

การเตรียมเส้นใยพอลิเมอร์ระดับนาโนโดยเทคนิคอิเล็กโตรสปินสำหรับใช้เป็นเมมเบรนในอุปกรณ์
ตรวจวัดมลพิษในอากาศแบบพาสซีฟ

นางสาวสิรินธรรักรักษ์ รังสรรค์โอภาส วท.บ. (เคมี)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2551

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....

(ดร. สราวุธ เทพานนท์)

ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์

.....

(รศ.ดร. วินัย สมบูรณ์)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

.....

(รศ. นราพร หาญวงษ์วงศ์)

กรรมการ

.....

(ผศ.ดร. วันดี อ่อนเรียบร้อย)

กรรมการ

หัวข้องานวิจัย	การเตรียมเส้นใยพอลิเมอร์ระดับนาโนโดยเทคนิคอิเล็กโตรสปินสำหรับใช้เป็นเมมเบรนในอุปกรณ์ตรวจวัดมลพิษในอากาศแบบพาสซีฟ
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นางสาวสิรินธรรักรักษ์ รังสรรค์โอภาส
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.วินัย สมบูรณ์
หลักสูตร	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
พ.ศ.	2551

บทคัดย่อ

อุปกรณ์เก็บอากาศแบบพาสซีฟ (Air passive sampler หรือ APS) เป็นอุปกรณ์ขนาดเล็กที่ใช้ในการตรวจวัดสารมลพิษในอากาศ เช่น แก๊ส SO_2 หรือ NO_2 อุปกรณ์นี้ต้องมีแผ่นเมมเบรน (ปกติทำจากไนลอน เทฟลอน หรือเซลลูโลส) ที่มีสารที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารมลพิษ เป็นตัวจับสารมลพิษในงานวิจัยนี้เป็นการเตรียม APS ชนิดใหม่ที่จะใช้แผ่นเมมเบรนของเส้นใยพอลิเมอร์ระดับนาโนแทนแผ่นเมมเบรนแบบเดิม เส้นใยพอลิเมอร์ที่ใช้เตรียมจากสารละลายของไนลอน-6 (น้ำหนักโมเลกุล ~ 10,000 Dalton) ในตัวทำละลายกรดฟอร์มิกด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิ่งที่อุณหภูมิห้อง การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อขนาดและรูปร่างของเส้นใย ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลาย (15 - 35% โดยน้ำหนัก) ความต่างศักย์ไฟฟ้า (10 - 20 kV) และระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใย (5 - 15 cm) พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการสปินเส้นใยคือ ความเข้มข้น 20 % โดยน้ำหนัก ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับอุปกรณ์รองรับเส้นใย 20 cm ซึ่งทำให้ได้เส้นใยขนาด 50 - 60 nm ได้เตรียมเมมเบรนของเส้นใยนาโนลงบนกระดาษกรองและนำไปประกอบในอุปกรณ์ APS จากนั้นนำไปทดลองเก็บแก๊ส NO_2 ในบรรยากาศ การทดลองพบว่ากระดาษกรองที่มีเส้นใยนาโนอยู่สามารถเก็บปริมาณแก๊ส NO_2 ได้ในอัตราที่เร็วกว่ากระดาษกรองแบบเดิม และสภาวะที่เหมาะสมในการเก็บตัวอย่างอากาศสำหรับแก๊ส NO_2 คือการใช้เมมเบรนของเส้นใยนาโนที่สปินลงบนกระดาษกรองนาน 45 นาที และใช้สารละลายดูดซับที่ประกอบด้วย NaOH เข้มข้น 0.176 M และ NaI เข้มข้น 0.416 M (80 % ของความเข้มข้นที่ใช้สำหรับแผ่นเมมเบรนเซลลูโลสมาตรฐาน) และระยะเวลาที่เก็บตัวอย่างนาน 120 ชั่วโมง

คำสำคัญ : อิเล็กโตรสปินนิ่ง / เส้นใยนาโน / อุปกรณ์เก็บอากาศแบบพาสซีฟ

Thesis Title	Preparation of Electrospun Polymer Nanofibers for Adsorption Membrane in Passive Air Sampler
Thesis Credits	12
Candidate	Miss Sirinrak Rungsonopas
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Winai Somboon
Program	Master of Science
Field of Study	Industrial Chemistry
Department	Chemistry
Faculty	Science
B.E.	2551

Abstract

Air passive sampler (APS) or air diffusive sampler is a portable unit used for monitoring the level of air pollutants such as SO₂ and NO₂. The essential component of APS is an adsorption membrane (conventionally made from nylon, teflon or cellulose) containing deposited active agent that reacts with a specific pollutant. This research aims to prepare sheet of nanofibers with controlled size and morphology via electrospinning process and to use the nanofiber membrane as an improved adsorption membrane in APSs. The polymer used in this study was Nylon-6 (MW~10,000 Dalton) dissolved in formic acid. The electrospinning process was performed at room temperature using home-built equipment. Nanofibers size and morphology were studied as a function of solution concentration (15 - 35 % by weight), applied voltage (10 - 20 kV) and a distance from the syringe tip to a grounded target, D (5 - 15 cm). Electrospun nylon nanofibers with the size of 50-60 nm were obtained from the solution (20 % by weight) at 20 kV and the distance of 20 cm. The obtained non-woven nanofibers membrane was spun onto cellulose filtering paper. The APSs containing nanofiber membrane were used to collect NO₂ in ambient air. It was found that the APSs containing nanofibers could collect NO₂ at the faster rate than those with standard cellulose filtering membrane. The APSs that yielded the best adsorption were those with membrane containing nanofiber electrospun for 45 minutes and the solution of active agents containing 0.176 NaOH and 0.416 M NaI (80 % of the concentration used for the standard cellulose membrane) and the sampling period of 120 hours.

Keywords : Electrospinning / Nanofibers / Air Passive Sampler

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วินัย สมบูรณ์ และอาจารย์สุภลักษณ์ อ่างแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัยที่คอยให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และให้การสนับสนุนด้านเครื่องมืออุปกรณ์ในการทำโครงการงาน ตลอดจนการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นตลอดช่วงระยะเวลาการดำเนินงานวิจัยนี้ อันเป็นผลให้ งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี พร้อมกันนี้ขอขอบพระคุณ รศ.นราพร หาญวงษ์ อาจารย์ ภาควิชาเคมี และผศ.ดร.วันดี อ่อนเรียบริ้อย อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และดร.สราวุธ เทพานนท์ อาจารย์ภาควิชาสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สละเวลามาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และช่วยให้คำแนะนำและแก้ไขให้งานวิจัยนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และขอขอบพระคุณ อาจารย์มยุรี กิตติเดชาชาญ อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้การสนับสนุนด้านเครื่องมือ อุปกรณ์และสถานที่ในการทำงานวิจัยและสำนักงานไปรษณีย์ เขตราชบุรีบูรณะ ถนนประชาอุทิศ จังหวัดกรุงเทพมหานคร ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการเก็บตัวอย่างอากาศ และขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ ภาควิชาเคมีทุกท่านที่ช่วยแนะนำและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและการเบิกอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณอย่างสูงต่อคุณพ่อและคุณแม่ที่คอยให้การสนับสนุนและให้กำลังใจผู้วิจัยตลอดมาจนทำให้งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จตามวัตถุประสงค์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ฉ
รายการรูปประกอบ	ช
รายการสัญลักษณ์	ค
ประมวลศัพท์และคำย่อ	ด

บทที่

1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	3
2. ทฤษฎี	4
2.1 นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology)	4
2.2 เส้นใยนาโน (Nanofibers)	4
2.2.1 วิธีการผลิตเส้นใยนาโน	4
2.3 กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning process)	6
2.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต	6
2.3.2 หลักการพื้นฐานของกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต	6
2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อขนาดและรูปร่างของเส้นใยนาโน	8
2.3.3.1 ปัจจัยที่เกิดจากสารละลายพอลิเมอร์ (Polymer solution parameters)	8
2.3.3.1.1 น้ำหนักโมเลกุลและความหนืดของสารละลาย (Molecular weight and solution viscosity)	8
2.3.3.1.2 แรงตึงผิวของสารละลาย (Surface tension)	12
2.3.3.1.3 การนำไฟฟ้าของสารละลาย (Solution conductivity)	14
2.3.3.1.4 ผลของค่าไดอิเล็กตริกของตัวทำละลาย (Dielectric effect of solvent)	16

	หน้า	
2.3.3.2	ปัจจัยของกระบวนการผลิต (Process condition)	17
2.3.3.2.1	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage)	17
2.3.3.2.2	อัตราการป้อนของสารละลาย (Feed rate)	18
2.3.3.2.3	อุณหภูมิ (Temperature)	19
2.3.3.2.4	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็ม (Diameter of needle)	20
2.3.3.2.5	ระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใย (Distance from syringe tip to a grounded target)	20
2.3.3.3	ปัจจัยของสภาพบรรยากาศขณะปั่นเส้นใย	21
2.3.4	ลักษณะและรูปร่างของเส้นใยนาโน (Nanofiber morphology)	22
2.3.4.1	เส้นใยที่มีรูพรุน (Porous nanofibers)	23
2.3.4.2	เส้นใยที่มีลักษณะแบนหรือมีลักษณะคล้ายริบบิ้น (Flattened or ribbon-like fibers)	23
2.3.4.3	เส้นใยที่มีกิ่งก้านสาขา (Branched fibers)	24
2.3.4.4	เส้นใยที่เป็นรูปขดลวด (Helical fibers)	25
2.4	สัณฐานวิทยา (Morphology)	25
2.5	เทคนิคการตรวจวัดวัสดุนาโน (Characterization of nanoparticles)	25
2.5.1	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM)	25
2.5.1.1	หลักการของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	26
2.5.2	Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS)	27
2.6	การประยุกต์ใช้เส้นใยนาโน	28
2.6.1	การนำไปใช้ทางการแพทย์	28
2.6.1.1	อวัยวะเทียม (Medical prostheses)	28
2.6.1.2	โครงร่างรองรับของเนื้อเยื่อ (Tissue template)	28
2.6.1.3	วัสดุปิดแผล (Wound dressing)	29
2.6.1.4	ด้านเวชภัณฑ์	29
2.6.2	การนำไปใช้ทางการทหาร	29
2.6.3	การประยุกต์ใช้ด้านการกรอง	30
2.7	แก๊สออกไซด์ของไนโตรเจน (NO _x)	30
2.8	อุปกรณ์เก็บอากาศแบบพาสซีฟ	31
2.8.1	อุปกรณ์เก็บอากาศแบบพาสซีฟ	31

	หน้า	
2.8.2	การเก็บตัวอย่างแก๊สในโตรเจนไดออกไซด์โดยวิธีพาสซีฟ	32
2.9	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	34
3.	เครื่องมือ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	39
3.1	เครื่องมือและอุปกรณ์	39
3.2	สารเคมี	40
3.3	วิธีการทดลอง	41
3.3.1	การเตรียมสารละลายในลอน 6	41
3.3.1.1	การเตรียมสารละลายในลอน 6 ความเข้มข้น 15 wt.%	41
3.3.1.2	การเตรียมสารละลายในลอน 6 ความเข้มข้น 20 wt.%	41
3.3.1.3	การเตรียมสารละลายในลอน 6 ความเข้มข้น 25 wt.%	41
3.3.1.4	การเตรียมสารละลายในลอน 6 ความเข้มข้น 30 wt.%	41
3.3.1.5	การเตรียมสารละลายในลอน 6 ความเข้มข้น 35 wt.%	41
3.3.2	การเตรียมเส้นใยพอลิเมอร์ โดยใช้กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต	42
3.3.2.1	การหาสภาวะที่เหมาะสมในการเริ่มต้นฉีดเส้นใยในลอน 6	42
3.3.2.2	การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเมมเบรน โดยศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสัมพันธานวิทยา และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของเส้นใยในลอน 6	42
3.3.2.3	ศึกษาสัมพันธานวิทยาและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของเส้นใยในลอน 6 ของชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมจากกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่สภาวะต่าง ๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM)	42
3.3.3	การเตรียมตัวอย่างสำหรับอุปกรณ์เก็บอากาศแบบพาสซีฟ	43
3.3.3.1	การเตรียมอุปกรณ์เก็บตัวอย่างโดยใช้กระดาษกรองเปล่าๆ	43
3.3.3.2	การเตรียมอุปกรณ์เก็บตัวอย่างที่ใช้เส้นใยในลอน 6 ที่มีกระดาษกรองเป็นตัวค้ำจุน	43
3.3.3.3	การเตรียมสารละลายดูดซับหรือสารละลายชุบกระดาษกรอง (Coating solution)	43
3.3.3.4	ทำการฉีดสารละลายดูดซับในปริมาตร 50 ไมโครลิตรลงไปบนแผ่นดูดซับของอุปกรณ์เก็บตัวอย่าง (ในบริเวณศูนย์กลางของกระดาษกรองเปล่าหรือเส้นใยในลอนที่มีกระดาษกรองเป็นตัวค้ำจุน)	43

3.3.3.5	นำไปส่อง SEM เพื่อดูขนาดและการกระจายตัวของสารละลาย คูดซ์ับ (เกลือ) บนแผ่นคูดซ์ับ	43
3.3.4	ทำการศึกษาเกี่ยวกับขนาดและการกระจายตัวของผลึก	43
3.3.5	การเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์เชิงปริมาณแก๊สในโตรเจนไดออกไซด์	44
3.3.5.1	การเตรียมสารละลายที่ทำให้เกิดสี	44
3.3.5.2	การเตรียมสารละลายโซเดียมไอโอไดด์เข้มข้น 0.05xx M เพื่อทำการเจือจางสารละลายมาตรฐาน	44
3.3.5.3	การเตรียมสารละลายมาตรฐานโซเดียมไนไตรท์ 0.0250 M	44
3.3.5.4	การเตรียมสารละลายมาตรฐานโซเดียมไนไตรท์ 50 μM (Working standard)	44
3.3.5.5	การเตรียมแผ่นคูดซ์ับสำหรับเก็บตัวอย่างแก๊สในโตรเจนไดออกไซด์ และการทำแบลงค์	44
3.3.5.6	การสกัดแก๊สในโตรเจนไดออกไซด์จากสารตัวอย่างและแบลงค์	44
3.3.6	การเตรียมสารละลายมาตรฐานของไนไตรท์	45
3.3.7	จุดเก็บตัวอย่างแก๊สในโตรเจนไดออกไซด์และจำนวนในการเก็บตัวอย่าง	46
4.	ผลการทดลอง	47
4.1	การจัดเตรียมอุปกรณ์ของกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต	47
4.2	การเตรียม Filter membrane สำหรับคูดซ์ับสารมลพิษโดยใช้เส้นใยนาโน	48
4.3	การหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเส้นใยนาโนในลอน 6	49
4.3.1	การหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเส้นใย โดยใช้ฉากเป็นแบบตั้ง	49
4.3.1.1	การหาสภาวะที่เหมาะสมในการเริ่มฉีดเส้นใยในลอน 6	49
4.3.1.2	การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเมมเบรน โดยศึกษาผล ของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยในลอน 6	50
4.3.1.2.1	การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายในลอน 6	50
4.3.1.2.2	การศึกษาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้	53
4.3.1.2.3	การศึกษาผลของระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์ รองรับเส้นใยของสารละลายในลอน 6	55
4.3.2	การหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเส้นใย โดยใช้ฉากเป็นแบบหมุน	57
4.3.2.1	การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายในลอน 6	58
4.3.2.2	การศึกษาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้	60

4.3.2.3	การศึกษาผลของระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยของสารละลายในลอน 6	62
4.3.3	การเปรียบเทียบลักษณะของที่รองรับเส้นใย	64
4.4	การศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสัมพันธภาพของเส้นใยในลอน 6	66
4.4.1	การเกิดเส้นใยที่มีเม็ดบีด (Beaded nanofibers)	66
4.4.1.1	การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายในลอน 6	66
4.4.1.2	การศึกษาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้	66
4.4.1.3	การศึกษาผลของระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยของสารละลายในลอน 6	66
4.4.2	การเกิดการแตกของเส้นใยออกเป็นเส้นเล็กๆ (Microfibrils)	69
4.5	การเตรียม Passive sampler เพื่อศึกษาขนาดและการจัดเรียงตัวของผลึกเกลือในสารละลายดูดซับ	70
4.6	การเก็บตัวอย่างอากาศแบบพาสซีฟสำหรับแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์	73
4.6.1	การศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้ในการสปินเส้นใยในลอนลงบนกระดาษกรอง	73
4.6.2	การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายดูดซับ	74
4.6.3	การศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง	78
5.	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	80
5.1	สรุปผลการทดลอง	80
5.1.1	การเตรียม Filter membrane สำหรับดูดซับสารมลพิษโดยใช้เส้นใยนาโน	80
5.1.2	การหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเส้นใยในลอน 6	80
5.1.3	การเปรียบเทียบลักษณะของที่รองรับเส้นใย	80
5.1.4	การศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสัมพันธภาพของเส้นใยในลอน 6	81
5.1.4.1	การเกิดเส้นใยที่มีเม็ดบีด	81
5.1.4.2	การเกิดการแตกออกเป็นเส้นเล็กๆ หลายๆ เส้นจากเส้นใย	81
5.1.5	การเตรียม Passive sampler เพื่อศึกษาขนาดและการจัดเรียงตัวของผลึกเกลือในสารละลายดูดซับ	81
5.1.6	การเก็บตัวอย่างอากาศแบบพาสซีฟสำหรับแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์	82
5.2	ข้อเสนอแนะ	82

เอกสารอ้างอิง

83

ภาคผนวก

ก รายการตารางค่ามวลแห้งของไน ไตรท์

86

ผลงานตีพิมพ์

96

ประวัติผู้วิจัย

101

รายการตาราง

ตาราง	หน้า	
2.1	แสดงการเปรียบเทียบเทคนิคที่ใช้ในการผลิตเส้นใยนาโน	5
2.2	แสดงข้อดีและข้อเสียของแต่ละเทคนิค	5
2.3	แสดงชนิดของสารละลายดูดซับที่ใช้ในการดูดซับแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์	33
3.1	แสดงการเตรียมสารละลายมาตรฐานสำหรับวัดความเข้มข้นของไนไตรท์	45
4.1	แสดงผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการเริ่มฉีดเส้นใยในลอน 6	50
4.2	แสดงปริมาณของธาตุไอโอดีนที่ความเข้มข้นของสารละลายดูดซับต่าง ๆ	77
ก.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการสปinningเส้นใยกับมวลแห้งของไนไตรท์ที่ความเข้มข้นของสารละลายดูดซับที่ประกอบด้วย 0.022 โมลาร์โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ 0.052 โมลาร์โซเดียมไอโอดีน (10% ของความเข้มข้นที่ใช้สำหรับแผ่นเมมเบรนเซลลูโลสมาตรฐาน) และทำการเก็บตัวอย่างเป็นระยะเวลา 5 วัน	87
ก.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการสปinningเส้นใยกับมวลแห้งของไนไตรท์ที่ความเข้มข้นของสารละลายดูดซับที่ประกอบด้วย 0.022 โมลาร์โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ 0.052 โมลาร์โซเดียมไอโอดีน (10% ของความเข้มข้นที่ใช้สำหรับแผ่นเมมเบรนเซลลูโลสมาตรฐาน) และทำการเก็บตัวอย่างเป็นระยะเวลา 5 วัน	88
ก.3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการสปinningเส้นใยกับมวลแห้งของไนไตรท์ที่ความเข้มข้นของสารละลายดูดซับที่ประกอบด้วย 0.022 โมลาร์โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ 0.052 โมลาร์โซเดียมไอโอดีน (10% ของความเข้มข้นที่ใช้สำหรับแผ่นเมมเบรนเซลลูโลสมาตรฐาน) และทำการเก็บตัวอย่างเป็นระยะเวลา 5 วัน	89
ก.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายดูดซับกับมวลแห้งของไนไตรท์ที่ระยะเวลาที่ใช้ในการสปinningเส้นใย 45 นาที และทำการเก็บตัวอย่างเป็นระยะเวลา 5 วัน	90
ก.5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายดูดซับกับมวลแห้งของไนไตรท์ที่ระยะเวลาที่ใช้ในการสปinningเส้นใย 45 นาที และทำการเก็บตัวอย่างเป็นระยะเวลา 5 วัน	91
ก.6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายดูดซับกับมวลแห้งของไนไตรท์ที่ระยะเวลาที่ใช้ในการสปinningเส้นใย 45 นาที และทำการเก็บตัวอย่างเป็นระยะเวลา 5 วัน	92

ตาราง (ต่อ)	หน้า
ก.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่เก็บตัวอย่างกับมวลแห้งของไนโตรเจนที่ความเข้มข้นของสารละลายคูดซับที่ประกอบด้วย 0.176 โมลาร์โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ 0.416 โมลาร์โซเดียมไอโอไดด์ (80% ของความเข้มข้นที่ใช้สำหรับแผ่นเมมเบรนเซลลูโลสมาตรฐาน) และระยะเวลาที่ใช้ในการสปินเส้นใย 45 นาที	93
ก.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่เก็บตัวอย่างกับมวลแห้งของไนโตรเจนที่ความเข้มข้นของสารละลายคูดซับที่ประกอบด้วย 0.176 โมลาร์โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ 0.416 โมลาร์โซเดียมไอโอไดด์ (80% ของความเข้มข้นที่ใช้สำหรับแผ่นเมมเบรนเซลลูโลสมาตรฐาน) และระยะเวลาที่ใช้ในการสปินเส้นใย 45 นาที	94
ก.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่เก็บตัวอย่างกับมวลแห้งของไนโตรเจนที่ความเข้มข้นของสารละลายคูดซับที่ประกอบด้วย 0.176 โมลาร์โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ 0.416 โมลาร์โซเดียมไอโอไดด์ (80% ของความเข้มข้นที่ใช้สำหรับแผ่นเมมเบรนเซลลูโลสมาตรฐาน) และระยะเวลาที่ใช้ในการสปินเส้นใย 45 นาที	95

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
1.1	แสดงภาพเครื่องมือของกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต	2
1.2	แสดงภาพของอุปกรณ์เก็บอากาศแบบพาสซีฟ	3
2.1	แสดงการจัดอุปกรณ์ของกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต	7
2.2	แสดงการเคลื่อนที่ของสารละลายที่พุ่งออกมาจากปลายเข็มฉีดยา	8
2.3	แสดงผลของความเข้มข้นต่าง ๆ ที่มีต่อลักษณะเส้นใยของพอลิเอทรีลีน โคไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(ethylene-co-vinyl alcohol) : EVOH)	10
2.4	แสดงผลของความเข้มข้นที่มีต่อเส้นใยพอลิเอทรีลีนออกไซด์ (Poly(ethylene oxide : PEO)	11
2.5	แสดงแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์และตัวทำละลาย (A) ที่ความหนืด สูง โมเลกุลของตัวทำละลายกระจายอยู่รอบๆสายโซ่พอลิเมอร์อย่างสม่ำเสมอ (B) ที่ความหนืดต่ำ โมเลกุลของตัวทำละลายจะรวมตัวกันเนื่องจากผลของแรงดึงดูด	13
2.6	แสดงผลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของเอทานอลต่อน้ำที่มีต่อลักษณะของเส้นใย	14
2.7	แสดงผลของปริมาณเกลือ NaCl ที่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย	16
2.8	แสดงผลของอัตราการไหลที่มีต่อขนาดเม็ดยืดบนเส้นใยของพอลิคาโพรแลกแทม	19
2.9	แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะของเส้นใย	19
2.10	แสดงผลของระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใย ที่มีต่อลักษณะเส้นใยที่ได้	20
2.11	แสดงผลของความชื้นต่าง ๆ ที่มีผลต่อลักษณะของเส้นใย	22
2.12	แสดงเส้นใยที่มีรูพรุนของสารละลาย PLLA ในไดคลอโรมีเทน	23
2.13	แสดงเส้นใยจากกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตของ PVA ที่มีลักษณะแบน	23
2.14	แสดงกลไกการเกิดเส้นใยที่มีลักษณะคล้ายริบบิ้น	24
2.15	แสดงเส้นใยที่มีกิ่งก้านสาขาของ Poly(urethane urea)	24
2.16	แสดงขั้นตอนการทำงานของเครื่อง Scanning electron microscope (SEM)	26
2.17	แสดงเครื่อง Scanning electron microscope (SEM)	27
2.18	แสดง EDS สเปกตรัมของโลหะ MP35N	27
2.19	แสดงอุปกรณ์เก็บอากาศแบบพาสซีฟ	31
2.20	แสดงปฏิกิริยาการเกิดสีในการวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของไนไตรท์	33
4.1	แสดงลักษณะของอุปกรณ์รองรับเส้นใย (ฉากรองรับ)	47
4.2	แสดงการจัดอุปกรณ์ต่าง ๆ ในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต	47

รูป (ต่อ)	หน้า
4.3 แสดง Filter membrane ที่ได้มาจากการขึ้นรูปเส้นใยนาโนลงบนกระดาษกรอง โดยมีกระดาษกรองเป็นตัวค้ำจุน	48
4.4 แสดง Filter membrane ที่ได้มาจากการขึ้นรูปเส้นใยนาโน โดยไม่มีกระดาษกรองเป็นตัวค้ำจุน	48
4.5 แสดงภาพถ่าย SEM ของลักษณะและปริมาณของเส้นใยที่ได้ (ความเข้มข้นที่ใช้ 15 wt.%)	50
4.6 แสดงภาพถ่าย SEM ของความเข้มข้นของสารละลายในลอน 6 (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 15 kV และ 10 cm)	51
4.7 แสดงค่าการกระจายความถี่ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในลอน 6 ที่มีลักษณะเป็น Nonwoven mat ที่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายในลอน 6 (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 15 kV และ 10 cm)	52
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายในลอน 6 กับค่าเฉลี่ยของขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในลอน 6 (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 15 kV และ 10 cm)	53
4.9 แสดงภาพถ่าย SEM ของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 20 wt.% และ 10 cm)	54
4.10 แสดงค่าการกระจายความถี่ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในลอน 6 ที่มีลักษณะเป็น Nonwoven mat ที่ขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 20 wt.% และ 10 cm)	54
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้กับค่าเฉลี่ยของขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในลอน 6 (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 20 wt.% และ 10 cm)	55
4.12 แสดงภาพถ่าย SEM ของระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสาร กับอุปกรณ์รองรับเส้นใยของสารละลายในลอน 6 (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 20 wt.% และ 20 kV)	56
4.13 แสดงค่าการกระจายความถี่ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในลอน 6 ที่มีลักษณะเป็น Nonwoven mat ที่ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยของสารละลายในลอน 6 (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 20 wt.% และ 20 kV)	56

รูป (ต่อ)	หน้า
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยกับค่าเฉลี่ยของขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในลอน 6 (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 20 wt.% และ 20 kV)	57
4.15 แสดงภาพถ่าย SEM ของความเข้มข้นของสารละลายในลอน 6 (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 15 kV และ 10 cm)	58
4.16 แสดงค่าการกระจายความถี่ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในลอน 6 ที่มีลักษณะเป็น Nonwoven mat ที่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายในลอน 6 (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 15 kV และ 10 cm)	59
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายในลอน 6 กับค่าเฉลี่ยของขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในลอน 6 (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 15 kV และ 10 cm)	60
4.18 แสดงภาพถ่าย SEM ของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 20 wt.% และ 10 cm)	61
4.19 แสดงค่าการกระจายความถี่ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในลอน 6 ที่มีลักษณะเป็น Nonwoven mat ที่ขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 20 wt.% และ 10 cm)	61
4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้กับค่าเฉลี่ยของขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในลอน 6 (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 20 wt.% และ 10 cm)	62
4.21 แสดงภาพถ่าย SEM ของระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยของสารละลายในลอน 6 (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 20 wt.% และ 20 kV)	63
4.22 แสดงค่าการกระจายความถี่ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในลอน 6 ที่มีลักษณะเป็น Nonwoven mat ที่ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยของสารละลายในลอน 6 (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 20 wt.% และ 20 kV)	63
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยกับค่าเฉลี่ยของขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในลอน 6 (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 20 wt.% และ 20 kV)	64

รูป (ต่อ)	หน้า
4.24 แสดงการเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยของความเข้มข้นของสารละลายไนลอน 6 ที่ได้จากลักษณะของที่รองรับเส้นใยที่ต่างกัน	65
4.25 แสดงการเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยของความต่างศักย์ไฟฟ้าจากลักษณะของที่รองรับเส้นใยที่ต่างกัน	65
4.26 แสดงการเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยของระยะห่างจากลักษณะของรองรับเส้นใยที่ต่างกัน	65
4.27 แสดงภาพถ่าย SEM ของความเข้มข้นของสารละลายไนลอน 6 (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 20 kV และ 10 cm)	67
4.28 แสดงภาพถ่าย SEM ของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 15 wt.% และ 10 cm)	68
4.29 แสดงภาพถ่าย SEM ของระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยของสารละลายไนลอน 6 (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 15 wt.% และ 20 kV)	68
4.30 แสดงผลของความเข้มข้นที่มีต่อการเกิดการแตกของเส้นใยออกเป็นเส้นเล็ก ๆ (สภาวะที่ใช้ในการทดลองคือ 15 kV และ 10 cm)	69
4.31 แสดงการเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	70
4.32 แสดงการเปรียบเทียบขนาดและการกระจายตัวของผลึกเกลือและการเกาะติดของเกลือบนพื้นผิว	71
4.33 แสดงขนาดและการกระจายตัวของผลึกเกลือที่ความเข้มข้นของสารละลายดูดซับที่ประกอบด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.22 โมลต่อลิตรกับ โซเดียมไอโอไดด์ 0.52 โมลต่อลิตร (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ 20 wt.%, 20 kV และ 15 cm)	71
4.34 แสดงการเปรียบเทียบขนาดและการกระจายตัวของผลึกเกลือ (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 20 wt.%, 20 kV และ 15 cm)	72
4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการสปินเส้นใยไนลอนลงบนกระดาษกรองกับมวลแห้งของไนไตรท์	73
4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายดูดซับกับมวลแห้งของไนไตรท์	75
4.37 แสดงภาพถ่าย SEM ของการกระจายตัวของผลึกเกลือของแต่ละความเข้มข้น	76
4.38 แสดงองค์ประกอบต่าง ๆ ของความเข้มข้นของสารละลายดูดซับ	77
4.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายดูดซับน้ำหนัก	77
4.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่เก็บตัวอย่างกับมวลแห้งของไนไตรท์	78

รายการสัญลักษณ์

D	=	ระยะห่างระหว่างปลายหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใย
°C	=	องศาเซลเซียส
λ	=	ความยาวคลื่น
%	=	เปอร์เซ็นต์

ประมวลศัพท์และคำย่อ

AFM	=	Atomoc Force Microscopy
BET	=	Surface area and porosity analyzer
CAS	=	Cellulose Acetate Solution
CRT	=	Cathode Ray Tube
$C_{12}H_{16}Cl_2N_2$	=	N-1-naphthylethylene diamine dihydrochloride
$C_6H_7NO_3S$	=	Sulfanilic acid
CH_3OH	=	Methanol
cm	=	Centimetre
cm^3	=	Cubic centimeter
DI	=	(De-ionized water)
DMF	=	N,N- Dimethylformamide
EDS	=	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy
EVOH	=	Poly(ethylene-co-vinyl alcohol)
FESEM	=	Field Emission Scanning Electron Microscopy
g	=	Gram
g/mol	=	Gram per mole
GPC	=	Gel Permeation Chromatography
h	=	Hour
HNO_2	=	Nitrous acid
H_3PO_4	=	Phosphoric acid
kV	=	Kilovote
L	=	Liter
M	=	Molar
mA	=	Milliamp
mg	=	Milligram
m^2/g	=	Square metre per gram
mL	=	Millilitre
mm	=	Millimetre
nm	=	Nanometre
NaCl	=	Sodium Chloride

ประมวลศัพท์และคำย่อ (ต่อ)

NaI	=	Sodium iodide
NaNO ₂	=	Sodium nitrite
NO	=	Nitric oxide
N ₂ O	=	Nitrous oxide
N ₂ O ₂	=	Dinitrogen dioxide
N ₂ O ₃	=	Dinitrogen trioxide
N ₂ O ₄	=	Dinitrogen tetraoxide
N ₂ O ₅	=	Dinitrogen pentaoxide
NO ₂	=	Nitrogen dioxide
OM	=	Optical microscopy
PASA	=	Poly(aniline sulfonic acid)
PEO	=	Poly(ethylene oxide)
PTFE	=	Polytetrafluoroethylene
PVA	=	(Poly(vinyl alcohol))
P(LLA-CL)	=	Poly(L-lactid-co-caprolactone)
PDI	=	Polydispersity
ppm	=	Part per million
SEM	=	Scanning Electron Microscope
TBAC	=	Triethyl Benzyl Ammonium Chloride
THF	=	Tetrahydrofuran
TEM	=	Transmission Electron Microscope
UV	=	Ultra violet
wt%	=	Percent weight
μM	=	Micrometre
μg	=	Microgram

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันนาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) ได้มีบทบาทสำคัญต่อวิวัฒนาการของโลก เนื่องจากนาโนเทคโนโลยีเป็นเทคโนโลยีที่รวมศาสตร์ต่าง ๆ เข้าด้วยกัน และเกี่ยวข้องกับการสร้าง การสังเคราะห์วัสดุหรือผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตร (ประมาณ 10-100 นาโนเมตร) หรือเทียบเท่าระดับอนุภาคของโมเลกุลหรืออะตอม รวมถึงการจัดเรียงอะตอมและโมเลกุลในตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ ทำให้โครงสร้างของวัสดุมีคุณสมบัติพิเศษขึ้นไม่ว่าทางด้านฟิสิกส์ เคมี หรือชีวภาพ จึงได้มีการผลิตวัสดุที่มีโครงสร้างในระดับนาโนขึ้นมาเพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย [1, 2]

จากกระแสนาโนเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจจึงมีผู้พยายามทำการคิดค้นผลิตเส้นใยสังเคราะห์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระดับนาโนเมตรเรียกว่า “เส้นใยนาโน (Nanofibers)” ซึ่งมีข้อดีกว่าเส้นใยขนาดปกติคือ มีความเป็นรูพรุนสูง อัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของเส้นใยสูง และปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้ดีขึ้น จึงนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น การกรองอนุภาคขนาดต่ำกว่าไมครอน (Filtration of submicron particles) [3], หลอดเลือดเทียม (Vascular grafts) [4], วัสดุปิดแผล (Wound dressing) [5] เป็นต้น

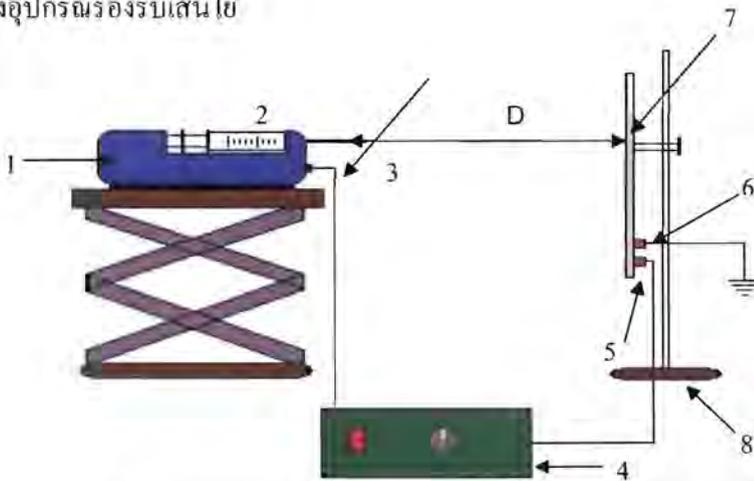
ปัจจุบันกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning process) เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการผลิตเส้นใยนาโนจากพอลิเมอร์ และเมื่อไม่นานมานี้ได้นำไปประยุกต์ใช้ในการทำเซรามิกส์ โลหะ และคอมโพสิต (พอลิเมอร์ เซรามิกส์ และวัสดุโลหะ)

เครื่องมือของกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ ดังนี้

1. อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของพอลิเมอร์
2. หลอดบรรจุสาร
3. ขั้วต่อสายไฟฟ้าขั้วบวก
4. เครื่องจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง
5. ขั้วต่อสายไฟฟ้าขั้วลบ
6. ขั้วต่อสายดิน

7. อุปกรณ์รองรับเส้นใย

8. ขาตั้งอุปกรณ์รองรับเส้นใย



รูปที่ 1.1 แสดงภาพเครื่องมือของกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

D = ระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใย

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต เช่น ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้ ความเข้มข้นหรือความหนืดของสารละลายที่ใช้ และระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใย เป็นต้น

