



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ทุนวิจัย
กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานวิจัย

การเตรียมเส้นใยอิเล็กโตรสปินผสมระหว่างพอลิสไตรีน
และพอลิ(2-เมธอกซี,5-(2-เอธิลเฮกซิลออกซี)
-พารา-ฟีนิลีนไวนิลีน) และสมบัติด้านการเปล่งแสง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดย

พิชญ์ ศุภผล

ธันวาคม 2549

จท
ปค 15
013269

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทุนวิจัย

กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานผลการวิจัย (ฉบับสมบูรณ์)

การเตรียมเส้นใยอิเล็กโตรสปินผสมระหว่างพอลิสไตรีนและพอลิ(2-เมธอกซี,5-(2'-เอซิลเฮกซิลออกซี)-พารา-ฟีนิลีนไวนิลีน) และสมบัติด้านการเปล่งแสง

โดย

รองศาสตราจารย์ ดร. พิชญ์ สุภผล

ธันวาคม 2549

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินสนับสนุนการวิจัยจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [ผ่านทางทุนวิจัย กองทุนรัชดาภิเษก สมโภช (พฤษภาคม 2548 - พฤษภาคม 2549)] รวมทั้งแหล่งทุนวิจัยอื่นๆ อันได้แก่ สำนักงานสนับสนุนการวิจัย (สกว) (ทุนเพิ่มขีดความสามารถด้านการวิจัยของอาจารย์รุ่นกลางในสถาบันอุดมศึกษา RMU4980045) ศูนย์เทคโนโลยีปิโตรเลียมและปิโตรเคมี [ผ่านทางกองทุนจากธนาคารเพื่อการพัฒนาแห่งเอเชีย (ADB)] และวิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชื่อโครงการวิจัย	การเตรียมเส้นใยอิเล็กโตรสปินผสมระหว่างพอลิสไตรีนและพอลิ(2-เมธอกซี,5-(2'-เอธิลเฮกซิลออกซี)-พารา-ฟีนิลีนไวนิลีน) และสมบัติด้านการเปล่งแสง
ชื่อผู้วิจัย	รองศาสตราจารย์ ดร. พิชญ์ ศุภผล
เดือนและปีที่ทำวิจัยเสร็จ	ธันวาคม 2549

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการเตรียมเส้นใยผสมระหว่างพอลิสไตรีนและพอลิ(2-เมธอกซี,5-(2'-เอธิลเฮกซิลออกซี)-พารา-ฟีนิลีนไวนิลีน) (PS/MEH-PPV) จากสารละลาย PS/ MEH-PPV ในตัวทำละลาย 3 ชนิดคือ คลอโรฟอร์ม 1,2-ไดคลอโรอีเทน และเตตระไฮโดรฟิวแรนด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ซึ่งจากการทดลองเตรียมสารละลายที่มีความเข้มข้นต่างกันเป็น 8.5 16 และ 23.5% (w/v) พบว่ามีเพียงสารละลาย PS/MEH-PPV เข้มข้น 23.5% (w/v) ในคลอโรฟอร์มเท่านั้นที่ให้เส้นใยที่เรียบ ส่วนในความเข้มข้นอื่นพบว่าความสามารถในการเตรียมเป็นเส้นใยของสารละลาย PS/MEH-PPV เข้มข้น 8.5% (w/v) ในคลอโรฟอร์มนั้นจะเพิ่มขึ้นได้โดยการเติมเกลืออินทรีย์ไพริดิเนียม ฟอรัมเมท (PF) หรือตัวทำละลายชนิดอื่นที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกซ์สูงกว่าลงไปในสารละลาย เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่เตรียมได้นั้นอยู่ในช่วง 0.30-5.11 μm นอกจากนี้ยังมีการศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติการเปล่งแสงของสารละลาย PS/MEH-PPV เข้มข้น 8.5% (w/v) ในตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรฟอร์มและ 1,2-ไดคลอโรอีเทนที่อัตราส่วนทางปริมาตรของตัวทำละลายผสมต่างๆ รวมทั้งศึกษาการเปล่งแสงของเส้นใยที่เตรียมได้จากสารละลายดังกล่าวด้วย สุดท้ายมีการศึกษาผลของการเติมเกลือ PF ที่ลิแกนด์ โดยศึกษาจากการเตรียมเส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลาย PS/MEH-PPV ใน 1,2-ไดคลอโรอีเทนทั้งที่มีการเติมและไม่มีการเติมเกลือ PF ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเส้นใยที่เตรียมได้หลังจากการเก็บสารละลายที่มีการเติมเกลือไว้ 1 เดือนนั้นสามารถทำให้สีการเปล่งแสงของเส้นใยเปลี่ยนเป็นสีเหลืองได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากการลดลงของหมู่แทนที่ MEH ในเส้นใยนั่นเอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Project Title	Preparation of electrospun polystyrene/poly(2-methoxy-5-(2'-ethylhexyloxy)-1,4-phenylene vinylene) blend fibers and their photoluminescence
Name of the Investigators	Associate Professor Dr. Pitt Supaphol
Year Completed	December 2006

Abstract

Ultrafine polystyrene (PS)/poly(2-methoxy-5-(2'-ethylhexyloxy)-1,4-phenylene vinylene) (MEH-PPV) fibers were successfully prepared by electrospinning of PS/ MEH-PPV solutions in chloroform, 1,2-dichloroethane, and tetrahydrofuran (THF). Three concentrations of the solutions were prepared: 8.5, 16, and 23.5% (w/v). Smooth fibers only observed from 23.5% (w/v) PS/MEH-PPV solution in chloroform. Improvement in the electrospinnability of 8.5% (w/v) PS/MEHPPV solution in chloroform was achieved by addition of an organic salt, pyridinium formate (PF), or by addition of a minor solvent with a high dielectric constant value. The average diameters of the as-spun PS/MEH-PPV fibers were between 0.30 and 5.11 μm . Photoluminescence of 8.5% (w/v) solutions of PS/MEH-PPV in a mixed solvent system of chloroform and 1,2-dichloroethane of various volumetric compositions and the resulting as-spun fibers was investigated and compared. For deep study in effect of PF addition, the electrospun PS/MEH-PPV fibers were fabricated from 8.5% (w/v) solutions of PS/MEH-PPV in 1,2-dichloroethane with and without PF addition. The results showed that the fibers that were electrospun from the solution that was left to age for 1 month after PF addition could be observed yellow emission color because of the decomposition of the MEH side groups.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
หน้าหัวเรื่อง	i
กิตติกรรมประกาศ	ii
บทคัดย่อภาษาไทย	iii
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ (Abstract)	iv
สารบัญ	v
รายการตารางประกอบ	vii
รายการภาพประกอบ	viii
บทนำ	1
การสำรวจแนวความคิดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต	5
MEH-PPV และการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตจาก MEH-PPV	5
วิธีการดำเนินงานวิจัย	7
วัสดุและสารเคมี	7
วิธีการเตรียมสารละลายเพื่อการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต	7
กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต	8
การตรวจสอบลักษณะสัณฐานเส้นใยอิเล็กโตรสปิน	8
การทดสอบคุณสมบัติของสารละลายและเส้นใยอิเล็กโตรสปิน	9
ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย	10
1. การศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อขนาด และสัณฐานของเส้นใยอิเล็กโตรสปิน	10
1.1. ระบบตัวทำละลายเดี่ยว	10
1.1.1. ผลของศักย์ไฟฟ้า และตัวทำละลาย ที่มีต่อขนาดและสัณฐานของเส้นใยอิเล็กโตรสปิน PS/ MEH-PPV	10
1.1.2. ผลของความเข้มข้น และตัวทำละลาย ที่มีต่อขนาดและสัณฐานของเส้นใยอิเล็กโตรสปิน PS/ MEH-PPV	11
1.1.3. ผลของการเติมเกลืออินทรีย์ลงในสารละลายที่มีต่อขนาดและสัณฐานของเส้นใยอิเล็กโตรสปิน PS/ MEH-PPV	14
1.1.4. ผลของปริมาณเกลืออินทรีย์ที่เติมลงในสารละลายที่มีต่อขนาดและสัณฐานของเส้นใยอิเล็กโตรสปิน PS/ MEH-PPV	14
1.1.5. การทดสอบเพื่อยืนยันว่ามี MEH-PPV ผสมอยู่ในเส้นใยอิเล็กโตรสปินที่เตรียมได้	17

	หน้า
1.2. ระบบตัวทำละลายผสม	19
1.2.1. ผลของสัดส่วนตัวทำละลายที่มีผลต่อขนาดและสัณฐานของเส้นใย อิเล็กโตรสปิน PS/MEH-PPV	19
1.2.2. สมบัติการเปล่งแสงของสารละลายและเส้นใยอิเล็กโตรสปิน PS/MEH-PPV	22
2. การศึกษาผลของการเติมเกลืออินทรีย์ (PF) ที่มีต่อสัณฐาน สี และ สมบัติการเปล่งแสงของ เส้นใยอิเล็กโตรสปิน	23
2.1. ผลของศักย์ไฟฟ้าที่มีต่อขนาดและสัณฐานของเส้นใยอิเล็กโตรสปิน PS/ MEH-PPV	25
2.2. ผลของการเติมเกลือที่มีต่อขนาดและสัณฐานของเส้นใยอิเล็กโตรสปิน PS/ MEH-PPV	25
2.3. ผลของเวลาหลังการเติมเกลือที่มีต่อขนาดและสัณฐานของเส้นใยอิเล็กโตรสปิน PS/ MEH-PPV	25
2.4. ผลของเวลาหลังการเติมเกลือ PF ที่มีต่อสี และ สมบัติการเปล่งแสงของเส้นใย อิเล็กโตรสปิน และการวิเคราะห์หาปริมาณหมู่แทนที่ MEH ที่ลดลง	27
สรุปผลการวิจัย	34
ข้อเสนอแนะ	35
เอกสารอ้างอิง	36

