ซึ่งจะมีประสิทธิภาพในการยึดติดกับพืชได้ 100 % ตรงข้ามกับวิธี spray หรือละอองซึ่งให้ประสิทธิภาพการยึดติดเพียง 3-5 %

ในทางการค้าการสังเคราะห์เส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับนาโนยังไม่ได้มีการพัฒนามากนัก เนื่องจากในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มักใช้เส้นใยในระดับไมครอน แต่ในอนาคตเส้นใยระดับนาโนจะเข้ามามีบทบาทสำคัญเพิ่มขึ้น

2.4 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของพอลิเอไมด์-6 [16,17]

ไนลอนเป็นพลาสติกในกลุ่มพอลิเอไมด์ซึ่งมีหมู่เอไมด์ (CONH) เป็นองค์ประกอบ เช่น ไนลอน6,6 ไนลอน6,12 ไนลอน4,6 ไนลอน6 ไนลอน12 ซึ่งมีสมบัติที่หลากหลาย ไนลอนสามารถใช้ในการผลิตฟิล์มและเส้นใย

ไนลอนสามารถเตรียมได้สองวิธีอย่างแรกคือการเกิดปฏิกิริยาควบแน่น (Condensation) ระหว่าง diamine กับ dibasic acid ซึ่งทำให้เกิดเป็นเกลือไนลอน ปริมาณของไนลอนจะอ้างอิงจากปริมาณคาร์บอนอะตอมในไดเอมีนหรือปริมาณกรด เช่น ไนลอน6,6 ไนลอน6,12

วิธีที่สองคือการเปิดวงมอโนเมอร์ที่ประกอบด้วยหมู่เอมีนและกรดที่รู้จักกันในชื่อวงแลคแทม (Lactam ring) ชื่อของไนลอนขึ้นกับจำนวนอะตอมในแลคแทมมอโนเมอร์ เช่น ไนลอน6 ไนลอน12

โดยมากไนลอนมีโครงสร้างแบบกึ่งผลึกและเป็นวัสดุที่มีความเหนียว ทนความร้อนและทนสารเคมีสูง ไนลอนชนิดต่างๆ กันก็จะมีสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น ค่าความถ่วงจำเพาะ จุดหลอมเหลวและปริมาณความชื้นซึ่งจะลดลงเมื่อปริมาณไนลอนเพิ่มขึ้น

ไนลอนสามารถดูดซับความชื้นจากสิ่งแวดล้อมได้ การดูดซับจะเกิดขึ้นต่อเนื่องจนถึงจุดสมดุล ซึ่งมีผลในทางลบต่อเสถียรภาพทางรูปร่าง โดยทั่วไปค่าความต้านทานแรงกระแทกและความยืดหยุ่นของไนลอนจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้น ขณะที่ค่าความแข็งแรงและความแข็งเพราะที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ($T_g < 50-80\text{ }^{\circ}\text{C}$) จะมีค่าลดลง ปริมาณความชื้นขึ้นกับอุณหภูมิ ความเป็นผลึก และความหนา

ไนลอนมีความสามารถในการต้านทานต่อสารเคมีแต่จะถูกทำลายได้ด้วยกรดแก่ (Strong acid) แอลกอฮอล์ (Alcohol) และอัลคาไลน์ (Akali)

ไนลอนมาสามารถประยุกต์ใช้งานในทางสิ่งแวดล้อมที่อุณหภูมิสูงได้ เพราะเสถียรภาพทางความร้อนของไนลอนจะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า $185\text{ }^{\circ}\text{C}$

ตาราง 2.3 แสดงสมบัติบางประการของไนลอน 6 [16]

Glass transition temperature	47	$^{\circ}\text{C}$
Melting temperature	220	$^{\circ}\text{C}$
Amorphous density at 25°C	1.084	g/cm^3
Crystalline density at 25°C	1.23	g/cm^3
Molecular weight of repeat unit	113.16	g/mol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรในมหาวิทยาลัยเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปยังบุคคลอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไนลอนมีหลากหลายชนิดเช่น ไนลอน6 ไนลอน6,6 ไนลอน6,6-6 ไนลอน6,9 ไนลอน6,10 ไนลอน6,12 ไนลอน11 ไนลอน12 ซึ่งมีทั้งโฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) โคพอลิเมอร์ (Copolymer) หรือคอมโพสิตเสริมแรง (Composite reinforcement) ไนลอนสามารถใช้ผสมกับพลาสติกทางวิศวกรรมอื่นๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ไนลอนสามารถขึ้นรูปได้หลายวิธีเช่น การฉีดขึ้นรูป (Injection molding) การหมุนหล่อขึ้นรูป (Rotational molding) การหล่อขึ้นรูป (Casting) หรือ การอัดรีด (Extrusion) ในรูปของฟิล์มและเส้นใย

เส้นใยไนลอนสามารถใช้ในงานในด้านสิ่งทอ ใช้ทำตาข่ายสำหรับตกปลา และพรม ส่วนไนลอนฟิล์มใช้สำหรับห่อบรรจุอาหารซึ่งมีความเหนียวและการซึมผ่านของแก๊สต่ำ และทนอุณหภูมิสูงเช่น กระเป๋าเก็บความร้อนสำหรับอาหาร (Boil-in-the-bag food packaging)

ไนลอนที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีอัดรีดและฉีดขึ้นรูปสามารถใช้เป็นส่วนประกอบเครื่องยนต์ในรถยนต์แทนโลหะได้ เนื่องจากไนลอนมีความเหนียว ทนการกัดกร่อน น้ำหนักเบาและราคาถูกกว่าอะลูมิเนียม และมีการไหลของอากาศดีกว่าเหล็กหล่อเนื่องจากมีผิวภายในที่เรียบ มีสมบัติในการหล่อขึ้น จากสมบัติต่างๆ เหล่านี้จึงนิยมใช้ทำเกียร์และเฟลา

ความเป็นฉนวนทางไฟฟ้า ด้านทานการกัดกร่อนและเหนียว ทำให้ไนลอนถูกใช้เป็นส่วนรับน้ำหนักในการประยุกต์ใช้งานด้านฉนวน สวิตช์ไฟตามบ้านเรือนและสายเคเบิล นอกจากนี้ยังใช้ทำอุปกรณ์ทางไฟฟ้าภายในบ้านอีกมากมาย [17]

2.5 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis) [18]

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการบำบัดหรือทำให้สารบริสุทธิ์ทั้งในเรือน้ำและอากาศ ซึ่งหลักการของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

1. การเกาะหรือดูดติดผิว (Adsorption process)

เป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือแก๊สให้มาเกาะจับและติดบนผิวของคะตะลิสต์ (Catalyst) ปรากฏการณ์เช่นนี้เป็นการเคลื่อนย้ายสารจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งหรือคอลลอยด์เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) การเกาะจับของโมเลกุลบนผิวของสารอาจเกิดขึ้นด้วยแรงทางกายภาพหรือด้วยแรงทางเคมีหรือทั้งสองอย่างรวมกัน ส่วนกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส การดูดซับจะเกิดจากแรงทางเคมีเป็นหลัก

2. การฉายแสง (Irradiation process)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่ออนุภาคสารกึ่งตัวนำที่ถูกอนุภาคของแสง ซึ่งมีพลังงานเท่ากับหรือสูงกว่าช่องว่างพลังงาน (E_g) ตกกระทบผิวหน้าอนุภาคสารกึ่งตัวนำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้น เปลี่ยนที่อยู่จากวาเลนซ์แบนด์ (Valence band) ไปยังคอนดักชันแบนด์ (Conduction band) ทำให้เกิดสภาวะขาดแคลนอิเล็กตรอนที่วาเลนซ์แบนด์ เรียกว่า โฮล (Hole) ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ h^+ ส่วนอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปอยู่ในคอนดักชันแบนด์ แทนด้วยสัญลักษณ์ (e^-) ค่ะ ตะลึงถูกฉายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) จะทำให้เกิดคู่ของอิเล็กตรอน (e^-) และโฮล (h^+) ซึ่งอิเล็กตรอนและโฮลมีบทบาทในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันรีดักชัน (Oxidation-reduction) โดยอิเล็กตรอน (e^-) สามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับสารอินทรีย์ทำให้เกิดการลดออกซิเดชันสแตต (Oxidation state) ทำให้ความเป็นพิษของสารอินทรีย์ลดลงได้ดังนี้



ส่วนโฮล (h^+) สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์หรือไอออนต่าง ๆ ในน้ำได้ เช่น



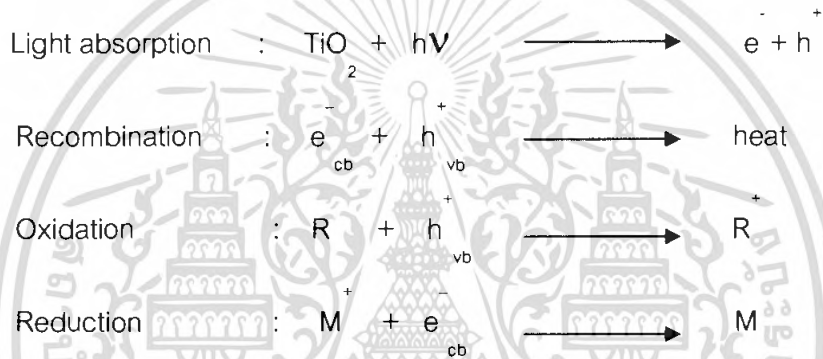
กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เร่งปฏิกิริยาที่ใช้แสง ซึ่งในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบนี้เป็นแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalyst) คือ การเร่งที่ผิวหน้าระหว่างสถานะที่ต่างกันของระบบที่มีมากกว่าหนึ่งสถานะ โดยทั่วไปโมเลกุลของสารตั้งต้นจะถูกดูดซับ (Absorbed) ไว้บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โมเลกุลที่ถูกดูดซับจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในแง่ของการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนและบางพันธะของโมเลกุลจะเริ่มสลาย

ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสนี้ เป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำ ทั้งนี้เพื่อที่จะให้เข้าใจการเกิดปฏิกิริยาจึงจำเป็นต้องศึกษาและทำความเข้าใจกับโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำจะมีแถบพลังงานที่น่าสนใจอยู่สองแถบ คือ แถบวาเลนซ์ และแถบการนำไฟฟ้า แถบพลังงานทั้งสองนี้จะถูกแยกจากกันโดยมีแถบช่องว่างพลังงาน (Band Gap) ซึ่งมีความกว้าง E_g กั้นอยู่

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในวัฏภาคน้ำหรือเอควียสเฟส (Aqueous phase) คือ กระบวนการการโฟโตออกซิเดชัน (Photooxidation) ของอนุภาคสารกึ่งตัวนำที่ถูกอนุภาคของแสง (Photo) ซึ่งมีพลังงานเท่ากับหรือสูงกว่าช่องว่างพลังงาน E_g ตกกระทบผิวหน้าอนุภาคสารกึ่งตัวนำ ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้น เปลี่ยนที่อยู่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำไฟฟ้า ทำให้เกิดสภาวะ

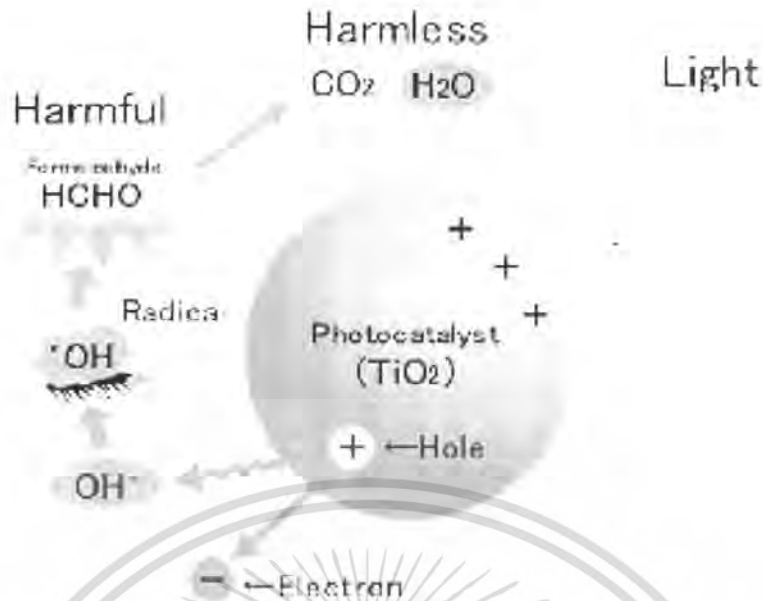
ขาดอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์เรียกว่า โฮล แทนด้วยสัญลักษณ์ h^+_{vb} ส่วนอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปอยู่ในแถบการนำไฟฟ้าแทนด้วยสัญลักษณ์ e^-_{cb} ซึ่ง h^+_{vb} และ e^-_{cb} สามารถที่จะกลับมาอยู่ในสถานะเดิมอีกได้ เรียกว่า รีคอมบิเนชัน (Recombination) ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญของกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน และที่ผิวหน้าระหว่างของแข็งและของเหลว (Solid-Liquid interface) อิเล็กตรอนสามารถที่จะเคลื่อนย้ายจากแถบการนำไฟฟ้าไปสู่ตัวรับอิเล็กตรอน (Acceptor) ในสารละลาย เรียกว่า รีดักชัน (Reduction) หรืออิเล็กตรอนจากผู้ให้ (Donor) ในสารละลายไปสู่โฮลในแถบวาเลนซ์ เรียกว่า ออกซิเดชัน (Oxidation) ซึ่งโฮลที่เกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี (Strong oxidation)

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยมีไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแสดงดังสมการ



เมื่อ $h\nu$ = อนุภาคของแสง (photon)
 h^+_{vb} = โฮลที่วาเลนซ์แบนด์
 e^-_{cb} = อิเล็กตรอนที่คอนดักชันแบนด์
 R = โมเลกุลของสารอินทรีย์
 M = โลหะหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แผนภาพแสดงการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันของไททาเนียมไดออกไซด์โดยใช้แสงยูวี [19]

อิเล็กตรอนที่คอนดักชันแบนด์จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ดูดซับไว้ที่ไททาเนียมไดออกไซด์ ทำให้โมเลกุลออกซิเจนเปลี่ยนเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลออกซิเจน ($O_2^{\cdot -}$) ส่วนโฮลที่วาเลนซ์แบนด์สามารถรับอิเล็กตรอนจากโมเลกุลสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในสารละลายได้โดยตรง หรือไฮดรอกซิล-ออกซิเจน (OH^{\cdot}) ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^{\cdot}) และยังทำให้โมเลกุลของน้ำที่ดูดซับไว้ที่ไททาเนียมไดออกไซด์เปลี่ยนเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลด้วยเช่นกัน ซึ่งไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่มีความไวในการทำปฏิกิริยาสูง และทำหน้าที่สลายโมเลกุลของสารอินทรีย์ในสารละลายที่ดูดซับไว้ของไททาเนียมไดออกไซด์ ส่วนซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลออกซิเจนสามารถที่จะทำปฏิกิริยาต่อไปได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ดังสมการ