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ การเตรียมเส้นใยพอลิเมอร์ระดับนาโน โดยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตและนำเส้นใยนาโนที่เตรียมได้ไปประยุกต์ใช้งานเป็นเมมเบรนในอุปกรณ์ตรวจวัดมลพิษในอากาศแบบพาสซีฟ

เทคโนโลยีการแยกด้วยการดูดซับคือ ในระหว่างการดูดซับนั้นองค์ประกอบของแก๊สจะเคลื่อนตัวจากกระแสของแก๊สที่ออกจากระบบ โดยเกาะติดอยู่ที่ผิวของของแข็ง โมเลกุลของแก๊สที่เคลื่อนที่เรียกว่า "Adsorbate" ในขณะที่ของแข็งที่ดูดติดเรียกว่า "Adsorbent" เช่น วิธีเก็บตัวอย่างแบบพาสซีฟ (Passive sampler) เป็นต้น

วิธีเก็บตัวอย่างแบบพาสซีฟ (Passive sampler) เป็นวิธีการในการตรวจวัดคุณภาพอากาศ โดยอาศัยการแพร่ของสารมลพิษที่ปนเปื้อนอยู่ในอากาศผ่านเข้าสู่กระดาษกรองที่ขุบสารละลายที่เหมาะสม แล้วนำกระดาษกรองที่ดูดซับแล้วไปทำการสกัด แล้วจึงนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารที่ต้องการทราบความเข้มข้นต่อไป



รูปที่ 1.2 แสดงภาพของอุปกรณ์เก็บอากาศแบบพาสซีฟ ที่มา : [6]

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการเตรียมเส้นใยระดับนาโนจากพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ในการทำอิเล็กโตรสปินนิงที่มีต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยนาโนที่ได้
- 1.2.3 เพื่อนำเส้นใยนาโนไปประยุกต์ใช้งานเป็นเมมเบรนสำหรับดูดซับสารมลพิษ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 พอลิเมอร์ที่นำมาศึกษา ได้แก่ ไนลอน 6 (Nylon-6)
- 1.3.2 ศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ในการทำอิเล็กโตรสปินนิงที่มีต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยนาโนที่ได้ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ ความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

- 1.4.1 ได้ข้อมูลที่แสดงผลของตัวแปรต่าง ๆ ในการทำอิเล็กโตรสปินนิงที่มีต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยนาโนที่ได้
- 1.4.2 ได้เส้นใยนาโนสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นเมมเบรนสำหรับดูดซับสารมลพิษ

บทที่ 2 ทฤษฎี

2.1 นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) [1, 2]

นาโนเทคโนโลยีคือ เทคโนโลยีที่รวมศาสตร์ต่าง ๆ เข้าด้วยกันและเกี่ยวข้องกับการจัดการ การสร้าง หรือการวิเคราะห์ วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องจักรและผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ในระดับนาโนเมตร เทียบเท่ากับระดับอนุภาคของโมเลกุลหรืออะตอม รวมถึงการออกแบบหรือการใช้เครื่องมือสร้างวัสดุ ที่อยู่ในระดับที่เล็กมากหรือการเรียงอะตอมและโมเลกุลในตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ ทำให้โครงสร้างของวัสดุมีคุณสมบัติพิเศษขึ้นไม่ว่าทางด้านฟิสิกส์ เคมี หรือชีวภาพ และสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อผู้ใช้สอยและเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจได้

2.2 เส้นใยนาโน (Nanofibers) [3]

เส้นใยนาโนเป็นนาโนเทคโนโลยีอีกรูปแบบหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก โดยเส้นใยนาโนเป็นเส้นใยที่มีรูปร่าง 1 มิติ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับนาโน (ปกติ 10-100 นาโนเมตร : nm)

2.2.1 วิธีการผลิตเส้นใยนาโน

เส้นใยนาโนของพอลิเมอร์สามารถผลิตได้จากเทคนิคต่าง ๆ ดังนี้ การดึงยืด (Drawing), การใช้แม่พิมพ์ (Template synthesis), การแยกเฟส (Phase separation), การประกอบในตัวเอง (Self-assembly) และกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning) การเปรียบเทียบหลักสำคัญต่าง ๆ ที่สัมพันธ์กับวิธีการผลิตเส้นใยนาโนของพอลิเมอร์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบเทคนิคที่ใช้ในการผลิตเส้นใยนาโน ที่มา : [3]

เทคนิค	ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี	ความสามารถขยายสเกล	การทำซ้ำได้	ความสะดวกในการผลิต	ความสามารถในการควบคุมขนาดและรูปร่างของเส้นใย
การดึงยึด	ห้องแล็บ	X	√	√	X
การใช้แม่พิมพ์	ห้องแล็บ	X	√	√	√
การแยกเฟส	ห้องแล็บ	X	√	√	X
การประกอบในตัวเอง	ห้องแล็บ	X	√	X	X
การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต	ห้องแล็บในอุตสาหกรรม	√	√	√	√

ตารางที่ 2.2 แสดงข้อดีและข้อเสียของแต่ละเทคนิค ที่มา : [3]

เทคนิค	ข้อดี	ข้อเสีย
การดึงยึด	ใช้เครื่องมือน้อย	เป็นเทคนิคที่ไม่ต่อเนื่อง
การใช้แม่พิมพ์	สามารถผลิตเส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่าง ๆ ได้ง่าย โดยการใช้แม่แบบที่ต่างกัน	
การแยกเฟส	ใช้เครื่องมือน้อย สามารถผลิตเส้นใยนาโนได้โดยสามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลได้ โดยการควบคุมความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์	จำกัดเฉพาะพอลิเมอร์บางชนิดเท่านั้น
การประกอบในตัวเอง	ได้เส้นใยนาโนขนาดเล็ก	กระบวนการซับซ้อน
การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต	มีประสิทธิภาพคุ้มค่ากับต้นทุน สามารถผลิตเส้นใยนาโนที่ยาวและมีความต่อเนื่องได้	สารละลายที่พุ่งออกมาไม่มีเสถียร

2.3 กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning process) [3, 7]

กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการผลิตเส้นใยนาโนจากพอลิเมอร์และได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ในการทำเซรามิกส์ โลหะ และคอมโพสิต (พอลิเมอร์ เซรามิกส์ และวัสดุโลหะ)

2.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

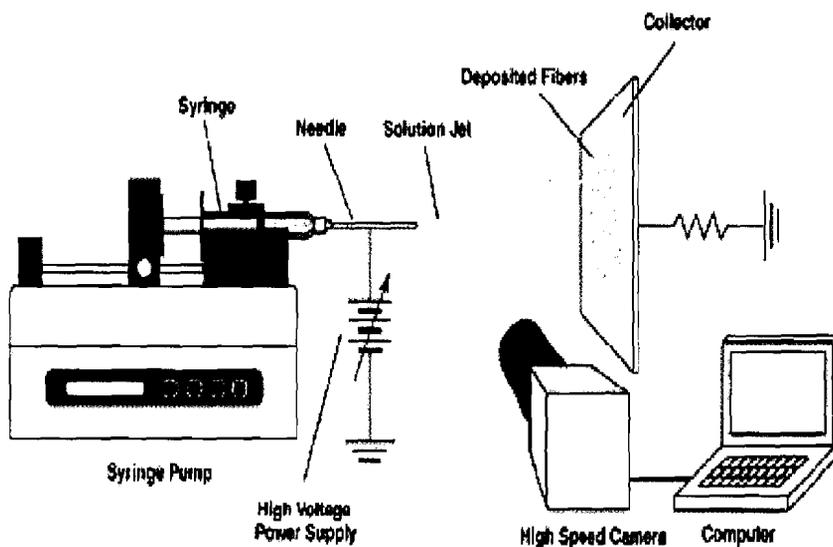
อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่

1. เครื่องกำเนิดศักย์ไฟฟ้าแรงสูง (High voltage power supply) ที่สามารถปรับค่าความต่างศักย์ได้ และกำลังเคลื่อนไฟฟ้าของเครื่องควรมีค่าน้อยในระดับมิลลิแอมป์ (mA) หรือต่ำกว่า เพื่อไม่ให้เกิดอันตรายเนื่องจากไฟฟ้าช็อตได้
2. หลอดแก้วสำหรับบรรจุสารละลายพอลิเมอร์ (Capillary tube) ซึ่งอาจเป็นปิเปตหรือหลอดฉีดยา โดยมีช่องเปิดเพื่อให้พอลิเมอร์ตัวอย่างสามารถไหลออกมาได้ ในกรณีที่ใช้หลอดฉีดยาสามารถใช้เข็มฉีดยาต่อตรงส่วนเปิด
3. อุปกรณ์โลหะที่ใช้รองรับเส้นใย (Collecting screen) ซึ่งมีได้หลายลักษณะ เช่น เป็นแผ่นหรือตะแกรงโลหะ เป็นลูกกลิ้งที่หุ้มด้วยแผ่นโลหะ ซึ่งสามารถควบคุมอัตราเร็วรอบการหมุนของลูกกลิ้งได้ หรืออาจเป็นอ่างสารละลาย (ในกรณีที่ต้องการให้เส้นใยตกตะกอนเหมือนกับในกรณีการปั่นเส้นใยแบบเปียก) เป็นต้น พอลิเมอร์ตัวอย่างอาจเป็นได้ทั้งสารละลายพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์หลอมเหลว การปั่นเส้นใยสามารถที่จะกระทำได้ที่ทั้งแนวราบ (โดยวางหลอดบรรจุให้ทำมุมเล็กน้อยกับแนวราบ เพื่อไม่ให้พอลิเมอร์ตัวอย่างหก) และแนวนอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนืดของพอลิเมอร์ตัวอย่างที่นำมาปั่นนั่นเอง

2.3.2 หลักการพื้นฐานของกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

ในการผลิตเส้นใยนาโนโดยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตจะให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงกับสารละลายพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์หลอมเหลว เพื่อให้สารละลายสามารถพุ่งออกจากปลายเข็มได้ โดยจะต่อขั้วประจุไฟฟ้าขั้วบวกเข้าไปในสารละลายพอลิเมอร์และขั้วลบเข้ากับฉากรับ และฉากรับมักจะต่อกับสายดิน (Ground) ด้วย เมื่อเริ่มให้ประจุไฟฟ้าแก่ของเหลวประจุจะเคลื่อนที่ไปบริเวณ

พื้นผิวของของเหลวนั้น เมื่อแรงของความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่งจะทำให้หยดของสารละลายพอลิเมอร์ที่บริเวณปลายเข็มฉีดยา ซึ่งมีลักษณะเป็นครึ่งวงกลมเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นลักษณะทรงกรวย เนื่องมาจากการผลักกันของประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้น รูปทรงกรวยนี้เรียกว่ากรวยของเทย์เลอร์ (Taylor's cone) เมื่อเพิ่มปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นไปอีก ส่วนยอดโคนจะมีการสะสมของประจุมากขึ้น ทำให้เกิดแรงผลักกันของประจุที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงทางไฟฟ้ามีค่ามากกว่าแรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์ ทำให้เกิดสายเจ็ต (Jet) ของสารละลายพอลิเมอร์พุ่งออกมา ขณะเดียวกันตัวทำละลายจะระเหยออกไปเหลือแต่เส้นใยพอลิเมอร์กองรวมกันอย่างไม่เป็นระเบียบ จนการรับมีลักษณะเป็นแบบเส้นใยที่ไม่ถักไม่ทอ (Nonwoven) ดังรูปที่ 2.1 ในช่วงที่พอลิเมอร์พุ่งออกมาหากมองด้วยตาเปล่าหรือถ่ายภาพด้วยกล้องที่ความเร็วไม่สูง จะเห็นสารละลายที่พุ่งออกมาเกิดการแตกออกเป็นเส้น ไปยังจากรองรับดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ก) แต่หากใช้กล้องความเร็วสูงในการถ่ายภาพการเคลื่อนที่ของสารละลายที่พุ่งออกมานี้ จะสามารถสังเกตเห็นการเคลื่อนที่ของสารละลายที่พุ่งออกมาเป็นเส้นตรงในช่วงแรก จากนั้นปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นจากประจุไฟฟ้าสถิตที่อยู่ภายในสารละลายที่พุ่งออกมาและแนวสนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของสารละลายที่พุ่งออกมาที่ไม่เสถียร ทำให้เกิดการเคลื่อนที่คล้ายกับการสะบัดตัวคล้ายไส้ โดยการสะบัดตัว (Bending instability) ของสารละลายที่พุ่งออกมานี้จะมีลักษณะการสะบัดเป็นสามมิติ โดยมีจุดกลางการสะบัดอยู่ที่จุดสิ้นสุดของการเคลื่อนที่ของสารละลายที่พุ่งออกมาที่เป็นเส้นตรง โดยที่แนวของการสะบัดจะมีลักษณะเป็นทรงกรวยดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ข)



รูปที่ 2.1 แสดงการจัดอุปกรณ์ของกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ที่มา : [3]



(ก) ถ่ายภาพด้วยกล้องที่ความเร็วไม่สูง



(ข) ถ่ายภาพด้วยกล้องที่ความเร็วสูง

รูปที่ 2.2 แสดงการเคลื่อนที่ของสารละลายที่พุ่งออกมาจากปลายเข็มฉีดยา ที่มา : [8]

2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อขนาดและรูปร่างของเส้นใยนาโน

ปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดและรูปร่างของเส้นใยมีทั้งปัจจัยของสารละลายพอลิเมอร์และปัจจัยของกระบวนการผลิต ส่วนอีกปัจจัยหนึ่งที่มีการศึกษากันค่อนข้างน้อยคือ ปัจจัยสภาพบรรยากาศขณะปั่นเส้นใย

2.3.3.1 ปัจจัยที่เกิดจากสารละลายพอลิเมอร์ (Polymer solution parameters)

คุณสมบัติของสารละลายพอลิเมอร์มีผลต่อกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตรวมทั้งยังมีผลต่อลักษณะและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ได้ สมบัติของสารละลายเหล่านี้ ได้แก่ น้ำหนักโมเลกุลและความหนืดของสารละลาย แรงตึงผิวของสารละลาย ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของตัวทำละลาย

2.3.3.1.1 น้ำหนักโมเลกุลและความหนืดของสารละลาย (Molecular weight and solution viscosity)

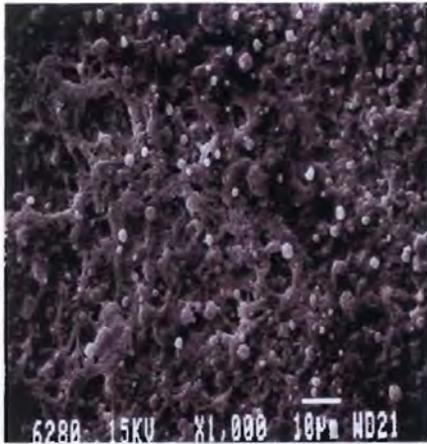
ปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์คือ น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งโดยทั่วไปเมื่อนำพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ๆ มาละลายในตัวทำละลาย พบว่าจะมีความหนืดมากกว่าพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า และสิ่งสำคัญในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตก็คือ สารละลายพอลิเมอร์ต้องมีน้ำหนักโมเลกุลและความหนืดที่มากเพียงพอจึงจะเกิดเป็นเส้นใยได้

ในระหว่างกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตนั้น สารละลายจะถูกฉีดออกมาจากปลายเข็มทำให้ โมเลกุลพอลิเมอร์เกิดการยืดตัวออกไปยังฉากรับและในระหว่างที่สารละลายพอลิเมอร์เกิดการยืด ออกไปนั้นจะมีการเกี่ยวพันกัน (Entanglement) ของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เพื่อป้องกันการขาด ออกจากกันของสารละลายที่กำลังพุ่งออกมา ซึ่งส่งผลให้สารละลายเกิดการพุ่งออกมาเป็นเส้นได้อย่าง ต่อเนื่อง

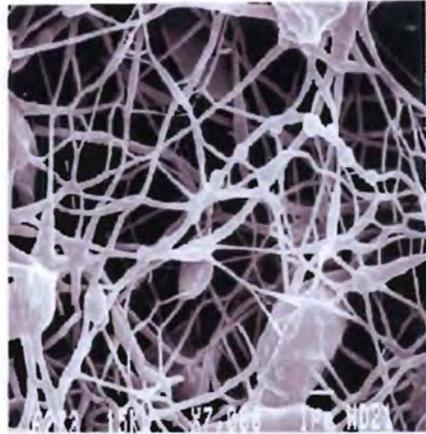
น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์จะแสดงถึงความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์และยังแสดงถึงความหนืด ของสารละลายพอลิเมอร์ได้อีกด้วย ดังนั้นหากต้องการเพิ่มความหนืดของสารละลายสามารถทำได้ โดยการเพิ่มความเข้มข้นของพอลิเมอร์ ซึ่งจะ ทำให้มีการเกี่ยวพันกันของสายโซ่พอลิเมอร์มากขึ้นจึง ทำให้สารละลายถูกฉีดออกมาเป็นเส้นอย่างต่อเนื่อง

การเกี่ยวพันกันของสายโซ่พอลิเมอร์มีความสำคัญต่อสารละลายพอลิเมอร์ที่พุ่งออกมา ซึ่งหากมี ปริมาณการเกี่ยวพันของสายโซ่พอลิเมอร์ที่น้อยมากแสดงว่ามีความหนืดของสารละลายต่ำมาก ๆ ดังนั้นสารละลายที่พุ่งออกมาจะขาดออกหรือแตกออกได้เป็นหยดเล็ก ๆ (Droplets) ของสารละลาย พอลิเมอร์ หรือเกิดเป็นเส้นใยที่มีเม็ดบิดเกิดขึ้น แต่หากมีความหนืดสูงเกินไปสารละลายอาจจะพุ่ง ออกจากปลายเข็มได้ยาก หรือสารละลายอาจแห้งติดปลายเข็มก่อนที่จะถูกฉีดออกไปยังฉากรับ

Kenawy และคณะ [9] พบว่าเมื่อสารละลายมีความหนืดที่ต่ำมาก ทำให้สารละลายที่พุ่งออกมาแตก ออกได้เป็นหยดเล็ก ๆ ดังรูปที่ 2.3 (ก) และเมื่อเพิ่มความหนืดขึ้นมาอีกเล็กน้อยแต่ยังอยู่ในช่วงความ หนืดที่ต่ำอยู่จะเกิดเป็นเส้นใยที่มีเม็ดบิด (Beaded fibers) ดังรูปที่ 2.3 (ข) และเมื่อความหนืดหรือความ เข้มข้นของสารละลายสูงขึ้นก็จะทำให้ได้เส้นใยที่มีเม็ดบิดน้อยลงจนได้เส้นใยที่มีผิวที่เรียบดังรูปที่ 2.3 (ค และ ง) ตามลำดับ และเมื่อความหนืดหรือความเข้มข้นของสารละลายสูงมากขึ้นก็จะทำให้ได้ เส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ขึ้นดังรูปที่ 2.3 (จ และ ฉ) ตามลำดับ



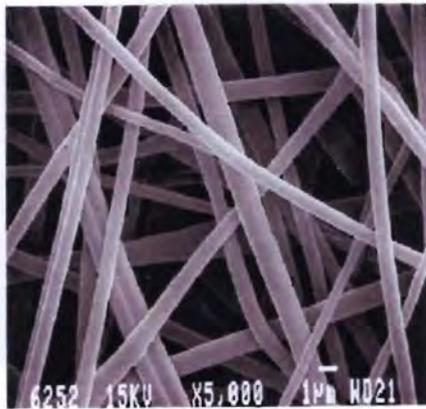
(ก) ความเข้มข้น 2.5 wt.%



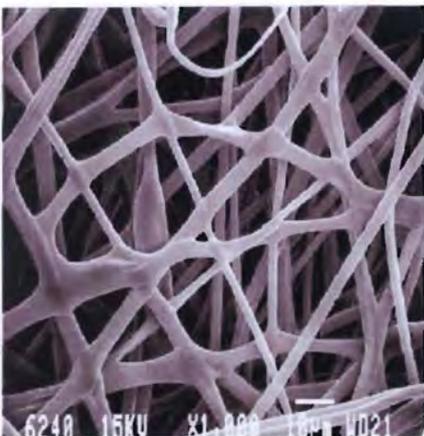
(ข) ความเข้มข้น 5 wt.%



(ค) ความเข้มข้น 7.5 wt.%



(ง) ความเข้มข้น 10 wt.%



(จ) ความเข้มข้น 15 wt.%



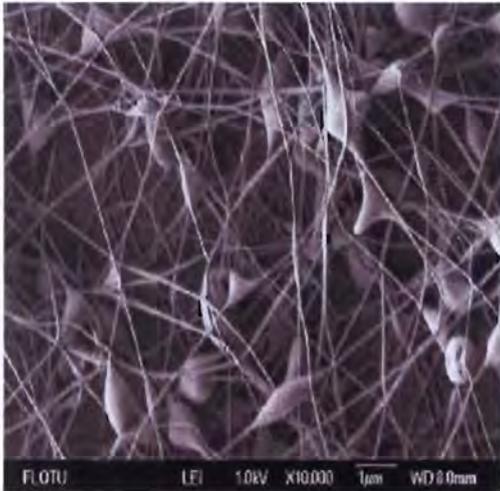
(ฉ) ความเข้มข้น 20 wt.%

รูปที่ 2.3 แสดงผลของความเข้มข้นต่าง ๆ ที่มีต่อลักษณะเส้นใยของพอลิเอทธิลีนโคไวนิลแอลกอฮอล์

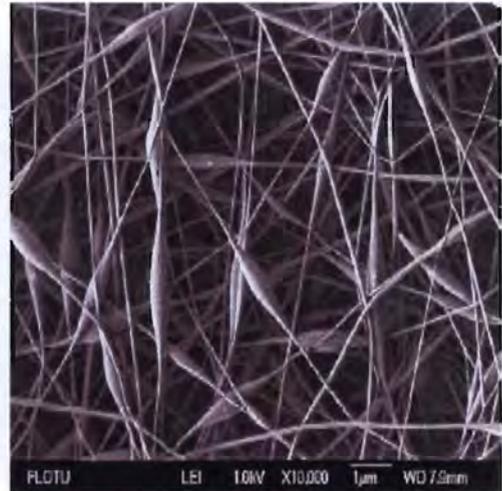
(Poly(ethylene-co-vinyl alcohol) : EVOH) ที่มา : [9]

เมื่อความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ค่อนข้างต่ำ มักพบว่าจะมีเม็ดบีดเกิดขึ้น และเมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงขึ้นจะทำให้รูปร่างของเม็ดบีดยืดออกได้มากขึ้นจนกระทั่งเป็นเส้นใยที่ค่อนข้างเรียบ

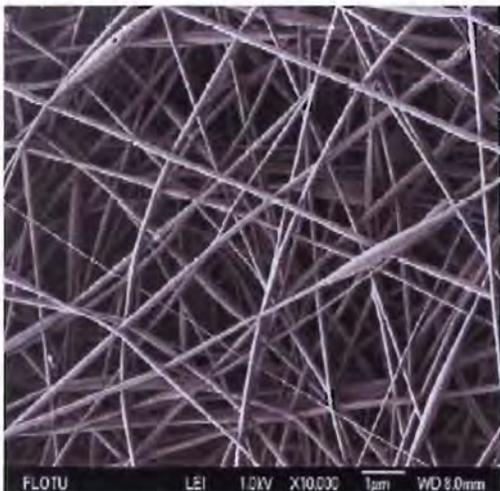
Morozov และคณะ [10] พบว่าสารละลายที่มีความหนืดค่อนข้างต่ำจะมีเม็ดบีดเกิดขึ้น และเมื่อความหนืดเพิ่มขึ้นรูปร่างของเม็ดบีดจะเกิดการยืดออกจนเปลี่ยนจากรูปร่างวงกลมไปเป็นวงรี และยังมีความหนืดเพิ่มมากขึ้นก็จะทำให้เม็ดบีดยืดออกได้มากขึ้น จนกระทั่งเป็นเส้นใยที่ค่อนข้างเรียบดังรูปที่ 2.4



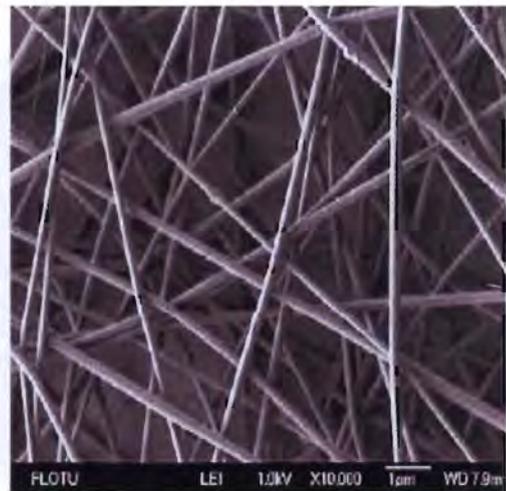
(ก) 1 wt.%



(ข) 1.5 wt.%



(ค) 2 wt.%



(ง) 3 wt.%

รูปที่ 2.4 แสดงผลของความเข้มข้นที่มีต่อเส้นใยพอลิเอทรีนออกไซด์ (Poly(ethylene oxide) : PEO)

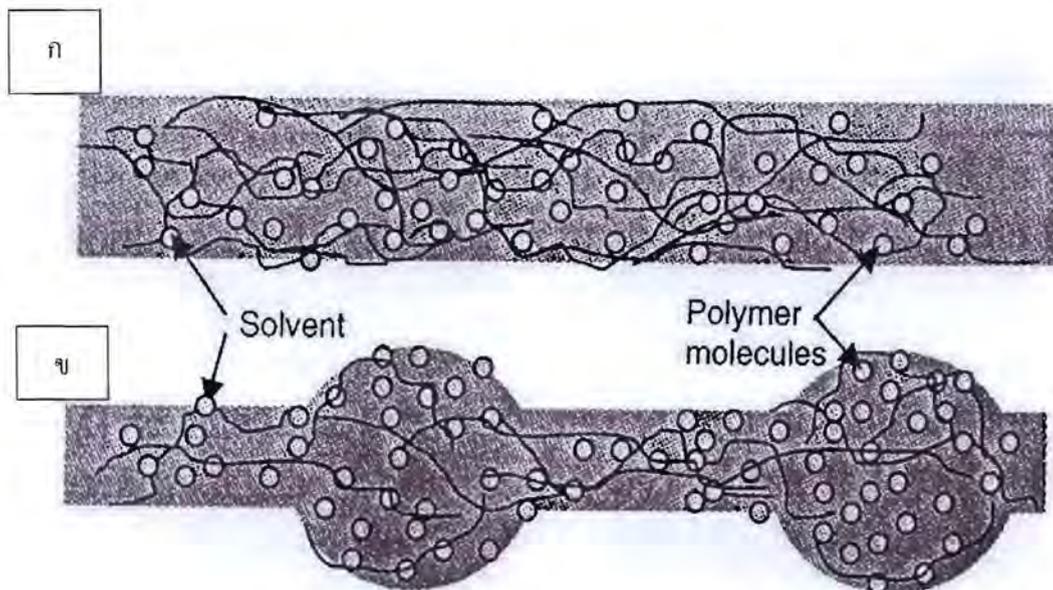
ที่มา : [10]

ที่ความหนืดต่ำจะมีปริมาณของโมเลกุลของตัวทำละลายมากและการเกี่ยวพันกันของสายโซ่พอลิเมอร์มีปริมาณน้อย ซึ่งหมายความว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงจะเป็นแรงตึงผิวของของเหลวซึ่งเป็นผลทำให้เกิดเม็ดบิดขึ้น และเมื่อความหนืดสูงขึ้นจะทำให้การเกี่ยวพันกันของสายโซ่มีผลมากขึ้นจึงทำให้สารละลายพอลิเมอร์ที่ถูกฉีดออกมาสามารถยืดออกเป็นเส้นใยเรียบได้อย่างเต็มที่ ทำให้โมเลกุลของตัวทำละลายกระจายอยู่ตามสายโซ่พอลิเมอร์ และเมื่อความหนืดสูงขึ้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ได้จะมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากสารละลายมีความต้านทานต่อการยืดออกสูงและมีปริมาณเนื้อพอลิเมอร์ถูกถ่ายเทไปมากขึ้น

แรงกระทำระหว่างสารละลายและประจุบนสารละลายที่ถูกฉีดออกมาจะเป็นตัวกำหนดการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ได้ และในระหว่างการทำอิเล็กโตรสปินนิงอาจเกิดเส้นที่แยกออกมาจากเส้นหลัก (Branched fibrils) ซึ่งทำให้ได้เส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กลงที่ความหนืดนั้นได้ ปรากฏการณ์นี้สามารถนำไปอธิบายการกระจายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ค่อนข้างแตกต่างกันอย่างชัดเจนได้ อย่างไรก็ตาม ในบางกรณีเมื่อความหนืดของสารละลายมีค่าสูงมากพอก็จะสามารถไปขัดขวางการเกิดเส้นที่แยกออกมาจากเส้นหลักได้จึงเป็นผลทำให้เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ขึ้น

2.3.3.1.2 แรงตึงผิวของสารละลาย (Surface tension)

การที่จะทำให้สารละลายถูกฉีดออกไปยังฉากรับได้จะต้องทำให้แรงผลักดันของประจุไฟฟ้าภายในสารละลายพอลิเมอร์สามารถเอาชนะแรงตึงผิวของสารละลายให้ได้ โดยที่แรงตึงผิวของสารละลายจะทำให้พื้นที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรลดลง ดังนั้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโมเลกุลตัวทำละลายจะทำให้มีแนวโน้มสูงในการเกิดเม็ดบิด และหากความหนืดมากขึ้นจะทำให้แรงกระทำระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์และตัวทำละลายมากขึ้น ดังนั้นเมื่อสารละลายถูกฉีดออกโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์จะเกิดการยึดตัวออกทำให้ตัวทำละลายสามารถกระจายไปทั่วโมเลกุลของสายโซ่ ทำให้ปริมาณตัวทำละลายมีแนวโน้มที่ลดลงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงแรงกระทำระหว่าง โมเลกุลของพอลิเมอร์และตัวทำละลาย (ก) ที่ความหนืดสูง โมเลกุลของตัวทำละลายกระจายอยู่รอบ ๆ สายโซ่พอลิเมอร์อย่างสม่ำเสมอ (ข) ที่ความหนืดต่ำ โมเลกุลของตัวทำละลายรวมตัวกัน เนื่องจากผลของแรงตึงผิว ที่มา : [3]

การลดแรงตึงผิวของสารละลายอาจทำได้โดยใช้สารละลายพอลิเมอร์ที่มีความหนืดที่ต่ำลง หรือทำการเติมตัวทำละลายที่มีค่าแรงตึงผิวต่ำ เช่น เอทานอล เมทานอล เป็นต้น ลงไปผสม หรือทำการเติมสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ลงไป ก็จะได้เส้นใยที่เรียบสม่ำเสมอเช่นกัน

Fong และคณะ [11] พบว่าเมื่อทำการเตรียมสารละลายพอลิเอทิลีนออกไซด์ โดยการนำพอลิเอทิลีนออกไซด์ละลายในน้ำจะได้เส้นใยที่มีเม็ดบิด แต่ถ้าใส่เอทานอลลงไปผสมกับน้ำ โดยปริมาณเอทานอลที่ใส่ลงไปมีปริมาณมากขึ้น ทำให้ปริมาณเม็ดบิดลดลงจนได้เส้นใยที่เรียบและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ขึ้นด้วยดังรูปที่ 2.6



(ก) อัตราส่วนของเอทานอลต่อน้ำเท่ากับ 0.000



(ข) อัตราส่วนของเอทานอลต่อน้ำเท่ากับ 0.054



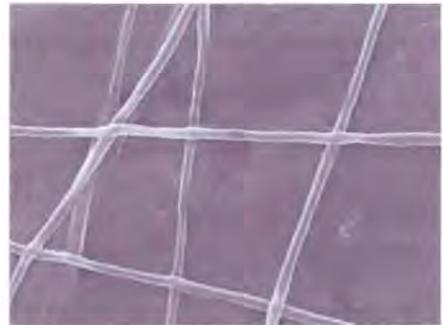
(ค) อัตราส่วนของเอทานอลต่อน้ำเท่ากับ 0.115



(ง) อัตราส่วนของเอทานอลต่อน้ำเท่ากับ 0.260



(จ) อัตราส่วนของเอทานอลต่อน้ำเท่ากับ 0.448



(ฉ) อัตราส่วนของเอทานอลต่อน้ำเท่ากับ 0.702

รูปที่ 2.6 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของเอทานอลต่อน้ำที่มีต่อลักษณะของเส้นใย ที่มา : [11]

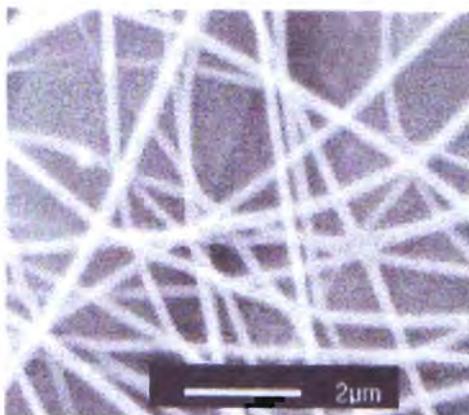
2.3.3.1.3 การนำไฟฟ้าของสารละลาย (Solution conductivity)

กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นกระบวนการที่ใช้ในการดึงยัดของสารละลายพอลิเมอร์โดยอาศัยแรงผลักรันของประจุที่มีผิวหน้าของสารละลายพอลิเมอร์ ดังนั้นหากสารละลายมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงขึ้นก็จะเกิดประจุบนสารละลายพอลิเมอร์ที่มากขึ้น การดึงยัดจึงเพิ่มมากขึ้น ทำให้สารละลายถูกฉีดออกไปยังฉากรับได้ แต่หากการยัดของสารละลายไม่สมบูรณ์ก็จะทำให้เกิดเม็ดบีดได้ ดังนั้นการเติมเกลือหรือพอลิอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) ปริมาณเล็กน้อยลงในสารละลาย ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าที่สูงขึ้น ส่งผลให้ประจุในสารละลายมากขึ้น ถ้าแรงผลักระหว่างประจุมากขึ้นจะทำให้สารละลายเกิดการยัดออกไปได้มากขึ้น ซึ่งทำให้ได้เส้นใยที่มีผิวเรียบขึ้นและมีขนาดเส้นผ่าน

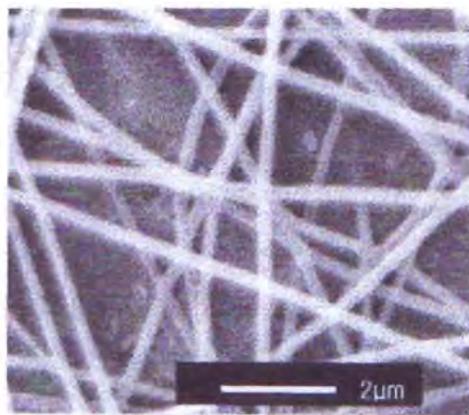
ศูนย์กลางของเส้นใยที่เล็กลงด้วย แต่อย่างไรก็ตาม ต้องพิจารณาที่ค่าความหนืดของสารละลายด้วย ซึ่งหากแรงที่เกิดจากความหนืดสูงมากอาจต้านแรงทางไฟฟ้าได้ ขนาดเส้นใยก็อาจไม่เล็กลง และที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ ค่าการนำไฟฟ้าในสารละลายพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความต่างศักย์ที่ใช้เพื่อให้สารละลายถูกฉีดออกมาได้ก็จะลดลงด้วย ส่วนผลกระทบด้านอื่น ได้แก่ ทำให้ความไม่เสถียรของการโค้งงอสูง จึงทำให้บริเวณที่รองรับเส้นใยกว้างขึ้น แต่เส้นใยที่ได้จะมีผิวเรียบมากขึ้นด้วย

ขนาดของไอออนที่เติมลงไปในสารละลายมีผลต่อลักษณะของเส้นใยที่ได้ดังนี้ เมื่อเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride : NaCl) ลงในสารละลายจะได้เส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กมาก ในขณะที่เมื่อเติมเกลือที่มีไอออนขนาดใหญ่ เช่น โพแทสเซียม ไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Potassium dihydrogenphosphate : KH_2PO_4) ลงในสารละลายพบว่าเส้นใยที่ได้มีเส้นผ่านศูนย์กลางค่อนข้างใหญ่ และเมื่อเติมเกลือโซเดียม ไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Sodium dihydrogenphosphate : NaH_2PO_4) ลงในสารละลายจะได้เส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดปานกลาง เนื่องจากโซเดียมไอออนและคลอไรด์ไอออนมีรัศมีอะตอมเล็กกว่าโพแทสเซียมไอออนและฟอสเฟตไอออน ทำให้มันมีการเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้าภายนอกได้มากกว่า เป็นผลให้สารละลายที่ถูกฉีดออกมามีแรงยึดมากขึ้นเส้นใยที่ได้จึงมีขนาดเล็ก และหากต้องการเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายพร้อมกับลดแรงตึงผิวของสารละลายสามารถทำได้โดยการเติมสารลดแรงตึงผิว เช่น ไตรเอทิล เบนซิล แอมโมเนียมคลอไรด์ (Triethyl benzyl ammonium chloride : TBAC) ลงไป ซึ่งทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ได้มีขนาดลดลงด้วย