รายการตารางประกอบ

ตารางที่	หน้า	
1.	สมบัติที่สำคัญบางประการของตัวทำละลายที่ใช้ในงานวิจัย	7
2.	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 23.5% (w/v) (สัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่าง PS และ MEH-PPV เท่ากับ 22.5:1) ในตัวทำละลาย คลอโรฟอร์มและ 1,2-ไดคลอโรอีเทน	11
3.	ค่าแรงดึงผิวของสารละลาย PS/MEH-PPV ที่ละลายด้วยตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม 1,2-ไดคลอโรอีเทน และเดคระไฮโครฟิวแรนที่ความเข้มข้นต่างๆ	11
4.	ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณของเส้นใยอิเล็กโตรสปินที่เตรียมจากสารละลาย PS/MEH-PPV ใน คลอโรฟอร์ม ความเข้มข้น 8.5% (w/v) (สัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่าง PS และ MEH-PPV เท่ากับ 7.5:1) ซึ่งเติมเกลือ PF ลงไปด้วยปริมาณที่แตกต่างกันในช่วง 2 ถึง 10% (v/v)	16
5.	ผลการวิเคราะห์สเปกตรัม IR ของเส้นใยอิเล็กโตรสปิน PS/MEH-PPV ที่เตรียมจากสารละลาย ความเข้มข้น 23.5% (w/v) ในคลอโรฟอร์มเปรียบเทียบกับ MEH-PPV บริสุทธิ์	19
6.	ค่าแรงดึงผิวของสารละลาย PS/MEH-PPV ในตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรฟอร์มและ 1,2-ไดคลอโรอีเทนที่ผสมกันด้วยสัดส่วนปริมาตรที่ต่างกัน โดยสารละลายแต่ละชนิดนั้นมีการเติม เกลือ PF ลงไปด้วยจนได้ความเข้มข้นของ PF เท่ากับ 8% (v/v)	20
7.	ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณของเส้นใยอิเล็กโตรสปินที่เตรียมจากสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% (w/v) (สัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่าง PS และ MEH-PPV เท่ากับ 7.5:1) ใน ตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรฟอร์มและ 1,2-ไดคลอโรอีเทนที่สัดส่วนการผสมต่างๆ กัน และเติมเกลือ PF ลงไป 8% (v/v)	20
8.	ภาพ SEM (กำลังขยาย 500x สเกลบาร์ยาว 50 μm) และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% (w/v) (PS:MEH-PPV = 7.5:1) ใน 1,2-ไดคลอโรอีเทนทั้งที่ไม่เติมเกลือ และมีการเติมเกลือ PF คิดเป็น 8% (v/v) และที่เวลาหลัง การเติมเกลือที่ต่างกัน โดยสภาวะที่ใช้เตรียมเส้นใย คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง ในช่วง 7.5-15 kV ระยะในการเก็บเส้นใย 10 cm และเวลาในการเก็บเส้นใย 1 นาที	24
9.	ผลการวิเคราะห์สเปกตรัม IR ของเส้นใยอิเล็กโตรสปิน PS/MEH-PPV ที่เตรียมจากสารละลาย ความเข้มข้น 8.5% (w/v) (PS:MEH-PPV = 7.5:1 w/w) ใน 1,2-ไดคลอโรอีเทน ที่มีการเติม เกลือ PF ลงไปคิดเป็น 8% (v/v) แล้วทิ้งสารละลายไว้เป็นเวลา 12 ชั่วโมงเปรียบเทียบกับ 1 เดือนก่อนนำไปเตรียมเป็นเส้นใย	30

รายการรูปภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
1.	กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต	2
2.	โครงสร้างของพอลิ(พารา-ฟีนิลีนไวนิลีน) (poly(p-phenylene vinylene), PPV)	3
3.	แผนภาพของไดโอดเปล่งแสง	4
4.	โครงสร้างของ MEH-PPV	6
5.	การจัดอุปกรณ์ในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต	8
6.	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (JEOL JSM-5200)	9
7.	ภาพ SEM ของเส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลาย PS/MEH-PPV ในคลอโรฟอร์มที่ความเข้มข้นต่างๆ (a) 8.5% (w/v) (b) 16% (w/v) และ (c) 23.5% (w/v) ส่วน (d) เส้นใยจากสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% (w/v) ที่เติมเกลือ PF ลงไป 8% (v/v) โดยสภาวะที่ใช้เตรียมเส้นใย คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV และระยะในการเก็บเส้นใย 10 cm	12
8.	ภาพ SEM ของเส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลาย PS/MEH-PPV ใน 1,2-ไดคลอโรอีเทนที่ความเข้มข้นต่างๆ (a) 16% (w/v) และ (b) 23.5% (w/v) ส่วน (c) เส้นใยจากสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% (w/v) ที่เติมเกลือ PF ลงไป 8% (v/v) โดยสภาวะที่ใช้เตรียมเส้นใย คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV และระยะในการเก็บเส้นใย 10 cm	13
9.	ภาพ SEM ของเส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลาย PS/MEH-PPV ในเตตระไฮโดรฟิวแรนที่ความเข้มข้น (a) 16% (w/v) ส่วน (b) เส้นใยจากสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% (w/v) ที่เติมเกลือ PF ลงไป 8% (v/v) โดยสภาวะที่ใช้เตรียมเส้นใย คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV และระยะในการเก็บเส้นใย 10 cm	13
10.	ภาพ SEM ของเส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลาย PS/MEH-PPV ในคลอโรฟอร์มความเข้มข้น 8.5% (w/v) ที่เติมเกลือ PF ลงไปในปริมาณที่ต่างกัน (a) 0 (b) 2 (c) 4 (d) 8 และ (e) 10% (v/v) ตามลำดับ ซึ่ง “1” และ “2” ของแต่ละรูปหมายถึงกำลังขยาย 100 และ 500 เท่าตามลำดับ โดยสภาวะที่ใช้เตรียมเส้นใย คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV และระยะในการเก็บเส้นใย 10 cm	16
11.	สเปกตรัม IR ของเกลือ PF หลังทิ้งไว้ในเซลล์บรรจุของเหลวที่ปล่อยให้เกลือดังกล่าวสัมผัสอากาศที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา (a) 2 (b) 10 และ (c) 15 นาที ตามลำดับ	17
12.	สเปกตรัม IR ของเส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% (w/v) ในคลอโรฟอร์ม (a) ไม่เติมเกลือ PF (b) เติมเกลือ PF ลงไป 8% (v/v)	18
13.	สเปกตรัม IR ของ (a) เส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลาย PS ความเข้มข้น 23.5% (w/v) ในคลอโรฟอร์ม (b) MEH-PPV บริสุทธิ์ และ (c) เส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 23.5% (w/v) ในคลอโรฟอร์ม โดยสภาวะที่ใช้เตรียมเส้นใย คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV และระยะในการเก็บเส้นใย 10 cm	18