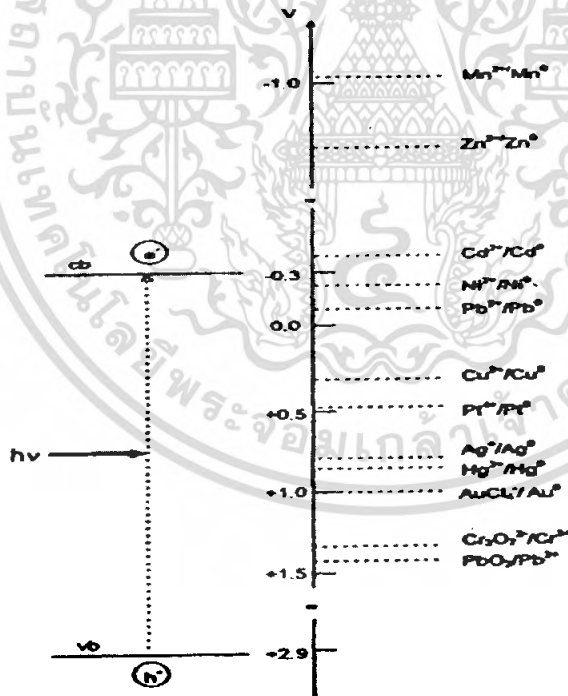
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้ โดยจะทำปฏิกิริยากับ e_{cb} ทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (Radical) ดังสมการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 ปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เกิดจากอิเล็กตรอนในคอนดักชันแบนด์ (e_{cb}) หรือโฮล (h^+) ในวาเลนซ์แบนด์ทำปฏิกิริยากับโลหะหนัก สารอินทรีย์ หรือ ไอออนต่าง ๆ ในน้ำนั้น จะต้องคำนึงค่าศักย์ไฟฟ้าในการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (reduction potential) ด้วย โดยปฏิกิริยารีดักชันของโลหะหนักจะเกิดขึ้นได้เมื่อศักย์ไฟฟ้าของคู่โลหะ M^+/M จะต้อง เป็นบวกมากกว่าหรือมีค่ามากกว่าศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กตรอนในคอนดักชันแบนด์ ดังแสดงในภาพที่ 2.10 จะเห็นได้ว่าตั้งแต่คู่โลหะ PbO_2/Pb^{2+} จนถึง Ni^{2+}/Ni^0 สามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับอนุภาค ไททาเนียมไดออกไซด์ซึ่งเป็นคะตะลิสต์ ส่วนคู่โลหะตั้งแต่ Cd^{2+}/Cd^0 จนถึง Mn^{2+}/Mn^0 ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ได้ และจะเห็นว่าโลหะทุกตัวสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ได้ เนื่องจากมีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ มากกว่าหรือมีค่าน้อยกว่าศักย์ไฟฟ้าของโฮลในวาเลนซ์แบนด์



รูปที่ 2.11 ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าในการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (reduction potential) ของคู่โลหะสัมพันธ์กับระดับพลังงานของคอนดักชันแบนด์และวาเลนซ์แบนด์ของไททาเนียมไดออกไซด์ที่ pH 0 [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิส (Photocatalyst)

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิส ได้แก่ ค่าพีเอช (pH) ความเข้มข้นของอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลาย (Dissolved oxygen) และความเข้มของแสง (Light intensity) (Venkatadri and Peters, 1993)

1. ค่าพีเอช (pH)

ประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะลิสขึ้นอยู่กับค่า pH ในสารละลายซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญในการทำปฏิกิริยาที่ค่า pH น้อยกว่า 3 และค่า pH ที่เปลี่ยนแปลงไป ยังทำให้ช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำประเภทโลหะออกไซด์ (Metal oxide) เปลี่ยนแปลงได้ 0.059 mV/pH unit (Staffot et al, 1996)

2. ความเข้มข้นของอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂ Dosage)

อนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ในสารละลาย ทำหน้าที่ให้ไฮดรอกซิลเรดิคัลทำปฏิกิริยาและเร่งให้เกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารปนเปื้อน และทำหน้าที่เป็นตัวกลางให้สารอินทรีย์ในสารละลายยึดเกาะ โดยการยึดเกาะของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ขึ้นอยู่กับปริมาณและขนาดของอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ ดังนั้นพื้นที่ผิวจึงเป็นปัจจัยหนึ่งในปัจจัยการควบคุมการเกิดปฏิกิริยา แต่ปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ที่มากเกินไปในสารละลายจะทำให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสลดลง เนื่องจากอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์จะไปขัดขวางแสงที่ส่องไปยังสารละลาย ทำให้ปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยอนุภาคแสงและปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลลดลง (Bing-Nan et al., 1999) ปริมาณไททาเนียมที่ใช้ในการศึกษาเรื่องโฟโตออกซิเดชัน ส่วนใหญ่มีความเข้มข้น 1–5 กรัมต่อลิตร (Venkatadri and Peter, 1993)

3. อุณหภูมิ

จากข้อมูลทางจุลศาสตร์ อุณหภูมินับว่าเป็นปัจจัยสำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยค่าคงที่ อัตราการทำปฏิกิริยาจากสมการของอาร์เรเนียส ได้ดังนี้

$$K = A e^{-E_a/RT}$$

เมื่อ K = ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา, นาที⁻¹ (Reaction rate constant, min⁻¹)

A = แฟคเตอร์ความถี่, นาที⁻¹ (Frequency factor, min⁻¹)

E_a = พลังงานกระตุ้น, จูล/โมล (Activation energy, J mol⁻¹)

R = ค่าคงที่ (8.314 จูล/โมล เคลวิน)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์, เคลวิน (Absolution temperature, K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสามารถหาพลังงานกระตุ้น (E_a) ได้จากความชันของกราฟลอการิทึมที่เขียนกราฟระหว่างค่าคงที่อัตราการทำปฏิกิริยา (K) กับค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ $1/T$ (langphasuk, 1997)

$$\ln K = \frac{-E_a + \ln A}{RT}$$

ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการทำปฏิกิริยาของ e_{cb}^{\cdot} และ h_{vb}^+ กับสารปนเปื้อนในสารละลายมีค่ามากกว่าอัตราการกลับมารวมตัวกันใหม่ของ e_{cb}^{\cdot} และ h_{vb}^+ และอาจเนื่องจากความถี่ในการชนกันของโมเลกุลมีมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และอาจเนื่องมาจาก การลดลงของพลังงานกระตุ้นในการทำปฏิกิริยา (Serpone and Pelizzetti, 1989)

4. ปริมาณออกซิเจนละลาย (Dissolved oxygen)

อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในสารละลายเพิ่มขึ้น ออกซิเจนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส เพราะออกซิเจนจะยึดเกาะบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาทำหน้าที่ยึดจับ e_{cb}^{\cdot} ที่คอนดักชันแบนด์ ทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์ไอออน และจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ต่อไปได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ด้วยเหตุนี้ ออกซิเจนจึงทำหน้าที่เป็นตัวยึดเวลาการกลับมารวมตัวกันใหม่ของ e_{cb}^{\cdot} และ h_{vb}^+ นอกจากนี้ ออกซิเจนยังทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical) อีกด้วย

5. ความเข้มของแสง (Light intensity)

เนื่องจากความเข้มของแสง (คือ พลังงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา หรืออนุภาคแสง 1 โฟตอน (Photon) ที่มีความถี่ ν มีพลังงาน $E = h\nu$ คิดเป็น 1 ควอนตัม) ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานของแสงโดยตรง ถ้าให้พลังงานของแสงทั้งหมดที่ตกกระทบหนึ่งหน่วยพื้นที่ของผิวน้ำโลหะเป็น E_f ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ} &= \frac{\text{พลังงานของแสงทั้งหมดที่ตกกระทบ}}{\text{พลังงานของแสง 1 โฟตอน}} \\ &= E_f / h\nu \end{aligned}$$

$$\text{จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบต่อ 1 วินาที} = \frac{\text{ความเข้มแสง}}{h\nu}$$

ซึ่งมีสมมุติฐานว่า 1 โฟตอน จะทำให้เกิด 1 โฟโตอิเล็กตรอน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าจำนวน

โฟโตอิเล็กตรอน \sim จำนวนโฟตอน \sim ความเข้มของแสง การที่จะกระตุ้นไททาเนียมไดออกไซด์ให้
เอกสารอินทรีย์อื่นอีกสารหนึ่งให้มีประสิทธิภาพสูงนั้น มีอยู่หลายปัจจัยที่ต้องพิจารณาค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิด e_{cb}^- และ h_{vb}^+ ต้องใช้ความยาวคลื่นประมาณ 390 นาโนเมตร หรือต้องใช้พลังงานอย่างน้อย 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ (Tseng and Haung, 1991) และมีรายงานของ Ollis และคณะ ในปี ค.ศ.1991 ได้สรุปผลของความเข้มแสงที่มีผลต่ออัตราการเกิด ปฏิกริยาไว้ว่าที่ระดับความเข้มแสงต่ำ อัตราการเกิดปฏิกริยาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสงที่ระดับความเข้มแสงปานกลาง อัตราการเกิดปฏิกริยาจะแปรผันตามรากที่สองของความเข้มแสง และที่ระดับความเข้มแสงสูง อัตราการเกิดปฏิกริยาจะไม่ขึ้นกับความเข้มแสงและอัตราการเกิดปฏิกริยาที่คงที่ เมื่อถึงจุดกำจำกัดของการเคลื่อนย้ายมวล (Quantum efficiency of degradation = สัดส่วนของการสลายตัวต่อจำนวนโฟตอนที่ใช้) จะมีค่าคงที่ที่ระดับความเข้มแสงต่ำ และจะแปรผกผันกับรากที่สองของความเข้มแสงที่ระดับความเข้มแสงปานกลางและจะแปร ผกผันกับความเข้มแสงที่ระดับความเข้มแสงสูง

2.5.3 คลื่นแสงที่พบในแสงอาทิตย์

แสงแดดประกอบด้วยแสงในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ ดังนี้

1. UVC มีความยาวคลื่น 100 - 290 นาโนเมตร แสงในช่วงนี้โดยมากจะถูกดูดซับโดยก๊าซโอโซนในบรรยากาศ ฉะนั้นแสงอุลตราไวโอเล็ตที่มาถึงโลกจะอยู่ระหว่างช่วงความยาวคลื่น 290 - 400 นาโนเมตร
2. UVB มีความยาวคลื่น 290 - 320 นาโนเมตร แสงในช่วงนี้ทำให้เกิดผิวเกรียมแดดและผิวหนังอักเสบ เป็นตัวหลักที่ทำให้ผิวแก่ก่อนวัย และทำให้เกิดมะเร็งผิวหนังได้บ่อยขึ้น
3. UVA มีความยาวคลื่น 320 - 400 นาโนเมตร แสงในช่วงนี้ทำให้เกิดผิวคล้ำแดดโดยกระตุ้นให้เกิดการสร้างเมลานิน (Melanin) แต่ไม่ทำให้เกิดการอักเสบ
4. Visible light มีความยาวคลื่น 400 - 800 นาโนเมตร
5. Infrared light มีความยาวคลื่น 800 - 1,700 นาโนเมตร

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Pitt Supapol, *et al.* [7] การเตรียมเส้นใยนาโนของทิตาเนียม (IV) ออกไซด์ (Titanium (IV) oxide) ด้วยวิธีโซล-เจลและเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต พร้อมทั้งศึกษาสมบัติของเส้นใยหลังผ่านการแคลซิเนชัน (Calcination) และผลของการโด๊ป จากสัณฐานวิทยาที่ปรากฏและโครงสร้างผลึกของเส้นใยทิตาเนียมที่เตรียมจากคอมโพสิตระหว่างพอลิไวนิลไพร์โรลิโดนกับทิตาเนียม (IV) ออกไซด์ (Polyvinylpyrrolidone ,PVP/titanium (IV) oxide composite nanofibers) จากสารละลายที่ประกอบด้วยพอลิไวนิลไพร์โรลิโดนและทิตาเนียมเตตระไอโซโพรอกไซด์ (Titanium tetraisopropoxide, TTIP) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุประกอบที่เตรียมได้อยู่ในช่วง 129-350 nm ผลของความเข้มข้นของพอลิไวนิลไพร์โรลิโดนและความเข้มข้นของสนามไฟฟ้ามีผลต่อขนาดและการกระจายตัวของเส้นใย การทำแคลซิเนชันของวัสดุประกอบที่อุณหภูมิ 500°C ส่งผลให้เส้นใยทิตาเนียมเกิดเป็นผลึกอนาเทสเพียงอย่างเดียว

K. Kajihara, *et al.* [20] การเตรียมฟิล์มทิตาเนีย (Titania film) ที่มีรูพรุนในระดับแมโคร (Macro) ด้วยวิธีโซล-เจล ดิพ-โคทติ้ง (Sol-gel dip-coating) จากสารละลายทิตาเนียมเตตระไอโซโพรอกไซด์กับพอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethyleneglycol, PEG) จากสัณฐานวิทยาที่ได้บอกถึงรูพรุนขนาดใหญ่ (Macroporous) ได้แก่ ขนาด การกระจายตัว และรูปร่างของรูพรุน สามารถควบคุมได้โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเอทิลีนไกลคอล ลดความเร็วและอุณหภูมิในการจุ่ม สัณฐานวิทยาของฟิล์มทิตาเนีย พิจารณาได้จากปัจจัยต่างๆ ดังนี้ (i) การลดลงของของเหลวเนื่องจากการระเหยของตัวทำละลาย (ii) การเชื่อมโยงเนื่องจากปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน (Polycondensation) และ (iii) การแยกกันระหว่างขอบเขตของเจลและตัวทำละลาย

D. Li and Y. Xia [21] ศึกษาการเตรียมเส้นใยนาโนของทิตาเนียด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตโดยมีการควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและรูพรุนของเส้นใย เมื่อทำการผสมสารละลายเอทานอล (Ethanol) กับพอลิไวนิลไพร์โรลิโดน (Polyvinyl pyrrolidone, PVP) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,300,000 Da) และทิตาเนียมเตตระไอโซโพรอกไซด์เข้าด้วยกันแล้วฉีดออกจากปลายเข็มด้วยแรงจากสนามไฟฟ้า วัสดุประกอบเส้นใยระดับนาโนที่เตรียมจากพอลิไวนิล-ไพร์โรลิโดนและทิตาเนียมไดออกไซด์ (Titaniumdioxide, TiO_2) ที่เป็นอสัณฐาน ที่พุ่งออกจากปลายเข็มจะเปลี่ยนเป็นอนาเทสเมื่อทำ แคลซิเนชันที่อุณหภูมิ 500°C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้น-ใยระดับนาโนที่เตรียมได้ถูกควบคุมให้อยู่ในช่วง 20-200 nm หลังการทำแคลซิเนชันที่อุณหภูมิ 500°C พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยนาโนและขนาดลดลงเนื่องจากการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูญเสียบอลิไวไนลไพโรริโดนและผลึกทิเทเนียออกไปจากเส้นใย จากการทดลองพบว่าเส้นใยจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของอลิไวไนลไพโรริโดนเพิ่มขึ้นและเมื่อความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราเร็วในการฉีกอลิไวไนลไพโรริโดนเพิ่มขึ้น ทำให้เส้นใยทิเทเนียม (IV) ออกไซด์ที่ได้มีความหนาเพิ่มขึ้น หากใช้ทิเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำๆจะทำให้เกิดเป็นเส้นใยเซรามิกที่บางลง จากการทดลองพบว่าสามารถใช้สารประกอบออกไซด์ (Oxide) ในการทำให้เกิดเส้นใยได้หลายชนิด เช่น SnO_2 , SiO_2 , Al_2O_3 และ ZrO_2