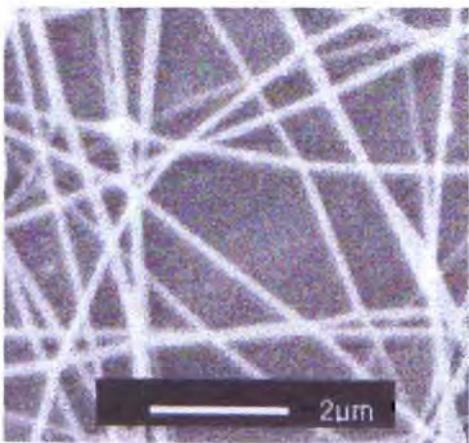
Zhang และคณะ [12] พบว่าเมื่อทำการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ลงไปในสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol) : PVA) สารละลายมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ก็จะเกิดประจุบนสารละลายพอลิเมอร์ที่มากขึ้น การดึงยึดจึงเพิ่มมากขึ้น ทำให้สารละลายถูกฉีดออกไปยังฉากรับได้ส่งผลให้เส้นใยที่ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ลดลงดังรูปที่ 2.7



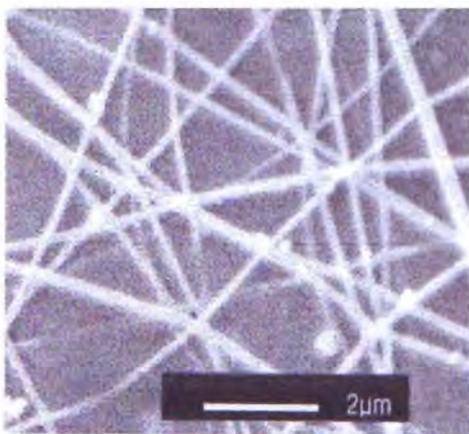
(ก) ปริมาณเกลือ NaCl 0.05%



(ข) ปริมาณเกลือ NaCl 0.10%



(ค) ปริมาณเกลือ NaCl 0.15%



(ง) ปริมาณเกลือ NaCl 0.20%

รูปที่ 2.7 แสดงผลของปริมาณเกลือ NaCl ที่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ที่มา : [12]

หากต้องการเพิ่มการนำไฟฟ้าด้วยวิธีอื่น อาจทำได้โดยการเปลี่ยนค่า pH ของสารละลายที่จะทำให้ไอเล็กโตรสปีนนิ่ง เช่น สารละลายเซลลูโลสอะซิเตท (Cellulose acetate solution : CAS) ภายใต้สภาวะเบส จะให้เส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับในสภาวะที่เป็นกลาง เนื่องจากเซลลูโลสอะซิเตทจะเกิดการ Deacetylation โดยใช้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ภายใต้สภาวะเบสได้ ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น จึงทำให้สารละลายถูกดึงให้อีคออกได้มากขึ้นด้วย

2.3.3.1.4 ผลของค่าไดอิเล็กตริกของตัวทำละลาย (Dielectric effect of solvent)

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) ของตัวทำละลายมีผลสำคัญต่อการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเช่นกัน สารละลายที่มีสมบัติไดอิเล็กตริกสูงจะสามารถเปลี่ยนแปลงลักษณะเส้นใยได้ เช่น การลดปริมาณการเกิดเม็ดบีคบนเส้นใย เป็นต้น และยังมีผลต่อขนาดเส้นใยโดยเส้นใยอาจมีขนาดเล็กลง

ดังนั้นเราอาจเติมตัวทำละลายที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง ๆ ลงไปในสารละลาย ก็อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ตัวทำละลายที่นิยมผสมลงไป เช่น N,N - Dimethylformamide (DMF) เป็นต้น

2.3.3.2 ปัจจัยของกระบวนการผลิต (Process condition)

ตัวแปรที่สำคัญต่อกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตอีกอย่างหนึ่งก็คือ ปัจจัยภายนอกที่ส่งผลต่อสารละลายที่ถูกฉีดออกมาจากปลายเข็มแล้ว ได้แก่ ความต่างศักย์ไฟฟ้า อัตราการไหลของสารละลาย อุณหภูมิของสารละลาย ชนิดของฉากรองรับเส้นใย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มที่ใช้ และระยะระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใย ซึ่งปัจจัยดังกล่าวเหล่านี้มีผลต่อลักษณะและขนาดของเส้นใยน้อยกว่าปัจจัยของสารละลายพอลิเมอร์

2.3.3.2.1 ความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage)

องค์ประกอบที่สำคัญยิ่งในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ได้แก่ การนำค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงมาประยุกต์ใช้กับสารละลาย ถ้ามีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงจะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุบนสารละลายและเกิดสนามไฟฟ้าภายนอกขึ้นควบคู่ไปด้วย กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตจะเริ่มต้นขึ้นเมื่อแรงทางไฟฟ้าในสารละลายสามารถเอาชนะแรงตึงผิวของสารละลายได้ และยิ่งขึ้นกับอัตราการไหลของสารละลายที่ออกมายังปลายเข็มอีกด้วย ซึ่งหากอัตราการไหลของสารละลายช้ากว่าการยืดออกของสารละลายไปยังฉากรับจะทำให้ Taylor cone หดเข้าไปเกิดในเข็มได้

ทั้งค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้เข้าไปและสนามไฟฟ้าภายนอกมีผลต่อการดึงยืดและความเร่งของสารละลายที่พุ่งออกมาจากปลายเข็ม ซึ่งส่งผลกระทบต่อขนาดและรูปร่างของเส้นใยที่ได้ ส่วนมากค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงจะทำให้สารละลายเกิดการยืดออกได้มาก เนื่องจากมีแรงकुลอมบ์ที่มากขึ้นในสารละลายที่พุ่งออกมา ส่งผลให้ได้เส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลง รวมทั้งยังทำให้อัตราการระเหยของตัวทำละลายสูงขึ้น ทำให้ได้เส้นใยที่แห้งขึ้นอีกด้วย ถ้าหากใช้สารละลายที่มีความหนืดต่ำแต่ยังคงใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงก็จะทำให้เกิดเส้นใยแยกออกมาจากเส้นหลักได้เป็นผลให้เส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้มีขนาดเล็กลง

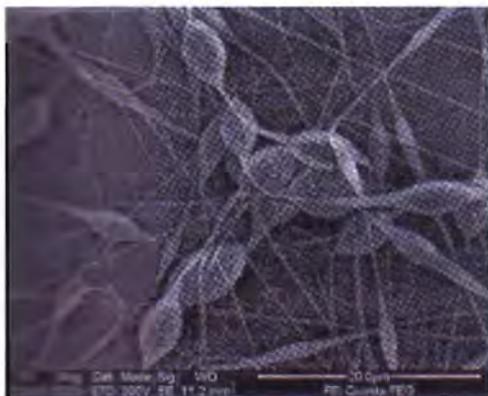
ปัจจัยอื่นที่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ได้แก่ ระยะเวลาที่สารละลายพุ่งออกมาจากปลายเข็มไปยังฉากรับ หากใช้เวลานานเส้นใยจะมีการยืดตัวได้มากซึ่งก่อนที่จะไปกองอยู่บนฉากรองรับ ดังนั้นการใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำ ๆ จะเป็นการลดความเร่งของสารละลายที่พุ่งออกมาจาก

ปลายเข็มและทำให้สนามไฟฟ้าอ่อนลง แต่มันจะไปเพิ่มระยะเวลาในการยึดของสารละลายที่พุ่งออกมาจากปลายเข็มให้มากขึ้น ส่งผลให้ได้เส้นใยที่มีผิวเรียบ

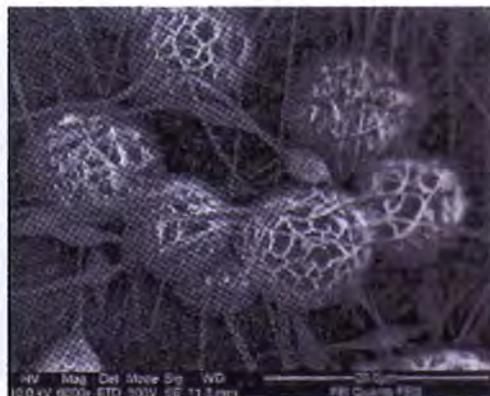
ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงไม่เพียงแต่ส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพของเส้นใยเท่านั้น แต่ยังส่งผลถึงความถี่ของเส้นใยพอลิเมอร์อีกด้วย โดยสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตจะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์ในสารละลายเกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึกในเส้นใย แต่อย่างไรก็ตาม หากใช้ความต่างศักย์สูงเกินไปจะทำให้ความถี่ของผลึกลดลงได้ เนื่องจากค่าความต่างศักย์ที่สูงเกินไป ทำให้ความถี่ของสารละลายที่พุ่งออกมาจากปลายเข็มมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาที่ใช้ในการยึดของสารละลายลดลง เพราะว่าโมเลกุลของพอลิเมอร์ต้องการเวลาในการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ การลดระยะเวลาจะทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์ไปติดค้างมากกว่าก่อนจะเกิดการจัดเรียงตัว ดังนั้นการใช้ระยะเวลาที่เหมาะสมทำให้เพิ่มความถี่ของเส้นใยได้มากขึ้น

2.3.3.2.2 อัตราการป้อนของสารละลาย (Feed rate)

อัตราการป้อนของสารละลายหรืออัตราการไหลของสารละลายจะเป็นตัวกำหนดปริมาณของสารละลายที่เพียงพอต่อกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ซึ่งจะต้องสัมพันธ์กับความต่างศักย์เพื่อที่จะยังคงทำให้เกิด Taylor cone อยู่ได้ เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารละลายจะเป็นผลทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยหรือขนาดของเม็ดปัดมีขนาดใหญ่ขึ้นดังรูปที่ 2.8 เนื่องจากมีสารละลายปริมาณมากอยู่ที่ปลายเข็ม แต่อย่างไรก็ตาม ยังคงมีข้อจำกัดเกี่ยวกับการเพิ่มขึ้นของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย เนื่องจากอัตราการป้อนสูง เมื่ออัตราการป้อนสูงจะทำให้เส้นใยที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากปริมาตรมากขึ้น และที่สำคัญเมื่อใช้อัตราการป้อนสูงจะต้องใช้เวลานานในการที่จะทำให้ได้เส้นใยที่แห้งจึงเป็นผลทำให้ตัวทำละลายระเหยออกไปไม่ทันส่งผลให้เส้นใยเกิดการหลอมรวมกัน จึงทำให้ได้เส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้น ดังนั้นถ้าต้องการให้ได้เส้นใยที่เล็กลงจึงควรควบคุมอัตราการไหลให้พอเหมาะ ไม่ควรสูงมากเกินไป



(ก) อัตราการไหล 0.5 ml/hr.

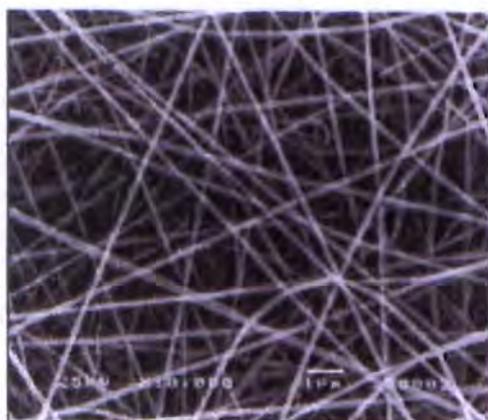


(ข) อัตราการไหล 2.0 ml/hr.

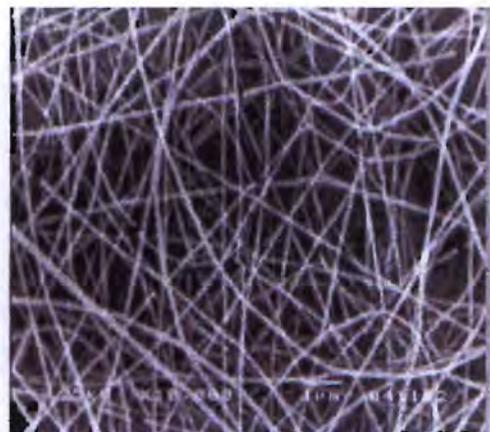
รูปที่ 2.8 แสดงผลของอัตราการไหลที่มีต่อขนาดเม็ดบีบบนเส้นใยของพอลิอิมิดาโพลแลกแทม ที่มา : [3]

2.3.3.2.3 อุณหภูมิ (Temperature)

การเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายส่งผลให้อัตราการระเหยมากขึ้นและความหนืดของสารละลายลดลง Chidchanok Mit-uppatham และคณะ [13] เมื่อทำการกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตของพอลิเอไมด์-6 (Polyamide-6) ที่อุณหภูมิสูงจะได้เส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายจะส่งผลให้อัตราการระเหยมากขึ้น จึงมีผลต่อปริมาณของโมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้การเกี่ยวพันของสายโซ่พอลิเมอร์มีค่าลดลง ส่งผลให้สารละลายมีความหนืดที่ต่ำลง และเมื่อความหนืดลดลงแรงทางประจุจะผลักดันให้สารละลายสามารถยืดออกได้ดีขึ้นจึงเป็นผลทำให้ได้เส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลงดังรูปที่ 2.9 และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะไปเพิ่มอัตราการเคลื่อนที่ของโมเลกุล ทำให้แรงทางประจุสามารถดึงสารละลายให้ยืดออกไปได้มากขึ้น



(ก) อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



(ข) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

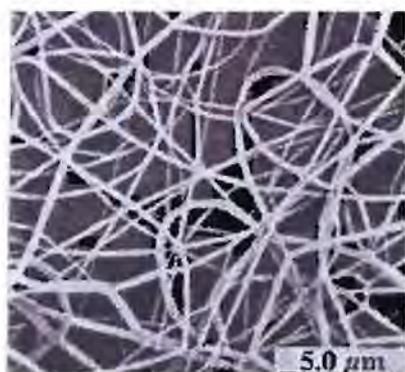
รูปที่ 2.9 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะของเส้นใย ที่มา : [13]

2.3.3.2.4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็ม (Diameter of needle)

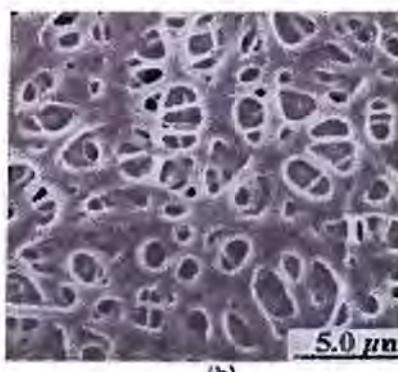
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเข็มที่ใช้จะมีผลต่อกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มที่ใช้มีขนาดเล็กจะทำให้ได้เส้นใยที่มีขนาดเล็กลง เนื่องจากเมื่อขนาดของเข็มมีขนาดเล็กลง ขนาดของหยดสารละลายที่อยู่ปลายเข็มจะเล็กลงด้วย ทำให้แรงตึงผิวของหยดสารละลายเพิ่มมากขึ้น หากปริมาณศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับสารละลายที่เท่ากัน การจะเกิดเป็นสารละลายที่พุ่งออกมาได้จึงต้องการแรงทางไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น จากผลดังกล่าวสารละลายที่พุ่งออกมาจึงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ลดลง และมีระยะเวลาที่มากพอที่จะเกิดการดึงยืดเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มมีขนาดเล็กจนเกินไปจะทำให้สารละลายไม่สามารถไหลออกมาที่ปลายเข็มได้

2.3.3.2.5 ระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใย (Distance from syringe tip to a grounded target)

การเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยมีผลโดยตรงต่อระยะเวลาในการยืดและความแรงของสนามไฟฟ้า ในการที่จะผลิตเส้นใยเดี่ยว ๆ จะต้องให้สารละลายที่พุ่งออกมามีระยะเวลาที่มากเพียงพอที่จะทำให้ตัวทำละลายระเหยออกไปเพื่อให้ได้เส้นใยที่แห้ง หากลดระยะห่างลงจะทำให้การเคลื่อนที่ของสารละลายที่พุ่งออกมาสั้นลง ทำให้ตัวทำละลายระเหยไม่หมด เส้นใยที่ได้ก็จะหลอมรวมกันดังรูปที่ 2.10



(ก) 2 เซนติเมตร



(ข) 0.5 เซนติเมตร

รูปที่ 2.10 แสดงผลของระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยที่มีต่อลักษณะเส้นใยที่ได้ ที่มา : [3]

การที่ตัวทำละลายระเหยไม่หมด และเกิดการเชื่อมต่อกันของแผ่นเส้นใยนี้อาจเป็นผลดีต่อการนำไปใช้งานในการทำเป็นโครงร่างเทียมสำหรับเนื้อเยื่อเทียมที่ต้องการให้มีความพรุนตัว และมีความแข็งแรงสูง

การเปลี่ยนแปลงระยะห่างอาจจะมีหรือไม่มีผลต่อลักษณะและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารละลาย แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อระยะห่างที่ใช้ลดลงอาจทำให้มีเม็ดปึกเกิดขึ้น เนื่องจากสนามไฟฟ้าระหว่างปลายเข็มกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยมีค่ามากขึ้น

ในบางกรณีการเพิ่มระยะห่างจะทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยลดลง เนื่องจากระยะห่างที่มากขึ้น สารละลายจะมีเวลาในการยืดออกมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มระยะห่างอาจทำให้ขนาดของเส้นใยเพิ่มขึ้นก็ได้ เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่อ่อนลงทำให้สารละลายยืดตัวได้น้อยลง

2.3.3.3 ปัจจัยของสภาพบรรยากาศขณะปั่นเส้นใย

การศึกษาผลปัจจัยของสภาพบรรยากาศขณะปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่มีต่อลักษณะและขนาดของเส้นใยมีค่อนข้างน้อย แต่มีงานวิจัยหลายแห่งพบว่าปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อลักษณะของเส้นใยเหมือนกัน ปัจจัยดังกล่าว เช่น ความชื้น ชนิดของบรรยากาศ และความดันอากาศ เป็นต้น ซึ่งที่ความชื้นสูงจะมีลักษณะเกิดเป็นรูพรุนบนเส้นใยได้

Casper และคณะ [14] พบว่าเมื่อใช้พอลิซัลโฟน (Polysulfone : PS) ละลายในเตตระไฮโดรฟลูอเรน (Tetrahydrofuran : THF) แล้วทำการปั่นเส้นใยในบรรยากาศที่มีความชื้นน้อยกว่า 50 % พบว่าเส้นใยที่ได้จะมีผิวที่เรียบสูง แต่เมื่อมีความชื้นเพิ่มขึ้น พบว่าจะเกิดรูพรุนที่มีลักษณะเป็นวงกลมบนแผ่นเส้นใยที่ปั่นได้ ซึ่งขนาดและความลึกของรูพรุนจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งรวมตัวกันเป็นกลุ่มใหญ่ดังรูปที่ 2.11 ทั้งนี้ความชื้นมีผลต่ออัตราการระเหยของตัวทำละลายในสารละลายพอลิเมอร์ ถ้าทำการปั่นเส้นใยในบรรยากาศที่มีความชื้นต่ำ ตัวทำละลายที่ระเหยได้เร็วก็จะแห้งได้อย่างรวดเร็วขึ้น



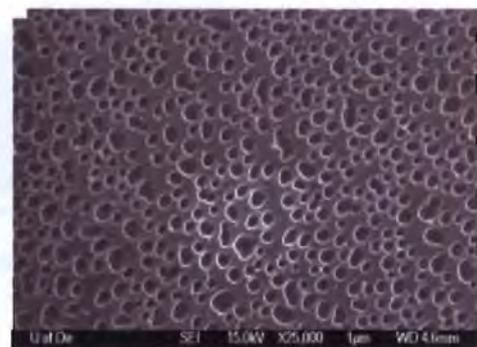
(ก) ความชื้น < 25 %



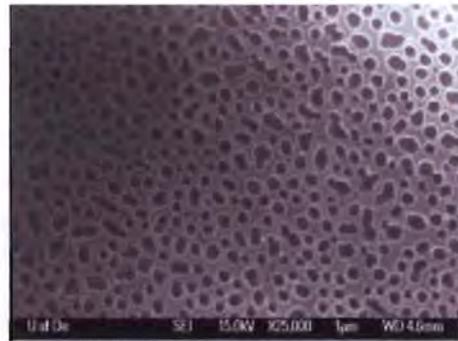
(ข) ความชื้น 31-38 %



(ค) ความชื้น 40-45 %



(ง) ความชื้น 50-59 %



(จ) ความชื้น 60-72 %

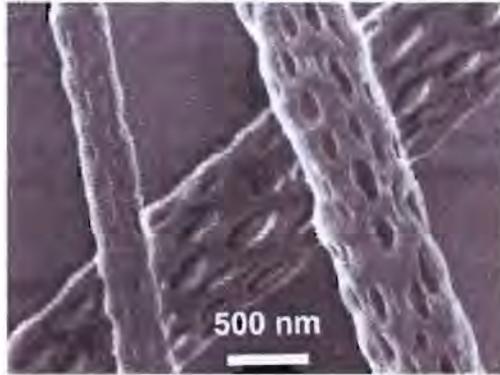
รูปที่ 2.11 แสดงผลของความชื้นต่าง ๆ ที่มีผลต่อลักษณะของเส้นใย ที่มา : [14]

2.3.4 ลักษณะและรูปร่างของเส้นใยนาโน (Nanofiber morphology)

เมื่อสภาวะในการทำกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ได้ลักษณะและรูปร่างของเส้นใยนาโนที่แตกต่างกันออกไป ปัจจัยบางอย่างมีความสัมพันธ์กับการเกิดเม็ดปืดในเส้นใยคั้งที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น อย่างไรก็ตาม รูปแบบของเส้นใยยังมีมากกว่านั้น ซึ่งในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตสามารถผลิตเส้นใยนาโนที่มีลักษณะต่าง ๆ ที่สำคัญอื่น ๆ อีก ได้แก่

2.3.4.1 เส้นใยที่มีรูพรุน (Porous nanofibers)

เส้นใยที่มีรูพรุนเกิดจากการที่มีความชื้นในระหว่างกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีปัจจัยอื่นที่มีผลทำให้เกิดรูพรุนในเส้นใยนาโนอีกด้วย



รูปที่ 2.12 แสดงเส้นใยที่มีรูพรุนของสารละลาย PLLA ในไดคลอโรมีเทน ที่มา : [3]

2.3.4.2 เส้นใยที่มีลักษณะแบนหรือมีลักษณะคล้ายริบบิ้น (Flattened or ribbon-like fibers)

เส้นใยลักษณะนี้เกิดจากการใช้สภาวะในการทำกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่แน่นอน ซึ่งการเกิดลักษณะเช่นนี้เนื่องมาจากอัตราการระเหยของตัวทำละลายในระหว่างกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต



รูปที่ 2.13 แสดงเส้นใยจากกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตของ PVA ที่มีลักษณะแบน ที่มา : [3]

สำหรับเส้นใยที่มีลักษณะแบนของ PVA นี้เกิดขึ้นจากการใช้ PVA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลและความเข้มข้นสูง ทำให้อัตราการระเหยของน้ำที่ใช้เป็นตัวทำละลายลดลง เนื่องจากมีความหนืดสูงทำให้เส้นใยที่พุ่งไปยังฉากยังมีความชื้นอยู่สูง จึงไปติดที่ฉากในลักษณะแบน ๆ เนื่องจากเกิดการระเหยส่วนกลไกการเกิดเส้นใยที่มีลักษณะคล้ายริบบิ้นแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงกลไกการเกิดเส้นใยที่มีลักษณะคล้ายริบบิ้น ที่มา : [3]

จากรูปที่ 2.14 ที่บริเวณผิวหน้าของสารละลายพอลิเมอร์ที่พุ่งออกมาจะมีการระเหยของตัวทำละลายกลายเป็นชั้นของแข็งบาง ๆ ส่วนภายในยังเป็นของเหลวอยู่ดังรูป (a) เมื่อตัวทำละลายระเหยออกจากแกนกลางจะทำให้ท่อที่ได้แบนลง พื้นที่หน้าตัดจะเปลี่ยนจากวงกลมกลายเป็นวงรีดังรูป (b) จากนั้นจะกลายเป็นรูปร่างคล้ายริบบิ้นดังรูป (c) และในบางกรณีอาจมีการเกิดท่อเล็ก ๆ ขึ้นที่ขอบทั้ง 2 ด้านของริบบิ้นดังรูป (d)

2.3.4.3 เส้นใยที่มีกิ่งก้านสาขา (Branched fibers)

เส้นใยที่มีกิ่งก้านสาขาได้จากการแยกตัวออกมาเป็นเส้นเล็กจากพื้นผิวของเส้นหลักของสารละลายที่พุ่งออกมาจากหยดประจุ ทำให้ได้สารละลายที่พุ่งออกมา 2 สายเล็ก ๆ ความยาวของสารละลายที่พุ่งออกมาและการระเหยของตัวทำละลายจะเปลี่ยนแปลงรูปร่างและประจุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่



รูปที่ 2.15 แสดงเส้นใยที่มีกิ่งก้านสาขาของ Poly(urethane urea) ที่มา : [3]

2.3.4.4 เส้นใยที่เป็นรูปขดลวด (Helical fibers)

เส้นใยแบบนี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบระบบ Microelectromechanical องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับการมองเห็นและระบบการขนส่งยา ซึ่งเส้นใยลักษณะนี้ทำจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนออกไซด์ (Polyethylene oxide : PEO) กับพอลิอะนิลีนซัลโฟนิคแอซิด (Poly(aniline sulfonic acid) : PASA) เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ PEO จะสามารถควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ loop ได้

2.4 สัณฐานวิทยา (Morphology)

การศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาหรือโครงสร้างทางกายภาพของเส้นใย สามารถทำได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM) ซึ่งโครงสร้างทางกายภาพนั้นครอบคลุมถึง ความยาว ขนาดหรือเส้นผ่านศูนย์กลาง รูปร่างภาคตัดขวาง (Cross-sectional shape) รูปร่างของผิวเส้นใย และความหยักของเส้นใย

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเป็นประโยชน์มากในการศึกษาค้นคว้าทางการแพทย์ โลหะวิทยา และวิทยาศาสตร์อีกหลายสาขา เพราะสามารถส่องให้มองเห็นรูปร่าง ลักษณะของแบคทีเรีย ไวรัส และผลึกที่ประกอบขึ้นเป็นโลหะ ซึ่งไม่อาจมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดาได้

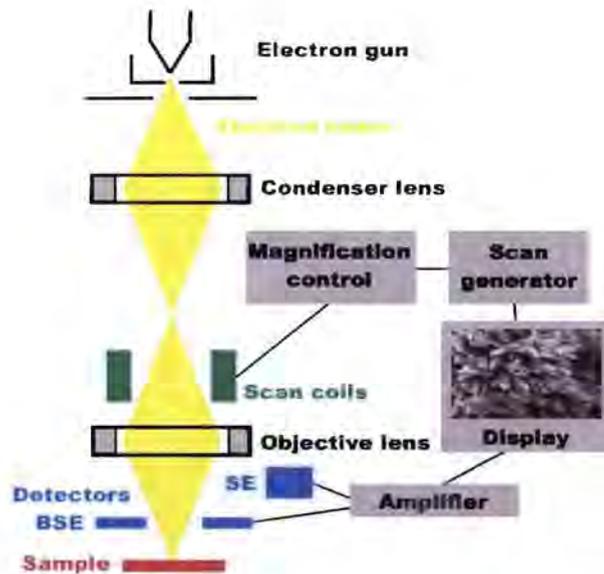
2.5 เทคนิคการตรวจวัดวัสดุนาโน (Characterization of nanoparticles)

2.5.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นหนึ่งในเครื่องมือที่เป็นประโยชน์อย่างมากในการใช้อธิบายหรือวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัตถุ เนื่องจากให้ภาพที่มีความละเอียดสูง คือสามารถเห็นรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาด 2- 5 nm ได้ โดยในบางรุ่นมีกำลังขยายถึง 100,000 เท่า รวมทั้งรูปที่ได้จะมีความชัดทางลึกสูง มีมิติ ภาพที่ได้จาก SEM จึงมีความชัดเจนกว่าภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ธรรมดาที่ให้ภาพเป็นแบบ 2 มิติ และมีกำลังขยายเพียง 1,000 เท่า

2.5.1.1 หลักการของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การทำงานของ SEM จะเริ่มจากการป้อนความต่างศักย์ให้กับ Filament จนถึงค่า Breakdown voltage เพื่อเร่งการปลดปล่อยอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electrons) อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกบีบโดยใช้เลนส์ (Condenser lens) เพื่อรวบรวมลำอิเล็กตรอนให้หนาแน่นขึ้นลงมายังเลนส์โฟกัสภาพ (Objective lens) และโฟกัสลงบนชิ้นงาน โดย Scanning Coil จะเป็นตัวบังคับให้ลำอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปทั่วชิ้นงานบนระนาบ X-Y ทำให้เกิดสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ สัญญาณนี้จะเข้าสู่ Detector แล้วแปลงเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์และนำไปขยายสัญญาณเพื่อส่งต่อไประบบสร้างภาพบนจอ Cathode ray tube (CRT) โดยที่การใช้งานทั่วไปสามารถพิจารณาตัวแปรที่สำคัญ 3 ตัวแปร คือ 1. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปลายอิเล็กตรอน 2. กระแสของลำอิเล็กตรอน 3. มุมกระเจิงของลำอิเล็กตรอน ตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปรนี้จะมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปลายอิเล็กตรอนเล็กลง ค่าของกระแสของลำอิเล็กตรอนก็จะน้อยลงไปด้วย แต่มุมกระเจิงของลำอิเล็กตรอนจะมากขึ้น ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.16 และรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.16 แสดงขั้นตอนการทำงานของเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) ที่มา : [3]

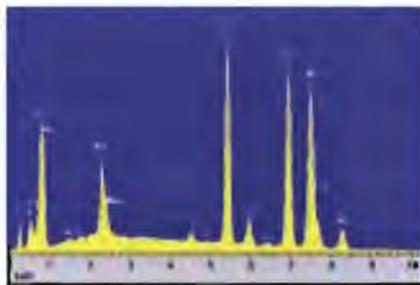


รูปที่ 2.17 แสดงเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) ที่มา : [3]

2.5.2 Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS)

EDS หรือ EDX เป็นเทคนิคในการวิเคราะห์สารปริมาณน้อย โดยใช้ร่วมกับเทคนิค SEM โดยเทคนิคนี้จะตรวจวัดปริมาณรังสี X-ray ที่เปล่งออกมาจากสารตัวอย่างในระหว่างการระดมยิงด้วยลำอิเล็กตรอน เพื่อบอกปริมาณและองค์ประกอบของสารที่นำมาวิเคราะห์

เมื่อสารตัวอย่างถูกระดมยิงด้วยลำอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากอะตอมที่ผิวหน้าของสารตัวอย่าง จึงทำให้มีช่องว่างเกิดขึ้น ซึ่งจะถูกเติมให้เต็มด้วยอิเล็กตรอนจากชั้นที่สูงกว่า โดยการคายพลังงานในรูปของรังสี X-ray ออกมาเพื่อดุลพลังงานที่ต่างกันระหว่างสถานะของอิเล็กตรอนทั้ง 2 โดยที่พลังงานที่เปล่งออกมาจะเป็นลักษณะเฉพาะของธาตุนั้น ๆ



รูปที่ 2.18 แสดง EDS สเปกตรัมของโลหะ MP35N ที่มา : [3]

ดีเทคเตอร์ของ EDS X-ray จะวัดความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสี X-ray ที่เปล่งออกมาเทียบกับพลังงาน ชนิดของดีเทคเตอร์ ได้แก่ Lithium-drifted silicon, Solid-state device เมื่อรังสี X-ray ตกกระทบบนดีเทคเตอร์จะมีสัญญาณ เนื่องจากประจุซึ่งเป็นสัดส่วนกับพลังงานของรังสี X-ray

2.6 การประยุกต์ใช้เส้นใยนาโน

2.6.1 การนำไปใช้ทางการแพทย์

ในทางการแพทย์เนื้อเยื่อและอวัยวะของมนุษย์ เช่น กระดูก ฟัน กระดูกอ่อน และผิวหนัง มีลักษณะโครงสร้างการเรียงตัวในระดับนาโนเมตรหรืออยู่ในรูปของเส้นใยขนาดนาโนเมตรอยู่แล้ว งานวิจัยทางด้านกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตจึงมุ่งเน้นทางด้านวิศวกรรมชีวภาพ เช่น

2.6.1.1 อวัยวะเทียม (Medical prostheses)

มีการเสนอให้ใช้นาโนไฟเบอร์กับอวัยวะเทียมที่เกี่ยวกับเนื้อเยื่ออ่อน เช่น หลอดเลือดเทียม เป็นต้น โดยทั่วไปได้มีการใช้หลอดเลือดเทียมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ แต่ในปัจจุบันวงการวิจัยที่ก้าวหน้าได้พยายามมุ่งเน้นไปที่การหาวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการซ่อมแซมหลอดเลือดที่มีขนาดกลางและขนาดเล็ก หลอดเลือดเทียมมีทั้งที่เป็นแบบทางชีวภาพและหลอดเลือดเทียมที่สังเคราะห์ขึ้นมา หลอดเลือดเทียมชนิดสังเคราะห์ทำมาจากวัสดุที่เรียกว่า "ดาครอน (Dacron)" หรือ โพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene : PTFE) ผลิตด้วยวิธีการทอหรือถัก ซึ่งหากผลิตด้วยวิธีการทอจะมีรูเล็กกว่า ไม่มีการรั่วซึมของเลือดมากนัก และมีการนำมาใช้งานน้อยกว่าหลอดเลือดชนิดที่ผลิตด้วยวิธีการถัก เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการผลิตหลอดเลือดเทียมที่ทำมาจากดาครอนที่เคลือบด้วยโปรตีน (คอลลาเจน/อัลบูมิน) เพื่อช่วยลดการซึมของเลือด และเคลือบยาปฏิชีวนะเพื่อป้องกันการติดเชื้ออีกด้วย นอกจากนี้ฟิล์มเยื่อบางจากนาโนไฟเบอร์ยังสามารถนำมาติดกับอวัยวะเทียม เพื่อลดความแตกต่างระหว่างความแข็งของเนื้อเยื่อของร่างกายมนุษย์กับอวัยวะเทียมที่จะฝังเข้าไปในร่างกายมนุษย์ได้

2.6.1.2 โครงร่างรองรับของเนื้อเยื่อ (Tissue template)

การออกแบบโครงร่างที่สามารถจำลองโครงสร้างและหน้าที่ของ Natural extra cellular matrix ได้ ยังเป็นสิ่งท้าทายวงการวัสดุการแพทย์ เซลล์ของมนุษย์สามารถยึดติดและทำหน้าที่ได้กับเส้นใยที่มี

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าขนาดของเซลล์ ด้วยเหตุนี้โครงร่างรองรับที่ทำจากเส้นใยนาโนสามารถนำมาใช้เป็นแม่แบบสำหรับการเลี้ยงเซลล์ได้

2.6.1.3 วัสดุปิดแผล (Wound dressing)

เส้นใยนาโนพอลิเมอร์สามารถพันลงบนบาดแผลไฟไหม้ได้โดยตรง ซึ่งช่วยให้แผลหายเร็ว โดยปกติแผ่นผ้าก๊อทจากเส้นใยนาโนจะมีรูพรุนขนาด 500-1,000 ไมครอน ซึ่งเล็กพอที่จะปกป้องแผลจากแบคทีเรียพื้นผิวที่สูงถึง $5-100 \text{ m}^2/\text{g}$ และช่วยในการดูดซับของเหลว ทำให้การให้ยาทางผิวหนังมีประสิทธิภาพดีเยี่ยม

2.6.1.4 ด้านเวชภัณฑ์

โดยปกติแล้วยังยามีขนาดเล็กเท่าใดร่างกายมนุษย์ก็สามารถดูดซึมได้ง่ายขึ้นเท่านั้น การให้ยาผ่านทางพอลิเมอร์เส้นใยนาโนอาศัยหลักการที่ว่าอัตราการละลายของอนุภาคของยาที่จะเพิ่มขึ้นของยาหรือพาหะ (Carrier) การทำให้ยาอยู่ในโครงสร้างขนาดนาโนเมตรมีหลายวิธี เช่น อนุภาคยาเกาะอยู่ที่ผิวของเส้นใยนาโนทั้งยาและพาหะอยู่ในรูปของเส้นใยนาโนเกี่ยวพันกันอยู่ ทั้งยาและพาหะผสมรวมกันอยู่ในรูปเส้นใยนาโนเส้นเดียวกันและขึ้นรูปพาหะให้อยู่ในรูปทรงคล้ายท่อหุ้มตัวยายู่ข้างใน สองวิธีสุดท้ายเป็นรูปแบบที่ต้องการมากที่สุด อย่างไรก็ตามงานวิจัยเรื่องการส่งผ่านยาโดยใช้เส้นใยนาโนยังอยู่ในขั้นเริ่มต้น

