

การเตรียมเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตตผสมถ่านกัมมันต์โดยการปั่นเส้นใยด้วย  
ไฟฟ้าสถิต สำหรับการดูดซับสารอินทรีย์

PREPARATION OF ACTIVATED CARBON CELLULOSE  
ACETATE FIBERS BY ELECTROSPINNING FOR ORGANIC  
COMPOUNDS ADSORPTION

วัฒนา กลิ่นสุคนธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การเตรียมเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตตผสมถ่านกัมมันต์โดยการปั่นเส้นใย  
ด้วยไฟฟ้าสถิต สำหรับการดูดซับสารอินทรีย์

วัฒนา กลินสุคนธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตตผสมถ่านกัมมันต์โดยการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต สำหรับการดูดซับสารอินทรีย์ Preparation of Activated Carbon Cellulose Acetate Fibers by Electrospinning for Organic Compounds Adsorption
ชื่อ-นามสกุล	นายวัฒนา กลิ่นสุคนธ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาวสุปรีย์, Ph.D.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์นที ศรีสวัสดิ์, ปร.ด.
ปีการศึกษา	2556

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....	ประธานกรรมการ
(อาจารย์ณรงค์ชัย โอเจริญ, Ph.D.)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อภิรัตน์ เล่าห์บุตรี, ปร.ด.)	
.....	กรรมการ
(อาจารย์กุลวดี สังข์สนิท, Ph.D.)	
.....	กรรมการ
(อาจารย์นที ศรีสวัสดิ์, ปร.ด.)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาวสุปรีย์, Ph.D.)	

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมหมาย ผิวสอาด, Ph.D.)  
วันที่.....เดือน..ตุลาคม..พ.ศ..2556...

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตดผสมถ่านกัมมันต์โดยการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต สำหรับการดูดซับสารอินทรีย์
ชื่อ-นามสกุล	นายวัฒนา กลิ่นสุคนธ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาวสุปรีย์, Ph.D.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์นที ศรีสวัสดิ์, ปร.ด.
ปีการศึกษา	2556

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีการคิดค้นพัฒนาวัสดุรองจากผ้าไม่ทอเส้นใยนาโนเมตร ซึ่งมีขนาดเส้นใยเล็กระดับนาโนเมตร เพื่อใช้เป็นวัสดุรองสำหรับลดความเข้มข้นของมลพิษทางน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารประกอบอินทรีย์ ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการขึ้นรูปผ้าไม่ทอเซลลูโลสอะซิเตด (CA) ผสมถ่านกัมมันต์ (AC) ด้วยวิธีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเพื่อการดูดซับสารอินทรีย์

การศึกษาสภาวะของกระบวนการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิต โดยการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของ CA ที่ 8 และ 10 wt% ละลายในตัวทำละลายผสมระหว่าง ได-คลอโรมีเทน (DCM) และไดเมทิลฟอร์มามิเด (DMF) ในอัตราส่วน 2 ต่อ 1 ส่วนโดยน้ำหนัก และผสม AC ที่ปริมาณ 0, 1, 2, 3 และ 5 wt% ทำการวิเคราะห์ความหนืดของสารละลายด้วยเครื่องวัดความหนืด (Viscometer) วิเคราะห์รูปร่างและขนาดเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และวัดการดูดซับสารเมทิลีนบลู ด้วยเครื่อง UV-vis spectrometer

ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณ AC เพิ่มขึ้นทำให้ความหนืดของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น ที่สภาวะ CA 10 wt%/AC 5 wt% มีความหนืดสูงสุด เมื่อวิเคราะห์ผ้าไม่ทอด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าผ้าไม่ทอที่ CA 8 wt% มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยอยู่ในช่วง 250-270 nm และมีความสม่ำเสมอของเส้นใยมากกว่าผ้าไม่ทอที่ CA 10 wt% ซึ่งมีขนาดเส้นใยอยู่ในช่วง 300-350 nm ความหนืดของสารละลายเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เส้นใยมีขนาดเพิ่มขึ้น และผลการดูดซับสารเมทิลีนบลู เพิ่มขึ้น 5 ppm ในเวลา 48 ชม. พบว่า CA 8 wt% มีการดูดซับ เมทิลีนบลูมากกว่า CA 10 wt% ที่ปริมาณ AC ต่างๆเนื่องจากที่ CA 8 wt% มีขนาดเส้นใยเล็กกว่า จึงมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากกว่า การวิจัยนี้ทำให้ทราบถึงสภาวะการขึ้นรูปผ้าไม่ทอเซลลูโลสอะซิเตดที่มีถ่านกัมมันต์ผสมโดยการปั่นแบบไฟฟ้าสถิต และนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับสารอินทรีย์

**คำสำคัญ:** การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต การดูดซับ เส้นใยเซลลูโลสอะซิเตด ถ่านกัมมันต์

<b>Thesis Title</b>	Preparation of Activated Carbon Cellulose Acetate Fibers by Electrospinning for Organic Compounds Adsorption
<b>Name-Surname</b>	Mr. Wattana Klinsukhon
<b>Program</b>	Materials Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Sorapong Pavasupree, Ph.D.
<b>Thesis Co-advisor</b>	Mr. Natee Srisawat, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2013

## ABSTRACT

Nowadays, nanofibers have been found as a nonwoven fabric as a filter to reduce harmful substances in polluted water, especially organic compounds. This research aimed to study the fabrication of nonwoven of cellulose acetate (CA) nanofibers composited with activated carbon (AC) by electrospinning method for organic compound adsorption.

Spinning dopes of cellulose acetate of 8 and 10 wt% were prepared in mixture solvents of dichloromethane (DCM) and dimethylformamide (DMF). The ratio of DCM:DMF was 2:1 with varied amount of activated carbon 0,1,2,3 and 5 wt%. Solution viscosity was measured by viscometer. Morphology of electrospun (CA)/(AC) nonwovens were studied by scanning electron microscopy (SEM) and their methylene blue adsorption efficiencies were measured by UV-vis spectrometer.

The results showed that the solution viscosity increased when increasing AC contents. The highest viscosity of nonwoven fabric was CA 10 wt% with AC 5 wt%. From SEM analysis, nonwoven nanofiber CA 8 wt% showed diameter in a range of 250-270 nm. The nanofibers were more uniform than that of CA 10 wt% with diameter in a range of 300-350 nm. Fiber diameters increased with increasing viscosity of CA solution. The results of methylene blue adsorption 5 ppm for 48 hr showed that nonwoven of CA 8 wt% could adsorb methylene blue better than CA 10 wt% nonwoven at various contents of AC. It was due to the fibers of CA 8 wt% nonwoven was smaller so that it was higher surface area per volume for adsorption. This research provided the information on electrospinning conditions for prepared nonwoven of CA compounded with AC for development on organic compounds adsorption.

**Keywords:** electrospinning, adsorption, cellulose acetate fibers, activated carbon

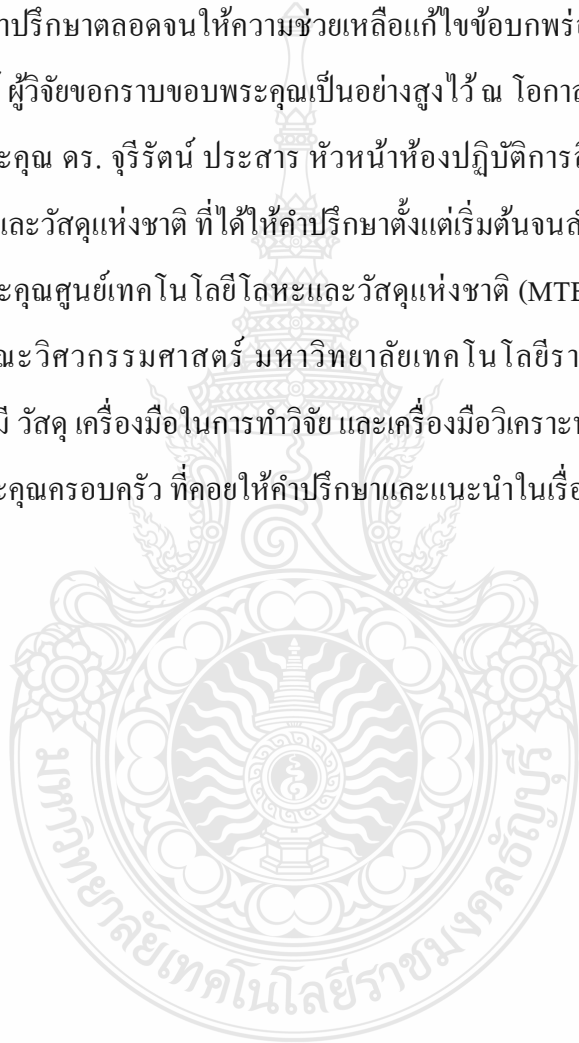
## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างดีของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรพงษ์ ภาวสุปรีย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.ณรงค์ชัย โอเจริญ ดร.กฤตดิ สังข์สนิท ดร.นที ศรีสวัสดิ์ กรรมการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรัตน์ เล่าห์บุตร ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ดร. จุริรัตน์ ประसार หัวหน้าห้องปฏิบัติการสิ่งทอ หน่วยวิจัยพอลิเมอร์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ได้ให้คำปรึกษาตั้งแต่เริ่มต้นจนสำเร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) และภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านสารเคมี วัสดุ เครื่องมือในการทำวิจัย และเครื่องมือวิเคราะห์

ขอขอบพระคุณครอบครัว ที่คอยให้คำปรึกษาและแนะนำในเรื่องต่างๆ รวมทั้งเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา



วัฒนา กลิ่นสุคนธ์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	14
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	14
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	16
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	17
1.4 ประโยชน์ของการวิจัย.....	17
1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	17
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.2 เซลลูโลสอะซิเตต (Cellulose Acetate).....	22
2.3 นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology).....	25
2.4 การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning).....	26
2.5 เทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning Technique).....	32
2.6 การประยุกต์ใช้ผ้าไม่ทอเส้นใยนาโนด้านวัสดุศาสตร์และสิ่งแวดล้อม.....	48
2.7 การวิเคราะห์เส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM).....	52
2.8 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon).....	54
2.9 การดูดซับ (Adsorption).....	56
2.10 เมทิลีนบลู (Methylene Blue).....	60

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	62
3.1 แผนการดำเนินงาน.....	62
3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	63
3.3 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	64
3.4 วิธีการทดลอง.....	67
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	69
4.1 ผลการวัดความหนืดสารละลาย (Viscosity).....	69
4.2 วิเคราะห์ลักษณะสัญญาณและขนาดของถ้ำกัมมันต์และเส้นใย.....	71
4.3 ผลการดูดซับสารเมทิลีนบลู.....	75
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	82
5.1 สภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นผ้าไหมทอด้วยเทคนิคไฟฟ้าสถิต.....	82
5.2 สมบัติของการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู.....	82
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	82
รายการอ้างอิง.....	84
ภาคผนวก.....	87
ภาคผนวก ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	88
ประวัติผู้เขียน.....	105



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติต่างๆของเมทิลลีนบลู.....	60
ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน.....	62



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 ผลของขนาดเส้นใยที่เล็กลงต่อประสิทธิภาพการกรองสาร.....	14
รูปที่ 1.2 ระบบกรองจากเส้นใยนาโนที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อกรองและจับอนุภาคขนาดเล็ก	15
รูปที่ 1.3 ระบบกรองจากเส้นใยนาโนที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อใช้ทำระบบกรองน้ำ หรือของเหลว.....	15
รูปที่ 2.1 เส้นใยผสมแบบร่วมแกน Polyvinylidene Fluoride (PVDF) (แกนใน) – Polycarbonate (PC) (เปลือกนอก).....	19
รูปที่ 2.2 การปั่นเส้นใยนาโนกลางด้วยเทคนิค Electrohydrodynamically (EHD).....	20
รูปที่ 2.3 เส้นใยนาโนกลางที่เก็บเส้นได้จากวิธี (EHD) สารละลายที่ใช้จะอยู่ด้านนอก ส่วน ด้านในใช้กลีเซอรินเป็นสารละลายด้านใน จากนั้น นำไปอบให้แห้งที่ 500°C.....	20
รูปที่ 2.4 การปั่นเส้นใยไมครอนกลางจำนวนหลายรู.....	21
รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาการเกิด Cellulose Xanthate.....	22
รูปที่ 2.6 การสังเคราะห์พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สังเคราะห์ได้จากการ Methanolysis.....	22
รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนรูปร่างของพอลิเมอร์ด้วยแรงทางไฟฟ้า.....	28
รูปที่ 2.8 การเกิดกรวยแท่งด้วยแรงไฟฟ้า.....	29
รูปที่ 2.9 รูปถ่ายการเกิดกระแสพอลิเมอร์ของพอลิเอทิลีนออกไซด์ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักโมเลกุล 920 กิโลกรัมต่อโมล) ละลายในน้ำ.....	30
รูปที่ 2.10 กระบวนการปั่นแบบไม่เสถียรที่มีการเคลื่อนที่แบบหมุนวน (Whipping Motion)..	31
รูปที่ 2.11 การแข็งตัวของกระแสพอลิเมอร์เป็นเส้นใย.....	32
รูปที่ 2.12 ชูปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบเดี่ยว.....	34
รูปที่ 2.13 ระบบหัวฉีดสำหรับการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน.....	35
รูปที่ 2.14 เส้นใยผสมแบบร่วมแกน Polyvinylidene Fluoride (PVDF) (แกนใน) – Polycarbonate (PC) (เปลือกนอก).....	37
รูปที่ 2.15 การปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกนของเส้นใย PU (แกนใน) (PC) (เปลือกนอก)	38
รูปที่ 2.16 การปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกนของเส้นใย TiO <sub>2</sub> .....	39
รูปที่ 2.17 เส้นใยนาโน TiO <sub>2</sub> ที่ถ่ายภาพ ด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์, TEM และ SEM.....	40
รูปที่ 2.18 เส้นใยนาโน TiO <sub>2</sub> โครงสร้างแบบรูพรุน เตรียมโดยการเผาแคลไซน์.....	42

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.19 ระบบการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบหลอมละลายที่ใช้เตรียมเส้นใย TiO <sub>2</sub> -PVP.....	43
รูปที่ 2.20 เส้นใย TiO <sub>2</sub> -PVP ที่เตรียมได้ด้วยระบบการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบหลอมละลาย	44
รูปที่ 2.21 ระบบการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบสนามใกล้ (Near-Field Electrospinning).....	46
รูปที่ 2.22 เส้นใย Polyethylene Oxide, PEO เตรียมจากวิธีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบ สนามใกล้.....	47
รูปที่ 2.23 ผลของสนามแม่เหล็กต่อระบบการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิต.....	49
รูปที่ 2.24 ระบบการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตเส้นใยเส้นใยนาโนแบบอาร์เรย์.....	50
รูปที่ 2.25 เส้นใยนาโนที่ได้จากการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบใช้สนามแม่เหล็กร่วม.....	51
รูปที่ 2.26 วิธีการสร้างเส้นใยแบบโครงสร้างหลายชั้น.....	52
รูปที่ 2.27 ภาพ SEM ของเส้นใยนาโนคาร์บอน.....	53
รูปที่ 2.28 ประสิทธิภาพของการกรองเพิ่มมากขึ้น เมื่อเส้นใย มีขนาดเล็กลง.....	54
รูปที่ 2.29 ระบบกรองจากเส้นใยนาโนที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อกรองและจับอนุภาคขนาดเล็ก	55
รูปที่ 2.30 ระบบกรองจากเส้นใยนาโนที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อพัฒนาเพื่อใช้ทำระบบกรองน้ำ หรือของเหลว.....	55
รูปที่ 2.31 แผ่นเมมเบรนคัดแยกที่ทำจากเส้นใยเซลลูโลสที่มีผิวจริงไว้กับ Cibacron Blue สำหรับแยกอัลบูมิน (Albumin).....	56
รูปที่ 2.32 การเคลือบเส้นใยนาโนบนเครื่องแต่งกายทหาร เพื่อป้องกันอาวุธทางชีวภาพ.....	57
รูปที่ 2.33 แสดงหลักการของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	58
รูปที่ 2.34 กลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยในน้ำเข้าหาถ่านกัมมันต์.....	64
รูปที่ 2.35 ประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยที่ขึ้นอยู่กับขนาด.....	64
รูปที่ 2.36 โพรง หรือช่องว่างภายในถ่านกัมมันต์.....	65
รูปที่ 2.37 สูตร โครงสร้างเมทิลลินบลู.....	66
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย.....	69
รูปที่ 3.2 เซลลูโลสอะซิเตต (Mn~50,000).....	70
รูปที่ 3.3 สารละลายไดเมทิลฟอร์มาไมด์.....	70
รูปที่ 3.4 สารละลายไดคลอโรมีเทน.....	71

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.5 พงถ่านกัมมันต์.....	71
รูปที่ 3.6 สารเมทิลลีนบลู.....	72
รูปที่ 3.7 เครื่องวัดความหนืด VISCOMETER.....	72
รูปที่ 3.8 ชุดปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ( Electrospinning).....	73
รูปที่ 3.9 Hot Plate and Stirrer.....	73
รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM).....	74
รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ที่ใช้ในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต.....	75
รูปที่ 4.1 ค่าความหนืดของสารละลาย CA 8 wt% ที่ปริมาตร AC 0, 1, 2, 3 และ 5 wt%.....	76
รูปที่ 4.2 ค่าความหนืดของสารละลาย CA 10 wt% ที่ปริมาตร AC 0, 1, 2, 3 และ 5 wt%.....	77
รูปที่ 4.3 รูปถ่าย SEM แสดงลักษณะของอนุภาคพงถ่านกัมมันต์.....	78
รูปที่ 4.4 ผ้าไม่ทอที่ขึ้นรูปจากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่ผสมถ่านกัมมันต์ 0 และ 1 wt%	78
รูปที่ 4.5 ผ้าไม่ทอที่ขึ้นรูปจากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่ผสมถ่านกัมมันต์ 2, 3 และ 5 wt%.....	79
รูปที่ 4.6 รูปถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่า ของเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตดที่ผสมถ่านกัมมันต์ 0, 1 และ 2 wt%.....	80
รูปที่ 4.7 รูปถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่า ของเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตดที่ผสมถ่านกัมมันต์ 3 และ 5 wt%.....	81
รูปที่ 4.8 ขนาดของเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตดของตัวอย่างผ้าไม่ทอ.....	82
รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบความเข้มข้นระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมทิลลีนบลูกับเปอร์เซ็นต์การดูดซับแสงยูวี.....	83
รูปที่ 4.10 น้ำสีเมทิลลีนบลูที่เป็นตัวเทียบ (Blank) ที่ใช้ในการทดสอบการดูดซับของผ้าไม่ทอเซลลูโลสอะซิเตด.....	84
รูปที่ 4.11 น้ำสีเมทิลลีนบลูที่เหลือจากการดูดซับของผ้าไม่ทอเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตด CA 8 wt%/AC 0 wt% ที่เวลา 1, 24 และ 48 ชั่วโมง .....	84
รูปที่ 4.12 น้ำสีเมทิลลีนบลูที่เหลือจากการดูดซับของผ้าไม่ทอเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตด CA 8 wt%/AC 1 wt% ที่เวลา 1, 24 และ 48 ชั่วโมง .....	85

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.13 น้ำสีเมทิลลีนบลูที่เหลือจากการดูดซับของผ้าไม่ทอเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตด CA 8 wt%/AC 2 wt% ที่เวลา 1, 24 และ 48 ชั่วโมง .....	85
รูปที่ 4.14 น้ำสีเมทิลลีนบลูที่เหลือจากการดูดซับของผ้าไม่ทอเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตด CA 8 wt%/AC 3 wt% ที่เวลา 1, 24 และ 48 ชั่วโมง .....	86
รูปที่ 4.15 น้ำสีเมทิลลีนบลูที่เหลือจากการดูดซับของผ้าไม่ทอเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตด CA 8 wt%/AC 5 wt% ที่เวลา 1, 24 และ 48 ชั่วโมง .....	86
รูปที่ 4.16 น้ำสีเมทิลลีนบลูที่เหลือจากการดูดซับของผ้าไม่ทอเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตด CA 10 wt%/AC 0 wt% ที่เวลา 1, 24 และ 48 ชั่วโมง .....	87
รูปที่ 4.17 น้ำสีเมทิลลีนบลูที่เหลือจากการดูดซับของผ้าไม่ทอเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตด CA 10 wt%/AC 1 wt% ที่เวลา 1, 24 และ 48 ชั่วโมง .....	87
รูปที่ 4.18 น้ำสีเมทิลลีนบลูที่เหลือจากการดูดซับของผ้าไม่ทอเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตด CA 10 wt%/AC 2 wt% ที่เวลา 1, 24 และ 48 ชั่วโมง .....	88
รูปที่ 4.19 น้ำสีเมทิลลีนบลูที่เหลือจากการดูดซับของผ้าไม่ทอเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตด CA 10 wt%/AC 3 wt% ที่เวลา 1, 24 และ 48 ชั่วโมง .....	88
รูปที่ 4.20 น้ำสีเมทิลลีนบลูที่เหลือจากการดูดซับของผ้าไม่ทอเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตด CA 10 wt%/AC 5 wt% ที่เวลา 1, 24 และ 48 ชั่วโมง .....	89
รูปที่ 4.21 ความเข้มข้นของเมทิลลีนบลูที่เหลือ ณ เวลาที่ทดสอบ โดย ชุดความเข้มข้น CA 8 wt%.....	89
รูปที่ 4.22 ความเข้มข้นของเมทิลลีนบลูที่เหลือ ณ เวลาที่ทดสอบ โดย ชุดความเข้มข้น CA 10 wt%.....	90

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Abs	Absorbance
AC	ถ่านกัมมันต์
CA	เซลลูโลสอะซิเตต
DCM	ไดคลอโรมีเทน
DMF	ไดเมทิลฟอร์มาไมด์
EC	Ethyl cellulose
EHD	electrohydrodynamically
kV	กิโลโวลต์
ml/min	มิลลิลิตรต่อนาที
nm	นาโนเมตร
PC	Polycarbonate
PEO	Polyethylene oxide
PVDF	Polyvinylidene fluoride
SEM	Scanning Electron Microscopy
UV	อัลตราไวโอเล็ต
V	ศักย์ไฟฟ้า
$\mu\text{m}$	ไมโครเมตร
wt%	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

# บทที่ 1

## บทนำ

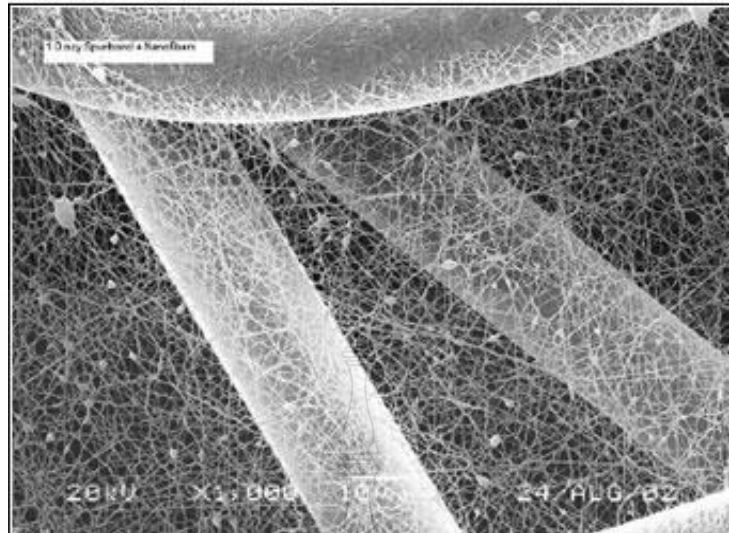
### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันนี้ปัญหาด้านมลพิษทางสิ่งแวดล้อม เป็นปัญหาหลักที่ทั่วโลกให้ความสำคัญเป็นลำดับต้นๆ มลพิษทางสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ ได้แก่ มลพิษทางน้ำ มลพิษทางอากาศ เป็นต้น จากปัญหาดังกล่าวนี้ จึงได้มีการคิดค้นพัฒนา วัสดุอุปกรณ์และเทคนิคต่างๆ ขึ้นมาอย่างมากมาย เพื่อที่จะป้องกันมลพิษดังกล่าว

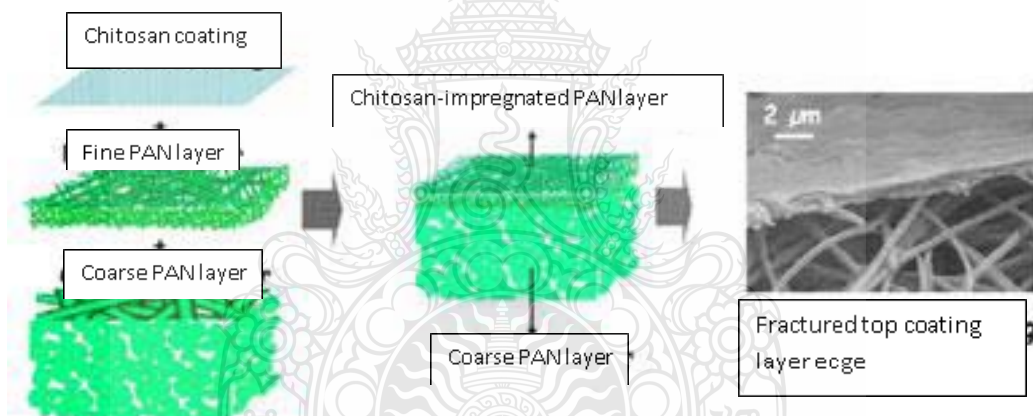
วัสดุสิ่งทอที่ใช้งานทางด้านสิ่งแวดล้อมได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ในชีวิตประจำวันเราจะพบว่าผืนผ้าที่ทอจากเส้นใยที่มีขนาดเล็ก ผ้าจะมีความละเอียด และมีช่องว่างขนาดเล็กกว่าผ้าที่ทอจากเส้นใยขนาดใหญ่ ผืนผ้าที่ทอจากเส้นใยที่เล็กในระดับนาโนเมตร จึงมีช่องว่างขนาดเล็กมาก และสามารถกรองอนุภาคได้จำนวนมากหลายเท่าตัว ดังรูปที่ 1.1 ผ้าเส้นใยนาโนจึงสามารถนำมาใช้สร้างระบบกรองที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อลดมลภาวะทั้งทางอากาศ และทางน้ำ หรือการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสีย ดังรูปที่ 1.2 ระบบกรองเส้นใยนาโนที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อกรองและจับอนุภาคขนาดเล็ก [1] และระบบกรองที่ทำจากเส้นใยขนาดนาโนเมตรที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อพัฒนาสำหรับใช้ทำระบบกรองน้ำหรือของเหลวโดยมีแผ่นฟิล์มโคโตะซานสำหรับด้านแบคทีเรียและจับไอออนของโลหะหนักอยู่ด้านบน ดังรูปที่ 1.3 [2]



รูปที่ 1.1 ผลของขนาดเส้นใยที่เล็กลงต่อประสิทธิภาพการกรองสาร [1]



รูปที่ 1.2 ระบบกรองจากเส้นใยนาโนที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อกรองและจับอนุภาคนาขนาดเล็ก [1]



รูปที่ 1.3 ระบบกรองจากเส้นใยนาโนที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อใช้ทำระบบกรองน้ำหรือของเหลว [2]

วิธีการผลิตผ้าเส้นใยนาโนนั้นมีหลายวิธี เช่น การดึงยืด (Drawing) การสังเคราะห์แบบเท็มเพลต (Template Synthesis) การแยกเฟส (Phase Separation) การประกอบด้วยตัวเอง (Self-Assembly) และการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning) กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต เป็นกระบวนการที่อาศัยแรงทางไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง ทำให้สารละลายพอลิเมอร์กลายเป็นเส้นใยนาโน ประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วนคือ แหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง (High Voltage DC Supply) หลอดบรรจุสารละลายที่ติดเข็มโลหะ (Syringe with Metal Needle)



และวัสดุรองรับ (Collector) เป็นระบบที่มีความซับซ้อนน้อย ต้นทุนต่ำ สามารถควบคุมขนาดและปริมาณการเกิดเส้นใยได้ต่อเนื่องมากยิ่งขึ้น โดยการควบคุมกระบวนการและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

นอกจากนั้นการที่จะเพิ่มปริมาณการดูดซับ โมเลกุลสารอีกวิธี คือ การเติมสารเติมแต่ง (Additive) เช่น ผงถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่อยู่ในรูปคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous Carbon) ชนิดหนึ่ง แต่ถูกผลิตขึ้นมาเป็นพิเศษโดยกระบวนการก่อกัมมันต์ (Activation) ซึ่งทำให้พื้นที่ผิวภายใน (Internal Surface Area) เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนจำนวนมากและขนาดเล็ก จึงมีความว่องไวในการดูดซับสูง [3]

วัสดุที่นำมาใช้ทางด้านสิ่งแวดล้อมนั้นควรมีสมบัติที่เข้ากันได้กับธรรมชาติ เช่น เซลลูโลสอะซิเตด มีการใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งทางด้านอุตสาหกรรมและชีวการแพทย์ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [4] เซลลูโลสอะซิเตด (CA) ซึ่งตัดแปลงมาจากเซลลูโลสธรรมชาติ (อะซิเตดเอสเทอร์) นำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น ตัวกรองบูทรี ผ้าอ้อมดูดซับสูง เมมเบรนสำหรับกระบวนการแยก [5] การค้นคว้าทางด้านสมบัติของวัสดุเซลลูโลสอะซิเตดในระดับนาโนด้วยเทคนิค การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นเรื่องที่น่าสนใจ เพราะมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (Surface-to-Volume Ratio) สูงและยังเป็นวัสดุที่ขบนำนำมาผลิตเป็นแผ่นเยื่อกรองขนาดนาโน [6-12]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเพื่อขึ้นรูปเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตด ภายใต้สภาวะการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน ดังนี้ ระยะห่างระหว่างเข็มถึงชุดเก็บรวบรวมเส้นใย อัตราการป้อนสารละลาย ความเข้มข้นสารละลาย ที่ผสมถ่านกัมมันต์ในปริมาณแตกต่างกัน โดยวิเคราะห์ความหนืดของสารละลายตัวอย่างที่มีผลต่อการปั่นเส้นใย ลักษณะสัณฐานของเส้นใย และความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ของผ้าไม่ทอเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตดผสมถ่านกัมมันต์ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาวัสดุที่ดูดซับสารอินทรีย์ให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานต่อไปในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาสภาวะการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตของสารละลายเซลลูโลสอะซิเตดผสมผงถ่านกัมมันต์ที่สามารถขึ้นรูปเส้นใยผ้าไม่ทอได้ ความสม่ำเสมอของผ้าไม่ทอ และขนาดเส้นใย

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณถ่านกัมมันต์ที่มีผลต่อ ความสม่ำเสมอของผ้าไม่ทอขนาดเส้นใย และการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ของผ้าไม่ทอเซลลูโลสอะซิเตด

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ทำการวัดความหนืดของสารละลายเซลลูโลสอะซิเตตที่ความเข้มข้น 8 และ 10 wt% ผสมถ่านกัมมันต์ที่ปริมาณ 0, 1, 2, 3 และ 5 wt% ก่อนทำการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

- ทดสอบความหนืดของสารละลายเซลลูโลสอะซิเตตผสมถ่านกัมมันต์ที่ปริมาณต่างๆกัน โดยเครื่อง Viscometer

1.3.2 ทำการปั่นเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตตผสมถ่านกัมมันต์ ด้วยไฟฟ้าสถิต ที่สภาวะการปั่นเส้นใย ดังนี้ อัตราการป้อนสารละลาย (Throughput Rate) คงที่ที่ 0.1 mm/min ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเข็ม 0.6 mm ระยะห่างระหว่างเข็มถึงชุดเก็บรวบรวมเส้นใย 15 cm ศักย์ไฟฟ้า 30 kV

1.3.3 ทำการศึกษาสัณฐานวิทยาของเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตตจากผ้าไหมทอที่เตรียมได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

1.3.4 นำตัวอย่างผ้าไหมทอจากเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตตผสมถ่านกัมมันต์ มาทดสอบการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู ที่ความเข้มข้น 5 ppm เพื่อเปรียบเทียบปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้

### 1.4 ประโยชน์ของการวิจัย

1.4.1 ได้ผ้าไหมทอเซลลูโลสอะซิเตตผสมถ่านกัมมันต์ที่มีความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ ที่ผลิตได้เองในประเทศ

1.4.2 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

### 1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

1.5.1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 เตรียมวัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1.5.3 เตรียมขึ้นรูปผ้าไหมทอเซลลูโลสอะซิเตตผสมถ่านกัมมันต์ที่ปริมาณต่างๆ และหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูป

1.5.4 ทำการศึกษาสัณฐานวิทยาของเส้นใยจากตัวอย่างผ้าไหมทอเซลลูโลสอะซิเตตผสมถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

1.5.5 ทดสอบการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู

1.5.6 วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการวิจัย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning) และการนำไปใช้ประโยชน์ ยกตัวอย่างดังนี้

Doshi และคณะ [13] ได้ศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับเส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่ำกว่าระดับไมโครเมตรที่เตรียมจากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตซึ่งไม่สามารถเตรียมเส้นใยแบบนี้จากเทคนิคอื่นได้ในขณะนั้น ทั้งสองทำการศึกษาเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเพื่ออธิบายถึงพารามิเตอร์ที่มีผลต่อกระบวนการและลักษณะพื้นฐานของเส้นใยในการวิจัยครั้งนี้ใช้พอลิเอทิลีนออกไซด์ (Polyethylene Oxide ; PEO) ที่มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 1 ถึง 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้ศักย์ไฟฟ้ามีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 12 กิโลโวลต์และใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy ; SEM) วิเคราะห์เส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นฐานของเส้นใยการวิจัยพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อเทคนิคปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ได้แก่ สมบัติของสารละลาย (ความหนืด ความนำไฟฟ้า และแรงตึงผิว) ศักย์ไฟฟ้าบริเวณปลายเข็ม ระยะห่างปลายเข็มและตัวรองรับเส้นใยและสภาพแวดล้อม (อุณหภูมิและความชื้นในห้องปฏิบัติการ)

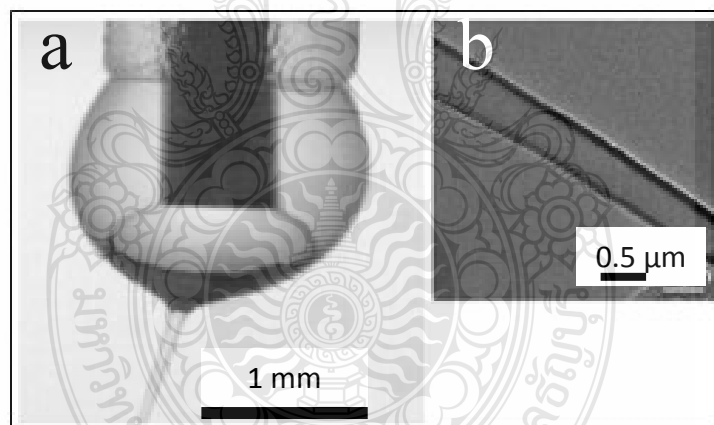
Reneker และคณะ [14] ศึกษาลักษณะของปมที่เกิดขึ้นบนเส้นใยนาโน โดยใช้พอลิเอทิลีนออกไซด์ (Polyethylene Oxide; PEO) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย  $9 \times 10^5$  กรัมต่อโมล สารละลายจะถูกเตรียมที่อุณหภูมิห้อง สารละลาย PEO บรรจุในเข็มฉีดยาที่รูเปิดมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.3 มิลลิเมตร หลอดฉีดยาเชื่อมอยู่กับเครื่องกำเนิดศักย์ไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งค่าที่ใช้ในการวิจัยมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 18 กิโลโวลต์และใช้แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์เป็นตัวรองรับเส้นใยโดยวางห่างจากปลายรูเปิดของเข็มฉีดยาเป็นระยะ 21.5 เซนติเมตร เส้นใยที่ได้นำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่าเมื่อสารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้นระยะทางระหว่างปมบนเส้นใยมีค่าเพิ่มขึ้นนั่นคือมีจำนวนปมน้อยลง นอกจากนี้รูปร่างของปมค่อยๆเปลี่ยนจากทรงกลมเป็นทรงกรวย เมื่อพิจารณาค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ถ้าค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจำนวนปมจะเพิ่มมากขึ้น

Wu และคณะ [15] ทำการศึกษาผลของตัวทำละลายที่ส่งผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเอทิลเซลลูโลส (Ethyl Cellulose; EC) โดยใช้เตตระไฮโดรฟอรั่นผสมกับไดเมทิลอะซิตาไมด์ ในอัตราส่วน 100:0 , 80:20 และ 20:80 เป็นตัวทำละลาย ผลให้สารละลายมีค่าความเข้มข้น 13

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ ผลการศึกษาพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลตเพิ่มขึ้น

Reznik และคณะ [16] ได้ทำการศึกษาปัญหาที่สำคัญที่พบบ่อยในระหว่างการเกิดเส้นใยนาโนผสมแบบร่วมแกน คือการที่หยดด้านนอก (Outer Droplet) สามารถถูกเปลี่ยนเป็นเส้นได้ ในขณะที่หยดด้านใน (Inner Droplet) ไม่สามารถถูกเปลี่ยนเป็นเส้นได้ ดังรูปที่ 2.1 (a) ที่เป็นเช่นนี้ เพราะว่าที่หยดด้านในไม่มีประจุที่ผิวจากแรงไฟฟ้าสถิตเกิดขึ้น การเปลี่ยนรูปของหยดสารละลายด้านในให้เป็นแกนในของเส้นใยเกิดจากแรงหนืด (Viscous Force) เพียงอย่างเดียว โดยหลักการแล้ว แรงหนืดสามารถหาได้จากการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ซึ่งจะทำให้สามารถหาเงื่อนไขทั่วไปสำหรับการทดลองได้ง่ายขึ้น