รูปที่		หน้า
14.	ภาพ SEM ของเส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% (w/v) ในตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรฟอร์มและ 1,2-ไดคลอโรอีเทนที่สัดส่วนการผสมต่างๆ กัน (a) 100/0, (b) 75/25, (c) 50/50, (d) 25/75 และ (e) 0/100 โดยสารละลายแต่ละชนิดนั้นมีการเติมเกลือ PF ลงไปด้วยจนได้ความเข้มข้นของ PF เท่ากับ 8% (v/v) สภาวะที่ใช้เตรียมเส้นใย คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV และระยะในการเก็บเส้นใย 10 cm	19
15.	สเปกตรัมการเปล่งแสง (photoluminescence spectra) ของ (a) สารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% (w/v) ในตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์มกับ 1,2-ไดคลอโรอีเทนที่สัดส่วนปริมาตรต่างๆ กัน โดยมีการเติมเกลือ PF ลงไป 8% (v/v) PF (b) สเปกตรัมที่ได้จากเส้นใยอิเล็กโตรสปิน PS/MEH-PPV จากสารละลายดังกล่าว	23
16.	รูปถ่ายดิจิทัลของเส้นใยอิเล็กโตรสปินที่เตรียมจากสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% ใน 1,2-ไดคลอโรอีเทนทั้งที่ไม่เติมเกลือ (a) และมีการเติมเกลือ PF คิดเป็น 8% (v/v) (PS:MEH-PPV = 7.5:1) ที่เวลาหลังการเติมเกลือก่อนนำไปเตรียมเส้นใยที่ต่างกันเป็น 10 นาที 12 ชั่วโมง และ 1 เดือน (b-d ตามลำดับ) โดยสภาวะที่ใช้เตรียมเส้นใย คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV ระยะในการเก็บเส้นใย 10 cm และเวลาในการเก็บเส้นใย 1 นาที	25
17.	ภาพ SEM ของเส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% (w/v) ในตัวทำละลาย 1,2-ไดคลอโรอีเทนที่เตรียมไว้ 1 เดือนก่อนนำไปปั่นเป็นเส้นใยโดยไม่มีการเติมเกลือ PF (a) ที่กำลังขยาย 500x (b) ที่กำลังขยาย 1,500x สภาวะที่ใช้เตรียมเส้นใย คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV ระยะในการเก็บเส้นใย 10 cm และเวลาในการเก็บเส้นใย 1 นาที เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่วัดจากภาพดังกล่าวเท่ากับ 0.206-0.284 μm	27
18.	สเปกตรัม IR ของ (a) เม็ดพลาสติก PS (b) MEH-PPV บริสุทธิ์ และเส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% (w/v) (PS:MEH-PPV = 7.5:1 w/w) ใน 1,2-ไดคลอโรอีเทน ที่มีการเติมเกลือ PF ลงไปคิดเป็น 8% (v/v) และทิ้งไว้เป็นเวลา (c) 12 ชั่วโมง และ (d) 1 เดือน ตามลำดับ โดยสภาวะที่ใช้เตรียมเส้นใย คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV และระยะในการเก็บเส้นใย 10 cm	28
19.	เทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์ด้วย TGA ของ (a) เม็ดพลาสติก PS (b) MEH-PPV บริสุทธิ์ และเส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% (w/v) (PS:MEH-PPV = 7.5:1 w/w) ใน 1,2-ไดคลอโรอีเทน ที่มีการเติมเกลือ PF ลงไปคิดเป็น 8% (v/v) และทิ้งไว้เป็นเวลา (c) 12 ชั่วโมง และ (d) 1 เดือน ตามลำดับ โดยสภาวะที่ใช้เตรียมเส้นใย คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV และระยะในการเก็บเส้นใย 10 cm	31

รูปที่		หน้า
20.	สเปกตรัมการเปล่งแสง (photoluminescence spectra) ของ (a) สารละลายที่ใช้ในการเตรียมเส้นใย [ประกอบด้วยสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% (w/v) (PS:MEH-PPV = 7.5:1 w/w) ในตัวทำละลาย 1,2-ไดคลอโรอีเทนที่มีการเติมเกลือ PF ลงไปคิดเป็น 8% (v/v) และทิ้งไว้เป็นเวลา (1) 12 ชั่วโมง (2) 1 เดือน ตามลำดับ และ (3) สารละลาย PS เข้มข้น 20% (w/v) ในตัวทำละลาย 1,2-ไดคลอโรอีเทน] และ (b) สเปกตรัมที่ได้จากเส้นใยอิเล็กโตรสปิน PS/MEH-PPV จากสารละลายดังกล่าวข้างต้น ซึ่งสภาวะที่ใช้เตรียมเส้นใย คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV และระยะในการเก็บเส้นใย 10 cm	33



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทนำ

ความต้องการผลิตวัสดุที่มีขนาดเล็กโดยเฉพาะวัสดุนาโน (วัสดุที่มีขนาดหรือการจัดเรียงโครงสร้างที่ถูกต้องในระดับนาโนเมตร) กำลังได้รับความสนใจและมีความตื่นตัวในวงกว้าง ทั้งในสหรัฐอเมริกา ยุโรป และเอเชีย และหนึ่งในรูปแบบวัสดุนาโนขนาดเล็กที่ได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบันก็คือ เส้นใยนาโน (เส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระดับนาโนเมตร) ซึ่งเป็นรูปแบบของวัสดุที่มีความสำคัญยิ่ง เพราะเส้นใยยังมีขนาดเล็กยังมีพื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตรหรือพื้นที่ผิวจำเพาะสูง และหากนำเส้นใยขนาดเล็กลงไปผลิตเป็นเส้นด้าย ย่อมทำให้เส้นด้ายมีความละเอียดและความแข็งแรงสูง ในขณะที่เดียวกันหากนำเส้นใยดังกล่าวไปผลิตเป็นแผ่นใยไม่ถักไม่ทอ (nonwoven fabric) ย่อมมีลักษณะเป็นแผ่นใยบางที่มีความยืดหยุ่น และมีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานเฉพาะที่ที่ต้องการความละเอียดสูง เช่น การแยกสาร วัสดุกรอง [1, 2] วัสดุควบคุมการปลดปล่อยยา [3] และ โครงวิศวกรรมสำหรับการสร้างเนื้อเยื่อ (tissue engineering scaffold) [4-6] ได้เป็นต้น

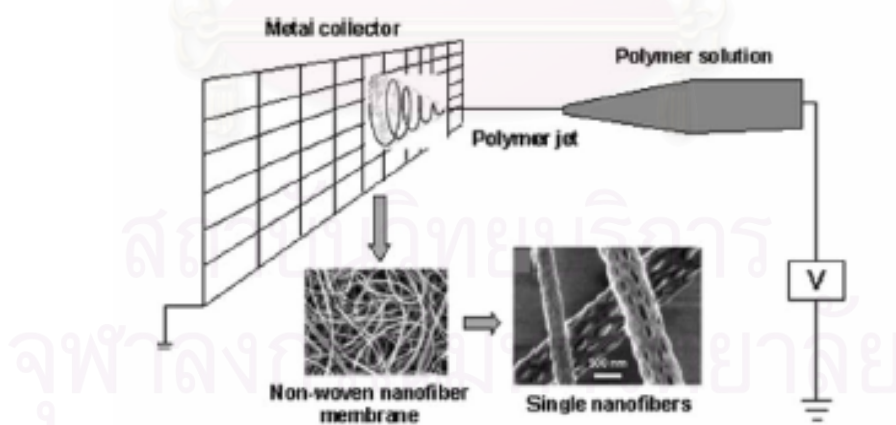
กระบวนการผลิตเส้นใยขนาดเล็กโดยทั่วไปได้แก่ กระบวนการปั่นเส้นใยจากพอลิเมอร์หลอมเหลว และจากสารละลาย ซึ่งสามารถผลิตเส้นใยที่มีขนาดเล็กกว่าหนึ่งเดซิเท็กซ์ได้ (1 เดซิเท็กซ์ = เส้นใยที่มีน้ำหนัก 1 กรัมต่อความยาว 10,000 เมตร) แต่เส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดใหญ่อยู่ในช่วง 1-5 ไมโครเมตร [7] แม้มีการพัฒนาเทคนิคในการผลิตและการแยกเส้นใยให้ออกมามีขนาดเล็กกว่าเดิม คือการผลิตเส้นใยสององค์ประกอบ (bicomponent fiber) ซึ่งอาศัยการฉีดสารละลายพอลิเมอร์สองชนิดที่มีสมบัติต่างกันออกมาพร้อมกัน แล้วจึงแยกพอลิเมอร์ทั้งสองออกจากกัน เพื่อให้ได้เส้นใยที่มีขนาดเล็กลง แต่เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ได้ก็ยังคงอยู่ในช่วง 1.64-2.85 ไมโครเมตร [8]

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา การศึกษาและพัฒนาเกี่ยวกับการใช้ไฟฟ้าสถิตความต่างศักย์สูงในการขึ้นรูปเส้นใยขนาดเล็ก (ultrafine fiber) หรือที่เรียกกันว่าเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (electrostatic spinning หรือ electrospinning) นั้นได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เพราะกระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน หาอุปกรณ์ได้ง่าย ราคาถูก วัสดุที่ใช้ในการผลิตแต่ละครั้งมีปริมาณน้อย ระยะเวลาในการผลิตสั้น สามารถผลิตเส้นใยจากวัสดุธรรมดาต่างๆ ไป เช่น พอลิเมอร์ทางชีวภาพ พอลิเมอร์วิศวกรรม (engineering polymer) พอลิเมอร์นำไฟฟ้า โคลิพอลิเมอร์แบบบล็อก (block copolymer) พอลิเมอร์ผสม หรือแม้แต่เซรามิกซ์และวัสดุผสมผสมผสานคอมโพสิต (composite material) ให้มีขนาดเล็กในระดับที่น้อยกว่าไมโครเมตรลงไปจนถึงระดับนาโนเมตรได้ (เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยอยู่ในช่วง 40 ถึง 2000 นาโนเมตร) [9-12] เทคนิคนี้ริเริ่มขึ้นโดยฟอรัมฮัลส์ (A. Formhals) ในปี พ.ศ. 2477 [13] และได้รับการพัฒนาเรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน จากฐานข้อมูลของ ISI Web of Science พบว่าในรอบ 6 เดือนแรกของปี พ.ศ. 2547 มีผลงานวิจัยเกี่ยวกับเทคนิคนี้กว่า 120 ฉบับที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนานาชาติ [14]