2.6.2 การนำไปใช้ทางการแพทย์

การมีเครื่องช่วยหายใจหรือชุดปกป้องร่างกาย (Protective clothing) จากเชื้อโรคหรือก๊าซพิษไม่ให้เข้าสู่ร่างกายทั้งทางการแพทย์ หรือการซึมผ่านทางผิวหนัง เป็นสิ่งที่คนทั่วโลกให้ความสนใจเป็นพิเศษ ชุดปกป้องร่างกายที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันใช้ถ่านเป็นตัวดูดซับ ซึ่งมีข้อจำกัดในการระบายความชื้นและมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น ผลของการใช้เทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตทำให้ได้เส้นใยนาโนที่เรียงตัวเป็นชั้น ซึ่งมีความพรุนสูงแต่ขนาดของรูเล็ก ทำให้มีความต้านทานการทะลุทะลวงของสารเคมีที่ปนมาให้อากาศสูง มีความต้านทานการระบายอากาศ และความชื้นต่ำกว่าเส้นใยที่ใช้กันโดยทั่วไป แต่มีประสิทธิภาพในการดักจับสารปนเปื้อนในอากาศสูงกว่า

2.6.3 การประยุกต์ใช้ด้านการกรอง

การใช้เส้นใยมาทำเป็นไส้กรอง (Filter) มีข้อดีคือ มีประสิทธิภาพในการกรองสูงและการต้านทานการไหลของอากาศต่ำ ประสิทธิภาพในการกรองนั้นขึ้นอยู่กับความละเอียดของเส้นใย การดักจับอนุภาคขนาดเล็กกว่าระดับไมโครเมตร ตัวกรองต้องมีขนาดเล็กพอ ๆ กับอนุภาคที่ต้องการดักจับ วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับตัวกรองวิธีหนึ่งก็คือ การใช้เส้นใยนาโนเป็นโครงสร้างของไส้กรอง เนื่องจากพื้นที่ผิวต่อปริมาตรที่สูงมากของเส้นใยนาโนทำให้มีแรงยึดเกาะที่ผิวสูง ทำให้ตัวกรองที่มีเส้นใยนาโนเป็นองค์ประกอบสามารถดักจับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 0.5 ไมครอนได้ดี

2.7 แก๊สออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) [15]

ออกไซด์ของไนโตรเจนประกอบด้วย ไนตรัสออกไซด์ (N₂O) ไนตริกออกไซด์ (NO) ไดไนโตรเจน ไตรออกไซด์ (N₂O₃) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) ไดไนโตรเจนไดออกไซด์ (N₂O₂) ไดไนโตรเจนเตตราออกไซด์ (N₂O₄) และ ไดไนโตรเจนเพนออกไซด์ (N₂O₅) ซึ่งส่วนหนึ่งเกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต่าง ๆ เช่น ก๊าซ ถ่านหิน และฝืน เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของออกไซด์ของไนโตรเจนซับซ้อนมาก และขึ้นอยู่กับสารมลพิษอื่น ๆ เช่น ไฮโดรคาร์บอน โอโซน สารประกอบและซัลเฟอร์ เป็นต้น รวมทั้งสภาวะทางธรรมชาติ เช่น แสงอาทิตย์ ก็เป็นองค์ประกอบตัวหนึ่งเช่นกัน ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะไนตริกออกไซด์ (NO) และไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) ไนตริกออกไซด์เป็นแก๊สไม่มีสีและกลิ่น ซึ่งส่วนมากเมื่อทำปฏิกิริยาทางเคมีกับออกซิเจนในอากาศจะเปลี่ยนเป็นไนโตรเจนไดออกไซด์ และมีผลต่อมนุษย์ ซึ่งพบว่าค่าต่ำสุดที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของผู้เป็นโรคหืดคือ 190 µg/m³ (0.1 ppm) ในระยะเวลา 1 ชั่วโมงต่อวันที่หายใจเอาแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์เข้าไป อย่างไรก็ตาม จากการประชุมขององค์การอนามัยโลก พ.ศ. 2515 ที่กรุงโตเกียว ได้สรุปว่า ถึงแม้จะมีการทดลองกับผู้ป่วยโรคหืด และพบว่กัก็แก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ที่ระดับ 190 µg/m³ ในระยะ 1 ชั่วโมง มีผลทำให้เกิดหลอดลมตีบตันมากขึ้น แต่ก็ยังไม่สามารถระบุได้แน่ชัด ดังนั้นควรมีการทดสอบต่อไป

2.8 อุปกรณ์เก็บอากาศชนิดพาสซีฟ

2.8.1 อุปกรณ์เก็บอากาศแบบพาสซีฟ

วิธีเก็บตัวอย่างแบบพาสซีฟ (Passive sampler) เป็นวิธีที่อาศัยการแพร่ของสารมลพิษที่ปนเปื้อนอยู่โดยแก๊สที่ต้องการศึกษาสามารถแพร่เข้าไปยังสารละลายดูดซับ (Coating solution) ได้เองในอากาศผ่านเข้าสู่ตัวดูดซับที่ซูดสารละลายที่เหมาะสม หลังจากทำการเก็บตัวอย่างเสร็จสิ้นแล้วนำตัวดูดซับที่ทำปฏิกิริยากับแก๊สที่ต้องการวิเคราะห์ไปทำการสกัดซึ่งจะได้สารละลายแล้วจึงนำไปทดสอบหาปริมาณสารที่ต้องการทราบความเข้มข้นต่อไป ซึ่งการเก็บโดยวิธีเก็บตัวอย่างอากาศแบบพาสซีฟมีข้อดีคือ อุปกรณ์ต่อชิ้นมีราคาถูก สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ วิธีการไม่ยุ่งยากทำให้ไม่ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญ ไม่ต้องการไฟฟ้า มีน้ำหนักเบา ทำให้สามารถวิเคราะห์คุณภาพอากาศได้เป็นบริเวณกว้างหลายจุด และสามารถทำการเก็บวิเคราะห์คุณภาพอากาศแบบต่อเนื่องได้เป็นเวลานาน ซึ่งตัวอย่างอุปกรณ์พาสซีฟแสดงได้ดังรูปที่ 2.19



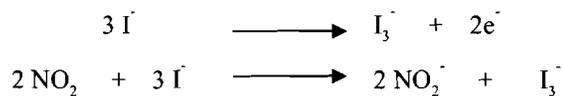
รูปที่ 2.19 แสดงอุปกรณ์เก็บอากาศแบบพาสซีฟ ที่มา : [6]

อุปกรณ์เก็บอากาศชนิดนี้อาศัยหลักการทำงานอย่างง่าย โดยอาศัยการแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของแก๊สสูงไปสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นของแก๊สต่ำ โดยใช้สารละลายดูดซับที่เหมาะสมเพื่อดูดซับแก๊สที่ต้องการตรวจวัดไว้ และมีตาข่าย (Screen) ที่ทำจากเหล็กไร้สนิมเพื่อกันฝุ่นและแผ่นกรองเพื่อลดการผันผวนของอากาศ (Turbulent) บริเวณด้านหน้าช่องเปิดเมื่อเกิดการแพร่ (Diffusion) จะทำให้แก๊สที่ฟุ้งกระจายอยู่ในอากาศถูกดูดซับบนกระดาษกรอง

2.8.2 การเก็บตัวอย่างแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์โดยวิธีพาสซีฟ

ในการเก็บตัวอย่างแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ในบรรยากาศโดยวิธีพาสซีฟนั้นสามารถใช้สารละลายดูดซับหลายประเภทและหลายวิธีการ ซึ่งทั้งนี้ขึ้นกับเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์หาปริมาณด้วย ซึ่งสามารถแสดงได้ในตารางที่ 2.3 โดยในงานวิจัยนี้จะสามารถใช้สารละลายผสมระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมไอโอไดด์ (NaI)

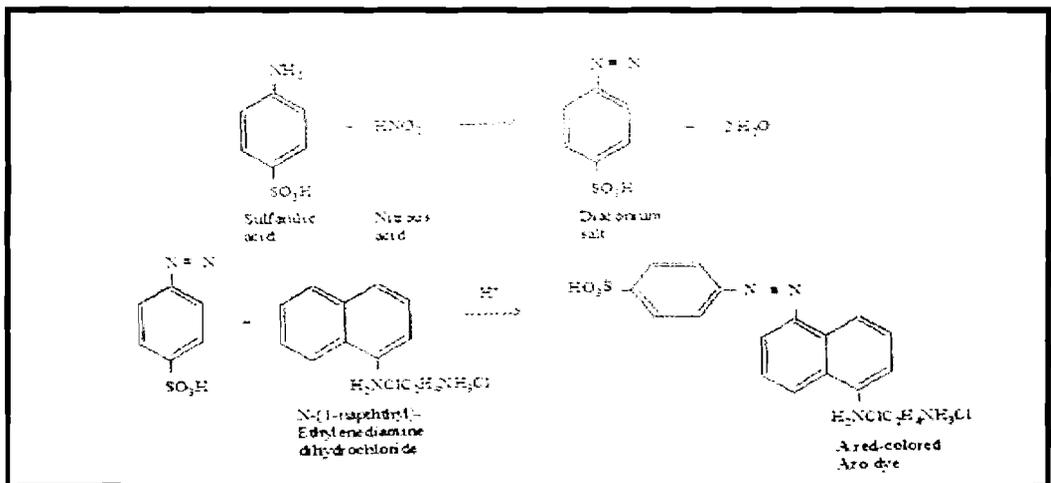
ขั้นตอนในการดูดซับแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์เกิดจากการเกิดปฏิกิริยากันระหว่างแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ในอากาศกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นตัวดูดซับแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ โดยมีโซเดียมไอโอไดด์เป็นตัวออกซิไดส์ให้ไปอยู่ในรูปของไนไตรท์ (NO_2^-) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นดังนี้



เมื่อเสร็จสิ้นการเก็บตัวอย่างในอากาศแล้วตัวกลางที่ดูดซับแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์จะอยู่ในรูปของไนไตรท์จะถูกนำไปสกัด (Extraction) โดยใช้ น้ำกลั่น ซึ่งไนไตรท์จะอยู่ในรูปของกรดไนตริก (HNO_2) จากนั้นจึงนำสารละลายที่สกัดได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไนไตรท์ ซึ่งวิธีที่สะดวกและราคาถูกคือ วิธีทำให้เกิดสี (Colorimetric) โดยนำสารละลายที่สกัดได้ไปทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดซัลฟานิลิก (Sulphanilic acid) ซึ่งจะกลายเป็นเกลือไดอะโซเนียม (Diazonium salt) และเกลือไดอะโซเนียม ทำปฏิกิริยากับเอ็น หนึ่ง แนพทาลีน ไดอามีน ไดไฮโดรคลอไรด์ (N-1-naphthylethylene diamine dihydrochloride) (เป็นตัวทำให้เกิดสี) จะได้หมู่ฟังก์ชันของสารสีอ้อมเอโซ (Azo dye) ซึ่งจะมีสีชมพูโดยความเข้มของสีจะเป็นปฏิกาดกับความเข้มข้นของไนไตรท์ในตัวอย่าง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังรูปที่ 2.20 หลังจากนั้นนำสารละลายที่มีสีนี้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Spectrophotometer ต่อไป

ตารางที่ 2.3 แสดงชนิดของสารละลายดูดซับที่ใช้ในการดูดซับแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ ที่มา : [16]

ชนิดของอุปกรณ์	ลักษณะของฝาเปิด	สารละลายดูดซับ
Palmes-Type Diffusion Tube	Open	TEA
Blatter Diffusion Tube	Open	Not reported
Ferm Badge	Steel grid and Teflon membrane	NaAsO ₂ Na/ KI/NaOH
Willems Badge	PTFE membrane	NaI/NaOH
CEH ALPHA	PTFE membrane	Under test
Ogawa Badge	Open	TEA
CSPSS Badge	PTFE membrane	CHEMIX TM
Radiello Radial Symmetry Sampler	Cylindrical Synthesised Micro porous polyethylene	TEA
Krochmal Badge	Polypropylene membrane	TEA
Yanagisawa Badge	-	TEA



รูปที่ 2.20 แสดงปฏิกิริยาการเกิดสีในการวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของไนโตรท

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chidchanok Mit-uppatharn และคณะ [13] ได้เตรียมเส้นใย Polyamide-6 (PA-6) โดยใช้กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต และได้ศึกษาผลของสัณฐานวิทยาคือ ศึกษาคุณสมบัติของสารละลายต่าง ๆ (ความเข้มข้น ความหนืด แรงตึงผิว และการนำไฟฟ้า) โดยใช้ Optical scanning (OS) และ Scanning electron microscopy (SEM) ซึ่งจะพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงขึ้น ความหนืดก็จะเพิ่มขึ้นตามความสัมพันธ์แบบ Exponential และเมื่อเพิ่มความเข้มข้น แรงตึงผิวจะเพิ่มขึ้นแต่การนำไฟฟ้าจะลดลงเพียงเล็กน้อย โดยที่ความหนืดต่ำจะเกิดหยดขึ้นบนแผ่นรองรับเส้นใย และเมื่อความหนืดสูงขึ้นจนถึงค่าวิกฤต หยดจะหายไปเหลือแต่เม็ดบิดและได้เส้นใยที่เรียบ ถ้าความหนืดเพิ่มขึ้นเม็ดบิดจะลดลง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจะใหญ่ขึ้น และการศึกษาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย พบว่าเราจะได้จากค่าความเข้มข้นที่แตกต่างกันของ PA-6 ซึ่งสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ก็คือมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ดังนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ได้จะมีขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์แบบ Exponential และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับสารละลายพอลิเมอร์ จะพบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีขนาดเล็กลง เมื่อนำสารละลายของ PA-6 ผสมกับ m-creso และกรดฟอร์มิก ทำให้สารละลายมีความหนืดสูงขึ้น เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้น และจากการเติม Inorganic salt (NaCl, LiCl และ MgCl₂) ลงไปในสารละลาย จะเป็นการเพิ่มการนำไฟฟ้าให้กับสารละลาย ทำให้อัตราการไหลเพิ่มขึ้น เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้น

Deitzel และคณะ [18] ได้ศึกษาผลของปัจจัยของกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่มีโครงสร้างของนาโนไฟเบอร์ โดยใช้ (Poly(ethylene oxide) : PEO) ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 400,000 g/mol นำมาละลายในน้ำเป็นสารละลายพอลิเมอร์ที่นำมาศึกษา โดยความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ที่ศึกษาอยู่ในช่วง 4 ถึง 10 wt.% และความต่างศักย์ไฟฟ้าอยู่ในช่วง 5.5 ถึง 15.0 kV จากการศึกษาพบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเพิ่มขึ้นเมื่อสารละลายพอลิเมอร์มีความเข้มข้นสูงขึ้น และความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าต่ำ โดยหากความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าต่ำก็จะก่อให้เกิดเม็ดบิดขึ้นบนเส้นใยเพิ่มขึ้นด้วย

Kenawy และคณะ [9] ได้เตรียมเส้นใย (Poly(ethylene-co-vinyl alcohol) : EVOH) โดยใช้กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของเส้นใยมีค่าระหว่าง 0.2 μm ถึง 8.0 μm และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของเส้นใยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลาย และสามารถนำเส้นใยไปประยุกต์ใช้ในทางชีวภาพทางการแพทย์ได้

Casper และคณะ [14] ได้เตรียมเส้นใย Polystyrene (PS) โดยใช้กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต และได้ศึกษาสัณฐานวิทยาของการควบคุมพื้นผิวของเส้นใย PS โดยจะศึกษาผลของความชื้นและน้ำหนักโมเลกุลที่มีผลต่อพื้นผิวของเส้นใย ด้วยเทคนิค Optical microscopy (OM), Field emission scanning electron microscopy (FESEM), Atomic force microscopy (AFM) และ Gel permeation chromatography (GPC) จากการศึกษพบว่าความชื้นในบรรยากาศน้อยกว่า 25 % เส้นใยจะมีพื้นผิวที่ราบเรียบ และเมื่อความชื้นในบรรยากาศมากกว่า 30 % เส้นใยจะมีพื้นผิวที่มีรูพรุนเกิดขึ้น ดังนั้นเมื่อความชื้นในบรรยากาศเพิ่มขึ้นจะทำให้จำนวนรูพรุน เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน และการกระจายตัวของรูพรุนเพิ่มขึ้น และยังพบว่ายังมีความชื้นมากขึ้น สารละลายจะมีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น เนื่องจากเส้นใยที่มีรูพรุนอยู่มากมาย ซึ่งมีลักษณะที่เหมือนกันอยู่เพียงเล็กน้อยในรูปร่างและขนาด และมีการกระจายขนาดของรูพรุนอย่างมาก ส่วน Polydispersity (PDI) จะไม่มีผลต่อขนาดและการกระจายของรูพรุน และเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม่มีผลต่อรูปร่างหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย และจากการใช้ GPC หาน้ำหนักโมเลกุลก่อนและหลังกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต พบว่าก่อนและหลังกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตไม่มีการทำลายสายโซ่พอลิเมอร์ของ PS

Xinhua Zong และคณะ [19] เตรียมเมมเบรนจาก Amorphous [Poly (D,L-lactic acid) : PDLA] และ Semi-crystalline [Poly (L-lactic acid) : PLLA] ด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต สำหรับประยุกต์ใช้เป็นวัสดุชีวภาพทางการแพทย์ ได้ทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อเส้นใยจาก SEM พบว่าเมื่อความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้นจะได้เส้นใยที่เสถียรมากขึ้นและเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดใหญ่ขึ้นเช่นกัน และการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) จะเป็นการเพิ่มประจุ ทำให้เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีขนาดเล็กลง และอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์สูงขึ้น จะทำให้เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ขึ้น กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต จะทำให้ PLLA ที่เป็นผลึก มี T_g และ T_m ลดลง โดยวิเคราะห์จาก DSC และ X-ray เมื่อเติมยาลงในเมมเบรน จะสามารถปลดปล่อยได้ใน 3 ชั่วโมง เหมาะกับการติดเชื้อที่รวดเร็ว

Chidchanok Mit-uppatham และคณะ [20] ได้เตรียมเส้นใย Polyamide-6 (PA-6) โดยใช้กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต และได้ศึกษาผลของสัณฐานวิทยา คือศึกษาคุณสมบัติของประเภทของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่สารละลาย โดยอาจจะเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าชนิดบวก หรือลบ โดยใช้ Scanning electron microscopy (SEM) พบว่าจะทำให้เกิดความแตกต่างของสัณฐานวิทยาและขนาดของเส้นใย โดยหากเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าชนิดลบ เส้นใยที่ผลิตได้จะมีลักษณะเป็นเส้นแบนและมีขนาดใหญ่กว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าชนิดบวก ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นกลม

Baumgarten [21] ได้ผลิตเส้นใยพอลิอะคริโลไนไทรล์ (Polyacrylonitrile) ด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตนี้ โดยใช้ไดเมทิลฟอร์มมาไมด์ (Dimethyl formamide) เป็นตัวทำละลายพอลิเมอร์ และได้ศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของเส้นพุ่ง (Jet) โดยปัจจัยเหล่านี้ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ การเปลี่ยนแปลงสภาพบรรยากาศขณะทำการปั่นเส้นใย อัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์และปริมาณของความต่างศักย์ไฟฟ้า จากการศึกษาพบว่า การเกิดเส้นใยที่มีขนาดเล็กมากจะพบที่สารละลายที่มีความเข้มข้น 7.5 wt.% หรือมีความหนืดของสารละลาย 1.7 พอยซ์ (Poise) จะกระทั่งถึงความเข้มข้น 20 wt.% หรือมีความหนืดของสารละลาย 215 พอยซ์ และพบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลาย 17.5 wt.% และ 20 wt.% ซึ่งเป็นความเข้มข้นของสารละลายที่มีความหนืดสูงจึงทำให้ตัวทำละลายระเหยออกจากเส้นใยไม่สมบูรณ์จึงทำให้เส้นใยเกิดติดกันขณะทำการปั่นเส้นใย ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์สูงขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจะใหญ่ขึ้น

Hongliang Jiang และคณะ [22] ศึกษาการเตรียมเมมเบรนด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตพบว่า เดกซ์แทรนสามารถปั่นเป็นเส้นใยได้เมื่อละลายในน้ำ DMSO/น้ำ และ DMSO/DMF แบ่งการทดลองเป็น 3 ตอนคือ ตอนที่ 1 เตรียมเส้นใยจากเดกซ์แทรนละลายน้ำพบว่า เส้นใยจะมีปม (Bead) น้อยที่ความเข้มข้น 0.75 g/ml H₂O ขึ้นไป และทำการผสมโปรตีนกับเดกซ์แทรนได้โดยตรง คือ Bovine serum albumin (BSA) และ Lysozyme เส้นใยที่ได้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงเนื่องจากการเพิ่มประจุให้กับสารละลาย ตอนที่ 2 เตรียมเส้นใยจากเดกซ์แทรนละลายใน DMSO/DMF และ DMSO/น้ำ ซึ่ง DMSO ต้องมากกว่า 40% ถึงจะปั่นเป็นเส้นใยได้ และเตรียมคอมโพสิตเมมเบรนระหว่าง Hydrophilic กับ Hydrophobic คือ เดกซ์แทรน/PLGA ใน DMSO/DMF จะทำให้สมบัติเชิงกลของเส้นใยดีขึ้น และตอนที่ 3 เตรียมเส้นใยเมทาคริเลต-เดกซ์แทรน และเชื่อมโยงแบบ Photo-crosslink ใช้ DMPA 1% เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง เชื่อมปฏิกิริยาทางแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) เป็นเวลา 2 วัน พบว่าเมมเบรนยังคงรูปร่างมากกว่า 1 เดือน

Ramakrishna และคณะ [23] ได้ผลิตเส้นใย Poly(L-lactid-co-caprolactone) (P(LLA-CL)) (70/30 wt%) ด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตนี้ โดยใช้ Dichloromethane (DCM), N,N-dimethylformamide (DMF) และไพริดีน (Pyridine) โดยจะมีอัตราส่วนของการผสมที่แตกต่างกันที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ เป็นตัวทำละลายพอลิเมอร์ และนำมาศึกษาสัณฐานวิทยา ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและลักษณะที่เหมือนกัน (Uniform) ของเส้นใยพบว่าผลของพารามิเตอร์คือ คุณสมบัติของสารละลายพอลิเมอร์ (ความเข้มข้นของพอลิเมอร์ น้ำหนักโมเลกุล และความสามารถในการเป็นตัวนำทางไฟฟ้าของตัวทำละลาย) และสภาวะของการผลิต (ความต่างศักย์ไฟฟ้าและปริมาณของอัตราการปั่น) ของกระบวนการผลิตมีผลต่อสัณฐานวิทยา ซึ่งจะสามารถ

สรุปได้ในแผนภูมิของกระบวนการผลิตเส้นใย (Process map) โดยจะพบว่าผลของคุณสมบัติของสารละลายพอลิเมอร์เป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญในการควบคุมสัณฐานวิทยามากกว่าสภาวะของการผลิต และจากการศึกษาพารามิเตอร์ข้างต้นทั้งหมดจะพบว่าสภาวะ (Condition) ที่จะใช้ในการปั่นเส้นใยคือ ใช้ HM-PLLA ซึ่งสามารถใช้ความเข้มข้นที่ต่ำที่สุดได้และเลือกตัวทำละลายที่มีค่าการนำไฟฟ้าที่สูง ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความหนาแน่นของประจุสูง ดังนั้นสารละลายพอลิเมอร์จะสามารถยืดยาวหรือพุ่งออกไปได้สูง และจะใช้ DCM เป็นตัวทำละลายหลัก โดยจะเติมไพริดีน (Pyridine) เพื่อเพิ่มค่าการนำไฟฟ้า โดยอัตราส่วนของ DCM/pyridine (20/80 wt.%) ซึ่งทำให้การละลายของพอลิเมอร์สมบูรณ์ และความเข้มข้นที่ต่ำที่สุดที่ทำให้ได้เส้นใยที่มีลักษณะที่เหมือนกัน (Uniform) มีค่าเท่ากับ 1 wt.% และเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเข็มเท่ากับ 0.21 mm, ให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 kV, อุปกรณ์รองรับเส้นใย (Grounded plate collector) จะอยู่ที่ระยะห่างจากเข็มเท่ากับ 10 cm และสารละลายพอลิเมอร์จะมีอัตราการป้อนเข้าไปเท่ากับ 0.1 mm/hr. แล้วเมื่อนำไปส่อง TEM จะพบว่าสามารถผลิตเส้นใย PLLA ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีขนาดเล็กมากคือ 9 nm ได้ประสบความสำเร็จ

Park และคณะ [24] ได้ศึกษาสภาวะที่มีเหมาะสมในการผลิตเส้นใยไนลอน 6 จากกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต และไนลอน 6 นาโนฟิลเตอร์จะใช้เส้นใยนาโนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 80-200 nm และทำการหาค่าประสิทธิภาพในการกรองและความดันที่ลดลงอีกด้านหนึ่งของการกรอง จากการศึกษาพบว่าเมื่อไนลอน 6 มีความเข้มข้น 15 wt.% เส้นใยจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 80 nm แต่จะเกิดเม็ดบีดมากมาย และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นถึง 24 wt.% เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจะค่อย ๆ หนาถึง 200 nm แต่จะไม่มีเม็ดบีดเกิดขึ้น และเมื่อระยะห่างในการปั่นมีน้อยจะทำให้เส้นใยเริ่มบางลง และประสิทธิภาพในการกรองของไนลอน 6 นาโนฟิลเตอร์ มีค่าเท่ากับ 99.993 % จะดีกว่ากระดาษกรองที่ขายอยู่ทั่วไป

Ryu และคณะ [25] ได้ผลิตเส้นใยไนลอน 6 (Nylon 6) ด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตนี้ โดยใช้กรดฟอร์มิก (Formic acid) เป็นตัวทำละลายพอลิเมอร์ และได้ศึกษาเกี่ยวกับสัณฐานวิทยา (Morphology), ขนาดของรู (Pore size), พื้นที่ผิว (Surface area) และคุณสมบัติของการให้แก๊สผ่านได้ (Gas transport) และจากผลการทดลองที่ได้จะพบว่าผลของความเข้มข้นของพอลิเมอร์ (ความหนืดของพอลิเมอร์) จะมีผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยอย่างมาก และทำการศึกษาเพิ่มเติมจะพบว่าผลของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจะมีผลต่อขนาดของรู, Brunauer-emmett-teller (BET) พื้นที่ผิว, และคุณสมบัติของการให้แก๊สผ่านได้ของไนลอน 6

เกรียงไกร ตั้งประเสริฐสุข [6] และ Murad และคณะ [26] โดยเกรียงไกร ได้ทำการเปรียบเทียบแผ่นกรองอากาศ 3 ชนิด ประกอบด้วย Teflon Filtrate และ Cellulose เพื่อใช้ตรวจวัดแก๊สไนโตรเจนได

ออกไซด์และแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เพื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้ออกกับเครื่องมือเก็บอากาศชนิด Active sampler โดยใช้เวลาเก็บตัวอย่าง 3 ชม.เป็นเวลา 3 เดือน ผลการศึกษาพบว่าแผ่นกรองอากาศทั้ง 3 ชนิด มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับข้อมูลที่ตรวจวัดได้ โดยค่าสหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ที่ได้อยู่ในช่วง 0.82-0.85 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ Ferm-type ซึ่ง G.P.Ayer ได้เลือกใช้เทคนิคนี้ในการตรวจวัดแก๊สในโตรเจนไดออกไซด์และแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งหาค่าได้ 0.85 แสดงว่าอุปกรณ์ที่ใช้มีมาตรฐานใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผ่นกรองทั้ง 3 ชนิด ด้วยวิธีการทางสถิติ (ANOVA method) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % พบว่าแผ่นกรองทั้ง 3 ชนิด ให้ค่านัยสำคัญ (Significant) ใกล้เคียงกัน ส่วน Murad และคณะ ได้ทำการศึกษาใช้งานอุปกรณ์เก็บอากาศแบบพาสซีฟในการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแก๊สโอโซน โดยส่วนตัวกรองอากาศใช้ Polytetrafluorethylene (PTFE) ส่วนสารละลายที่ใช้ดูดซับในจะอยู่ในรูปของไนไตรท์ โดยใช้กระดาษกรองแบบเซลลูโลส

บทที่ 3 เครื่องมือ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 3.1.1 เครื่องชั่ง (ทศนิยม 2 ตำแหน่ง) รุ่น PJ 3000 บริษัท เมคเลอร์ จำกัด
- 3.1.2 เครื่องชั่ง (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) Sartorius analytic บริษัท ไฮแอนติกพิค โปรโมชั่น
- 3.1.3 เครื่องแก้ว
- 3.1.4 เครื่องกวนแม่เหล็ก บริษัท VELP Sciencetifica จำกัด
- 3.1.5 กระบอกฉีดยาแก้ว (Glass syringe) ขนาด 5 มิลลิลิตร
- 3.1.6 เข็มฉีดยา (Syringe) เบอร์ 21
- 3.1.7 อุปกรณ์รองรับเส้นใยแบบตั้ง
 - 3.1.7.1 แผ่นอะคริลิกขนาด 12×12 เซนติเมตรหนา 0.3 เซนติเมตร
 - 3.1.7.2 แผ่นอะลูมิเนียมขนาด 10×10 เซนติเมตร
- 3.1.8 อุปกรณ์รองรับเส้นใยแบบหมุน
 - 3.1.8.1 แผ่นอะลูมิเนียมมีความยาว 26.5 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 13.5 เซนติเมตร
- 3.1.9 กระดาษฟอล์ย
- 3.1.10 อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของสารละลาย
- 3.1.11 เครื่องกำเนิดศักย์ไฟฟ้าแรงสูง (25,000 VDC High Voltages)
- 3.1.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ยี่ห้อ Hitachi รุ่น S-3400N
- 3.1.13 ตู้ควบคุมบรรยากาศ บริษัท Sanplatec จำกัด
- 3.1.14 ถุงพลาสติกชนิดซิปล็อค ขนาด 7.5×15 เซนติเมตร
- 3.1.15 เครื่องมือสเปกโตรนิค 22 (Spectronic 22TM) ผลิตโดยบริษัท Labomed จำกัด
- 3.1.16 เครื่องอัลตราโซนิค
- 3.1.17 กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร
- 3.1.18 แผ่นกรองอากาศชนิดเทฟลอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร และขนาดรู 1 ไมโครเมตร
- 3.1.19 ตะแกรงลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.00 มิลลิเมตรหนา 0.005 มิลลิเมตร

3.2 สารเคมี

- 3.2.1 ไนลอน 6 เกรด AR บริษัท เอเชียไฟเบอร์ จำกัด (มหาชน)
- 3.2.2 กรดฟอร์มิก (HCOOH) เกรด AR บริษัท Ajax Fine Chem จำกัด
- 3.2.3 น้ำปราศจากไอออน (De-ionized water : DI)
- 3.2.4 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรด AR บริษัท Lab-Scan จำกัด
- 3.2.5 โซเดียมไอโอดด์ (NaI) เกรด LAB บริษัท Asia Pacific Specialty Chemicals จำกัด
- 3.2.6 โซเดียมไนไตรต์ (NaNO₂) เกรด AR บริษัท Asia Pacific Specialty Chemicals จำกัด
- 3.2.7 เมทานอล (CH₃OH) เกรด AR บริษัท Ajax Fine Chem จำกัด
- 3.2.8 กรดซัลฟานิลิก (C₆H₇NO₃S) เกรด AR บริษัท Asia Pacific Specialty Chemicals จำกัด
- 3.2.9 กรดฟอสฟอริก (H₃PO₄) เกรด AR บริษัท Ajax Fine Chem จำกัด
- 3.2.10 เอ็น-หนึ่ง-แนพทิลเอทิลีน ไดอามีน ไดไฮโดรคลอไรด์ (C₁₂H₁₆Cl₂N₂) เกรด AR บริษัท Panreaz จำกัด
- 3.2.11 ก๊าซไนโตรเจน ความบริสุทธิ์ 99.995% บริษัทแพรแกซ์แอร์ (ประเทศไทย) จำกัด

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมสารละลายในลอน 6

3.3.1.1 การเตรียมสารละลายในลอน 6 ความเข้มข้น 15 wt.%

ชั่งในลอน 6 มา 15 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร และเติมสารละลายกรดฟอร์มิค 100.00 มิลลิลิตร แล้วนำไปปั่นที่ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที จนกว่าสารละลายจะละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

3.3.1.2 การเตรียมสารละลายในลอน 6 ความเข้มข้น 20 wt.%

ชั่งในลอน 6 มา 20 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร และเติมสารละลายกรดฟอร์มิค 100.00 มิลลิลิตร แล้วนำไปปั่นที่ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที จนกว่าสารละลายจะละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

3.3.1.3 การเตรียมสารละลายในลอน 6 ความเข้มข้น 25 wt.%

ชั่งในลอน 6 มา 25 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร และเติมสารละลายกรดฟอร์มิค 100.00 มิลลิลิตร แล้วนำไปปั่นที่ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที จนกว่าสารละลายจะละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

3.3.1.4 การเตรียมสารละลายในลอน 6 ความเข้มข้น 30 wt.%

ชั่งในลอน 6 มา 30 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร และเติมสารละลายกรดฟอร์มิค 100.00 มิลลิลิตร แล้วนำไปปั่นที่ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที จนกว่าสารละลายจะละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

3.3.1.5 การเตรียมสารละลายในลอน 6 ความเข้มข้น 35 wt.%

ชั่งในลอน 6 มา 35 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร และเติมสารละลายกรดฟอร์มิค 100.00 มิลลิลิตร แล้วนำไปปั่นที่ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที จนกว่าสารละลายจะละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

3.3.2 การเตรียมเส้นใยพอลิเมอร์ โดยใช้กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

3.3.2.1 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการเริ่มต้นฉีดเส้นใยในลอน 6

ทำการเตรียมความเข้มข้น 15 wt.% แล้วปรับค่าความต่างศักย์ 10 kV และ 15 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใย 5 cm และ 10 cm เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเริ่มต้นฉีดเส้นใยในลอน 6 ได้

3.3.2.2 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเมมเบรน โดยศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อลักษณะพื้นฐานวิทยา และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของเส้นใยในลอน 6

1) ผลของความเข้มข้นของสารละลายในลอน 6

ทำการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายเป็น 15 wt.%, 20 wt.%, 25 wt.%, 30 wt.% และ 35 wt.% ตามลำดับ โดยที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยเป็น 10 cm และความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็น 15 kV

2) ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้

ทำการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าเป็น 10, 15 และ 20 kV ตามลำดับ โดยที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยเป็น 10 cm และสารละลายพอลิเมอร์มีความเข้มข้น 20 wt.%

3) ผลของระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใย

ทำการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยเป็น 5, 10 และ 15 cm ตามลำดับ โดยที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็น 20 kV และสารละลายพอลิเมอร์มีความเข้มข้น 20 wt.%

3.3.2.3 ศึกษาพื้นฐานวิทยาและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของเส้นใยในลอน 6 ของชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมจากกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่สภาวะต่าง ๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM)

3.3.3 การเตรียมตัวอย่างสำหรับอุปกรณ์เก็บอากาศแบบพาสซีฟ

3.3.3.1 การเตรียมอุปกรณ์เก็บตัวอย่างโดยใช้กระดาษกรองเปล่า ๆ

1. นำกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ล้างด้วยน้ำ DI 2 ครั้ง โดยใช้คีมคีบกระดาษกรองแหว่งในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิเมตร ที่ใส่น้ำ DI อยู่ทั้ง 2 บีกเกอร์ ตามลำดับ
2. ล้างด้วยเมทานอล 1 ครั้ง โดยใช้กระดาษกรองแหว่งในบีกเกอร์ที่ใส่มะทานอลแทน
3. นำกระดาษกรองที่ทำความสะอาดแล้ววางลงในถาดพลาสติก แล้วนำถาดใส่ในตู้ควบคุมบรรยากาศ ภายใต้สภาวะบรรยากาศในโตรเจนจนกระดาษกรองแห้งสนิท
4. เก็บกระดาษกรองที่แห้งแล้วไว้ในถุงพลาสติกชนิดซิปล็อคและปิดให้สนิท