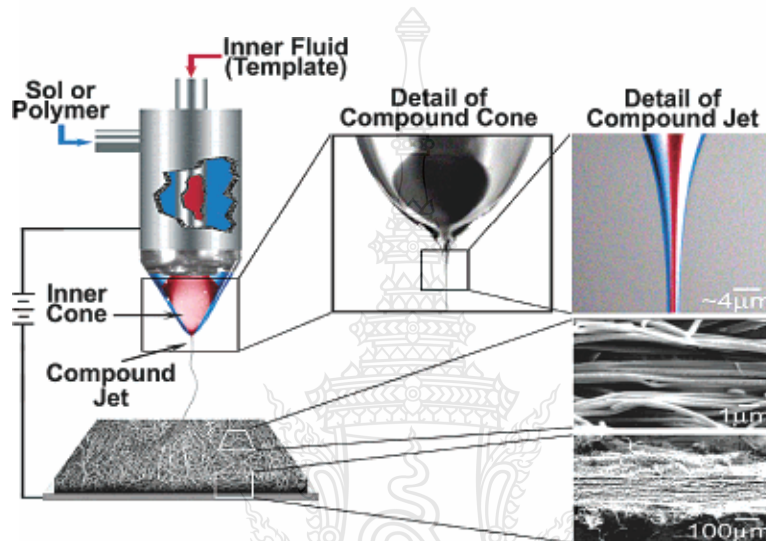
ในกรณีที่มีการเลือกใช้ตัวแปรและเงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสม การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกนสามารถใช้ประดิษฐ์เส้นใยนาโนผสมแบบร่วมแกนของวัสดุหลากหลายชนิดได้ด้วย ตัวอย่างเช่น เส้นใยผสมแบบร่วมแกนของ Polyvinylidene Fluoride (PVDF) (แกนใน) - Polycarbonate (PC) (เปลือกนอก) ดังรูปที่ 2.1 (b) เป็นต้น



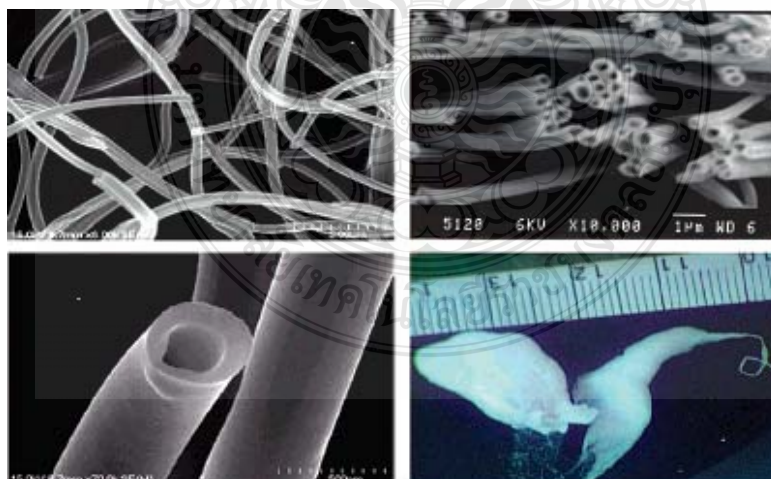
- (a) รูปจากกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงของหยดผสมแบบร่วมแกนที่หัวฉีดปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน
- (b) รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของเส้นใยแบบร่วมแกนของ Polyvinylidene Fluoride (PVDF) (แกนใน) และ Polycarbonate (PC) (เปลือกนอก)

รูปที่ 2.1 เส้นใยผสมแบบร่วมแกน Polyvinylidene Fluoride (PVDF) (แกนใน)  
Polycarbonate (PC) (เปลือกนอก)

Loscertales และคณะ [17] ได้ทำการศึกษาการปั่นเส้นใยนาโนกลวงด้วยเทคนิค Electrohydrodynamically (EHD) โดยที่สารละลายของเหลวที่อยู่ด้านนอกต้องไม่เข้ากับสารละลายของเหลวที่อยู่ด้านใน ดังรูปที่ 2.2 สารละลายที่ไม่เข้ากัน สีแดงกับสีน้ำเงิน จะถูกฉีดออกมาพร้อมกัน ระยะห่างที่พอเหมาะกับการแข็งตัวของสารละลายด้านนอก จะได้เส้นใยที่ผิวด้านนอกแข็งตัว ส่วนด้านในเต็มไปด้วยของเหลว

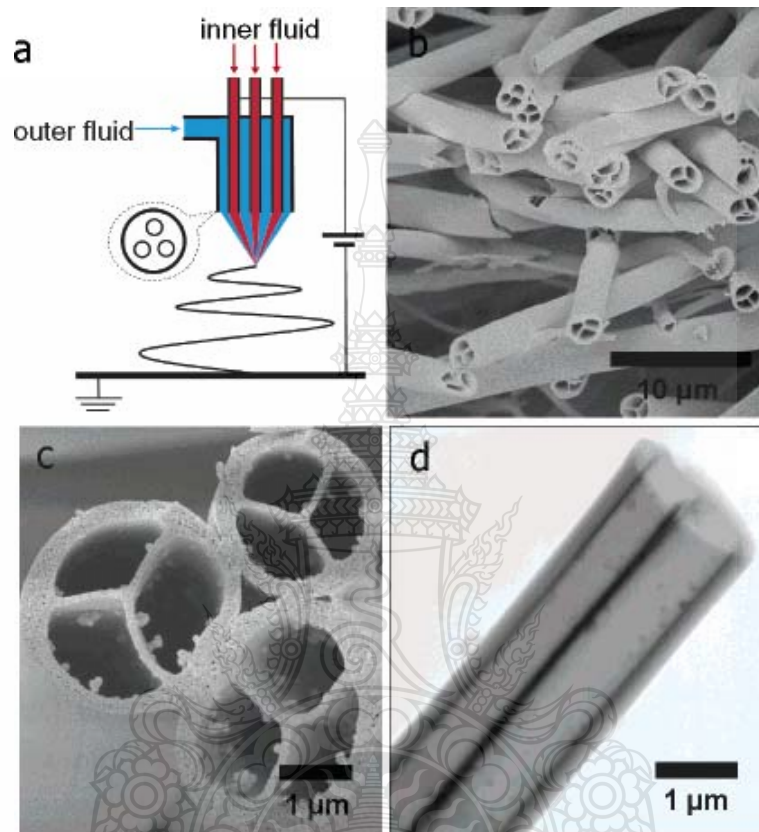


รูปที่ 2.2 การปั่นเส้นใยนาโนกลวงด้วยเทคนิค Electrohydrodynamically (EHD)



รูปที่ 2.3 เส้นใยนาโนกลวงที่เก็บเส้นได้จากวิธี (EHD) สารละลายที่ใช้จะอยู่ด้านนอก ส่วนด้านในใช้กลีเซอรินเป็นสารละลายด้านใน จากนั้น นำไปอบให้แห้งที่ 500°C

Zhao และคณะ [18] ได้ทำการศึกษาการปั่นเส้นใยไมครอนกลวงจำนวนหลายรูการทดลอง ดังรูปที่ 2.4

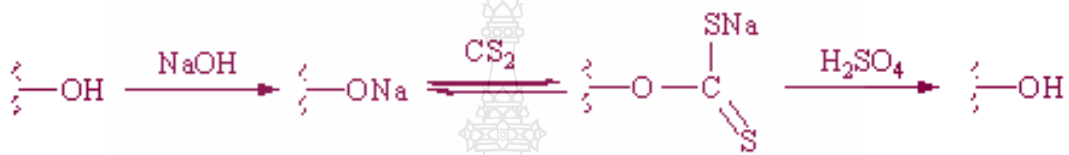


- (a) เป็นการไหลของแกนสีแดงมี 3 ช่อง สีแดงเป็น paraffin oil และสีน้ำเงินเป็นสารละลาย  $Ti(OiPr)_4$
- (b) รูปจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM ของเส้นใย  $Ti(OiPr)_4$  ที่ได้กำจัด paraffin oil ออกแล้ว
- (c) แสดงความเป็นรูพรุนเกิดขึ้นตลอดเส้น
- (d) รูปถ่ายด้วย TEM แสดงให้เห็นว่าช่องว่างด้านในมีลักษณะตรงต่อเนื่อง

รูปที่ 2.4 การปั่นเส้นใยไมครอนกลวงจำนวนหลายรู

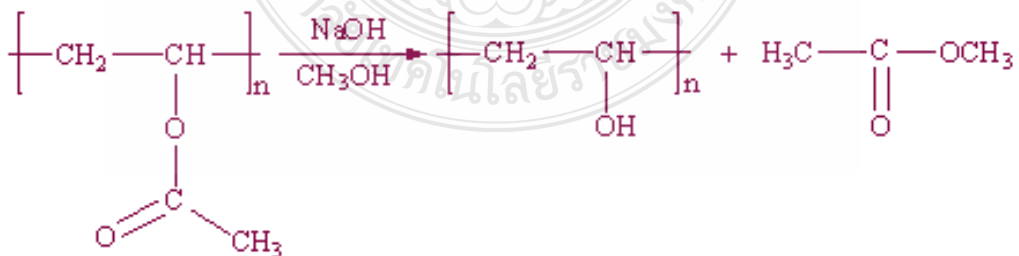
## 2.2 เซลลูโลสอะซิเตต (Cellulose Acetate) [19]

เซลลูโลสอะซิเตต (Cellulose Acetate) เป็นพอลิเมอร์กึ่งสังเคราะห์ (Semi-Synthetic Polymers) พอลิเมอร์ประเภทนี้เกิดจากปฏิกิริยาเคมีของพอลิเมอร์ไบโอพอลิเมอร์ ตัวอย่างเช่น เอสเทอร์ หรือ อีเทอร์ของเซลลูโลส หรือ อะไมโดส รวมทั้งยังผ่านการวัลคาไนซ์มาแล้ว ปฏิกิริยาดังกล่าวมักเกิดกับหมู่แทนที่ (Substituent) หรือหมู่ข้างเคียง (Side Group) ของไบโอพอลิเมอร์ โดยไม่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างหลักของสายโซ่โมเลกุล ดังรูปที่ 2.5



### รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาการเกิด Cellulose Xanthate

หมู่  $\text{-OH}$  ซึ่งเป็นหมู่แทนที่ในเซลลูโลสสามารถเกิดปฏิกิริยาและถูกเปลี่ยนเป็น โซเดียม เซนเทท (Sodium Xanthate) เมื่ออยู่ในโครงสร้างนี้ทำให้เซลลูโลสอยู่ในสภาพที่ละลายได้สามารถนำไปผ่าน กระบวนการเพื่อขึ้นรูปเป็นเส้นใย เรยอน หรือฟิล์ม เซลโลเฟน ได้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับหมู่แทนที่ หรือ หมู่ข้างเคียงในโมเลกุลพอลิเมอร์ เรียกว่า Polymer Analogous Reaction สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ได้ เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์สังเคราะห์ได้จากการ Methanolysis ของพอลิไวนิลอะซิเตต



### รูปที่ 2.6 การสังเคราะห์พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สังเคราะห์ได้จากการ Methanolysis

ปฏิกิริยานี้มีความสำคัญมาก เพราะไวนิลแอลกอฮอล์มอนอเมอร์ ( $H_2C=CHOH$ ) ไม่เสถียร สามารถเกิด Tautomerize ไปเป็นอะเซตัลดีไฮด์ ( $CH_3CHO$ ) ได้ง่าย จึงไม่นิยมเตรียมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จากพอลิเมอร์ไรเซชันของไวนิลแอลกอฮอล์มอนอเมอร์โดยตรง

### 2.2.1 เซลลูโลสชีวภาพ (Cellulic Biomass)

เซลลูโลสชีวภาพ (Cellulic Biomass) หมายถึง สารที่มีองค์ประกอบหลักอย่างแรกเป็นเซลลูโลสและมีองค์ประกอบหลักอื่นๆคือ เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน(Lignin) ส่วนองค์ประกอบรองจะเป็นพวกโปรตีน, ไขมัน, สารประกอบอินทรีย์ต่างๆ และ แป้ง สารที่ใช้ส่วนใหญ่มีเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบประมาณ 40-60% เซลลูโลสเป็นโพลีเมอร์ของกลูโคสมีโซ่ยาว (DP) 1000-10000 เป็น โพลีเมอร์แบบเส้นตรงไม่มีกิ่ง กลูโคสแต่ละตัวเชื่อมต่อกันด้วยโซ่  $\beta$  - 1,4 โซ่โพลีเมอร์แต่ละสายจะวิ่งขนานกันและสร้างพันธะไฮโดรเจนเชื่อมต่อกัน ซึ่งอาจจะสูงถึง 3 พันระต่อ 1 หน่วยกลูโคส แต่เมื่อรวมกันหลายๆ สายจะเรียกว่า ไมโครไฟบริล (Microfibril) ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบโครงผลึกสามมิติ ส่วนที่เป็นเซลลูโลสแบบผลึก (Crystalline) นั้นจะมีความคงทนต่อเอนไซม์และกรดมาก ส่วนที่ไม่ได้เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจนแต่มีการจัดเรียงตัวแบบสุ่มจะเรียกว่าเซลลูโลสแบบอสัณฐาน (Amorphous) เซลลูโลสธรรมชาติส่วนใหญ่จะเป็นเซลลูโลสแบบผลึก แหล่งที่มาหลักๆ ของเอทานอล คือ กลูโคส ซึ่งมาจากเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส คือ โพลีเมอร์ที่ผสมกันระหว่างโพลีเมอร์แบบเส้นตรงและโพลีเมอร์แบบมีกิ่งของน้ำตาลคาร์บอน 5 เช่น ไซโลสและอร่าบิโนส และน้ำตาลคาร์บอน 6 เช่น กลูโคส แมนโนส และกาแลคโตส เฮมิเซลลูโลสนี้ จะถูกละลายและถูกไฮโดรไลซ์ไปเป็นน้ำตาลทั่วไปโดยกรดเจือจางที่อุณหภูมิประมาณ  $120^{\circ}C$  ซึ่งสารที่ใช้ส่วนใหญ่ในกระบวนการจะมีเฮมิเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบอยู่ 15-25% ลิกนินเป็นส่วนที่แยกออกจากเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ในที่นี้ลิกนินจะไม่เป็นส่วนประกอบของคาร์โบไฮเดรต แต่จะประกอบด้วยโครงผลึกของฟีนอลิก-โพเพน ลิกนินนี้เปรียบเสมือนเป็นตัวป้องกันน้ำและเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงคอยป้องกันการทำร้ายจากจุลชีพ ลิกนินจะไม่ทำปฏิกิริยาใดๆในกระบวนการเตรียมและกระบวนการไฮโดรซิส มันเพียงถูกลดความเป็นโพลีเมอร์ลงเท่านั้นการเผาผลิกนินจะเป็นการผลิตพลังงานให้กับโรงงาน สารที่ใช้กระบวนการผลิตส่วนมากจะมีลิกนินเป็นส่วนประกอบอยู่ 15-30% เซลลูโลส เป็นส่วนประกอบที่มีมากที่สุดในเซลล์พืช ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงแก่เซลล์พืช โดยธรรมชาติจะไม่พบเซลลูโลสในรูปอิสระแต่มักรวมกับลิกนินเฮมิเซลลูโลส เพนโตแซน กัม แทนนิน ไวมัน และสารเกิดสีเป็นต้น



### 2.2.2 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมมากกว่าสตาโรลในการใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ เนื่องจากสามารถตัดแปรรูปได้มากมายและเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ (Biodegradable) มีประวัติอันยาวนานเกี่ยวกับการพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีรวมทั้งการนำไปใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ แต่ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับสมบัติทางเคมีและโครงสร้างทางกายภาพนั้นเป็นความรู้ใหม่ ในปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ทางด้านพอลิเมอร์ได้ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาปรับปรุงเพื่อนำความรู้ใหม่เกี่ยวกับการนำเซลลูโลสไปใช้ประโยชน์ เซลลูโลสมีสมบัติพิเศษกว่าวัสดุอื่นที่มีโครงสร้างทางเคมีและองค์ประกอบที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งทำให้มีลักษณะแข็งและมีผลึกค่อนข้างสูงทำให้ละลายในสารละลายอินทรีย์โดยทั่วไปได้ยาก คุณสมบัติเหล่านี้ส่งเสริมให้เซลลูโลสสามารถนำไปใช้งานทางด้านวิศวกรรมได้ มีการค้นพบที่สำคัญคือเซลลูโลสมีลักษณะตัดแปรรูปทางเคมีจะสามารถละลายน้ำ สารละลายอินทรีย์และสารละลายที่เป็นอนุพันธ์ของโลหะได้อนุพันธ์เซลลูโลสที่ผ่านการตัดแปรรูปนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น ใช้เป็นยาเครื่องสำอาง อาหารและบรรจุภัณฑ์ต่างๆ เป็นต้น

สามารถแบ่งชนิดของเซลลูโลสตามปริมาณการละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ 3 ชนิด คือ

1. แอลฟาเซลลูโลส ( $\alpha$  - Cellulose) คือเซลลูโลสที่ไม่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 17.5 % ที่อุณหภูมิห้อง
2. เบต้าเซลลูโลส ( $\beta$  - Cellulose) คือ เซลลูโลสที่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 17.5 % ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งก็คือแอลฟาเซลลูโลสที่ถูกทำให้ DP ลดลง และจะตกตะกอนในสภาพที่เป็นกรด
3. แกมมาเซลลูโลส ( $\gamma$  - Cellulose) คือ เซลลูโลสที่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 17.5 % ทุกสภาพความเป็นกรด-ด่าง และตกตะกอนได้ด้วยแอลกอฮอล์

### 2.3 นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) [20]

“นาโน (Nano)” มีพื้นฐานรากศัพท์จากภาษากรีกจากคำว่า “นาโนส(Nanos)” ที่แปลว่า “แคระ (Dwarf)” และมักเรียกกันในอีกชื่อหนึ่งว่า “ตัวแคระ” โดยทั่วไปอนุภาคระดับนาโนจะมีขนาดอยู่ในช่วง  $10^{-9}$  เมตร ดังนั้นนาโนจึงเป็นสิ่งที่เล็กมากตัวอย่างเช่น สิ่งของที่มีขนาด 1 นาโนเมตร (Nanometer, nm) ก็หมายถึง ก็หมายถึงมีขนาด 1 ในพันล้านเมตร(หนึ่งในพันล้านส่วนของเมตร) เมื่อนำคำว่า “นาโน” ไปใช้ในหน่วยใดก็ตามจะหมายถึงพันล้านส่วนของหน่วยนั้น เช่น 1 นาโนเมตรมีขนาดเท่ากับ 1 ใน 1000 ล้านเมตร หรือเล็กประมาณ 100,000 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นผมมนุษย์และเม็ดเลือดแดงซึ่งมีขนาดประมาณ 80,000-120,000 นาโนเมตรและ 7,000 นาโนเมตร ในขณะที่อะตอมมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 1 นาโนเมตร ในขณะที่ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลโปรตีนมีขนาด 1 นาโนเมตรหรือใหญ่กว่า

นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) เป็นคำศัพท์ที่มีการนำมาใช้ใน ค.ศ. 1974 โดยนักวิทยาศาสตร์จากมหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น ชื่อ Norio Taniguchi ซึ่งให้คำจำกัดความของนาโนเทคโนโลยีว่าเป็นวิชาการในการประกอบและผลิตสิ่งต่างๆขึ้นมาจากการจัดเรียงอะตอมหรือโมเลกุลเข้าด้วยกันในระดับนาโนเมตร โดยใช้เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดการ การสร้าง หรือการสังเคราะห์วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องจักร หรือผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กประมาณ 1-100 นาโนเมตร รวมถึงการออกแบบหรือการใช้เครื่องมือในการสร้างวัสดุที่มีขนาดเล็กมาก หรือเรียงอะตอมและโมเลกุลในตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ โดยเป็นการผสมผสานของวิทยาศาสตร์หลายแขนง เช่น เคมี ชีววิทยา ฟิสิกส์ เทคโนโลยีชีวภาพ วิศวกรรมศาสตร์ และเครื่องจักรกล ทำให้ได้โครงสร้างของวัสดุหรือสสารที่มีสมบัติพิเศษ จึงเป็นความพยายามของมนุษย์ที่จะสร้างและพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับสิ่งที่มีขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตร

ปัจจุบันทั่วโลกกำลังให้ความสนใจกันนาโนเทคโนโลยีเนื่องจากเป็นปัจจัยสำคัญในการผลักดันการพัฒนาเทคโนโลยีในศตวรรษที่ 21บทบาทสำคัญของการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น วัสดุนาโนเป็นกลุ่มหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจเนื่องจากสารประยุกต์ใช้งานได้หลายด้านเช่น นาโนพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพเพื่อใช้เป็นวัสดุในการนำส่งยา การใช้นาโนเทคโนโลยีทางด้านสิ่งแวดล้อมในการตรวจสอบการปนเปื้อนและบำบัดของเสียอย่างมีประสิทธิภาพ การใช้พลาสติกนาโนคอมโพสิต (Plastic Nanocomposites) เช่น การพัฒนาฟิล์มพลาสติกนาโนคอมโพสิตที่มีสมบัติด้านจุลชีพและมีความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซบางชนิดและไอน้ำเพื่อการทำบรรจุภัณฑ์ช่วยยืดอายุความสดของผักและผลไม้เป็นการเพิ่มมูลค่าการส่งออกสินค้าทางเกษตร การผลิตผงอนุภาคนาโนมาใช้ด้านจุลชีพและไวรัส การตรวจสอบการเกิด

มะเร็ง ซึ่งจะช่วยยกระดับคุณภาพชีวิตของคนทั่วโลก และการผลิตเส้นใยนาโนคอมโพสิตตอนที่ประกอบด้วยอนุภาคของคอปเปอร์ออกไซด์ที่มีฤทธิ์ต้านจุลชีพเป็นต้น

## 2.4 การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning)

ปัจจุบันทั่วโลกให้ความสำคัญต่อนานาเทคโนโลยีเป็นอย่างมากโดยสังเกตจากการประชุมในระดับนานาชาติ การจัดตั้งองค์กรที่เกี่ยวข้องมีรายงานการวิจัยเพิ่มขึ้นจำนวนมากและรวดเร็ว และได้งบประมาณสนับสนุนจากรัฐบาลในแต่ละประเทศที่เพิ่มขึ้นสูงในแต่ละปี ทำให้มีผลิตภัณฑ์ต่างๆที่เกิดจากนาโนเทคโนโลยี เพิ่มมากขึ้น เช่น เส้นใยนาโน เป็นต้น ในทางเภสัชกรรมมีการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีสำหรับพัฒนาระบบนำส่งยาแบบใหม่ ซึ่งเส้นใยนาโนเป็นรูปแบบที่กำลังได้รับความสนใจอย่างมาก ข้อดีของเส้นใยนี้คือ เป็นเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับนาโนเมตร มีอัตราส่วนระหว่างพื้นผิวต่อปริมาตร (Surface-to-Volume Ratio) สูงมากกว่า 1,000 เท่าเมื่อเทียบกับเส้นใยในระดับไมโครเมตร (Microfibers) มีช่องว่างขนาดเล็ก มีน้ำหนักเบา นอกจากนี้ แผ่นเส้นใยมีรูพรุนขนาดเล็กอยู่เป็นจำนวนมาก (High Porosity) ทำให้มีการส่งผ่านของเหลวหรือก๊าซได้ดี ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลทั้งในด้านความแข็งแรงและความยืดหยุ่น ดังนั้นจึงมีการนำไปประยุกต์ใช้ในงานหลายแขนง เช่น ใช้เป็นวัสดุควบคุมการปลดปล่อยสารออกฤทธิ์จากเครื่องสำอางเข้าสู่ผิวในลักษณะของแผ่นมาสก์หน้า ใช้เป็นอวัยวะเทียม ใช้ทำพลาสติกเพื่อใช้เป็นวัสดุปิดแผล (Wound Dressing) ใช้งานด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ (Tissue Engineering) เช่น หลอดเลือดเทียม เนื้อเยื่อเทียมสำหรับซ่อมแซมกระดูกอ่อน และเส้นประสาท เป็นต้น ในการเตรียมเส้นใยนาโนสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การดึงยืด (Drawing) การสังเคราะห์ด้วยแม่แบบ (Template Synthesis) การแยกวัฏภาค (Phase Separation) และการจัดเรียงตัวที่เกิดขึ้นได้เอง (Self-Assembly) เป็นต้น อย่างไรก็ตามวิธีข้างต้นเป็นวิธีซึ่งให้เส้นใยนาโนที่ไม่ต่อเนื่องขึ้นตอนยุ่งยากได้ผลผลิตน้อยและมีราคาแพง แต่มีอีกวิธีหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหาข้างต้นได้คือวิธี การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning) เป็นวิธีที่มีขั้นตอนไม่ซับซ้อน และมีความสะดวกในการปรับพารามิเตอร์ต่างๆที่ควบคุมการเกิดเส้นใยลักษณะต่างๆได้

การเตรียมเส้นใยนาโนด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต เป็นกระบวนการที่พัฒนาขึ้นมานานกว่า 80 ปี ในไทยมีการนำกระบวนการนี้มาใช้ในการเตรียมเส้นใยกันอย่างแพร่หลายมากขึ้นสำหรับเตรียมเส้นใยนาโนของวัสดุพอลิเมอร์และสารอนินทรีย์ออกไซด์หลากหลายชนิด วิธีการนี้สามารถเตรียมเส้นใยนาโนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ประมาณ 100 ถึง 1000 นาโนเมตร (Nanometer, nm) โดยข้อดีของกรรมวิธีการผลิตดังกล่าวมีหลายประการ เช่น เป็นกระบวนการที่ง่าย

อุปกรณ์ไม่ซับซ้อน ประหยัดทั้งเวลาและค่าใช้จ่าย ส่วนข้อเสียที่พบบ้างได้แก่ อาจมีสารเคมีที่เป็นพิษที่เกิดจากตัวทำละลายที่ระเหยออกมาและยังเป็นกระบวนการที่ส่วนมากยังใช้กับห้องปฏิบัติการ[10]

กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต เป็นทางเลือกที่สามารถใช้เตรียมเส้นใยในระดับไมโครเมตรและนาโนเมตรได้ดีเป็นกระบวนการที่มีงานวิจัยตีพิมพ์มากที่สุดในปัจจุบัน [11] การเกิดเส้นใยด้วยกระบวนการนี้จะอาศัยแรงทางไฟฟ้าที่เกิดจากศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงไปที่ปลายเข็มทำให้เกิดประจุไฟฟ้าที่ผิวพอลิเมอร์เหลว เมื่อความเข้มของสนามไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นจนทำให้แรงผลักรวมมากกว่าแรงดึงดูดของพอลิเมอร์ทำให้ลำสารละลายพอลิเมอร์ยืดยาวออกอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งไปสะสมที่วัสดุรองรับเส้นใย โดยประกอบด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญ 3 ส่วนคือ แหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง (High Voltage Power Supply) หลอดบรรจุสารละลายที่ติดเข็มโลหะ (Syringe with Needle) และวัสดุรองรับที่เป็นโลหะ (Metal Collector) [12] ทั้งนี้ในระบบปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตถูกพัฒนาให้ดีขึ้น เพิ่มอุปกรณ์สำหรับควบคุมการไหลของสารละลาย (Syringe Pump) และทำให้การประดิษฐ์เส้นใยมีประสิทธิภาพสูงขึ้นยังสามารถควบคุมขนาดและปริมาณการเกิดเส้นใยได้ต่อเนื่องมากยิ่งขึ้นซึ่งในส่วนวัสดุรองรับเส้นใยอาจมีหลายแบบขึ้นอยู่กับกรออกแบบวัตถุประสงค์ของการศึกษาเส้นใยและการนำเส้นใยไปใช้ เช่น แบบแกนหมุนร่วม (Rotating Mandrel Collector) แบบแกนแผ่นดิสก์หมุน (Rotating Disk Collector) แบบอะลูมิเนียมกริด (Aluminium Grid Collector) แบบเฟรม (Fram Collector) แบบตั้งระนาบ (Plate Collector) และแบบหลายเฟรมบนแกนหมุนร่วม (Rotating Multi-Fram Collector) และแบบเนินภูเขาสามเหลี่ยม (Mountain-Folded Collector) เป็นต้น [13]

#### 2.4.1 หลักการเกิดเส้นใย

กระบวนการเกิดเส้นใยมีขั้นตอนที่สำคัญ 5 ขั้นตอนดังนี้

2.4.1.1 การเกิดหยดของเหลว (Droplet Generation)

2.4.1.2 การเกิดกรวยเทย์เลอร์ (Taylor's Cone Formation)

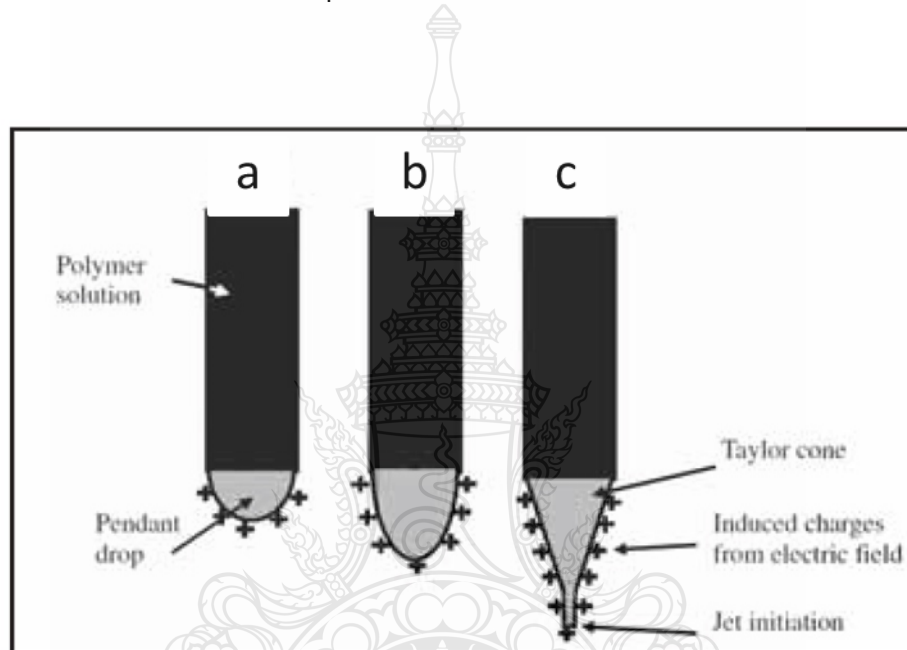
2.4.1.3 การรัศตัวของลำของเหลวที่พุ่งออกมา (Slender Thinning Jet)

2.4.1.4 กระบวนการปั่นแบบไม่เสถียร (Whipping Instability Region)

2.4.1.5 การแข็งตัวของกระแสพอลิเมอร์เป็นเส้นใย (Solidification Into Nanofibers)

#### 2.4.1.1 การเกิดหยดของเหลว (Droplet Generation)

เริ่มจากการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงแก่สารละลายพอลิเมอร์โดยเพิ่มความต่างศักย์ขึ้นเรื่อยๆจนทำให้เกิดหยดของสารละลายพอลิเมอร์ ที่บริเวณปลายช่องเปิดของหลอดบรรจุ ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกลมการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นผลเนื่องมาจากแรงตึงผิวที่พยายามยึดผิวของเหลวไว้ แรงตึงผิวจะขนานผิวของเหลวและตั้งฉากกับเส้นขอบของวัตถุ ทำให้เกิดรูปร่างทรงกลมของหยด ซึ่งจะทำให้เกิดการรักษาสมดุลของแรงต่างๆด้วยแรงโน้มถ่วง

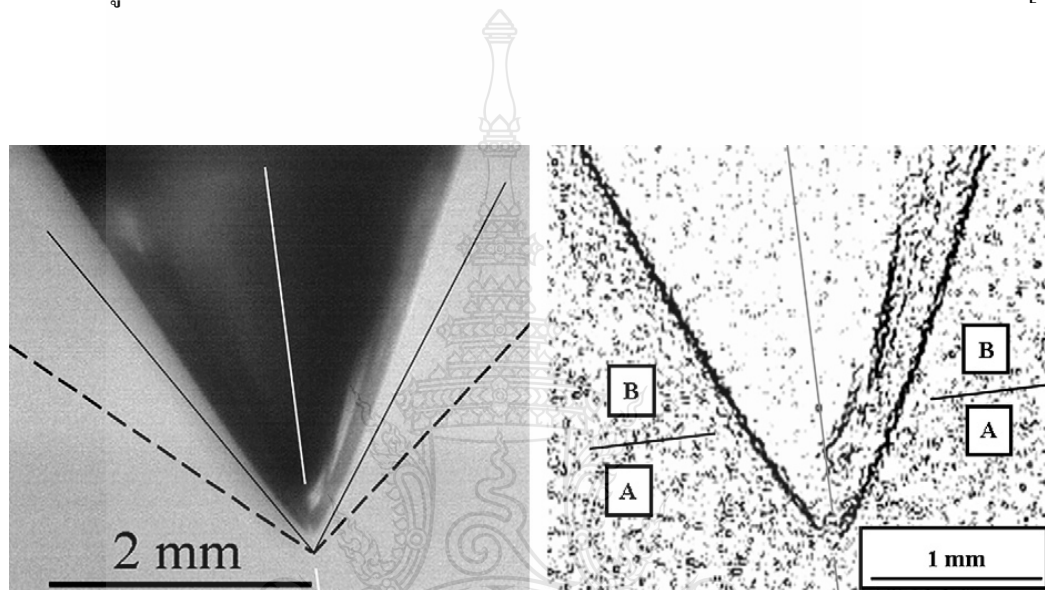


- (a) การเกิดหยดของเหลว (Pendant Drop)
- (b) การยืดของหยดสารละลาย (Strength Droplet)
- (c) การเกิดกรวยเทเลอร์

รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนรูปร่างของพอลิเมอร์ด้วยแรงทางไฟฟ้า

#### 2.4.1.2 การเกิดกรวยเทเลอร์ (Taylor's Cone Formation)

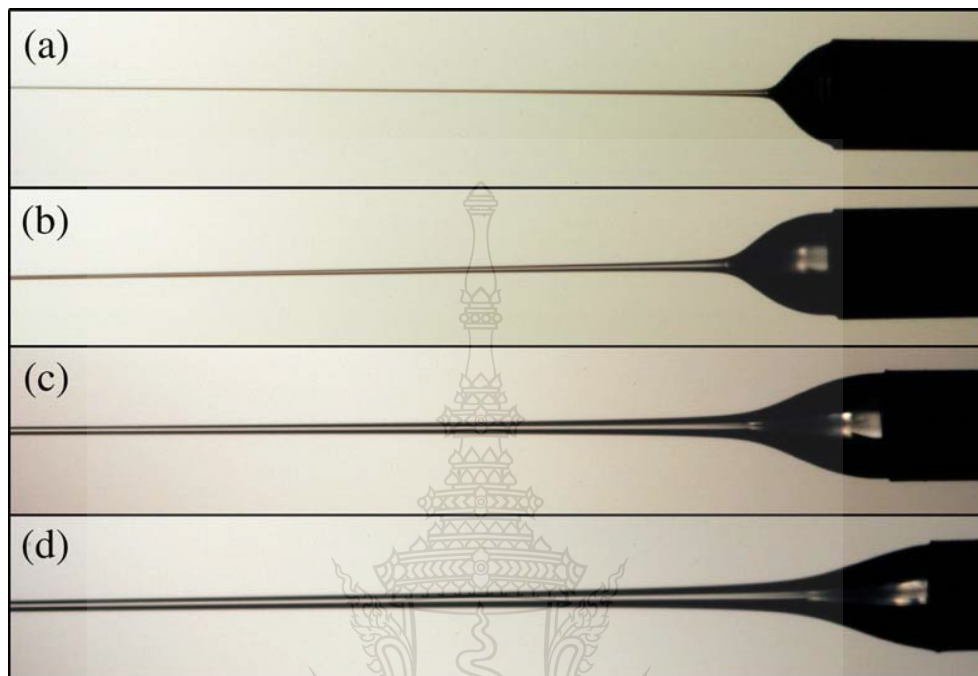
การเตรียมพอลิเมอร์ในรูปแบบสารละลาย ในหลอดบรรจุสารนั้นจะอยู่ในสถานะของไหลเมื่อพิจารณาหยดของสารละลายพอลิเมอร์ ที่บริเวณปลายเข็ม ขณะที่ต่อหัวไฟฟ้ากับปลายเข็มฉีดยา ไอออนของสารละลายพอลิเมอร์ก็จะมีลักษณะเดียวกับหัวไฟฟ้าที่ต่อจึงเกิดแรงกระทำเกิดขึ้นที่บริเวณผิวของของไหล ซึ่งแรงดึงผิวมีค่าเท่ากับแรงทางไฟฟ้าส่งผลให้ของไหลยืดยาวขึ้นจนมีลักษณะเป็นรูปกรวยแบบเทเลอร์ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการผลัดกันของประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้น [15]



รูปที่ 2.8 การเกิดกรวยเทเลอร์ด้วยแรงไฟฟ้า

#### 2.4.1.3 การรัดตัวของลำของเหลวที่พุ่งออกมา (Slender Thinning Jet)

การเพิ่มสนามไฟฟ้ามากขึ้นทำให้แรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Force) มากขึ้นจนสามารถเอาชนะแรงดึงผิวของของเหลว และประจุก็จะหลุดออกจากผิวหน้าของไหล พุ่งไปยังวัสดุรองรับ เมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าขึ้นไปอีกส่วนยอดโคนจะเกิดการสะสมของประจุเพิ่มมากขึ้นทำให้แรงผลัดกันของประจุที่เพิ่มขึ้นนี้มากกว่าแรงดึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์ จึงทำให้เกิดการรัดตัวของลำของเหลวแล้วพุ่งออกมา โดยแนวทางการเคลื่อนที่จะเป็นเส้นตรงในช่วงแรกโดยระยะเป็นเส้นตรงนี้จะขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนระหว่างศักย์ไฟฟ้าต่อระยะห่างจากปลายช่องเปิดถึงวัสดุรองรับ [16]