Jeerapong Watthanaarun, *et al* [22] ได้ศึกษาเตรียมเส้นใยทิเทเนียม (IV) ออกไซด์ (Titanium(IV)oxide) ที่โดปด้วยซิลิคอนและเส้นใยทิเทเนีย ด้วยวิธี โซล-เจลและเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตได้ โดยนำเส้นใยคอมโพสิตระหว่างอลิไวไนลไพโรริโดนกับทิเทเนีย (Polyvinylpyrrolidone,PVP/titania) ทั้งที่เติมและไม่เติมเตตระเอทิลออร์โทโรไซด์ (Tetraethyl-orthrosite,TEOS) มาทำแคลซิเนชัน (Calcination) ที่อุณหภูมิในช่วง $500\text{-}800^\circ\text{C}$ และศึกษาสมบัติการเป็นตัวกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalytic activity) ของเส้นใยทิเทเนียสังเคราะห์จากการสลายตัวของเมทิลีนบลู (MB) พบว่าเส้นใยทิเทเนียมีความเป็นผลึกอนาเทสลดลง ขณะที่ขนาดของผลึกเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการทำแคลซิเนชันเพิ่มขึ้น และหากทำแคลซิเนชันที่อุณหภูมิ 800°C พบว่าเส้นใยจะมีผลึกเป็นรูไทล์ (Rutile) เพียงอย่างเดียว การโดป (Dope) ซิลิคอนเป็นการเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนให้กับเส้นใย โดยจะทำให้ความเป็นอนาเทสเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณซิลิคอนที่โดปเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ 2% ของซิลิคอนที่โดป พบว่ามีความเป็นอนาเทสเพิ่มขึ้น 60% เมื่อทำแคลซิเนชันที่อุณหภูมิ 800°C เนื่องจากการโดปด้วยซิลิคอนทำให้ขนาดของผลึกลดลง แต่พื้นที่ผิวเมื่อตรวจวัดด้วยวิธี Brunauer-Emmett-Teller (BET) เพิ่มขึ้นนอกจากนี้การเกิดออกซิเดชันด้วยแสงของเมทิลีนบลูลงหลังจากการแคลซิเนชันที่อุณหภูมิ 500°C พบว่าเส้นใยทิเทเนียที่โดปด้วยซิลิคอนให้ผลดีกว่าทิเทเนียที่ใช้เป็นตัวอ้างอิง จึงสรุปได้ว่าซิลิคอนช่วยเพิ่มความสามารถในการเป็นตัวกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของเส้นใยทิเทเนีย

L. Zhang, *et al*. [23] ได้ศึกษาความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ TiO_2 โดยจะใช้ท่อ TiO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสำหรับการทำให้น้ำบริสุทธิ์ ซึ่งได้ทำการพัฒนาเพื่อไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียซึ่งมีสารละลายเจือจางแต่เป็นพิษผสมอยู่ ส่วนสำคัญของท่อปฏิกรณ์ประกอบด้วยท่อเซรามิกทรงกระบอกโดยพื้นผิวชั้นในเคลือบด้วย Pt-load ฟิล์ม TiO_2 และหลอดแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet,UV) มีกำลัง 30 W ซึ่งวางตรงกลางตามแนวของท่อ โดยน้ำจะผ่านท่อปฏิกรณ์ช้าๆ โดยการหาความสามารถของท่อปฏิกรณ์ จากการสลายตัวของสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟีนอล (Phenol) เตตระคลอโรเอทิลีน (Tetrachloroethylene ,TCE) และบิสฟีนอล เอ (Bisphenol A) ผลที่ได้คือสารประกอบอินทรีย์ ทุกตัวสลายตัวได้ในเวลาที่สั้นในถังปฏิกรณ์ โดยมีการคาดหวังว่าท่อบริการนี้นำไปใช้ในการทำให้น้ำบริสุทธิ์

ชวิศร์ ภรณ์เมธากุล [18] โททาเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะลิสต์ในรูปแบบลิกอนาเทสสามารถสลายสารมลพิษในน้ำและอากาศโดยใช้แสงได้ แต่มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจำกัดในช่วงของแสงยูวี จึงสามารถนำมาปรับช่วงของการดูดกลืนแสงให้อยู่ในช่วงวิสิเบิลซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของแสงอาทิตย์ได้ โดยการปรับแต่งพื้นผิวของโททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธี doping ด้วยอะตอมของธาตุซัลเฟอร์จากไทโอยูเรีย โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างโททาเนียม-ไอโซโพรพอกไซด์กับไทโอยูเรียเป็น 1:4 และเผาภายใต้บรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 °C จากนั้นนำมาพัฒนาประสิทธิภาพของโททาเนียมไดออกไซด์คะตะลิสต์โดยใช้การดูดซับด้วยไอออนของโลหะทรานสิชัน ได้แก่ Fe^{3+} , Cr^{3+} และ V^{3+} หลังจากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Brunauer-Emmett-Teller (BET), X-ray Powder Diffraction (XRD) และ UV-Visible Spectroscopy (UV-Vis) พบว่าอะตอมของธาตุซัลเฟอร์สามารถเลื่อนแถบการดูดกลืนแสงของโททาเนียมไดออกไซด์ให้เข้ามาอยู่ในช่วงวิสิเบิลได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังพบอีกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาที่สูงขึ้นทำให้การดูดกลืนแสงในช่วงวิสิเบิลมีประสิทธิภาพมากขึ้น และคะตะลิสต์ที่เตรียมได้ถูกนำมาทดสอบประสิทธิภาพในการสลายสารอินทรีย์โดยใช้เมทิลีนบลูเป็นสารทดสอบ พบว่า S-doped TiO_2 ที่ปรับแต่งผิวด้วย V^{3+} 2.84 % สามารถทำให้เกิดการสลายตัวของสารละลายเมทิลีนบลูได้สูงสุด 95.25 %

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 สารเคมี

1. ทิเทเนียมเตตระไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (TTIP 97%; เกรดวิเคราะห์) บริษัท Sigma-Aldrich
2. พอลิเอไมด์ – 6 (PA – 6 , MW = 17,000 Da) บริษัท Asia Fibre Public Co.Ltd (Thailand)
3. กรดฟอร์มิก (HCOOH; 85% ; เกรดวิเคราะห์) บริษัท Fisher Scientific UK Limited
4. สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂ 30%; เกรดวิเคราะห์) บริษัท Sigma-Aldrich
5. สารละลายเมทิลีนบลู (Methylene blue) บริษัท Sigma-Aldrich

3.2 อุปกรณ์

1. บริษัทเครื่องแก้ว
2. จุกยาง
3. แผ่นฟิล์มพาราฟิน
4. ขวดกั้นกลมพร้อมที่จับ
5. แท่งแม่เหล็ก
6. เครื่องปั่นกวน
7. เครื่องชั่ง
8. นาฬิกาจับเวลา
9. อะลูมิเนียมฟอยด์
10. หลอดฉีดยาขนาด 10 มิลลิลิตร
11. เข็มฉีดยาเบอร์ 26 (เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.7 มิลลิเมตร)
12. เครื่องแปลงไฟฟ้ากระแสตรง
13. เครื่องให้ความร้อน
14. เครื่อง LEO 1455 VP Scanning electron microscope (SEM)
15. Bruker D8 Advance X-ray diffractometer (XRD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16. Nicolet Impact 400 Fourier-transformed infrared spectrophotometer (FT-IR)
17. Brookfield DV-III Viscometer
18. SUNTEX Conductivity meter
19. PEACOCK Micrometer
26. Perkin-Elmer Lambda 650 UV-Visible scanning spectroscopy
27. UV reactor

3.3 การทดลอง

3.3.1 การเตรียมเส้นใยพอลิเอไมด์-6 ด้วยไฟฟ้าสถิต [4]

ส่วนที่ 1 การเตรียมสารละลายที่ใช้ปั่นเส้นใย

1. สารละลายที่ใช้ปั่นเป็นเส้นใย (34%w/v พอลิเอไมด์-6 (PA-6) ใน 85%กรดฟอร์มิก) สามารถเตรียมสารละลายได้โดยการนำพอลิเอไมด์-6 6.8 กรัม ใส่ลงในสารละลายกรดฟอร์มิกเข้มข้น 85% โดยน้ำหนัก ปริมาตร 20 มิลลิลิตร
2. พอลิเอไมด์-6 ใช้เวลาละลายในกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ส่วนที่ 2 ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของสารละลายที่ใช้ในการปั่นกวนเส้นใย

1. ทำการตรวจวัดความหนืดของสารละลายโดยเครื่อง Brookfield DV-III viscometer โดยใช้มาตรฐาน ASTM D 2857-87 ในการทดสอบ

ส่วนที่ 3 การปั่นเส้นใยโดยใช้กระแสไฟฟ้า

1. ตั้งเครื่องมือสำหรับการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ดังรูป 3.1 โดยเอาขั้วบวกจาก DC power supply ต่อที่เข็มของหลอดฉีดยาที่ใส่สารละลายในลอน 6 (Nylon 6) โดยใช้หัวเข็มที่เป็นสแตนเลส (เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.7 มิลลิเมตร) และขั้วลบต่อที่ดรัม (Drum) นำอลูมิเนียมฟอยล์หุ้มที่ดรัม เพื่อใช้เป็นแผ่นรองรับเส้นใย (Collector) ใช้สนามไฟฟ้าที่มีความเข้ม 21 kV และระยะห่างระหว่างหัวเข็มและแผ่นรองรับ 10 เซนติเมตร



รูปที่ 3.1 การตั้งเครื่องมือสำหรับการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

2. ทำการปั่นเส้นใยเป็นเวลา 48 ชั่วโมง

3.3.2 การเคลือบผิวเส้นใยพอลิเอไมด์-6 ด้วยสารละลาย ทีเทเนียมเตตระไอโซเปอร์ออกไซด์ (TTIP)

ส่วนที่ 1 การเคลือบผิวเส้นใยพอลิเอไมด์-6 ด้วยสารละลายทีเทเนียมเตตระไอโซเปอร์ออกไซด์ (TTIP)

ทำการตั้งเครื่องมือสำหรับการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตดังรูปที่ 3.1 โดยนำขั้วบวกจาก DC power supply ต่อที่ปลายเข็มของหลอดฉีดยาซึ่งบรรจุสารละลายทีเทเนียมเตตระไอโซเปอร์ออกไซด์ 97% (TTIP 97%) ปริมาตร 3 มิลลิลิตร โดยใช้หัวเข็มที่เป็นสแตนเลส (เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอก 0.7 มิลลิเมตร) และขั้วลบต่อที่ดรัม (Drum) โดยนำแผ่นเส้นใยที่ได้มาวางไว้บนดรัม ใช้สนามไฟฟ้าที่มีความเข้ม 26 kV และระยะห่างระหว่างหัวเข็มกับแผ่นรองรับ 4 เซนติเมตร

ส่วนที่ 2 ตรวจสอบลักษณะของทีเทเนียที่เคลือบบนผิวเส้นใย PA-6

1. สัณฐานวิทยาและขนาดของทีเทเนียที่เคลือบบนผิวเส้นใย PA-6 จะถูกตรวจสอบด้วยเครื่อง LEO 1455 VP Scanning Electron Microscope (SEM) โดยทำการเคลือบผิวตัวอย่างด้วย

ทองคำก่อนทำการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ความเป็นผลึกของทีเทเนียบนเส้นใยจะถูกตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Bruker D8 Advance X-ray Diffractometer (XRD)

3.3.3 การปรับปรุงพื้นผิวของทีเทเนียบนเส้นใยที่เคลือบบนเส้นใย PA-6

ส่วนที่ 1 การปรับปรุงพื้นผิวของทีเทเนียบนเส้นใยที่เคลือบบนเส้นใย PA-6

1. นำเส้นใยพอลิเอไมด์-6 ที่เคลือบด้วยทีเทเนียบนเส้นใยในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 30% โดยน้ำหนัก (Hydrogen peroxide, H_2O_2) ปริมาตร 20 ml ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

ส่วนที่ 2 ตรวจสอบลักษณะของการปรับปรุงพื้นผิวของทีเทเนียบนเส้นใย PA-6 โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

1. ความเป็นผลึกของทีเทเนียบนเส้นใยที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะถูกตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Bruker D8 Advance X-ray Diffractometer (XRD)
2. สัณฐานวิทยาและขนาดของทีเทเนียบนเส้นใยที่เคลือบบนเส้นใย PA-6 และทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะถูกตรวจสอบด้วยเครื่อง LEO 1455 VP Scanning Electron Microscope (SEM) โดยทำการเคลือบผิวตัวอย่างด้วยทองคำก่อนทำการวิเคราะห์

3.3.4 การ Aging ทีเทเนียบนเส้นใย PA-6 และทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ส่วนที่ 1 การก่อดผลึกของทีเทเนียบนเส้นใยที่เคลือบบนเส้นใย PA-6 และทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยใช้น้ำร้อน นำเส้นใยที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวแล้วแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 5, 6 และ 7 วัน

ส่วนที่ 2 การตรวจสอบลักษณะของทีเทเนียบนเส้นใย PA-6 หลังทำการก่อดผลึกด้วยน้ำกลั่น

1. ทิ้งทีเทเนียบนเส้นใยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง
2. ความเป็นผลึกของทีเทเนียบนเส้นใยที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์-

ออกไซด์ หลังทำการก่อกผลึกจะถูกตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Bruker D8 Advance X-ray Diffractometer (XRD)

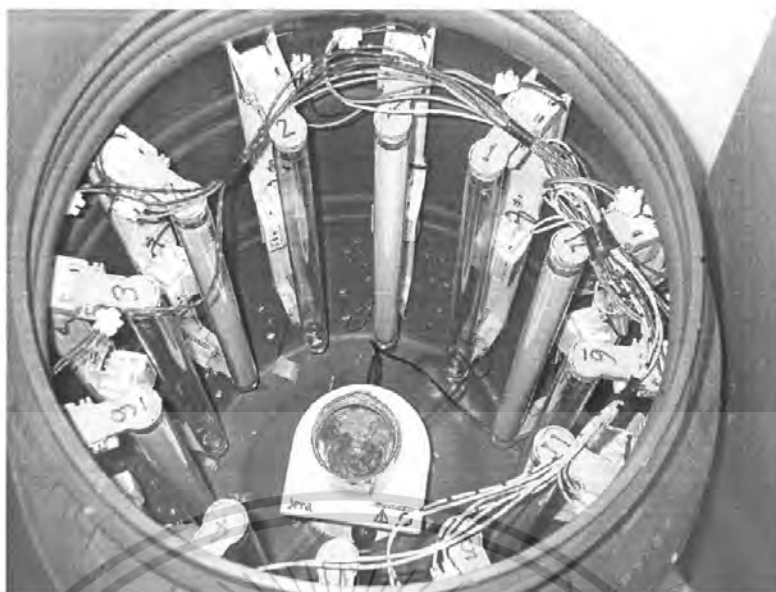
3. สัณฐานวิทยาและขนาดของทึเทเนียที่เคลือบบนผิวเส้นใย PA-6 และทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หลังทำการก่อกผลึกจะถูกตรวจสอบด้วยเครื่อง LEO 1455 VP Scanning Electron Microscope (SEM) โดยทำการเคลือบผิวตัวอย่างด้วยทองคำก่อนทำการวิเคราะห์

3.4 การเกิดปฏิกิริยาฟิโตออกซิเดชัน (Photooxidation) ของเมทิลีนบลู (Methylene Blue) [22]

การเกิดออกซิเดชันด้วยแสง (Photooxidation) ของเมทิลีนบลู (Methylene Blue, MB; $C_{16}H_{18}N_3S$) โดยใช้เส้นใยทึเทเนียสังเคราะห์เป็นตัวกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสง (Photocatalytic activity)