3.3.3.2 การเตรียมอุปกรณ์เก็บตัวอย่างที่ใช้เส้นใยไนลอน 6 ที่มีกระดาษกรองเป็นตัวก้ำจุน

เตรียมโดยวิธีเช่นเดียวกับ 3.3.3.1 แต่ใช้เส้นใยไนลอน 6 ที่มีกระดาษกรองเป็นตัวก้ำจุนแทนกระดาษกรองทั่วไป

3.3.3.3 การเตรียมสารละลายดูดซับหรือสารละลายชุบกระดาษกรอง (Coating solution)

ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.44 กรัม ในบีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิเมตร และชั่งโซเดียมไอโอดด์ 3.95 กรัม ในบีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิเมตร ละลายด้วยน้ำ DI เล็กน้อยแล้วผสมลงในขวดวัดปริมาตรและปรับปริมาตรด้วยเมทานอลจนถึงขีดวัดปริมาตร

3.3.3.4 ทำการฉีดสารละลายดูดซับในปริมาตร 50 ไมโครลิตร ลงไปบนแผ่นดูดซับของอุปกรณ์เก็บตัวอย่าง (ในบริเวณศูนย์กลางของกระดาษกรองเปล่าหรือเส้นใยไนลอนที่มีกระดาษกรองเป็นตัวก้ำจุน)

3.3.3.5 นำไปส่อง SEM เพื่อดูขนาดและการกระจายตัวของสารละลายดูดซับ (เกลือ) บนแผ่นดูดซับ

3.3.4 ทำการศึกษาเกี่ยวกับขนาดและการกระจายตัวของผลึก โดยทำการศึกษาดังนี้

ทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายดูดซับที่ใช้ฉีดลงไปบนเส้นใยไนลอน 6 ที่มีกระดาษกรองเป็นตัวก้ำจุน โดยให้มีความเข้มข้นที่ต่ำลงเพื่อดูขนาดและการกระจายตัวของผลึกเกลือ โดยใช้เทคนิค SEM

3.3.5 การเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์เชิงปริมาณแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์

3.3.5.1 การเตรียมสารละลายที่ทำให้เกิดสี (เตรียมใหม่ทุกครั้งที่ทำทดลอง)

ชั่งกรดซัลฟานิลิก 2.00 กรัม และเอ็น-หนึ่ง-แนพทิลเอธิลทีลิน ไดเอมีน ไดไฮโดรคลอไรด์ 0.05 กรัม ในบีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร ละลายด้วยน้ำ DI เล็กน้อย จากนั้นเปิดกรดฟอสฟอริก 2.00 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI จนถึงขีดวัดปริมาตร

3.3.5.2 การเตรียมสารละลายโซเดียมไอโอดัดเข้มข้น 0.05xx M เพื่อทำการเจือจางสารละลายมาตรฐาน

ชั่งโซเดียมไอโอดัด 0.1975 กรัม ในบีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร ละลายด้วยน้ำ DI เล็กน้อยแล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI ในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร จนถึงขีดวัดปริมาตร

3.3.5.3 การเตรียมสารละลายมาตรฐานโซเดียมไนไตรท์ 0.0250 M

ชั่งโซเดียมไนไตรท์ 0.1725 กรัม ในบีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร ละลายด้วยน้ำ DI เล็กน้อยแล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จนถึงขีดวัดปริมาตร

3.3.5.4 การเตรียมสารละลายมาตรฐานโซเดียมไนไตรท์ 50 μ M (Working standard)

เปิดสารละลายจากข้อ 3.3.5.3 ปริมาตร 0.20 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยสารละลายโซเดียมไอโอดัด จากข้อ 3.3.5.2 จนถึงขีดวัดปริมาตร

3.3.5.5 การเตรียมแผ่นดูดซับสำหรับเก็บตัวอย่างแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์และการทำแบลงค์

1. ทำการล้างแผ่นดูดซับตามข้อ 3.3.3.1 และ 3.3.3.2 จากนั้นนำแผ่นดูดซับที่ได้ฉีดสารละลายดูดซับลงไป นำไปประกอบเซลล์ให้ครบแล้วเก็บเซลล์เก็บอากาศไว้ในถุงพลาสติกชนิดซิปล็อคที่อุณหภูมิ 4 °C
2. นำเซลล์เก็บอากาศที่เตรียมไว้แล้วไปติดตั้งในจุดเก็บตัวอย่าง

3.3.5.6 การสกัดแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์จากสารตัวอย่างและแบลงค์

1. เปิดถุงพลาสติกชนิดซิปล็อคแล้วเปิดน้ำ DI 5.00 มิลลิลิตร ลงบนเส้นใยในลอนที่มีกระดาษกรองเป็นตัวค้ำจุนและกระดาษกรองเปล่า ๆ และไล่ฟองอากาศออกจากถุงปิดให้สนิท ปล่อยทิ้งไว้ 1 คืน
2. นำถุงซิปล็อคไปสกัดต่อในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลาครึ่งชั่วโมง
3. เปิดถุงพลาสติกชนิดซิปล็อคแล้วเปิดสารละลายจากข้อ 1. มา 3.00 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง
4. เปิดสารละลายที่ทำให้เกิดสี (Coloring solution) 2.00 มิลลิลิตร ลงไป เขย่าให้ทั่ว
5. ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที จะได้สารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพู ส่วนแบลงค์ต้องใสไม่มีสี

6. นำสารละลายที่สกัดได้และแบลงค์ที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 538 นาโนเมตร แล้วอ่านค่าความเข้มข้นของไนไตรท์จากกราฟมาตรฐาน

3.3.6 การเตรียมสารละลายมาตรฐานของไนไตรท์

ปีเปตสารละลายมาตรฐานของไนไตรท์ความเข้มข้น 50 ไมโครโมล จากข้อ 3.3.5.4 และสารละลายโซเดียมไอโอไดด์ จากข้อ 3.3.5.2 ตามตารางที่ 3.1 ลงในหลอดทดลองปริมาตร 10 มิลลิลิตร และเติมสารละลายที่ทำให้เกิดสีปริมาตร 2 มิลลิลิตร เขย่าและตั้งทิ้งไว้ 30 นาที

ตารางที่ 3.1 แสดงการเตรียมสารละลายมาตรฐานสำหรับวัดความเข้มข้นของไนไตรท์

ความเข้มข้นของ NO_2^- (μM)	ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน NO_2^- 50 μM (mL)	ปริมาตรของสารละลาย NaI (mL)	สารละลาย Coloring reagent (mL)	ปริมาตรรวมสุดท้าย (mL)
30	3.00	0.00	2.00	5.00
28	2.80	0.20	2.00	5.00
26	2.60	0.40	2.00	5.00
24	2.40	0.60	2.00	5.00
22	2.20	0.80	2.00	5.00
20	2.00	1.00	2.00	5.00
18	1.80	1.20	2.00	5.00
16	1.60	1.40	2.00	5.00
14	1.40	1.60	2.00	5.00
12	1.20	1.80	2.00	5.00
10	1.00	2.00	2.00	5.00
8	0.80	2.20	2.00	5.00
6	0.60	2.40	2.00	5.00
4	0.40	2.60	2.00	5.00
2	0.20	2.80	2.00	5.00
0	0.00	3.00	2.00	5.00

3.3.7 จุดเก็บตัวอย่างแก๊สในโตรเจนไดออกไซด์และจำนวนในการเก็บตัวอย่าง

ทำการเก็บตัวอย่างแก๊สในโตรเจนไดออกไซด์ที่สถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศของกรมควบคุมมลพิษที่ตั้งอยู่ในสถานที่ทำการไปรษณีย์เขตราษฎร์บูรณะ ถนนประชาธิปไตย จังหวัดกรุงเทพฯ ฯ โดยทำการเก็บตัวอย่าง 3 ครั้งต่อการศึกษาแต่ละปีจจัย และตัวอย่าง 1 ครั้งเก็บครั้งละ 3 ชั่วโมงโดยเก็บในช่วงเวลาเดียวกัน

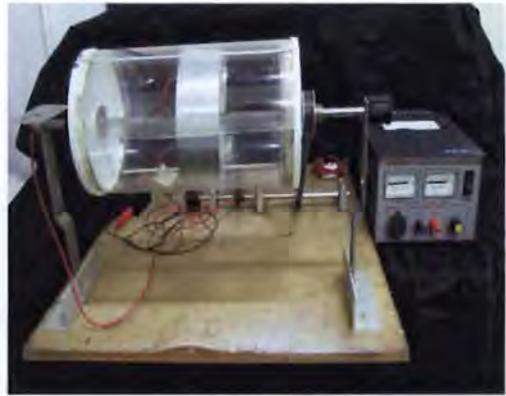
บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1 การจัดเตรียมอุปกรณ์ของกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตมีอุปกรณ์ที่ประกอบไปด้วย (1) เครื่องกำเนิดศักย์ไฟฟ้าแรงสูง (2) หลอดนิตยาสำหรับบรรจุพอลิเมอร์ตัวอย่าง (3) เครื่องดันหลอดนิตยา และ (4) อุปกรณ์รองรับเส้นใย ดังรูปที่ 4.2 (ก) ซึ่งลักษณะของอุปกรณ์รองรับเส้นใยมี 2 แบบคือ แบบจากตั้งปกติ และแบบจากหมุน ดังรูปที่ 4.1 สำหรับในการทดลองสามารถจัดเตรียมอุปกรณ์ต่าง ๆ ในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตได้ดังรูปที่ 4.2 หลังจากนั้นทำการฉีดให้เป็นเส้นใยนาโนออกมา

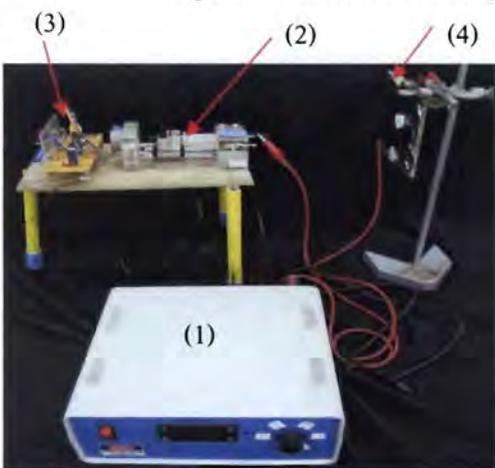


(ก) จากแบบตั้งปกติ



(ข) จากแบบหมุน

รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะของอุปกรณ์รองรับเส้นใย (ฉากรองรับ)



(ก) จากแบบตั้งปกติ



(ข) จากแบบหมุน

รูปที่ 4.2 แสดงการจัดอุปกรณ์ต่าง ๆ ในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

4.2 การเตรียม Filter membrane สำหรับดูดซับสารมลพิษโดยใช้เส้นใยนาโน

การนำเส้นใยนาโนที่ได้ไปเตรียมเป็น Filter membrane สำหรับดูดซับสารมลพิษ สามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่ การนำเส้นใยนาโนพ่นเคลือบ (Coat) ทับ ไปบนกระดาษกรอง โดยกระดาษกรองจะเป็นตัวค้ำจุน (Support) เส้นใยนาโนอยู่ และเมื่อนำไปจุ่มในสารละลายก็จะทำให้สารละลายติดบนเส้นใยนาโน และกระดาษกรอง แล้วนำไปใช้เป็นตัวดูดซับดังรูปที่ 4.3 และอีกวิธีหนึ่งคือ การขึ้นรูปเส้นใยนาโนให้มีลักษณะเป็นผืนในลักษณะ Nonwoven sheet จากนั้นตัดแผ่นเส้นใยให้มีขนาดเท่ากับกระดาษกรองที่ใช้เป็นตัวดูดซับสารมลพิษ แล้วนำแผ่นเส้นใยนาโนที่ตัดได้ไปใช้เป็นตัวดูดซับโดยตรงดังรูปที่ 4.4



(ก) กระดาษกรอง



(ข) ดึงแผ่นเส้นใยนาโนออกจากกระดาษกรอง

รูปที่ 4.3 แสดง Filter membrane ที่ได้มาจากการขึ้นรูปเส้นใยนาโนลงบนกระดาษกรอง โดยมีกระดาษกรองเป็นตัวค้ำจุน



(ก) แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์



(ข) แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์มีเส้นใยนาโน

รูปที่ 4.4 แสดง Filter membrane ที่ได้มาจากการขึ้นรูปเส้นใยนาโน โดยไม่มีกระดาษกรองเป็นตัวค้ำจุน

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าเส้นใยนาโนบนกระดาษกรองมีลักษณะเป็นแผ่นสีขาวที่หนาและไม่ขาดหรือแตกหักได้ง่าย ขณะที่เส้นใยนาโนบนลูมิเนียมฟอสฟอไรต์มีลักษณะที่เป็นแผ่นบาง ๆ ซึ่งอาจจะขาดหรือแตกหักได้ง่าย เนื่องจากเส้นใยบนกระดาษกรองจะมีกระดาษกรองเป็นตัวช่วยค้ำจุนอยู่ทำให้สปินตได้และเส้นใยนาโนไม่ขาดหรือเปราะได้ง่าย ดังนั้นจึงสามารถนำไปใช้เป็น Filter membrane ได้ทันที ขณะที่เส้นใยนาโนบนลูมิเนียมฟอสฟอไรต์จะสปินตได้น้อยดังรูป 4.4 (ข) และขาดหรือแตกหักได้ง่าย จึงตัดเป็นแผ่น Filter membrane ได้ยาก จึงไม่เหมาะจะนำมาใช้เป็น Filter membrane ได้ ดังนั้นในการทดลองต่อไปจะใช้วิธีการนำเส้นใยนาโนพันเคลือบทับไปบนกระดาษกรอง

4.3 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเส้นใยนาโนในลอน 6

ทำการผลิตเส้นใยนาโน และศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อขนาดและรูปร่างของเส้นใย ซึ่งตัวแปรที่ศึกษาจะประกอบไปด้วย ความเข้มข้นของสารละลาย ความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใย แล้วนำไปส่องด้วยเครื่อง SEM เพื่อศึกษาขนาดและรูปร่างของเส้นใยที่ได้

4.3.1 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเส้นใย โดยใช้ฉากเป็นแบบตั้ง

4.3.1.1 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการเริ่มฉีดเส้นใยในลอน 6

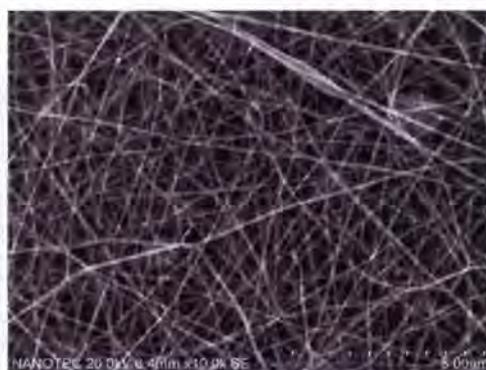
สภาวะที่เหมาะสมในการเริ่มฉีดเส้นใยในลอน 6 คือ สภาวะที่เริ่มสปिनออกมาเป็นเส้นใยได้ ซึ่งจะทำให้การทดลองโดยใช้ความเข้มข้น 15 wt.% ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 และ 15 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใย 5 และ 10 cm จากการทดลองพบว่าเมื่อเริ่มเกิดเส้นใยนาโนจะมีเสียงฟู่และเห็นภาพบนฉากเป็นเส้นสีขาวกระจายอยู่ที่ฉากรับ ซึ่งที่ระยะห่าง 5 cm จะได้เส้นใยที่ยังไม่ค่อยแห้ง เนื่องจากมีระยะทางที่น้อยจึงทำให้ตัวทำละลายที่อยู่ในสารละลายเกิดการระเหยออกไปได้ในปริมาณที่น้อย และที่ความต่างศักย์ 10 kV พบว่าได้เส้นใยออกมาในปริมาณน้อย เนื่องจากความแรงของสนามไฟฟ้าที่ให้ม้น้อย ทำให้ประจุไฟฟ้าที่สารละลายมีปริมาณน้อย จึงมีแรงผลักระหว่างประจุที่น้อย ส่งผลให้สารละลายพุ่งออกมาจากปลายเข็มได้น้อยลง ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.5 ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการฉีดเส้นใยในลอน 6 คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยที่ 10 cm แล้วนำสภาวะที่ได้ไปทำการศึกษาหาความเข้มข้นของสารละลายในลอน 6 ต่อไป

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการเริ่มฉีดเส้นใยไพลอน 6

ความเข้มข้นของ สารละลาย ไพลอน 6 (wt.%)	สภาวะที่ใช้ในการทำอิเล็กโตรสปินนิ่ง				
	15	ระยะห่าง (cm)	5	5	10
ความต่างศักย์ (kV)		10	15	10	15
ลักษณะและปริมาณ ของเส้นใยที่ได้		ไม่ค่อยแห้ง และปริมาณ เส้นใยน้อย	ไม่ค่อยแห้ง และปริมาณ เส้นใยมาก	แห้งและ ปริมาณเส้น ใยน้อย	แห้งและ ปริมาณ เส้นใยมาก



(ก) ระยะห่าง 5 cm และความต่างศักย์ 10 kV



(ข) ระยะห่าง 10 cm และความต่างศักย์ 15 kV

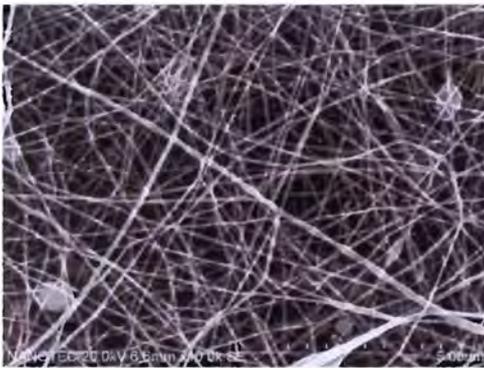
รูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่าย SEM ของลักษณะและปริมาณของเส้นใยที่ได้ (ความเข้มข้นที่ใช้ 15 wt.%)

4.3.1.2 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเมมเบรน โดยศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อ
ลักษณะวิทยาของเส้นใยไพลอน 6

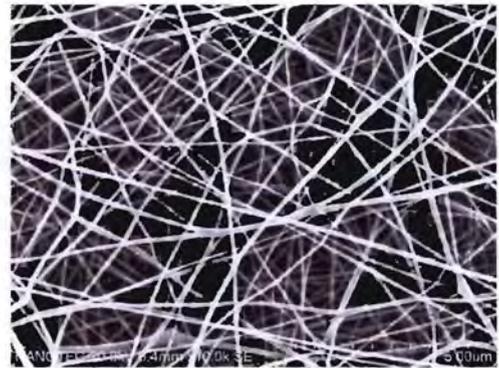
4.3.1.2.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายไพลอน 6

ทำการทดลองโดยใช้ความเข้มข้น 15-35 wt.% ความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ 15 kV และระยะห่างระหว่าง
ปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยคงที่ 10 cm จากการทดลองพบว่าภาพของเส้น
ใยไพลอน 6 ที่ได้จากการส่อง SEM จะมีลักษณะเป็นผืนในลักษณะ Nonwoven mat และมีลักษณะ
วิทยาที่แตกต่างกันที่ความเข้มข้นของสารละลายต่างกัน โดยพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมี
ค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยดังรูปที่ 4.6 และในการวิเคราะห์ขนาด

เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยสามารถวัดได้จากเส้นใยในภาพถ่าย SEM ซึ่งวัดเป็นจำนวนไม่น้อยกว่า 50 เส้น และเส้นใยที่เลื้อยกวัดจะเป็นเส้นใยที่อยู่เป็นเส้นเดี่ยว ๆ ส่วนเส้นใยที่พันกันแล้วเกิดการรวมตัวเป็นเส้นใหญ่และเส้นใยที่มีเม็ดบิดเกิดขึ้นจะไม่นำมาวัด แล้วนำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยไนลอน 6 ที่ได้มาทำเป็นแผนภูมิแท่งเพื่อดูการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยไนลอน 6 ในแต่ละความเข้มข้น ซึ่งจะแสดงได้ดังรูปที่ 4.7



ก) ความเข้มข้น 15 wt.%



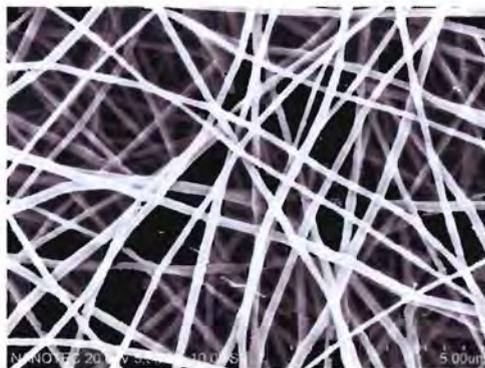
ข) ความเข้มข้น 20 wt.%



ค) ความเข้มข้น 25 wt.%

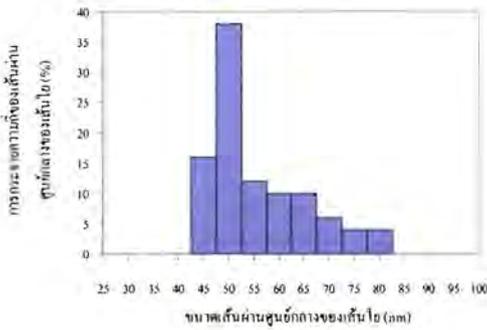


ง) ความเข้มข้น 30 wt.%

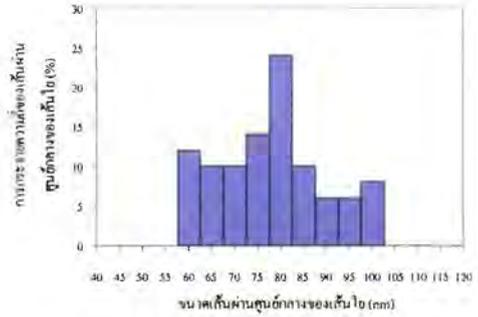


จ) ความเข้มข้น 35 wt.%

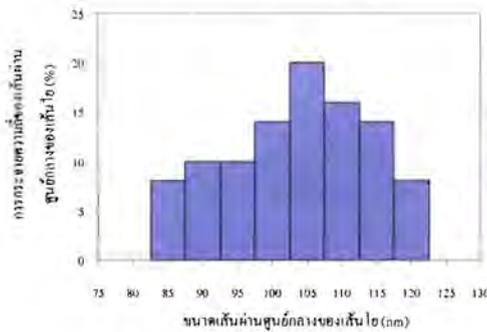
รูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่าย SEM ของความเข้มข้นของสารละลายไนลอน 6 (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ 15 kV และ 10 cm)



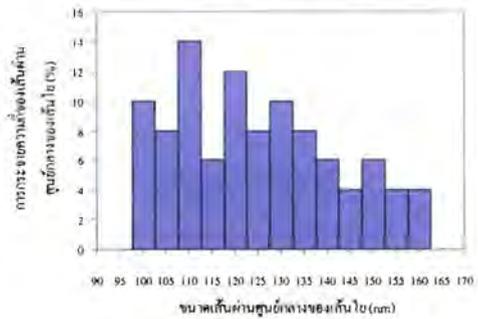
ก) ความเข้มข้น 15 wt.%



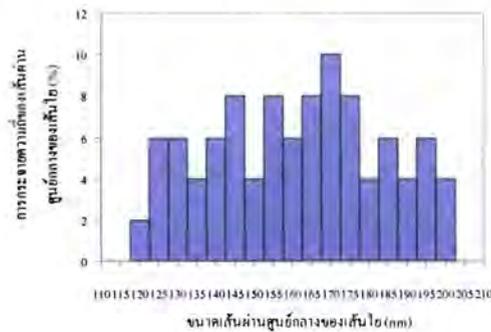
ข) ความเข้มข้น 20 wt.%



ค) ความเข้มข้น 25 wt.%



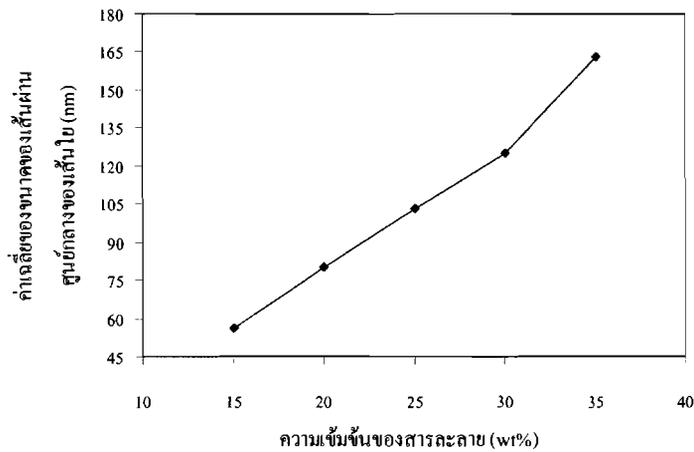
ง) ความเข้มข้น 30 wt.%



จ) ความเข้มข้น 35 wt.%

รูปที่ 4.7 แสดงค่าการกระจายความถี่ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในลอน 6 ที่มีลักษณะเป็น Nonwoven mat ที่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายในลอน 6 (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 15 kV และ 10 cm)

จากรูป (ก-จ) พบว่าที่ความเข้มข้นต่ำ ๆ จะมีการกระจายตัวของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่แคบกว่าความเข้มข้นสูง ๆ ซึ่งที่ความเข้มข้น 30-35 wt.% มีการกระจายตัวของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่กว้างมาก เนื่องจากที่ความเข้มข้นสูงตัวทำละลายอาจจะเหวี่ยงเข้าจึงทำให้เส้นใยเล็ก ๆ เกิดการมารวมตัวกันทำให้ได้เส้นใยที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมากขึ้นจะพบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจะมีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 56 nm เป็น 163 nm ซึ่งแสดงได้ ดังรูปที่ 4.8

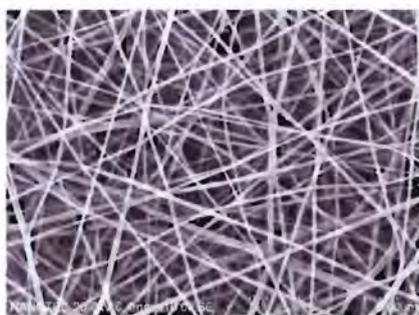


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายในลอน 6 กับค่าเฉลี่ยของขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในลอน 6 (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 15 kV และ 10 cm)

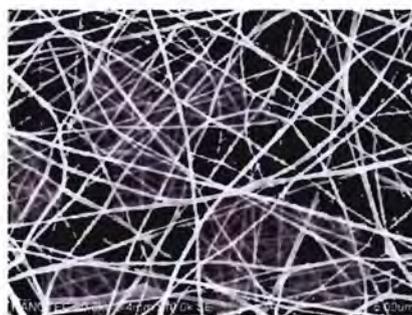
จากรูปที่ 4.8 พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในลอน 6 ค่อนข้างเป็นเส้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลายในลอน 6 โดยเฉพาะช่วงความเข้มข้นที่ต่ำ ส่วนที่ความเข้มข้นสูง 35 wt.% จะเบี่ยงเบนจากเส้นตรง และเมื่อความเข้มข้นของสารละลายในลอน 6 มีค่ามากขึ้น ส่งผลให้เส้นใยที่ได้ไม่มีเม็ดบีดเกิดขึ้นและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยเฉลี่ยของเส้น ใยมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย เนื่องจากค่าความเข้มข้นที่มากขึ้นจะทำให้มีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งทำให้การเกี่ยวพันกันของสายโซ่มีมากขึ้น จึงทำให้สารละลายพอลิเมอร์ที่ถูกฉีดออกมาสามารถยืดออกเป็นเส้น ใยที่เรียบและไม่มีเม็ดบีดเกิดขึ้น และมีปริมาณเนื้อสารพอลิเมอร์ที่ถูกฉีดออกมามากขึ้น ทำให้หลังจากตัวทำละลายระเหยแล้วจะเหลือเนื้อพอลิเมอร์มากขึ้น ส่งผลให้เส้น ใยมีขนาดที่ใหญ่มากขึ้น แล้วนำผลของความเข้มข้นของสารละลายในลอน 6 ที่ได้ไปใช้ศึกษาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อไป

4.3.1.2.2 การศึกษาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้

ทำการทดลองโดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10-20 kV ความเข้มข้นคงที่ 20 wt.% และระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยคงที่ 10 cm จากการทดลองจะได้ภาพถ่ายของเส้นใยจากการส่อง SEM ดังรูปที่ 4.9 และพบว่าเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้น ใยมีค่าลดลงด้วย และการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในลอน 6 ในแต่ละความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้จะแสดงได้ดังรูปที่ 4.10



ก) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 kV



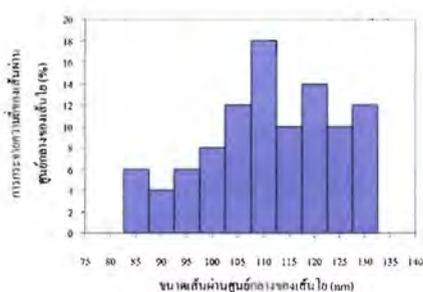
ข) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV



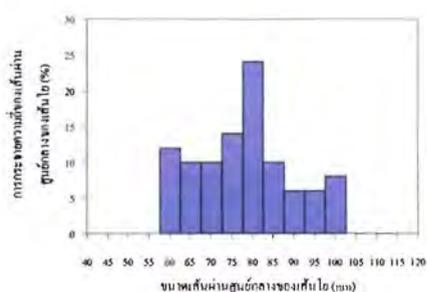
ค) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV

รูปที่ 4.9 แสดงภาพถ่าย SEM ของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 20 wt.%

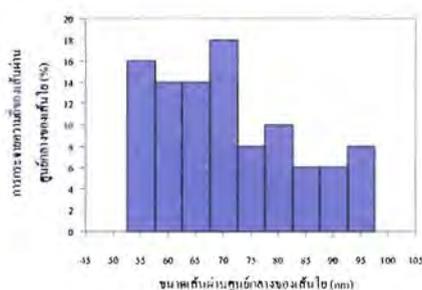
และ 10 cm)



ก) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 kV



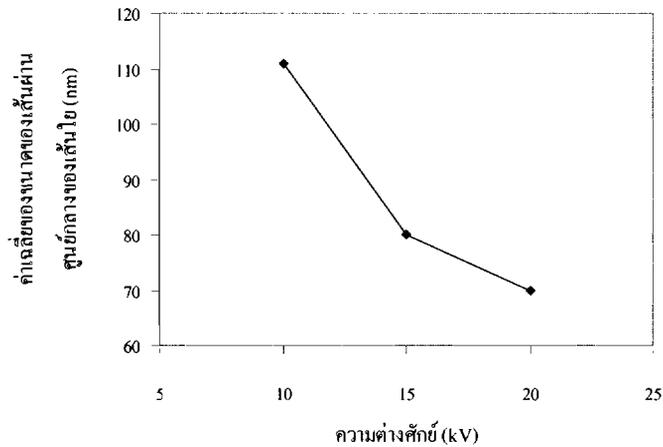
ข) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV



ค) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV

รูปที่ 4.10 แสดงค่าการกระจายความถี่ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในลอน 6 ที่มีลักษณะเป็น Nonwoven mat ที่ขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 20 wt.% และ 10 cm)

จากรูป (ก-ค) พบว่ามีการกระจายของขนาดเส้นใยที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้จะไม่ค่อยมีผลต่อการกระจายของขนาดเส้นใยเท่ากับผลของความเข้มข้นของสารละลาย และเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้มากขึ้นจะพบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเส้นใยจะมีค่าเฉลี่ยลดลงจาก 111 nm เป็น 70 nm ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้กับค่าเฉลี่ยของขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในลอน 6 (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 20 wt.% และ 10 cm)

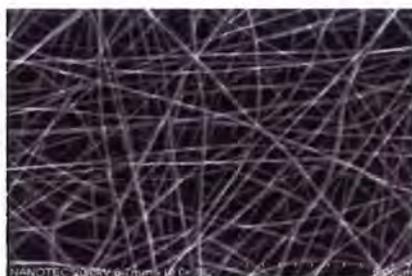
จากรูปที่ 4.11 พบว่าเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้มีค่ามากขึ้น จะส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของเส้นใยมีค่าเล็กลงด้วย เนื่องจากค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มากขึ้นจะทำให้เกิดประจุไฟฟ้าออกอยู่ที่ผิวพอลิเมอร์เยอะทำให้มีแรงผลักระหว่างประจุสูง จึงทำให้เกิดการยืดตัวของกระแสพอลิเมอร์ออกไปได้ยาวขึ้น ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของเส้นใยจึงมีค่าเล็กลง แล้วนำผลของความเข้มข้นของสารละลายในลอน 6 ที่ได้กับความต่างศักย์ไฟฟ้าไปใช้ศึกษาผลของระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยของสารละลายในลอน 6 ต่อไป

4.3.1.2.3 การศึกษาผลของระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยของสารละลายในลอน 6

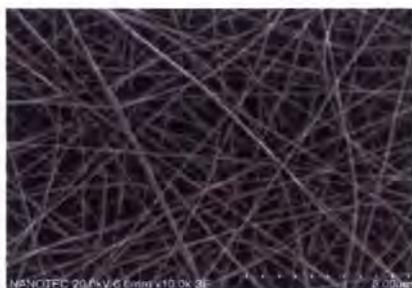
ทำการทดลองโดยใช้ระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใย 5-15 cm ความเข้มข้นคงที่ 20 wt.% และความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ 20 kV จากการทดลองจะได้ภาพถ่ายของเส้นใยจากการส่อง SEM ดังรูปที่ 4.12 และพบว่าเมื่อระยะห่างที่ใช้มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีค่าลดลงด้วย และการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในลอน 6 ในแต่ละระยะห่างที่ใช้จะแสดงได้ดังรูปที่ 4.13



ก) ระยะห่าง 5 cm

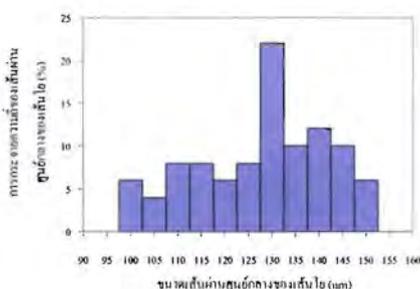


ข) ระยะห่าง 10 cm

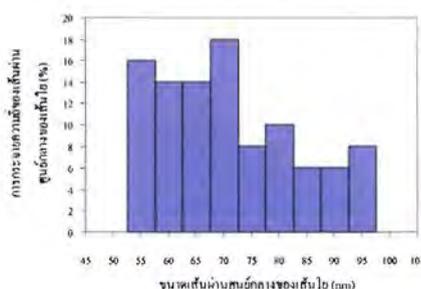


ค) ระยะห่าง 15 cm

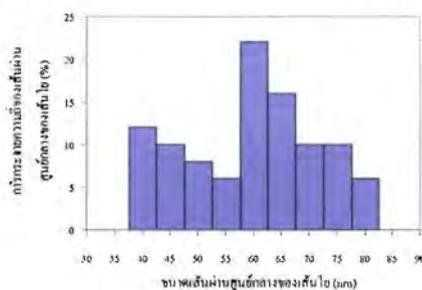
รูปที่ 4.12 แสดงภาพถ่าย SEM ของระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยของสารละลายไนลอน 6 (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 20 wt.% และ 20 kV)



ก) ระยะห่าง 5 cm



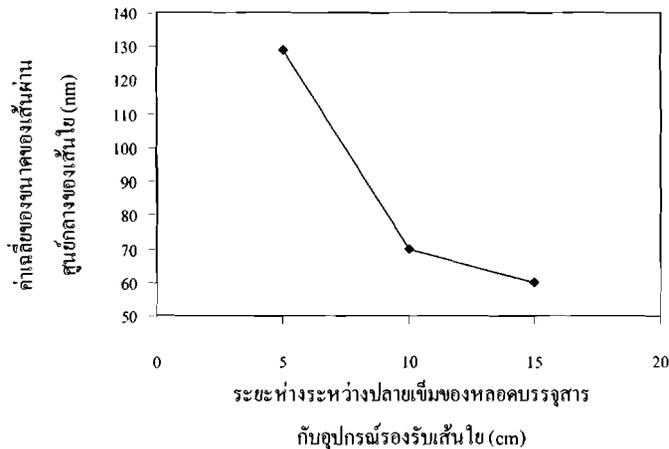
ข) ระยะห่าง 10 cm



ค) ระยะห่าง 15 cm

รูปที่ 4.13 แสดงค่าการกระจายความถี่ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยไนลอน 6 ที่มีลักษณะเป็น Nonwoven mat ที่ขึ้นอยู่กักระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยของสารละลายไนลอน 6 (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 20 wt.% และ 20 kV)