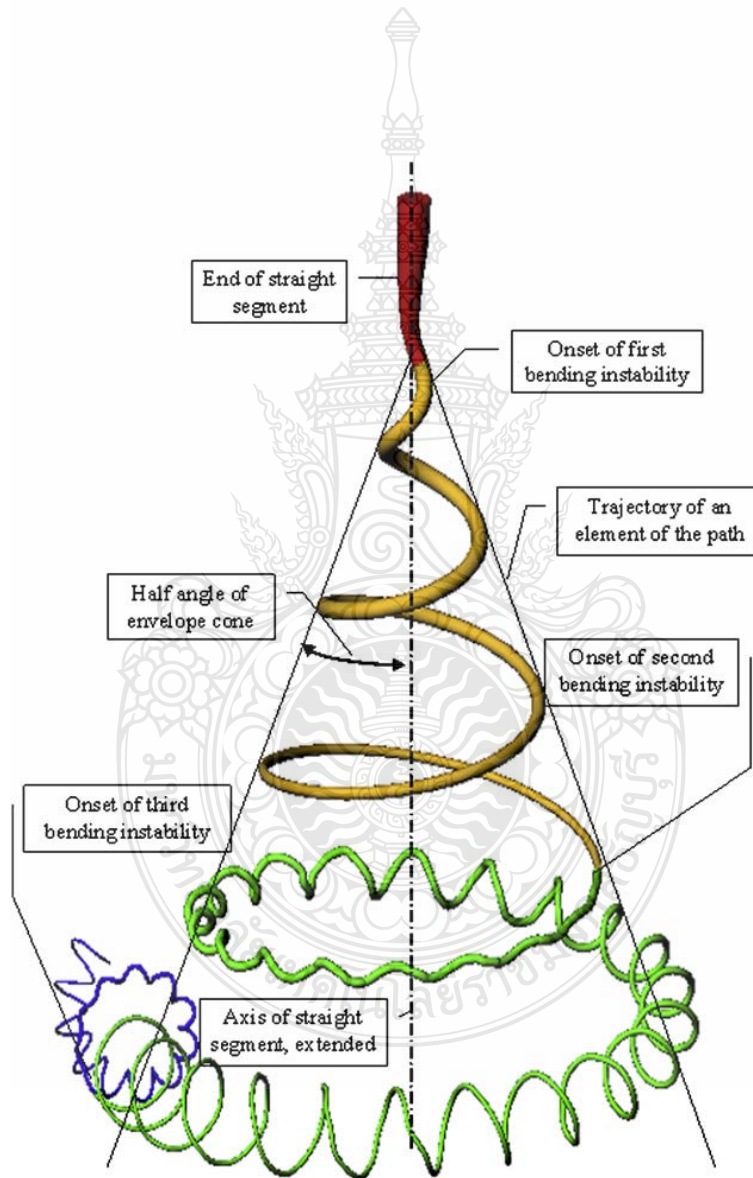


- (a) อัตราการป้อนสารละลาย 0.02 มิลลิลิตรต่อนาที, ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.282 กิโลโวลต์
- (b) อัตราการป้อนสารละลาย 0.01 มิลลิลิตรต่อนาที, ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.344 กิโลโวลต์
- (c) อัตราการป้อนสารละลาย 0.50 มิลลิลิตรต่อนาที, ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.533 กิโลโวลต์
- (d) อัตราการป้อนสารละลาย 1.00 มิลลิลิตรต่อนาที, ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.716 กิโลโวลต์

**รูปที่ 2.9** รูปถ่ายการเกิดกระแสพอลิเมอร์ของพอลิเอทีลีนออกไซด์ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์  
(น้ำหนักโมเลกุล 920 กิโลกรัมต่อโมล) ละลายในน้ำ

#### 2.4.1.4 ภาวะวุ่นการปั่นแบบไม่เสถียร (Whipping Instability Region)

เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น สนามไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นแรงกระทำระหว่างประจุไฟฟ้าทำให้การเคลื่อนที่ของลำของสารละลายพอลิเมอร์ ที่พุ่งออกมาเริ่มไม่เป็นเส้นตรงซึ่งถือว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการเคลื่อนที่แบบไม่เสถียร และจะมีการเคลื่อนที่แบบหมุนวน (Whipping Motion) ด้วยสนามไฟฟ้าที่มากขึ้น [17]

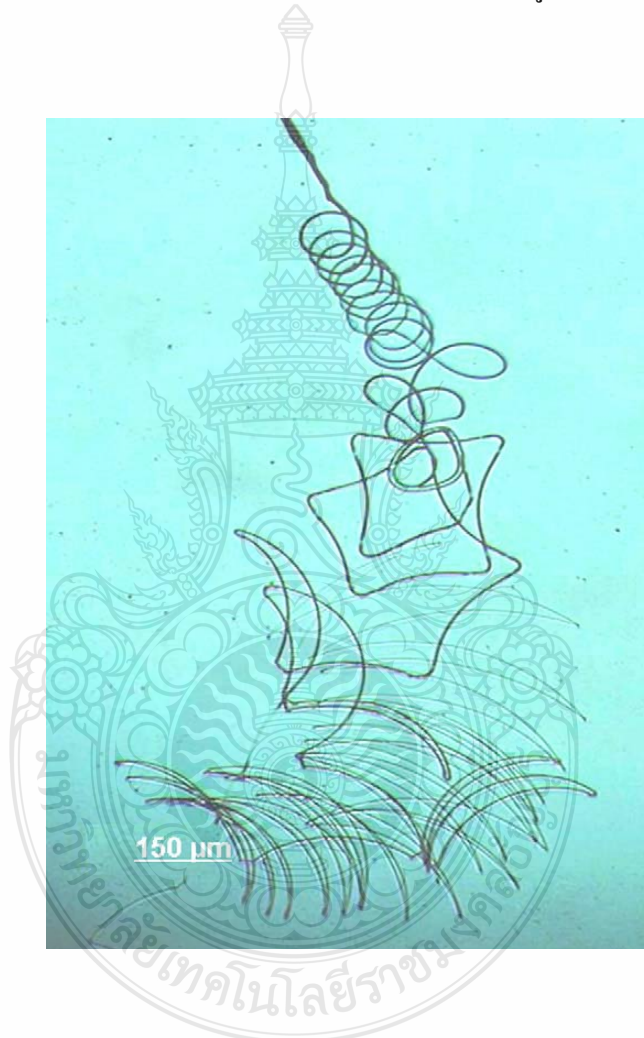


รูปที่ 2.10 ภาวะวุ่นการปั่นแบบไม่เสถียรที่มีการเคลื่อนที่แบบหมุนวน (Whipping Motion)



#### 2.4.1.5 การแข็งตัวของกระแสพอลิเมอร์เป็นเส้นใย (Solidification Into Nanofibers)

ในกระบวนการปั่นเส้นใยสารละลายที่ผ่านกระบวนการยึดด้วยแรงทางไฟฟ้าเกิดการระเหยของตัวทำละลายกลายเป็นไอ ทำให้สารละลายกลายเป็นเส้นใยพอลิเมอร์ที่เป็นของแข็งเกิดขึ้นในลักษณะเส้นใยที่พันกัน หรือเส้นใยที่มีการจัดเรียงตัวแบบในรูปแบบอื่นซึ่งสะสมบริเวณวัสดุรองรับตามชนิดของ การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ที่ใช้ ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การแข็งตัวของกระแสพอลิเมอร์เป็นเส้นใย [17]

## 2.5 เทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning Technique)

การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นกระบวนการที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย ในปัจจุบันมีนักวิจัยพยายามดัดแปลงกระบวนการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิต เพื่อให้ได้เส้นใยที่มีลักษณะเหมาะสมกับการนำไปใช้งานมากขึ้นชนิดของการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตสามารถจำแนกได้ตามชนิดของเข็มที่ใช้ ชนิดของสารละลายพอลิเมอร์ และการใช้กระบวนการพิเศษอื่น ๆ หากแบ่งตามการเรียงตัวของหลอดแคปิลารี (Capillary) และเข็มโลหะ (Nozzle Configuration) สามารถแบ่งได้ดังนี้

### 2.5.1 รูปแบบเดี่ยว (Single Configuration)

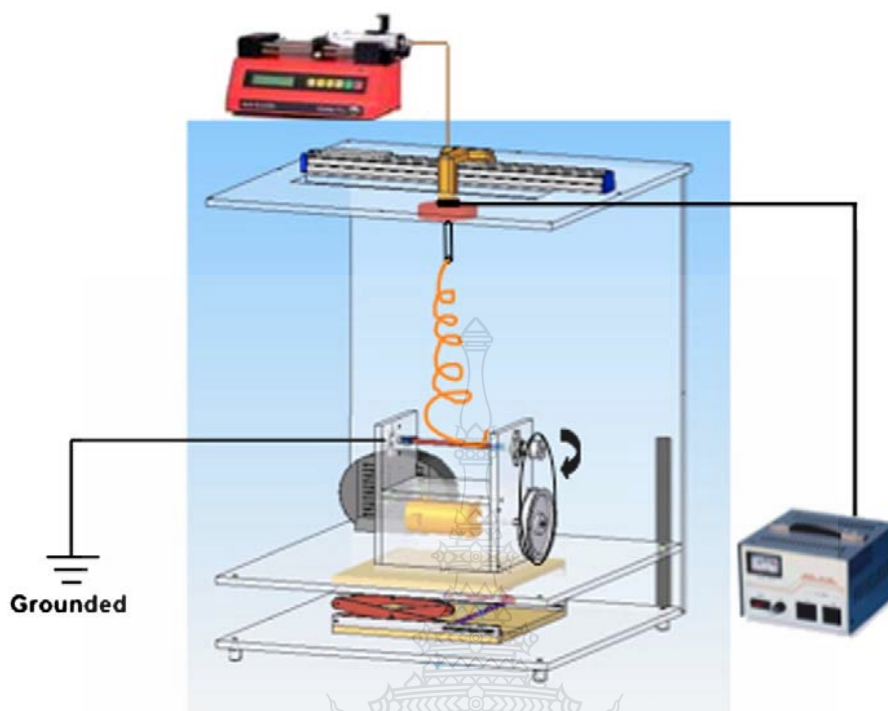
เป็นกระบวนการการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบดั้งเดิมมีอุปกรณ์ที่ใช้ คือ หลอดแคปิลารี และเข็มฉีดสารอันเดียวเป็นแบบที่ง่ายที่สุด ใช้สารละลายพอลิเมอร์ เพียงสารเดียว อาจเป็นพอลิเมอร์ หลายชนิดที่ละลายในตัวทำละลายชนิดเดียวกัน [18]

ข้อดีของกระบวนการนี้คือ

1. ง่าย สะดวก
2. ใช้สารตัวอย่างในปริมาณน้อยทำให้ประหยัด

ข้อจำกัดของกระบวนการนี้คือ

1. เหมาะสำหรับการเตรียมเส้นใยเพื่อใช้ในการทดลองในห้องปฏิบัติการที่ใช้ในการวิจัยเท่านั้น
2. อันตรายจากตัวทำละลายที่เป็นพิษที่ระเหยออกมาจากกระบวนการเตรียมเส้นใย
3. ผลิตเส้นใยได้น้อย

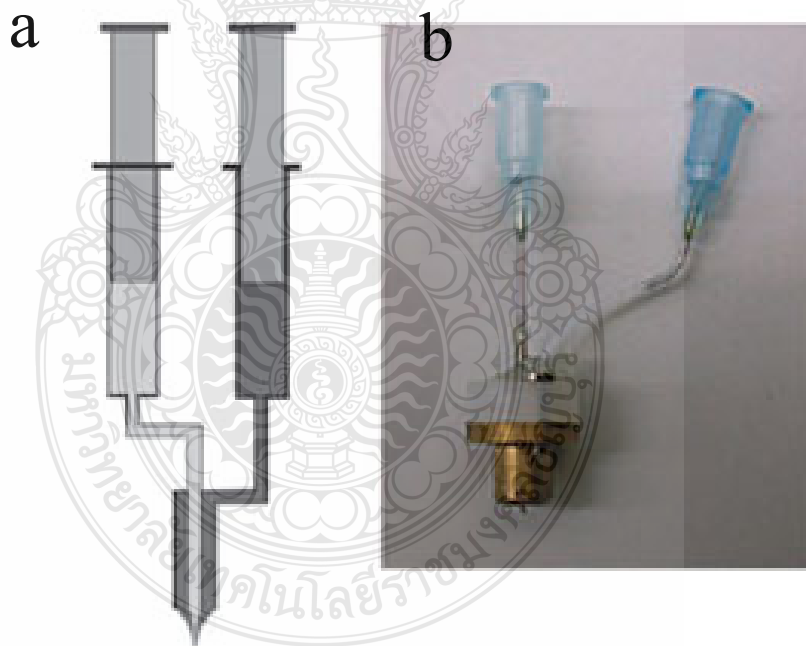


รูปที่ 2.12 ชุดปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบเดี่ยว

การพัฒนากระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่มีความซับซ้อนมากขึ้น มีความสำคัญและกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นหัวข้อวิจัยด้านการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตที่มีผลกระทบและมีคุณค่าทางวิชาการทั้งในปัจจุบันและในอนาคตอันใกล้นี้ระบบการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่ซับซ้อนนี้ได้แก่ การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน (Coaxial-Electrospinning) การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบหลอมละลาย (Melt-Electrospinning) การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบสนามใกล้ (Near-Filed Electrospinning) และการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบใช้สนามแม่เหล็กร่วม (Magneto-Electrospinning)

### 2.5.2 การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน (Coaxial-Electrospinning)

ในการทำให้เส้นใยนาโนมีหน้าที่หรือสมบัติพิเศษเฉพาะตัว (Functionalization) โดยการรวมเอาโมเลกุล สาร วัตถุหรือส่วนประกอบอื่น (โดยเฉพาะในด้านเทคโนโลยีเซนเซอร์ วิศวกรรมเนื้อเยื่อ การนำส่งยา และนาโนอิเล็กทรอนิกส์) เข้ากับเส้นใยนาโน ในหลายกรณีไม่สามารถทำได้โดยใช้เทคนิคการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตอย่างง่าย ทั้งนี้เนื่องจากมีปัญหาที่สำคัญอยู่ 2 ประการ คือ หนึ่ง ปัญหาความต้องการในการเก็บสารที่อยู่ร่วมกับเส้นใยนาโน (เช่น โมเลกุลชีวภาพ ได้แก่ เอนไซม์ โปรตีน ยา ไวรัส และแบคทีเรีย) ในสภาวะแวดล้อมของเหลว เพื่อที่จะคงสภาพหน้าที่หรือสมบัติเดิมของมันนั้นทำได้ยาก สอง ปัญหาเรื่องน้ำหนักโมเลกุลของวัสดุที่จะใช้เป็นส่วนแกนในของเส้นใย (Core Fiber) ซึ่งส่วนมากจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำมาก ทำให้การทำเส้นใยโดยเทคนิคการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตเป็นไปได้ยาก อย่างไรก็ตามปัญหาทั้งสองข้อนี้สามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้เทคนิค “การปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน” ซึ่งในปัจจุบันได้เริ่มมีการศึกษาและรายงานการวิจัยทางด้านนี้แล้ว จากหลายกลุ่มวิจัย [19]



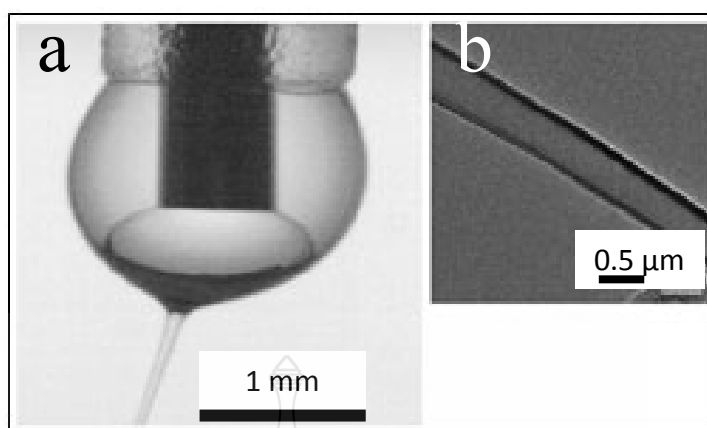
- (a) ระบบหัวฉีดสำหรับการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน
- (b) ระบบหัวฉีดสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ

รูปที่ 2.13 ระบบหัวฉีดสำหรับการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน

การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกนใช้หัวฉีด (Nozzle) ที่มีแกนขนานร่วมกันซ้อนกันอยู่สองอัน คำศัพท์ไฟฟ้าที่ให้กับทั้งสองหัวฉีดมีขนาดเท่ากัน และทำให้เกิดการหลอมหยดของสารประกอบ ลำของพอลิเมอร์ถูกขับให้พุ่งออกมาจากปลายหลอมของหยดของสารประกอบ และเกิดเป็นเส้นใยนาโนผสมแบบแกนใน-เปลือกนอก (Core-Shell Nanofiber) เมื่อพิจารณาอย่างละเอียด จะพบว่า การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกนมี กระบวนการทางกายภาพที่ซับซ้อน และยังมีการทดลองและการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาอธิบายค่อนข้างน้อย [13] ปัญหาที่สำคัญที่พบบ่อยในระหว่างการเกิดเส้นใยนาโนผสมแบบแกนใน-เปลือกนอก คือการที่หยดด้านนอก (Outer Droplet) สามารถถูกเปลี่ยนเป็นลำได้ ในขณะที่หยดด้านใน (Inner Droplet) ไม่สามารถถูกเปลี่ยนเป็นลำได้ ดังรูปที่ 2.14 (b) ที่เป็นเช่นนี้ เพราะว่าที่หยดด้านในไม่มีประจุที่ผิวจากแรงไฟฟ้าสถิตเกิดขึ้น การเปลี่ยนรูปของหยดด้านนอกให้เป็นแกนในของเส้นใยเกิดจากแรงหนืด (Viscous Force) เพียงอย่างเดียว โดยหลักการแล้ว แรงหนืดสามารถหาได้จากการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ซึ่งจะทำให้สามารถหาเงื่อนไขทั่วไปสำหรับการทดลองได้ง่ายยิ่งขึ้น

ในกรณีที่มีการเลือกใช้ตัวแปรและเงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสม การปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกนสามารถใช้ประดิษฐ์เส้นใยนาโนผสมแบบแกนใน-เปลือกนอกของวัสดุหลากหลายชนิดได้อย่างแม่นยำ ตัวอย่างเช่น เส้นใยผสมแบบแกนใน-เปลือกนอกของ Polyvinylidene Fluoride (PVDF) (แกนใน) และ Polycarbonate (PC) (เปลือกนอก) ดังรูปที่ 2.14 เป็นต้น [21]

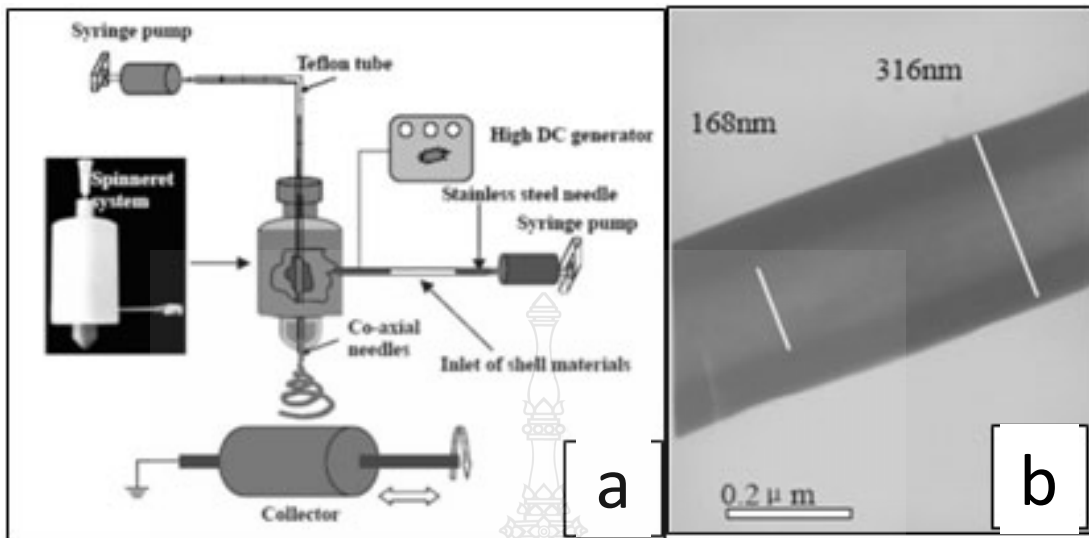
Han และคณะได้ใช้เทคนิคนี้โดยจัดระบบการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (a) เพื่อเตรียมเส้นใยผสมแบบแกนใน-เปลือกนอกของ Polyurethane (PU) (แกนใน, เส้นผ่านศูนย์กลาง 168 นาโนเมตร) และ Polycarbonate (PC) (เปลือกนอก, เส้นผ่านศูนย์กลาง 316 นาโนเมตร) ซึ่งเส้นใยที่ได้มีลักษณะ ดังรูปที่ 2.14 (b)



- (a) รูปจากกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงของหยดผสมแบบร่วมแกนที่หัวฉีดปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน
- (b) รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของเส้นใยแบบร่วมแกนของ Polyvinylidene Fluoride (PVDF) (แกนใน) และ Polycarbonate (PC) (เปลือกนอก)

**รูปที่ 2.14** เส้นใยผสมแบบร่วมแกน Polyvinylidene Fluoride (PVDF) (แกนใน) - Polycarbonate (PC) (เปลือกนอก)

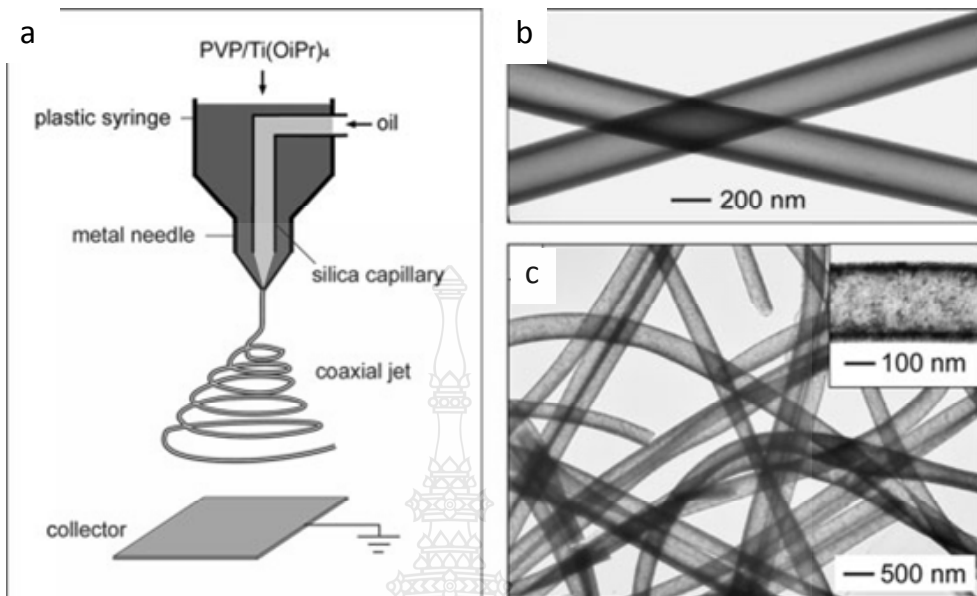
การปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกนไม่เพียงแต่ใช้ประดิษฐ์เส้นใยนาโนผสมแบบแกนใน-เปลือกนอกที่มีแกนในที่ต่อเนื่องเท่านั้น ยังสามารถใช้ประดิษฐ์เส้นใยนาโนที่มีลักษณะเป็นก้อนรูปหยดที่ต่อเนื่องอยู่ในเปลือกนอกต่อเนื่องได้อีกด้วย รูปร่างเช่นนี้เป็นที่สนใจเป็นอย่างมากสำหรับก้อนรูปหยดที่เป็นสารทางชีวภาพ เช่น โปรตีนเรืองแสงสีเขียว (Green Fluorescent Protein, GFP) ที่ใช้ในสิ่งแวดล้อมที่เป็นของเหลว หรือสำหรับเป็นสารบรรจุและควบคุมการปล่อยยา ข้อดีของการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกนในกรณีนี้คือ หยดด้านในจะไม่ถูกทำให้มีประจุเนื่องจากแรงทางไฟฟ้าสถิต และแรงเชิงกลจะมีผลต่อการเกิดเส้นใยน้อยมากและยังสามารถคำนวณได้อย่างถูกต้องอีกด้วย



- (a) การจัดระบบสำหรับการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกนสำหรับใช้เตรียมเส้นใยผสมแบบแกนใน-เปลือกนอกของ polyurethane (PU) (แกนใน) และ polycarbonate (PC) (เปลือกนอก)
- (b) รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ของเส้นใยที่ได้โดยเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของแกนในและเปลือกนอกมีขนาด 168 และ 316 นาโนเมตร ตามลำดับ

**รูปที่ 2.15** การปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกนของเส้นใย PU (แกนใน) (PC) (เปลือกนอก) [22]

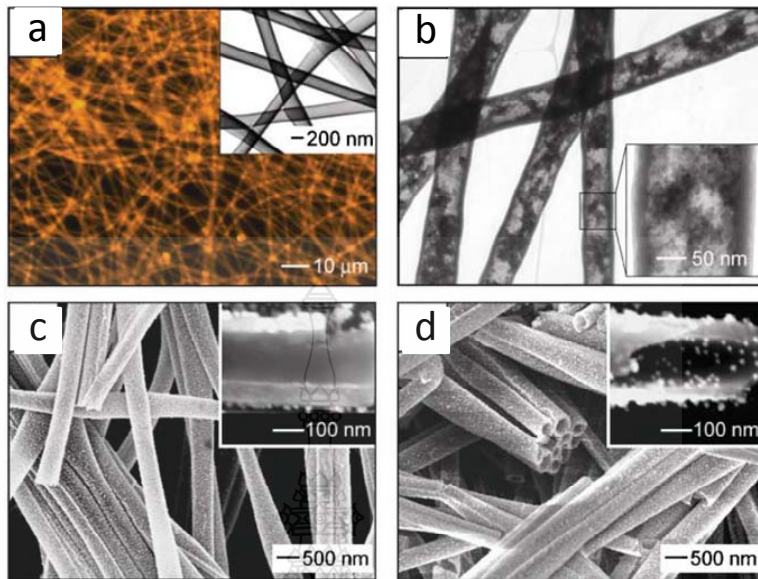
นอกจากนี้ การปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกนยังสามารถใช้ประดิษฐ์เส้นใยนาโนแกนใน-เปลือกนอกแบบกลวงได้ ในกรณีนี้ต้องเลือกใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสม โดยหลังจากการเกิดเส้นใยแบบแกนใน-เปลือกนอกแล้ว นำเส้นใยมาใส่ในสารละลายที่ละลายเฉพาะสารพอลิเมอร์แกนในออกเท่านั้น จะทำให้ได้เส้นใยนาโนแกนใน-เปลือกนอกแบบกลวงตามต้องการ โดยวิธีการเช่นนี้ Li และคณะ [11] ได้เตรียมเส้นใยนาโนเซรามิกกลวงของ  $\text{TiO}_2$  โดยใช้ Mineral Oil เป็นแกนในและสารละลาย Polyvinylpyrrolidone/  $\text{Ti}(\text{O}i\text{Pr})_4/\text{Ethanol}$  เป็นเปลือกนอก และทำการแคลไซน์หลังจากการกำจัดน้ำมันออก ดังรูปที่ 2.16



- (a) ระบบการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกนสำหรับเตรียมเส้นใยนาโนแบบกลวงของ  $\text{TiO}_2$
- (b),(c) รูปถ่าย TEM ของเส้นใยนาโนที่มี Mineral Oil เป็นแกนใน Polyvinylpyrrolidone/ $\text{Ti}(\text{OiPr})_4$ /Ethanol เป็นเปลือกนอก ภายหลังจากที่ Mineral Oil ถูกกำจัดออกโดยใช้ออกเทน (Octane)

รูปที่ 2.16 การปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกนของเส้นใย  $\text{TiO}_2$





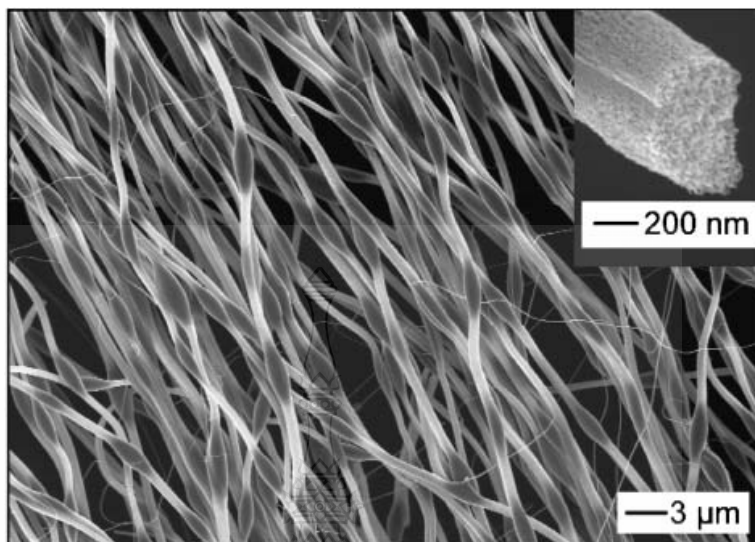
- (a) รูปถ่ายด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์แสดงการเจือแกนของน้ำมันด้วย Amphiphilic Fluorescent Dye สำหรับเส้นใยนาโน  $\text{TiO}_2$  แบบกลาง บรรจุด้วย Fluorescent Dye
- (b) รูปถ่าย TEM ของเส้นใยนาโน  $\text{TiO}_2$  แบบกลาง บรรจุด้วยอนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์ เคลือบอยู่ที่ผิวด้านใน
- (c) รูปถ่าย SEM ของเส้นใยนาโน  $\text{TiO}_2$  แบบกลาง ที่ปรับสมบัติของผิวด้านในด้วย Methyl-Terminated Silane และตามด้วยการปรับผิวด้านนอกด้วย Amino-Terminated Silane เมื่อจุ่มลงในสารละลายของทองคำ อนุภาคนาโนของทองคำจะเลือกเกาะติด เฉพาะที่ผิวด้านนอกของ  $\text{TiO}_2$
- (d) รูปถ่าย SEM ของเส้นใยนาโน  $\text{TiO}_2$  แบบกลาง ที่ปรับสมบัติของทั้งผิวด้านนอกและ ด้านในด้วย Amino-Terminated Silane เพื่อให้อนุภาคนาโนของทองคำเกาะติด ที่ผิวทั้งสองด้าน

รูปที่ 2.17 เส้นใยนาโน  $\text{TiO}_2$  ที่ถ่ายภาพ ด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์ , TEM และ SEM

การประยุกต์ใช้เส้นใยนาโนแบบกลวงในบางกรณี เช่น เส้นใยนาโนสำหรับเป็นตัวสนับสนุนสารเร่งปฏิกิริยา (Catalyst Support) ออปติคัลเวฟไกด์ (Optical Waveguides) และอุปกรณ์ด้านนาโนฟลูอิดิก (Nanofluidic Device) การรวมเอาสารหรือโมเลกุลอื่นและปรับแต่งผิวด้านในและด้านนอกของเส้นใยเป็นสิ่งที่จะต้องทำเป็นอย่างยิ่ง ทั้งนี้เนื่องจากการปรับแต่งผิวด้านในและด้านนอกของเส้นใยสามารถเปลี่ยนสมบัติเคมีเชิงผิวของเส้นใยนาโน ทำให้สามารถปรับสมบัติต่างๆ เช่น การไหลของของเหลว และการติดอนุภาคนาโนหรือตัวทำปฏิกิริยาอื่น โดยอาศัยการทำปฏิกิริยาทางเคมีกับผิวที่เปลี่ยนสมบัติทางเคมีแล้ว Xie และคณะ [23,24] ได้สาธิตการปรับผิวด้านในและด้านนอกของเส้นใยนาโนเซรามิกกลวงของ  $TiO_2$  โดยใช้ไซเลนแบบโซ่ยาวที่ละลายได้ในน้ำมัน ดังรูปที่ 2.17 (a) เป็นรูปถ่ายด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนส์สีส้ม

การเจือแกนของน้ำมันด้วย Amphiphilic Fluorescent Dye (1,19-Dioctadecyl-3,3,39,39-Tetramethylindocarbocyanine Perchlorate) เพื่อให้ได้เส้นใยนาโนแบบกลวงของ  $TiO_2$  บรรจุด้วย Fluorescent Dye นอกจากนี้ผิวด้านในของเส้นใยนาโนเซรามิกกลวงของ  $TiO_2$  สามารถทำให้มีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) โดยการเจือน้ำมันด้วย Methyl-Terminated Silane ซึ่งการเคลือบผิวด้านในนี้สามารถใช้ในการปรับเปลี่ยนผิวด้านนอกและด้านในของ  $TiO_2$  ได้ ดังรูปที่ 2.17 (b) และ (c) ถ้าในตอนแรกผิวด้านนอกถูกเคลือบด้วย Methyl-Terminated Silane มันจะปกป้องผิวด้านนอกเมื่อถูกนำไปจุ่มใน Amino-Functionalized Silane ดังนั้นด้านนี้จะไม่ทำปฏิกิริยาเมื่อจุ่มลงในสารละลายของทองคำ และอนุภาคนาโนของทองคำจะเลือกเกาะติดเฉพาะที่ผิวด้านนอกของ  $TiO_2$  เท่านั้น ดังรูปที่ 2.17 (c)

นอกจากนี้ การปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกนยังสามารถใช้ในการเตรียมเส้นใยนาโนที่มีโครงสร้างแบบรูพรุนได้ เช่น เส้นใยนาโน  $TiO_2$  โครงสร้างแบบรูพรุน [9] การเตรียมเส้นใยนาโนแบบนี้ทำได้โดยการผสมแคลไซน์เส้นใยผสมแบบแกนใน-เปลือกนอกของ Poly(styrene)/DMF-THF (แกนใน) และ Titanium Isopropoxide/PVP (เปลือกนอก) ในอากาศ ซึ่งจะกำจัดทั้ง Poly(styrene) และ PVP ออกไป เหลือเพียงเส้นใยนาโน  $TiO_2$  โครงสร้างแบบรูพรุน ดังรูปที่ 2.18

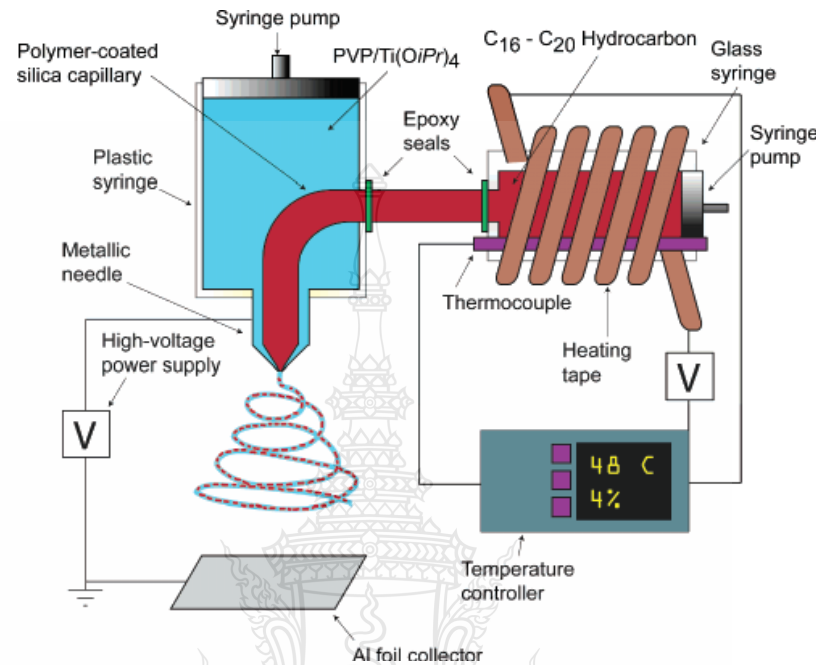


รูปที่ 2.18 เส้นใยนาโน TiO<sub>2</sub> โครงสร้างแบบรูพรุน เตรียมโดยการเผาแคลไซน์ [24]

### 2.5.3 การปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบหลอมละลาย (Melt-Electrospinning)

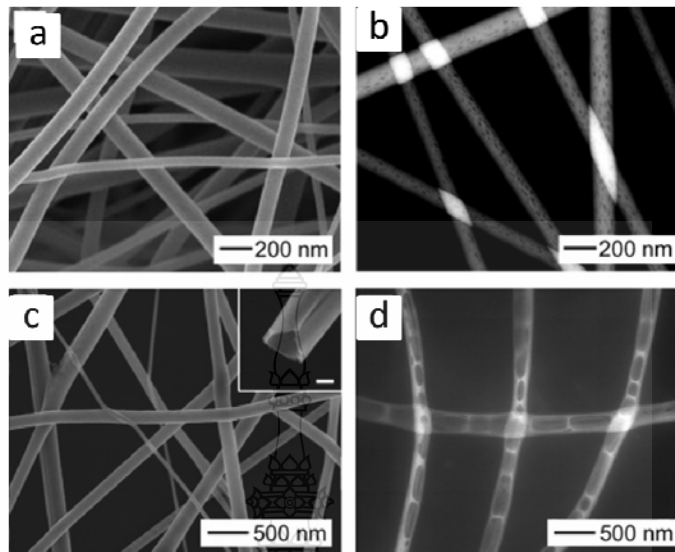
การปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบหลอมละลายเป็นการประดิษฐ์เส้นใยนาโนด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตจากพอลิเมอร์ที่หลอมละลายโดยไม่ใช้ตัวทำละลาย ข้อดีของการปั่นเส้นใยนาโนแบบนี้คือเป็นกระบวนการเตรียมเส้นใยที่ง่าย กำลังการผลิตสูง ต้นทุนต่ำและช่วยลดความเสี่ยงจากการได้รับสารพิษจากตัวทำละลาย จึงเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เหมาะที่จะใช้ในการเตรียมเส้นใยนาโนสำหรับประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ การปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบหลอมละลายนี้มีข้อจำกัด ตรงที่เส้นใยที่เตรียมมีขนาดใหญ่และยังไม่สามารถเตรียมเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 400 นาโนเมตรได้และมีการกระจายตัวที่แคบได้ มีการใช้การปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบหลอมละลายนี้ในการเตรียมเส้นใยพอลิเมอร์แล้วหลายชนิด เช่น Polyethylene (PE), Polypropylene (PP), Polyamide 12 (PA12), Poly(Ethylene Terephthalate) (PET), Polycaprolactone (PCL), Polyurethane (PU) และ Poly(Ethylene Glycol)-Block-Poly(Caprolactone)

McCann และคณะ [25] ได้พัฒนาและประยุกต์ใช้ระบบการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกนหลอมละลาย ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ระบบการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบหลอมละลายที่ใช้เตรียมเส้นใย  $\text{TiO}_2$ -PVP

การฉีดเส้นใยนาโนของวัสดุที่เปลี่ยนเฟสได้ (Phase Change Material, PCM) ดังรูปที่ 2.20 เส้นใยนาโนผสมของ  $\text{TiO}_2$ -PVP บรรจุสาร Octadecane (แกนใน) ในกระบวนการการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกนหลอมละลายนี้ Octadecane ถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิ  $68^\circ\text{C}$  ก่อนที่จะถูกฉีดออกมาด้วยอัตรา 0.2 มิลลิลิตร/ชั่วโมง ในขณะที่  $\text{TiO}_2$ -PVP (เปลือกนอก) ถูกฉีดออกมาด้วยอัตรา 0.7 มิลลิลิตร/ชั่วโมง