1. นำทึเทเนียที่เตรียมได้ 0.1 กรัม ใส่ลงในสารละลายเมทิลีนบลูเข้มข้น 10 ppm ปริมาตร 200 มิลลิลิตร นำมาวางในแก้วโบโรซิลิเกต (Borosilicate glass) ภายใต้สภาวะปั่นกววนด้วยความเร็วคงที่ พร้อมทั้งเก็บไว้ในที่มืดเป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนนำไปทดสอบ

2. นำเมทิลีนบลูที่เตรียมได้วางลงในถังปฏิกรณ์ยวี่ที่มีหลอดปรอท (Mercury lamp) ทั้งหมด 6 หลอดแต่ละหลอดมีความยาวคลื่นประมาณ 300-400 nm ที่ 14 mW.cm^{-2} ซึ่งติดรอบๆ ถังปฏิกรณ์ เพื่อเป็นแหล่งกำเนิดรังสี UV พร้อมทั้งควบคุมอุณหภูมิของสารละลายให้คงที่เท่ากับ $35 \pm 1^\circ\text{C}$ ดังรูปที่ 3.2

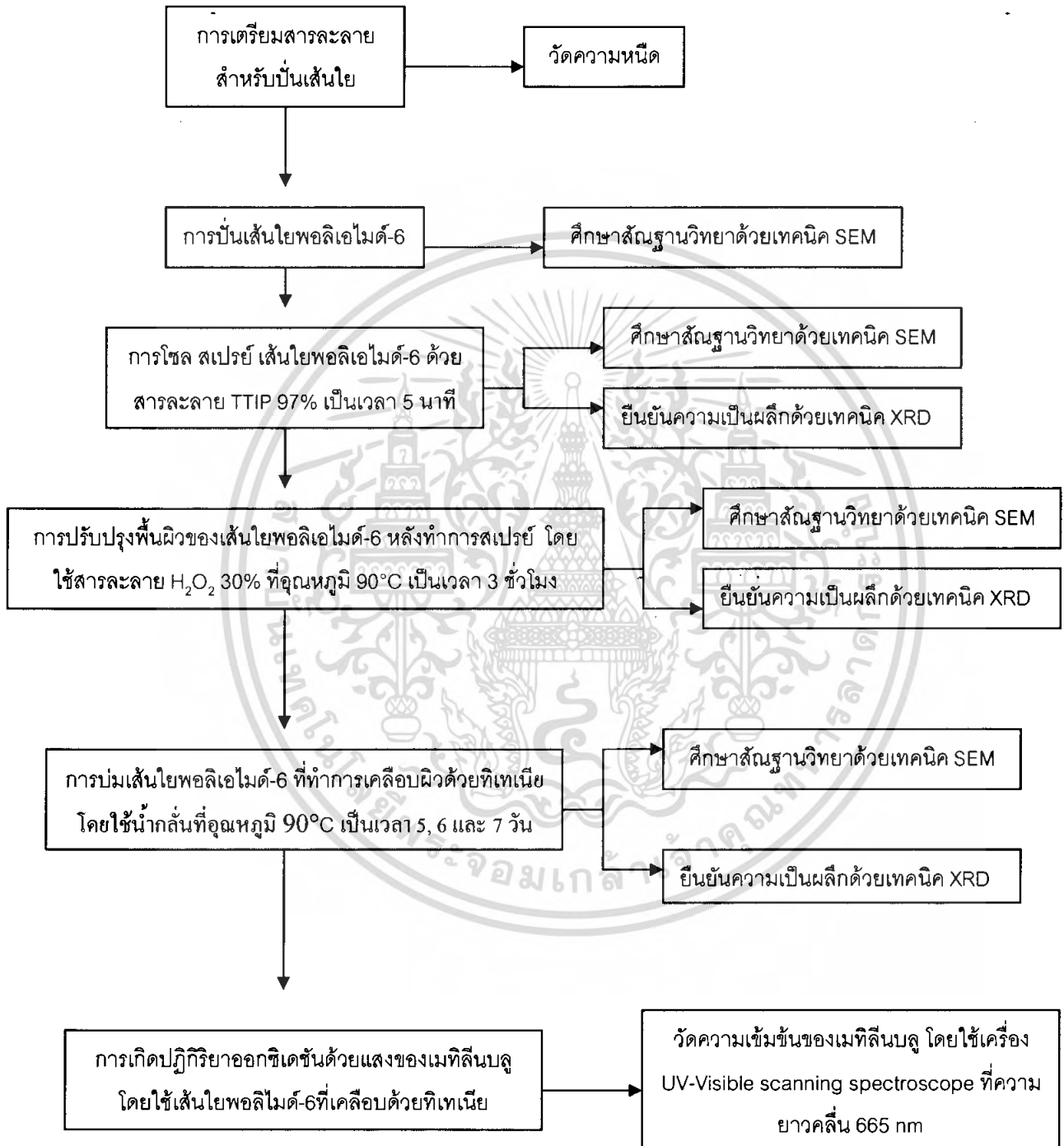


รูปที่ 3.2 ถังปฏิกรณ์ยูวี

3. ทำการเก็บตัวอย่างสารละลายเมทิลีนบลูปริมาตร 5 ml ทุกๆ 30 นาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง
4. ทำการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลูจากตัวอย่างที่เก็บได้ โดยวัดการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ความยาวคลื่น 665 nm ด้วยเครื่อง Perkin-Elmer Lambda 650 UV-Visible scanning spectrophotometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 แผนผังการทดลอง



รูปที่ 3.3 แผนผังแสดงการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

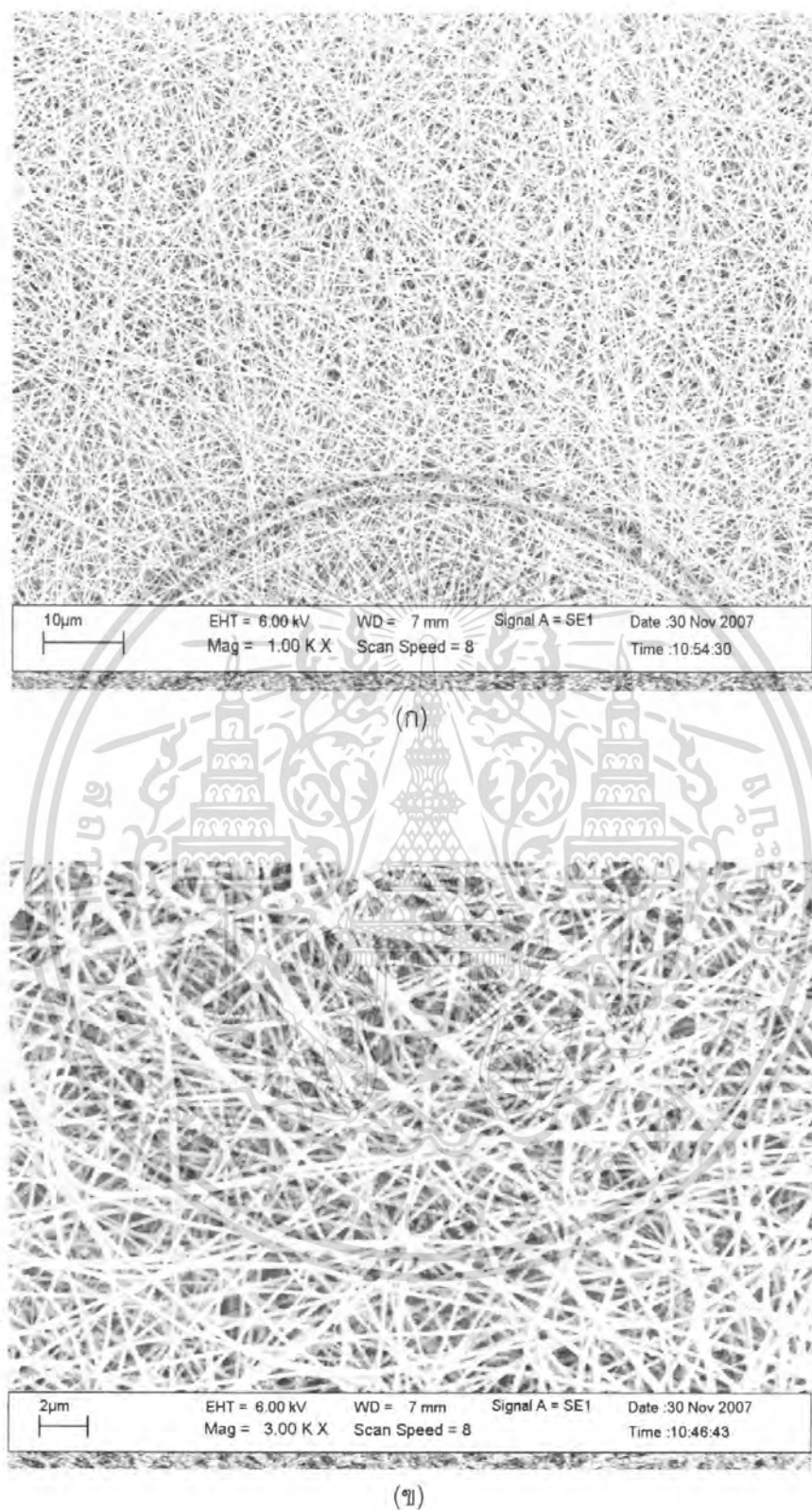
ศึกษาการเตรียมและการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงของเส้นใยพอลิเอไมด์-6 (Polyamide-6) ที่เคลือบด้วยทีเทเนียโดยสามารถเตรียมเส้นใยพอลิเอไมด์-6 จากเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตของ 34% w/v พอลิเอไมด์-6 (PA-6) ในสารละลายกรดฟอร์มิก (Formic acid) เข้มข้น 85% หลังจากนั้นทำการเคลือบทีเทเนียลงบนเส้นใยพอลิเอไมด์-6 ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต โดยเทคนิค โซล-สเปรย์โคทติ้ง (Sol-pray coating) ทีเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ (TTIP) 97% ลงบนแผ่นเส้นใยและนำไปทำปฏิกิริยากับสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) 30% ที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และทำการบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 5, 6 และ 7 วัน ในขั้นสุดท้ายทำการนำไปวัดการสลายตัวของสารละลายเมทิลีนบลูเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

4.1 การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning Process)

การวัดค่าความหนืดของสารละลาย PA-6 34% (w/v) ในสารละลายกรดฟอร์มิกโดยใช้เครื่อง Brookfield DV-III viscometer ตามมาตรฐาน ASTM D 2857-87 สามารถวัดค่าความหนืดของสารละลายได้เท่ากับ 910 ± 10 cP

เมื่อทำการปั่นเส้นใย PA-6 34% w/v ในสารละลายกรดฟอร์มิกเข้มข้น 85% ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตโดยจะให้ความต่างศักย์ (Voltage) เท่ากับ 21 kV และระยะห่างระหว่างแผ่นรองรับกับปลายเข็มเท่ากับ 10 เซนติเมตร ทำการปั่นเส้นใยเป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วทำการวัดความหนาของแผ่นเส้นใย PA-6 ที่ได้ด้วยเครื่องไมโครมิเตอร์ (Micrometer) พบว่าความหนาของแผ่นเส้นใยเฉลี่ยเท่ากับ 18.25 ± 0.7 μ m

เมื่อทำการการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของเส้นใย PA-6 โดยใช้เทคนิค SEM (แสดงในรูป 4.1) พบว่าได้เส้นใยที่เล็กเรียบและไม่มีปืด (Bead) มีลักษณะเรียงตัวแบบสุ่มไม่ถักทอ (Non-woven mat) เส้นใยมีขนาดสม่ำเสมอ

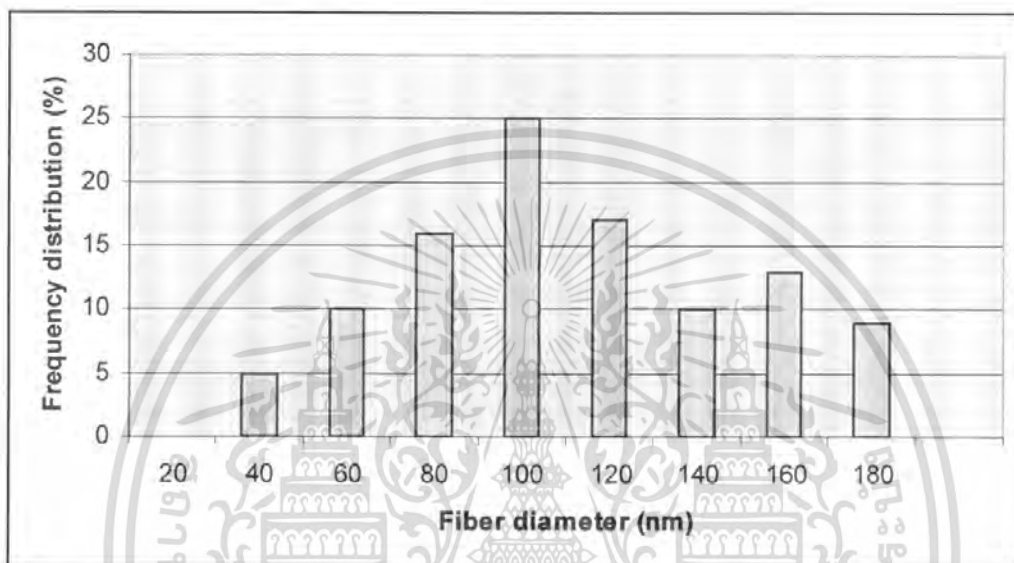


รูปที่ 4.1 ภาพ SEM ของเส้นใย PA-6 ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (ก) กำลังขยาย 1,000X, (ข) กำลังขยาย 3,000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเส้นใย PA-6 ที่ได้จะถูกวัดโดยใช้โปรแกรม SemAfore[®] 4.0 ซึ่งจากการสุ่มเลือกเส้นใยมา 50 เส้น จากรูปของ SEM ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย PA-6 ที่ได้จากเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเท่ากับ 127.3 ± 0.5 nm

การกระจายตัวของขนาดเส้นใย PA-6 ที่ได้จากเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต จะอยู่ในช่วงระหว่าง 40-180 nm ซึ่งมีความถี่สูงสุดในช่วง 100 nm ดังที่แสดงในรูปที่ 4.2