จากรูป (ก-ค) พบว่าที่ระยะห่าง 5 cm มีการกระจายตัวของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่กว้าง เนื่องจาก ระยะห่างที่น้อยทำให้เส้นใยยังไม่แห้ง จึงทำให้เส้นใยมารวมตัวกันเกิดเป็นเส้นใยที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งจะคล้ายกับกรณีที่ความเข้มข้นสูงในรูปที่ 4.7 (จ) ส่วนที่ระยะห่างมากขึ้นจะมีการกระจายตัวของขนาดที่แคบลง ดังนั้นเมื่อระยะห่างที่ใช้มีค่ามากขึ้นจะพบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจะมีค่าเฉลี่ย ลดลงจาก 129 nm เป็น 60 nm ซึ่งแสดงได้ ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับ อุปกรณ์รองรับเส้นใยกับค่าเฉลี่ยของขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในลอน 6 (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 20 wt.% และ 20 kV)

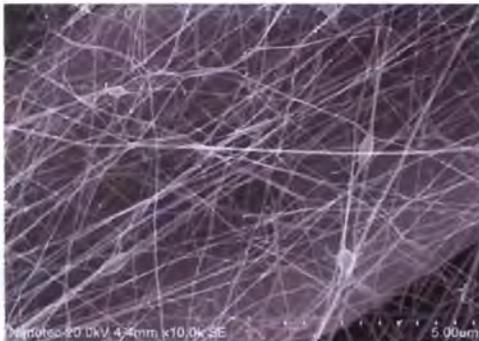
จากรูปที่ 4.14 พบว่าเมื่อระยะห่างมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของเส้นใยมีค่าเล็กลงด้วย เนื่องจากระยะห่างที่มากขึ้นจะทำให้เมื่อกระแสพอลิเมอร์เกิดการยึดตัวจะมีระยะให้เส้นใยยึดตัวออกไปได้มากขึ้น ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของเส้นใยจึงมีค่าเล็กลง

4.3.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเส้นใย โดยใช้ฉากเป็นแบบหมุน

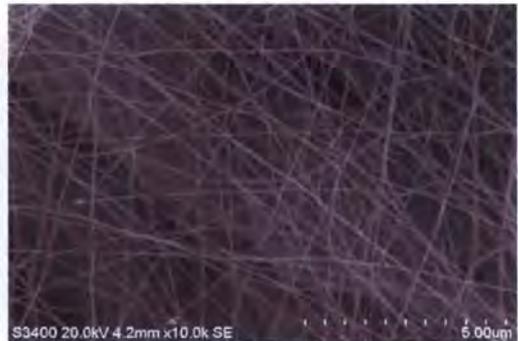
ในการทดลองนี้จะเป็นการศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของเส้นใยในลอน 6 เช่นเดียวกันกับหัวข้อ 4.3.1 แต่ทำการเปลี่ยนฉากที่ใช้จากฉากที่ตั้งปกติไปเป็นฉากแบบหมุน และหมุนด้วยความเร็วรอบ 50 รอบ/นาที

4.3.2.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายไนลอน 6

ทำการทดลองโดยใช้ความเข้มข้น 15-35 wt.% ความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ 15 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยคงที่ 10 cm จากการทดลองพบว่าภาพของเส้นใยไนลอน 6 ที่ได้มาจากการส่อง SEM มีลักษณะการจัดเรียงตัวที่ดีขึ้นคือ เส้นใยยึดเป็นเส้น ๆ มากขึ้น และมีสัญญาณวิทยาที่แตกต่างกันที่ความเข้มข้นของสารละลายต่างกัน โดยพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเส้นใยมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยดังรูปที่ 4.15 และการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยไนลอน 6 ในแต่ละความเข้มข้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.16



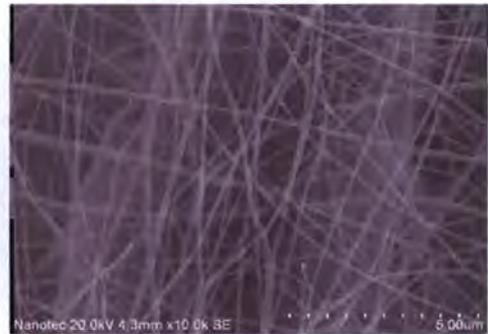
ก) ความเข้มข้น 15 wt.%



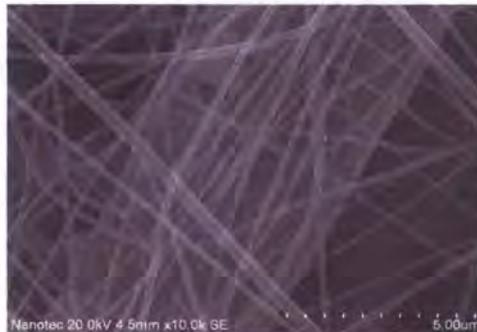
ข) ความเข้มข้น 20 wt.%



ค) ความเข้มข้น 25 wt.%

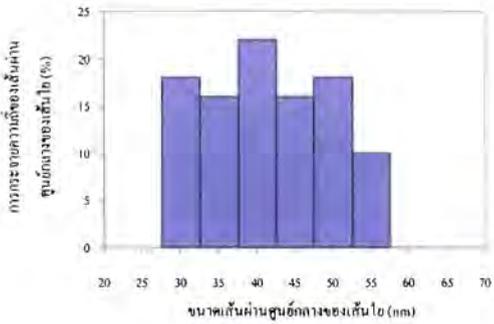


ง) ความเข้มข้น 30 wt.%

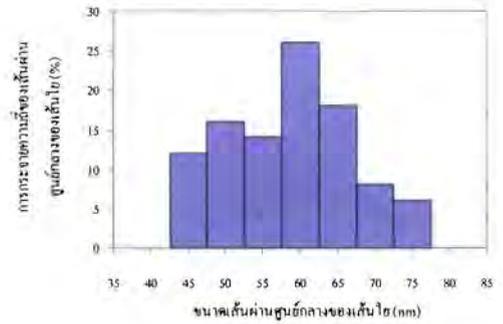


จ) ความเข้มข้น 35 wt.%

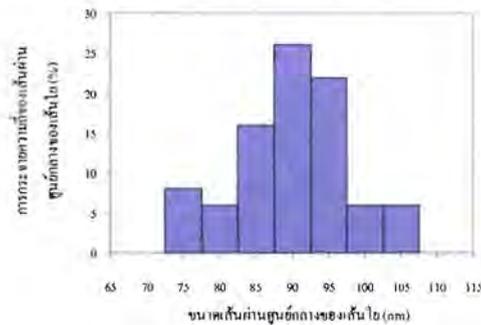
รูปที่ 4.15 แสดงภาพถ่าย SEM ของความเข้มข้นของสารละลายไนลอน 6 (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 15 kV และ 10 cm)



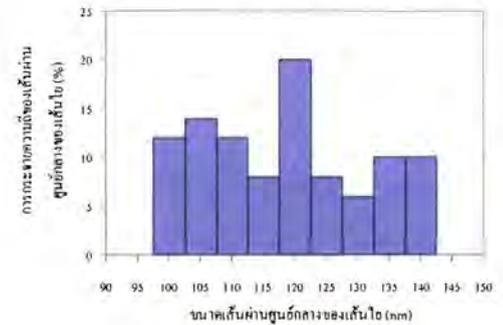
ก) ความเข้มข้น 15 wt.%



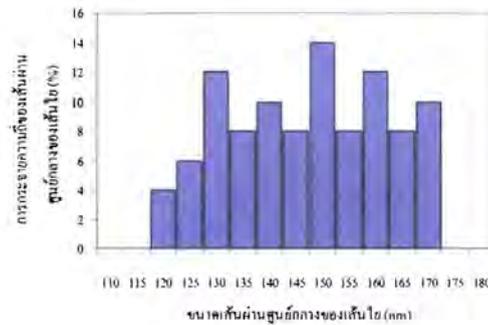
ข) ความเข้มข้น 20 wt.%



ค) ความเข้มข้น 25 wt.%



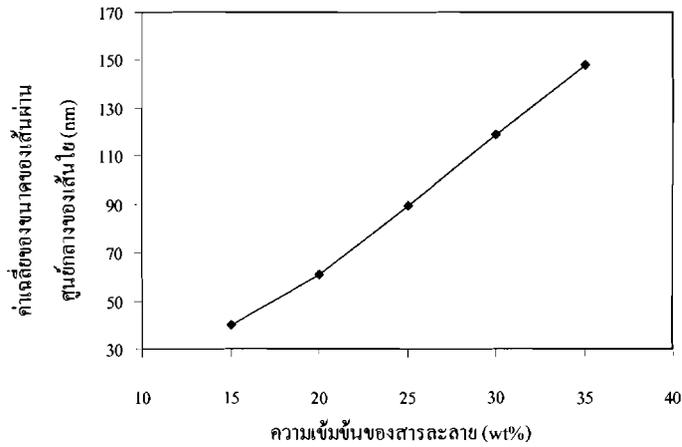
ง) ความเข้มข้น 30 wt.%



จ) ความเข้มข้น 35 wt.%

รูปที่ 4.16 แสดงค่าการกระจายความถี่ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยไพลอน 6 ที่มีลักษณะเป็น Nonwoven mat ที่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายไพลอน 6 (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 15 kV และ 10 cm)

จากรูป (ก-จ) พบว่าที่ความเข้มข้นต่ำ ๆ จะมีการกระจายตัวของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่แคบกว่าความเข้มข้นสูง ๆ ซึ่งจะคล้ายกับกรณีความเข้มข้นของรูปที่ 4.7 ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมากขึ้นจะพบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจะมีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 40 nm เป็น 148 nm ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายไนลอน 6 กับค่าเฉลี่ยของขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยไนลอน 6 (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 15 kV และ 10 cm)

จากรูปที่ 4.17 พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยไนลอน 6 จะเป็นเส้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลายไนลอน 6 และเมื่อความเข้มข้นของสารละลายไนลอน 6 มีค่ามากขึ้น ส่งผลให้เส้นใยที่ได้ไม่มีเม็ดบีดเกิดขึ้นและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของเส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย แล้วนำผลของความเข้มข้นของสารละลายไนลอน 6 ที่ได้ไปใช้ศึกษาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อไป

4.3.2.2 การศึกษาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้

ทำการทดลองโดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10-20 kV ความเข้มข้นคงที่ 20 wt.% และระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยคงที่ 10 cm จากการทดลองจะได้ภาพถ่ายของเส้นใยจากการส่อง SEM ดังรูปที่ 4.18 และพบว่าเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีค่าลดลงด้วย และการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยไนลอน 6 ในแต่ละความต่างศักย์ที่ใช้จะแสดงได้ดังรูปที่ 4.19



ก) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 kV



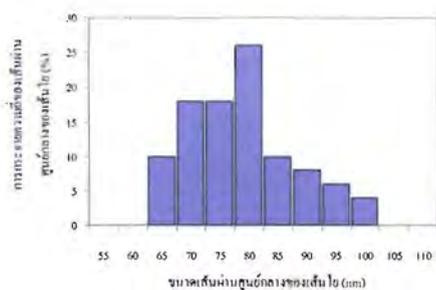
ข) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV



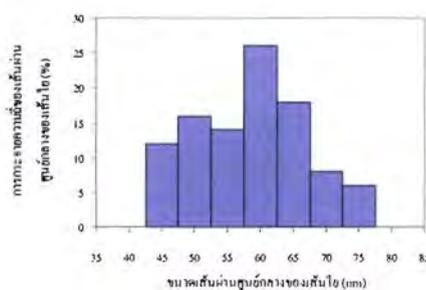
ค) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV

รูปที่ 4.18 แสดงภาพถ่าย SEM ของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 20 wt.%

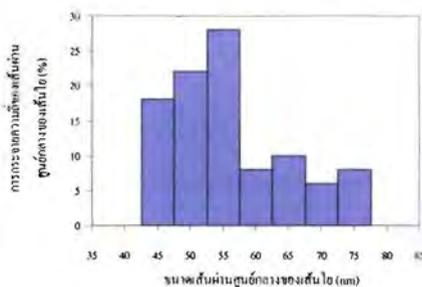
และ 10 cm)



ก) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 kV



ข) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV



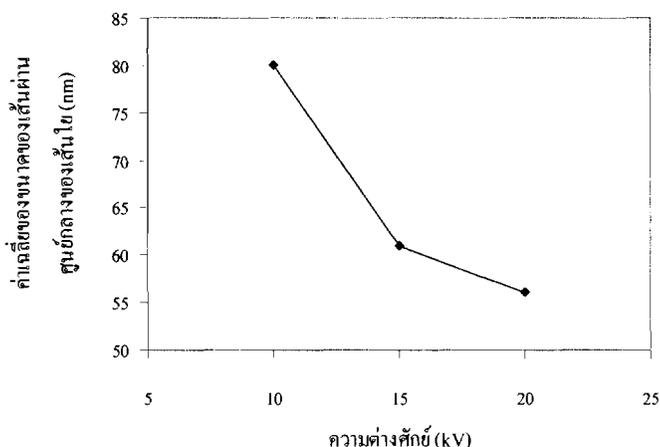
ค) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV

รูปที่ 4.19 แสดงค่าการกระจายความถี่ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในลอน 6 ที่มีลักษณะ

เป็น Nonwoven mat ที่ขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ

20 wt.% และ 10 cm)

จากรูป (ก-ค) พบว่ามีการกระจายของขนาดเส้นใยที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นความต่างศักย์ที่ใช้จะไม่ค่อยมีผลต่อการกระจายของขนาดเส้นใยเท่ากับผลของความเข้มข้นของสารละลาย และเมื่อความต่างศักย์ที่ใช้มีค่ามากขึ้นจะพบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเส้นใยจะมีค่าเฉลี่ยลดลงจาก 80 nm เป็น 56 nm ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้กับค่าเฉลี่ยของขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในลอน 6 (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 20 wt.% และ 10 cm)

จากรูปที่ 4.20 พบว่าเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าของสารละลายในลอน 6 มีค่ามากขึ้น จะส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของเส้นใยมีค่าเล็กลงด้วย แล้วนำผลของความเข้มข้นของสารละลายในลอน 6 กับความต่างศักย์ไฟฟ้าไปใช้ศึกษาผลของระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยของสารละลายในลอน 6 ต่อไป

4.3.2.3 การศึกษาผลของระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยของสารละลายในลอน 6

ทำการทดลองโดยใช้ระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใย 5-15 cm ความเข้มข้นคงที่ 20 wt.% และความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ 20 kV จากการทดลองจะได้ภาพถ่ายของเส้นใยจากการส่อง SEM ดังรูปที่ 4.21 และพบว่าเมื่อระยะห่างที่ใช้มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีค่าลดลงด้วย และการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในลอน 6 ในแต่ละระยะห่างที่ใช้จะแสดงได้ดังรูปที่ 4.22



ก) ระยะห่าง 5 cm

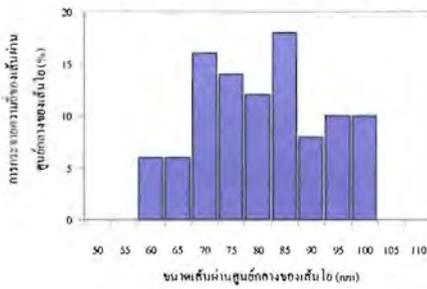


ข) ระยะห่าง 10 cm

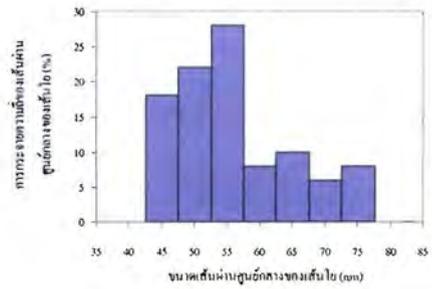


ค) ระยะห่าง 15 cm

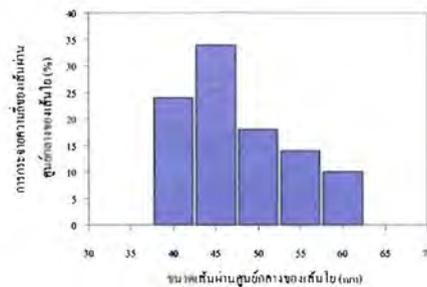
รูปที่ 4.21 แสดงภาพถ่าย SEM ของระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยของสารละลายไนลอน 6 (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 20 wt.% และ 20 kV)



ก) ระยะห่าง 5 cm



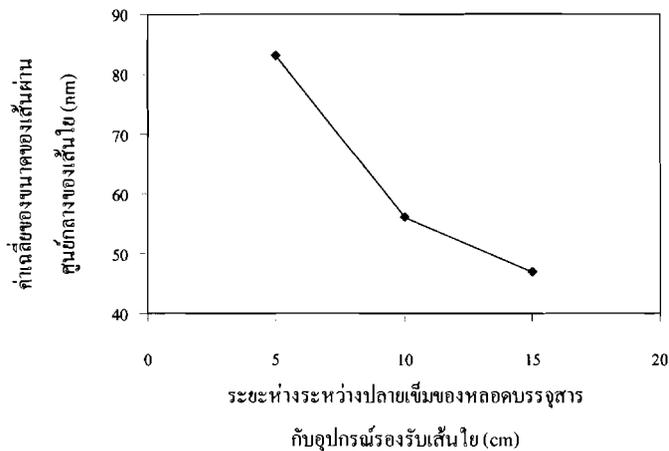
ข) ระยะห่าง 10 cm



ค) ระยะห่าง 15 cm

รูปที่ 4.22 แสดงค่าการกระจายความถี่ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยไนลอน 6 ที่มีลักษณะเป็น nonwoven mat ที่ขึ้นอยู่กักระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยของสารละลายไนลอน 6 (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 20 wt.% และ 20 kV)

จากรูป (ก-ค) พบว่าเมื่อระยะห่างมากขึ้น ทำให้การกระจายตัวของขนาดเส้นใยแคบลง ซึ่งจะคล้ายกับกรณีระยะห่างของรูปที่ 4.13 ดังนั้นเมื่อระยะห่างที่ใช้มีค่ามากขึ้นจะพบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจะมีค่าเฉลี่ยลดลงจาก 83 nm เป็น 47 nm ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.23

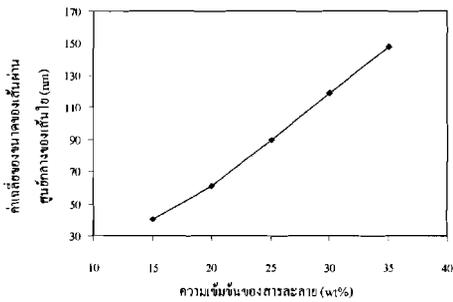


รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับ อุปกรณ์รองรับเส้นใยกับค่าเฉลี่ยของขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในลอน 6 (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 20 wt.% และ 20 kV)

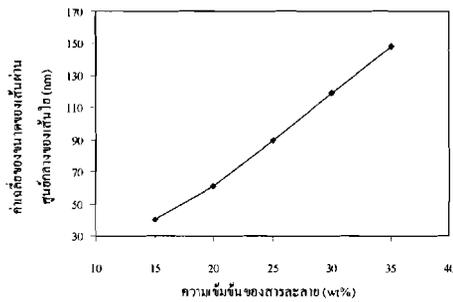
จากรูปที่ 4.23 พบว่าเมื่อระยะห่างมีค่ามากขึ้น จะส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของเส้นใยมีค่าเล็กลงด้วย

4.3.3 การเปรียบเทียบลักษณะของที่รองรับเส้นใย

ลักษณะที่รองรับของเส้นใยมี 2 แบบคือ แบบฉากตั้งปกติกับแบบหมุน ซึ่งจากผลการทดลองในหัวข้อ 4.3.2 พบว่าเมื่อใช้ฉากเป็นแบบหมุนจะทำให้เส้นใยมีการจัดเรียงตัวที่ดีขึ้นและมีการกระจายตัวของขนาดเส้นใยที่แคบลงกว่าการใช้ฉากแบบตั้ง เนื่องจากขณะที่หมุนจะเกิดการดึงยึดเส้นใยให้ดีขึ้น และขณะดึงก็จะมีเวลาให้ตัวทำละลายระเหยออก ทำให้เส้นใยแห้งขึ้นจึงลดปัญหาการรวมตัวกันของเส้นใยส่งผลให้เส้นใยมีการกระจายตัวที่ดีขึ้น และยังพบว่าการศึกษาผลของความเข้มข้น ความต่างศักย์ และระยะห่างโดยการใช้ฉากแบบหมุนจะได้เส้นใยที่มีขนาดเล็กกว่าการใช้ฉากแบบตั้ง ซึ่งจะแสดงการเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยระหว่างฉากแบบหมุนและฉากแบบตั้ง ดังรูปที่ 4.24, 4.25 และ 4.26

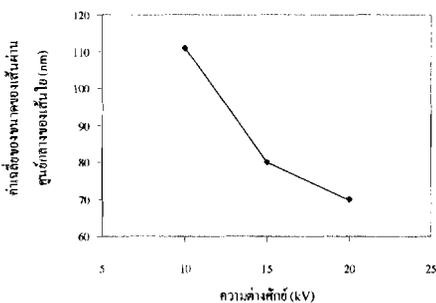


(ก) ฉากแบบตั้ง

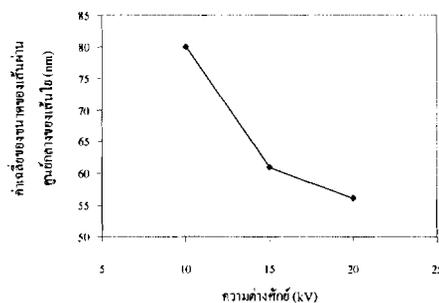


(ข) ฉากแบบหมุน

รูปที่ 4.24 แสดงการเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยของความเข้มข้นของสารละลายในลอน 6 ที่ได้จากลักษณะของที่รองรับเส้นใยที่ต่างกัน

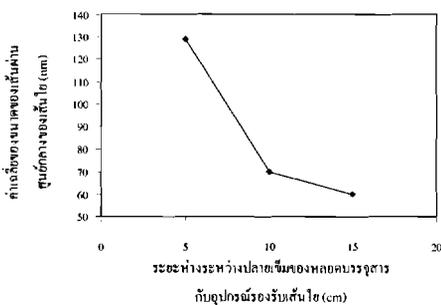


(ก) ฉากแบบตั้ง

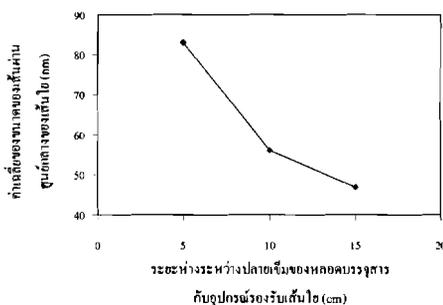


(ข) ฉากแบบหมุน

รูปที่ 4.25 แสดงการเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยของความต่างศักย์ไฟฟ้าจากลักษณะของที่รองรับเส้นใยที่ต่างกัน



(ก) ฉากแบบตั้ง



(ข) ฉากแบบหมุน

รูปที่ 4.26 แสดงการเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยของระยะห่างจากลักษณะของรองรับเส้นใยที่ต่างกัน

4.4 การศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของเส้นใยในลอน 6

เมื่อทำการสปินได้เส้นใยออกมาแล้ว นำไปส่อง SEM เพื่อศึกษาพื้นฐานวิทยาของเส้นใยในลอน 6 ซึ่งในการทดลองนี้จะศึกษาการเกิดเส้นใยที่มีเม็ดปิดและการเกิดการแตกของเส้นใยออกเป็นเส้นเล็ก ๆ

4.4.1 การเกิดเส้นใยที่มีเม็ดปิด (Beaded nanofibers)

4.4.1.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายในลอน 6

จากภาพถ่าย SEM พบว่าเมื่อความเข้มข้นมีค่ามากขึ้น เม็ดปิดจะหายไปกลายเป็นเส้นใยที่เรียบดังรูปที่ 4.27 เนื่องจากเมื่อมีความเข้มข้นน้อย ๆ ค่าความหนืดของสารละลายก็จะมีค่าน้อยไป ทำให้เกิดการเกี่ยวพันระหว่างสายโซ่น้อย ในขณะที่แรงผลักระหว่างประจุมีมาก จึงทำให้สายโซ่โพลิเมอร์เกิดการคลายตัว ไม่ยึดตัวเป็นเส้นใย ดังนั้นจะเกิดเม็ดปิดบนเส้นใยขึ้นได้ และเมื่อมีความเข้มข้นมากขึ้นจะทำให้ค่าความหนืดของสารละลายมีค่ามากขึ้นด้วย ทำให้สายโซ่เกิดการเกี่ยวพันกันมากขึ้นพอที่จะไม่เกิดการคลายตัวออกจากกัน จึงทำให้สายโซ่โพลิเมอร์เกิดการยึดตัวเป็นเส้นใยที่เรียบ

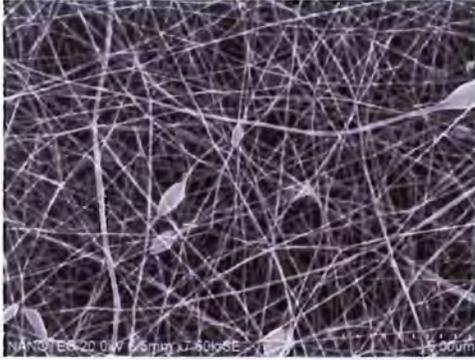
4.4.1.2 การศึกษาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้

จากภาพถ่าย SEM พบว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะไม่ค่อยมีผลต่อการเกิดเม็ดปิดบนเส้นใย เนื่องจากที่ความเข้มข้น 20 wt.%, 25 wt.%, 30 wt.% และ 35 wt.% ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ 10-20 kV จะไม่เกิดเม็ดปิดบนเส้นใย ส่วนที่ความเข้มข้น 15 wt.% จะพบว่าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10-20 kV จะเกิดเม็ดปิดขึ้นดังรูปที่ 4.28 ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ไม่มีผลต่อการเกิดเส้นใยที่มีเม็ดปิด

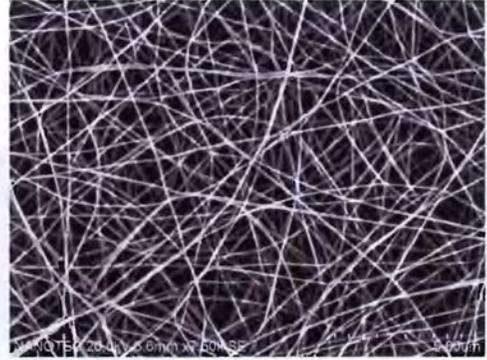
4.4.1.3 การศึกษาผลของระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยของสารละลายในลอน 6

จากภาพถ่าย SEM พบว่าผลของระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยของสารละลายในลอน 6 จะไม่ค่อยมีผลต่อการเกิดเม็ดปิดบนเส้นใย เนื่องจากที่ความเข้มข้น 20 wt.%, 25 wt.%, 30 wt.% และ 35 wt.% ค่าของระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยของสารละลายในลอน 6 ที่ 5, 10 และ 15 cm ตามลำดับ จะไม่เกิดเม็ดปิดบน

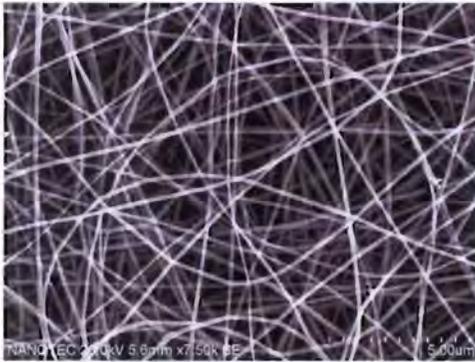
เส้นใย ส่วนที่ความเข้มข้น 15 wt.% จะพบว่าที่ระยะห่างทั้ง 5, 10 และ 15 cm จะเกิดเม็ดบีคขึ้นดังรูปที่ 4.29 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยไม่มีผลต่อการเกิดเม็ดบีคชัดเจนเหมือนในกรณีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารละลายไนลอน 6



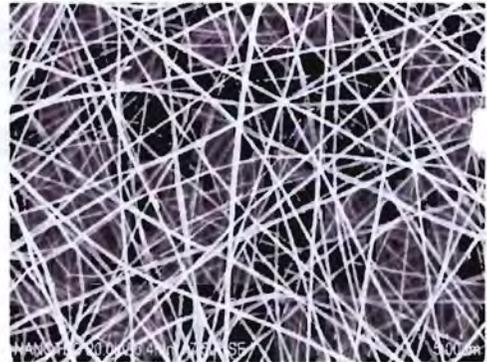
ก) ความเข้มข้น 15 wt.%



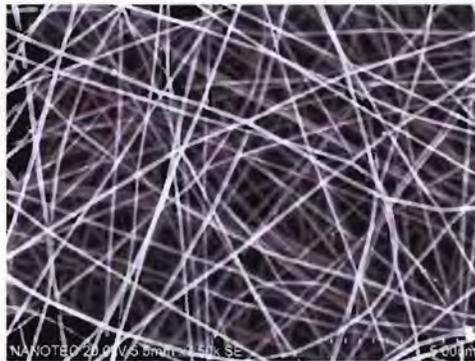
ข) ความเข้มข้น 20 wt.%



ค) ความเข้มข้น 25 wt.%

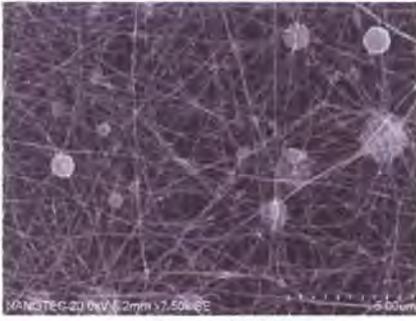


ง) ความเข้มข้น 30 wt.%

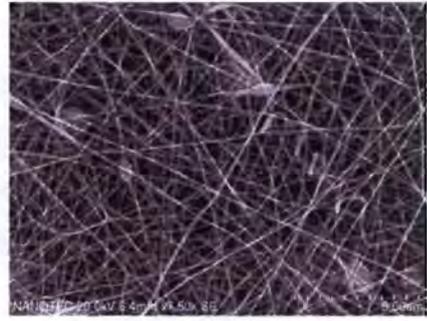


จ) ความเข้มข้น 35 wt.%

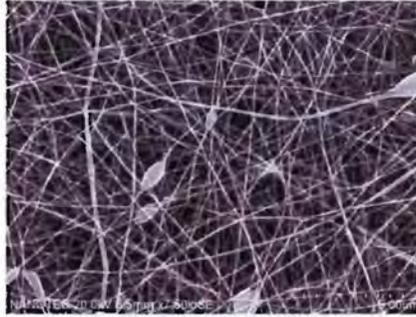
รูปที่ 4.27 แสดงภาพถ่าย SEM ของความเข้มข้นของสารละลายไนลอน 6 (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 20 kV และ 10 cm)



ก) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 kV

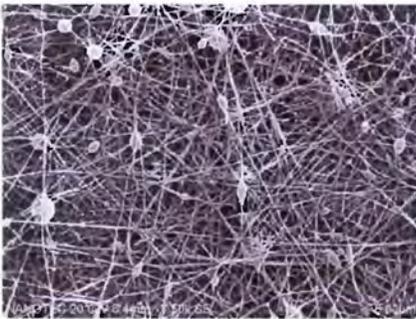


ข) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV

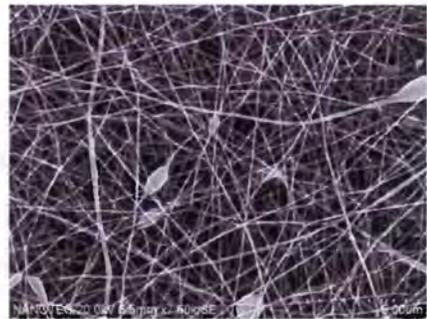


ค) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV

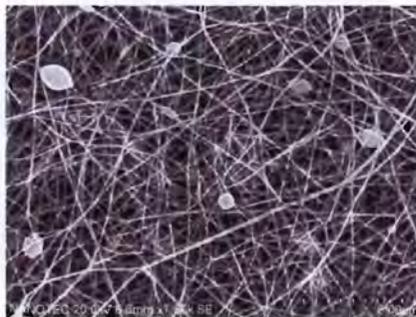
รูปที่ 4.28 แสดงภาพถ่าย SEM ของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 15 wt.% และ 10 cm)



ก) ระยะห่าง 5 cm



ข) ระยะห่าง 10 cm



ค) ระยะห่าง 15 cm

รูปที่ 4.29 แสดงภาพถ่าย SEM ของระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับ เส้นใยของสารละลายไนลอน 6 (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 15 wt.% และ 20 kV)

จากการศึกษาผลของปัจจัย (ความเข้มข้น ความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใย) พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารละลาย ไนลอน 6 มีผลต่อการเกิดเม็ดบิดบนเส้นใยมากกว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใย เนื่องจากการที่มีค่าความเข้มข้นของสารละลายที่ต่ำ ก็จะทำให้ค่าความหนืดของสารละลายที่ไม่สูงพอด้วย จึงทำให้การเกี่ยวพันกันของสายโซ่โพลิเมอร์ ไม่เพียงพอ ในขณะที่แรงผลักระหว่างประจุมีค่ามากขึ้น ทำให้สายโซ่โพลิเมอร์คลายตัวไม่ยึดตัวบนเส้นใย จึงทำให้เกิดเม็ดบิดเกิดขึ้น และอีกเหตุผลหนึ่งคือ สารละลายมีแรงดึงผิวในตัวมันเอง จึงทำให้เกิดการเกาะกลุ่มเกิดเป็นเม็ดบิดบนเส้นใยได้อีกด้วย ดังนั้นควรเพิ่มให้มีความหนืดมากขึ้น โดยการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย หรือทำการลดแรงดึงผิวของสารละลาย โดยการเติมตัวทำละลาย หรือการเติมเกลือ เช่น เกลือโซเดียมคลอไรด์ ลงไป เนื่องจากประจุอิสระที่เกิดขึ้นจะทำให้แรงผลักระหว่างประจุมีค่ามากกว่าแรงดึงผิวก็จะทำให้การเกิดเม็ดบิดบนเส้นใยเกิดได้ยากขึ้น

4.4.2 การเกิดการแตกของเส้นใยออกเป็นเส้นเล็ก ๆ (Microfibrils)

การเกิด Microfibrils จะพบได้เมื่อมีความเข้มข้นสูง ๆ ดังรูปที่ 4.30 ซึ่งเส้นใยอาจจะเป็นมัดของเส้นใยเส้นเล็ก ๆ แล้วเมื่อเกิดการฉีกขาดจะทำให้เห็นเส้นใยเล็ก ๆ แยกออกมาหรือที่เรียกว่า Microfibrils นั้นเอง และสาเหตุที่ทำให้เกิด Microfibrils เนื่องจากที่ความเข้มข้นมากขึ้น ค่าความหนืดก็จะมากขึ้นด้วย ทำให้สารละลายเกิดการพุ่งออกมาได้ยากขึ้น ดังนั้นต้องให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเข้าไปสูงจึงจะพุ่งออกมาได้ จึงทำให้เกิดแรงกระทำระหว่างสารละลายและประจุบนสารละลายที่มาก แล้วเมื่อสารละลายพุ่งออกมาจากเข็มจึงทำให้เกิดการแตกของเส้นใยออกมาเป็นเส้นเล็ก ๆ จากเส้นใยหลัก และผลที่ได้จากการเกิด Microfibrils คือ ได้พื้นที่ผิวที่มากขึ้นแต่จะมีความแข็งแรงของเส้นใยที่ลดลง



(ก) ความเข้มข้น 15 wt.%



(ข) ความเข้มข้น 25 wt.%



(ค) ความเข้มข้น 35 wt.%

รูปที่ 4.30 แสดงผลของความเข้มข้นที่มีต่อการเกิดการแตกของเส้นใยออกเป็นเส้นเล็ก ๆ (สภาวะที่ใช้

ในการทดลองคือ 15 kV และ 10 cm)

4.5 การเตรียม Passive sampler เพื่อศึกษาขนาดและการจัดเรียงตัวของผลิตภัณฑ์ในสารละลายดูดซับ

เมื่อทำการเปรียบเทียบกระดาษกรองเซลลูโลสทั่วไปกับเส้นใยในลอนที่สปีนลงไปบนกระดาษกรอง โดยใช้กระดาษกรองเป็นตัวค้ำจุน พบว่าเส้นใยในลอนที่สปีนลงไปบนกระดาษกรองจะมีเส้นใยที่มีขนาดเล็กกว่ากระดาษกรองเซลลูโลสทั่วไปมาก เนื่องจากกระดาษกรองทั่วไปจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ที่มีขนาดเป็นหน่วยไมครอน ส่วนเส้นใยในลอนที่สปีนลงไปบนกระดาษกรองจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางในหน่วยนาโนเมตรดังรูปที่ 4.31 ดังนั้นเส้นใยในลอนที่สปีนลงไปบนกระดาษกรองโดยใช้กระดาษกรองเป็นตัวค้ำจุน จะมีพื้นที่ผิวในการให้สารละลายดูดซับ (เกลือ) เกาะได้มากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ดูดซับมลพิษ (NO_2) ได้มากกว่ากระดาษกรองเซลลูโลสทั่วไป