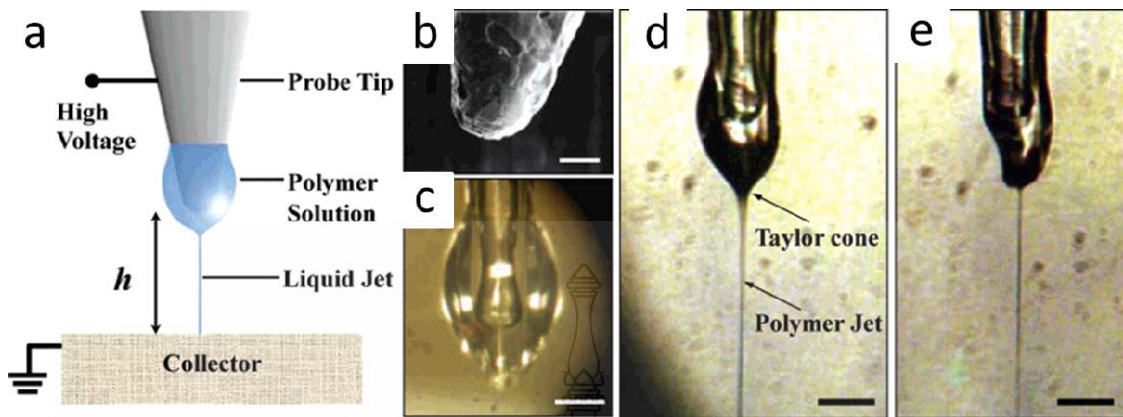


- (a) ภาพ SEM ของเส้นใย  $\text{TiO}_2$ -PVP ที่เตรียมได้ด้วยระบบการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบ หลอมละลาย
- (b) ภาพ TEM ของเส้นใยที่เตรียมได้หลังจากแช่เส้นใยในเฮกเซนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อ กำจัดสารไฮโดรคาร์บอนออกไปจากเส้นใย
- (c) ภาพ SEM ของเส้นใยที่เตรียมได้โดยใช้อัตราการไหลของของเหลวเพิ่มขึ้นเป็น 0.7 มิลลิลิตร/ชั่วโมง และ 0.3 มิลลิลิตร/ชั่วโมง สำหรับ  $\text{TiO}_2$ -PVP และ Octadecane ตามลำดับ
- (d) ภาพ TEM บอกให้เห็นว่า Octadecane แยกออกตามแกนของเส้นใย เป็นหยดทรงกลม เล็กๆ อยู่ภายในของเส้นใยการแตกออกจากกันของ Octadecane อยู่ภายในส่วนแกนใน ของเส้นใยแต่ละเส้นเกิดจากการที่ Octadecane มีความหนืดต่ำนั่นเอง

รูปที่ 2.20 เส้นใย  $\text{TiO}_2$ -PVP ที่เตรียมได้ด้วยระบบการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบหลอมละลาย

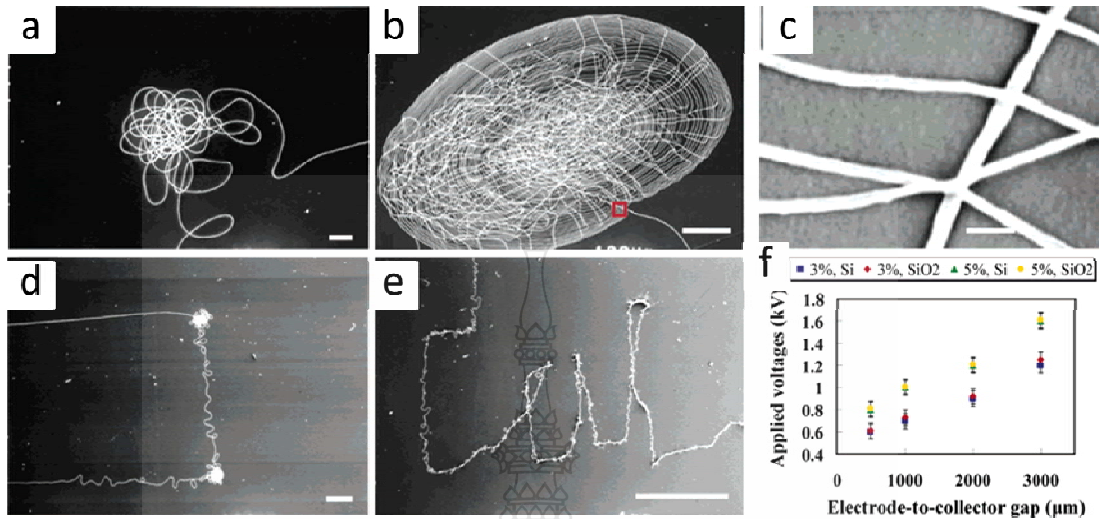
#### 2.5.4 การปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบสนามใกล้ (Near-Field Electrospinning)

เทคนิคการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบสนามใกล้ มีการรายงานขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Sun และคณะ [32] แห่งมหาวิทยาลัย Xiamen ประเทศจีน งานวิจัยนี้เป็นการค้นพบนวัตกรรมใหม่ระดับ Breakthrough ของการวิจัยทางการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตเพื่อประดิษฐ์เส้นใยนาโนของแข็งในรูปแบบที่สามารถกระทำ เขียนเป็นเส้นได้โดยตรง โดยที่เส้นใยมีความต่อเนื่อง และสามารถควบคุมการเกิด จัดเรียงตัวของเส้นใยนาโนได้อย่างแม่นยำ เทคนิคนี้แตกต่างจากเทคนิคการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบมาตรฐาน (ดั้งเดิม) ซึ่งเป็นกระบวนการที่เส้นใยนาโนเกิดขึ้นแบบสุ่มและไม่เป็นระเบียบ เทคนิคการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบสนามใกล้ ดังรูปที่ 2.21 ในกระบวนการการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบสนามใกล้ ปลายของเข็มทั้งสองเสตนต้น (เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25 ไมโครเมตร) ถูกใช้เป็นอิเล็กโตรดและจุ่มลงไปในสารละลายพอลิเมอร์เพื่อให้เกิดหยดของสารละลายพอลิเมอร์ติดอยู่ที่ปลายของทั้งสองเสตนซึ่งเชื่อมกับส่วนของแหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง ดังรูปที่ 2.21(a) เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงที่ปลายของทั้งสองเสตน ดังรูปที่ 2.21(b) ซึ่งมีหยดของสารละลายพอลิเมอร์ติดอยู่ ดังรูปที่ 2.21(c) พบว่า หากสนามไฟฟ้ามีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดแรงผลักมากกว่าแรงดึงดูด จะส่งผลให้รูปร่างครึ่งทรงกลมของสารละลายที่อยู่ปลายทั้งสองเสตนยื่นออกมาเป็นรูปร่างทรงกรวย เรียกว่า กรวยของเทเลอร์ ดังรูปที่ 2.21(d) และเมื่อสนามไฟฟ้าที่ให้กับระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่ง จะเกิดแรงขับเคลื่อนให้สารละลายพอลิเมอร์พุ่งออกมาเป็นลำ ดังรูปที่ 2.21(e) ต่อมาลำของสารละลายนี้จะยื่นออกมาจนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงถึงระดับนาโนเมตร แล้วตกลงบนวัสดุรองรับที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็วซึ่งจะทำให้ได้เส้นใยที่มีความต่อเนื่อง และสามารถควบคุมการเกิด จัดเรียงตัวของเส้นใยนาโนได้อย่างแม่นยำ จะเห็นว่ากระบวนการที่เกิดขึ้นจะมีความคล้ายกับเทคนิคการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบดั้งเดิมดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนแรก ต่างกันที่แผ่นรองรับจะอยู่ใกล้ปลายเข็มมาก จึงสามารถใช้ศักย์ไฟฟ้ากำลังต่ำขนาดประมาณ 600 โวลต์ เท่านั้น ซึ่งต่างจากเทคนิคการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบดั้งเดิมที่ต้องใช้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงขนาด 10-50 กิโลโวลต์ ในกระบวนการประดิษฐ์เส้นใย



- (a) ระบบการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบสนามใกล้ (Near-Field Electrospinning)
- (b) ภาพ SEM ส่วนปลายของทั้งสแตน
- (c) หยอดของสารละลายพอลิเมอร์ติดที่ปลายทั้งสแตน
- (d) สนามไฟฟ้ามีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดแรงผลักรวมกว่าแรงตึงผิว จะส่งผลให้รูปร่างครึ่งทรงกลม ของสารละลายที่อยู่ปลายทั้งสแตนยื่นออกเป็นรูปร่างทรงกรวย เรียกว่า กรวยของเทเลอร์
- (e) ถ้าของสารละลายนี้จะยื่นออกมาจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงถึงระดับนาโนเมตร

รูปที่ 2.21 ระบบการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบสนามใกล้ (Near-Field Electrospinning)



- (a) เมื่อแผ่นรองรับอยู่หนึ่งและเวลาของการสปิน 5 วินาทีจะเกิดเส้นใยแบบขดซ้อนทับรอบจุดเพื่อออกไปเป็นวงเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 ไมโครเมตร
- (b) เมื่อครอบแผ่นรองรับด้วยชั้นฉนวนของ ซิลิกา จะ เกิดเส้นใยแบบขดซ้อนทับรอบจุดแผ่ออกไปเป็นวงแหวนรั้วร่วมศูนย์กลางโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 300 ไมโครเมตร
- (c) ภาพกำลังขยายสูงของ (b) เพื่อให้ทราบขนาดเส้นใยประมาณ 1.5 ไมโครเมตร
- (d) สาทิตการเขียนเป็นสัญลักษณ์รูปตัว U
- (e) สาทิตการเขียนอักษรคำว่า Cal โดยเวลาของการสปิน 3 วินาที
- (f) ตัวอย่างค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำสุดเมื่อเทียบกับระยะทางการเก็บเส้นใย

รูปที่ 2.22 เส้นใย Polyethylene Oxide, PEO เตรียมจากวิธีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบสนามไกล

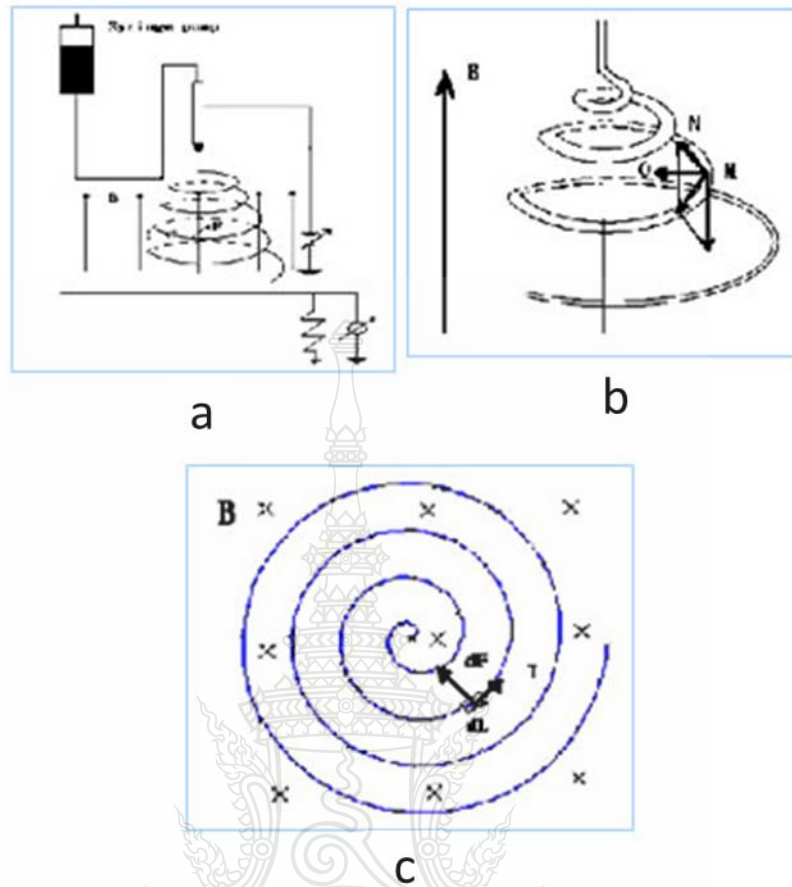


## 2.5.5 การปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบใช้สนามแม่เหล็กร่วม (Magneto-Electrospinning)

ปัญหาเกี่ยวกับการบิดโค้งที่ไม่มีเสถียรภาพในกระบวนการทางไฟฟ้าสถิตได้ถูกศึกษาทั้งในเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติ อย่างไรก็ตาม ณ ปัจจุบันยังไม่มีทฤษฎีใดสามารถอธิบายปรากฏการณ์นี้ได้อย่างถูกต้อง อย่างสมบูรณ์ Wu และคณะ [26] ได้เสนอวิธีการใหม่โดยใช้แนวคิดทางด้านแรงและสนามแม่เหล็กเพื่อศึกษาและอธิบายการบิดโค้งที่ไม่มีเสถียรภาพในกระบวนการทางการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิต ระบบการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตที่มีการใช้ทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กช่วยในการควบคุมกระบวนการเกิดเส้นใย นี้เรียกว่า การปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบใช้สนามแม่เหล็กร่วม (Magneto-Electrospinning, Magneto-ES) ในระบบการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบนี้ แรงจากสนามแม่เหล็ก นอกจากจะช่วยในการจัดเรียงตัวของเส้นใยในระดับนาโนทำได้ง่ายขึ้นแล้วยังจะช่วยลดขนาดและเพิ่มความสม่ำเสมอของเส้นใยได้

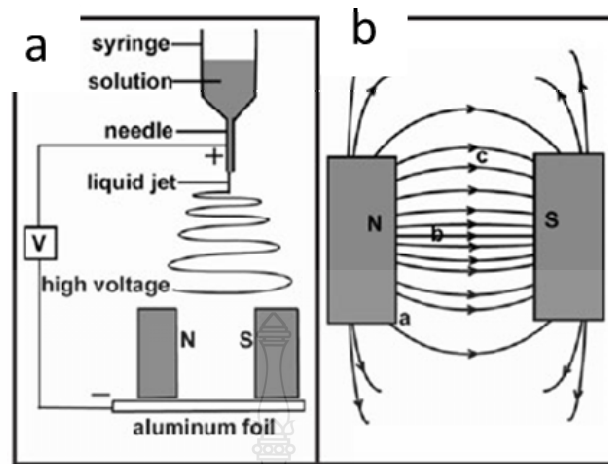
พิจารณาระบบการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบใช้สนามแม่เหล็กร่วม ดังรูปที่ 2.23 โดยที่ในรูปที่ 2.23(a) แสดงผลของสนามแม่เหล็กต่อระบบการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิต จากรูปกระแสไฟฟ้าในลำพอลิเมอร์ เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ (Magnetic Field Induction) จะเกิดแรงแอมแปร์ (Ampere Force) ที่กระทำบนการกระจัด ของเส้นใย ตามสมการ  $dF=IdLxB$

การวิเคราะห์แรงต่างๆที่เกิดขึ้นในระบบการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตเมื่อมีสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.23(b) และแรงลัพธ์ของแรงแอมแปร์กับแรงหนีคของลำการไหล ดังรูปที่ 2.23(c) แรงลัพธ์นี้ทำให้เกิดการกวาดเป็นวงกลมขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งกลไกนี้ได้ถูกอธิบายครั้งแรกโดย He และคณะ [27] ได้เสนอว่าปัญหาการกวาดเป็นวงกลมขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ นี้สามารถแก้ไขได้โดยการใช้สนามแม่เหล็กกับระบบการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิต ซึ่งกระแสไฟฟ้าในลำพอลิเมอร์ภายใต้สนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงเข้าสู่ศูนย์กลาง (Centripetal Force) โดยที่แรงแอมแปร์ มีทิศทางชี้เข้าสู่จุดสมดุลเริ่มต้นเสมอ ดังรูปที่ 2.23(b) และ (c) ส่งผลให้รัศมีของการกวาดเป็นวงกลมเกิดการหดตัวลง ดังนั้น เงื่อนไขของเสถียรรูปในกระบวนการทางการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตจึงเพิ่มขึ้นและสามารถควบคุมได้โดยใช้สนามแม่เหล็ก อย่างไรก็ตาม ทฤษฎีเชิงลึกและการทดลองเพื่อยืนยันทฤษฎีของการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบใช้สนามแม่เหล็กร่วมยังเปิดกว้างให้ศึกษา ซึ่งคาดว่าจะเป็นเรื่องที่ได้รับความสนใจและสำคัญที่สุดสำหรับการวิจัยทางด้านกระบวนการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตทั้งในปัจจุบันและอนาคต



- (a) ระบบการป้อนเส้นใยไฟฟ้าสถิตเมื่อมีสนามแม่เหล็ก
- (b) การวิเคราะห์แรงต่างๆที่เกิดขึ้นในระบบการป้อนเส้นใยไฟฟ้าสถิตเมื่อมีสนามแม่เหล็ก
- (c) แรงแอมแปร์ ในระบบการป้อนเส้นใยไฟฟ้าสถิตที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 2.23 ผลของสนามแม่เหล็กต่อระบบการป้อนเส้นใยไฟฟ้าสถิต



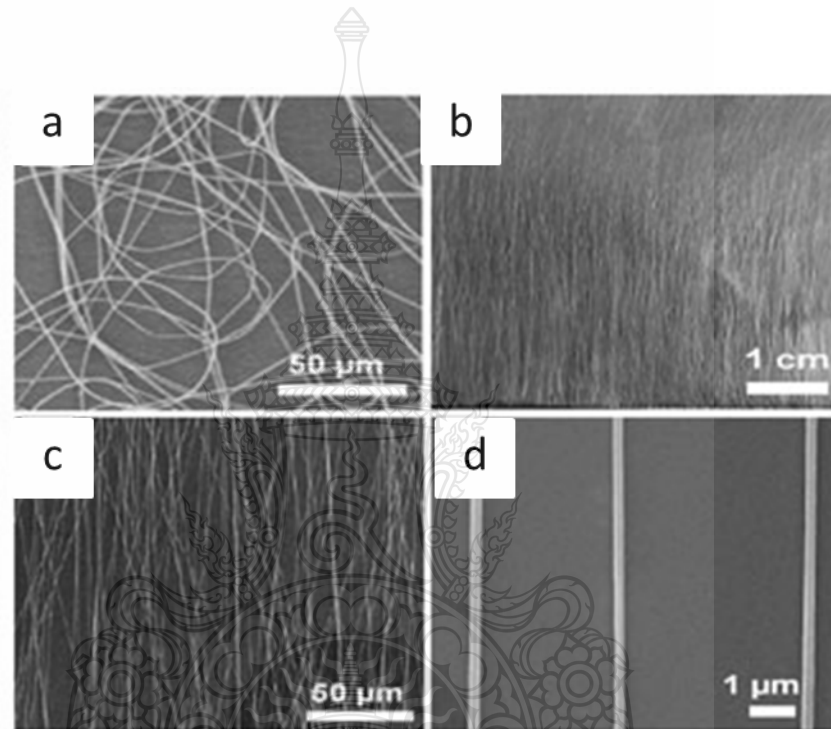
- (a) ระบบการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตเส้นใยเส้นใยนาโนแบบอาร์เรย์โดยใช้ออนุภาคนาโนแม่เหล็กเจือในพอลิเมอร์และการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตเส้นใยลงบนแผ่นรองรับที่มีแม่เหล็กถาวร 2 อันจัดวางไว้บนแผ่นรองรับ
- (b) เวกเตอร์ความเข้มสนามแม่เหล็กในบริเวณระหว่างแม่เหล็กถาวร 2 อัน โดยลูกศรที่ชี้แทนทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก (ความเข้มสนามแม่เหล็ก a, b, และ c เท่ากับ 120, 32, และ 25 mT ตามลำดับ)

**รูปที่ 2.24** ระบบการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตเส้นใยเส้นใยนาโนแบบอาร์เรย์ [27]

นอกเหนือจากการเสนอแนวคิดในการใช้สนามแม่เหล็กในระบบการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแล้ว การใช้ออนุภาคนาโนแม่เหล็กเจือในพอลิเมอร์สามารถใช้ควบคุมจัดเรียงตัวของของเส้นใยนาโนแบบอาร์เรย์ในกระบวนการการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตได้ โดย Yang และคณะ [28] เป็นกลุ่มแรกที่ใช้อนุภาคนาโนแม่เหล็ก ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , <0.5 wt.%) เจือในพอลิเมอร์ (Polyvinylalcohol, PVA) แล้วทำการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตเส้นใยลงบนแผ่นรองรับที่มีแม่เหล็กถาวร 2 อันจัดวางไว้บนแผ่นรองรับซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่สุดของระบบนี้ ดังรูปที่ 2.25 สนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.25 (b) จะยึดเส้นใยข้ามช่องว่างระหว่างแม่เหล็กถาวร 2 อัน เพื่อทำให้เกิดเส้นใยนาโนแบบอาร์เรย์ขนานเมื่อเส้นใยตกลงมาที่แม่เหล็กถาวรลักษณะของเส้นใยนาโนที่เตรียมได้โดยวิธีนี้ ดังรูปที่ 2.25

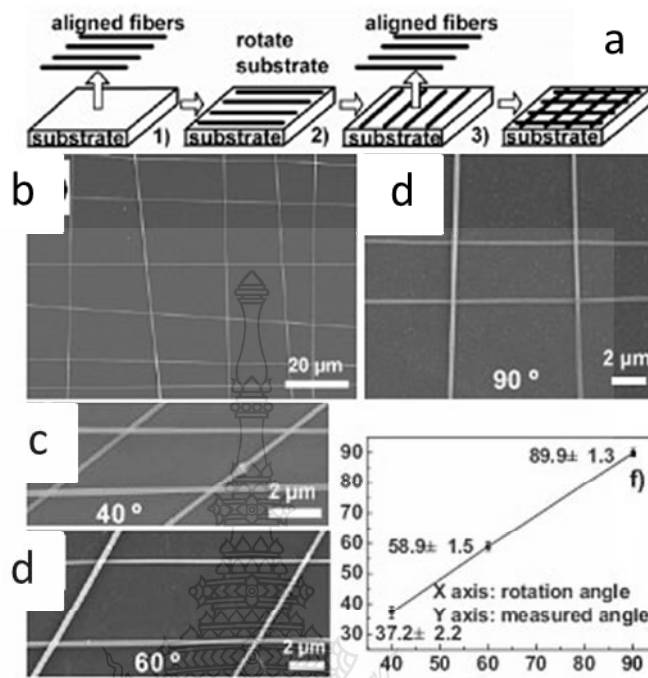
นอกจากการเตรียมเส้นใยแบบวางขนานในแนวเดียวกันได้แล้ว เทคนิคที่เสนอโดย Yang และคณะ นี้ยังสามารถสร้างโครงสร้างที่ซับซ้อนรูปแบบอื่นๆ ได้ ตัวอย่างเช่น การสร้างเส้นใยนาโนที่

มีรูปแบบเป็นอาร์เรย์ซ้อน (Stacking Array) หรือกริด (Grid) ดังรูปที่ 2.25 ได้ ซึ่งคาดว่าเทคนิคนี้จะมีประโยชน์เป็นอย่างมาก เนื่องจากเส้นใยนาโนที่มีการจัดเรียงตัวในทางเดียวกันได้จะส่งผลให้เส้นใยมีสมบัติแบบไอโซโทรปิก (Isotropic Properties) ทำให้มีสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางแสง สมบัติความตึงผิว และสมบัติเชิงกลที่ดีหรือแตกต่างจากเดิมในทางที่ดีขึ้นได้ ซึ่งความสามารถในการสร้างเส้นใยแบบโครงสร้าง (กริด) หลายชั้นได้ด้วยวิธีนี้ จะช่วยทำให้การประยุกต์ใช้งานของเส้นใยที่เตรียมได้มีมากยิ่งขึ้น



- (a) เส้นใยเส้นใยนาโนที่เตรียมด้วยการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบดั้งเดิม  
 (b), (c), (d) เส้นใยเส้นใยนาโนที่เตรียมด้วยการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตดัดแปลงโดยใช้อนุภาคนาโนแม่เหล็กเจือในพอลิเมอร์และการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตเส้นใยลงบนแผ่นรองรับที่มีแม่เหล็กถาวร 2 อันจัดวางไว้บนแผ่นรองรับ โดยที่ (b) เป็นรูปถ่ายโดยใช้เทคนิคจุลทรรศน์เชิงแสง ส่วน (c) และ (d) เป็นรูปถ่ายโดยใช้เทคนิค SEM

รูปที่ 2.25 เส้นใยนาโนที่ได้จากการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตแบบใช้สนามแม่เหล็กร่วม



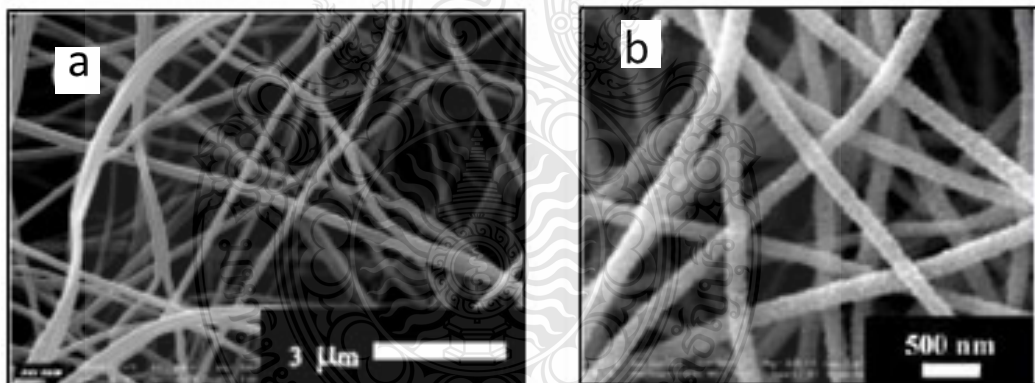
- (a) วิธีการสร้างเส้นใยแบบโครงสร้างหลายชั้น ซึ่ง 1) ทำการเตรียมเส้นใยเส้นใยชั้นแรก 2) หมุนแผ่นรองรับ 3) เตรียมเส้นใยเส้นใยชั้นที่สอง และ 4) เตรียมเส้นใยเส้นใยแบบโครงสร้าง (กริด) หลายชั้น
- (b), (c), (d), (e) รูปถ่าย SEM ของกริดชั้นที่สองที่เกิดจากการหมุนที่มุมต่างๆ กัน (b) และ (c) 90°; (d) 40°; (e) 60° (f) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของเส้นใยเส้นใยนาโนที่กระทำต่อกันที่วัดได้ และมุมที่ใช้หมุนแผ่นรองรับ ซึ่งพบว่าให้ผลสอดคล้องกันดีมาก [29]

รูปที่ 2.26 วิธีการสร้างเส้นใยแบบโครงสร้างหลายชั้น

## 2.6 การประยุกต์ใช้ผ้าไหมทอเส้นใยนาโนด้านวัสดุศาสตร์และสิ่งแวดล้อม

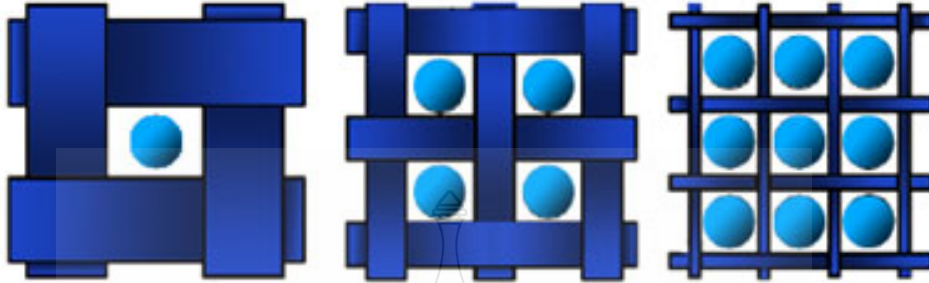
### 2.6.1 ด้านวัสดุศาสตร์

เส้นใยนาโนบางชนิดถูกนำไปเสริมกับวัสดุอื่นเพื่อให้มีสมบัติที่ดีขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสมบัติของเส้นใย เช่น เส้นใยนาโนคาร์บอน (Carbon Nanofibre) ซึ่งมีค่า Young's Modulus และความแข็งแรง (Strength) สูง อีกทั้งค่าแรงต้านทานแรงดึงตามยาว (Tensile Strength) ยังสูงกว่าเหล็กถึงประมาณ 3 เท่า ดังรูปที่ 2.27 (a) ในขณะที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าเหล็กประมาณ 6 เท่า ดังนั้นจึงสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุเสริมโครงสร้างในวัสดุคอมโพสิตให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ลักษณะเดียวกับการทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรงมากขึ้น โดยการเสริมด้วยเหล็กเส้น นอกจากนี้เส้นใยนาโนเฟอโรอิเล็กทริกเซรามิก (Ferroelectric Ceramic) เช่น แบเรียมสตรอนเดียมไททานเตด ((Ba, Sr)TiO<sub>3</sub>, BST) ดังรูปที่ 2.27 (b) เส้นใยชนิดนี้นอกจากสามารถใช้เป็นวัสดุเสริมในวัสดุคอมโพสิตให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นแล้วยังสามารถเพิ่มหน้าที่ความเป็นเฟอโรอิเล็กทริกเซรามิกให้แก่วัสดุอีกทางหนึ่งด้วย



- (a) เส้นใยนาโนคาร์บอนผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซอาร์กอน  
(b) เส้นใยนาโนเฟอโรอิเล็กทริกแบเรียมสตรอนเดียมไททานเตด ((Ba, Sr)TiO<sub>3</sub>, BST) [29]

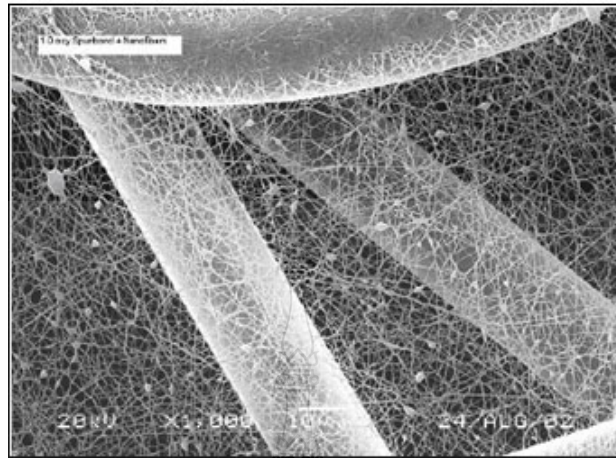
รูปที่ 2.27 ภาพ SEM ของเส้นใยนาโนคาร์บอน



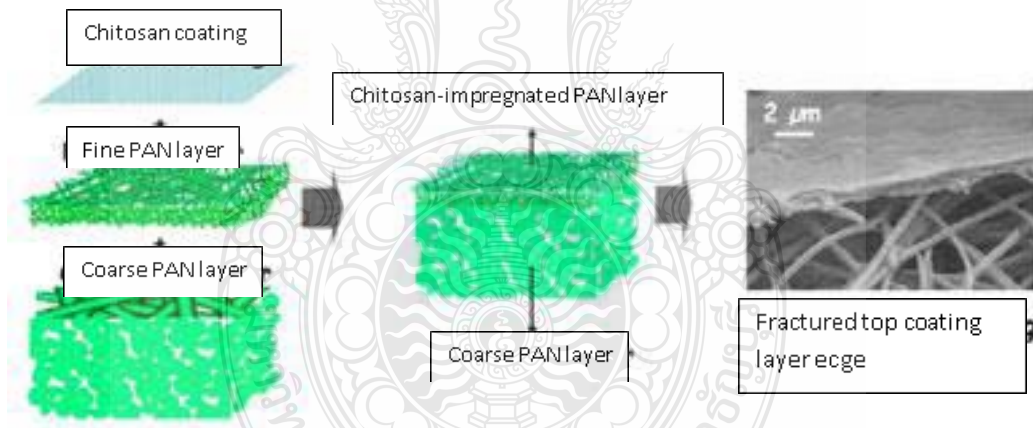
รูปที่ 2.28 ประสิทธิภาพของการกรองเพิ่มมากขึ้น เมื่อเส้นใย มีขนาดเล็กลง

#### 2.6.2 ด้านสิ่งแวดล้อมและเทคโนโลยีชีวภาพ

ในชีวิตประจำวันเราจะพบว่าเสื้อผ้าที่ทอจากเส้นด้ายที่มีขนาดเล็ก ผ้าจะมีความละเอียด และมีช่องว่างขนาดเล็กกว่าผ้าที่ทอจากเส้นด้ายขนาดใหญ่ แผ่นเส้นใยที่ถักทอจากเส้นใยที่เล็กในระดับนาโนเมตร จึงมีช่องว่างขนาดเล็กมากและสามารถกรองอนุภาคได้จำนวนมากกว่าหลายเท่าตัว ดังรูปที่ 2.28 แผ่นเส้นใยนาโนจึงสามารถนำมาใช้สร้างระบบกรองที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อลดมลภาวะทั้งทางอากาศ และทางน้ำ หรือพัฒนาเป็นระบบกรองน้ำจืดจากน้ำทะเล หรือแม้กระทั่งการกำจัด โลหะหนักจากน้ำเสีย ดังรูปที่ 2.29 แสดงระบบกรองเส้นใยนาโนที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อกรองและจับอนุภาคขนาดเล็ก [1] และรูปที่ 2.29 แสดงระบบกรองที่ทำจากเส้นใยนาโนที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อพัฒนาสำหรับใช้ทำระบบกรองน้ำหรือของเหลวโดยมีแผ่นฟิล์มไคโตซานสำหรับด้านแบคทีเรียและจับ ไอออนของโลหะหนักอยู่ด้านบน [2]



รูปที่ 2.29 ระบบกรองจากเส้นใยนาโนที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อกรองและจับอนุภาคขนาดเล็ก [1]



รูปที่ 2.30 ระบบกรองจากเส้นใยนาโนที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อพัฒนาเพื่อใช้ทำระบบกรองน้ำหรือของเหลว[2]

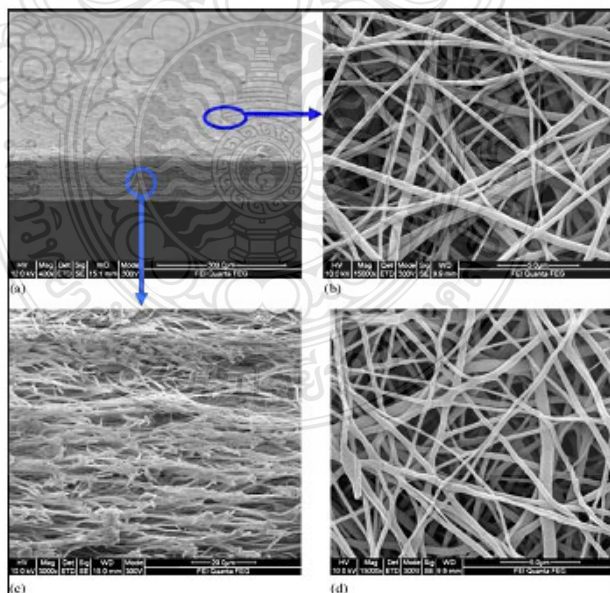
นอกจากนี้ยังมีเส้นใยนาโนเซรามิก บางกลุ่มที่สามารถนำมาทำระบบบำบัดน้ำเสียหรือเชื้อจุลินทรีย์ในอากาศได้ เช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) เป็นต้น วัสดุเหล่านี้มีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalysis) สามารถกำจัดสารพิษ แบคทีเรีย หรือกลิ่นเหม็นได้ ดังตัวอย่างใน



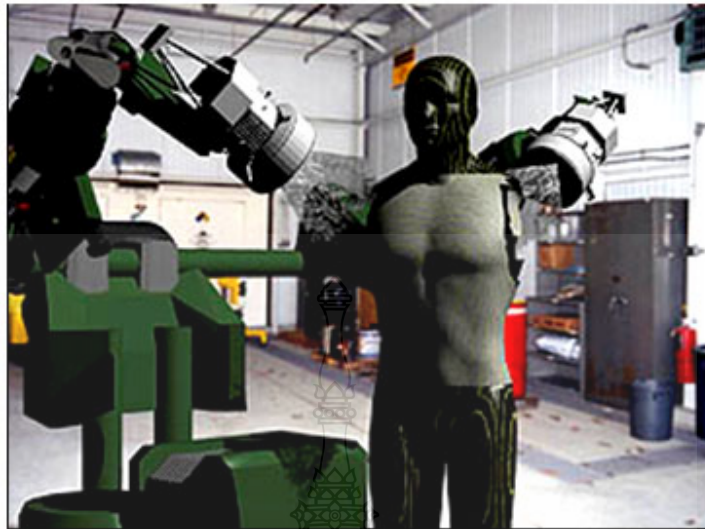
อุตสาหกรรมเครื่องปรับอากาศ ที่มีการนำอนุภาคระดับนาโนเมตรของวัสดุเหล่านี้มากำจัดเชื้อโรคในอากาศ และนำมาใช้เคลือบเส้นใยของเสื้อผ้าเพื่อป้องกันกลิ่นเหม็นอับจากเชื้อแบคทีเรีย หรือแม้กระทั่งใช้ผสมในสีทาบ้านเพื่อให้ทนต่อแสงแดดและด้านเชื้อรา ดังนั้นหากประดิษฐ์ให้วัสดุเหล่านี้มีลักษณะเป็นเส้นใยขนาดเล็กระดับนาโนเมตร จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้มากขึ้น

สำหรับการประยุกต์ใช้ในด้านเทคโนโลยีชีวภาพ ได้มีการนำเส้นใยนาโนมาใช้เป็นแผ่นเมมเบรนคัดแยก (Affinity Membrane) สำหรับการแยกโมเลกุลให้บริสุทธิ์โดยอาศัยสมบัติทางกายภาพ/เคมี หรือหน้าที่เฉพาะทางชีวภาพของโมเลกุลนั้น แผ่นเมมเบรนคัดแยกทำการแยกโมเลกุลโดยการเลือกจับ โมเลกุลซึ่งอาศัยการตรึงลิแกนด์ที่มีความจำเพาะต่อ โมเลกุลที่ต้องการคัดแยกลงบนผิวเมมเบรน แผ่นเมมเบรนคัดแยกทำให้เกิดระบบคัดแยกที่มีข้อดีว่าการใช้คอลัมน์โครมาโตกราฟีแบบดั้งเดิม ซึ่งให้สารเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์ตัวกลางที่บรรจุเม็ดคอลลอยด์ขนาดเล็ก เมื่อใช้เมมเบรนคัดแยกในระบบคัดเลือก จะทำให้สามารถคัดแยกโมเลกุลจากสารปริมาณน้อยกว่าได้ ใช้เวลาในการคัดแยกน้อยกว่า และคัดแยกโมเลกุลได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าเนื่องจากความจำเพาะระหว่างโมเลกุลบนเมมเบรนและโมเลกุลที่ต้องการ [29] ดังรูปที่ 2.31 แสดงแผ่นเมมเบรนคัดแยกที่ทำจากเส้นใยเซลลูโลสซึ่งมีผิวตรึงไว้กับ Cibacron Blue สำหรับแยกแอลบูมิน (Albumin)