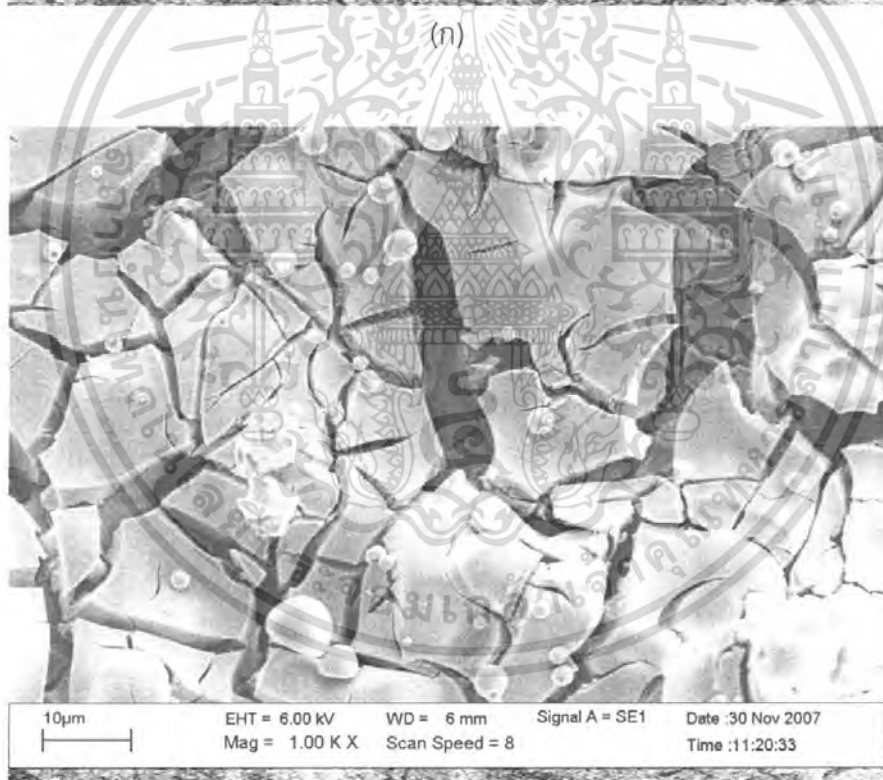
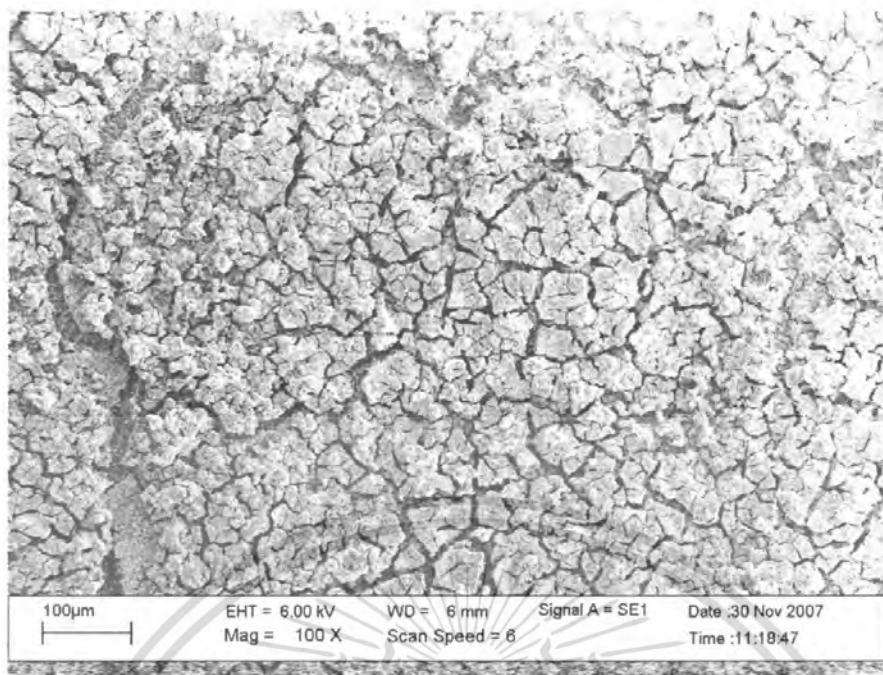


รูปที่ 4.2 การกระจายตัวของขนาดเส้นใย PA-6 ที่ได้จากเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

4.2 กระบวนการโซล-สเปรย์โคทติ้ง (Sol-spray coating process)

การเคลือบทีเทเนียงบนผิวเส้นใย PA-6 ที่ได้จากเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต โดยการสเปรย์ (Spray) สารละลายทีเทเนียมเตตระไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (TTIP) 97% และมีการให้ความต่างศักย์เท่ากับ 26 kV และระยะห่างเท่ากับ 4 เซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที แล้วทำการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ของพื้นผิวของเส้นใย PA-6 หลังจากทำการสเปรย์ (Spray) โดยใช้เทคนิค SEM พบว่าหลังผ่านการสเปรย์แล้วพื้นผิวของเส้นใย PA-6 จะถูกปกคลุมด้วยทีเทเนียมซึ่งจะมีการแตกที่พื้นผิวเกิดขึ้นอาจเนื่องมาจากการระเหยตัวของตัวทำละลายทำให้เกิดการหดตัวและเกิดการแตกที่พื้นผิวโดยเม็ดปิด (Bead) หรือก้อนกลมของทีเทเนียมขนาดประมาณ 1-10 ไมครอน กระจายอยู่บนพื้นผิวเล็กน้อย ดังแสดงจากรูปกำลังขยายสูง แสดงดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

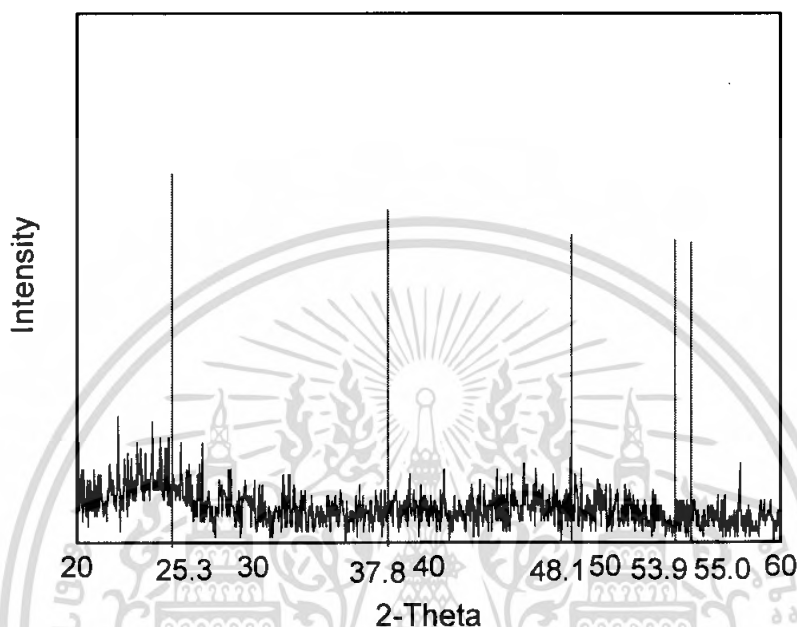


(ข)

รูปที่ 4.3 ภาพ SEM ของเส้นใย PA-6 ที่ถูกสเปรย์ด้วย TTIP 97% (ก) กำลังขยายต่ำ (100X), (ข) กำลังขยายสูง (1,000X)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาความเป็นผลึกของทีเทเนียที่เคลือบบนเส้นใย PA-6 โดยใช้เทคนิค XRD ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าไม่ปรากฏพีคที่ 25.3° , 37.8° , 48.1° , 53.9° และ 55.0° ใน 2 Theta ซึ่งจะตรงกับพีคของอนาเทส แสดงให้เห็นว่าเส้นใยที่เคลือบด้วยทีเทเนียที่เตรียมได้ยังคงอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) หรือยังไม่มีความเป็นผลึกอนาเทสที่ต้องการเลย



รูปที่ 4.4 กราฟ XRD ของเส้นใย PA-6 หลังผ่านการสเปรย์ (Spray) ด้วยทีเทเนีย (ก่อนการบ่ม)

4.3 การปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยพอลิเอไมด์-6 ที่เคลือบด้วยทีเทเนีย

เส้นใย PA-6 เคลือบด้วยสารละลายทีเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ (TTIP) 97% ที่ได้ถูกนำไปทำปฏิกิริยากับสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, H_2O_2) เข้มข้น 30% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อปรับปรุงพื้นผิวก่อนที่จะเกิดการก่อผลึก ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 พบว่าทีเทเนียที่เคลือบบนเส้นใยมีผิวเรียบ พบรอยแตกอันเนื่องจากการระเหยตัวของตัวทำละลายเหมือนสัณฐานวิทยาหลังการเคลือบด้วยทีเทเนียแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 ที่รอยแตกจะเห็นสัณฐานวิทยาของเส้นใย PA-6 ทำให้ปริมาณความหนาของฟิล์มทีเทเนียที่เคลือบอยู่มีความหนาประมาณ 1-2 ไมครอน สังเกตได้ว่าความหนาของฟิล์มลดลง (เปรียบเทียบรูปที่ 4.3 ข และ 4.5 ข) คาดว่าเนื่องจากชั้นทีเทเนียซึ่งเคลือบอยู่บนเส้นใย PA-6 นั้นผิวชั้นนอกอาจเกิดปฏิกิริยาหลุดออกไปเหลือเพียงชั้นในที่อยู่ติดกับเส้นใยที่มี

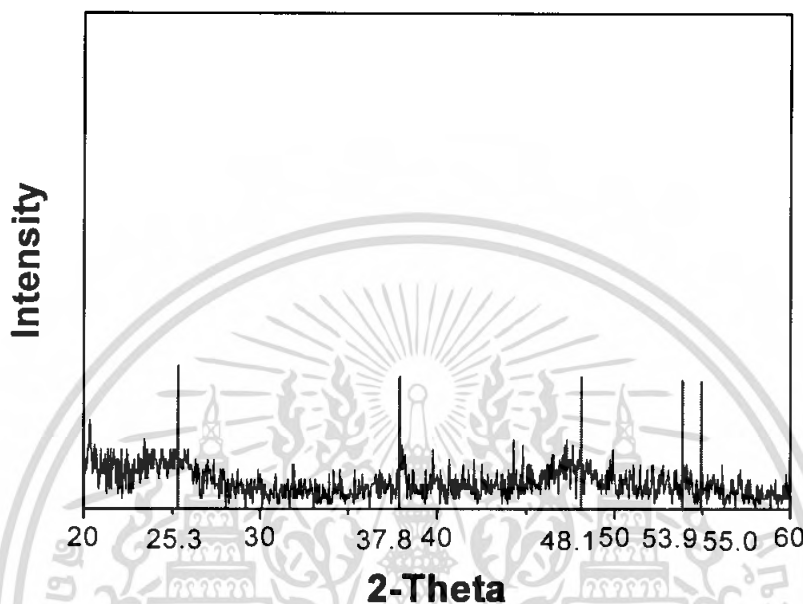
การยึดติดที่ดี อาจเป็นเพราะความเป็นกรดของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของทีเทเนียทำให้ผิวของทีเทเนียชั้นนอกหลุดออกไป เป็นผลให้ฟิล์มที่เคลือบบางลง



รูปที่ 4.5 ภาพ SEM ของเส้นใย PA-6 เคลือบด้วยสารละลายทีเทเนียมเตตระไฮโซเปอร์ออกไซด์ (TTIP) 97% ถูกนำไปทำปฏิกิริยากับสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 30% (ก) กำลังขยาย 200X, (ข) กำลังขยาย 1,000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการศึกษาโครงสร้างความเป็นผลึกของทีเทเนียที่เคลือบบนเส้นใย PA-6 หลังทำปฏิกิริยากับ สารละลาย H_2O_2 ด้วยเทคนิค XRD สามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 4.6 พบว่าเริ่มมีพีคที่แสดงถึงความเป็นผลึกอนาเทสปรากฏขึ้นเล็กน้อย โดยดูได้จากพีคที่ตำแหน่ง 25.3° , 37.8° , 48.1° , 53.9° และ 55.0° ใน 2θ ซึ่งจะตรงกับพีคของอนาเทส

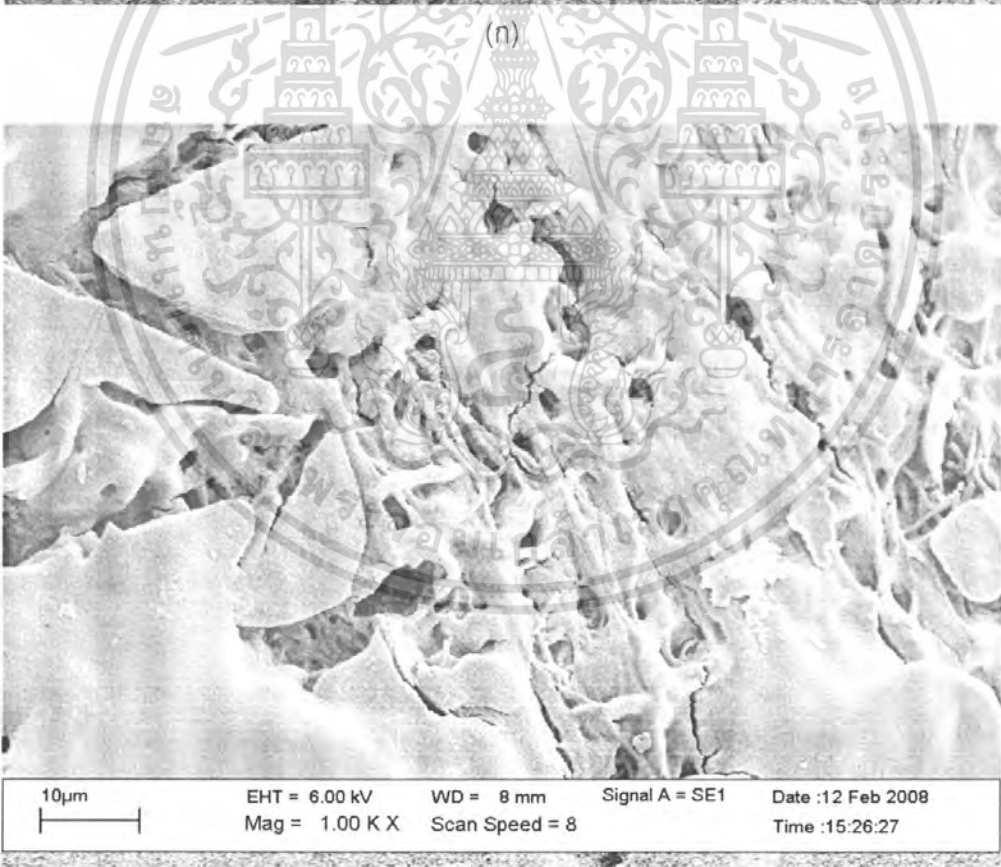
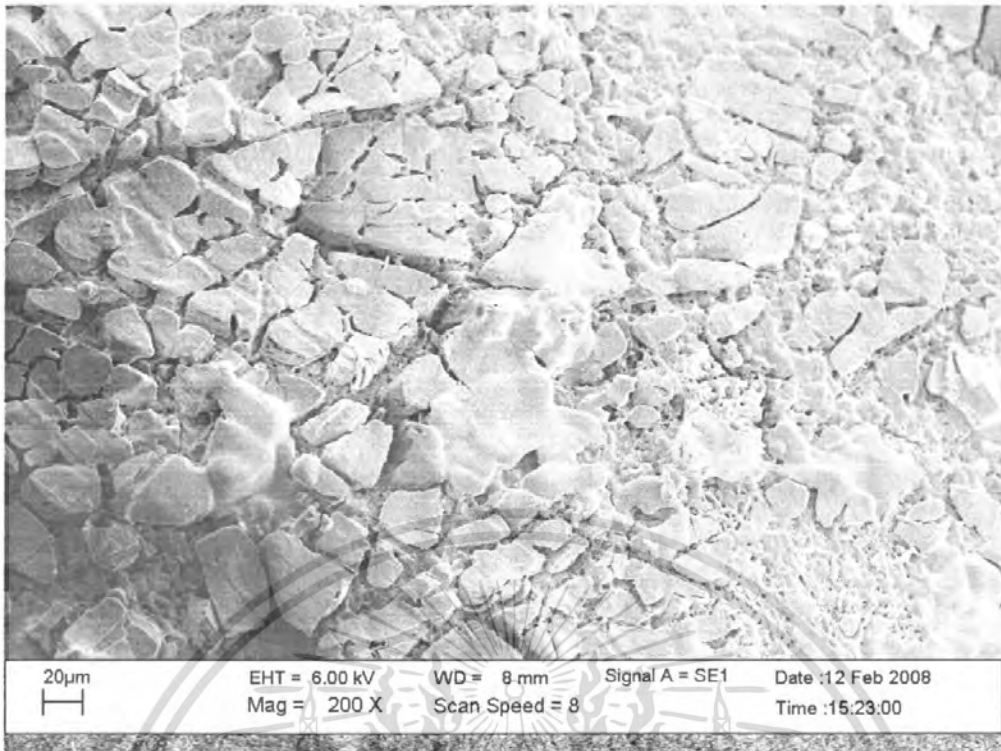