อุปกรณ์ปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตประกอบด้วย หลอดบรรจุพอลิเมอร์หลวหรือสารละลายพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นหลอดคาปิลลารี เช่น เข็มฉีดยา หรือปิเปตที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในขนาด 1 มิลลิเมตรหรือเล็กกว่านั้น พร้อมอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของพอลิเมอร์ที่ออกจากปลายหลอดคาปิลลารีให้คงที่ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง ที่สามารถปรับค่าได้อยู่ในช่วงประมาณ 1-30 กิโลโวลต์ พร้อมขั้วจ่ายไฟฟ้าซึ่งทำด้วยวัสดุที่เป็นโลหะเช่น ทองแดง หรือเหล็กไร้สนิมเป็นต้น สนามไฟฟ้าจะเกิดขึ้นระหว่างปลายหลอดคาปิลลารีและแผ่นโลหะ

ที่เป็นตัวรองรับเส้นใยซึ่งมีหลายลักษณะเช่น แผ่นอะลูมิเนียม ลูกกอล์ฟที่หมุนได้และท่อหุ้มด้วยแผ่นอะลูมิเนียมหรืออ่างตัวทำละลาย

การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตนั้นอาศัยหลักการการสร้างสนามไฟฟ้าขึ้นระหว่างปลายท่อหรือปลายเข็มนำไฟฟ้าขนาดเล็กที่ต่อกับหลอดบรรจุสารละลายพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์หลอมเหลว กับฉากรับไฟฟ้าที่ใช้เก็บเส้นใยที่ปั่นได้ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าจนถึงค่าหนึ่ง ประจุไฟฟ้าจำนวนมากที่สะสมอยู่ที่ผิวของหลอดของเหลวจะทำให้รูปทรงกลมของหลอดดังกล่าวสูญเสียเสถียรภาพเปลี่ยนเป็นหยดรูปกรวยซึ่งเรียกกันว่ากรวยของเทเลอร์ (Taylor's cone) และถ้าเพิ่มความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าต่อไปอีกถึงค่าหนึ่งจะเกิดลำของพอลิเมอร์ยื่นออกจากส่วนยอดของกรวยเพื่อช่วยลดประจุที่เกิดขึ้นอย่างมากบนผิวของหลอด ลำพอลิเมอร์ที่ยื่นออกมานี้จะพุ่งไปยังฉากรับด้วยแรงไฟฟ้าสถิต และเมื่อลำพอลิเมอร์พุ่งออกมาพ้นระยะจากปลายเข็มประมาณ 2 ถึง 3 เซนติเมตร (ขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์และความเข้มข้นของสารละลาย) จะเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่จากแนวตรงกลายเป็นเคลื่อนที่เหวี่ยงออกไปแบบไม่เสถียร (instability) โดยเกิดทั้งการแกว่งตัวและโค้งงอ (whipping- and bending instability) ทำให้การเคลื่อนที่โดยรวมคล้ายกับรูปทรงกรวย 3 มิติ มีจุดเริ่มต้นของทรงกรวย 3 มิติที่ปลายสุดของส่วนที่เหวี่ยงตรง ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของแรงผลักของประจุที่เหมือนกัน (Coulombic repulsion force) ซึ่งการเคลื่อนที่แบบนี้จะช่วยทำให้ลำของพอลิเมอร์มีขนาดเล็กจนถึงจุดหนึ่งที่ลำพอลิเมอร์แห้งหรือเย็นเพียงพอขนาดของลำพอลิเมอร์ก็จะไม่ลดลงอีก (เนื่องจากความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์หลอมเหลวมีค่ามากเกินไป) ลำของพอลิเมอร์ที่ตกลงบนฉากรับจะทับกันไปมาอย่างไม่เป็นระเบียบได้เป็นเส้นใยขนาดเล็กที่เรียกว่าเส้นใยอิเล็กโตรสปิน (electrospun fiber) รวมกันเป็นผืนแบบไม่ถักไม่ทอ กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1

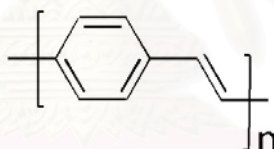


รูปที่ 1. กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

เนื่องจากผืนเส้นใยอิเล็กโตรสปินนั้นมีค่าอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักสูงและมีความหนาแน่นของรูพรุน (ขนาดเล็กกว่าไมโครเมตร) มาก จึงทำให้สามารถนำเส้นใยดังกล่าวไปใช้ในงานต่างๆ ได้มากมาย เช่น เส้นใยนาโนสำหรับเสริมแรงในวัสดุผสมผสานคอมโพสิต เยื่อ (membrane) เสื้อผ้าฉลาด (smart cloth) วัสดุตกแต่ง

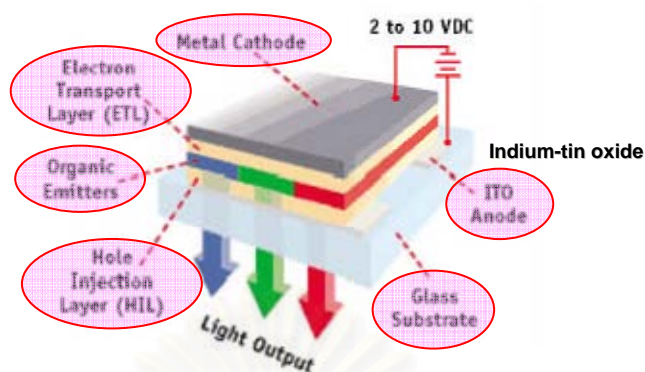
บาดแผล (wound-dressing) โครงวิศวกรรมสำหรับการสร้างเนื้อเยื่อ วัสดุรองรับไอโซเมอร์และตัวเร่งปฏิกิริยาจากเส้นใยนาโน อุปกรณ์ตรวจจับสนามนาโน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์แปลงแสง เป็นต้น [9-11] ซึ่งในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาเส้นใยนาโนจากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่ให้สมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติการให้แสงที่ดัดแปรได้ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เพราะวัสดุดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการขึ้นรูปอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์แปลงแสงในระดับนาโนได้ [9, 15-18]

พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์แปลงแสง (optoelectronic properties) และเป็นที่น่าสนใจคือ พอลิ(พารา-ฟีนิลีนไวนิลีน) (poly(p-phenylene vinylene), PPV) (โครงสร้างดังรูปที่ 2) รวมทั้งอนุพันธ์ของมัน [15-18] เนื่องจากสามารถนำไปใช้สร้างเป็นไดโอดเปล่งแสง (light emitting diode, LED) และอุปกรณ์ให้แสงเนื่องจากกระแสไฟจากปฏิกิริยาเคมี (photovoltaic device) ได้ โดยอาศัยโครงสร้างคอนจูเกตของ PPV ที่มีสมบัติกึ่งตัวนำจากพายอิเล็กตรอน (π -electron) ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ตลอดสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งหนึ่งในอนุพันธ์ของ PPV นั้น พอลิ(2-เมทอกซี, 5-(2'-เอทิลเฮกซิลออกซี)-พารา-ฟีนิลีนไวนิลีน) (poly(2-methoxy-5-(2'-ethylhexyloxy)-1,4-phenylene vinylene), MEH-PPV) เป็นพอลิเมอร์ที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เพราะพอลิเมอร์ชนิดนี้สามารถละลายได้ในตัวทำละลายบางชนิด ต่างจาก PPV ที่ไม่สามารถละลายในตัวทำละลายใดได้เลย การละลายได้นี้เป็นผลเนื่องมาจากหมู่แทนที่หรือสายโซ่กิ่งที่ช่วยลดแรงอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่โมเลกุลของโครงสร้างเดิมของ PPV ลงนั่นเอง [19-21]



รูปที่ 2. โครงสร้างของพอลิ(พารา-ฟีนิลีนไวนิลีน) (poly(p-phenylene vinylene), PPV)

การสร้างไดโอดเปล่งแสงโดยทั่วไปจะทำได้โดยการเตรียมฟิล์มบางของพอลิเมอร์ซึ่งจะอยู่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดโลหะสองขั้ว โดยมีชั้นของอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) เป็นขั้วอิเล็กโทรดโปร่งแสงซึ่งสามารถให้แสงที่กำเนิดขึ้นภายในไดโอดส่องผ่านออกมาได้ ส่วนอีกขั้วหนึ่งมักจะเป็นอะลูมิเนียม แมกนีเซียม หรือ แคลเซียม [22] โดยแสดงแผนภาพได้ดังรูปที่ 3 ซึ่งแม้ว่าวิธีขึ้นรูปอุปกรณ์ไดโอดเปล่งแสงที่ใช้ในปัจจุบัน ซึ่งได้แก่วิธีการสปินโค้ตติ้ง (spin-coating) หรือ วิธีการพิมพ์ (printing) จะสามารถผลิตฟิล์มบางระดับนาโนเมตรและเป็นเนื้อเดียวกัน [23] ได้ แต่อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้เทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเพื่อเตรียมฟิล์มบางที่มีความโปร่งแสง และศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ขึ้นรูปอุปกรณ์แปลงแสงแบบใหม่ก็เป็นสิ่งที่น่าสนใจอย่างยิ่ง