นอกจากนี้ได้มีความพยายามนำเส้นใยนาโนมาเคลือบบนชุดเครื่องแบบทหาร เพื่อป้องกันอาวุธทางชีวภาพ สารพิษทางเคมี นิวเคลียร์ ดังรูปที่ 2.31



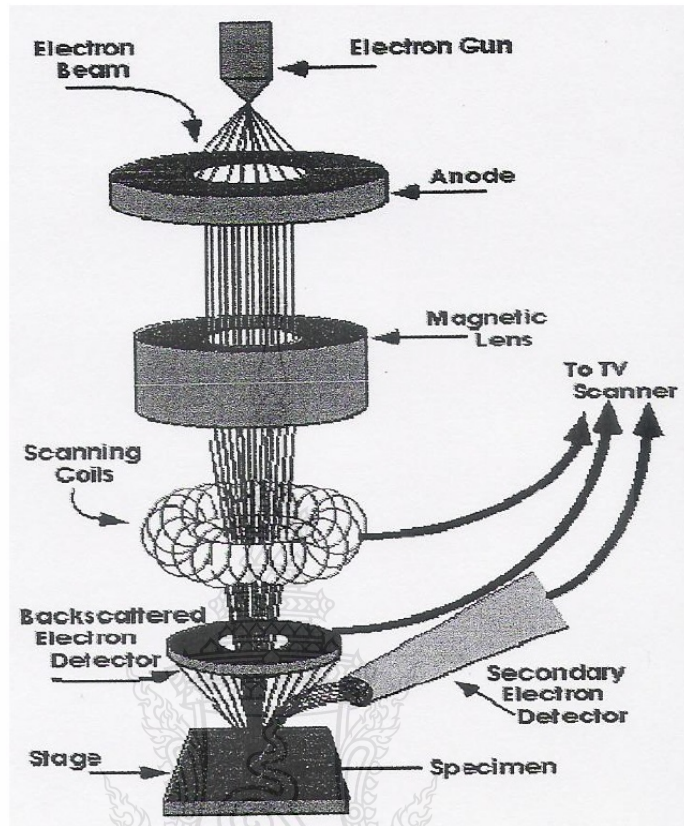
รูปที่ 2.31 แผ่นเมมเบรนคัดแยกที่ทำจากเส้นใยเซลลูโลสที่มีผิวตรึงไว้กับ Cibacron Blue สำหรับแยกแอลบูมิน (Albumin)



รูปที่ 2.32 การเคลื่อนย้ายของนาโนบนเครื่องแต่งกายทหาร เพื่อป้องกันอาวุธทางชีวภาพ

## 2.7 การวิเคราะห์เส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) SEM เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ลักษณะชิ้นงานในหลายสาขา เช่น วัสดุศาสตร์ ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ธรณีวิทยา ชีววิทยา และการแพทย์ เนื่องจากสาขาวิชาต่างๆจำเป็นต้องทำงานเกี่ยวกับวัสดุและชิ้นส่วนประกอบที่มีขนาดเล็กมากซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์ได้จากเครื่องมือธรรมดาทั่วไป SEM มีจุดเด่นที่สำคัญ 3 ประการ ได้แก่ สามารถให้ภาพที่มีความชัดลึกสูง (High depth of field) สามารถให้กำลังแยกแยะเชิงระยะสูง (High Spatial Resolution ) และสามารถใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) เพื่อให้ข้อมูลเชิงเคมี



รูปที่ 2.33 หลักการของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

### 2.7.1 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ส่วนประกอบและลักษณะการทำงาน โดยสังเขปของเครื่อง SEM แสดงไว้ดังรูปที่ สิ่งสำคัญอันดับแรกของเครื่อง SEM คือ อิเล็กตรอนต้องเป็นลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานเดียว (ความยาวคลื่นเดียว) ในส่วนบนสุดจะเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron Source) หรือ ปืนอิเล็กตรอน (Electron Gun) โดยมีขดลวดทั้งสเตรนรูปตัววีเป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการใช้ SEM กับพอลิเมอร์นั้น มีขีดจำกัดเนื่องจากความร้อนของลำอิเล็กตรอนอาจทำลายผิวหน้าของชิ้นงานได้ นอกจากนี้ยังมีความจำเป็นต้องเคลือบชิ้นงานพอลิเมอร์ซึ่งไม่นำไฟฟ้าด้วยตัวนำไฟฟ้า เช่น คาร์บอน หรือทองคำ อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ด้วยความต่างศักย์ในช่วง 1 ถึง 30 กิโลโวลต์ (บางเครื่องอาจสูงถึง 50 กิโลโวลต์) ชิ้นงานหรืออนุภาคถูกยึดไว้กับอะไรที่มีศักย์ไฟฟ้าที่เป็นศูนย์ลำอิเล็กตรอนผ่านช่องในอนุภาคและถูกโฟกัสลงบนชิ้นงาน โดยทิศทางเคลื่อนที่ของ

อิเล็กตรอนจะควบคุมโดยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Lens) จำนวน 2 ชุดหรือมากกว่าและปริมาณของอิเล็กตรอนจะควบคุมโดยช่องเปิดที่มีขนาดต่างๆกันตามลักษณะการใช้งานเลนส์คอนเดนเซอร์อันแรก (First Condenser Lens) อาจนับได้ว่าเป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญสูงสุดต่อการควบคุมทัศนศาสตร์ของอิเล็กตรอน (Electron Optics) เนื่องจากเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบลำอิเล็กตรอนที่ส่งลงมาจากแหล่งกำเนิดให้มีพื้นที่หน้าตัดเล็กลง (Demagnification) ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective Lens) ซึ่งเป็นเลนส์อันสุดท้ายนั้นทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอนให้ไปตกกระทบกับผิวของวัตถุเป้าหมาย โดยมีคอยล์กวาดภาพ (Scan Coil) ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนบนผิววัตถุในกรอบสี่เหลี่ยม เมื่อลำอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งใหม่คุณลักษณะของสัญญาณที่ถูกวัดโดยเครื่องรับสัญญาณต่างๆเปลี่ยนแปลงไปและแสดงผลออกมาในรูปของความมืดสว่างของภาพซึ่งสอดคล้องกับลักษณะพื้นผิว กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสามารถตรวจสอบตัวอย่างขนาดประมาณ 10 มิลลิเมตร ในการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างจะติดอยู่บนสตัป (Stub) ซึ่งเคลื่อนที่ขึ้นลงบนแท่นวางชิ้นงานคล้ายกับการทำงานของแม่แรงยกของรถยนต์ ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่เป็นฉนวนไฟฟ้าจะถูกเหนี่ยวนำทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้ด้วยการระเหย (Evaporation) โลหะใส่ชิ้นตัวอย่างหรือการฉาบด้วยโลหะ (Sputtering) เช่น ทองคำ ทองคำผสมพลาเดียม อลูมิเนียมหรือคาร์บอน เป็นต้น ในการระเหยใช้หลักการให้ความร้อนกับโลหะภายใต้สุญญากาศ มักใช้ทั้งสแตนเป็นขดลวดให้ความร้อนซึ่งสามารถต้านทานต่อความร้อนสูงที่สัทธิไฟฟ้าต่ำ โดยทั่วไปลวดโลหะเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการหลอมเหลวและค่อยๆระเหยกลายเป็นไอ ผิวหน้าของโลหะหลอมเหลวจะสัมผัสกับไส้หลอดทั้งสแตนด้วยแรงดึงผิวตลอดเวลา จากนั้นอะตอมของก๊าซโลหะแต่ละอะตอมเกิดการควบแน่นบนผิวชิ้นตัวอย่างภายในช่องสุญญากาศ

อย่างไรก็ตามควรระลึกเสมอว่า การเคลือบผิวชิ้นตัวอย่างนี้เมื่อทำให้ชิ้นงานนำไฟฟ้าได้ ดังนั้นในการเคลือบผิวควรครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดที่ต้องการตรวจสอบและการเคลือบต้องต่อเนื่องติดต่อกันเป็นเนื้อเดียวกันตลอดตั้งแต่ด้านข้างของชิ้นงานจนถึงตัวสตัป เพื่อทำให้เกิดสภาพการนำไฟฟ้าบนพื้นที่ทั้งหมดทำสัมผัสลำอิเล็กตรอนตลอดจนแท่นวางชิ้นตัวอย่างซึ่งมีสัทธิไฟฟ้าเป็นศูนย์ บ่อยครั้งอาจมีการทาสีซึ่งมีส่วนผสมของเงินหรือกราไฟท์บนผิวของชิ้นตัวอย่างก่อนการทาสารเหนียวคล้ายกาวเพื่อทำให้เกิดสภาพการนำไฟฟ้าถึงกันได้ด้วย

## 2.8 ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) หมายถึงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบธรรมชาติ หรือ อินทรีย์วัตถุซึ่งมีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก มาผ่านกรรมวิธีก่อกัมมันต์ (Activation Process) จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำ มีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง มีสมบัติในการดูดซับสารต่างๆ ได้ดี วัตถุดิบที่ใช้ผลิตจะขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต อาจเป็นอินทรีย์วัตถุหรือถ่านก็ได้ อินทรีย์วัตถุที่ใช้เป็นวัตถุดิบแบ่งได้ดังนี้

1. สารเซลลูโลสที่มาจากพืช เช่น แกลบ กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม ขี้เถ้า ชานอ้อย ชังข้าวโพด เป็นต้น

2. ถ่านหิน เช่น ลิกไนต์ (Lignite) พีท (peat) บิทูมินัส (Bituminous) เป็นต้น

3. วัตถุดิบจากสัตว์ เช่น เลือด กระดูก เป็นต้น

ส่วนถ่านที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปจะเป็นถ่านสังเคราะห์ (Artificial Char) ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากการเผาอินทรีย์วัตถุธรรมชาติ เช่น กราไฟต์ แอนทราไซต์

วิธีการผลิตถ่านกัมมันต์มีหลายวิธี วัตถุประสงค์หลักคือ กระตุ้นให้ถ่านมีพื้นที่ผิวมากขึ้น ในปัจจุบันมักใช้วิธีกระตุ้นด้วยไอน้ำที่ร้อนยิ่งยวด (Superheated Steam) ทำปฏิกิริยากับถ่านที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้การกระตุ้นอาจใช้สารที่มีคุณสมบัติดูดน้ำ (Dehydrating Agent) เช่น สังกะสีคลอไรด์ (Zinc Chloride) กรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) เป็นต้น

ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้กันมีอยู่ 2 ชนิด คือ ชนิดผง และชนิดเม็ด ชนิดผงผลิตจากขี้เถ้าเป็นส่วนใหญ่ มีรูพรุนเล็กกว่า โดยนำไปใช้ในสารละลายหรือของเหลว ใช้ในอุตสาหกรรมเคมี เช่น สีย้อม สารเคมีอัดรูป สารทำความสะอาด เป็นต้น การฟอกสีในอุตสาหกรรมน้ำตาล ไชและน้ำมันทั้งพืชและสัตว์ เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ น้ำตาลกลูโคส และผงชูรส เป็นต้น ส่วนชนิดเม็ดยังผลิตจากกะลามะพร้าว ถ่านหิน มีรูพรุนค่อนข้างใหญ่ ใช้ในการดูดก๊าซและไอ ใช้ในอุตสาหกรรมทำน้ำยากันกันก๊าซพิษ การปรับอากาศ บูหรี การผลิตน้ำบริสุทธิ์ เป็นต้น

## 2.8.1 ชนิดของถ่านกัมมันต์

ชนิดของถ่านกัมมันต์ แบ่งตามเกณฑ์ต่างๆ คือ

### 1. แบ่งตามชนิดของตัวกระตุ้น

- เคมี (Chemical Activated Carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยาเคมีกับฟิวคาร์บอน มักเป็นพวกที่มีรูพรุนขนาดใหญ่
- ฟิสิกส์ (Physical Activated Carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้แก๊สออกซิไดน์ มักเป็นพวกที่มีรูพรุนขนาดเล็ก

### 2. แบ่งตามขนาดรูพรุนบนฟิวคาร์บอน

- ขนาดเล็ก (Micropores) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนไม่เกิน 15 นาโนเมตร (nm) มักใช้ในการดูดซับแก๊สหรือไอระเหย
- ขนาดกลาง (Transitional Pores or Mesopores) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนประมาณ 15-100 nm มักใช้ในปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Reaction)
- ขนาดใหญ่ (Macropores) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนใหญ่กว่า 100 นาโนเมตร มักใช้ในการฟอกสี และผลิตยา

### 3. แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ที่ได้

- ความหนาแน่นต่ำ ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ในสถานะที่เป็นสารละลาย เช่น การฟอกสีน้ำตาลดิบ หรือการทำน้ำให้บริสุทธิ์ เป็นต้น
- ความหนาแน่นสูง ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ดูดแก๊สพิษ หรือไอระเหย

### 4. แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ

- สำหรับดูดซับแก๊ส (Gas Adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับสารพิษ กลิ่น และไอของสารอินทรีย์ ส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการเผาถ่านประเภท Hard Artificial Char ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากเมล็ดผลไม้ หรือ ถ่านไม้ที่เผาที่ความดันสูง
- สำหรับดูดซับสี (Colour Adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นตัวฟอกสีส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้เผาถ่านประเภท Soft Artificial Char ซึ่งเป็นถ่านได้จาก ถ่านไม้ถ่านขานอ้อย ถ่านจากแกลบ ถ่านจากถ่านหินน้ำมัน และ ถ่านจากกากน้ำตาล
- สำหรับดูดซับโลหะ (Metal Adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่เป็นตัวแยกพวกโลหะชนิดต่างๆ เช่น ถ่านที่ใช้ในการแยก ทอง เงิน แพลทินัม และแร่

## 2.9 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ (Adsorption) เป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ที่อยู่ในของเหลวหรือแก๊ส ให้มาเกาะจับและติดบนผิว ปรากฏการณ์ เช่นนี้ จัดเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass Transfer) จากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็ง โมเลกุลหรือคอลลอยด์ เรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของ Adsorbate เรียกว่า Adsorbent

### 2.9.1 ทฤษฎีการดูดซับ

การดูดซับ (Adsorption) หมายถึง การเพิ่มความเข้มข้นของสารที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ (Adsorbent) หรือในทางกลับกันเป็นการลดลงของความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) บนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ สารซึ่งมีพลังงานอิสระที่ผิวดำ (Low Surface Free Energy) จะถูกดูดซับ ซึ่งพลังงานอิสระที่ผิวของตัวถูกดูดซับจะมีความสัมพันธ์กับแรงตึงผิว (Surface Tension ) และพื้นที่ผิว (Surface Area) ดังนี้

$$G_{sf} = \mu A$$

เมื่อ  $G_{sf}$  เป็นพลังงานอิสระที่ผิว  
 $\mu$  เป็นแรงตึงผิว  
 $A$  เป็นพื้นที่ผิว

เมื่อแรงตึงหรือพื้นที่ผิวเปลี่ยนแปลงไปจะเป็นผลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของพลังงานซึ่งจะเป็น  $dS_{sf}$  แรงตึงผิวของของเหลว คือ แรงตึงผิวต่อหน่วยความยาว (ตั้งฉากกับแรง) ที่ถูกแรงนี้กระทำปกติ แรงตึงผิวจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เช่น ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส น้ำจะมีแรงตึงผิวเท่ากับ  $75.6 \times 10^{-3}$  ต่อนิวตันเมตร และที่ 20 องศาเซลเซียส น้ำจะมีแรงตึงผิวเท่ากับ  $72.8 \times 10^{-3}$  ต่อนิวตันเมตร ความตึงผิวของของเหลวเป็นค่าเฉพาะของของเหลวชนิดนั้น เช่น แรงตึงผิวของปรอทที่ 20 องศาเซลเซียส มีแรงตึงผิวเท่ากับ  $4.56 \times 10^{-3}$  ต่อนิวตันเมตร ซึ่งแตกต่างจากค่าความตึงผิวของน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน การดูดซับจะเกิดได้ ก็ต่อเมื่อมีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ตัวถูกดูดซับที่ใช้ศึกษาอาจเป็น โมเลกุลของแก๊สหรือตัวทำละลายในสารละลาย การดูดซับของแก๊สหรือตัวถูกละลายในสารละลายจะเกิดขึ้นจนกระทั่งเกิดสมดุลระหว่างโมเลกุลของแก๊สในสภาวะแก๊สกับโมเลกุลของแก๊สที่ผิวของของแข็ง หรือ เกิดสมดุลระหว่างโมเลกุลของตัวละลายในสารละลายกับโมเลกุลของตัวถูกละลายที่ผิวของแข็ง

การดูดซับเป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงดูด โมเลกุลหรือคอลลอยด์ ซึ่งอาจ อยู่ในของเหลวหรือแก๊สให้มาเกาะและติดบนผิว ถือว่าเป็นการเคลื่อนย้ายสารระหว่างสถานะต่างๆ ทั้ง 3 สถานะ ซึ่งมีได้ทั้งแบบของเหลว - ของเหลว แก๊ส- ของแข็ง และของเหลว-ของแข็ง ในกรณีการดูดซับได้กำหนดนิยามที่เกี่ยวข้องไว้ดังนี้

- Adsorbate หมายถึง โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ โดยผิวของแข็ง หรือผิวของตัวดูดซับ
- Adsorbent หมายถึง ตัวดูดซับหรือสารที่มีผิวเป็นที่ยึดเกาะจับของ Adsorbate
- Adsorption หมายถึง การดูดซับ
- Absorption หมายถึง การดูดซึม
- Solute หมายถึง โมเลกุลของสารหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในของเหลว
- Sorption หมายถึง การดูดติดทั้งสองชนิด ได้แก่ Adsorption และ Absorption

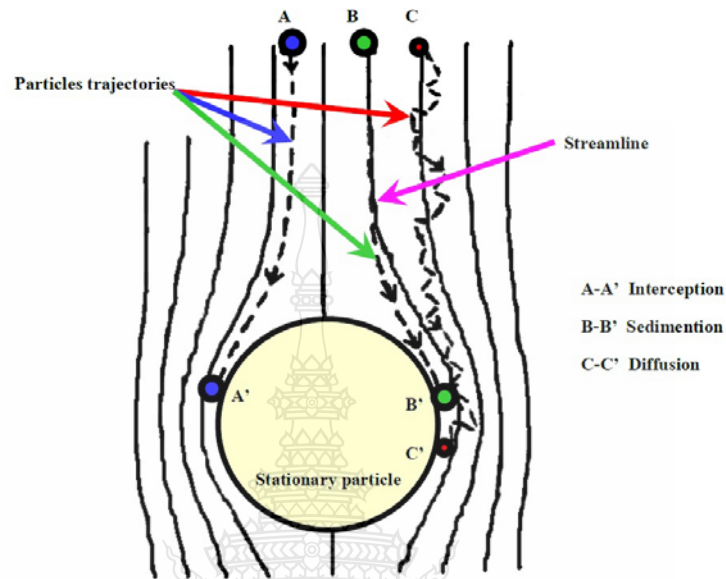
## 2.9.2 ขั้นตอนของการดูดซับ

ขั้นตอนของการดูดซับสามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

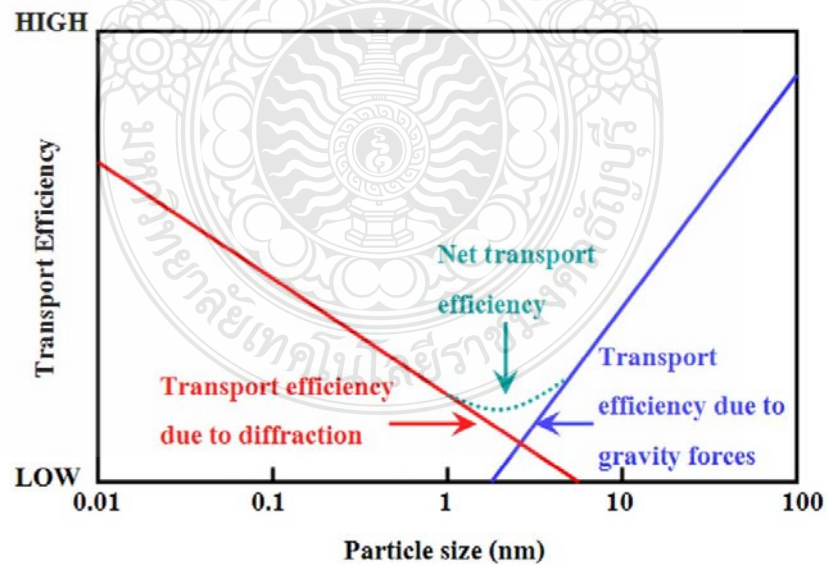
ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารละลาย หรือสารแขวนลอยเข้าหาถ่านกัมมันต์ โดยการเคลื่อนที่จะมีลักษณะคล้ายกับการกรองน้ำซึ่งเป็นการเคลื่อนย้ายของสารแขวนลอยในน้ำเข้ามาติดที่ถ่านกัมมันต์ ซึ่งสารแขวนลอยนี้จะเคลื่อนที่เข้าหาสารกรองได้ 2 วิธี (ตามรูปที่ 2.34 ) โดยวิธีแรกเป็นการเคลื่อนที่ตามธรรมชาติของสารที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน และเป็นการเคลื่อนที่แบบ บราวเนียน (Brownian Diffusion) ส่วนวิธีที่สองเป็นการเคลื่อนที่ตามเส้นทางการไหลของน้ำ โดยสารแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอนจะวิ่งเบียดเข้าหาสารกรอง (Interception) ในขณะที่ผ่านช่องว่างขนาดเล็ก นอกจากนี้สารแขวนลอยขนาดใหญ่ยังอาจตกตะกอนในทิศทางที่เคลื่อนที่เข้าหาถ่านกัมมันต์ได้ ขนาดและการกระจายขนาด (Size Distribution) ของสารแขวนลอยมีความสำคัญต่อกลไกการเคลื่อนย้ายเป็นอย่างมาก พิจารณาจากรูปที่ 2.34 คือ เมื่อขนาดของสารแขวนลอยเล็กกว่า 1 ไมครอน ประสิทธิภาพของการเคลื่อนย้ายจะแปรผกผันกับขนาดซึ่งก็คือ การแพร่กระจายจะทำให้สารขนาดเล็กเคลื่อนที่ได้มากกว่า และมีโอกาสวิ่งเข้าหาถ่านกัมมันต์ได้มากกว่า สารขนาดใหญ่ แต่เมื่อสารมีขนาดมากกว่า 1 ไมครอน จะมีการแพร่กระจายในระดับเลขน้อยมาก ขนาดและน้ำหนักของสารแขวนลอยจะเข้ามามีบทบาทสำคัญในการสร้างกลไกแบบตะกอนและติดค้าง (Sedimentation) ดังนั้นประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายจึงแปรผกผันตรงกับขนาดของสารแขวนลอย ดังรูปที่ 2.34 ทั้งนี้เนื่องจากสารแขวนลอยขนาดใหญ่มีน้ำหนักมาก และมีปริมาตรมากจึง



ตกตะกอนหรือติดค้างบนถ้ำน้ำมันได้ง่าย โดยเมื่อพิจารณาจากที่กล่าวมา พบว่า สารแขวนลอยที่มีขนาด 1 ไมครอนจะกำจัดออกได้ยากกว่าสารขนาดอื่น ในลักษณะของการกำจัดโดยวิธีการกรอง



รูปที่ 2.34 กลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยในน้ำเข้าหาถ้ำน้ำมัน

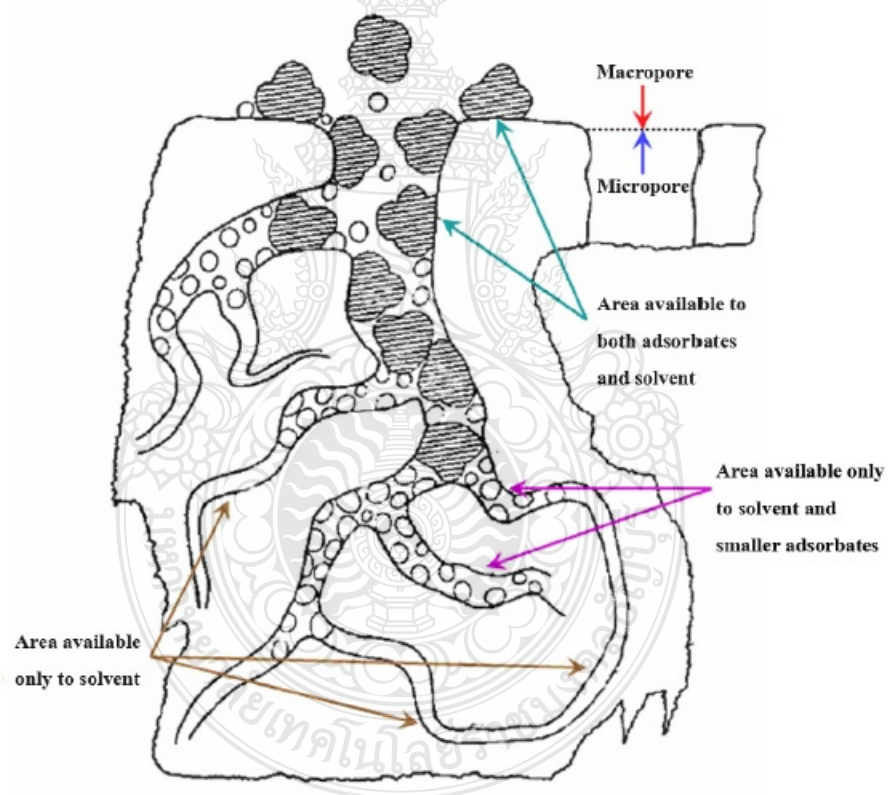


รูปที่ 2.35 ประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยที่ขึ้นอยู่กับขนาด

ขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอน Film Diffusion เมื่อโมเลกุลของสารแขวนลอยเข้ามาถึงถ่านกัมมันต์ซึ่งโดยปกติแล้วถ่านกัมมันต์นี้จะมีฟิล์มของน้ำห่อหุ้มโดยรอบ คล้ายเยื่อบางๆ โมเลกุลต้องทำการแทรกตัวผ่านฟิล์มของน้ำให้ได้จึงจะเข้าไปในผิวถ่านกัมมันต์ได้

ขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอน Pre Diffusion เนื่องจากสาเหตุที่ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวส่วนใหญ่อยู่ที่โพรง หรือช่องว่างภายใน ดังรูปที่ 2.36 โมเลกุลของสารแขวนลอยจะต้องแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างของถ่านกัมมันต์ให้ได้จึงจะมีการดูดซับเกิดขึ้น

ขั้นตอนที่ 4 ขั้นตอนนี้โมเลกุลของสารแขวนลอยจะต้องเกาะติดบนผิวของถ่านกัมมันต์ได้โดยไม่หลุดออกไป จึงจะถือว่าเกิดการดูดซับที่ผิวอย่างสมบูรณ์

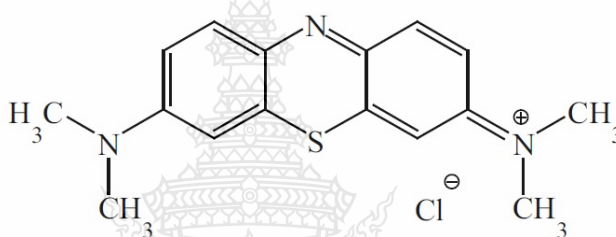


รูปที่ 2.36 โพรง หรือช่องว่างภายในถ่านกัมมันต์

## 2.10 เมทิลีนบลู (Methylene Blue)

### 2.10.1 สมบัติของเมทิลีนบลู

สารประกอบเมทิลีนบลู เป็นสารอินทรีย์กลุ่มสารประกอบพวก เฮทเทอโรไซคลิกอะโรมาติก (Heterocyclic Aromatic) ที่ย่อยสลายยาก ซึ่งมีสูตรทางเคมี คือ  $C_{16}H_{18}N_3ClS$  หรือสามารถเรียกชื่อตามระบบ IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) ว่า 3,7-bis (Dimethylamino)-Phenazathionium Chloride หรือ Tetramethylthionine Chloride โดยมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.41 ลักษณะเป็นผลึกสีเขียวเข้ม และละลายน้ำจะเป็นสีน้ำเงิน โดยสมบัติต่างๆ ของเมทิลีนบลู แสดงดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.37 สูตร โครงสร้างเมทิลีนบลู

ตารางที่ 2.1 สมบัติต่างๆของเมทิลีนบลู

สมบัติ	
สมบัติทั่วไป	
มวลโมเลกุล (g/mol)	319.85
สมบัติทางกายภาพและเคมี	
ลักษณะ	ของแข็ง
จุดหลอมเหลว (K)	463.15
ความสามารถในการละลายน้ำ (g/100cm <sup>3</sup> )	4
ความสามารถในการละลายแอลกอฮอล์ (g/100cm <sup>3</sup> )	1.54

### 2.10.2 การนำเมทิลลินบลูมาใช้ประโยชน์

ในปัจจุบัน เมทิลลินบลู ถูกใช้เป็นสีข้อมในอุตสาหกรรมสีต่างๆ เนื่องจากเมทิลลินบลู เมื่อละลายน้ำแล้วให้สีน้ำเงิน และยังใช้เป็นอินดิเคเตอร์ในการทดสอบความเป็นกรด่างของสารละลายได้อีกด้วย

นอกจากนี้ เมทิลลินบลู ยังถูกใช้เป็นยาฆ่าเชื้อในลำไส้ ยาฆ่าเชื้อทางเดินปัสสาวะ และ ยาฆ่าเชื้อมาเลเรียอย่างอ่อน

### 2.10.3 ความเป็นพิษของเมทิลลินบลู

ถ้ามนุษย์ได้รับเมทิลลินบลูเข้าสู่ร่างกายมากเกินไป อาจมีอาการแสบร้อนในปาก หรือท้อง คลื่นไส้ อาเจียน นอกจากนี้จะมีอาการปวดศีรษะ เจ็บหน้าอก แน่นหน้าอก หายใจเร็ว เกิดอาการวิตกกังวล บางรายจะเกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินปัสสาวะทำให้ปัสสาวะขัดหรือปัสสาวะบ่อย นอกจากนี้ เมทิลลินบลู ยังอาจทำให้ผิวหนังมีสีน้ำเงิน (Bluish Skin) ได้



### บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

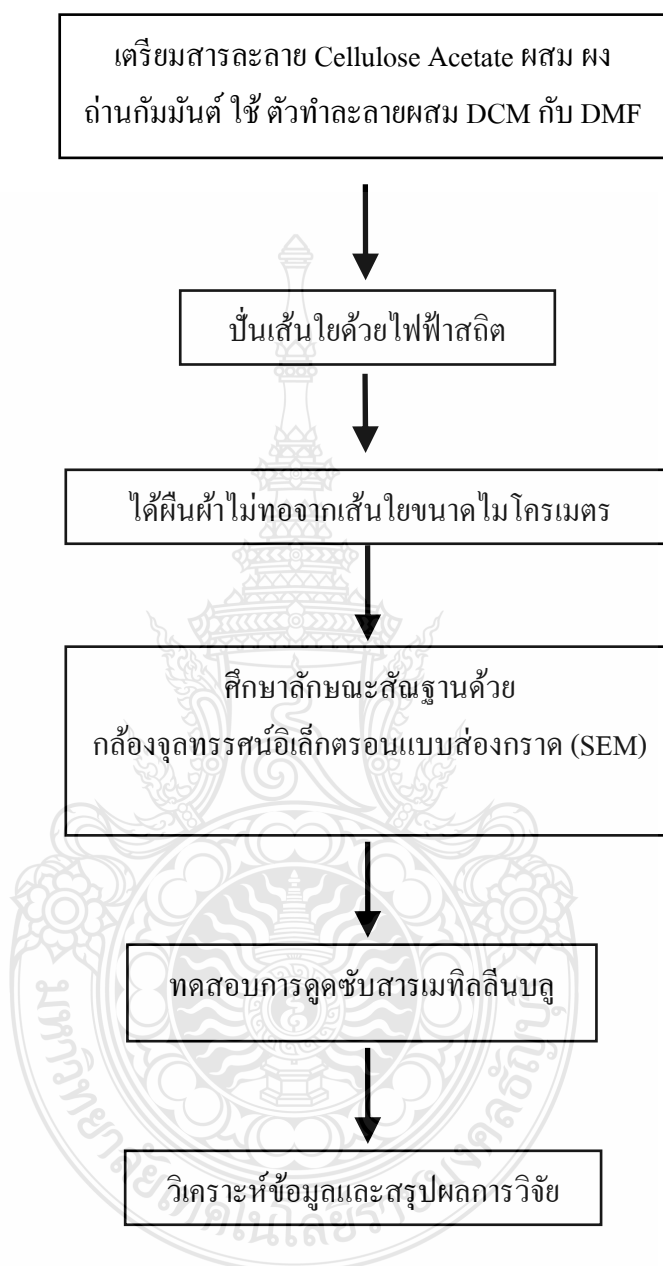
งานวิจัยนี้ศึกษาการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเพื่อขึ้นรูปเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตด ภายใต้สภาวะการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน ดังนี้ ระยะห่างระหว่างสปินเนอร์เรทกับชุดเก็บรวบรวมเส้นใย อัตราการป้อนสารละลาย ความเข้มข้นสารละลาย ที่ไม่ผสมผงถ่านกัมมันต์ กับที่ผสมผงถ่านกัมมันต์ โดยเปรียบเทียบขนาดของเส้น การเกิดรูพรุนที่ผิว และความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ของเส้นใย ขนาดไมโครเมตรเซลลูโลสอะซิเตดที่ไม่ผสมผงถ่านกัมมันต์และที่ผสมผงถ่านกัมมันต์ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาวัสดุที่ดูดซับสารอินทรีย์ให้เหมาะสมในการนำไปใช้งาน โดยมีแผนการและขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังต่อไปนี้

#### 3.1 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	2555					2556				
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	ก.ย.	ต.ค.
1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	←→									
2. เตรียมวัสดุอุปกรณ์และ สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย			←→							
3. สอบหัวข้อและเค้าโครงวิทยานิพนธ์							←→			
4. เตรียมฝืนผ้าไม่ทอจากเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตดผสมผงถ่านกัมมันต์					←→					
5. วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานเส้นใยกลวง ด้วย SEM					←→					
6. ทดลองนำเอาฝืนผ้าไม่ทอที่เตรียมได้ไปใช้เป็นตัวดูดซับสารเมทิลีน บลู							←→			
7. วิเคราะห์และสรุปผลการทำวิจัย							←→			
8. เผยแพร่และจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์									←→	

### 3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

### 3.3 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

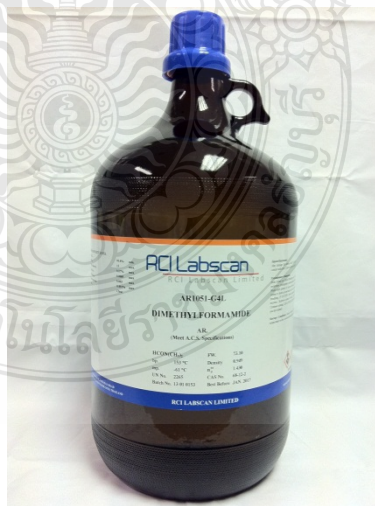
#### 3.3.1 สารเคมี

1. Cellulose Acetate ( $M_n \sim 50,000$ ) จากบริษัท เอส.เอ็ม. เคมีคอล ซัพพลาย จำกัด



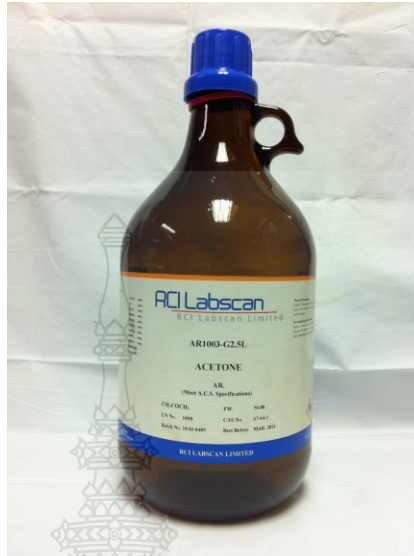
#### รูปที่ 3.2 สารเซลลูโลสอะซิเตต ( $M_n \sim 50,000$ )

2. Dimethylformamide (DMF) จากบริษัท อาร์ซีไอ แล็บสแกน จำกัด



#### รูปที่ 3.3 สารละลายไดเมทิลฟอร์มามิด

3. Dichloromethane (DCM) จากบริษัท อาร์ซีไอ แล็บสแกน จำกัด



รูปที่ 3.4 สารละลายไดคลอโรมีเทน

4. Powdered Activated Coconut Shell Based Carbon เกรด HRO M325-60 จากบริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด



รูปที่ 3.5 ผงถ่านกัมมันต์



5. Methylene Blue Hydrate จาก บริษัท เอส.เอ็ม.เคมิคอล ซัพพลาย จำกัด



รูปที่ 3.6 สารเมทิลีนบลู

3.3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องวัดความหนืด VISCOMETER



รูปที่ 3.7 เครื่องวัดความหนืด VISCOMETER

## 2. ชุดปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ( Electrospinning)



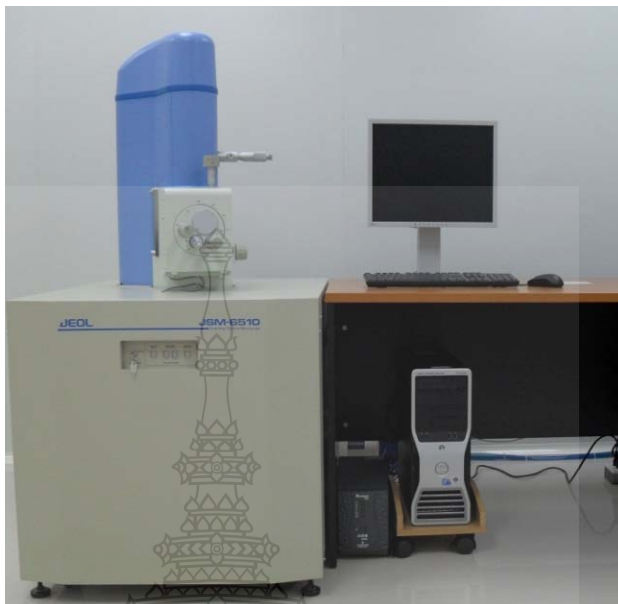
รูปที่ 3.8 ชุดปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ( Electrospinning)