รูปที่ 4.6 กราฟ XRD เส้นใย PA-6 ที่เคลือบด้วยสารละลายทีเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ (TTIP) 97% ถูกนำไปทำปฏิกิริยากับสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 30%

4.4 การบ่มด้วยน้ำร้อน

การทำให้เกิดผลึกของทีเทเนียที่เคลือบบนเส้นใย PA-6 ทำได้โดยการปรับปรุงพื้นผิวโดยการบ่ม (Aging) ในน้ำร้อน โดยจะนำเส้นใย PA-6 ที่เคลือบด้วยทีเทเนียหลังจากปรับปรุงพื้นผิวมาทำการบ่มในน้ำที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 5, 6 และ 7 วัน พบว่าสัณฐานวิทยาของพื้นผิวของทีเทเนียที่เคลือบบนเส้นใย PA-6 หลังจากปรับปรุงพื้นผิวและทำการบ่มในน้ำที่อุณหภูมิ 95°C ที่เวลา 5, 6 และ 7 วัน ทำการศึกษาโดยเทคนิค SEM ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.7, 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ โดยพบว่าหลังจากที่ทำการบ่มที่อุณหภูมิ 95°C พื้นผิวของทีเทเนียที่เคลือบบนเส้นใย PA-6 นั้นจะหลุดไปเหลืออยู่เพียงชั้นที่อยู่ติดกับเส้นใยซึ่งมีการยึดติดที่ดี โดยพื้นผิวของแผ่นเส้นใยที่เคลือบด้วยทีเทเนียหลังผ่านการบ่มเป็นเวลา 7 วันจะมีความหนาของชั้นทีเทเนียมมากกว่าที่ 5 และ 6 วัน เนื่องจากการตกตะกอนกลับลงมาของทีเทเนียมมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



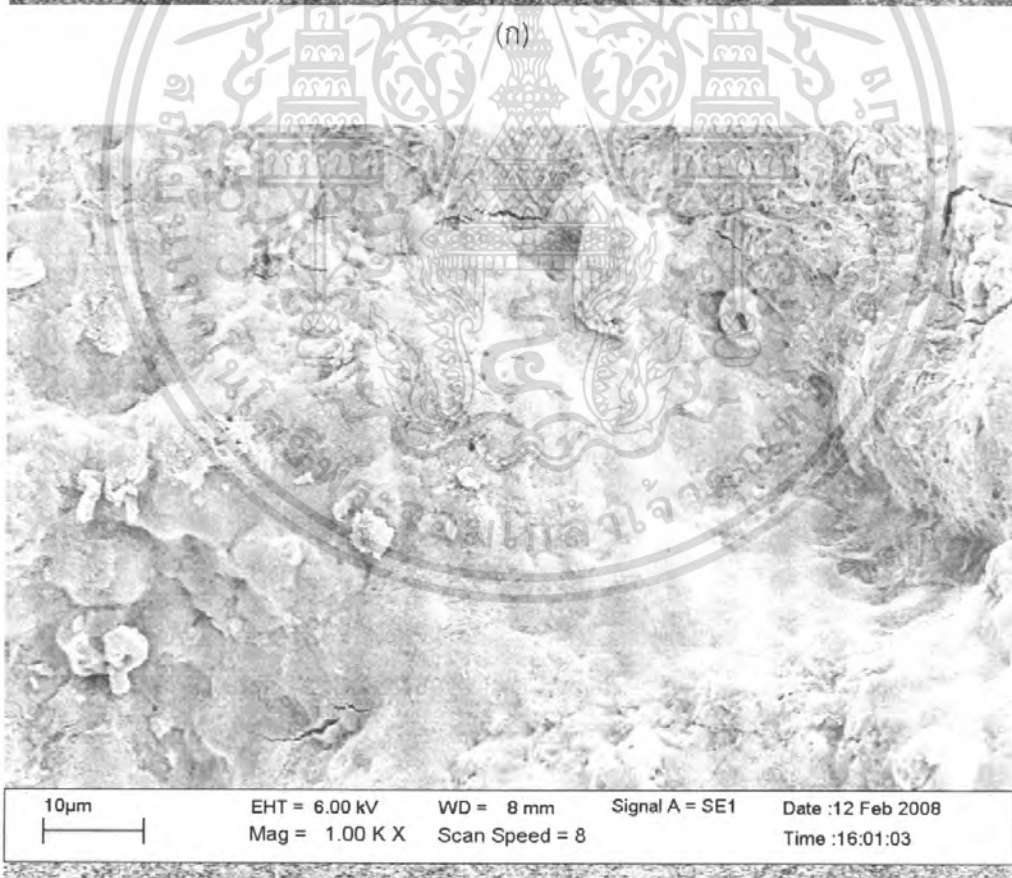
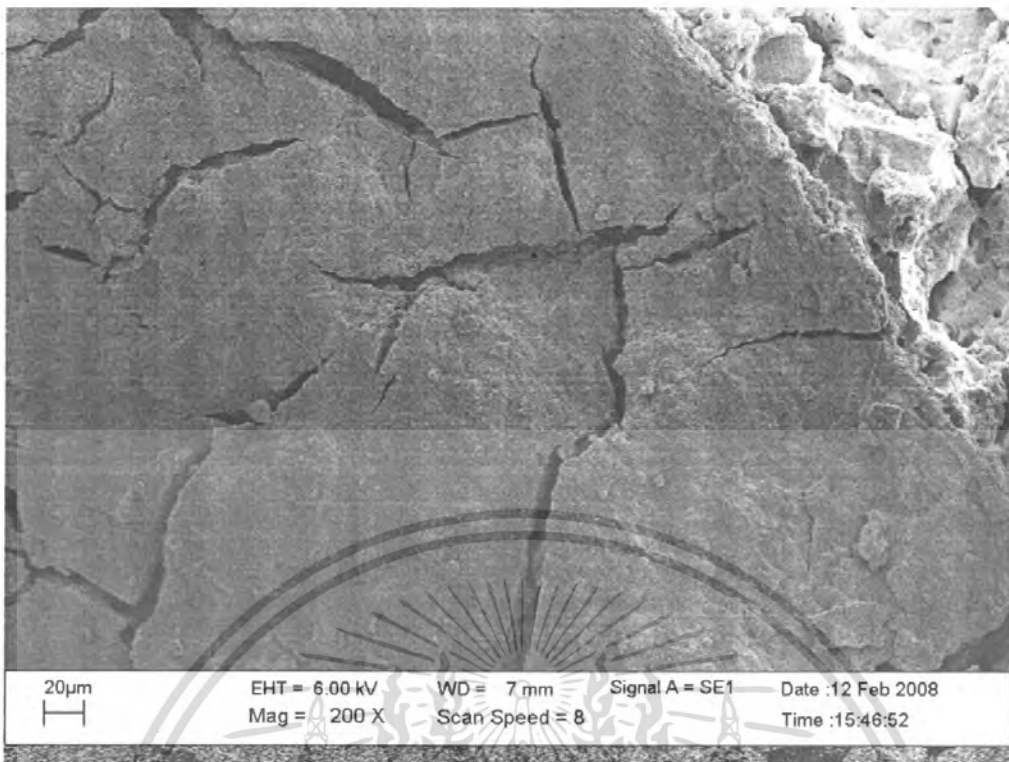
(ข)

รูปที่ 4.7 ภาพ SEM ของเส้นใย PA-6 ที่เคลือบด้วยทีเทเนียหลังจากปรับปรุงพื้นผิวและทำการบ่ม

ในน้ำที่อุณหภูมิ 95 °C ที่เวลา 5 วัน (ก) กำลังขยายต่ำ (200X) (ข) กำลังขยายสูง (1000X)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

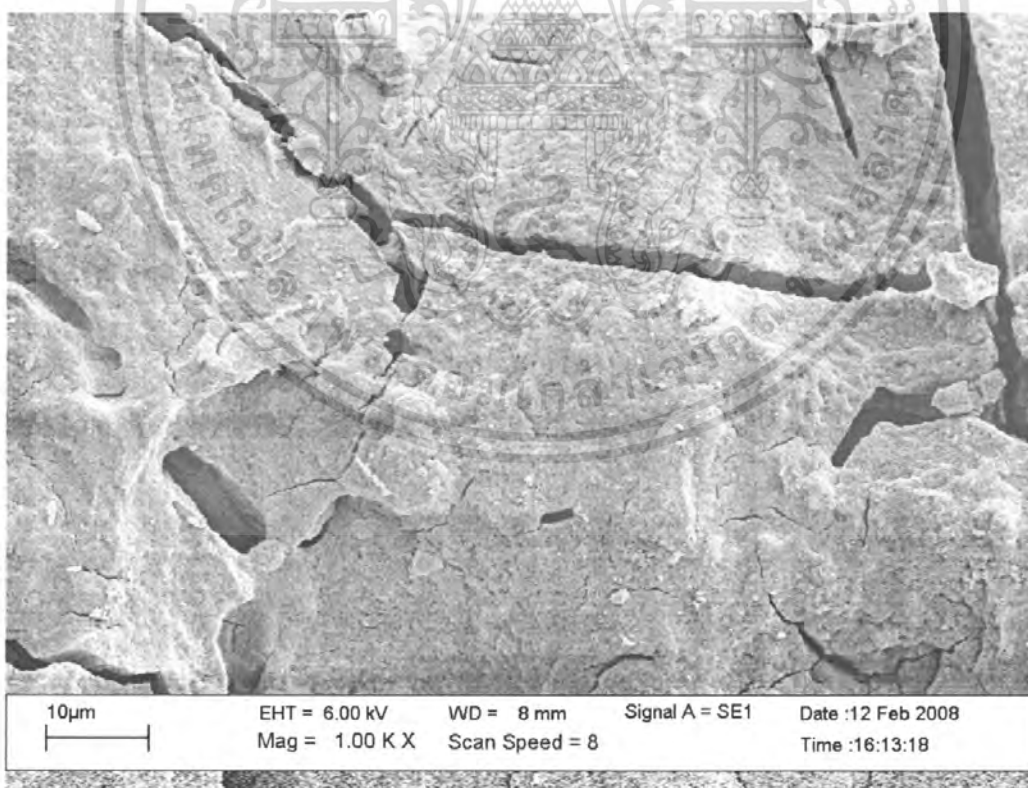
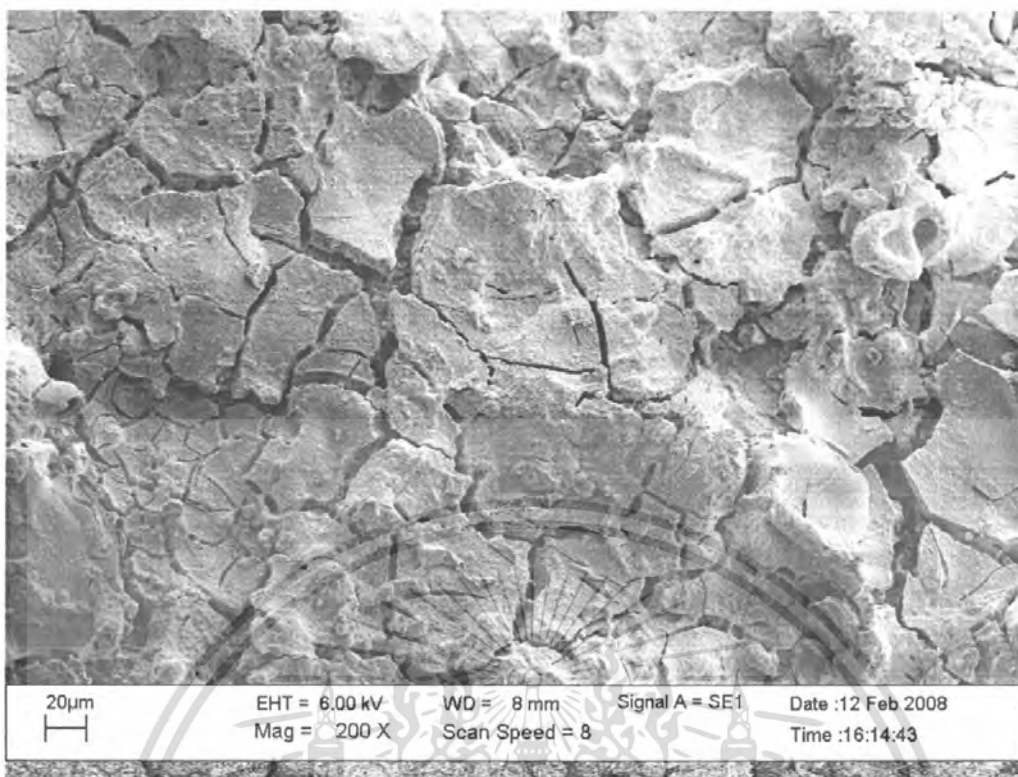
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 4.8 ภาพ SEM ของเส้นใย PA-6 ที่เคลือบด้วยทีเทเนียหลังจากปรับปรุงพื้นผิวและทำการบ่มในน้ำที่อุณหภูมิ 95 °C ที่เวลา 6 วัน (ก) กำลังขยายต่ำ (200X) (ข) กำลังขยายสูง (1000X)

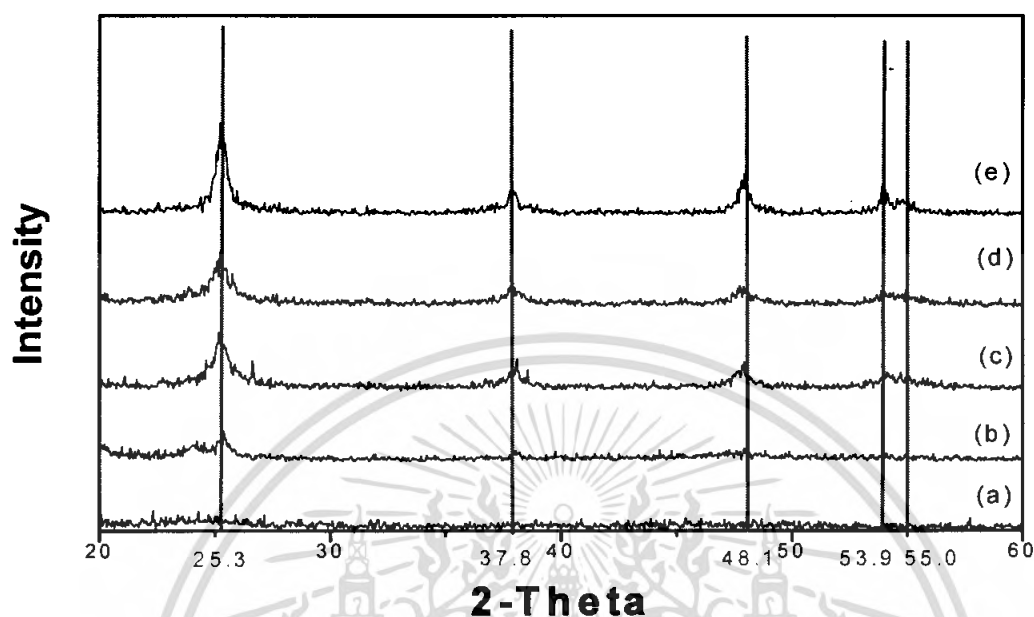
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 4.9 ภาพ SEM ของเส้นใย PA-6 ที่เคลือบด้วยทีเทเนียหลังจากปรับปรุงพื้นผิวและทำการบ่มในน้ำที่อุณหภูมิ 95°C ที่เวลา 7 วัน (ก) กำลังขยายต่ำ (200X) (ข) กำลังขยายสูง (1000X) โยชนด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาโครงสร้างผลึกของเส้นใย PA-6 ที่เคลือบด้วยทิเทเนียหลังจากปรับปรุงพื้นผิวและทำการบ่มในน้ำร้อน โดยใช้เทคนิค XRD ที่เวลาต่างๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.10