รูปที่ 3. แผนภาพของไดโอดเปล่งแสง

การขึ้นรูปเส้นใย MEH-PPV ด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตนั้น มีรายงานแล้วว่าสามารถทำได้ [21] แต่เนื่องจากพอลิเมอร์ชนิดนี้ มีราคาสูง ทำให้การหาสถานะการขึ้นรูปเส้นใยด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตโดยใช้ MEH-PPV ที่ผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นแต่ยังคงไว้ซึ่งสมบัติอิเล็กทรอนิกส์เปล่งแสงนั้น เป็นงานที่น่าศึกษา ซึ่งจากการศึกษาพอลิเมอร์หลายชนิดพบว่าพอลิสไตรีน (polystyrene, PS) เป็นพอลิเมอร์ที่เหมาะสม เพราะมีราคาถูก มีความเข้ากันได้กับ MEH-PPV และสามารถปั่นเป็นเส้นใยได้ง่าย นอกจากนี้สำหรับการใช้งานเส้นใยพอลิเมอร์ที่สามารถเปล่งแสงได้นั้น สีของแสงที่เปล่งออกมามีความสำคัญยิ่ง ซึ่งปกติแล้ว MEH-PPV จะเปล่งแสงในช่วงสีแดง-ส้ม ซึ่งต่างจาก PPV ที่ให้แสงในช่วงสีเหลือง ทั้งนี้เนื่องมาจากหมู่แทนที่ของ MEH-PPV ทำให้เกิดการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ต่างจาก PPV ดังนั้นนอกจากการขึ้นรูปเส้นใยจากพอลิเมอร์ผสม PS/MEH-PPV แล้ว การหาวิธีการที่ง่ายแต่สามารถเปลี่ยนสีเส้นใย PS/MEH-PPV ให้มีสีเหลืองเหมือน PPV ที่ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้โดยตรงนั้นเป็นสิ่งที่ท้าทายเป็นอย่างยิ่ง

งานวิจัยนี้ทำขึ้นเพื่อศึกษาการปั่นเส้นใยขนาดเล็กจาก MEH-PPV ผสมกับพอลิสไตรีน โดยศึกษาผลของสัดส่วนการผสม ความเข้มข้นของสารละลาย ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการเตรียมเส้นใย ระบบของตัวทำละลาย ศึกษาผลของการเติมเกลืออินทรีย์และระยะเวลาในการเติมในสารละลาย ที่มีต่อสัณฐานของเส้นใย สี และโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่เปลี่ยนไป นอกจากนี้ยังศึกษาถึงสมบัติการเรืองแสง (photoluminescence) ของสารละลายที่ใช้ อัตราส่วนปริมาตรของตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรฟอร์ม (chloroform) และ 1,2-ไดคลอโรอีเทนที่แตกต่างกัน รวมถึงเส้นใยอิเล็กโตรสปินที่เตรียมได้ด้วย

การสำรวจแนวความคิดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นกระบวนการขึ้นรูปเส้นใยโดยอาศัยศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมระหว่างอุปกรณ์บรรจูละลายพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์หลอมเหลวกับฉากรองรับ ทำให้เกิดเป็นสายของพอลิเมอร์ที่มีประจุขึ้น สายของพอลิเมอร์นี้จะเคลื่อนไปยังอุปกรณ์รองรับ และเมื่อตัวทำละลายระเหยออกไปหรือพอลิเมอร์เกิดการเย็นตัวก็จะเหลือเป็นเส้นใยขนาดเล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงหลายนาโนเมตรจนถึงไมโครเมตรขึ้น กระบวนการนี้ริเริ่มขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ.1934 โดยฟอร์มฮัลส์ (Anton Formhals) [24] จากนั้นก็มีการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่เน้นศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์ปั่นที่เตรียมได้ ซึ่งงานที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

ทอร์เรส (Torres) และคณะ [25] ได้ศึกษาการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตโดยผสมพอลิสไตรีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างกันคือ 280000, 28000 และ 2430 ในตัวทำละลายเตตระไฮโดรฟูแรน (THF) ที่ความเข้มข้น 15% โดยน้ำหนัก และพบว่าน้ำหนักโมเลกุลของพอลิสไตรีนมีผลต่อลักษณะการเกิดเส้นใยที่ดี ในขณะที่การผสมพอลิสไตรีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างกันจะได้เส้นใยที่มีเม็ดปมลักษณะดอกเห็ดที่มีผิวเป็นรูพรุน

ยาง (Yang) และคณะ [26] ได้ศึกษาสมบัติเชิงความหนืดของพอลิสไตรีนในตัวทำละลายผสมโทลูอีนและไซโคลเฮกเซนที่อุณหภูมิต่างกัน และพบว่าความหนืดแท้จริง (intrinsic viscosity) ของพอลิสไตรีนในตัวทำละลายผสมเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของโทลูอีนเพิ่มขึ้น หรือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์-ตัวทำละลายเพิ่มขึ้นที่สภาวะดังกล่าว

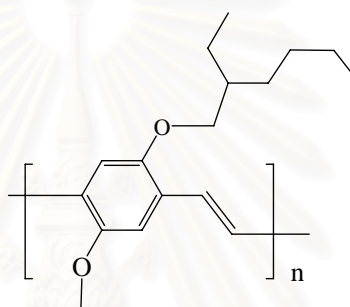
ลี (Lee) และคณะ [27] ได้ศึกษาผลของตัวทำละลาย THF และ N,N-ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (DMF) ที่มีต่อการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตของพอลิไวนิลคลอไรด์ พบว่าเมื่อใช้ THF จะได้เส้นใยที่มีการกระจายตัวของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมาก ในช่วง 500 นาโนเมตร ถึง 6 ไมโครเมตร ในขณะที่ใช้ DMF จะได้เส้นใยที่มีการกระจายตัวของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยน้อย โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 200 นาโนเมตร อีกทั้งได้ศึกษาผลของตัวทำละลายผสม THF/DMF (อัตราส่วนโดยปริมาตร 80/20 - 20/80) ซึ่งได้เส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร

MEH-PPV และการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตจาก MEH-PPV

พอลิเมอร์นำไฟฟ้า (conjugated or conductive polymer) เป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่มีลักษณะเด่นหลายประการ เช่น มีน้ำหนักเบา ราคาถูก ขึ้นรูปเป็นอุปกรณ์ต่างๆ ได้ง่าย นอกจากนี้ยังมีสมบัติทางไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ แม่เหล็ก และสมบัติการให้แสงเช่นเดียวกับโลหะหรือสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าด้วย พอลิ(พารา-ฟีนิลีนไวนิลีน) (poly(p-phenylene vinylene), PPV) เป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความสนใจในการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อใช้เป็นไดโอดเปล่งแสง (light-emitting diode) ทรานซิสเตอร์แบบฟิล์มบาง (field effect transistor) และอุปกรณ์ให้แสงเนื่องจากกระแสไฟฟ้าจากปฏิกิริยาเคมี (photovoltaic device) [28] เนื่องจากพอลิเมอร์ชนิดนี้มีข้อดีหลายประการ เช่น มีสมบัติการเปล่งแสงที่ดีแม้มีปริมาณน้อย และนำไฟฟ้าได้ดีหลังกระบวนการ

โด๊ป (doping process) เป็นต้น [29] แต่อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์แบบสายโซ่ตรงของ PPV นั้นมีข้อจำกัดประการบางที่สำคัญ กล่าวคือ ไม่ละลายในตัวทำละลายใดเลย ไม่เสถียรในอากาศ และขึ้นรูปเพื่อนำไปใช้งานได้ยาก [30]

การเติมหมู่แทนที่หรือสายโซ่กิ่งแบบแอลคิลหรือแอลคอกซี (alkyl or alkoxy substituent) ลงบนวงแหวนอโรมาติกของสายโซ่ PPV เป็นวิธีการที่มักใช้ในการเพิ่มสมบัติการละลายของ PPV โดยทั่วไปจะเรียกพอลิเมอร์ที่ได้รับการปรับปรุงดังกล่าวว่าเป็นอนุพันธ์ของ PPV ซึ่งหนึ่งในอนุพันธ์ที่ได้รับความนิยมมากที่สุดก็คือ พอลิ(2-เมธอกซี, 5-(2'-เอธิลเฮกซิลอ็อกซี)-พารา-ฟีนิลีน ไวนิลีน) (poly(2-methoxy-5-(2'-ethylhexyloxy)-1,4-phenylene vinylene), MEH-PPV) เนื่องจากพอลิเมอร์ชนิดนี้สามารถแก้ไขข้อจำกัดของ PPV ได้ โครงสร้างของพอลิเมอร์ดังกล่าวได้แสดงไว้ในรูปที่ 4



รูปที่ 4. โครงสร้างของ MEH-PPV

สำหรับการขึ้นรูปเส้นใย MEH-PPV ด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตนั้นมีรายงานว่าสามารถทำได้แล้ว โดยใช้ 1,2-ไดคลอโรอีเทน (1,2-dichloroethane) เป็นตัวทำละลาย ที่ความเข้มข้นในช่วง 7-10% (w/v) โดย MEH-PPV ที่นำมาขึ้นรูปนี้มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 292000 และ 281000 และมีค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล (polydispersity) เท่ากับ 1.04 [21] นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าสามารถขึ้นรูปเส้นใยผสมผสานคอมโพสิตของ MEH-PPV กับวัสดุเลือกเฟ้นระดับโมเลกุล เอสบีเอ-15 (molecular sieve SBA-15) ด้วยการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตโดยใช้หลอดบรรจุสารละลายแบบคู่ได้ จากผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเส้นใยคอมโพสิตมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วงนาโนเมตรถึงไมครอน และให้สมบัติการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์ (fluorescence) แบบเลื่อนไปทางแสงช่วงความยาวคลื่นต่ำ (blue shift) เมื่อเปรียบเทียบกับ MEH-PPV ปกติ [21]