## 3. Hot plate and Stirrer



รูปที่ 3.9 Hot Plate and Stirrer

## 6.2.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) (JEOL, JSM-6510)



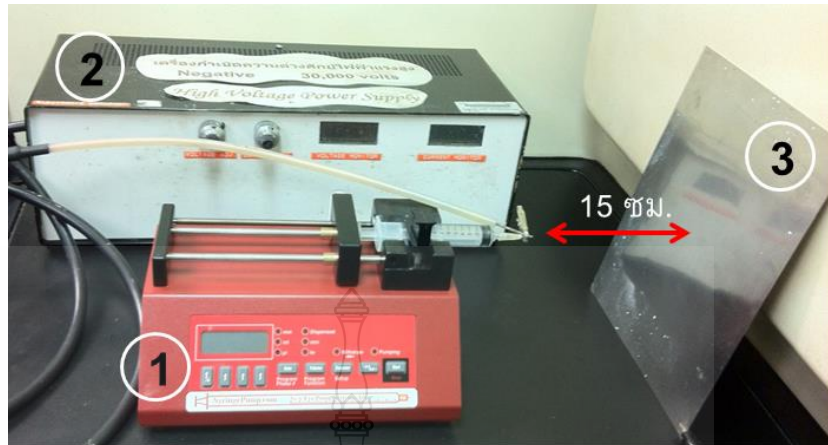
รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM)

### 3.4 วิธีการทดลอง

#### 3.4.1 การเตรียมผ้าไหมทอโดยการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิต

1. ทำการเตรียมสารละลายโดยชั่งเซลล์ูโลสอะซิเตท 8 และ 10 wt% แล้วเติมตัวทำละลายผสมไดคลอโรมีเทน (DCM) และไดเมทิลฟอร์มาอิมด์ (DMF) ในอัตราส่วน 2 ต่อ 1 ส่วนโดยน้ำหนัก ทำการกวนด้วยแท่งกวนชนิดแม่เหล็ก (Magnetic Bar) ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 10-15 นาที จนได้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเติมผงถ่านกัมมันต์ (AC) ในอัตราส่วน 0,1,2,3,5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ลงในสารละลายที่เตรียมไว้ แล้วกวนสารละลายผสมผงถ่านกัมมันต์นี้ด้วยแท่งกวนชนิดแม่เหล็ก (Magnetic bar) ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชม.จนผงถ่านกัมมันต์กระจายเข้ากันอย่างสม่ำเสมอทั่วสารละลาย

2. ทำการขึ้นรูปผ้าไหมทอจากเส้นใยเซลล์ูโลสอะซิเตทที่ตัวอย่างสารละลายที่เตรียมไว้ ด้วยไซริงค์ปั๊ม (Syringe Pump, Just Infusion™) โดยทำการตั้งค่าสถานะที่ใช้ในการขึ้นรูปดังนี้ อัตราการป้อนสารละลาย (Throughput Rate) คงที่ที่ 0.1 มิลลิลิตรต่อนาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเข็ม 0.6 mm ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 kV ระยะทางจากเข็มถึงแผ่นรองรับเส้นใย 15 cm ดังรูปที่ 3.11



1. ไชริงค์ปี่ม
2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์สูง
3. แผ่นรองรับเส้นใย

### รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ที่ใช้ในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

#### 3.4.2 การวิเคราะห์ลักษณะ

- วัดค่าความหนืดของสารละลายตัวอย่าง ด้วยเครื่อง Rheometer (ThermoHake RotoVisco1)
- วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (JEOL JSM-4501)
- วัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใยด้วยโปรแกรม Image J

#### 3.4.3 ทดสอบการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู

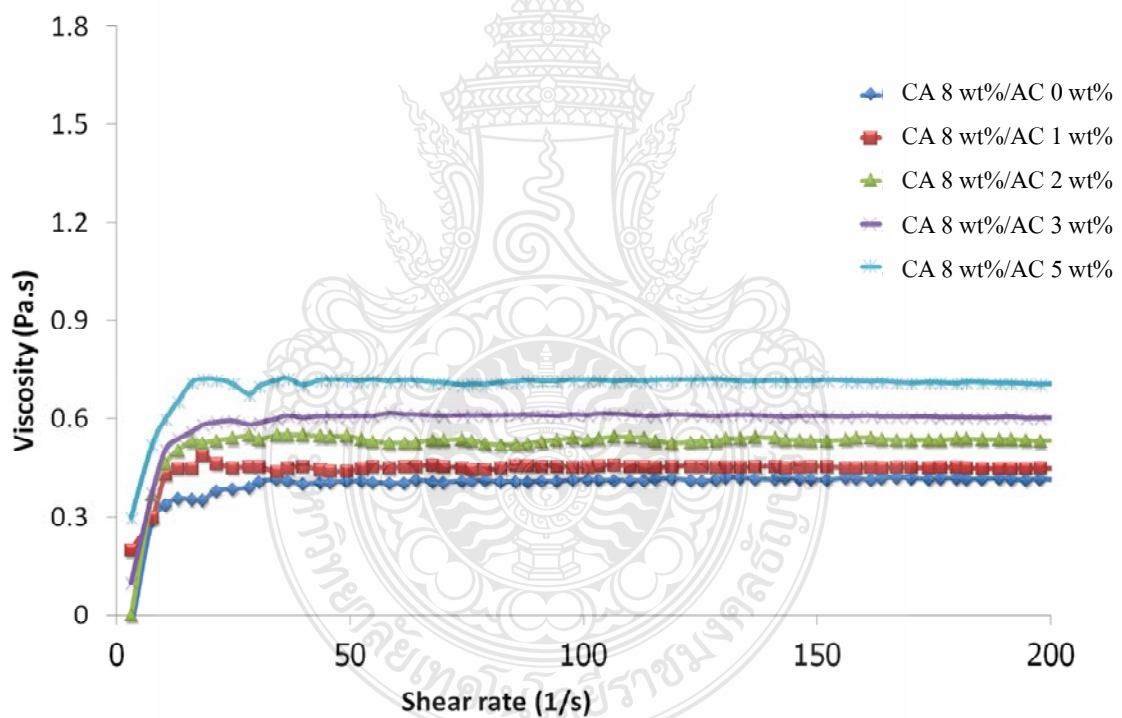
เตรียมผ้าไมโทแต่ละตัวอย่างขนาด 5 x 5 cm น้ำหนักประมาณ 100 mg ใกล้เคียงกันทุกชิ้น เตรียมสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 5 ppm ใช้สารละลายในการทดสอบ 100 ml ทดสอบในห้องมืด ทำการเก็บตัวอย่างที่ 0, 1, 3, 6, 12, 24 และ 48 ชั่วโมง ตามลำดับ แล้วนำสารละลายไปวัดความเข้มข้นที่เหลือ ด้วยการดูดซับแสงในช่วงความยาวคลื่น 600-700 nm โดยใช้เครื่อง UV-vis Spectrophotometer (JASCO V-530)

## บทที่ 4

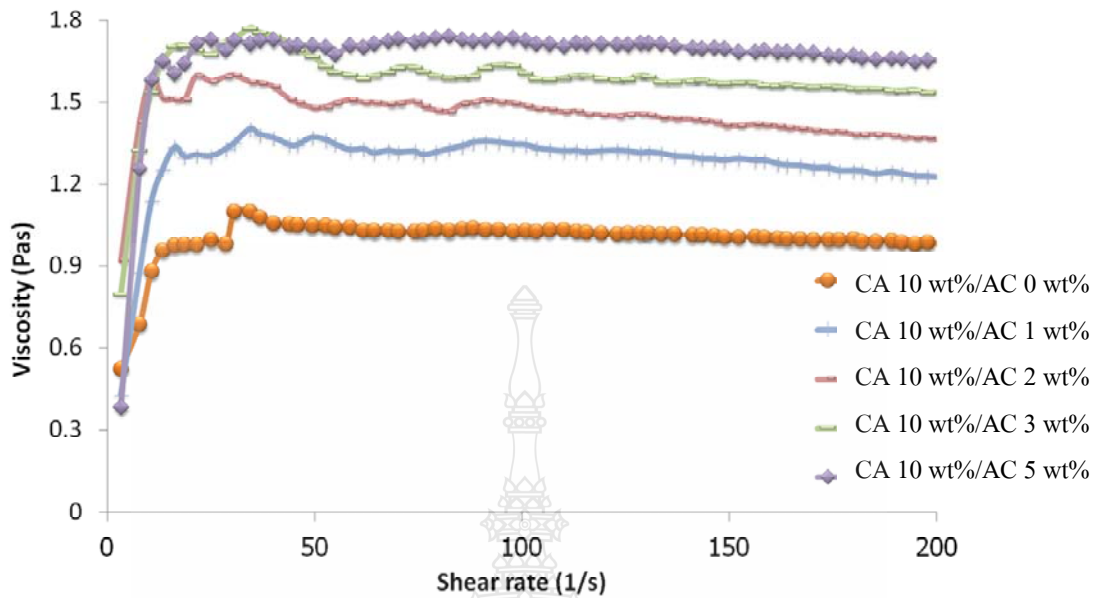
### ผลการทดลอง

ก่อนทำการขึ้นรูปผ้าไหมทอด้วยสารละลายเซลลูโลสอะซิเตตได้ทำการวัดค่าความหนืดของสารละลายตัวอย่างที่ผสมถ่านกัมมันต์ต่าง ๆ กัน เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลของความหนืดต่อขนาดเส้นใยและความสามารถในการปั่นขึ้นรูปด้วยไฟฟ้าสถิต

#### 4.1 ผลการวัดความหนืดสารละลาย (Viscosity)



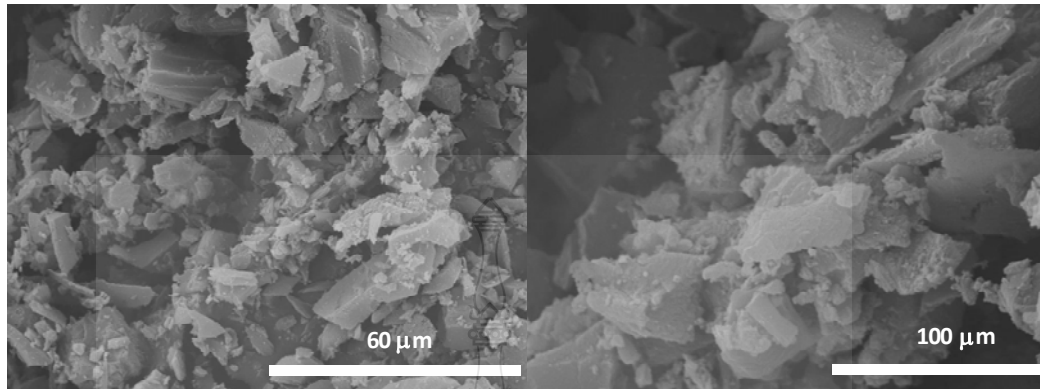
รูปที่ 4.1 ค่าความหนืดของสารละลาย CA 8 wt% ที่ปริมาณ AC 0, 1, 2, 3 และ 5 wt%



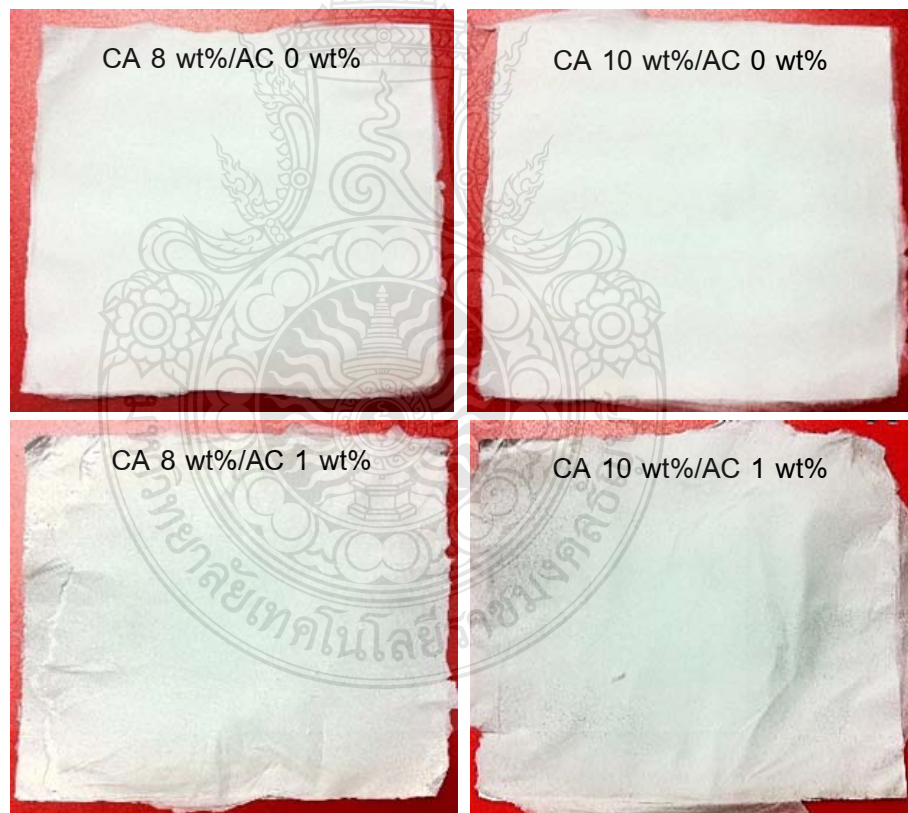
รูปที่ 4.2 ค่าความหนืดของสารละลาย CA 10 wt% ที่ปริมาณ AC 0, 1, 2, 3 และ 5 wt%

จากผลของความหนืดสารละลาย CA ความเข้มข้น 8 และ 10 wt% ผสมถ่านกัมมันต์ในปริมาณ 0, 1, 2, 3 และ 5 wt% เมื่อเปรียบเทียบสารละลายที่ความเข้มข้นของ CA ทั้งสองค่า พบว่าที่ตัวอย่าง CA 10 wt%/AC 0 wt% มีค่าความหนืดสูงกว่า CA 8 wt%/AC 0 wt% และปริมาณ AC ที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่าความหนืดมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อนำสารละลายดังกล่าวมาทำการขึ้นรูปโดยการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นเส้นใยไม่ทอพบว่าสารละลาย CA 8 wt% ที่ผสม AC ที่ปริมาณต่าง ๆ กันสามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่เกิดการอุดตันที่รูเข็ม (เส้นใยไม่ทอจะมีความเรียบเนียน) ดังรูปที่ 4.4-4.5 เห็นได้ว่า ที่ CA 8 wt% แสดงลักษณะเส้นใยที่สม่ำเสมอกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ สารละลาย CA 10 wt% ซึ่งขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้ไม่เรียบเนียน เมื่อปริมาณผสม AC เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ CA 10 wt%/AC 5 wt% ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความหนืดที่สูงเกินไปส่งผลทำให้การไหลของสารละลายไหลผ่านรูเข็มที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก 0.6 mm เกิดความเค้นสูง และไหลได้ช้ากว่าสารละลาย CA 8 wt% ที่มีความหนืดต่ำกว่า จึงทำให้เกิดการสะสมของอนุภาค AC ที่รูเข็ม หัวฉีดเส้นใยค่อนข้างมาก ทำให้เกิดการอุดตันและได้เส้นใยที่ไม่สม่ำเสมอ [13]

## 4.2 วิเคราะห์ลักษณะสัญญาณและขนาดของถ่านกัมมันต์และเส้นใย



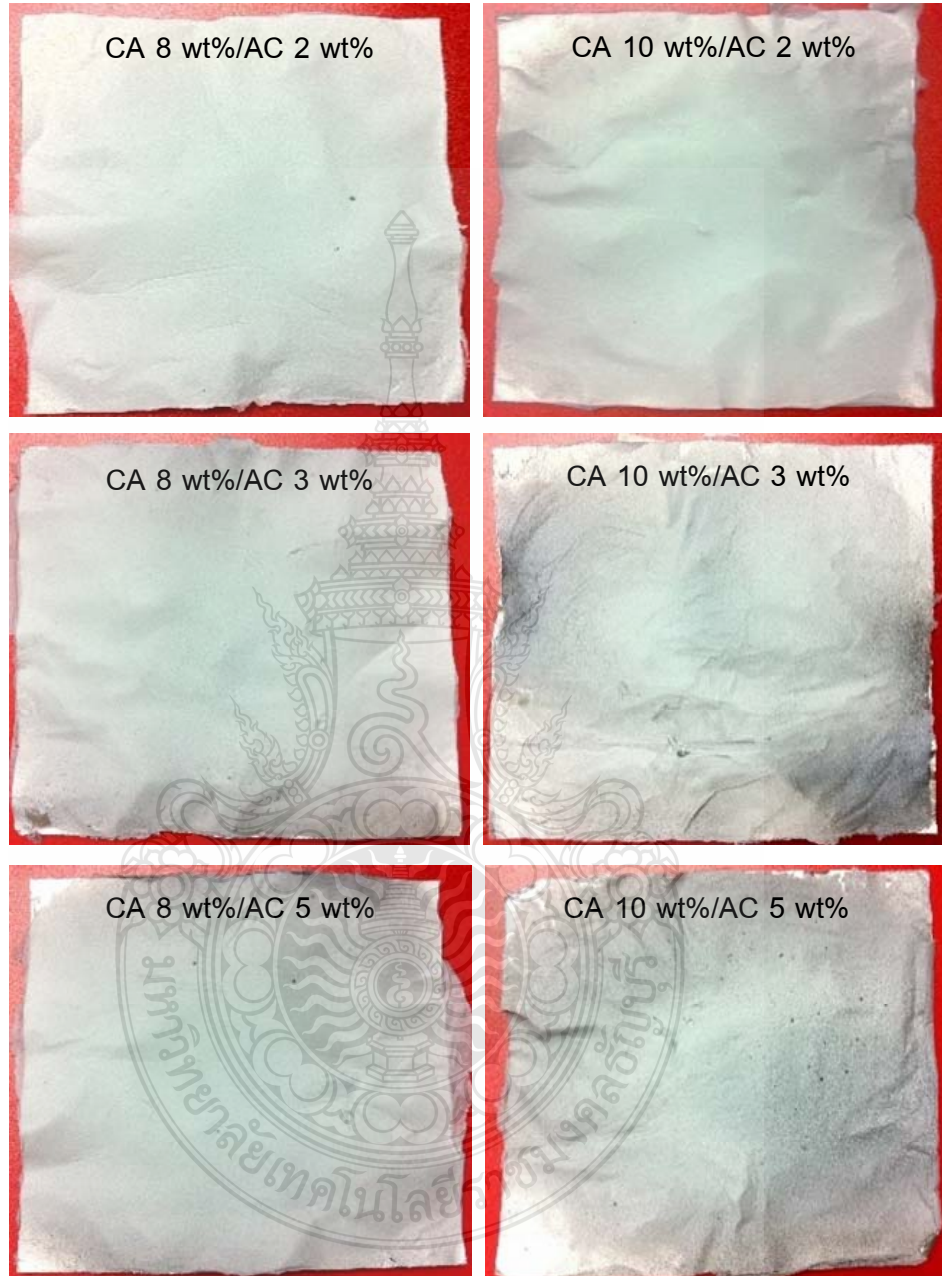
รูปที่ 4.3 รูปถ่าย SEM แสดงลักษณะของอนุภาคผงถ่านกัมมันต์



(A) ชุดความเข้มข้น CA 8 wt%

(B) ชุดความเข้มข้น CA 10 wt%

รูปที่ 4.4 ผ้าไมโทที่ขึ้นรูปจากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่ผสมถ่านกัมมันต์ 0 และ 1 wt%



(A) ชุดความเข้มข้น CA 8 wt%

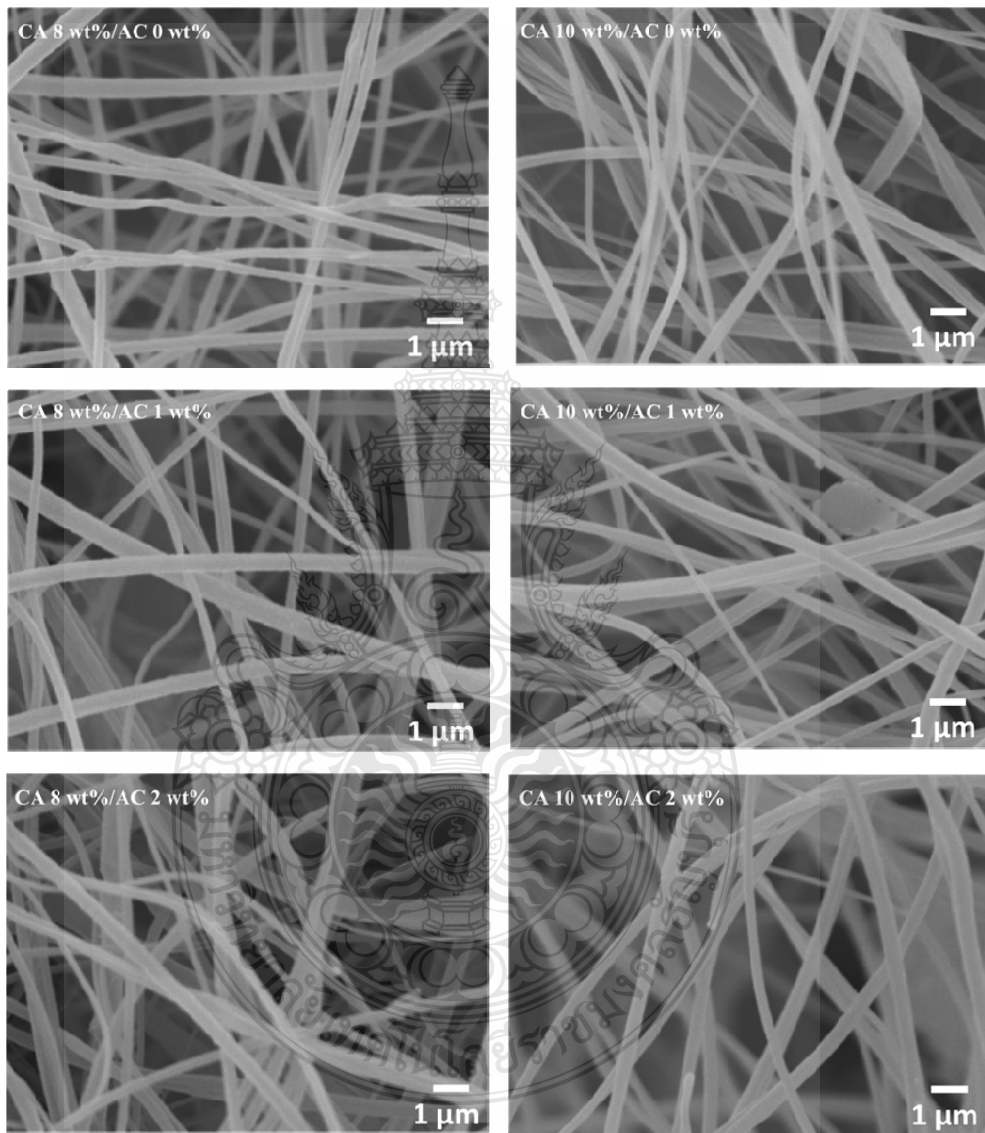
(B) ชุดความเข้มข้น CA 10 wt%

รูปที่ 4.5 ฝ่าไม่ทอที่ขึ้นรูปจากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่ผสมถ่านกัมมันต์ 2, 3 และ 5 wt%



ผ้าไม่ทอเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตดของสารละลายผสมถ่านกัมมันต์ที่ปริมาณต่างๆกัน สีของผ้าไม่ทอมีความเข้มขึ้นเมื่อปริมาณถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.4-4.5

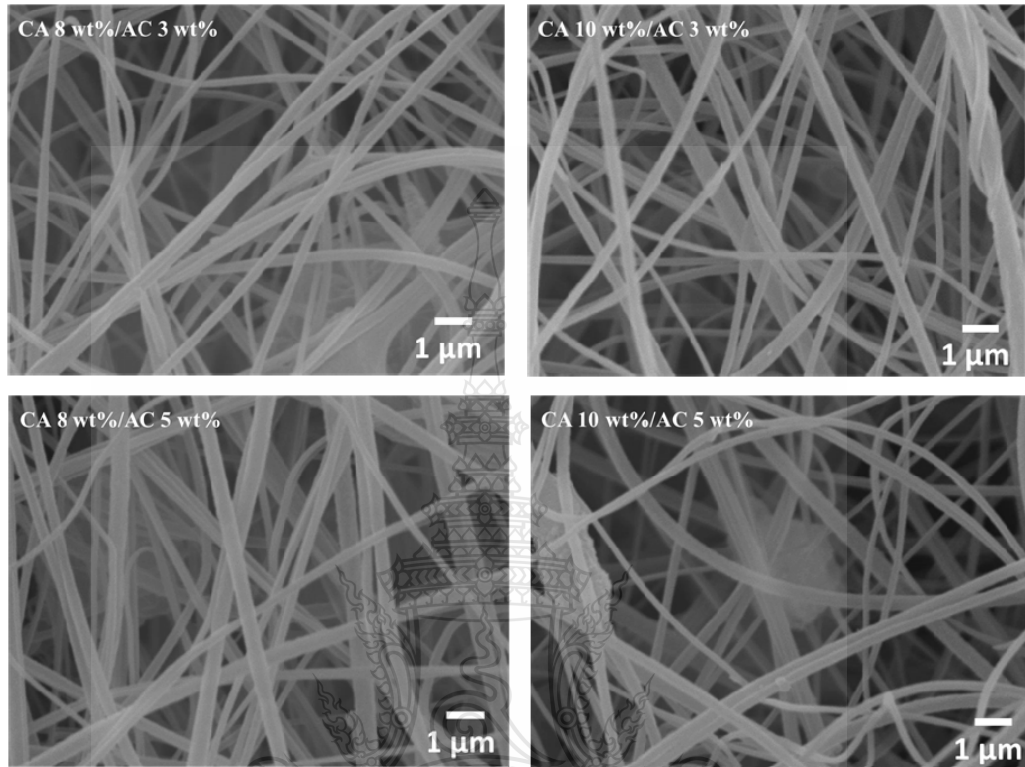
จากนั้นได้วิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อดูขนาดเส้นใยบนพื้นผ้า ดังรูปที่ 4.6-4.7



(A) ชุดความเข้มข้น CA 8 wt%

(B) ชุดความเข้มข้น CA 10 wt%

รูปที่ 4.6 รูปถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่า ของเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตดที่ผสมถ่านกัมมันต์ 0, 1 และ 2 wt%

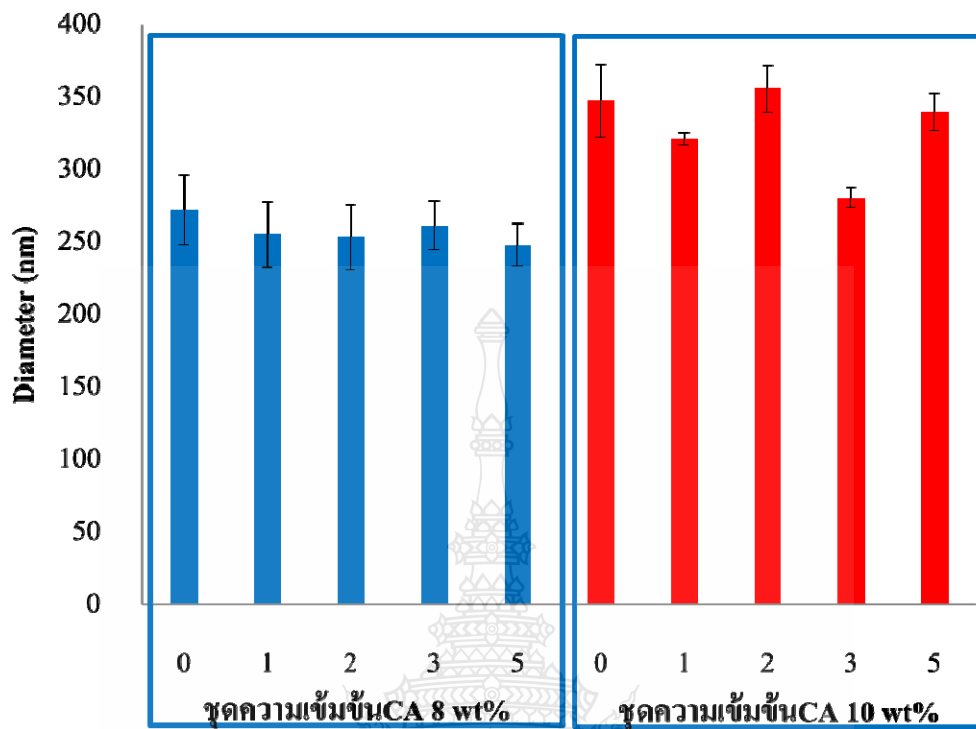


(A) ชุดความเข้มข้น CA 8 wt%

(B) ชุดความเข้มข้น CA 10 wt%

รูปที่ 4.7 รูปถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่า ของเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตดที่ผสมถ่านกัมมันต์ 3 และ 5 wt%

วัดขนาดของเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตดของตัวอย่างผืนผ้าไม่ทอผสมถ่านกัมมันต์ที่ขึ้นรูปได้จากไฟฟ้าสถิต ด้วยโปรแกรม Image J เพื่อหาขนาดของเส้นใย ดังรูปที่ 4.8

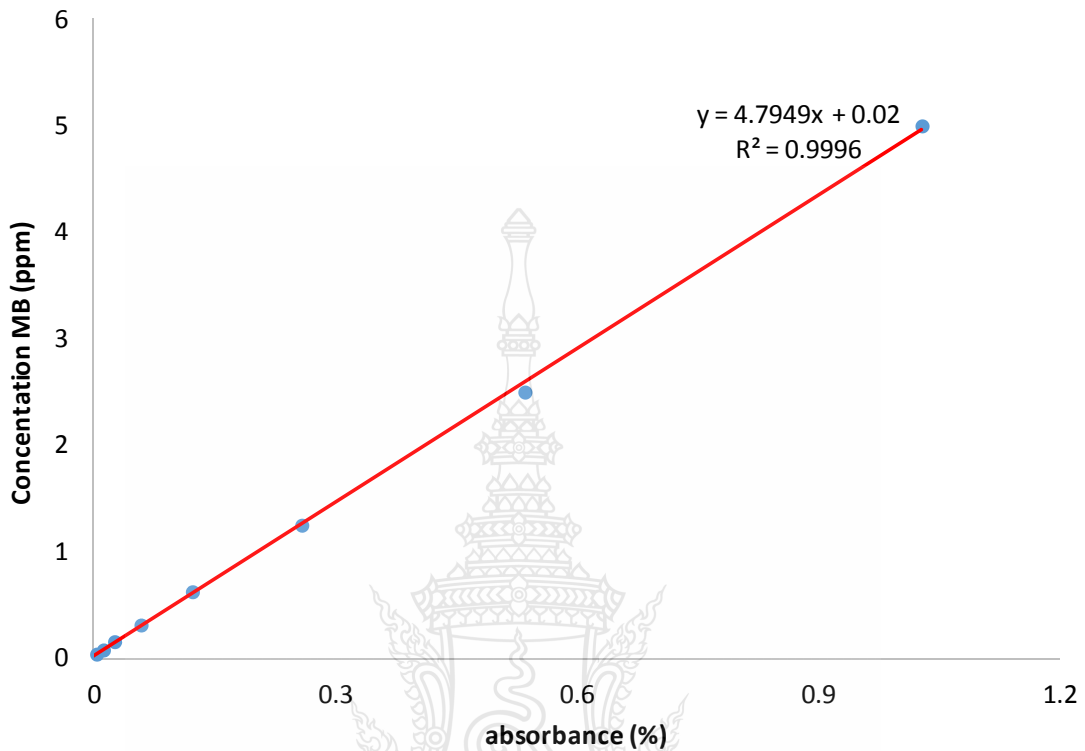


- เมื่อ 0 คือ ปริมาณถ่านกัมมันต์ 0 wt%  
 1 คือ ปริมาณถ่านกัมมันต์ 1 wt%  
 2 คือ ปริมาณถ่านกัมมันต์ 2 wt%  
 3 คือ ปริมาณถ่านกัมมันต์ 3 wt%  
 5 คือ ปริมาณถ่านกัมมันต์ 5 wt%

รูปที่ 4.8 ขนาดของเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตดของตัวอย่างผ้าไม่ทอ

ผลการวิเคราะห์ขนาดเส้นใยของผ้าไม่ทอเมื่อเปรียบเทียบที่ความเข้มข้นของสารละลาย CA 8 wt% และ CA 10 wt% พบว่าที่ชุดความเข้มข้น CA 8 wt% มีขนาดของเส้นใยอยู่ในช่วง 250-270 nm เส้นใยมีขนาดเล็กกว่าชุดความเข้มข้น CA 10 wt% ซึ่งมีขนาดของเส้นใยอยู่ในช่วง 300-350 nm ที่ปริมาณผสม AC 0, 1, 2, 3 และ 5 wt% ที่เท่ากัน อีกทั้งขนาดของเส้นใยมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน และไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับ สารละลาย CA 10 wt% ดังรูปที่ 4.8 ทั้งนี้ เนื่องจากความหนืดของสารละลายเซลลูโลสอะซิเตด 8 wt% มีความหนืดอยู่ในช่วงเหมาะสมต่อสภาวะการปั่นเส้นใยที่กำหนดขึ้น จึงส่งผลให้ได้ขนาดของเส้นใยที่เล็กกว่า [14]

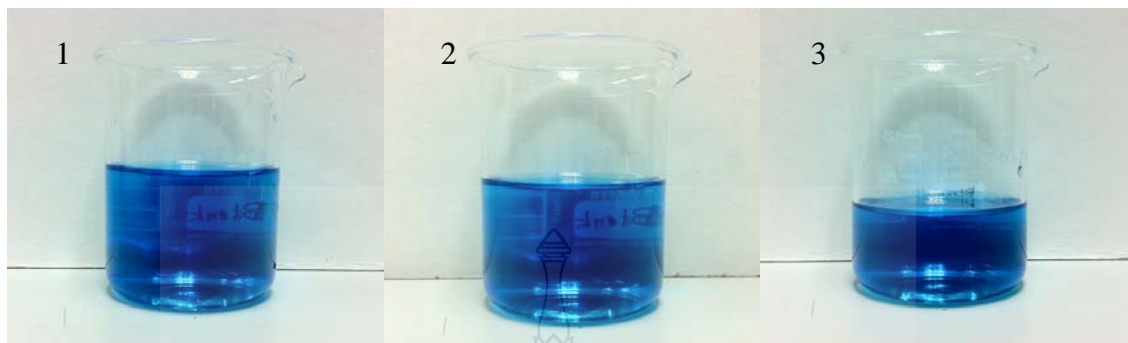
### 4.3 ผลการดูดซับสารเมทิลีนบลู



รูปที่ 4.9 กราฟสอบเทียบความเข้มข้นระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูกับเปอร์เซ็นต์การดูดซับแสงยูวี

จากผลทดสอบ ดังรูปที่ 4.9 ทำการสอบเทียบความเข้มข้นระหว่าง ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูกับเปอร์เซ็นต์การดูดซับแสงยูวี และลากเส้นสัมพันธ์ Trendline นำมาคำนวณเป็น กราฟความสัมพันธ์เส้นตรงระหว่าง ค่าความเข้มข้นแกน y และ ค่าการดูดซับแสงยูวี แกน x เพื่อใช้เป็นสมการมาตรฐานสำหรับการคำนวณความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปของสารละลายเมทิลีนบลูสำหรับงานวิจัยนี้

ผลการดูดซับสารเมทิลีนบลู ของผ้าไมโทเซลลูโลสอะซิเตต ดังนี้



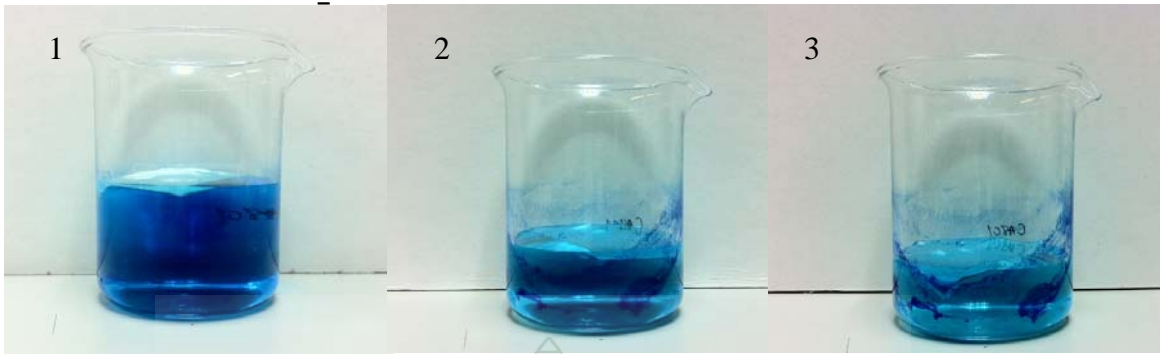
1. ความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ที่เวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง
2. ความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ที่เวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง
3. ความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ที่เวลาผ่านไป 48 ชั่วโมง

รูปที่ 4.10 น้ำสีเมทิลีนบลูที่เป็นตัวเทียบ (Blank) ที่ใช้ในการทดสอบการดูดซับของผ้าไมโทเซลลูโลสอะซิเตต



1. ความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ที่เวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง
2. ความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ที่เวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง
3. ความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ที่เวลาผ่านไป 48 ชั่วโมง

รูปที่ 4.11 น้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลือจากการดูดซับของผ้าไมโทเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตต CA 8 wt%/AC 0 wt% ที่เวลา 1, 24 และ 48 ชั่วโมง