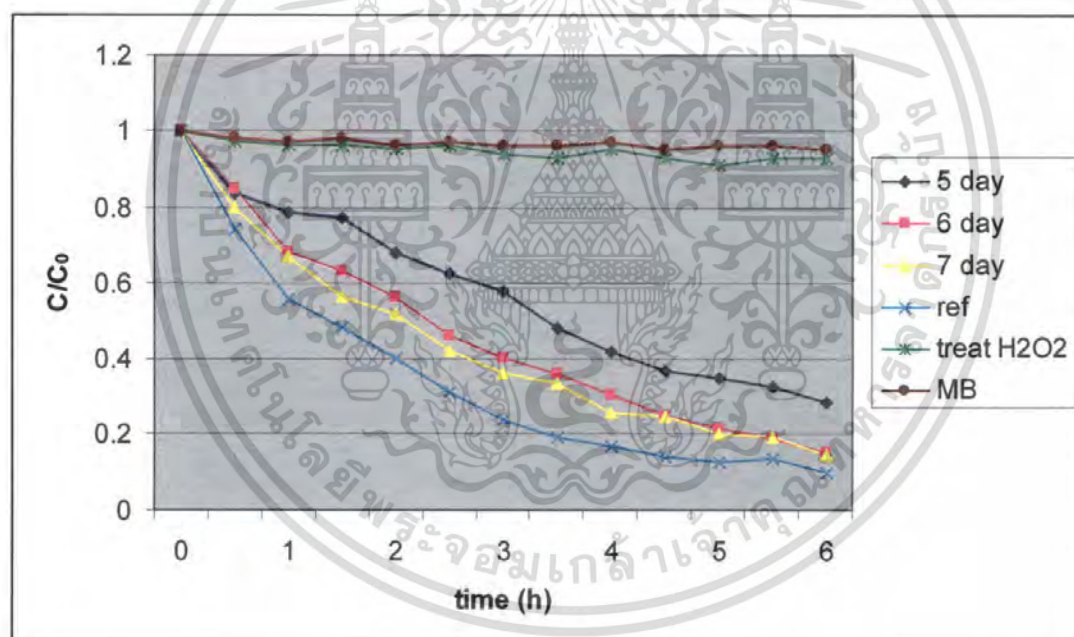
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความเข้มของนาเทสของทิเทเนียที่เคลือบบนเส้นใยที่เวลาต่างๆ (a) เส้นใยหลังผ่านการสเปรย์ (b) ทิเทเนียหลังผ่านการทรีตด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (c) ทิเทเนียหลังผ่านการบ่มเป็นเวลา 5 วัน (d) ทิเทเนียหลังผ่านการบ่มเป็นเวลา 6 วัน (e) ทิเทเนียหลังผ่านการบ่มเป็นเวลา 7 วัน

หลังจากทำการบ่มเส้นใยที่เคลือบด้วยสารละลายทิเทเนียมเตตระไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (TTIP) 97% ในน้ำร้อนที่เวลา 5, 6 และ 7 วัน แล้วทำการทดสอบด้วยเทคนิค XRD พบว่าปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 25.3° , 37.8° , 48.1° , 53.9° และ 55.0° ใน 2 Theta ซึ่งจะตรงกับพีคของนาเทส โดยเมื่อจำนวนวันในการบ่มเพิ่มมากขึ้นก็จะส่งผลให้ความเป็นอนาเทสของทิเทเนียที่เคลือบบนผิวเส้นใย PA-6 เพิ่มขึ้น ซึ่งดูได้จากค่า Intensity ที่เพิ่มสูงขึ้น จากข้อมูลดังกล่าวสามารถอธิบายกลไกการเกิดผลึกอนาเทสได้โดย "Dissolution-precipitation" หลังทำการปรับปรุงพื้นผิวของทิเทเนียที่เคลือบบนผิวเส้นใย PA-6 ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พันธะ Ti-O-Ti ที่พื้นผิวซึ่งเป็นเป็นทิเทเนียในรูปอสัณฐานจะถูกออกซิไดซ์ให้กลายเป็นพันธะ Ti-OH หลังจากทำการบ่มเส้นใยที่เคลือบด้วยทิเทเนียในน้ำร้อนพันธะ Ti-O-Ti ที่เหลืออยู่จะถูกไฮโดรไลซ์ (Hydrolyze) กลายเป็นพันธะ Ti-OH ซึ่ง ณ จุดนี้จะมี Ti^{4+} ในน้ำ และมีสารละลาย $Ti(OH)_4$ เกิดขึ้นซึ่งค่า pH ที่จุดนี้จะไม่เสถียรส่งผลให้ทิเทเนียไม่สามารถละลายได้ จึงเกิดการตกตะกอนลงมาบนพื้นผิวของเส้นใยการเป็นทิเทเนียในรูปอนาเทส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน (Photooxidation)

ความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสง (Photocatalyst) สามารถทดสอบได้โดยใช้การสลายตัวของเมทิลีนบลู (Methylene Blue) เป็นสารตัวอย่างแทนสารปนเปื้อนที่จะกำจัดทำได้โดยการนำเส้นใย PA-6 ที่เคลือบด้วยทิตาเนียหลังทำการปรับปรุงพื้นผิวและบ่มในน้ำร้อนแล้ว ใส่ลงในสารละลายเมทิลีนบลู (Methylene Blue) แล้วทำการฉายแสง UV เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าเมทิลีนบลู (Methylene Blue) สามารถสลายตัวได้โดยดูจากค่าความเข้มข้นของสารละลายที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง อันเนื่องมาจากความเป็นอนาเทสของทิตาเนีย (Titania) ทำให้มีสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงที่ดี จึงเป็นข้อพิสูจน์ว่าเส้นใย PA-6 ที่เคลือบด้วยทิตาเนียหลังจากผ่านการปรับปรุงพื้นผิวและทำการบ่มในน้ำร้อน มีการเปลี่ยนความเป็นผลึกจากรูปอสัณฐาน (Amorphous) เป็นผลึกอนาเทส (Anatase) โดยเส้นใยที่เคลือบด้วยทิตาเนียที่ผ่านการบ่มในน้ำร้อนแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แสดงผลการสลายตัวของเมทิลีนบลู (Methylene blue) ที่เวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าเมทิลีนบลูที่ไม่ใส่ทิตาเนียจะมีค่าความเข้มข้นไม่เปลี่ยนแปลง และเมื่อใส่ทิตาเนียหลังผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย H_2O_2 พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นเพียงเล็กน้อยเนื่องจากทิตาเนียที่ได้ในขั้นนี้ส่วนใหญ่ยังอยู่ในรูปอสัณฐาน ส่วนทิตาเนียที่เคลือบบนผิวเส้นใยที่ผ่านการบ่มในน้ำร้อนเป็นเวลา 7 วัน จะให้ค่าการสลายตัวของเมทิลีนบลูสูงกว่าทิตาเนียที่เคลือบบน

ผิวเส้นใยที่ผ่านการบ่มเป็นเวลา 5 และ 6 วัน เนื่องจากความเป็นผลึกอนาเทสเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนวันในการบ่มเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงเพิ่มขึ้น โดยค่าการสลายตัวของเมทิลีนบลูที่เวลาต่างๆ ลดลงน้อยกว่าที่เทียบมาตรฐานโดยในการทดลองนี้ใช้ JRC-TIO1 ซึ่งเป็นที่นิยมที่ใช้ในเชิงพาณิชย์เนื่องจากที่เทียบมาตรฐานมีความเป็นผลึกอนาเทสสูงอย่างมาก (กราฟ XRD ของ JRC-TIO1 แสดงในรูปที่ ข ของภาคผนวก)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

เส้นใยที่เตรียมได้จากกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นเส้นใยขนาดเล็ก เรียบ ไม่มีปัด (Bead) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 127.3 nm แล้วจึงทำการเคลือบผิวเส้นใยด้วยสารละลาย ทีเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ (TTIP) โดยใช้เทคนิคโซล – สเปรย์โคทติ้ง (Sol-spray coating) พบว่าพื้นผิวของเส้นใย PA-6 จะถูกปกคลุมด้วยทีเทเนีย ซึ่งจะมีการหดตัวและเกิดการแตกที่พื้นผิวเนื่องจากการระเหยของตัวทำละลาย พร้อมทั้งมีปัดหรือก้อนกลมของทีเทเนียขนาดประมาณ 1-10 ไมครอน กระจายอยู่บนพื้นผิวเล็กน้อย โดยทีเทเนียที่ได้ในขั้นนี้ยังคงอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) จากนั้นทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เข้มข้น 30% พบว่าทีเทเนียที่เคลือบบนผิวเส้นใยมีความหนาประมาณ 1-2 ไมครอน โดยความหนาของฟิล์มลดลงและเริ่มพบพีค ณ ตำแหน่งที่แสดงถึงความเป็นผลึกอนาเทส (Anatase) ต่อมาจึงนำมาทำการบ่ม (Aging) ในน้ำร้อนเป็นเวลา 5, 6 และ 7 วัน พบว่าความหนาของฟิล์มทีเทเนียที่ผ่านการบ่มเป็นเวลา 7 วัน จะมีความหนาและความสูงของพีคที่ตำแหน่งของอนาเทสมากกว่าที่ระยะเวลาการบ่ม 5 และ 6 วัน สุดท้ายทำการศึกษาความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงพบว่าแผ่นเส้นใยที่เคลือบด้วยทีเทเนียที่ผ่านการบ่มเป็นเวลา 7 วัน สามารถสลายเมทิลีนบลูได้มากกว่าที่ระยะเวลาการบ่ม 5 และ 6 วัน

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานในอนาคต

จากผลสรุปก่อนหน้า มีข้อเสนอแนะในการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคตดังนี้

1. ศึกษาวิธีการเคลือบผิวทีเทเนียบนเส้นใยโดยให้มีความหนาของชั้นทีเทเนียน้อยลงเพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา
2. ศึกษาการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม เช่น การนำมาใช้เป็นแผ่นบำบัดน้ำเสียในโรงงาน แผ่นกรองอากาศและอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

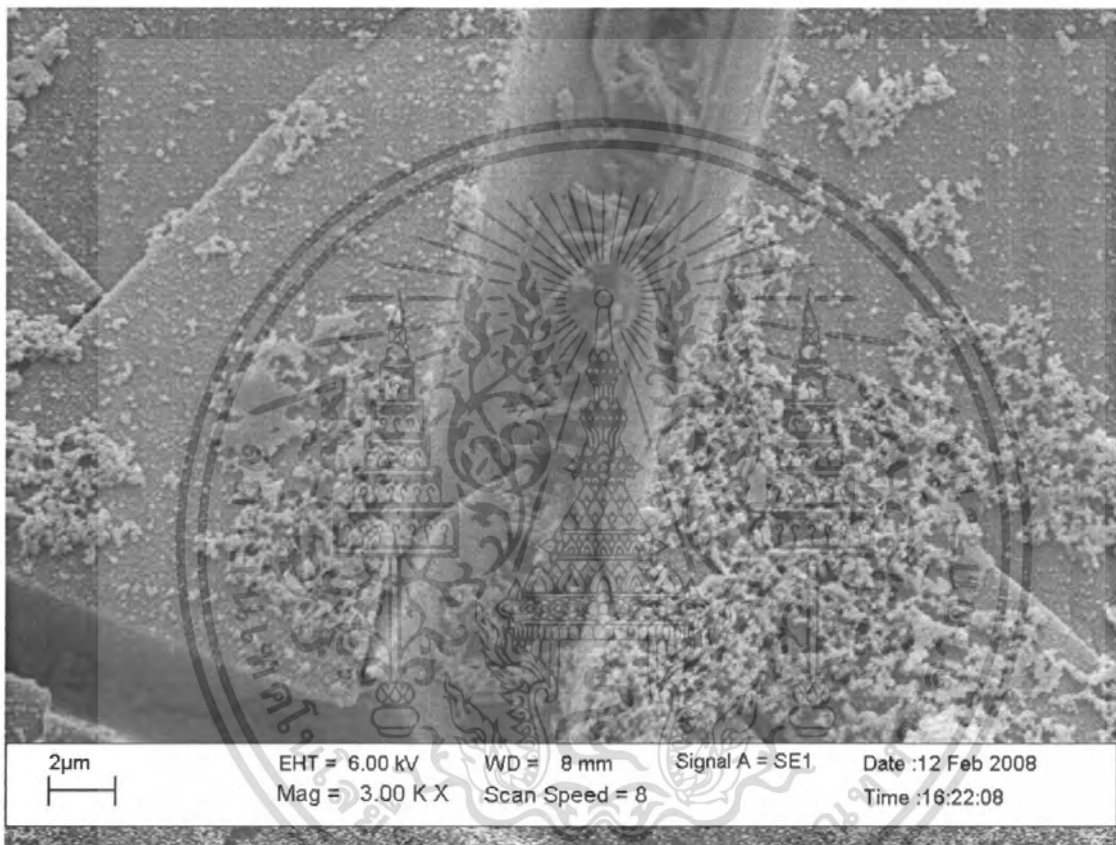
เอกสารอ้างอิง

- [1] C.H. Kwon, H. Shin, J.H. Kim. "Degradation of Methylene Blue via Photocatalysis of Titanium Oxide." *Materials Chemistry and Physics.*, vol. 86, 2004. pp. 78-82.
- [2] I. Keesmann. "Hydrothermal Synthesis of Brookite." *Z. Anorg. Allg. Chem.*, vol. 346, 1996. pp. 30-43.
- [3] P.V. Kamat, N.M. Dimitrijevic. "Colloidal Semiconductors as Photocatalysts for Solar Energy Conversion." *Sol. Energy.*, vol. 44, 1990. pp. 83-98.
- [4] Natthida, Issariya. "Preliminary study on the preparation of titanium(IV)oxide coated electrospun polyamide-6 fiber mats. King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 2006.
- [5] Y. Guo, X. Zhao, J. Zhao, W. Fu, X. Ding, Y. Jiang, K. Yu, X. Lv, Z. Wang. "Controlling the Particle Size of Nanocrystalline Titania via a Thermal Dissociation of Substrates with Ammonium Chloride." *Materials Letters.*, vol. 60, 2006. pp. 494-498.
- [6] K. Othmer. "Encyclopedia of Chemical Technology." Wiley interscience., 1998.
- [7] J. Watthanaarun, V. Pavarajan, and P. Supaphol. "Titanium (IV) Oxide Nanofibers by Combined Sol-gel and Electrospinning Techniques: Preliminary Report on Effects of Preparation Conditions and Secondary Metal Dopant." *Science and Technology of Advanced Materials.*, vol. 6, 2005. pp. 240-245.
- [8] A. Fujishima, K. Hashimoto, T. Watanabe. "TiO₂ Photocatalysis Fundamental and Applications." BKC Inc., 1999.
- [9] <http://www.solgel.com/artical/June00/phalip/introsolgel.htm>
- [10] "Principle of Dip." Internet: <http://www.sdicompany.com/en/principle/index.html>.
- [11] "Dip-coating Process." Internet: <http://www.wikipedia.com>.
- [12] http://en.wikipedia.org/wiki/taylor_cone
- [13] L.Wannatong, A. Sirivat, P. Supaphol, *Polymer International* 2004, 53, 1851.
- [14] J. Doshi, D.H. Reneker, *Electrospinning procrss and application of electrospinfibers.* *Journal of Electrostatic* 1995; 35(2-3):151-160