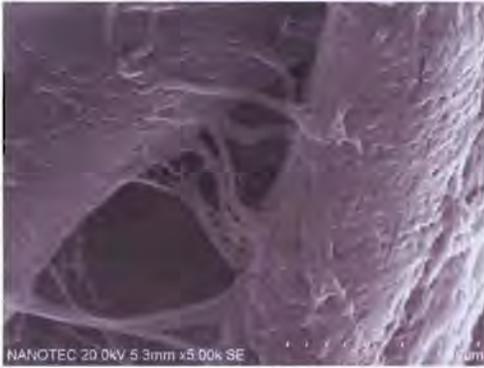
(ก)กระดาษกรองเซลลูโลสทั่วไป



(ข) เส้นใยในลอนที่สปีนลงไปบนกระดาษกรอง

รูปที่ 4.31 แสดงการเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

เมื่อทำการฉีดสารละลายดูดซับ (สารละลายเกลือ) ลงไปในกระดาษกรองเซลลูโลสทั่วไปกับกระดาษกรองที่ทำมาจากเส้นใยในลอนที่สปีนลงไปบนกระดาษกรอง โดยใช้กระดาษกรองเป็นตัวค้ำจุนในปริมาณที่เท่ากัน พบว่าที่กระดาษกรองเซลลูโลสทั่วไปขนาดของเกลือจะมีขนาดใหญ่และเกาะกันเป็นก้อนหรือเป็นแผ่น จึงทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับมลพิษได้น้อยลง ส่วนเส้นใยในลอนที่สปีนลงไปบนกระดาษกรอง พบว่าขนาดของเกลือจะเล็กลงและการกระจายของเกลือที่อยู่บนเส้นใยจะกระจายได้ดีกว่าบนกระดาษกรองเซลลูโลสทั่วไป และกระดาษกรองที่มีเส้นใยในลอน 6 อยู่จะสามารถทำให้เกลือเกิดการเกาะที่พื้นผิวได้มากกว่ากระดาษกรองเซลลูโลสทั่วไปในปริมาณสารละลายดูดซับที่ใช้เท่าเดิม ทำให้ดูดซับมลพิษ (NO_2) ได้มากขึ้น ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.32



(ก) กระจายกรองเซลล์ลูโลสทั่วไป



(ข) เส้นใยในลอนที่สปีนลงไปบน

กระจายกรอง

รูปที่ 4.32 แสดงการเปรียบเทียบขนาดและการกระจายตัวของผลึกเกลือและการเกาะติดของเกลือบนพื้นผิว

เมื่อทำการศึกษาขนาดและการกระจายตัวของผลึกเกลือที่ความเข้มข้นของสารละลายดูดซับที่ประกอบด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.22 โมลต่อลิตรกับโซเดียมไอโอไดด์ 0.52 โมลต่อลิตร พบว่าขนาดของผลึกเกลือจะมีขนาดใหญ่อยู่ที่ประมาณ 9-10 nm และการกระจายตัวของผลึกเกลือก็จะเกาะกันเป็นกลุ่ม ๆ ดังรูปที่ 4.33 (ก) และเป็นผลึกเกลือขนาดใหญ่ 1 ผลึกอยู่บนเส้นใยหรือเป็นผลึกเกลือที่มีขนาดใหญ่หลาย ๆ ผลึกมาเชื่อมต่อกันดังรูปที่ 4.33 (ข)



(ก) ผลึกเกลือเกาะกันเป็นกลุ่ม



(ข) ผลึกเกลือขนาดใหญ่ 1 ผลึกและผลึกเกลือที่มีขนาดใหญ่หลาย ๆ ผลึกมาเชื่อมต่อกัน

รูปที่ 4.33 แสดงขนาดและการกระจายตัวของผลึกเกลือที่ความเข้มข้นของสารละลายดูดซับที่ประกอบด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.22 โมลต่อลิตรกับโซเดียมไอโอไดด์ 0.52 โมลต่อลิตร (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ 20 wt.%, 20 kV และ 15 cm)

จากผลการทดลองที่ได้จากสารละลายดูดซับที่ความเข้มข้นของสารละลายดูดซับที่ประกอบด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.22 โมลต่อลิตรกับโซเดียมไอโอไดด์ 0.52 โมลต่อลิตร พบว่าผลึกเกลือยังมีขนาดใหญ่และเกาะกันเป็นกลุ่ม ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองใช้สภาวะของการสปinning โพลีในอุณหภูมิเดิมแต่เปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายดูดซับให้มีความเข้มข้นที่ต่ำลงคือ ความเข้มข้นสารละลายดูดซับที่ประกอบด้วย 0.022 โมลาร์โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ 0.052 โมลาร์โซเดียมไอโอไดด์ (10% ของความเข้มข้นที่ใช้สำหรับแผ่นเมมเบรนเซลลูโลสมาตรฐาน) จากผลการทดลองจะพบว่าขนาดเกลือจะมีขนาดที่เล็กกว่าคือ มีขนาดประมาณ 3-4 nm เนื่องจากการที่ใช้ความเข้มข้นที่ต่ำลงจะทำให้ขนาดของผลึกที่ได้มีขนาดที่เล็กลง และการกระจายตัวของผลึกเกลือจะเกาะเป็นเม็ดเล็กๆ อยู่บนเส้นใยดังรูปที่ 4.34



(ก) ความเข้มข้นของสารละลายดูดซับที่ประกอบด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.22 โมลต่อลิตรกับโซเดียมไอโอไดด์ 0.52 โมลต่อลิตร



(ข) ความเข้มข้นของสารละลายดูดซับที่ประกอบด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.022 โมลต่อลิตรกับโซเดียมไอโอไดด์ 0.052 โมลต่อลิตร (10% ของความเข้มข้นที่ใช้สำหรับแผ่นเมมเบรนเซลลูโลสมาตรฐาน)

รูปที่ 4.34 แสดงการเปรียบเทียบขนาดและการกระจายตัวของผลึกเกลือ (สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 20 wt.%, 20 kV และ 15 cm)

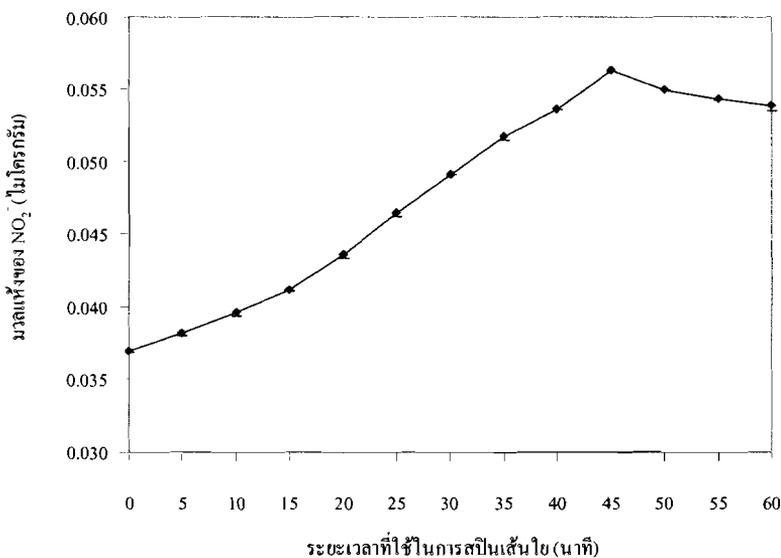
จากการทดลองที่ได้สรุปได้ว่าควรใช้สารละลายดูดซับที่ความเข้มข้นสารละลายดูดซับที่ประกอบด้วย 0.022 โมลาร์โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ 0.052 โมลาร์โซเดียมไอโอไดด์ (10% ของความเข้มข้นที่ใช้สำหรับแผ่นเมมเบรนเซลลูโลสมาตรฐาน) หรือต่ำกว่าความเข้มข้นของสารละลายดูดซับที่ประกอบด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.22 โมลต่อลิตรกับโซเดียมไอโอไดด์ 0.52 โมลต่อลิตร ในการเก็บตัวอย่างอากาศแบบพาสซีฟสำหรับแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์

4.6 การเก็บตัวอย่างอากาศแบบพาสซีฟสำหรับแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์

ในการเก็บตัวอย่างอากาศแบบพาสซีฟนั้นได้ทำการศึกษาปัจจัยดังต่อไปนี้ ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการสปินเส้นใยในลอนลงบนกระดาษกรอง ผลของความเข้มข้นของสารละลายดูดซับ และผลของระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง เพื่อศึกษาผลของปริมาณการดูดซับสารมลพิษระหว่างเส้นใยในลอนที่อยู่บนกระดาษกรองกับกระดาษกรองทั่ว ๆ ไป และหาสภาวะที่เหมาะสมในการเก็บตัวอย่างอากาศแบบพาสซีฟสำหรับแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ ซึ่งจะแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.6.1 การศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้ในการสปินเส้นใยในลอนลงบนกระดาษกรอง

การเก็บตัวอย่างอากาศแบบพาสซีฟเพื่อตรวจวัดหาปริมาณแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ นั้นจะใช้เส้นใยในลอนที่มีกระดาษกรองเป็นตัวกักจับอยู่และกระดาษกรองเปล่า ๆ โดยทำการสปินเส้นใยในลอนลงบนกระดาษกรองเป็นเวลา 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 และ 60 นาที ตามลำดับ และสภาวะที่ใช้ในการสปินเส้นใยในลอนคือ 20 wt.%, 20 kV และ 15 cm และความเข้มข้นของสารละลายดูดซับที่ประกอบด้วย 0.022 โมลาร์โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ 0.052 โมลาร์โซเดียมไอโอดด์ (10% ของความเข้มข้นที่ใช้สำหรับแผ่นเมมเบรนเซลลูโลสมาตรฐาน) โดยทำการเก็บในคาบเวลา 120 ชั่วโมง (5 วัน) และทำการเก็บชนิดละ 3 ซ้ำ ซึ่งจะแสดงได้ดังรูปที่ 4.35



0 คือ ชนิดของตัวอย่างที่เป็นกระดาษกรองเปล่า ๆ

รูปที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการสปินเส้นใยในลอนลงบนกระดาษกรอง

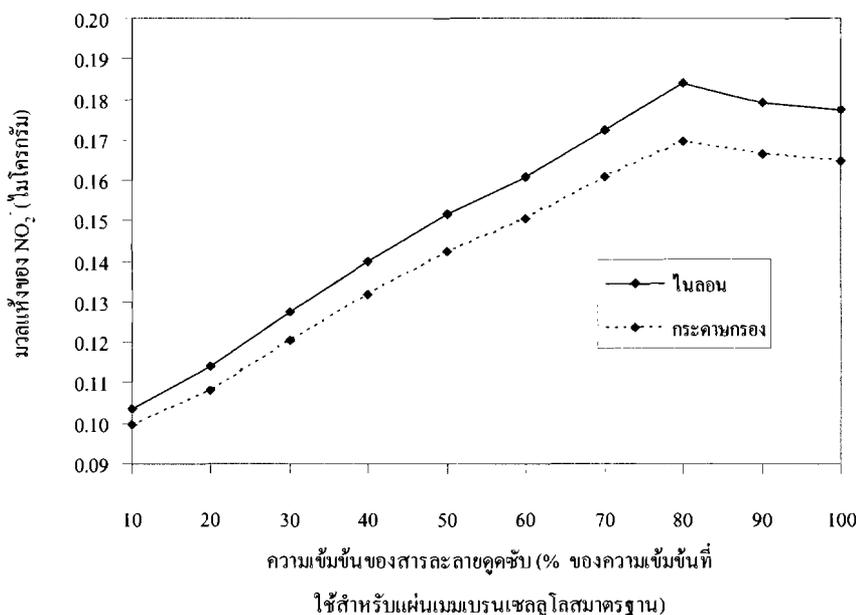
กับมวลแห้งของไนโตรท์ (จากข้อมูลของตารางที่ ก.1)

จากรูปที่ 4.35 แสดงให้เห็นว่าที่ระยะเวลา 5-60 นาที พบว่าเส้นใยในลอนมีค่ามวลแห้งของไนไตรท์มากกว่ากระดาษกรอง เนื่องจากเส้นใยในลอนจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับสารมลพิษ ให้มีค่ามากขึ้น และที่ระยะเวลา 45 นาที มีค่ามวลแห้งของไนไตรท์ในปริมาณมากที่สุด เนื่องจากมีปริมาณเส้นใยที่พอเหมาะจึงทำให้สารละลายดูดซับ (ผลึกเกลือ) ไม่เกาะกันเป็นกลุ่มอยู่บนเส้นใยและสามารถเกาะที่เส้นใยที่ถูกต้องอยู่ด้านล่างได้ และมีพื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับสารมลพิษได้มากขึ้น จึงทำให้เกิดการดูดซับสารมลพิษได้มากขึ้น และที่ 50-60 นาที มีค่ามวลแห้งของไนไตรท์ที่ต่ำกว่า 45 นาทีลงมา เนื่องจากที่ระยะเวลา 50-60 นาที อาจมีปริมาณของเส้นใยนาโนที่มากเกินไปทำให้สารละลายดูดซับเกิดการเกาะอยู่ที่พื้นผิวของเส้นใยและอาจเกาะกันเป็นกลุ่มได้ จึงทำให้เกิดการดูดซับสารมลพิษแก่พื้นผิวเท่านั้น

จากผลการทดลองที่ได้พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการสปินเส้นใยลงบนกระดาษกรองที่เหมาะสมที่สุดคือที่ระยะเวลา 45 นาที เนื่องจากปริมาณเส้นใยที่ได้จะมีปริมาณที่ไม่มากและน้อยเกินไป จึงทำให้มีพื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ที่เหมาะสม และทำให้สารละลายดูดซับไม่เกาะเป็นกลุ่มอยู่บนเส้นใยและสามารถเข้าไปเกาะอยู่บนเส้นใยที่อยู่ด้านล่างได้ จึงทำให้มีการดูดซับสารมลพิษแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ได้มากขึ้น

4.6.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายดูดซับ

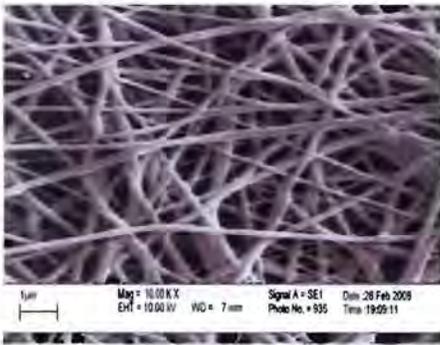
การเก็บตัวอย่างอากาศแบบพาสซีฟเพื่อตรวจวัดหาปริมาณแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์นั้นจะใช้เส้นใยในลอนที่มีกระดาษกรองเป็นตัวกักจับอยู่และกระดาษกรองเปล่า ๆ โดยจะใช้ความเข้มข้นของสารละลายดูดซับที่ประกอบด้วย 0.22, 0.198, 0.176, 0.154, 0.132, 0.11, 0.088, 0.066, 0.044 และ 0.022 โมลต่อลิตร ตามลำดับ กับโซเดียมไอโอไดด์ 0.52, 0.468, 0.416, 0.364, 0.312, 0.26, 0.208, 0.156, 0.104 และ 0.052 โมลต่อลิตร ตามลำดับ (100, 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20 และ 10% ของความเข้มข้นที่ใช้สำหรับแผ่นเมมเบรนเซลลูโลสมาตรฐาน) และสภาวะที่ใช้ในการสปินเส้นใยในลอนคือ 20 wt.%, 20 kV และ 15 cm และระยะเวลาที่ใช้ในการสปินเส้นใยลงบนกระดาษกรอง 45 นาที โดยทำการเก็บในคาบเวลา 120 ชั่วโมง (5 วัน) และทำการเก็บชนิดละ 3 ซ้ำ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.36



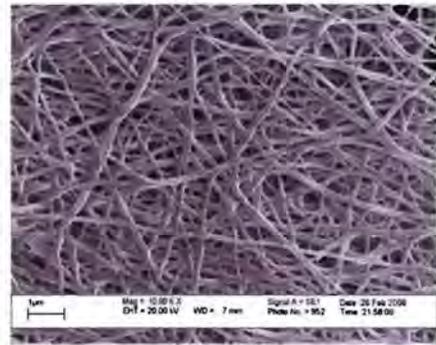
รูปที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายดูดซับกับมวลแห้งของไนไตรท์ (จากข้อมูลของตารางที่ ก.4)

จากรูปที่ 4.36 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายดูดซับมีค่ามากขึ้นจะทำให้มวลแห้งของไนไตรท์มีค่ามากขึ้นด้วย เนื่องจากสารละลายดูดซับเป็นตัวที่ดูดซับให้สารมลพิษมาเกาะบนเส้นใยไนลอนที่มีกระดาษกรองเป็นตัวกักจับอยู่และกระดาษกรองเปล่า ๆ ดังนั้นถ้ามีความเข้มข้นของสารละลายดูดซับมากขึ้นก็จะทำให้เกิดการดูดซับสารมลพิษได้มากขึ้น และพบว่าค่ามวลแห้งของไนไตรท์จะมีค่ามากที่สุด เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายดูดซับที่ประกอบด้วย 0.176 โมลาร์โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ 0.416 โมลาร์โซเดียมไอโอไดด์ (80% ของความเข้มข้นที่ใช้สำหรับแผ่นเมมเบรนเซลลูโลสมาตรฐาน) เนื่องจากขนาดของผลึกเกลือยังมีขนาดที่ไม่ใหญ่เกินไปและผลึกยังไม่เกาะตัวเป็นก้อน จึงทำให้มีพื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับสารมลพิษได้มากขึ้น แต่ที่ความเข้มข้นของสารละลายดูดซับที่ประกอบด้วย 0.198 โมลาร์โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ 0.468 โมลาร์โซเดียมไอโอไดด์ (90% ของความเข้มข้นที่ใช้สำหรับแผ่นเมมเบรนเซลลูโลสมาตรฐาน) และความเข้มข้นของสารละลายดูดซับที่ประกอบด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.22 โมลต่อลิตรกับโซเดียมไอโอไดด์ 0.52 โมลต่อลิตร จะพบว่ามีค่ามวลแห้งของไนไตรท์ที่น้อยกว่าความเข้มข้นของสารละลายดูดซับที่ประกอบด้วย 0.176 โมลาร์โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ 0.416 โมลาร์โซเดียมไอโอไดด์ (80% ของความเข้มข้นที่ใช้สำหรับแผ่นเมมเบรนเซลลูโลสมาตรฐาน) เนื่องจากจะมีปริมาณเกลือที่มากขึ้นและขนาดของผลึกเกลือจะมีขนาดที่เริ่มใหญ่และเริ่มจะเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน จึงทำให้พื้นที่ผิวของเส้นใยไนลอนที่จะช่วยในการดูดซับสารมลพิษมีพื้นที่ที่น้อยลง จึงทำให้เกิดการดูดซับสารมลพิษที่น้อยลงอีกด้วย และจากกราฟจะพบว่าความ

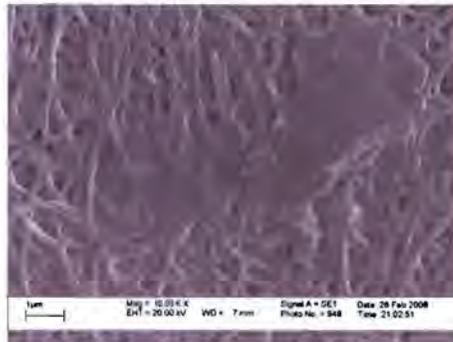
เข้มข้นของสารละลายดูดซับจะมีปริมาณการดูดซับสารมลพิษอยู่ 3 ช่วงคือ ช่วงที่มีปริมาณการดูดซับสารมลพิษที่ค่อย ๆ มากขึ้น (ก่อนเส้นกราฟจะมีค่าสูงสุด) ช่วงที่มีปริมาณการดูดซับสารมลพิษที่มากที่สุด (เส้นกราฟมีค่าสูงสุด) และช่วงที่มีปริมาณการดูดซับสารมลพิษที่ลดลง (หลังจากเส้นกราฟมีค่าสูงสุด) ดังนั้นเพื่อยืนยันผลการทดลองที่ได้ของรูปที่ 4.36 จึงนำไปถ่ายภาพ SEM เพื่อดูการกระจายตัวของผลึกเกลือของแต่ละช่วงความเข้มข้นของสารละลายดูดซับดังรูปที่ 4.37 และศึกษาองค์ประกอบต่าง ๆ ของสารละลายดูดซับและปริมาณของความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วย EDX ซึ่งในการทดลองนี้จะดูปริมาณของธาตุไอโอดีน (I) เนื่องจากในสารละลายดูดซับประกอบด้วย NaOH และ NaI แต่ธาตุไอโอดีนมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่สูงกว่าทำให้พิกซ์เข้มดูชัดเจนกว่าธาตุโซเดียม (Na) และธาตุโซเดียมอาจจะปนเปื้อนมาจากสารอื่น แต่ธาตุไอโอดีนจะมาจากรีเอเจนต์เท่านั้น ซึ่งจะแสดงได้ดังรูปที่ 4.38 และตารางที่ 4.2 แล้วนำค่าจากตารางที่ 4.2 ไปพล็อตกราฟดังรูปที่ 4.39



(ก) ความเข้มข้นของสารละลายดูดซับที่ประกอบด้วย 0.044 โมลาร์โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ 0.104 โมลาร์โซเดียมไอโอดีน (20% ของความเข้มข้นที่ใช้สำหรับแผ่นเมมเบรนเซลลูโลสมาตรฐาน)

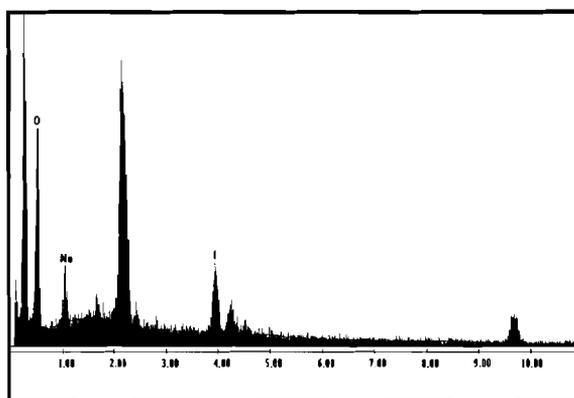


(ข) ความเข้มข้นของสารละลายดูดซับที่ประกอบด้วย 0.176 โมลาร์โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ 0.416 โมลาร์โซเดียมไอโอดีน (80% ของความเข้มข้นที่ใช้สำหรับแผ่นเมมเบรนเซลลูโลสมาตรฐาน)



(ค) ความเข้มข้นของสารละลายดูดซับของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.22 โมลต่อลิตรกับโซเดียมไอโอดีน 0.52 โมลต่อลิตร

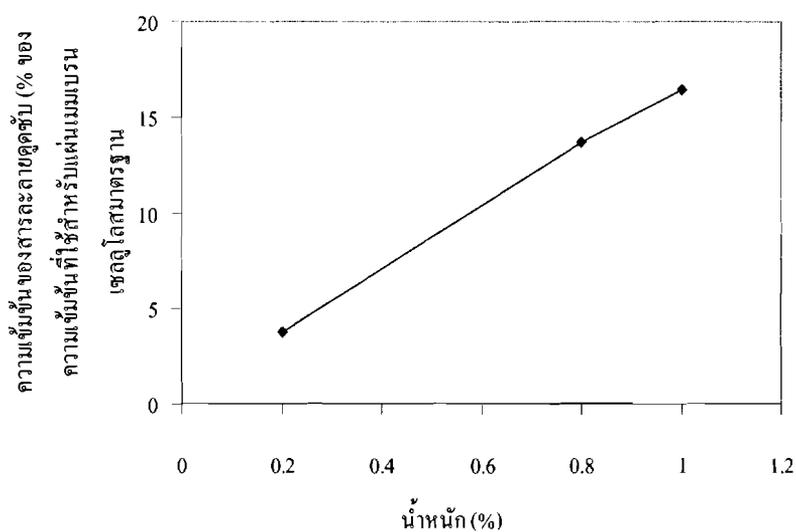
รูปที่ 4.37 แสดงภาพถ่าย SEM ของการกระจายตัวของผลึกเกลือของแต่ละความเข้มข้น



รูปที่ 4.38 แสดงองค์ประกอบต่าง ๆ ของความเข้มข้นของสารละลายดูดซับ

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณของธาตุไอโอดีนที่ความเข้มข้นของสารละลายดูดซับต่าง ๆ

ความเข้มข้นของสารละลายดูดซับ (% ของความเข้มข้นที่ใช้สำหรับแผ่นเมมเบรนเซลลูโลสมาตรฐาน)	น้ำหนัก (%)
0.2	3.71
0.8	13.68
1.0	16.44



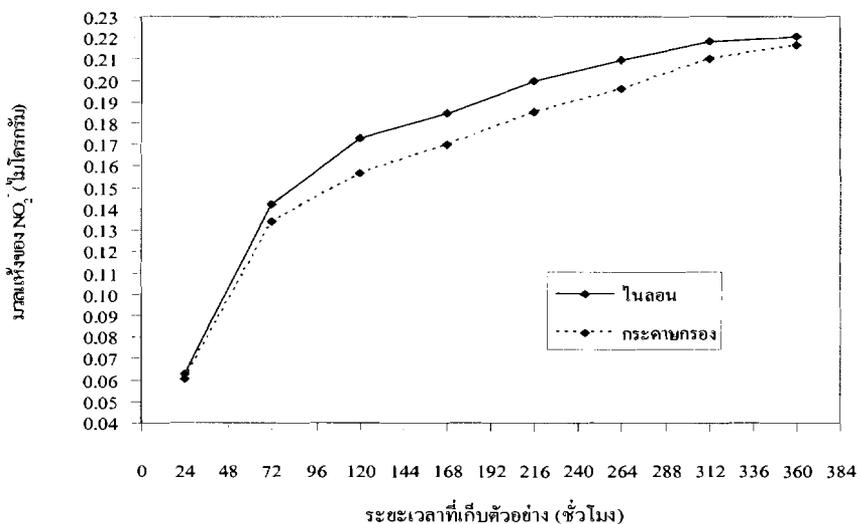
รูปที่ 4.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายดูดซับกับน้ำหนัก

จากผลการทดลองที่ได้จากการถ่ายภาพ SEM และทำ EDX พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายดูดซับมีค่ามากขึ้นปริมาณของผลิตภัณฑ์ก็มีค่ามากขึ้นด้วย ทำให้เกลือติดกันเป็นแผ่นจึงส่งผลให้การดูดซับสารมลพิษได้น้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากรูปที่ 4.36

จากผลการทดลองในตอนนี้สรุปได้ว่าความเข้มข้นของสารละลายดูดซับที่เหมาะสมในการดูดซับแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์คือ ความเข้มข้นของสารละลายดูดซับที่ประกอบด้วย 0.176 โมลาร์โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ 0.416 โมลาร์โซเดียมไอโอดด์ (80% ของความเข้มข้นที่ใช้สำหรับแผ่นเมมเบรนเซลลูโลสมาตรฐาน)

4.6.3 การศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง

การเก็บตัวอย่างอากาศแบบพาสซีฟเพื่อตรวจวัดหาปริมาณแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์นั้นจะใช้เส้นใยไนลอนที่มีกระดาษกรองเป็นตัวกักจับอยู่และกระดาษกรองเปล่า ๆ โดยจะใช้ระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างคาบเวลา 24, 72, 120, 168, 216, 264, 312 และ 360 ชั่วโมง หรือ 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 และ 15 วัน ตามลำดับ และสภาวะที่ใช้ในการสปินเส้นใยไนลอนคือ 20 wt.%, 20 kV และ 15 cm และระยะเวลาที่ใช้ในการสปินเส้นใยลงบนกระดาษกรอง 45 นาที และความเข้มข้นของสารละลายดูดซับที่ประกอบด้วย 0.176 โมลาร์โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ 0.416 โมลาร์โซเดียมไอโอดด์ (80% ของความเข้มข้นที่ใช้สำหรับแผ่นเมมเบรนเซลลูโลสมาตรฐาน) และทำการเก็บชนิดละ 3 ซ้ำ ซึ่งจะแสดงได้ดังรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่เก็บตัวอย่างกับมวลแห้งของไนโตรต (จากข้อมูลของตารางที่ ก.7)

จากรูปที่ 4.40 แสดงให้เห็นว่าจำนวนชั่วโมงที่เก็บตัวอย่างมากขึ้นจะทำให้มวลแห้งของไนโตรที่มีค่ามากขึ้นด้วย เนื่องจากยิ่งเก็บนานขึ้นก็จะทำให้เกิดสารมลพิษมาเกาะได้มากขึ้น แต่จะพบว่าค่าผลต่างระหว่างเส้นใยในลอนกับกระดาษกรองจะมีค่าน้อยลงในช่วง 168, 216, 264, 312 และ 360 ชั่วโมงตามลำดับ เนื่องจากยิ่งเก็บเป็นเวลานานขึ้นอาจทำให้บางส่วนของเส้นใยในลอนที่มีกระดาษกรองเป็นตัวค้ำจุน อยู่และกระดาษกรองเปล่า ๆ อาจจะเริ่มเกิดการดูดซับสารมลพิษมากจนเกิดการอึดตัวบ้างในบางส่วน จึงทำให้การดูดซับของสารมลพิษมีปริมาณที่น้อยลง

จากผลการทดลองในตอนนี้จะสรุปได้ว่าจำนวนชั่วโมงที่เก็บตัวอย่างที่เหมาะสมในการดูดซับแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์คือ 120 ชั่วโมง

จากผลการทดลองทั้ง 3 ปัจจัยสามารถสรุปได้ว่ากระดาษกรองที่มีเส้นใยนาโนของไนลอนอยู่สามารถเก็บปริมาณแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ได้ในอัตราที่เร็วกว่ากระดาษกรองทั่วไปในสถานะที่เหมือนกัน และสถานะที่เหมาะสมในการเก็บตัวอย่างอากาศแบบพาสซีฟสำหรับแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์นั้นคือ ระยะเวลาที่ใช้ในการสปินเส้นใยลงบนกระดาษกรอง 45 นาที ความเข้มข้นของสารละลายดูดซับที่ประกอบด้วย 0.176 โมลาร์โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ 0.416 โมลาร์โซเดียมไอโอไดด์ (80% ของความเข้มข้นที่ใช้สำหรับแผ่นเมมเบรนเซลลูโลสมาตรฐาน) และจำนวนชั่วโมงที่เก็บตัวอย่าง 120 ชั่วโมง (5 วัน)

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การเตรียม Filter membrane สำหรับดูดซับสารมลพิษโดยใช้เส้นใยนาโน

จากผลการทดลองพบว่าการเตรียม Filter membrane สำหรับดูดซับสารมลพิษโดยใช้เส้นใยนาโนควรใช้วิธีการนำเส้นใยนาโนพันเคลือบทับไปบนกระดาษกรอง โดยมีกระดาษกรองเป็นตัวช่วยค้ำจุนเส้นใยนาโน

5.1.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเส้นใยในลอน 6

จากการศึกษาผลของปัจจัย (ความเข้มข้น ความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใย) ที่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของเส้นใยในลอน 6 โดยใช้จากเป็นแบบตั้งปกติและแบบหมุน พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการสปินเส้นใยในลอน 6 ลงบนกระดาษกรองคือ ความเข้มข้น 20 wt.% ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใย 15 cm

5.1.3 การเปรียบเทียบลักษณะของที่รองรับเส้นใย

จากการศึกษาพบว่าลักษณะของที่รองรับเส้นใยที่เป็นแบบหมุนจะทำให้เส้นใยมีการจัดเรียงตัวที่ดีขึ้น และมีการกระจายตัวของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่แคบลงกว่าการใช้จากแบบตั้ง และยังพบว่าการศึกษาผลของความเข้มข้น ความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยโดยการใช้จากแบบหมุนจะได้เส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลงกว่าการใช้จากแบบตั้ง

5.1.4 การศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสัญญาณวิทยาของเส้นใยในลอน 6

5.1.4.1 การเกิดเส้นใยที่มีเม็ดบิด

จากการศึกษาผลของปัจจัย (ความเข้มข้น ความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างปลายเข็มของหลอดบรรจุสารกับอุปกรณ์รองรับเส้นใย) พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารละลายในลอน 6 จะมีผลต่อการเกิดเม็ดบิดบนเส้นใยมากที่สุด ซึ่งสภาวะที่เกิดเส้นใยที่มีเม็ดบิดมากที่สุดคือ การใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นที่ต่ำ

5.1.4.2 การเกิดการแตกออกเป็นเส้นเล็ก ๆ หลาย ๆ เส้นจากเส้นใย (Microfibrils)

การเกิด Microfibrils พบได้เมื่อมีความเข้มข้นสูง ๆ และผลที่ได้จากการเกิด Microfibrils คือ ได้พื้นที่ผิวที่มากขึ้นแต่จะมีความแข็งแรงของเส้นใยที่ลดลง

5.1.5 การเตรียม Passive sampler เพื่อศึกษาขนาดและการจัดเรียงตัวของผลึกเกลือในสารละลายดูดซับ

จากการศึกษาพบว่ากระดาษกรองที่มีเส้นใยในลอน 6 ทับอยู่สามารถทำให้เกิดการเกาะที่พื้นผิวได้มากกว่ากระดาษกรองเซลลูโลสทั่วไปในปริมาณสารละลายดูดซับที่ใช้เท่าเดิมจึงทำให้ดูดซับแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ได้มากขึ้น

จากการศึกษาขนาดและการกระจายตัวของผลึกเกลือในสารละลายดูดซับพบว่าควรใช้สารละลายดูดซับที่มีความเข้มข้นที่ประกอบด้วย 0.022 โมลาร์โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ 0.052 โมลาร์โซเดียมไอโอไดด์ (10% ของความเข้มข้นที่ใช้สำหรับแผ่นเมมเบรนเซลลูโลสมาตรฐาน) หรือต่ำกว่าความเข้มข้นของสารละลายดูดซับที่ประกอบด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.22 โมลต่อลิตรกับโซเดียมไอโอไดด์ 0.52 โมลต่อลิตร ในการเก็บตัวอย่างอากาศแบบพาสซีฟสำหรับแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์

5.1.6 การเก็บตัวอย่างอากาศแบบพาสซีฟสำหรับแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์

จากผลการทดลองทั้ง 3 ปีวิจัยสามารถสรุปได้ว่ากระดาศกรงที่มีเส้นใยนาโนของไนลอนอยู่จะสามารถเก็บปริมาณแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ได้ในอัตราที่เร็วกว่ากระดาศกรงทั่วไปในสถานะเดียวกันและปริมาณสารเคมีที่ใช้มีปริมาณน้อยกว่า จึงเป็นวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพมากกว่า

สถานะที่เหมาะสมในการเก็บตัวอย่างอากาศแบบพาสซีฟสำหรับแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์คือระยะเวลาที่ใช้ในการสปินเส้นใยลงบนกระดาศกรง 45 นาที ความเข้มข้นของสารละลายดูดซับที่ประกอบด้วย 0.176 โมลาร์โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ 0.416 โมลาร์โซเดียมไอโอดด์ (80% ของความเข้มข้นที่ใช้สำหรับแผ่นเมมเบรนเซลลูโลสมาตรฐาน) และระยะเวลาที่เหมาะสมในการเก็บตัวอย่างอากาศแบบพาสซีฟคือ 120 ชั่วโมง (5 วัน)

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรทำการทดลองเตรียมเส้นใยนาโนในสถานะอากาศแห้ง เนื่องจากเมื่ออากาศชื้นเส้นใยที่ได้อาจจะไม่แห้ง แล้วทำให้เส้นใยเกิดการรวมตัวกันได้

5.2.2 ควรทำการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเก็บอากาศระหว่างชุดพาสซีฟที่มีขายในท้องตลาด (Filter pack) กับกระดาศกรงที่มีเส้นใยไนลอนอยู่

เอกสารอ้างอิง

1. **Wikipedia** [Online], Available: <http://th.wikipedia.org/wiki/Nanotechnology> [2006, March 18].
2. **Thai-Nano** [Online], Available: <http://www.thai-nano.com> [2006, March 18].
3. Ramakrishna, S., Fujihara, K., Teo, W.E., Lim, T.C. and Ma, Z., 2005, **An Introduction to Electrospinning and Nanofibers**, World Scientific Publishing, Singapore, pp. 7-21, 90-126, 275-278.
4. **Nature** [Online], Available: <http://www.nature.com/news/2005/050124/full/050124-15.html> [2006, March 18].
5. กมลรัตน์ คณาวิง และกนกวรรณ พนิชนาพันธ์, 2546, เส้นใยพอลิเมอร์เพื่อใช้ในการแพทย์ในระดับนาโนโดยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต : การเตรียมและตรวจสอบสมบัติ ของเส้นใยผสมของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับอัลจินตเพื่อใช้เป็นวัสดุปิดแผล, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
6. เกரியงไกร ตั้งประเสริฐสุข, 2546, การพัฒนาและทดสอบการใช้ได้ของ **Passive Air Sampler** สำหรับแก๊ส NO_2 และ SO_2 , วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
7. **จิตชนก มีใจซื่อ** [Online], Available: <http://www.eng.ru.ac.th/journal1.doc> [2007, May 20].
8. Reneker, D.H., Yarin, A.L., Fong, H. and Koombhongse, S., 2000, "Bending Instability of Electrically Charged Liquid Jets of Polymer Solutions in Electrospinning", **Journal of Applied Physics**, Vol. 87, No. 9, pp. 4531-4546.