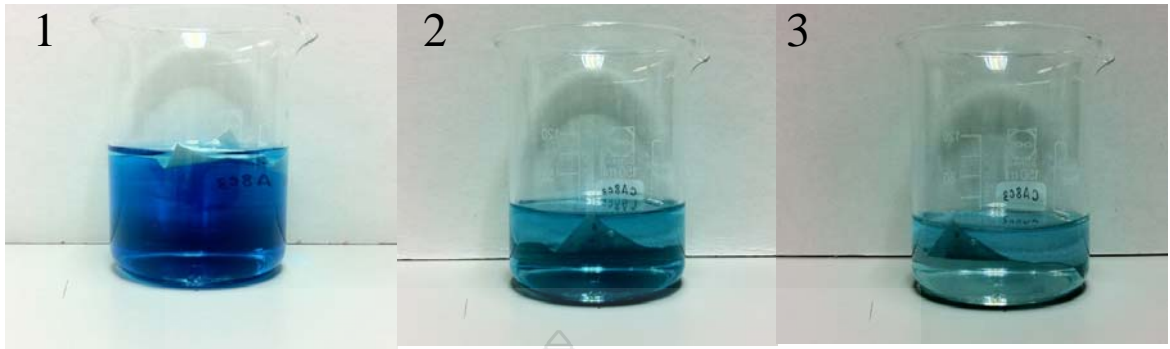
1. ความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ที่เวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง
2. ความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ที่เวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง
3. ความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ที่เวลาผ่านไป 48 ชั่วโมง

รูปที่ 4.12 น้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลือจากการดูดซับของผ้าไม่ทอเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตด  
CA 8 wt%/AC 1 wt% ที่เวลา 1, 24 และ 48 ชั่วโมง



1. ความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ที่เวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง
2. ความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ที่เวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง
3. ความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ที่เวลาผ่านไป 48 ชั่วโมง

รูปที่ 4.13 น้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลือจากการดูดซับของผ้าไม่ทอเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตด  
CA 8 wt%/AC 2 wt% ที่เวลา 1, 24 และ 48 ชั่วโมง



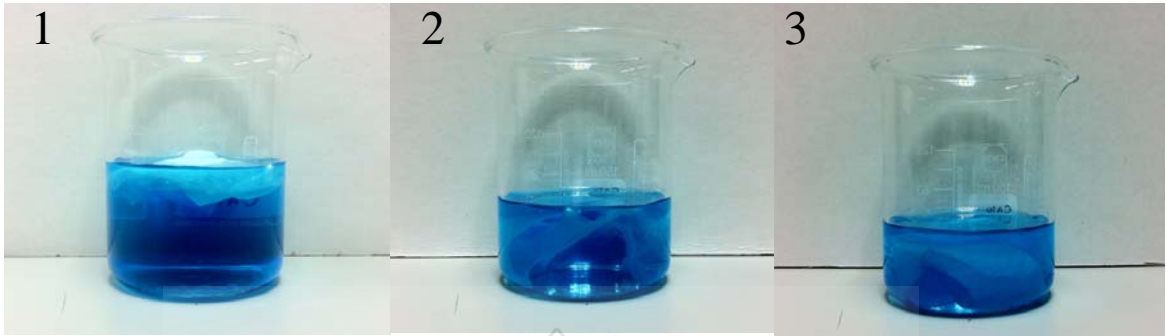
1. ความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ที่เวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง
2. ความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ที่เวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง
3. ความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ที่เวลาผ่านไป 48 ชั่วโมง

รูปที่ 4.14 น้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลือจากการดูดซับของผ้าไม่ทอเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตด  
CA 8 wt%/AC 3 wt% ที่เวลา 1, 24 และ 48 ชั่วโมง



1. ความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ที่เวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง
2. ความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ที่เวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง
3. ความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ที่เวลาผ่านไป 48 ชั่วโมง

รูปที่ 4.15 น้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลือจากการดูดซับของผ้าไม่ทอเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตด  
CA 8 wt%/AC 5 wt% ที่เวลา 1, 24 และ 48 ชั่วโมง



1. ความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ ที่เวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง
2. ความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ ที่เวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง
3. ความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ ที่เวลาผ่านไป 48 ชั่วโมง

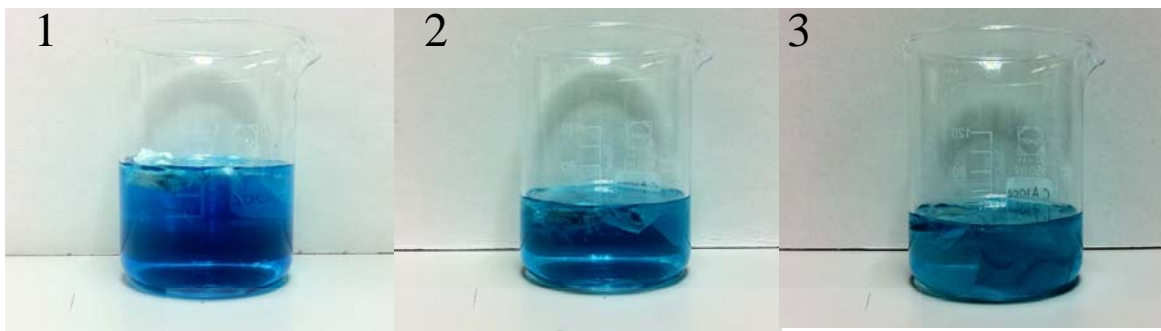
รูปที่ 4.16 น้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลือจากการดูดซับของผ้าไม่ทอเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตด CA 10 wt%/AC 0 wt% ที่เวลา 1, 24 และ 48 ชั่วโมง



1. ความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ ที่เวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง
2. ความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ ที่เวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง
3. ความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ ที่เวลาผ่านไป 48 ชั่วโมง

รูปที่ 4.17 น้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลือจากการดูดซับของผ้าไม่ทอเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตด CA 10 wt%/AC 1 wt% ที่เวลา 1, 24 และ 48 ชั่วโมง





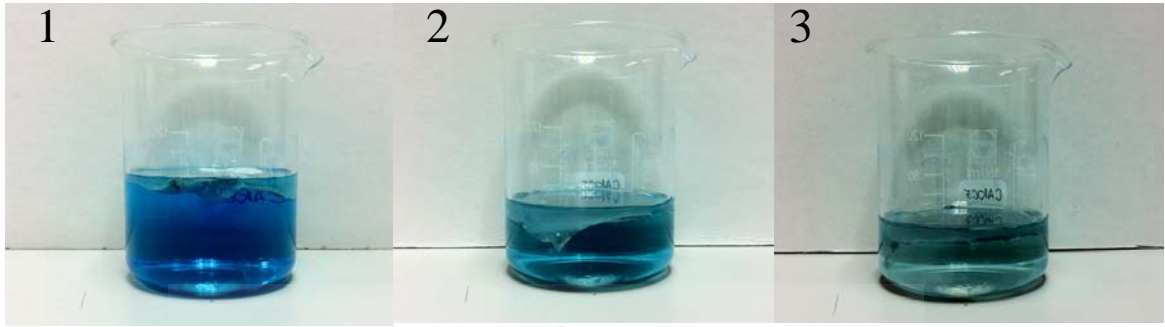
1. ความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ที่เวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง
2. ความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ที่เวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง
3. ความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ที่เวลาผ่านไป 48 ชั่วโมง

รูปที่ 4.18 น้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลือจากการดูดซับของผ้าไม่ทอเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตด CA 10 wt%/AC 2 wt% ที่เวลา 1, 24 และ 48 ชั่วโมง



1. ความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ที่เวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง
2. ความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ที่เวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง
3. ความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ที่เวลาผ่านไป 48 ชั่วโมง

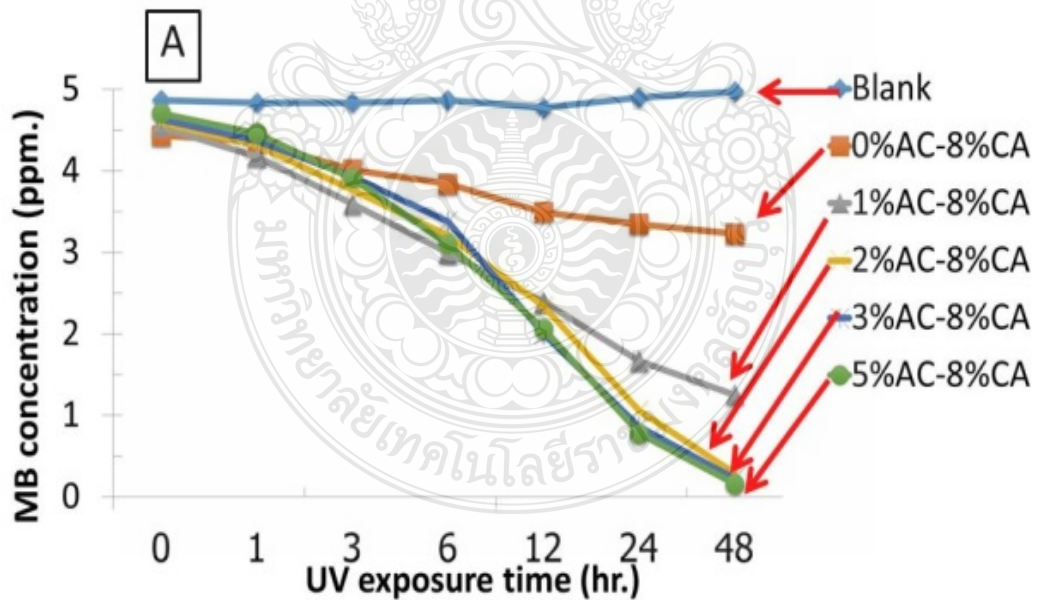
รูปที่ 4.19 น้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลือจากการดูดซับของผ้าไม่ทอเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตด CA 10 wt%/AC 3 wt% ที่เวลา 1, 24 และ 48 ชั่วโมง



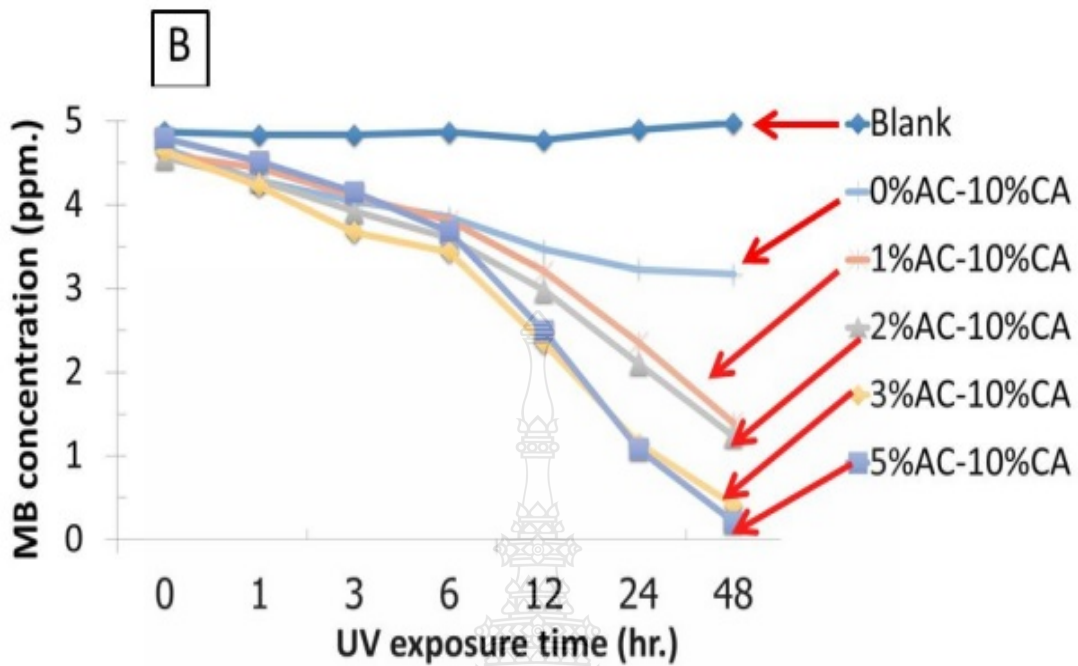
1. ความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ ที่เวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง
2. ความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ ที่เวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง
3. ความเข้มข้นของน้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ ที่เวลาผ่านไป 48 ชั่วโมง

รูปที่ 4.20 น้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลือจากการดูดซับของผ้าไมทอเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตด CA 10 wt%/AC 5 wt% ที่เวลา 1, 24 และ 48 ชั่วโมง

ได้วัดค่าน้ำสีเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ ดังรูปที่ 4.21 – 4.22



รูปที่ 4.21 ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เหลือ ณ เวลาที่ทดสอบ โดย ชุดความเข้มข้น CA 8 wt%



รูปที่ 4.22 ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เหลือ ณ เวลาที่ทดสอบ โดย ชุดความเข้มข้น CA 10 wt%

จากผลการทดลองการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 5 ppm เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ของผ้าไม่ทอเซลลูโลสอะซิเตดขนาด 5 x 5 cm น้ำหนักผ้าประมาณ 100 mg พบว่าที่ความเข้มข้น CA 8 wt% ที่ปริมาณผสม AC เพิ่มขึ้น มีแนวโน้มการดูดซับเมทิลีนบลูมากกว่าความเข้มข้น CA 10 wt% กล่าวคือความเข้มข้น CA 8 wt% ที่ปริมาณการผสม AC 5 wt% ที่เป็นปริมาณมากที่สุด ณ เวลา 48 ชั่วโมง พบว่าสีของสารละลายเมทิลีนบลูจางหายไปหมดจากสีน้ำเงิน เป็นสีใส ค่าความเข้มข้นเมทิลีนบลูมีค่าใกล้เคียง 0 ppm ในขณะที่ตัวอย่างผ้าไม่ทอเซลลูโลสอะซิเตดที่ CA 10 wt% ที่ปริมาณ AC ที่เท่ากัน มีความสามารถในการดูดซับน้ำสีได้น้อยกว่า

ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผ้าไม่ทอเซลลูโลสอะซิเตดที่ความเข้มข้น 8 wt% นั้นมีขนาดของเส้นใยที่เล็ก จึงมีพื้นที่ผิวมาก ทำให้การดูดซับโมเลกุลของสารเมทิลีนบลูได้มากกว่า ชุดความเข้มข้น CA 10 wt% ที่มีขนาดเส้นใยที่ใหญ่กว่า [15]

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

ผลการศึกษการขึ้นรูปเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตตผสมถ่านกัมมันต์โดยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตที่สภาวะแตกต่างกัน คือ ความเข้มข้นของสารละลาย อัตราส่วนผสมถ่านกัมมันต์ โดยเปรียบเทียบลักษณะสัญญาณ และการดูดซับสารเมทิลีนบลู สรุปผลดังต่อไปนี้

#### 5.1 สภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นผ้าไม่ทอด้วยเทคนิคไฟฟ้าสถิต

การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายมีแนวโน้มทำให้เส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความหนืดของสารละลายที่มากขึ้น ที่ความเข้มข้นของสารละลายเซลลูโลสอะซิเตต 8 wt% มีความเหมาะสมต่อสภาวะการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต เก็บเส้นใยได้ง่ายต่อเนื่อง และเมื่อพิจารณาผลของปริมาณ ถ่านกัมมันต์ พบว่าปริมาณถ่านกัมมันต์มากขึ้นความหนืดเพิ่มมากขึ้น สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการวิจัยคือ ชุด CA 8 wt% ผสมถ่านกัมมันต์ 0, 1, 2, 3 และ 5 wt% ซึ่งได้ความสม่ำเสมอของผ้าไม่ทอ

#### 5.2 สมบัติของการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู

จากผลการทดสอบการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู ที่ความเข้มข้น 5 ppm เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ด้วยผ้าไม่ทอเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตต พบว่าที่ความเข้มข้นเซลลูโลสอะซิเตต 8 wt% ที่ปริมาณผสม AC เพิ่มขึ้น มีแนวโน้มการดูดซับเมทิลีนบลูมากกว่า เนื่องจากสารละลายตัวอย่างนี้มีความเหมาะสมกับสภาวะการขึ้นรูปด้วยไฟฟ้าสถิต มีขนาดเส้นใยที่เล็ก จึงมีพื้นที่ในการดูดซับโมเลกุลที่มากกว่า ขนาดเส้นใยอยู่ในช่วง 250-270 นาโนเมตร ส่วนความเข้มข้นเซลลูโลสอะซิเตต 10 wt% นั้นมีความหนืดสูงกว่า มีขนาดเส้นใยที่ใหญ่กว่าอยู่ในช่วง 300-350 นาโนเมตร จึงไม่เหมาะสมต่อสภาวะการปั่นเส้นใย กล่าวคือความหนืดของสารละลายตัวอย่างที่ใช้เตรียมเป็นเส้นใยมีความสำคัญต่อการดูดซับสารเมทิลีนบลู

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

เนื่องด้วยงานวิจัยนี้มีขอบเขตจำกัด เช่น ชนิดของตัวทำละลายความเข้มข้นของสารละลาย ระยะห่างระหว่างเข็มกับวัสดุรองรับเส้นใย ความต่างศักย์ไฟฟ้า ขนาดรูเข็มฉีดยาและอัตราการป้อนสารละลาย ซึ่งจำกัดอยู่ในช่วงค่าความหนืดของสารละลายช่วงหนึ่งที่ยังขึ้นรูปได้ อย่างไรก็ตาม หากทำการปรับเปลี่ยนสถานะ อาจทำให้สามารถขึ้นรูปเส้นใยไม่ทอ ที่ใช้สารละลายที่หนืดและปริมาณต่ำกว่าที่สมรรถนะสูงสุดได้



## รายการอ้างอิง

- [1] K. Graham, M. Gogins, H. Schreuder-Gibson, *Int. Nonwovens J. Summer*, (2004) 21.
- [2] K. Yoon, K.Kim, X. Wang, D.Fang, B. S. Hsiao, B. Chu, *Polymer* 47 (2006) 2434.
- [3] Lee, K.J., Shiratori, N., Lee, G.H., Miyawaki, J., Mochida, I., Yoon, S.H., and Jang, J. 2010. Activated carbon nanofiber produced from electrospun polyacrylonitrile nanofiber as a highly efficient formaldehyde adsorbent. *CARBON* 48: 4248-4255.
- [5] Lively, R.P., Chance, R.R., Kelley, B.T., Deckman H.W., Drese, J.H., Jones, C.W., and Koros, W.J. 2009. Hollow Fiber Adsorbents for CO<sub>2</sub> Removal from Flue Gas. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 48(15): 7314-7324.
- [6] Tan, I.A.W., Ahmad, A.L., and Hameed, B.H., 2008. Adsorption of basic dye using activated carbon prepared from oil palm shell: batch and fixed bed studies. *Desalination* 225: 13-28.
- [7] Tungprapa, S., Puangparn, T., Weerasombut, M., Jangchud, I., Fakum, P., Semongkhon, S., Meechaisue, C., and Supaphol, P. 2007. Electrospun Cellulose acetate fibers: effect of solvent system on morphology and fiber diameter. *Cellulose* 14: 563-575.
- [8] Reneker, D.H., Yarin, A.L., Fong, H., and Koombhongse, S. 2000. Bending instability of electrically charged liquid jets of polymer solution in electrospinning. *Journal of Applied Physics* 87: 4531-4547
- [9] Prahsarn, C., Klinsukhon, W., and Roungpaisan, N. 2011. Electrospinning of PAN/DMF/H<sub>2</sub>O containing TiO<sub>2</sub> and photocatalytic activity of their webs. *Materials Letters* 65: 2498-2501
- [10] Reznik, S.N., Yarin, A.L., Zussman, E., and Bercovici, L. 2006. Evolution of a compound droplet attached to a core-shell nozzle under the action of a strong electric field. *PHYSICS OF FLUIDS* 18: 062101-13.
- [11] Loscertales, I.G., Barrero, A., Marquez, M., Spretz, R., Velarde-Ortiz, R., and Larsen, G. 2004. Electrically Forced Coaxial Nanojets for One-Step Hollow Nanofiber Design. *Journal of the American Chemical Society* 126: 5376-5377.
- [12] Kurban, Z., Lovell, A., Bennington, S.M., Jenkins, W.K., Ryan, K.R., Jones, M.O., Skipper,

## รายการอ้างอิง (ต่อ)

- N.T., and Daved, W.I.F. 2010. A solution Selection Model for Coaxial Electrospinning and Its Application to Nanostructured Hydrogen Storage Materials. *Journal of Physical Chemistry C* 114(49): 21201-21213
- [13] Zhao, Y., Cao, X., and Jiang, L. 2007. Bio-mimic Multichannel Microtubes by a Facile Method. *Journal of American Chemical Society* 129(4): 764-765
- [14] Chen, H., Wang, N., Di, J., Zhao, Y., Song, Y., and Jiang, L. 2010. Nanowire-in-Microtube Structured Core/Shell Fibers via Multifluidic Coaxial Electrospinning. *Langmuir* 26(13): 11291-11296
- [15] Misra, M., Seydibeyoglu, O., Ray, D., Das, K. and Mohanty, AK. 2011. Biodegradable Nanocomposites from Cellulosic Plastics and Cellulosic Fiber. In: Mittal Vikas, editor. *Nanocomposites with Biodegradable Polymers: Synthesis, Properties, and Future Perspectives*. New York, Oxford University Press Inc. [Chapter 6].
- [16] Pham, QP., Sharma, U. and Mikos, AG. 2006. Electrospinning of Polymeric Nanofibers for Tissue Engineering Applications: a review. *Tissue Engineering*, 12(5):1197-211.
- [17] Yu, L., Shige, W., Wingwu, S., Ruiling, Q., Yi, F., Rui, G., Hongdong, C. and Xueyan, C. 2013. Carbon Nanotube-Incorporated Multilayered Cellulose Acetate Nanofibers for Tissue Engineering Applications. *Carbohydrate Polymers*, 91:419-427.
- [18] Zuwei, Ma., Kotaki, M. and Ramakrishna, S. Surface Modified Nonwoven Polysulphone (PSU) Fiber Mesh by Electrospinning: a Novel Affinity Membrane. *Journal Membrane Science*, Submitted for Publication.
- [19] Ye, T., Min, W., Ruigang, L., Yanxiang, L., Deqian, W., Junjun, T., Rongcheng, W. and Yong, H. 2011. Electrospun Membrane of Cellulose Acetate for Heavy Metal Ion Adsorption in Water Treatment. *Carbohydrate Polymers*, 83 : 743-748.
- [20] Klein, E. 2000. Affinity Membranes: a 10-year Review. *Journal Membrane Science*, 179:1-27.

## รายการอ้างอิง (ต่อ)

- [21] Liu, H. and Hsieh, Y. 2002. Ultrafine Fibrous Cellulose Membranes from Electrospinning of Cellulose Acetate, Inc. Journal Polymer Science, Part B, Polymer Physics, 40: 2119 -2129.
- [22] Liu, H. and Hsieh, Y. 2003. Surface Methacrylation and Graft Copolymerization of Ultrafine Cellulose Fibers. Journal Polymer Science, Part B: Polymer Physics, 41: 953–964.
- [23] Son, W.K., Youk, J.H., Lee, T.S. and Park, W.H. 2004. Electrospinning of Ultrafine Cellulose Acetate Fibers: Studies of a New Solvent System and Deacetylation of Ultrafine Cellulose Acetate Fibers. Journal Polymer Science, Part B: Polymer Physics, 42: 5–11.
- [24] Lifeng, Z., Todd, J. M. and Hao, F. 2008. Fabrication and Bioseparation Studies of Adsorptive Membranes/felts Made from Electrospun Cellulose Acetate Nanofibers Journal Membrane Science, 319: 176–184.
- [25] Zuwei, M., Kotaki, M. and Ramakrishna, S. 2005. Electrospun Cellulose Nanofiber as Affinity Membrane. Journal Membrane Science, 265:115-123.
- [26] Zhang, L. and Hsieh, Y-L. 2008. Ultrafine Cellulose Acetate Fibers with Nanoscale Structural Features. Journal Nanoscience Nanotechnology, 8(9):4461–9.
- [27] Chureerat, P., Wattana, K. and Nanjaporn, R. 2011. Electrospinning of PAN/DMF/H<sub>2</sub>O Containing TiO<sub>2</sub> and Photocatalytic Activity of their Webs. Materials Letters, 65:2498-2501
- [28] Santi, T., Tanarithorn, P., Monchawan, W., Ittipol, J., Porntiva, F., Somsak, S., Chidchanok, M. and Pitt, S. 2007. Electrospun Cellulose Acetate Fibers: Effect of Solvent System on Morphology and Fiber Diameter. Cellulose, 14:563-575.
- [29] Gurdev, S., Dipak, R., Takeshi, M., Seeran, R., Roberto, M.N. and Shahram, T. 2010. Removal of Disinfection Byproducts from Water by Carbonized Electrospun Nanofibrous Membranes. Separation and Purification Technology, 74: 202-212.



ภาคผนวก

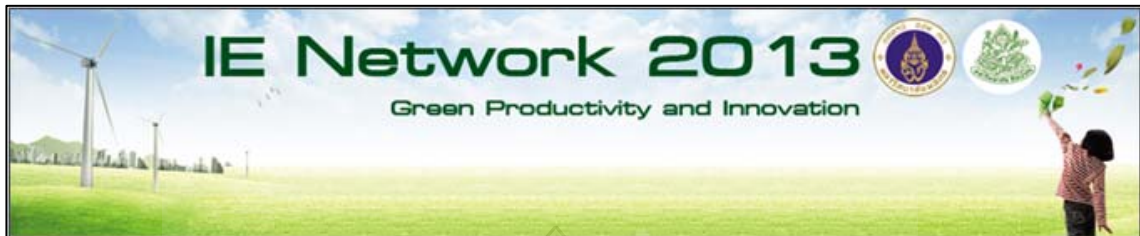




ภาคผนวก

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

**W. Klinsukhon**, N. Srisawat, C. Prahsarn, and S. Pavasupree, “Effect of Electrospinning Processing Parameter on Morphology of Activated Carbon Cellulose Acetate Micro Fiber for Organic Compound Adsorption,” Proceeding, Industrial Engineering Network Conference 2013 (IE NETWORK 2013), The Royal Cruise Hotel, Chonburi, Thailand, October 16-18, 2013, accepted.



**Login**

Username

Password

- MAIN MENU**
- [หน้าหลัก](#)
  - [หลักการและเหตุผล](#)
  - [คณะกรรมการ](#)
  - [คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ](#)
  - [พิจารณาบทความ](#)
  - [ข่าวประชาสัมพันธ์](#)
  - [ติดต่อเรา](#)
- Paper Submission**
- [ระบบลงทะเบียนออนไลน์](#)
  - [ศาลงทะเบียน](#)
- Destination Guides**
- [สาขาวิชาในการประชุม](#)
  - [กำหนดการสำคัญ](#)
  - [แนวทางการส่งบทความ](#)
  - [สถานที่จัดการประชุม](#)
- Link**
- [Session Welding](#)
- Past Conference**
- [IE Network 2013](#)
  - [Past IE Network](#)

ShinyStat™  
Today visits 90  
Tot. visits 13091

### Green Productivity and Innovation

SHARE

สารจากประธานจัดงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2556

ภาคีวิชาชีพวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล มีความยินดีเป็นอย่างยิ่งที่ได้รับเกียรติเป็นเจ้าภาพจัดการประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมประจำปี 2556 (IE Network Conference 2013; IENET 2013) ร่วมกับมหาวิทยาลัยศิลปากร และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ภาคีวิชาชีพวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ขอเชิญชวนนักวิชาการ นักวิจัย อาจารย์ นักศึกษา และผู้ที่สนใจ เข้าร่วมประชุม เพื่อแลกเปลี่ยนความรู้ ประสบการณ์ ในการทำวิจัย อันจะก่อให้เกิดการพัฒนาวิจัยอย่างต่อเนื่อง ที่เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมของประเทศ เพื่อเพิ่มขีดความสามารถทางการแข่งขันอย่างยั่งยืน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กนกวรรณ กิ่งผดุง  
หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล




IE Network 2013

**ประกาศเลื่อนวันประกาศผลรางวัลพิจารณาบทความฉบับสมบูรณ์**

**เป็นวันที่ 23 สิงหาคม 2556**

egienet2013@mahidol.ac.th



 Login

---

บรรจุพร เรื่องไพศาล  
[User]

**USER MENU**

- [ส่งไฟล์บันทึกย่อ](#)
- [การจัดการ บทคัดย่อ](#)
- [การจัดการ บทความ](#)
- [บทความฉบับตีพิมพ์](#)
- [แก้ไขข้อมูลส่วนตัว](#)

**MAIN MENU**

- [หน้าหลัก](#)
- [หลักการและเหตุผล](#)
- [คณะกรรมการ](#)
- [คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ](#)
- [พิจารณาบทความ](#)
- [ข่าวประชาสัมพันธ์](#)
- [ติดต่อเรา](#)

**Paper Submission**

- [ระบบลงทะเบียนออนไลน์](#)
- [ค่าลงทะเบียน](#)

**Destination Guides**

- [สาขาวิชาในการประชุม](#)
- [กำหนดการสำคัญ](#)
- [แนวทางการส่งบทความ](#)
- [สถานที่จัดการประชุม](#)

**Link**

- [Session Welding](#)

**Past Conference**

- [IE Network 2013](#)
- [Past IE Network](#)
- [Session Welding](#)
- [Download](#)

## ผู้ทรงคุณวุฒิทางวิศวกรรมอุตสาหการจากมหาวิทยาลัยต่างๆ

### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. รศ.ดร.จิตรา รุจิกการพานิช
2. ผศ.ดร.มานพ เรียวเดชะ
3. ผศ.ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร

### มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1. ผศ. ดร.กรทิพย์ วัชรปัญญาวงศ์ เดชะเมธีกุล

### มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

1. ผศ.ดร.สิริรงค์ กลั่นคำสอน
2. ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง
3. ดร.นฤวิภา จันทรศรี
4. ดร.เพ็ญสุดา พันธุธาคำ
5. ดร.รัฐดิกร พัฒนพิบูล
6. อ.จักรินทร์ กลั่นเงิน

### มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

1. รศ.ดร.คมกฤต เล็กสกุล
2. รศ.ดร.ชนนาก กฤตวรากาญจน์
3. รศ.ดร.นิเวศ เจริญใจ
4. รศ.ดร.วิมลีน เหล่าศิริถาวร
5. รศ.ดร.อภิชาติ โสภางค์
6. ผศ.ดร.ศกดิ์เกษม ระมิงค์วงศ์
7. ผศ.ดร.กรกฎ ไยบัวเทศ ทัพยาวงศ์
8. ผศ.ดร.ชมพูนุท เกษมเศรษฐ์
9. ผศ.ดร.รุ่งฉัตร ชมภูอินใจ
10. ผศ.ดร.วิสาขย์ วรธนัจฉริยา
11. ผศ.ดร.อรุณพล สมทศุบัติ
12. ดร.วชิระ นาดเขียว
13. ดร.วริษา วิสิทธิ์พานิช
14. ดร.อนันต์ ไชยจางกูรนิช

### มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

1. รศ.ดร.จิรัชย์ พุทธกุลสมศิริ

### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

1. รศ.ดร.เด็อนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์
2. รศ.ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์
3. รศ.วชิระ มีทอง
4. ผศ.ดร.สุขสันต์ พรหมบุญพงศ์
5. ผศ.ดร.อภิรักษ์นา อุดมศักดิ์กุล
6. ผศ.ดร.เจริญชัย โขมพัตราภรณ์
7. ผศ.ดร.ธนัญญา วสุศรี
8. ผศ.ดร.อิสราต์ พึ่งอัน
9. ผศ.เฉลิมเกียรติ จิระรุ่งเสถียร



### สปอนเซอร์



10. ผศ.เชิดพงษ์ จอมเดช
11. ผศ.เจริญ สุนทรวาณิชย์
12. ดร.ปภัศร ชัยวัฒน์
13. ดร.ช่อแก้ว จตุรานนท์
14. อ.แบงค์ งามอรุณโชติ
15. อ.อาวุธ สนใจยุทธ
16. อ.มงคล สีนะวัฒน์
17. อ.ภัทธีรา ม้วนจัน

### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1. ผศ.ดร.วิชัย ดุงเรืองอนันต์
2. ผศ.ดร.กฤต พิมาพันธ์ศรี
3. ผศ.ดร.ธีรเดช ภูมิพรพันธ์
4. ผศ.ดร.นันทกฤษณ์ ยอดพิจิตร
5. ดร.ธนสาร อินทรกำธรชัย
6. ดร.วราภรณ์ มีกรม

### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1. รศ.ดร.วัลย์ลักษณ์ อัศวธีรวงศ์
2. รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ
3. รศ.ดร.ฤดี มาสุจินทร์
4. รศ.ดร.สกนธ์ คล่องบุญจิต
5. ผศ.ดร.ชุมพล ยวงโย
6. ผศ.ดร.สิทธิพร พิมพ์สกุล
7. ดร.พลชัย โชติปราชญ์กุล
8. ดร.พิชญ์วดี กิตติปัญญางาม
9. ดร.วิภู ศรีสืบสาย
10. ดร.อุดม จันทร์จรุสสุข

### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

1. ผศ.ดร.เนนโชติ อุดมศรี
2. ผศ.จักรินทร์ น่วมทิม
3. ผศ.ราฟิง เจริญยศ
4. ดร.สมพงษ์ พริยายนต์

### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุโขทัยธรรมราช

1. รศ.หม่อมราชวงศ์ ผจญแก้ว
2. รศ.สุภาวดี ธีรธรรมากร
3. รศ.สุณี ภูสีม่วง
4. รศ.ศุภณี เรียบเลิศศิริ
5. ดร.แววบุญ แยมแสงสิงขร
6. อ.กรรณิการ์ ยี่มขนาด
7. อ.จิราบุษ บุคดีจีน
8. อ.บุญชัย วลีระชัยสวัสดิ์
9. อ.ภูมิ เจือศิริภักดี
10. อ.อิทธิเดช มุลมิ่งมี

### มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

1. ผศ.ดร.ปัญญา พิทักษ์กุล
2. ดร.ณัฐพัชร์ อารีรัชกุลกานต์
3. ดร.สมหญิง งามพรประเสริฐ
4. ดร.สัทนะ รัฐวิบูลย์
5. อ.วณิชกรณ์ จรรย์ต้นดีเวทย์

เครื่องเชื่อมไฟฟ้า สองเวลา



คุณภาพทนทาน บริการสุดยอดเยี่ยม



6. อ.อรดี พฤตศรีณนันท
7. ผศ.ดร.ศุภรัชชัย วรรัตน์

มหาวิทยาลัยนครพนม

1. ดร.มิ่งเท็ด บุญขาว
2. ดร.วิชัย พัฒนพล
3. อ.จุฑาภา นันทโพธิ์เดช

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

1. ดร.วีระยุทธ สดสมบุรณ์

มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

1. ดร.จิรวัดน์ วิมุตตสุขวิริยา

มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

1. รศ.ดร.วิชัย แหวนเพชร
2. ผศ.ดร.ประเดต บุญไชยอภิสิทธิ์
3. ผศ.อวยชัย วงศ์รัตน์
4. ดร.อนันตกุล อินทรผดุง
5. อ.ชาญชัย วิลลิสต์
6. อ.พีเชษฐ รัตนบุญทวี
7. อ.ภาสุระ อังกุลานนท์
8. อ.ลักขณา ฤกษ์เกษม
9. อ.อรมน บันทอง

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

1. อ.ธณิดา โชนงบุษ
2. อ.อลงกรณ์ เมืองไหว

มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย

1. อ.เปรมชัย มูลหล้า

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์

1. ผศ.ดร.ชูชาติ พยอม
2. ผศ.ดร.ณัฐกานต์ พวงไพบุลย์
3. ผศ.ดร.นิคม ลนขุนทด

มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

1. อ.ท้าวรัตน์ ศรีราตรี
2. อ.วสันต์ พลัวพันธ์

มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์

1. ดร.กันต์ อินทุวงศ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1. ดร.จกกล ศรีธรร

**มหาวิทยาลัยรามคำแหง**

1. ผศ.ดร.กฤษดา ทิศลยุปตร
2. ผศ.นุกูล อุบลบาน
3. ดร.เลิศเลขา ธนะชัยพันธ์

**มหาวิทยาลัยมหิดล**

1. รศ.ดร.ดวงพรรณ กริชชาญชัย
2. รศ.ศุภชัย นาทะพันธ์
3. ผศ.ดร.กนกวรรณ กิ่งผดุง
4. ผศ.ดร. ดร.ธนกรณ์ แน่นหนา
5. ผศ.ดร.วเรศรา วีระวัฒน์
6. ผศ.ดร.สรนาถ ไธฏ
7. ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีตระกูลชัย
8. ดร.จิรพรรณ เลียงโรคาพาธ
9. ดร.มงคล เทียนวิบูลย์
10. ดร.รณชัย ศิโรเวธกุล
11. ดร.ศุภชัย ราชภูริศิริ
12. อ.กัญจน์ คณะธารทิพย์
13. อ.ดวงยศ สุภักดิ์
14. อ.ธนา สาตรา
15. อ.นพกร ภูระยา
16. อ.พิมพ์วิมลย์ สุดะโคตร
17. อ.สิทธิพันธุ์ ดัฒเพ็ญพันธ์

**มหาวิทยาลัยแม่โจ้**

1. ผศ.เสริมสุข บัวเจริญ

**มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ**

1. รศ.ธนรัตน์ แต้วัฒนา
2. ผศ.ดร.นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์
3. ผศ.ดร.พิลดา หวังพานิช
4. ผศ.รติรัตน์ กิตติปัญญาพัฒน์
5. ดร.ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ
6. ดร.พงษ์เทัญ จันทนะ
7. ดร.วราธร ปัญญางาม
8. ดร.สิริเดช ชาตินิยม

**มหาวิทยาลัยศิลปากร**

1. ผศ.ดร.ประจวบ กล่อมจิตร
2. ผศ. จันทร์เทัญ อุนรัตนานนท์
3. ผศ. วันชัย ลีลากรวิวงศ์
4. ดร.กัญญา ทองสนธิ
5. ดร.คณเฑศ พลอยดน้อย
6. ดร.สิทธิชัย แซ่เหล่ม
7. ดร.สุจินต์ วุฒิชัยวัฒน์
8. อ.กวิธธ สัยเจริญ

**มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์**

1. รศ.ดร.นิกร ศิริวงศ์ไพศาล
2. รศ.สมชาย ชูโงม
3. รศ.วนิดา รัตน์มณี
4. ผศ.ดร.กลางเดือน โปชนา

- 
5. ผศ.ดร.ธเนศ รัตนวิไล
  6. ผศ.ดร.นภิสพร มิ่งมงคล
  7. ผศ.ดร.รัญชมา สีนธวาลัย
  8. ผศ.ดร.สุภาพรพรณ ไชยประพัทธ์
  9. ผศ.ดร.เสกสรรค์ สุธรรมานนท์
  10. ผศ.ดร.อุจน์ สังขพงศ์
  11. ผศ.เจริญ เจตวิจิตร
  12. ผศ.พิเชษฐ ตระการชัยศิริ
  13. ผศ.สงวน ตั้งโพธิ์ธรรม
  14. ผศ.ดร.ประกาศ เมื่องจันทร์บุรี