- [15] F.K. Ko, S. Khan, A. Ali, Y. Gogotsi, N. Naguib, G. Yang, C. Li, H. Shimoda, O. Zhou, M. J. Bronikowski. R. E. Smalley and P. A. Willis. "Electrospinning of Continuous Carbon Nanotube-Filled Nanofiber Yarns." *Advanced Materials.*, vol 15, 2002. pp 1161-1165.
- [16] "PA-6." Internet: <http://www.polymerprocessing.com/polymers/PA6.html>
- [17] "Nylon." Internet: <http://www.bpf.co.uk>.
- [18] Chavis karanmeythakul."Modification of Titanium dioxide Surfaces to Enhance Photocatalytic Activity." King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, 2006.
- [19] www.mne.eng.psu.ac.th
- [20] K. Kajihara, K. Nakanichi, K. Tanaka, K. Hirao, N. Soga "Preparation of Macroporous Titania Films by a Sol-gel Dip-coating Method from the System Containing Poly(ethylene glycol)." *Journal of the American Ceramic Society.*, vol. 81, 1998. pp. 2670-2676.
- [21] D. Li, Y. Xia. "Fabrication of Titania Nanofibers by Electrospinning." *Nano Letters.*, vol. 3, 2003. pp. 555-560.
- [22] Jeerapong Wathanaarun, Pitt Supaphol, and Varong Pavarajarn, "Photocatalytic Activity of Neat and Silicon-Doped Titanium (IV) Oxide Nanofibers Prepared by Combined Sol-Gel and Electrospinning Technique." *Journal of Nanoscience and Nanotechnology.*, vol. 7, 2443-2450, 2007.
- [23] L. Zhang, T. Kanki , N. Sano, A. Toyoda. "Development of TiO₂ Photocatalyst Reaction for Water Purification." *Separation and Purification Technology.*, vol. 31, 2003. pp. 105-110.
- [24] P. Supaphol, C. Mit-Uppatham, M. Nithitanakul. "Ultrafine Electrospun Polyamide-6 Fibers: Effect of Emitting Electrode Polarity on Morphology and Average Fiber Diameter." *Macromolecules Material Engineering.*, vol. 290, 2005. pp. 933-942.

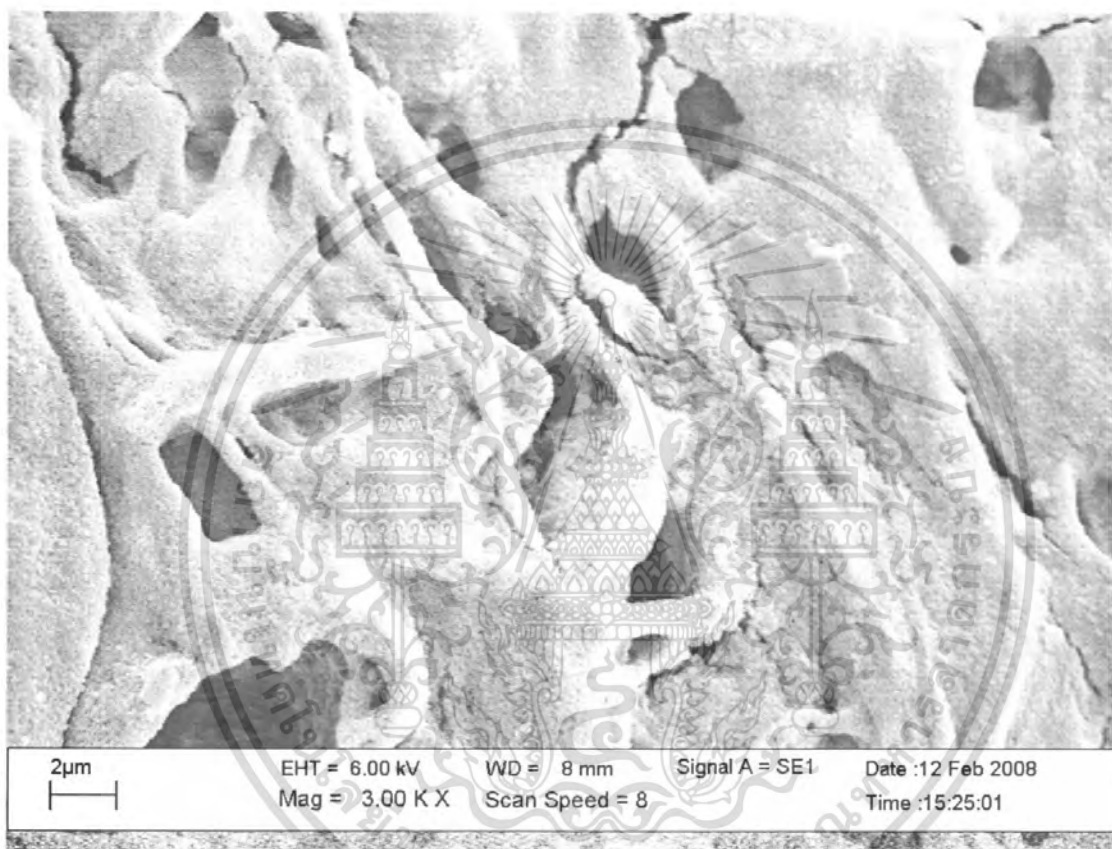


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



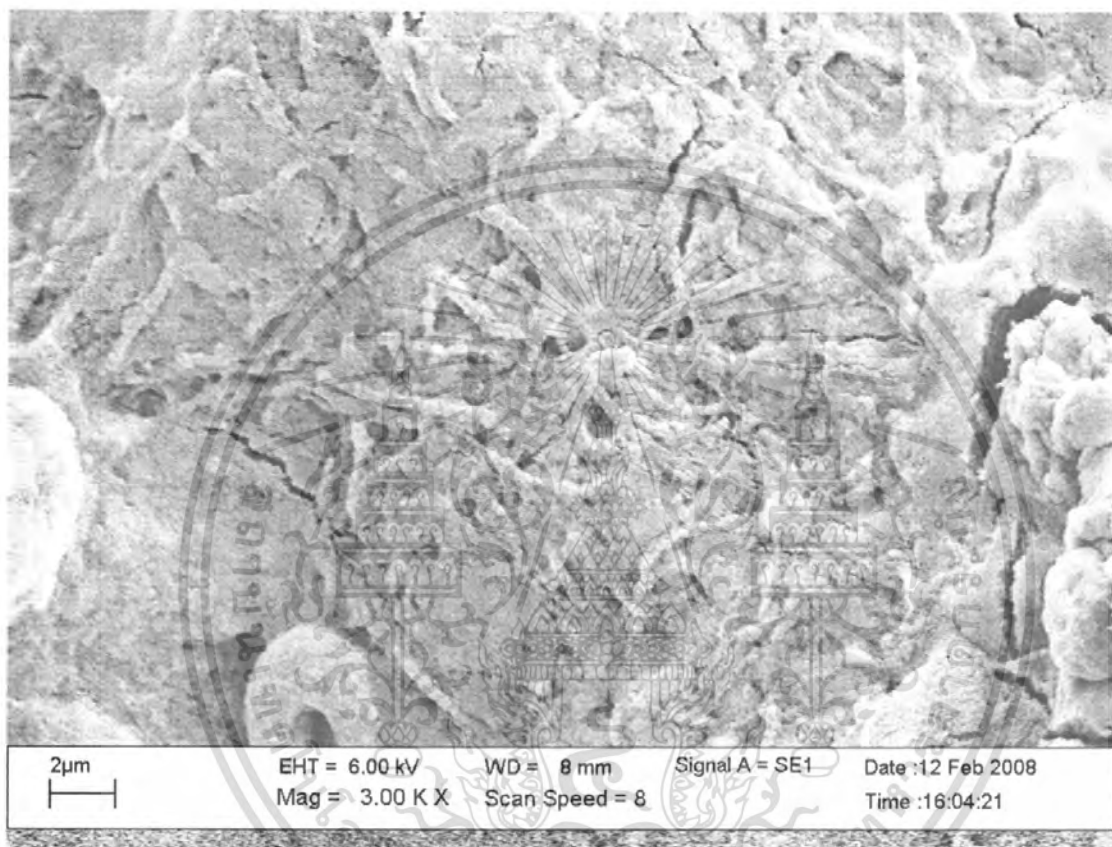
รูปที่ ก1 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของทีเทเนียสหลังผ่านการ treat ด้วย H_2O_2 ที่กำลังขยาย 3000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



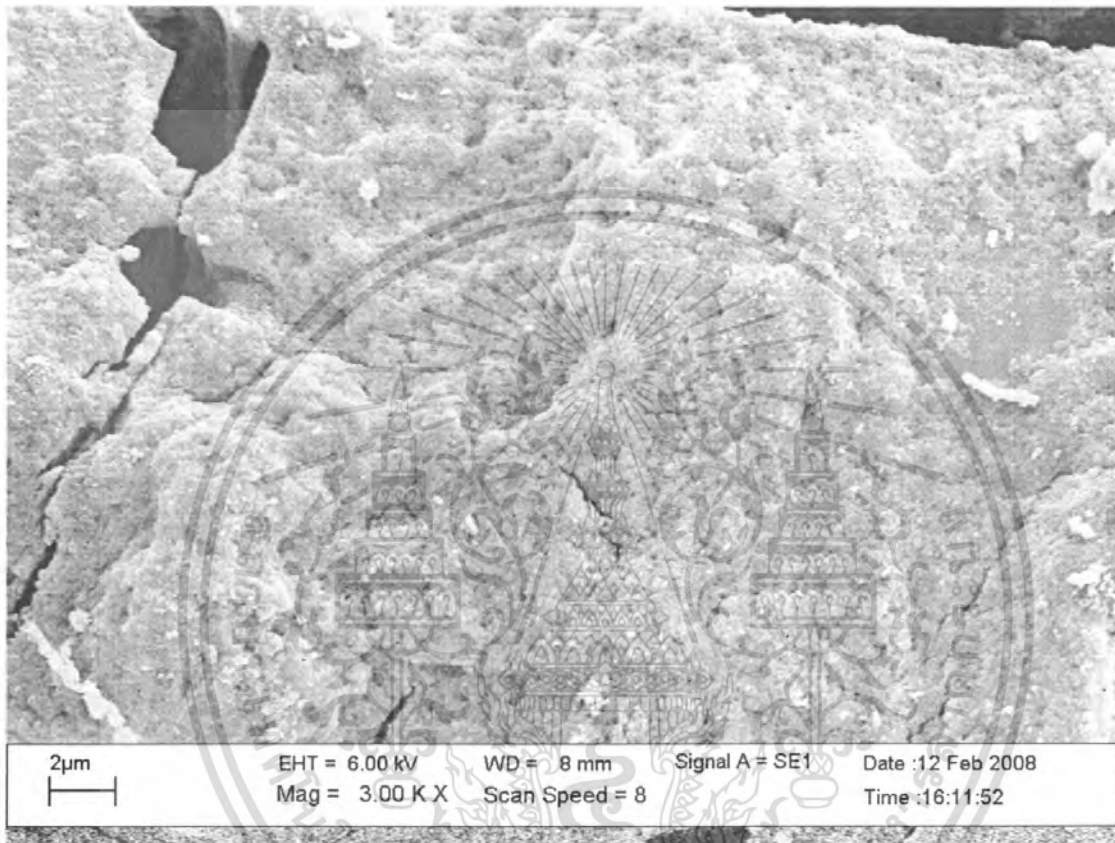
รูปที่ ก2 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของทีเทเนียหลังผ่านการ aging เป็นเวลา 5 วัน ที่กำลังขยาย 3000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



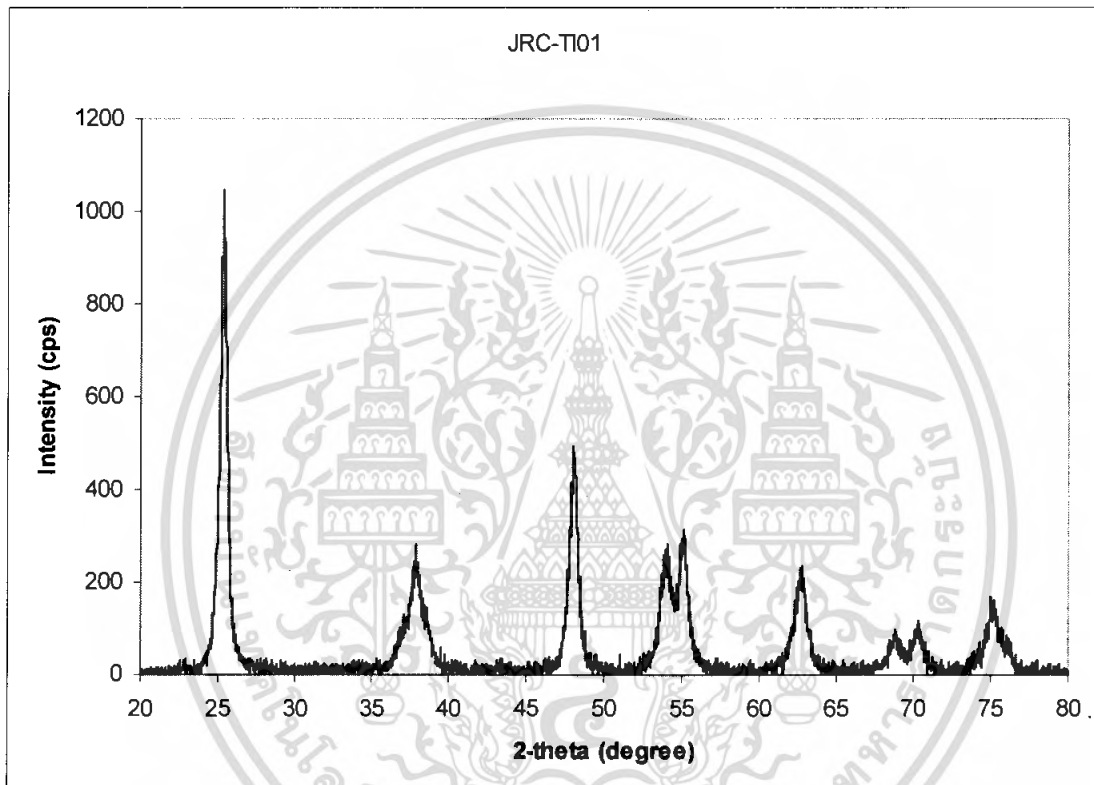
รูปที่ ก3 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางด้วฐานวิทยาของทีเทเนียหลังผ่านการ aging เป็นเวลา 6 วัน ที่กำลังขยาย 3000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก4 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของทีเทเนียหลังผ่านการ aging เป็นเวลา 7 วัน ที่กำลังขยาย 3000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข กราฟ XRD แสดงความเป็นผลึกอนาเทสของ JRC-TiO₂

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้