9. Kenawy, E.L., Layman, J.M., Watkins, J.R., Bowlin, G.L., Matthews, J.A., Simpson, D.G. and Wnek, G.E., 2003, "Electrospinning of Poly(ethylene-co-vinyl alcohol) Fibers", **Biomaterials**, Vol. 24, pp. 907-913.
10. Morozov, V.N., Morozova, T.Y. and Kallenbach, N.R., 1998, "Atomic Force Microscopy of Structures Produced by Electrospinning Polymer Solution", **International Journal of Mass Spectrometry**, Vol. 178, pp. 143-159.
11. Fong, H., Chun, I. and Reneker, D.H., 1999, "Beaded Nanofibers Formed During Electrospinning", **Polymer**, Vol. 40, pp. 4585-4592.
12. Chunxue, Z., Xiaoyan, Y., Lili, W., Yue, H. and Jing, S., 2005, "Study on Morphology of Electrospun Poly(vinyl alcohol) Mats", **European Polymer Journal**, Vol. 41, pp. 423-432.
13. Chidchanok Mit-uppatharn, Manit Nithitanakul and Pitt Supaphol, 2004, "Ultrafine Electrospun Polyamide-6-Fiber : Effect of Solution Conditions on Morphology and Average Fiber Diameter", **Macromolecular Chemistry and Physics**, Vol. 205, pp. 2327- 2338.
14. Casper, C.L., Stephens, J.S., Tassi, N.G., Chase, D.B. and Rabolt, J.F., 2004, "Controlling Surface Morphology of Electrospun Polystyrene Fibers : Effect of Humidity and Molecular Weight in the Electrospinning Process", **Macromolecules**, Vol. 37, pp. 53-578.
15. นพภาพร พานิช, แสงสันติ พานิช, วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์, วิจิตรา จงวิศาล และวราวุธ เสือดี, 2547, **ตำราระบบบำบัดมลพิษทางอากาศ**, ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, หน้า 1-1 และ 1-7.
16. Cruz, L.P.S., Campos, V.P., Silva, A.M.C. and Tavares, T.M., 2004, "A Field Evaluation of A SO₂ Passive Sampler in Tropical Industrial and Urban Air", **Atmospheric Environment**, Vol. 38, pp. 6425-6429.
17. Cox, R.M., 2003, "The Use of Passive Sampling to Monitor Forest Exposure to O₃, NO₂, SO₂ : Review and Some Case Studies", **Environmental Pollution**, Vol. 126, pp. 301-311.

18. Deitzel, J.M., Kleinmeyer, J.D., Hirvonen, J.K., Beck, N.C. and Tan., 2001, "Controlled Deposition of Electrospun Poly(ethylene oxide) Fibers ", **Polymer**, Vol. 42, pp. 8163-8170.
19. Zong, X., Kim, K., Fang, D., Ran, S., Hsiao, B.S. and Chu, B., 2002, "Structure and Process Relationship of Electrospun Bioabsorbable Nanofiber Membrane", **Polymer**, Vol. 43, pp. 4403-4412.
20. Chidchanok Mit-uppatharn, Manit Nithitanakul and Pitt Supaphol., 2005, "Ultrafine Polyamide-6-Fiber : Effect of Emitting Electrode Polarity on Morphology and Average Fiber Diameter", **Journal of Polymer Science and Physics**, Vol. 43, pp. 3699-3712.
21. Baumgarten, P.K., 1971, "Electrostatic Spinning of Acrylic Microfibers", **Journal Colloid Interface Science**, Vol. 36, No. 1, pp. 71-79.
22. Jiang, H., Fang, D., Hsiao, B.S., chu, B., and Chen, W., 2004, "Optimization and Characterization of Dextran Membrane Prepared by Electrospinning", **Biomacromolecules**, Vol. 5, pp. 326-333.
23. Tan, S-H., Inai, R., Kotaki, M. and Ramakrishna, S., 2005, "Systematic Parameter Study for Ultrafine-Fiber Fabrication Via Electrospinning Process", **Polymer**, Vol. 46, pp. 6128-6134.
24. Ahn, Y.C., Park, S.K., Kim, G.T., Hwang, Y.J., Lee, C.G., Shin, H.S. and Lee, J.K., 2005, "Development of High Efficiency Nanofilters Made of Nanofibers", **Current Applied Physics**, Vol. 39, pp. 1-6.
25. Ryu, Y.J., Kim, H.Y., Lee, K.H., Park, H.C. and Lee, D.R., 2003, "Transport Properties of Electrospun Nylon 6 Nonwoven Mats", **European Polymer Journal**, Vol. 39, pp. 1883-1889.
26. Murad, I.H., Suharto, N., Takashi, K. and Kazuhiko, T., 2002, "Development of Passive Sampler Technique for Ozone Monitoring. Estimation of Indoor and Outdoor Ozone Concentration", **Elsevier Science**, Vol. 58, pp. 649-659.

ภาคผนวก ก.

รายการตารางค่ามวลแห้งของไนโตรเจน

ภาคผนวก ก. รายการตารางค่ามวลแห้งของไนไตรท์

ตารางที่ ก.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการสปินเส้นใยกับมวลแห้งของไนไตรท์ที่ความเข้มข้นของสารละลายคูดซับที่ประกอบด้วย 0.022 โมลาร์โซเดียมไฮดรอกไซด์และ 0.052 โมลาร์โซเดียมไอโอไดด์ (10% ของความเข้มข้นที่ใช้สำหรับแผ่นเมมเบรนเซลลูโลสมาตรฐาน) และทำการเก็บตัวอย่างเป็นระยะเวลา 5 วัน

ระยะเวลาที่ใช้ในการสปินเส้นใย	มวลแห้งของไนไตรท์ (ug)			
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0 นาที	0.0368	0.0368	0.0370	0.0369
5 นาที	0.0384	0.0380	0.0384	0.0382
10 นาที	0.0396	0.0398	0.0394	0.0396
15 นาที	0.0411	0.0413	0.0411	0.0412
20 นาที	0.0434	0.0438	0.0434	0.0436
25 นาที	0.0465	0.0467	0.0463	0.0465
30 นาที	0.0491	0.0491	0.0491	0.0491
35 นาที	0.0520	0.0514	0.0518	0.0517
40 นาที	0.0536	0.0536	0.0536	0.0536
45 นาที	0.0562	0.0564	0.0564	0.0563
50 นาที	0.0549	0.0549	0.0551	0.0549
55 นาที	0.0545	0.0543	0.0543	0.0543
60 นาที	0.0540	0.0540	0.0536	0.0539

หมายเหตุ 0⁰ คือ ชนิดของตัวอย่างที่เป็นกระดาษกรองเปล่า ๆ

ตารางที่ ก.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการสปินเส้นใยกับมวลแห้งของไนไตรท์ที่ความเข้มข้นของสารละลายดูดซับที่ประกอบด้วย 0.022 โมลาร์โซเดียมไฮดรอกไซด์และ 0.052 โมลาร์โซเดียมไอโอดด์ (10% ของความเข้มข้นที่ใช้สำหรับแผ่นเมมเบรนเซลลูโลสมาตรฐาน) และทำการเก็บตัวอย่างเป็นระยะเวลา 5 วัน

ระยะเวลาที่ใช้ในการสปิน เส้นใย	มวลแห้งของไนไตรท์ (ug)			
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0 นาที	0.0353	0.0353	0.0353	0.0353
5 นาที	0.0366	0.0360	0.0362	0.0363
10 นาที	0.0368	0.0368	0.0368	0.0368
15 นาที	0.0384	0.0382	0.0382	0.0382
20 นาที	0.0403	0.0405	0.0403	0.0403
25 นาที	0.0419	0.0423	0.0423	0.0422
30 นาที	0.0453	0.0457	0.0451	0.0454
35 นาที	0.0482	0.0482	0.0482	0.0482
40 นาที	0.0511	0.0513	0.0511	0.0511
45 นาที	0.0530	0.0534	0.0536	0.0534
50 นาที	0.0529	0.0525	0.0523	0.0526
55 นาที	0.0519	0.0519	0.0521	0.0520
60 นาที	0.0515	0.0515	0.0515	0.0515

หมายเหตุ 0⁰ คือ ชนิดของตัวอย่างที่เป็นกระดาษกรองเปล่า ๆ

ตารางที่ ก.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการสปินเส้นใยกับมวลแห้งของไนไตรท์ที่ความเข้มข้นของสารละลายดูดซับที่ประกอบด้วย 0.022 โมลาร์โซเดียมไฮดรอกไซด์และ 0.052 โมลาร์โซเดียมไอโอไดด์ (10% ของความเข้มข้นที่ใช้สำหรับแผ่นเมมเบรนเซลลูโลสมาตรฐาน) และทำการเก็บตัวอย่างเป็นระยะเวลา 5 วัน

ระยะเวลาที่ใช้ในการสปินเส้นใย	มวลแห้งของไนไตรท์ (ug)			
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0 นาที	0.0376	0.0372	0.0372	0.0374
5 นาที	0.0393	0.0395	0.0397	0.0395
10 นาที	0.0413	0.0409	0.0411	0.0411
15 นาที	0.0430	0.0424	0.0422	0.0425
20 นาที	0.0447	0.0451	0.0443	0.0447
25 นาที	0.0471	0.0469	0.0465	0.0468
30 นาที	0.0498	0.0500	0.0492	0.0497
35 นาที	0.0527	0.0527	0.0527	0.0527
40 นาที	0.0548	0.0546	0.0552	0.0549
45 นาที	0.0568	0.0568	0.0568	0.0568
50 นาที	0.0561	0.0561	0.0561	0.0561
55 นาที	0.0558	0.0558	0.0558	0.0558
60 นาที	0.0555	0.0555	0.0553	0.0555

หมายเหตุ 0^๐ คือ ชนิดของตัวอย่างที่เป็นกระดาษกรองเปล่า ๆ

ตารางที่ ก.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายดูดซับกับมวลแห้งของไนโตรที่
ที่ระยะเวลาที่ใช้ในการสปินเส้นใย 45 นาที และทำการเก็บตัวอย่างเป็นระยะเวลา 5 วัน

ความเข้มข้นของ สารละลายดูดซับ (*)	มวลแห้งของไนโตรที่ของ เส้นใยในลอน (ug)				มวลแห้งของไนโตรที่ของ กระดาษกรอง (ug)			
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10	0.1036	0.1032	0.1034	0.1034	0.0997	0.0995	0.0993	0.0995
20	0.1141	0.1141	0.1141	0.1141	0.1080	0.1082	0.1084	0.1082
30	0.1274	0.1270	0.1276	0.1273	0.1204	0.1208	0.1202	0.1205
40	0.1400	0.1398	0.1402	0.1400	0.1319	0.1319	0.1319	0.1319
50	0.1516	0.1516	0.1516	0.1516	0.1425	0.1425	0.1427	0.1425
60	0.1605	0.1611	0.1609	0.1608	0.1504	0.1506	0.1502	0.1504
70	0.1724	0.1724	0.1728	0.1725	0.1605	0.1607	0.1611	0.1607
80	0.1842	0.1842	0.1840	0.1841	0.1695	0.1697	0.1699	0.1697
90	0.1792	0.1792	0.1792	0.1792	0.1662	0.1666	0.1664	0.1664
100	0.1772	0.1772	0.1772	0.1772	0.1645	0.1649	0.1649	0.1648

หมายเหตุ * คือ เปอร์เซ็นต์ของความเข้มข้นที่ใช้สำหรับแผ่นเมมเบรนเซลลูโลสมาตรฐาน

ตารางที่ ก.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายดูดซับกับมวลแห้งของไนโตรเจนที่ระยะเวลาที่ใช้ในการสปินเส้นใย 45 นาที และทำการเก็บตัวอย่างเป็นระยะเวลา 5 วัน

ความเข้มข้นของ สารละลายดูดซับ (*)	มวลแห้งของไนโตรเจนของ เส้นใยในลอน (ug)				มวลแห้งของไนโตรเจนของ กระดาษกรอง (ug)			
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10	0.1082	0.1082	0.1080	0.1082	0.1013	0.1013	0.1013	0.1013
20	0.1181	0.1181	0.1181	0.1181	0.1101	0.1101	0.1101	0.1101
30	0.1309	0.1309	0.1309	0.1309	0.1220	0.1220	0.1220	0.1220
40	0.1418	0.1420	0.1418	0.1419	0.1319	0.1319	0.1323	0.1321
50	0.1516	0.1516	0.1512	0.1515	0.1407	0.1405	0.1405	0.1405
60	0.1611	0.1611	0.1609	0.1611	0.1493	0.1493	0.1493	0.1493
70	0.1714	0.1714	0.1710	0.1713	0.1585	0.1585	0.1581	0.1584
80	0.1842	0.1842	0.1838	0.1841	0.1685	0.1685	0.1681	0.1684
90	0.1793	0.1793	0.1793	0.1793	0.1655	0.1655	0.1655	0.1655
100	0.1753	0.1753	0.1757	0.1754	0.1620	0.1620	0.1624	0.1621

หมายเหตุ * คือ เปอร์เซ็นต์ของความเข้มข้นที่ใช้สำหรับแผ่นเมมเบรนเซลลูโลสมาตรฐาน

ตารางที่ ก.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายดูดซับกับมวลแห้งของไนโตรที่
ที่ระยะเวลาที่ใช้ในการสปินเส้นใย 45 นาที และทำการเก็บตัวอย่างเป็นระยะเวลา 5 วัน

ความเข้มข้นของ สารละลายดูดซับ (*)	มวลแห้งของไนโตรที่ของ เส้นใยในลอน (ug)				มวลแห้งของไนโตรที่ของ กระดาษกรอง (ug)			
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10	0.1138	0.1136	0.1134	0.1136	0.1023	0.1025	0.1027	0.1025
20	0.1248	0.1252	0.1250	0.1250	0.1137	0.1135	0.1137	0.1136
30	0.1340	0.1342	0.1340	0.1341	0.1253	0.1255	0.1253	0.1254
40	0.1457	0.1461	0.1461	0.1460	0.1347	0.1349	0.1351	0.1349
50	0.1552	0.1548	0.1550	0.1550	0.1436	0.1436	0.1436	0.1436
60	0.1635	0.1635	0.1637	0.1636	0.1507	0.1509	0.1509	0.1508
70	0.1724	0.1726	0.1730	0.1727	0.1595	0.1595	0.1595	0.1595
80	0.1833	0.1829	0.1831	0.1831	0.1679	0.1677	0.1677	0.1678
90	0.1795	0.1797	0.1797	0.1796	0.1655	0.1651	0.1651	0.1652
100	0.1763	0.1763	0.1765	0.1763	0.1624	0.1624	0.1622	0.1623

หมายเหตุ * คือ เปอร์เซ็นต์ของความเข้มข้นที่ใช้สำหรับแผ่นเมมเบรนเซลลูโลสมาตรฐาน

ตารางที่ ก.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่เก็บตัวอย่างกับมวลแห้งของไนโตรเจนที่ความเข้มข้นของสารละลายคูดซับที่ประกอบด้วย 0.176 โมลาร์โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ 0.416 โมลาร์โซเดียมไอโอดีน (80% ของความเข้มข้นที่ใช้สำหรับแผ่นเมมเบรนเซลลูโลสมาตรฐาน) และระยะเวลาที่ใช้ในการสปินเส้นใย 45 นาที

จำนวนวันที่เก็บตัวอย่าง (วัน)	มวลแห้งของไนโตรเจนของเส้นใยในลอน (ug)				มวลแห้งของไนโตรเจนของกระดาษกรอง (ug)			
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	0.0632	0.0630	0.0632	0.0631	0.0608	0.0612	0.0610	0.0610
3	0.1425	0.1425	0.1425	0.1425	0.1340	0.1340	0.1344	0.1341
5	0.1731	0.1729	0.1729	0.1729	0.1572	0.1570	0.1568	0.1570
7	0.1850	0.1846	0.1844	0.1847	0.1704	0.1700	0.1702	0.1702
9	0.1998	0.1998	0.2002	0.1999	0.1850	0.1854	0.1850	0.1852
11	0.2097	0.2091	0.2093	0.2094	0.1966	0.1964	0.1962	0.1964
13	0.2187	0.2187	0.2185	0.2186	0.2105	0.2103	0.2103	0.2104
15	0.2211	0.2209	0.2209	0.2210	0.2166	0.2166	0.2162	0.2165

ตารางที่ ก.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่เก็บตัวอย่างกับมวลแห้งของไนโตรเจนที่ความเข้มข้นของสารละลายดูดซับที่ประกอบด้วย 0.176 โมลาร์โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ 0.416 โมลาร์โซเดียมไอโอไดด์ (80% ของความเข้มข้นที่ใช้สำหรับแผ่นเมมเบรน เซลลูโลสมาตรฐาน) และระยะเวลาที่ใช้ในการสปินเส้นใย 45 นาที

จำนวนวันที่เก็บตัวอย่าง (วัน)	มวลแห้งของไนโตรเจนของเส้นใยไนลอน (ug)				มวลแห้งของไนโตรเจนของกระดาษกรอง (ug)			
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	0.0637	0.0635	0.0631	0.0634	0.0618	0.0610	0.0612	0.0613
3	0.1411	0.1413	0.1407	0.1410	0.1332	0.1330	0.1326	0.1329
5	0.1577	0.1577	0.1577	0.1577	0.1424	0.1424	0.1424	0.1424
7	0.1794	0.1788	0.1792	0.1792	0.1659	0.1657	0.1655	0.1657
9	0.2005	0.2005	0.2007	0.2006	0.1860	0.1869	0.1862	0.1864
11	0.2132	0.2126	0.2130	0.2129	0.1998	0.1998	0.2002	0.1999
13	0.2222	0.2224	0.2222	0.2223	0.2128	0.2130	0.2126	0.2128
15	0.2246	0.2246	0.2246	0.2246	0.2187	0.2187	0.2187	0.2187

ตารางที่ ก.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่เก็บตัวอย่างกับมวลแห้งของไนโตรเจนที่ความเข้มข้นของสารละลายคูดซึบที่ประกอบด้วย 0.176 โมลาร์โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ 0.416 โมลาร์โซเดียมไอโอไดด์ (80% ของความเข้มข้นที่ใช้สำหรับแผ่นเมมเบรนเซลลูโลสมาตรฐาน) และระยะเวลาที่ใช้ในการสปินเส้นใย 45 นาที

จำนวนวันที่เก็บตัวอย่าง (วัน)	มวลแห้งของไนโตรเจนของเส้นใยในลอน (ug)				มวลแห้งของไนโตรเจนของกระดาษกรอง (ug)			
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	0.0645	0.0642	0.0644	0.0644	0.0622	0.0618	0.0620	0.0620
3	0.1441	0.1439	0.1441	0.1440	0.1363	0.1357	0.1359	0.1360
5	0.1691	0.1691	0.1691	0.1691	0.1536	0.1536	0.1536	0.1536
7	0.1777	0.1775	0.1779	0.1777	0.1648	0.1644	0.1640	0.1644
9	0.1952	0.1948	0.1950	0.1950	0.1813	0.1817	0.1815	0.1815
11	0.2087	0.2089	0.2093	0.2090	0.1968	0.1970	0.1970	0.1969
13	0.2189	0.2190	0.2190	0.2190	0.2109	0.2109	0.2109	0.2109
15	0.2215	0.2215	0.2215	0.2215	0.2172	0.2170	0.2172	0.2171

ผลงานตีพิมพ์

Preparation of Electrospun Nylon Membrane for Air Passive Samplers

Sirinrak Rungsonopas, Winai Somboon, Suppalak Angkaew*

*Nanomaterials Research Laboratory, Department of Chemistry, Faculty of Science, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 10140 Thailand: * s_angkaew@yahoo.com*

Abstract

Air passive sampler (APS) or air diffusive sampler is a portable unit used for monitoring the level of air pollutants such as SO₂ and NO₂. The essential component of APS is an adsorption membrane (conventionally made from Nylon, Teflon or cellulose filtering membrane) containing deposited active agent that reacts with a specific pollutant, to the degree accordingly to the pollutant concentration in air. This research aims to prepare nanofibers sheet with controlled size and morphology to be used as an improve adsorption membrane in APSs. Nylon-6 (MW ~10,000 Da) solutions (15 – 35 %wt) in formic acid were prepared at room temperature. The electrospinning was performed at room temperature using the home-built equipment (with the voltage from 10 to 20 kV and distance from syringe tip to a grounded target (D, from 5-15 cm). Nanofibers size and morphology were studied as a function of solution concentration, applied voltage and the syringe tip-to-target distance. Electrospun Nylon nanofibers with the size of 80 – 90 nm were easily obtained from 20 %wt solution at 20 kV and the distance of 10-15 cm. The obtained non-woven nanofibers membrane supported on filtering (cellulose) paper were used to study the deposition of reactive agent in APS.

1. INTRODUCTION

In recent years, air diffusive or air passive sampler (APS) have gained increasing attention because they are simple, lightweight and cheap and can be operated without any power source. Each APS is equipped with an adsorption membrane deposited with an active agent that can react with a specific pollutant in air and changes into an inert substance to the degree according to the pollutant concentration. Amount of the resulting inert substance is then analyzed quantitatively to obtain the corresponding concentration of the pollutant. APSs have been widely used for monitoring the level of air pollutants such as SO₂, NO₂ and ozone. One limitation for APS is due to its low pollutant adsorption rate. It thus requires as long as 12 – 48 hours for collecting each APS sampler. Normal APS use Nylon, Teflon or cellulose filtering as adsorption membranes. The filter paper contains non-woven micro-size fibers whose surface is a deposition area for the active reagent. It is well known that surface area determines the rate and extent of any heterogeneous surface process. Thus, it is very advantageous if the adsorption membrane contains large surface area for the deposition of active agent.

Electrospinning utilizes the action of high voltage potential to added large surface charge to polymer solution. When the surface repulsion force surpasses surface tension of liquid, a polymer jet is ejected from the surface of conical meniscus and nanofibers are formed. The electrospinning technique can easily produce nano- or submicron-scale fibers (diameter range ~ 20 – 30 nm to microns). Morphology and size of nanofibers can be tailored based on the various parameters such as solution concentration, applied voltage, distance from syringes tip to a grounded target [4-7]. The resulting electrospun nanofibers are useful in various applications include filters, membranes, wound dressing, tissue engineering scaffolds, sensors reinforcing fibers in composite material and catalysts [10-13].

This research aims to prepare non-woven sheet or mat of nylon-6 nanofibers to be used as an improve adsorption membrane in air passive sampler. It is believed that the enhanced surface area due to very small fiber dimension will provide larger surface area of the deposited active agent.

2. EXPERIMENTAL PROCEDURE

2.1 Preparation of polymer solutions

Nylon 6 was obtained from Asia Fiber Public Co., Thailand. Electrospinning solutions were prepared by dissolving nylon 6 in formic acid (15 to 30 wt.%) at room temperature and gently stirring for 6-10 hr.

2.2 Electrospinning process

The electrospinning was performed on the home-built electrospinning equipment in the Nanomaterials Research Laboratory (at KMUTT). The equipment setup is shown in Fig. 1. A polymer solution was placed in a 5-mL syringe attached to a 21-gauge needle and a flow-rate controller. The positive electrode of a high voltage power supply (HVPS) used was connected to a metal end of the syringe and the negative electrode was connected to grounded aluminum-foil target. The experiments was performer at room temperature using the applied voltage from 10 to 20 kV and the distance from syringes tip to a target (D) from 5 to 15 cm.

2.3 Morphology study

The morphology and diameter of electrospun nylon 6 nanofibers was observed by scanning electron microscopy (SEM, JSM-5800, JEOL Co., Japan).

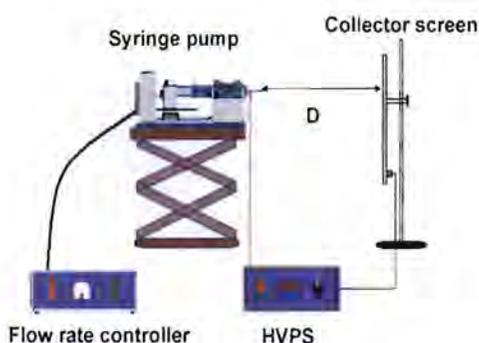


Fig. 1 Experimental set-up for the electrospinning.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Preparation of nylon 6 nanofibers

3.1.1 Effect of polymer concentration

Series of Nylon 6 solutions with concentration ranging from 15 to 35 wt.% were prepared in formic acid. The SEM micrographs of nanofibers (Fig. 2) show different morphology. Formation of spindle-like beads on fibers was found for 15 wt.% solution. As the concentration increases, the morphology changed from beaded to uniform fiber structure and the average fiber diameter increased from 47 to 205 nm (Fig. 2) The larger fiber size is the result of more mass transfer to the spun fiber at higher solution concentration.

3.1.2 Effect of equipment parameters (applied voltage and distance from syringes tip to a target)

A series of experiments were carried out when the applied voltage was varied from 10 to 20 kV and the distance from syringes tip to a target was varied from 5 to 15 cm. The results were shown in Fig.4. It can be concluded that the average diameter of nanofibers decreases with an increase in applied electric field or the distance from syringe tip to the target. The higher voltage increases the surface charge and generates repulsive force between polymer chains, causing more chain stretching. Increasing the tip-to-target distance also causes smaller average fiber diameter due to an increase flight time (and length) of the electrospun nanofibers.

3.1.2 Effect of equipment parameters (applied voltage and distance from syringes tip to a target)

A series of experiments were carried out when the applied voltage was varied from 10 to 20 kV and the distance from syringes tip to a target was varied from 5 to 15 cm. The results shown in Fig.4 indicate that the average diameter of nanofibers decreases with an increase in applied electric field or

the distance from syringe tip to the target. The higher voltage increases the surface charge of polymer and generates repulsive force between polymer chains, causing more chain stretching. Increasing the distance from a syringe tip to a target distance also causes smaller average fiber diameter due to an increase flight time (and length) of the electrospun nanofibers.

From all of the above experiments, it can be found that nylon nanofibers with the diameter of less than 100 nm can be easily prepared from 20%wt solution at 20 kV and the distance between syringe tip to target between 10 to 15 cm. These conditions were used to prepare nanofibers map for the adsorption membrane of the air passive samplers.

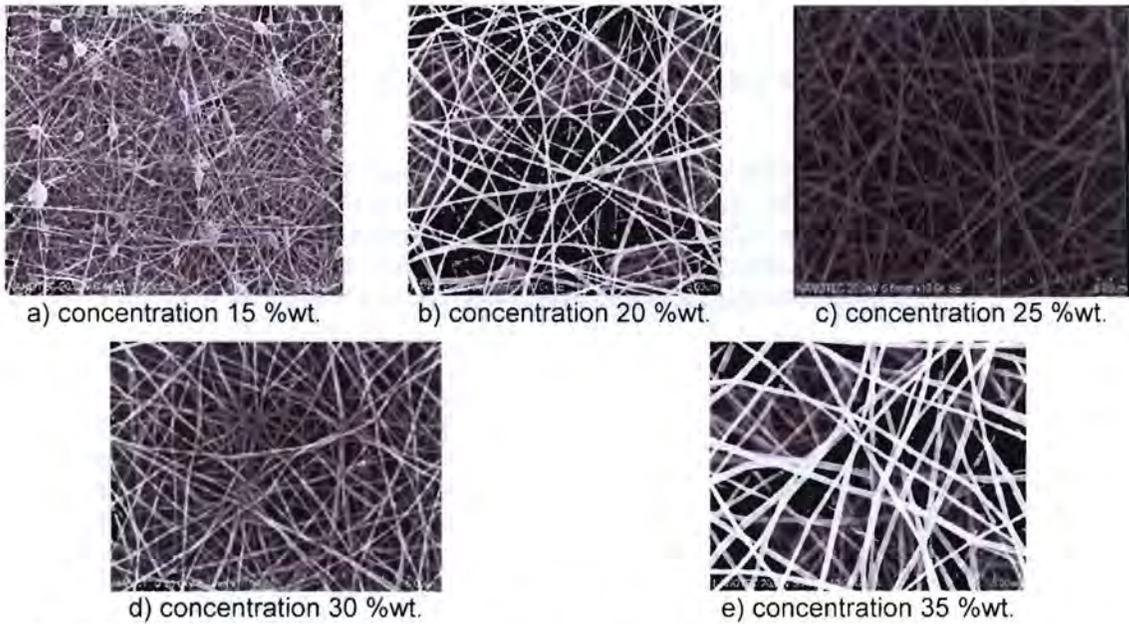


Fig.2 SEM micrographs of Nylon 6 nanofibers electrospun at various solution concentrations.

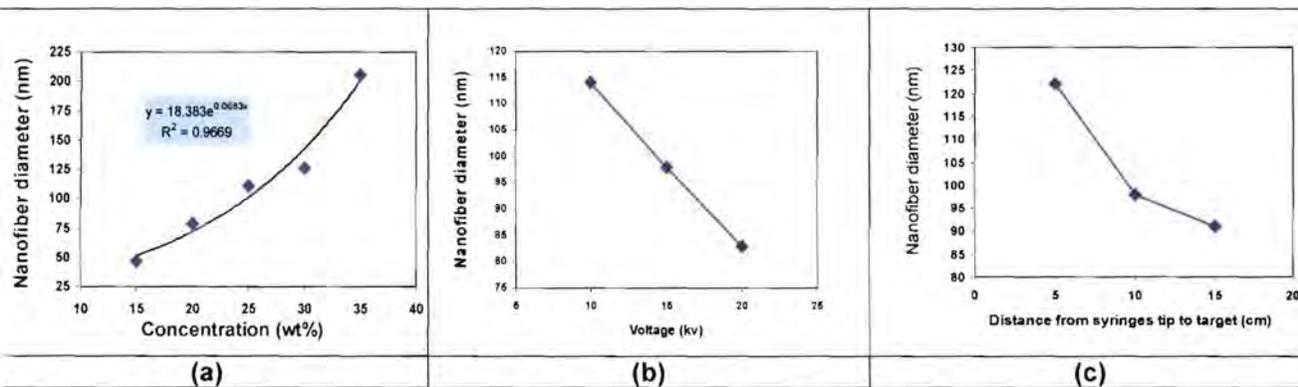


Fig.3 Average diameter of nylon-6 nanofibers as a function of a) solution concentration, b) applied voltage and b) distance from syringes tip to a grounded target

3.2 Nanofibers mat as adsorption membrane for air passive sampler

3.1.2 Morphology of a filtering (cellulose) paper and NaOH (active agent) deposited on the paper

A filtering paper is a common adsorption membrane used in an air passive sampler. The filtering paper is made of cellulose microfibers with diameter in the range of 5 to 10 mm (shown in Fig. 5a). After treating with NaOH solution, NaOH was found deposited as a solid lump coated over the

cellulose fibers (Fig. 5b). NaOH does not form crystalline solid due to its high water adsorption (hygroscopic property).

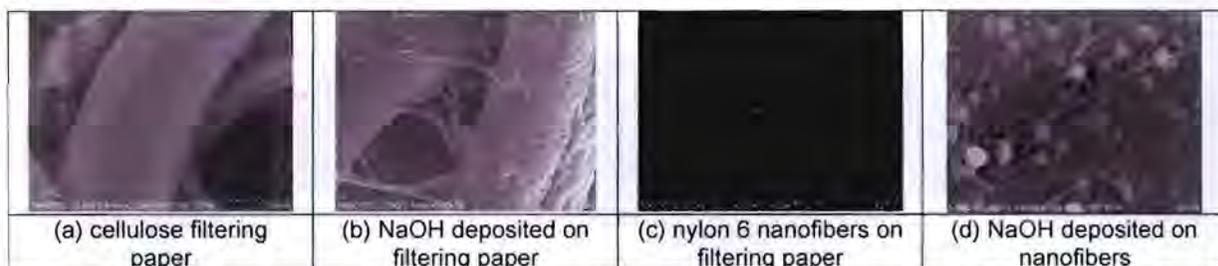


Fig.5 SEM micrograph (5000x) of the filtering (cellulose) paper and nylon nanofibers, with and without NaOH deposition.

3.1.2 Morphology of nanofibers supported by filtering paper and NaOH deposited on nanofibers

Morphology of the electrospun non-woven nanofibers mat supported on filtering (cellulose) paper is as shown in Fig. 6a. After treating with NaOH solution, NaOH was found deposited as droplets (diameter around 0.5 – 1 micron) on nanofibers. Although nanofibers have much smaller size, small NaOH crystals were not formed on the nanofibers due to the hygroscopic.

4. CONCLUSION

The nylon 6 nanofibers were successfully prepared by the electrospinning. Higher solution concentration favors the formation of uniform nanofibers without beads. The diameter of the electrospun nanofibers increases with increase of the solution concentration and decreases with increase of applied voltage and distance from syringe tip to target. Electrospun nylon-6 nanofibers with the size of less than 100 nm were facially obtained from 20%wt solution at 20 kV and the distance of 10-15 cm. NaOH solid deposited on the nanofibers as droplets (0.5-1 micron size) and deposited as a solid lump on the common cellulose filtering filter. The size of solid NaOH deposited on nanofibers was smaller than that of common fibers but it cannot take the full advantage of nano-dimension due to the hygroscopic nature of NaOH which prevents formation of nano-size crystals of the agent on the nanofibers.

References

- [1] Formhals, A. (1934). US Patent 1, 975, 504.
- [2] Reneker, D.H., Yarin, A.L., Fong, H. and Koombhongse, S. (2000). J. Appl. Phys. **87**, 4531-4547.
- [3] Burger, C., Hsiao B.S. and Chu, B. (2006). Annurev. Mat. Sci. **36**, 333-368.
- [4] Tan, S-H., Inai, R., Kotaki, M. and Ramakrishna, S. (2005). Polymers. **46**, 6128-6134.
- [5] Yan, Li., Zhengming Huang and Yandong, Lu. (2006). European Polymer Journal **42**, 1696-1704.
- [6] Mit-uppatharn, C., Nithitanakul, M. and Supaphol, P.. (2004). Macromolecular Chemistry and Physics. **205**, 2327-2338.
- [7] Ryu, Y.J., Kim, H.Y., Lee, K.H., Park, H.C. and Lee, D.R. (2003). EUROPEAN POLYMER JOURNAL. **39**, 1883-1889.
- [8] Lee, KH., Kim, HY., La YM, Lee, D.R. and Sung, N.H. (2002). J. Polym. Sci. Polym. Phys. **40**, 2259-2268.
- [9] Megeliski, S., Stephens, JS., Chase, DB. and Rabolt, JF. (2006). Macromolecules. **35**, 8456-8466.
- [10] Deitzel, J.M., Kosik, W., Mcknight, S.H., Beak Tan, NC., Desimone, JM. and Crette, S. (2002). Polymer. **43**, 1025-1029.
- [11] Bergshoef, M.M. and Vancso, G.J. (1999). Adv. Mater. **11**, 1362-1365.
- [12] Doshi, J. and Reneker, DH. (1995). J. Electrostat. **35**, 151-160.
- [13] Kenawy, El-R. and Layman, J.M. (2003). J. Biomaterials. **24**, 907-913.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาวสิรินธรรักษ์ รังสรรค์โอภาส
วัน เดือน ปีเกิด	3 ตุลาคม 2526
ประวัติการศึกษา	
ระดับมัธยมศึกษา	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนวัดราชโอรส พ.ศ. 2544
ระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ พ.ศ. 2547
ระดับปริญญาโท	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2551
ทุนการศึกษาหรือทุนอุดหนุน	ทุนวิจัยพระจอมเกล้าธนบุรี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
การนำเสนอผลงาน	Sirinrak Rungsonopas, Winai Somboon and Suppalak Angkaew, 2007, "Preparation of Electrospun Nylon Membrane for Air Passive Samplers", The 2 nd International Conference on Advances in Petrochemicals and Polymers (ICAPP 2007), June 25 th - 28 th , 2007, Imperial Queen's Park Hotel, Bangkok, Thailand, NNE 115.