เอนูป (Anoop) และคณะ [31] ได้ศึกษาผลของการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลของ PPV ที่มีต่อประสิทธิภาพของไดโอดเปล่งแสง (LED) โดยศึกษากับ PPV และอนุพันธ์ของ PPV เช่น ไดแอลคอกซี ซับสติติว เพนตาเมอร์ (dialkoxy substituted pentamer) พบว่าเมื่อน้ำหนักโมเลกุลสูง จะมีช่องว่างพลังงานต่ำ ส่วนน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะมีช่องว่างพลังงานสูง และเมื่อใช้ PPV น้ำหนักโมเลกุลต่ำและมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลน้อยจะได้ประสิทธิภาพของไดโอดที่ดีกว่าเมื่อน้ำหนักโมเลกุลสูงและการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลมาก

วิธีการดำเนินงานวิจัย

วัสดุและสารเคมี

พอลิเมอร์ที่ใช้ในการเตรียมเส้นใยมี 2 ชนิด คือ เม็ดพลาสติกพอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) ($M_w \approx 3.0 \times 10^5$ Daltons) เกรดทั่วไป (general purpose grade) (Dow Chemical) และ พอลิ(2-เมทอกซี, 5-(2'-เอทิลเฮกซิลออกซี)-พารา-ฟีนิลีนไวนิลีน) (poly(2-methoxy-5-(2'-ethylhexyloxy)-1,4-phenylene vinylene), MEH-PPV) ที่ได้จากการสังเคราะห์ตามวิธีการในเอกสารอ้างอิง [19] ตัวทำละลายที่ใช้มี 3 ชนิด คือ คลอโรฟอร์ม (chloroform) (Carlo Erba, Italy) 1,2-ไดคลอโรอีเทน (1,2-dichloroethane) (Lab-Scan Asia, Thailand) และ เตตระไฮโดรฟูแรน (tetrahydrofuran, THF) (J.T.Baker, USA) ซึ่งสมบัติที่สำคัญของตัวทำละลายดังกล่าวแสดงไว้ในตารางที่ 1 ส่วนเกลืออินทรีย์ที่ใช้คือ ไพริเดเนียม ฟอर्मेट (pyridinium formate, PF) เข้มข้น 4 โมลาร์ (M) เตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างไพริดีน (pyridine) (Lab-Scan Asia, Thailand) และ กรดฟอर्मิก (formic acid) (Merck, England)

ตารางที่ 1. สมบัติที่สำคัญบางประการของตัวทำละลายที่ใช้ในงานวิจัย

ตัวทำละลาย	จุดเดือด (°C)	แรงตึงผิว (mN/m)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ไดโพลโมเมนต์ (Dipole moment) (debye)	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกซ์ (Dielectric constant)
คลอโรฟอร์ม	61.2	26.0	1.470	1.01	4.806
1,2-ไดคลอโรอีเทน	83.5	31.6	1.239	2.94	10.19
เตตระไฮโดรฟูแรน	66.0	24.4	0.875	1.63	7.60

วิธีการเตรียมสารละลายเพื่อการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

สำหรับการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อขนาด และลักษณะของเส้นใยอิเล็กโตรสปิน สารละลายที่ใช้ในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตสามารถเตรียมได้จากระบบตัวทำละลายเดี่ยวหรือตัวทำละลายผสมก็ได้ ในระบบตัวทำละลายเดี่ยวสารละลายผสมของ PS/MEH-PPV เตรียมขึ้นโดยใช้ตัวทำละลายเป็นคลอโรฟอร์มหรือ 1,2-ไดคลอโรอีเทน ที่ความเข้มข้น 8.5%, 16% และ 23.5% (w/v) (สัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่าง PS และ MEH-PPV คือ 7.5:1, 15:1 และ 22.5:1 ตามลำดับ) จากนั้นศึกษาผลของความเข้มข้นของเกลือที่เติมลงในสารละลายพอลิเมอร์ที่มีผลต่อเส้นใยที่เตรียมได้ โดยเตรียมสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% (w/v) ในคลอโรฟอร์มแล้วเติม PF ลงในสารละลายนั้น โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของ PF ตั้งแต่ 2 ถึง 10% (v/v) ส่วนในระบบตัวทำละลายผสม สารละลายของ PS/MEH-PPV เตรียมขึ้นโดยใช้ตัวทำละลายเป็นคลอโรฟอร์มผสมกับ 1,2-ไดคลอโรอีเทนด้วยอัตราส่วน 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100 โดยปริมาตร ที่ความเข้มข้นพอลิเมอร์ 8.5% (w/v) แล้วเติม PF ลงไป 8% (v/v) จากนั้นนำสารละลายที่เตรียมได้ไปขึ้นรูปเป็นเส้นใยโดยใช้กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต โดยศึกษาผลของการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าในการเตรียมตั้งแต่ 12 ถึง 21 kV ขณะที่ระยะระหว่างหัวเข็มกับอุปกรณ์รองรับคงที่ที่ 10 เซนติเมตร และระยะเวลาในการเตรียมเส้นใยคงที่ที่ 1 นาที

สำหรับการศึกษาผลของการเติมเกลืออินทรีย์ (PF) ที่มีต่อสัณฐาน สี และ สมบัติการเปล่งแสงของเส้นใยอิเล็กโตรสปิน PS/MEH-PPV นั้น สารละลายที่ใช้ในการทดลองเตรียมขึ้นจากพอลิเมอร์ผสม PS/MEH-PPV ที่ความเข้มข้น 8.5% (w/v) (สัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่าง PS และ MEH-PPV คือ 7.5:1) สารละลายที่มีการเติมเกลือ นั้นใช้ปริมาณ PF ที่เติมคิดเป็น 8% (v/v) ของสารละลายทั้งหมด แล้วใช้แท่งแม่เหล็กคนสารละลายและทิ้งไว้ที่เวลาที่แตกต่างกันเป็น 10 นาที 12 ชั่วโมง และ 1 เดือน ก่อนนำไปขึ้นรูปเป็นเส้นใยเพื่อศึกษาผลของเวลาหลังการเติมเกลือที่มีผลต่อสัณฐาน สี และ สมบัติการเปล่งแสงของเส้นใยอิเล็กโตรส การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตจากสารละลายดังกล่าวใช้ศักย์ไฟฟ้าในช่วง 7.5 ถึง 15 kV ที่ระยะระหว่างหัวเข็มกับอุปกรณ์รองรับคงที่ที่ 10 เซนติเมตร และระยะเวลาในการเตรียมเส้นใยคงที่ที่ 1 นาที

กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

การจัดเตรียมอุปกรณ์ในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ก็เหมือนกับกระบวนการที่ได้บรรยายไว้ในที่อื่นๆ [9-11] ดังแสดงในรูปที่ 5 เริ่มจากนำสารละลายที่เตรียมได้เติมลงในหลอดฉีดยาขนาด 3 มิลลิลิตร หรือ 5 มิลลิลิตร ที่ติดอยู่กับเข็มฉีดยาสแตนเลสปลายตัดตรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.91 มิลลิเมตร (gauge 20 needle) แล้วนำแผ่นอลูมิเนียม (aluminum sheet) มาวางที่ตำแหน่งห่างจากปลายเข็ม 10 เซนติเมตรเพื่อใช้เป็นแผ่นรองรับเส้นใย อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเส้นใยอิเล็กโตรสปิน คือ เครื่องให้ศักย์ไฟฟ้าพลังงานสูง (Gamma High Voltage Research D-ES30PN/M692) ที่ใช้สร้างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างปลายเข็มกับแผ่นรองรับเส้นใย โดยให้ปลายเข็มต่อกับขั้วบวกจากเครื่องให้ศักย์ไฟฟ้า และ แผ่นรองรับต่อกับสายดิน

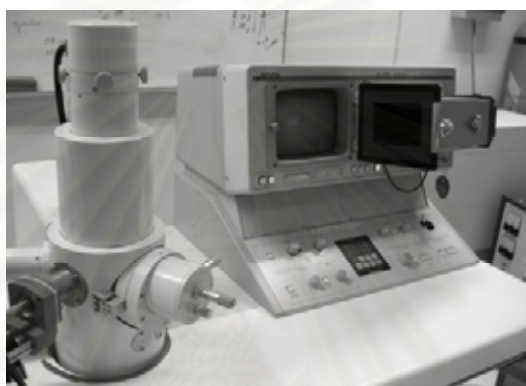


รูปที่ 5. การจัดอุปกรณ์ในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

การตรวจสอบลักษณะสัณฐานเส้นใยอิเล็กโตรสปิน

การตรวจสอบลักษณะสัณฐาน (morphology) ของเส้นใยอิเล็กโตรสปิน PS/MEH-PPV ทำได้โดยนำตัวอย่างมาเคลือบผิวด้วยทองชั้นบางๆ ก่อนโดยใช้เครื่องเคลือบทอง (sputtering device) (JEOL JFC-1100E)