#### มหาวิทยาลัยสยาม

1. รศ.ดร.วันชัย ธิจิราณีช
2. รศ.ศันสนีย์ สุภาภา
3. ผศ.ดร.เฉลิมเกียรติ วงศ์วนิธวี
4. ผศ.ดร.รัฐภูมิ รุ่งแทนคุณ
5. ผศ.ดร.อาทิตย์ โสตรโยม
6. อ.ณัฐพล พุฒยงกุล
7. อ.รัชณนท์ แดนเขต
8. อ.ปยุตศา คินดี
9. อ.พงศ์พัฒน์ เพชรรุ่งเรือง
10. อ.วิมลพรรณ คงสมบูรณ์

#### มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

1. รศ.ดร.สถาพร อมรสวัสดิ์วัฒนา
2. ผศ.ดร.กาญจนา กาญจนสุนทร
3. ผศ.ดร.ชมะ เยี่ยงกมลสิงห์
4. ดร.วิวัฒน์ชัย พุกกะกานนท์

#### มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

1. ดร.นิศากร สมสุข
2. อ.จิตลดา หมายมัน
3. อ.วรลักษณ์ เสถียรรังสฤษฏ์
4. อ.อรอุมา กอสนาน

#### มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

1. รศ.ดร.ระพีพันธ์ ปิศาคะโส
2. ผศ.ดร.คณิตร์ ภูนิคม
3. ผศ.ดร.นลิน เพียรทอง
4. ผศ.ดร.บุษสรา เกรียงกรกฎ
5. ผศ.ดร.ปรีชา เกรียงกรกฎ
6. ผศ.ดร.สมบัติ สินธุเชาวน์
7. ดร.จรวายพร แสนทวีสุข
8. ดร.ธารชุตดา พันธนิกุล
9. ดร.สัทธ์ โอฟ้าพิริยกุล

#### โรงเรียนนายเรืออากาศ

1. น.อ.สุทธิ ศรีบูรพา
2. น.ท.ปัญญาธิกรักษ์ โกศลวัฒน์



**สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น**

1. ผศ.ดร.ณัฐพล ลิม้จีระจรัส
2. ผศ.ดร.พิศุทธิ์ พงศ์ชัยฤกษ์
3. ผศ.ดร.วราคม เน็ดน้อย
4. ผศ.ดร.วิภาวดี วงษ์สุวรรณ
5. ดร.กรกฎ เหมสถาปิตย์
6. ดร.จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์
7. ดร.ดำรงเกียรติ รัตนอมรพิน

**มหาวิทยาลัยศรีปทุม**

1. ผศ.ดร.สุพัฒตรา เกษราพงศ์
2. ผศ.ชาลิต มณีศรี
3. ดร.อัศวิน วงศ์วิวัฒน์
4. อ.จักรพันธ์ กัณหา
5. อ.ธนิน ศรีวระมย์

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร**

1. ดร.วิจิตรสวัสดิ์ สุขสวัสดิ์ ณ อยุธยา
2. อ.ธนภฤต โชติภาววิศ
3. อ.ธนิดา สุนารักษ์
4. อ.พัฒน์พงษ์ แสงหัดถวัฒนา
5. อ.พรเทพ แก้วเชื้อ
6. อ.วรินทร์ เกียรติบุญกุล
7. อ.อรณิชา อนุชิตชาญชัย

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี**

1. รศ.ดร.ณฐา ศปตันเรียม
2. ผศ.ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงษ์
3. ผศ.ดร.ศิริชัย ต่อสกุล
4. ผศ.ดร.ศิวกร อ่างทอง
5. ผศ.นฤฤทธิ์ คชฤทธิ์
6. ผศ.ไพฑูรย์ พูลสุขโช
7. ผศ.ไพฑูรย์ แย้มเค็อน
8. ผศ.ศุภเอก ประมูลมาก
9. ผศ.ศรีโร จารุกัญญา
10. ผศ.สมศักดิ์ แก่นทอง
11. ผศ.สุรัตน์ ตรีวัฒนพงศ์
12. ดร.กุลชาติ จุลเพ็ญ
13. ดร.ชัยยะ ปราณีโตพลกรัง
14. ดร.ระพี กาญจนะ
15. อ.วรญา วัฒนจิตศิริ

**มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร**

1. รศ.ดร.ไพโรจน์ เนียมนาค
2. ผศ.วิษณุ บัวเทศ

**มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต**

1. รศ.นิตดา สวัสดิ์พงษ์
2. ผศ.สุทัศน์ จันบัวลา
3. ดร.ชาติ พิษะ
4. ดร.ชรินทร์ กุลเศรษฐ์ญชลี
5. ดร.สิรวลภ เรืองช่วย คู่ประกาย

- MAT013 การเตรียมวัสดุแผ่นวัสดุผสมที่เตรียมจากต้นรูปถ่ายและพอลิแลคติกแอซิด  
เกียรติชัย อ่ำคลองธรรม และ สุเนตร มุลทา
- MAT014 การสร้างตู้เย็นอนุรักษ์พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์และแผ่นทำความเย็น  
พิทักษ์ พนาวัน, ประยูร สุรินทร์ และ เจษฎา วงษ์อ่อน
- MAT015 อิทธิพลของกระบวนการผลิตที่มีผลต่อสมบัติของเส้นใยพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดและ  
พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต  
ลลิตา จอมแปง, ณรงค์ชัย โอเจริญ, นที ศรีสวัสดิ์ และ สุภาภรณ์ ทุมสอน
- MAT016 การพัฒนาสมบัติของเส้นใยพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไตรเมทิลีนเทเรฟทาเลทและ  
พอลิแลคติกแอซิด  
ศิรดา ภาตี, ณรงค์ชัย โอเจริญ, นที ศรีสวัสดิ์ และสุภาภรณ์ ทุมสอน
- MAT017 เส้นใยสององค์ประกอบระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต  
เอกทินัย จันทร์ศรี, ณรงค์ชัย โอเจริญ และ นที ศรีสวัสดิ์
- MAT018 การเพิ่มผลผลิตและประสิทธิภาพสายการผลิตของการประกอบรถยนต์โดยใช้ระบบการผลิต  
แบบเพิ่มมูลค่า กรณีศึกษา : โรงงานผลิตรถอุตสาหกรรมการประกอบรถยนต์แห่งหนึ่ง  
ชัยพฤกษ์ อาภาเวท และ ประยูร สุรินทร์
- MAT019 การใช้รีไซเคิลเพทเป็นสารเพิ่มเนื้อในการขึ้นรูปแบบหมุน  
ปริญญา แกมนิล และ ณรงค์ชัย โอเจริญ
- MAT020 ผลกระทบของกระบวนการขึ้นรูปเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตตผสมถ่านกัมมันต์โดยการปั่นเส้นใยด้วย  
ไฟฟ้าสถิต สำหรับการดูดซับสารอินทรีย์  
วัฒนา กลิ่นสุคนธ์, นที ศรีสวัสดิ์, จุริรัตน์ ประสาร และ สรพงษ์ ภาสุปรีย์
- MAT021 ผลกระทบของการเติมพอดเดอวี สโตนในพอลิโพรพิลีนต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการลามไฟ  
วัชรวิ จันฎ, อำนวย ลากเกษมสุข และ สรพงษ์ ภาสุปรีย์
- MAT022 การหาวัสดุทำเฟืองที่ผ่านกระบวนการชุบผิวแข็งที่มีขีดจำกัดความล้าสูงสุด  
ณรงค์เดช พัฒนไพบูลย์ และ กิตติภฎ รัตนจันทร์
- MAT023 การศึกษาผลกระทบของเครื่องมือขึ้นรูปต่อความหยาบผิวของแผ่นสแตนเลส SUS 304 ด้วยวิธีขึ้น  
รูปแบบลูกโซ่  
สุนทร สิทธิสกุลเจริญ, พัตรีพมิล สุวรรณกาญจน์ และ ชลธิชา นุชพงษ์
- MAT024 การเตรียมแผ่นบางขนาดนาโนด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลและผลกระทบของการเติมแผ่นบาง  
ขนาดนาโนในพอลิแลคติกแอซิดต่อสมบัติเชิงกลและการดูดกลืนแสง  
ธงไชย สมานทอง, พงศธร เอี่ยมสะอาด, ปัฐพงษ์ มุขจัน, วิษณุ เจริญถนอม, ธนกร วิรุฬห์มงคล,  
ณรงค์ชัย โอเจริญ และ สรพงษ์ ภาสุปรีย์
- MAT025 ผลกระทบของสารเจือเงินอนุภาคนาโนที่มีต่อขนาดอนุภาคของเส้นใยนาโนทั้งสแตนออกไซด์  
ที่ผลิตด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง  
ณัฐธา ศักดิ์ศิลาพร และ ปาพจน์ เจริญอภิบาล

## ผลกระทบของกระบวนการขึ้นรูปเส้นใยเซลลูโลสอะซีเตทผสมถ่านกัมมันต์โดย การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต สำหรับการดูดซับสารอินทรีย์

### Effect of Electrospinning Processing Parameter on Morphology of Activated Carbon Cellulose Acetate Micro Fiber for Organic Compound Adsorption

วัฒนา กลิ่นสุคนธ์<sup>1</sup> นที ศรีสวัสดิ์<sup>1</sup> จุรีรัตน์ ประสาร<sup>2</sup> สรพงษ์ ภาวสุปรีย์<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหะการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ต.คลองหก อ. ธัญบุรี จ. ปทุมธานี 12110

<sup>2</sup>ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ อ.พหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

Wattana Klinsukhon<sup>1</sup> Natee Srisawat<sup>1</sup> Chureerat Prahsam<sup>2</sup> Sorapong Pavasupree<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Klong 6, Thanyaburi, Pathumthani 12110, Thailand

<sup>2</sup>National Metal and Materials Technology Center, Klong 1, Klong Luang, Pathumthani 12120, Thailand

Tel.: 0 2549 3480, fax: 0 2549 3483, E-mail: sorapongp@yahoo.com

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา ผลกระทบของกระบวนการขึ้นรูปเส้นใยเซลลูโลสอะซีเตท (CA) ผสมถ่านกัมมันต์(AC) โดยการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต สำหรับการดูดซับสารอินทรีย์ โดยวิธีปรับเปลี่ยนความเข้มข้น CA 8 และ 10% โดยน้ำหนัก ละลายในตัวทำละลาย ไดคลอโรมีเทน (DCM) และไดเมทิลฟอร์มามิเด (DMF) ผสม 2 ต่อ 1 ส่วนโดยน้ำหนัก จากนั้นเติมถ่านกัมมันต์ (AC) 0.1,2,3,5% โดยน้ำหนัก แล้วขึ้นรูปในอัตราการป้อนคงที่ที่ 0.1 มล./นาที ขนาดรูเข็ม 0.6 มม. ศักย์ไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์ ระยะจากเข็มถึงแผ่นรองรับ 15 ซม. เมื่อนำสารละลายไปทดสอบค่าความหนืดพบว่า สัดส่วน AC เพิ่มขึ้นทำให้ความหนืดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ 5%AC-10%CA มีความหนืดสูงสุด ซึ่งส่งผลทำให้การปั่นเส้นใยไม่ต่อเนื่อง เมื่อนำผืนผ้าไม่ทอที่ขึ้นรูปได้ไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์(SEM) พบว่า เส้นใยมีขนาดและลักษณะสม่ำเสมอ ผลการดูดซับสารเมทิลีนบลู เข้มข้น 5 ppm เป็นเวลา 48 ชม. ด้วยผ้าไม่ทอตัวอย่าง พบว่า 8%CA ที่ปริมาณผสม AC เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มการดูดซับ เมทิลีนบลูมากกว่า 10%CA และเข้าสู่ภาวะสมดุลที่ 2%AC-8%CA จากการวิจัยนี้ทำให้ทราบถึงสภาวะการขึ้นรูปผ้าไม่ทอผสม AC ด้วยการปั่นแบบไฟฟ้าสถิตและปริมาณ AC ที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นวัสดุดูดซับสารอินทรีย์ได้

#### Abstract

This study was focused on the effect of electrospinning processing parameter on morphology of activated carbon cellulose acetate micro fiber for organic compound adsorption. The cellulose acetate (CA) and activated carbon (AC) were forming via electrospinning needle size 0.6 mm, 30 kV at 15 cm height with dichloromethane/dimethylformamide (DCM/DMF) with 8 and 10%wt CA. AC was added in CA with the composition of 0,1,2,3,5%wt. The throughput rate was fix at 0.1 ml/min. The results showed that the viscosity increased with the increasing of AC ratio. SEM micrographs indicated the similar size of the fibers. For the fiber adsorption ability, methylene blue was used as the indicator. The prepared sample (2%AC-8%CA) was the optimal fiber condition for the adsorption property. This study presented the suitable electrospinning condition for organic compound absorbed fibers.

**Keywords:** electrospinning, adsorption, cellulose acetate fiber

## 1. บทนำ

เซลลูโลสอะซีเตทมีการใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งทางด้านอุตสาหกรรมและชีวการแพทย์ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [1] เซลลูโลสอะซีเตท (CA) ซึ่งดัดแปลงมาจากเซลลูโลสธรรมชาติ (อะซีเตทเอสเทอร์) นำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น ตัวกรองบูห์รี ผ้าอ้อมดูดซับสูง เมมเบรนสำหรับกระบวนการแยก [2] การค้นคว้าทางด้านสมบัติของวัสดุเซลลูโลสอะซีเตทในระดับนาโนด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นเรื่องที่น่าสนใจ เพราะมีอัตราส่วนระหว่างพื้นผิวต่อปริมาตร (surface-to-volume ratio) สูง และยังเป็นวัสดุที่ชอบนำมาผลิตเป็นแผ่นเยื่อกรองขนาดนาโน [3-9] มีการศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยนาโนเซลลูโลสอะซีเตทซึ่งสามารถดูดซับได้มากขึ้น [10,11] รวมถึงมีการศึกษาเกี่ยวกับการนำเส้นใยนาโนคาร์บอนมาดูดซับสารอินทรีย์พบว่าเส้นใยคาร์บอนที่มี ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นผสมอยู่สามารถดูดซับสารอินทรีย์ได้มากขึ้นเมื่อมีปริมาณมากขึ้น [12]

ในการศึกษานี้ได้ทำการขึ้นรูปผ้าไม่ทอจากเส้นใยเซลลูโลสอะซีเตท (CA) ผสมถ่านกัมมันต์ (AC) โดยการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ที่สภาวะการขึ้นรูปต่างกัน เพื่อที่จะวิเคราะห์โครงสร้างที่เกิดขึ้นและการดูดซับสารละลายเมทิลลีนบลูที่มีความเหมาะสมต่อสภาวะการขึ้นรูป

## 2. วิธีการทดลอง

### 2.1 วัสดุ

- เซลลูโลสอะซีเตท (CA) (Mn~50,000) จากบริษัท เอส.เอ็ม. เคมีคอล ซัพพลาย จำกัด
- ไดเมทิลฟอร์มาไรด์ (DMF) จากบริษัท อาร์ซีไอ แล็บส์ แกน จำกัด
- ไดคลอโรมีเทน(DCM)จากบริษัทอาร์ซีไอแล็บส์ แกน จำกัด
- ผงถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว เกรด HRO M325-60 จากบริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด
- สารเมทิลลีนบลู จาก บริษัท เอส.เอ็ม.เคมีคอล ซัพพลาย จำกัด

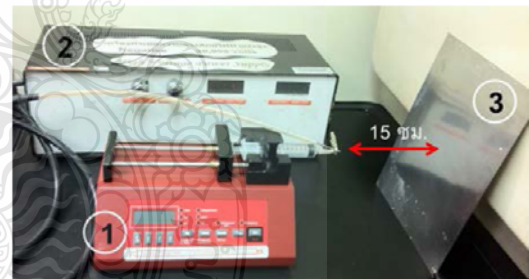
### 2.2 การเตรียมผ้าไม่ทอโดยการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิต

1. ทำการเตรียมสารละลายโดยชั่งเซลลูโลสอะซีเตท 8 และ 10 % โดยน้ำหนัก แล้วเติมตัวทำละลายผสมไดคลอ-

โรมีเทน (DCM) และไดเมทิลฟอร์มาไรด์ (DMF) ในอัตราส่วน 2 ต่อ 1 ส่วนโดยน้ำหนัก ทำการกวนด้วยแท่งกวนชนิดแม่เหล็ก (Magnetic bar) ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 10-15 นาที จนได้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเติมผงถ่านกัมมันต์ (AC) ในอัตราส่วน 0,1,2,3,5% โดยน้ำหนัก ลงในสารละลายที่เตรียมไว้ แล้วกวนสารละลายผสมผงถ่านกัมมันต์นี้ด้วยแท่งกวนชนิดแม่เหล็ก (Magnetic bar) ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชม. จนผงถ่านกัมมันต์กระจายเข้ากันอย่างสม่ำเสมอทั่วสารละลาย

2. ทำการขึ้นรูปผ้าไม่ทอจากเส้นใยเซลลูโลสอะซีเตทที่ตัวอย่างสารละลายที่เตรียมไว้ ด้วยไซริงค์บี้ม (syringe pump, Just Infusion™) โดยทำการตั้งค่าสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปดังนี้ อัตราการป้อนสารละลาย (Throughput rate) คงที่ที่ 0.1 มิลลิลิตรต่อนาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเข็ม 0.6 มม. ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์ ระยะทางจากเข็มถึงแผ่นรองรับเส้นใย 15 ซม.

(ตั้งรูปที่ 1)



รูปที่ 1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต 1. ไซริงค์บี้ม 2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์สูง 3. แผ่นรองรับเส้นใย

### 2.3 การวิเคราะห์ลักษณะ

- วัดค่าความหนืดของสารละลายตัวอย่าง ด้วยเครื่อง Rheometer (ThermoHake RotoVisco1)
- วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (JEOL JSM-4501)
- วัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใยด้วยโปรแกรม Image J

### 2.4 ทดสอบการดูดซับสารละลายเมทิลลีนบลู

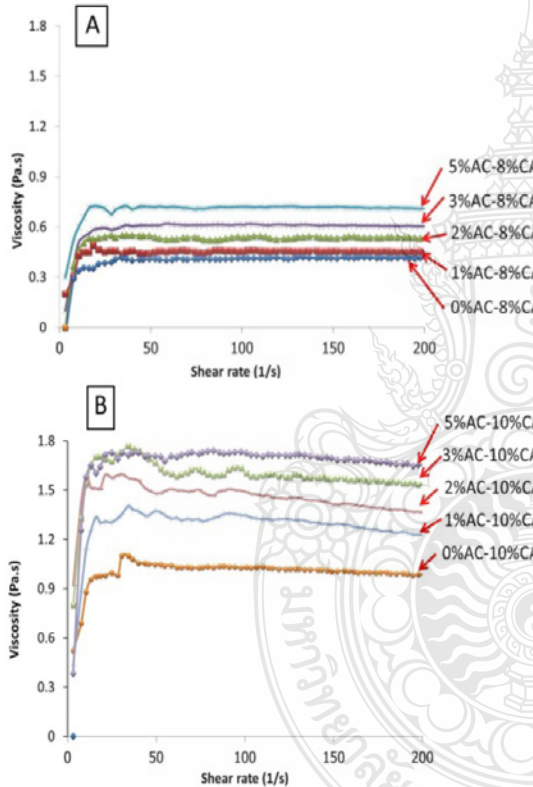
เตรียมผ้าไม่ทอแต่ละตัวอย่างขนาด 5 x 5 ซม. น้ำหนักประมาณ 100 mg ใกล้เคียงกันทุกชิ้น เตรียมสารละลายเมทิลลีนบลูความเข้มข้น 5 ppm ใช้สารละลายในการทดสอบ 100 มิลลิลิตร ทดสอบในห้องมืด ทำการ

เก็บตัวอย่างที่ 0,1,3,6,12,24,48 ชม. ตามลำดับ แล้วนำสารละลายไปวัดความเข้มข้นที่เหลือ ด้วยการดูดซับแสงในช่วงความยาวคลื่น 600-700 นาโนเมตร โดยใช้เครื่อง UV-vis Spectrophotometer (JASCO V-530)

### 3. ผลการทดลอง

#### 3.1 ผลการวัดความหนืดสารละลาย (Viscosity)

สารละลายตัวอย่างที่เตรียมไว้ ก่อนที่จะนำมาขึ้นรูปเส้นใย ได้ทำการวัดค่าความหนืดเพื่อบอกถึงสภาพการไหลของสารละลายผ่านหัวฉีดขณะขึ้นรูป ดังกราฟ (รูปที่ 2 )



รูปที่ 2 ค่าความหนืดของสารละลาย (A) ที่ความเข้มข้น 8%CA และ (B) 10%CA ที่ปริมาณ AC 0,1,2,3,5 %โดยน้ำหนัก

จากผลการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสารละลาย CA ที่ความเข้มข้น (8 และ 10% โดยน้ำหนัก) และปริมาณผสม AC (0,1,2,3,5% โดยน้ำหนัก) เมื่อเปรียบเทียบสารละลายที่ความเข้มข้นของ CA ทั้งสองค่า พบว่าที่ตัวอย่าง 0%AC-10%CA มีค่าความหนืดสูงกว่า 0%AC-8%CA และปริมาณ AC ที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่าความหนืดมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อนำสารละลายดังกล่าวมาทำการขึ้นรูปโดยการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นผ้าไม่ทอ

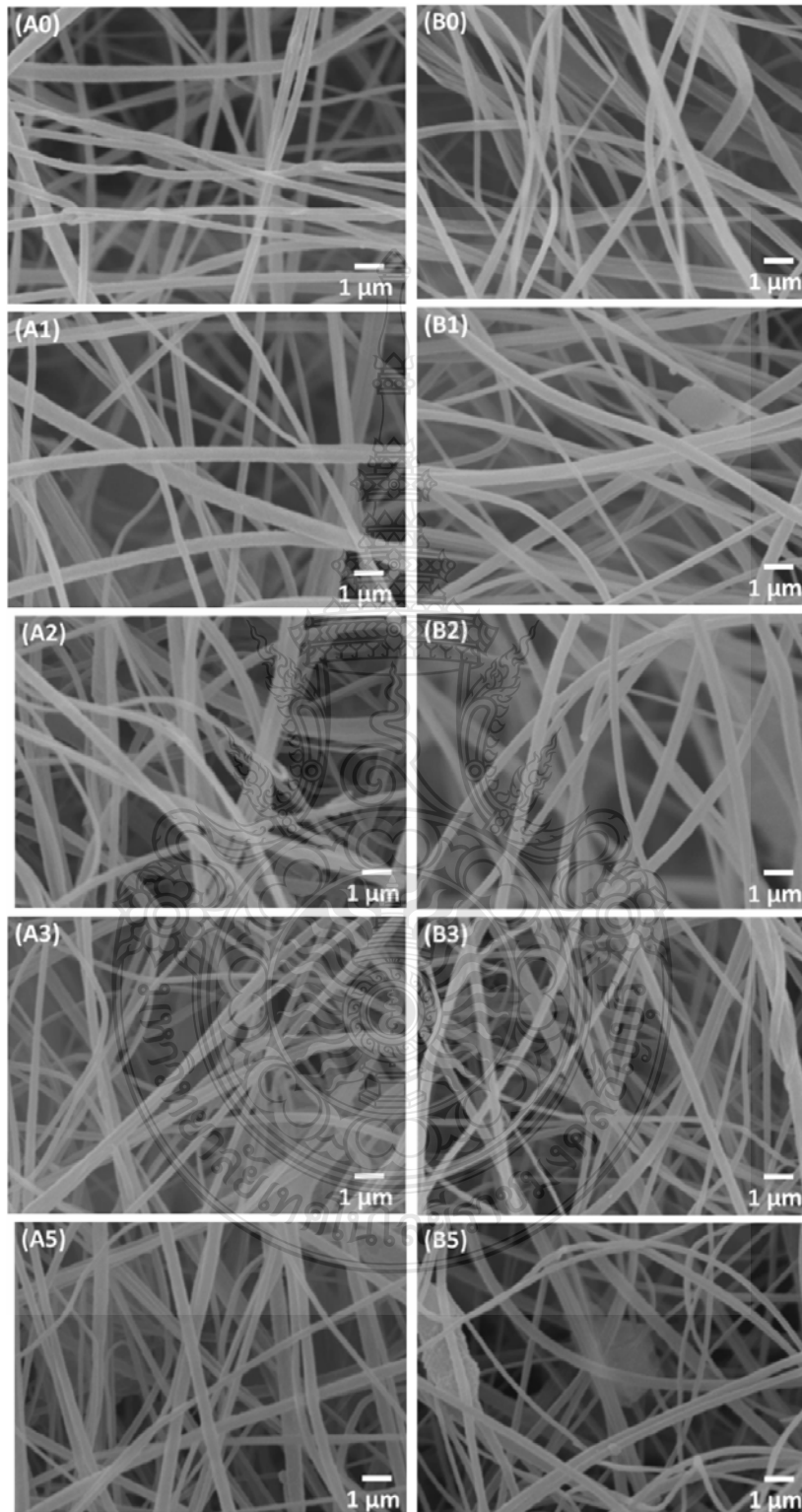
พบว่าสารละลาย 8%CA ที่ผสม AC ที่ปริมาณต่างๆกันสามารถขึ้นรูปเป็นผ้าไม่ทอได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่เกิดการอุดตันที่หัวฉีด(ผืนผ้าไม่ทอจะมีความเรียบเนียน) (ดังรูปที่ 3 ) เห็นได้ว่า ที่ 8%CA แสดงลักษณะผืนผ้าที่สม่ำเสมอกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ สารละลาย 10%CA ซึ่งขึ้นรูปเป็นผ้าไม่ทอได้ไม่ต่อเนื่อง(ไม่เรียบเนียน)เมื่อปริมาณผสม AC เพิ่มขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ 5%AC-10%AC ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากความหนืดที่สูงเกินไปส่งผลทำให้การไหลของสารละลายเหลวผ่านรูเข็มที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก 0.6 มิลลิเมตร เกิดความเค้นสูง และไหลได้ช้ากว่า สารละลาย 8% CA ที่มีความหนืดต่ำกว่า จึงทำให้เกิดการสะสมของอนุภาค AC ที่รูเข็มหัวฉีดเส้นใยค่อนข้างมาก ทำให้เกิดการอุดตันและได้ผืนผ้าที่ไม่สม่ำเสมอ [13]

#### 3.2 วิเคราะห์ลักษณะสัญญาณและขนาดของเส้นใย

จากการขึ้นรูปผ้าไม่ทอจากเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตทของตัวอย่างสารละลายผสมถ่านกัมมันต์ที่ปริมาณต่างๆกันสีของผ้ามีความเข้มข้นเมื่อปริมาณถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 3

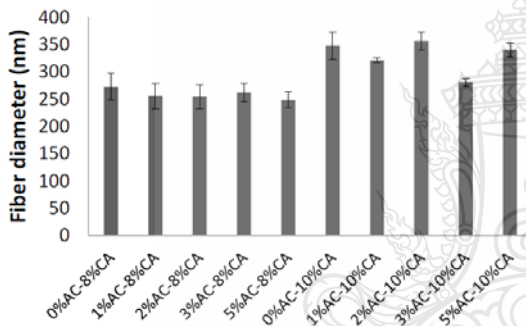


รูปที่ 3 ตัวอย่างผ้าไม่ทอที่ขึ้นรูปจากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต



รูปที่ 4 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่า ของ (A) 8%CA , (B)  
10%CA ที่ 0.1,2,3,5%AC โดยน้ำหนัก

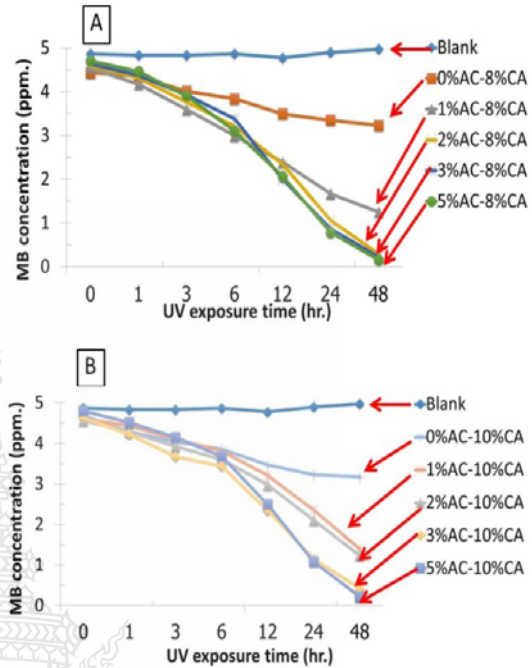
ผลการวิเคราะห์ขนาดเส้นใยของผ้าไม่ทอเมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของสารละลาย 0%AC-8%CA และ 0%AC-10%CA โดยน้ำหนัก พบว่าที่ความเข้มข้น 0%AC-8%CA มีขนาดของเส้นใยอยู่ในช่วง 250-270 นาโนเมตร แนวโน้มเล็กกว่าที่ความเข้มข้นของสารละลาย 0%AC-10%CA ขนาดของเส้นใยอยู่ในช่วง 300-350 นาโนเมตร ทุกๆ ปริมาณการผสม AC (0,1,2,3,5% โดยน้ำหนัก) อีกทั้งขนาดของเส้นใยมีแนวโน้มใกล้เคียงกันและไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับสารละลาย 0%AC-10%CA ดังรูปที่ 4-5 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความหนืดของสารละลายที่สูงส่งผลทำให้การไหลไม่ต่อเนื่องและเกิดการอุดตันของอนุภาคทำให้ขนาดเส้นใยที่ขึ้นรูปได้มีขนาดที่แตกต่างกัน [14]



รูปที่ 5 ขนาดของเส้นใย ที่ความเข้มข้นCAและปริมาณACที่แตกต่างกัน(1-5%AC)

### 3.3 ผลการดูดซับสารเมทิลีนบลู

จากผลการทดลองการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู ที่ความเข้มข้น 5 ppm เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ของผ้าไม่ทอเซลลูโลสอะซิเตดขนาด 5 x 5 ซม. น้ำหนักผ้าประมาณ 100 มิลลิกรัม พบว่าที่ความเข้มข้น 8%CA ที่ปริมาณผสม AC เพิ่มขึ้น มีแนวโน้มการดูดซับเมทิลีนบลูมากกว่าความเข้มข้น10%CA และเข้าสู่สภาวะสมดุล (MB = 0 ppm) ได้เร็วกว่า กล่าวคือความเข้มข้นของสารละลาย 8%CA ที่ปริมาณการผสม 2% AC ณ เวลา 48 ชั่วโมง พบว่าสีของสารละลายเมทิลีนบลูจางหายไปหมดจากสีน้ำเงิน เป็นสารละลายใส ทำให้แสดงค่าความเข้มข้นเท่ากับ 0 ppm ในขณะที่ตัวอย่างผ้าไม่ทอเซลลูโลสอะซิเตดที่ 10%CA ต้องใช้ปริมาณ AC มากขึ้นเป็น 3%AC จึงสามารถทำให้สีของสารละลายเมทิลีนบลูจางหายไป ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ความเข้มข้นที่เหลือของเมทิลีนบลูที่ทดสอบโดย (A) ความเข้มข้นCA8% (B) CA10% ที่ปริมาณACที่แตกต่างกัน (1-5%AC)

ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผ้าไม่ทอเซลลูโลสอะซิเตด 2%AC-8%CA มีการกระจายตัวของอนุภาค AC บนเส้นใยที่สม่ำเสมอและขนาดเส้นใยที่เล็กกว่าจึงมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงกว่า [3] ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับที่ดีกว่า (รูปที่ 4 A2) อีกทั้งพบว่าปริมาณ AC เพิ่มขึ้นมากกว่า 3%AC ไม่ส่งผลต่อความเร็วในการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู ณ เวลาที่เท่ากัน จึงไม่จำเป็นต้องผสม AC ในปริมาณมาก [15]

### 4. สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองสรุปได้ว่า จากผลการทดสอบการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู ที่ความเข้มข้น 5 ppm เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ด้วยผ้าไม่ทอเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตด พบว่าที่ความเข้มข้นเซลลูโลสอะซิเตด 8% โดยน้ำหนักที่ปริมาณผสม AC เพิ่มขึ้น มีแนวโน้มการดูดซับเมทิลีนบลูมากกว่า เนื่องจากสารละลายตัวอย่างนี้มีความเหมาะสมกับสภาวะการขึ้นรูปด้วยไฟฟ้าสถิต มีขนาดเส้นใยอยู่ในช่วง 250-270 นาโนเมตร ส่วนความเข้มข้นเซลลูโลสอะซิเตด 10% โดยน้ำหนัก นั้นมีความหนืดสูง มีขนาดเส้นใยอยู่ในช่วง 300-350 นาโนเมตร จึงไม่เหมาะสมต่อสภาวะการปั่นเส้น กล่าวคือความหนืดของ

สารละลายตัวอย่างที่ใช้เตรียมเป็นเส้นใยมีความสำคัญต่อการดูดซับสารเมทิลีนบลู สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของไส้กรองน้ำสำหรับใช้ในโรงพยาบาล

#### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Misra, M., Seydibeyoglu, O., Ray, D., Das, K. and Mohanty, AK. 2011. Biodegradable Nanocomposites from Cellulosic Plastics and Cellulosic Fiber. In: Mittal Vikas, editor. Nanocomposites with Biodegradable Polymers: Synthesis, Properties, and Future Perspectives. New York, Oxford University Press Inc. [Chapter 6].
- [2] Pham, QP., Sharma, U. and Mikos, AG. 2006. Electrospinning of Polymeric Nanofibers for Tissue Engineering Applications: a review. Tissue Engineering, 12(5):1197-211.
- [3] Yu, L., Shige, W., Wingwu, S., Ruiling, Q., Yi, F., Rui, G., Hongdong, C. and Xueyan, C. 2013. Carbon Nanotube-Incorporated Multilayered Cellulose Acetate Nanofibers for Tissue Engineering Applications. Carbohydrate Polymers, 91:419-427.
- [4] Zuwei, Ma., Kotaki, M. and Ramakrishna, S. Surface Modified Nonwoven Polysulphone (PSU) Fiber Mesh by Electrospinning: a Novel Affinity Membrane. Journal Membrane Science, Submitted for Publication.
- [5] Ye, T., Min, W., Ruigang, L., Yanxiang, L., Deqian, W., Junjun, T., Rongcheng, W. and Yong, H. 2011. Electrospun Membrane of Cellulose Acetate for Heavy Metal Ion Adsorption in Water Treatment. Carbohydrate Polymers, 83 : 743-748.
- [6] Klein, E. 2000. Affinity Membranes: a 10-year Review. Journal Membrane Science, 179: 1-27.
- [7] Liu, H. and Hsieh, Y. 2002. Ultrafine Fibrous Cellulose Membranes from Electrospinning of Cellulose Acetate, Inc. Journal Polymer Science, Part B, Polymer Physics, 40: 2119-2129.
- [8] Liu, H. and Hsieh, Y. 2003. Surface Methacrylation and Graft Copolymerization of Ultrafine Cellulose Fibers. Journal Polymer Science, Part B: Polymer Physics, 41: 953-964.
- [9] Son, W.K., Youk, J.H., Lee, T.S. and Park, W.H. 2004. Electrospinning of Ultrafine Cellulose Acetate Fibers: Studies of a New Solvent System and Deacetylation of Ultrafine Cellulose Acetate Fibers. Journal Polymer Science, Part B: Polymer Physics, 42: 5-11.
- [10] Lifeng, Z., Todd, J. M. and Hao, F. 2008. Fabrication and Bioseparation Studies of Adsorptive Membranes/felts Made from Electrospun Cellulose Acetate Nanofibers. Journal Membrane Science, 319: 176-184.
- [11] Zuwei, M., Kotaki, M. and Ramakrishna, S. 2005. Electrospun Cellulose Nanofiber as Affinity Membrane. Journal Membrane Science, 265:115-123.
- [12] Zhang, L. and Hsieh, Y-L. 2008. Ultrafine Cellulose Acetate Fibers with Nanoscale Structural Features. Journal Nanotechnology, 8(9):4461-9.
- [13] Chureerat, P., Wattana, K. and Nanjaporn, R. 2011. Electrospinning of PAN/DMF/H<sub>2</sub>O Containing TiO<sub>2</sub> and Photocatalytic Activity of their Webs. Materials Letters, 65:2498-2501
- [14] Santi, T., Tanarinthorn, P., Monchawan, W., Ittipol, J., Pomtiva, F., Somsak, S., Chidchanok, M. and Pitt, S. 2007. Electrospun Cellulose Acetate



- Fibers:Effect of Solvent System on Morphology and Fiber Diameter. Cellulose, 14:563-575.
- [15] Gurdev, S., Dipak, R., Takeshi, M., Seeran, R., Roberto, M.N. and Shahram,T. 2010. Removal of Disinfection Byproducts from Water by Carbonized Electrospun Nanofibrous Membranes. Separation and Purification Technology, 74: 202-212.





การประชุมวิชาการช่างานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2556  
IE Network Conference 2013

ขอขอบเกียรติบัตรนี้ไว้เพื่อแสดงว่า

วัฒนา กลิ่นสุคนธ์ นที ศรีสวัสดิ์ จุรีรัตน์ ประสาร สรพงษ์ ภาสุปรีย์

ได้เข้าร่วมนำเสนอผลงานวิชาการในหัวข้อ

ผลกระทบของกระบวนการขึ้นรูปเส้นใยเซลลูโลสอะซีเตทผสมถ่านกัมมันต์

โดยการนำเสนอด้วยไฟฟ้าสถิตสำหรับการดูดซับสารอินทรีย์

ระหว่างวันที่ 16-18 ตุลาคม 2556

ณ โรงแรมแอวัน เดอะ รอยัล ครูซ พัทยา จังหวัดชลบุรี

นางสาว กิ่งตุง

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนกวรรณ กิ่งตุง)

ประธานช่างานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2556

PK

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร)

ประธานช่างานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2556

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายวัฒนา กลิ่นสุคนธ์
วัน เดือน ปีเกิด	20 กรกฎาคม 2529
ที่อยู่	8 หมู่ 5 ตำบลเขาชัย้อย อำเภอเขาชัย้อย จังหวัดเพชรบุรี 76140
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งทอ แขนง การผลิตเส้นใยสังเคราะห์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	ผู้ช่วยนักวิจัย ห้องปฏิบัติการสิ่งทอ หน่วยวิจัยพอลิเมอร์ ศูนย์ เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
เบอร์โทรศัพท์	089-0877754
อีเมล	wattanak@mtec.or.th