จากนั้นนำไปส่องและถ่ายภาพเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) (JEOL JSM-5200) ดังแสดงในรูปที่ 6 ภาพถ่าย SEM ที่ได้นี้สามารถนำมาใช้หาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง จำนวนปมต่อหน่วยพื้นที่ และจำนวนเส้นใยต่อหน่วยพื้นที่ของเส้นใยอิเล็กโตรสปินได้ กล่าวคือ การรายงานค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยสำหรับหนึ่งชุดตัวอย่างใช้การคำนวณจากผลการวัดทั้งหมด 50 ครั้ง การรายงานค่าจำนวนปมต่อหน่วยพื้นที่เฉลี่ย (หรือ อาจเรียกว่าความหนาแน่นของปม) ของเส้นใยอิเล็กโตรสปินที่มีปม (beaded fiber) ใช้การคำนวณจากภาพ SEM ที่กำลังขยาย 100 เท่า ส่วนการรายงานค่าจำนวนเส้นใยต่อหน่วยพื้นที่เฉลี่ย (หรือ อาจเรียกว่าความหนาแน่นของเส้นใย) ใช้การคำนวณจากภาพ SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 6. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (JEOL JSM-5200)

การทดสอบคุณสมบัติของสารละลายและเส้นใยอิเล็กโตรสปิน

การหาค่าแรงตึงผิวของสารละลายที่เตรียมขึ้นทำได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์รูปร่างของหยดสารละลาย (KRÜSS DSA10-Mk2 drop-shape analyzer) ที่อุณหภูมิ 25°C ส่วนหมู่โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยอิเล็กโตรสปินจาก PS/MEH-PPV เส้นใย PS และ MEH-PPV ที่สังเคราะห์ได้ รวมทั้งเกลือ PF นั้นใช้การวิเคราะห์ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรสโคป (Thermo Nicolet Nexus 670 Fourier-transformed infrared spectroscopy, FT-IR) สี และลักษณะของเส้นใยบันทึกไว้ด้วยภาพถ่ายจากกล้องดิจิทัล (Fujifilm S304 digital camera) อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ภายใต้ความร้อนใช้การวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน (Perkin Elmer Pyris Diamond Thermogravimetric-Differential Thermal Analysis, TG-DTA) สูดทำยสมบัติการเปล่งแสง (photoluminescence) ของสารละลาย PS/MEH-PPV ในระบบตัวทำละลายผสมของคลอโรฟอร์มและ 1,2-ไดคลอโรอีเทนที่สัดส่วนปริมาตรต่างๆ รวมทั้งเส้นใยอิเล็กโตรสปินที่เตรียมได้ ใช้การวิเคราะห์ด้วยสเปกโตรมิเตอร์ที่ใช้งานรังสีช่วงคลื่นอัลตราไวโอเล็ต (Ocean Optics USB 2000 UV-Vis spectrometer) โดยฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตความยาวคลื่น 385 ± 10 nm ด้วยหลอดขนาด 4 วัตต์ (4 W UV lamp) ไปยังตัวอย่างที่ต้องการทดสอบและตรวจสอบความยาวคลื่นของแสงที่เปล่งออกมาจากตัวอย่างนั้น

ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย

1. การศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อขนาด และลักษณะของเส้นใยอิเล็กโตรสปิน

1.1. ระบบตัวทำละลายเดี่ยว

ในการทดลองนี้เลือกใช้ตัวทำละลาย 3 ชนิดคือ คลอโรฟอร์ม 1,2-ไดคลอโรอีเทน และ เตตระไฮโดรฟูแรน เนื่องจากตัวทำละลายเหล่านี้สามารถละลายทั้ง PS และ MEH-PPV ได้อย่างสมบูรณ์ในช่วงของความเข้มข้น ซึ่งสมบัติที่สำคัญบางประการของตัวทำละลายดังกล่าวแสดงไว้ใน [ตารางที่ 1](#)

1.1.1. ผลของศักย์ไฟฟ้า และตัวทำละลาย ที่มีต่อขนาดและลักษณะของเส้นใยอิเล็กโตรสปิน PS/ MEH-PPV

การศึกษาถึงผลของศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการเตรียมเส้นใยที่มีต่อลักษณะลักษณะ (morphology) และขนาดของเส้นใยอิเล็กโตรสปินนั้น ใช้สารละลาย PS/ MEH-PPV ความเข้มข้น 23.5% (w/v) (สัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่าง PS และ MEH-PPV เท่ากับ 22.5:1) ทั้งที่ละลายในคลอโรฟอร์มและ 1,2-ไดคลอโรอีเทนเป็นสารละลายตัวอย่างในการเตรียมเส้นใยอิเล็กโตรสปิน เหตุที่ไม่ใช้สารละลายจากเตตระไฮโดรฟูแรนเนื่องจากไม่สามารถเตรียมสารละลายความเข้มข้น 23.5% (w/v) จากตัวทำละลายดังกล่าวได้ (พอลิเมอร์ละลายได้ไม่สมบูรณ์ถึงแม้จะทิ้งให้ละลายถึง 7 วันแล้วก็ตาม) ผลการทดลองค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยที่เตรียมได้แสดงไว้ใน [ตารางที่ 2](#) ซึ่งจะเห็นว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยอิเล็กโตรสปินมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น สิ่งที่น่าสนใจก็คือเส้นใย PS/MEH-PPV จากสารละลายที่ละลายด้วยคลอโรฟอร์มมีขนาดใหญ่กว่าเส้นใยที่เตรียมจากสารละลายที่ละลายด้วย 1,2-ไดคลอโรอีเทนประมาณ 2 เท่า (ผลการทดลองแสดงไว้ใน [ตารางที่ 2](#)) ทั้งนี้ น่าจะเป็นผลเนื่องมาจากค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant) ของ 1,2-ไดคลอโรอีเทนที่มากกว่าคลอโรฟอร์ม ทำให้แรงผลักทางไฟฟ้า (Coulombic repulsion force) (แรงดึงดูดของพอลิเมอร์ระหว่างกระบวนการปั่นเส้นใย) และแรงไฟฟ้าสถิต (แรงที่ทำให้ลำพอลิเมอร์เคลื่อนจากปลายหลอดไปยังฉากรับเส้นใย) ในสารละลายที่ละลายด้วย 1,2-ไดคลอโรอีเทนมีค่ามากกว่าในคลอโรฟอร์มนั่นเอง [32] อย่างไรก็ตามจำนวนของปม (bead) ที่พบในเส้นใย PS/MEH-PPV ที่เตรียมจากสารละลายที่ละลายด้วย 1,2-ไดคลอโรอีเทนก็มีมากกว่าสารละลายที่ละลายด้วยคลอโรฟอร์มด้วยเช่นกัน ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจาก 1,2-ไดคลอโรอีเทนมีค่าแรงดึงดูดสูงกว่านั่นเอง (ผลการทดลองแสดงไว้ใน [ตารางที่ 3](#))

ตารางที่ 2. เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 23.5% (w/v) (สัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่าง PS และ MEH-PPV เท่ากับ 22.5:1) ในตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและ 1,2-ไดคลอโรอีเทน

ตัวทำละลาย	ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้เตรียมเส้นใย (kV)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (μm)
คลอโรฟอร์ม	12	2.31 ± 0.66
	15	2.43 ± 0.83
	18	2.39 ± 0.65
	21	5.11 ± 0.68
1,2-ไดคลอโรอีเทน	12	1.25 ± 0.37
	15	1.30 ± 0.52
	18	1.62 ± 0.60
	21	1.66 ± 0.58

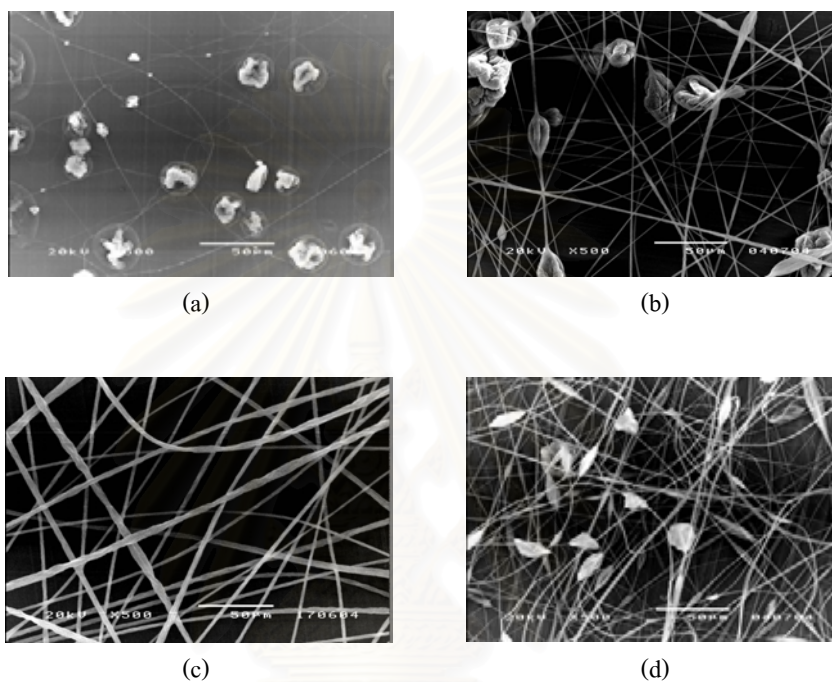
ตารางที่ 3. ค่าแรงตึงผิวของสารละลาย PS/MEH-PPV ที่ละลายด้วยตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม 1,2-ไดคลอโรอีเทน และเตตระไฮโดรฟิวแรนที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของ PS/MEH-PPV [% (w/v)]	คลอโรฟอร์ม	1,2-ไดคลอโรอีเทน	เตตระไฮโดรฟิวแรน
23.5	20.13	24.52	n/a
16	19.21	24.41	26.41
8.5 [เติม PF 8% (v/v)]	19.14	24.21	27.42

1.1.2. ผลของความเข้มข้น และตัวทำละลาย ที่มีต่อขนาดและลักษณะของเส้นใยอิเล็กโตรสปิน PS/ MEH-PPV

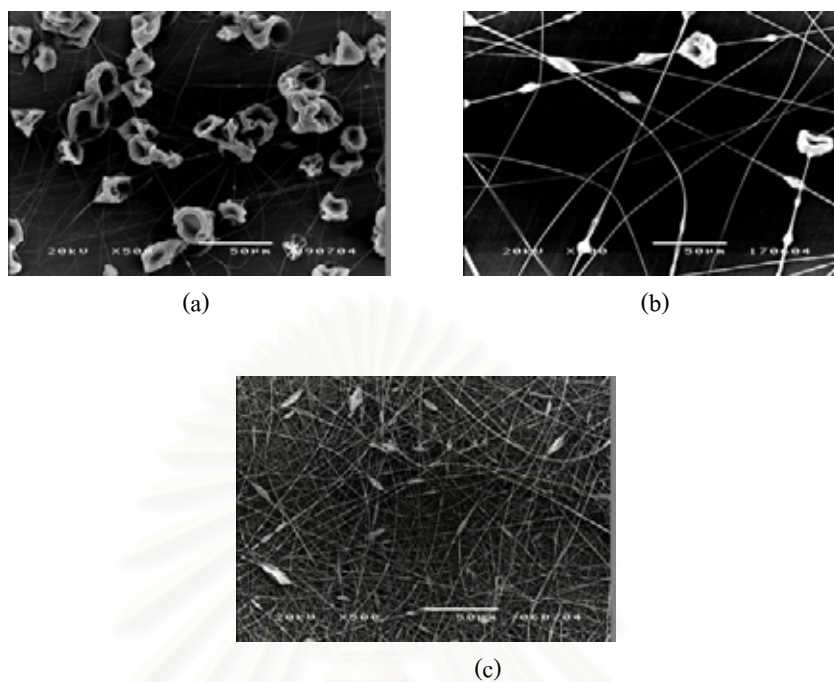
รูปที่ 7 8 และ 9 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ของเส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลาย PS/MEH-PPV ในคลอโรฟอร์ม 1,2-ไดคลอโรอีเทน และเตตระไฮโดรฟิวแรน ตามลำดับ ซึ่งแต่ละภาพจะแสดงเส้นใยจากการทดลองขึ้นรูปเส้นใยด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV และระยะในการเก็บเส้นใย 10 cm ที่สัดส่วนพอลิเมอร์ผสมและความเข้มข้นต่างๆ กัน จากการทดลองจะเห็นว่าถ้าไม่สนใจผลเนื่องมาจากตัวทำละลาย ความเข้มข้นของ PS/MEH-PPV มีผลอย่างมากกับการเกิดเป็นเส้นใยอิเล็กโตรสปิน กล่าวคือ ถ้าความเข้มข้นของ PS/MEH-PPV มีค่าต่ำจะทำให้ได้เส้นใยอิเล็กโตรสปินเป็นแบบเส้นใยมีปม (beaded fiber) คือ มีปมของพอลิเมอร์และมีเส้นใยเรียบขนาดเล็กต่อระหว่างปมพอลิเมอร์เหล่านั้น ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากแรงวิสโคอีลาสติก (viscoelastic force) ของสารละลายพอลิเมอร์ที่มีความเข้มข้นต่ำนั้นมีค่าน้อยเกินไปเมื่อเปรียบเทียบกับแรงผลักระหว่างประจุไฟฟ้า [32] ซึ่งจากการทดลองทั้งหมดพบว่ามีเพียงสารละลาย PS/MEH-PPV ในคลอโรฟอร์มเท่านั้นที่ให้เส้นใยอิเล็กโตรสปินผิวเรียบและไม่มีปมเลย (**ดูรูปที่ 7(c)** เปรียบเทียบกับ 2(b)) ส่วนที่ความเข้มข้น 16% (w/v) มีเพียงสารละลาย PS/MEH-PPV ในคลอโรฟอร์ม

เท่านั้นที่ให้เส้นใยมีปมที่มีความหนาแน่นของปมต่ำ ขณะที่สารละลาย PS/MEH-PPV ในเตตระไฮโดรฟูเวรนให้ปมพอลิเมอร์ได้ดีพอๆ กับเส้นใยมีปมที่มีความหนาแน่นของปมสูง (ดูรูปที่ 7(b) 8(a) และ 9(a)) ทั้งนี้ผลการทดลองดังกล่าวสัมพันธ์กับค่าแรงดึงผิวที่สูงขึ้นของคลอโรฟอร์ม 1,2-ไดคลอโรอีเทน และเตตระไฮโดรฟูเวรนตามลำดับ (ดูตารางที่ 3)

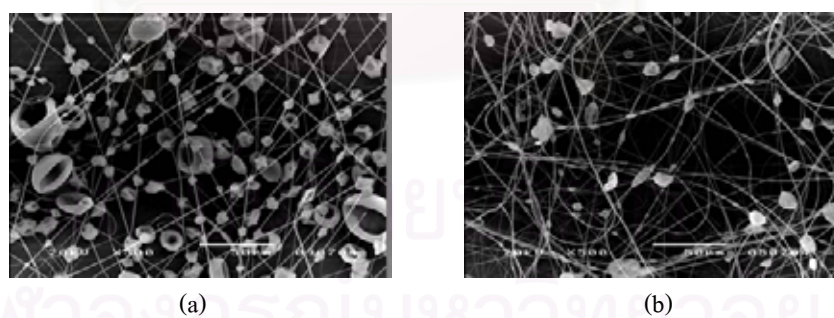


รูปที่ 7. ภาพ SEM ของเส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลาย PS/MEH-PPV ในคลอโรฟอร์มที่ความเข้มข้นต่างๆ (a) 8.5% (w/v) (b) 16% (w/v) และ (c) 23.5% (w/v) ส่วน (d) เส้นใยจากสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% (w/v) ที่เติมเกลือ PF ลงไป 8% (v/v) โดยสภาวะที่ใช้เตรียมเส้นใย คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV และระยะในการเก็บเส้นใย 10 cm

ที่ความเข้มข้น 8.5% (w/v) มีเพียงสารละลาย PS/MEH-PPV ในคลอโรฟอร์มเท่านั้นที่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้ (ดูรูปที่ 7(a)) ซึ่งเส้นใยนั้นเป็นเส้นใยมีปมที่มีเส้นใยขนาดเล็กกับปมพอลิเมอร์ขนาดใหญ่ปะปนกัน ส่วนสารละลาย PS/MEH-PPV ใน 1,2-ไดคลอโรอีเทนและเตตระไฮโดรฟูเวรนที่ความเข้มข้นดังกล่าวให้เพียงแคंपมพอลิเมอร์เท่านั้น ไม่มีเส้นใยเกิดขึ้น (ซึ่งไม่ได้นำมาแสดงในที่นี้) ผลการทดลองดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยค่าแรงดึงผิวของสารละลายนั่นเอง อย่างไรก็ตามถึงแม้ที่ความเข้มข้นนี้จะให้ปมของพอลิเมอร์มากกว่าเส้นใย แต่ก็ยังเป็นค่าความเข้มข้นที่น่าสนใจศึกษา เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นอื่นที่ใช้ในการศึกษาทั้งหมด ความเข้มข้น 8.5% (w/v) นี้ถือว่ามีสัดส่วนของ MEH-PPV ต่อ PS สูงที่สุด จึงเป็นงานที่ทำท้าวว่าทำอย่างไรให้สามารถขึ้นรูปเส้นใยจากสารละลาย PS/MEH-PPV ที่ความเข้มข้นนี้ได้



รูปที่ 8. ภาพ SEM ของเส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลาย PS/MEH-PPV ใน 1,2-ไดคลอโรอีเทนที่ความเข้มข้นต่างๆ (a) 16% (w/v) และ (b) 23.5% (w/v) ส่วน (c) เส้นใยจากสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% (w/v) ที่เติมเกลือ PF ลงไป 8% (v/v) โดยสภาวะที่ใช้เตรียมเส้นใย คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV และระยะเวลาในการเก็บเส้นใย 10 cm



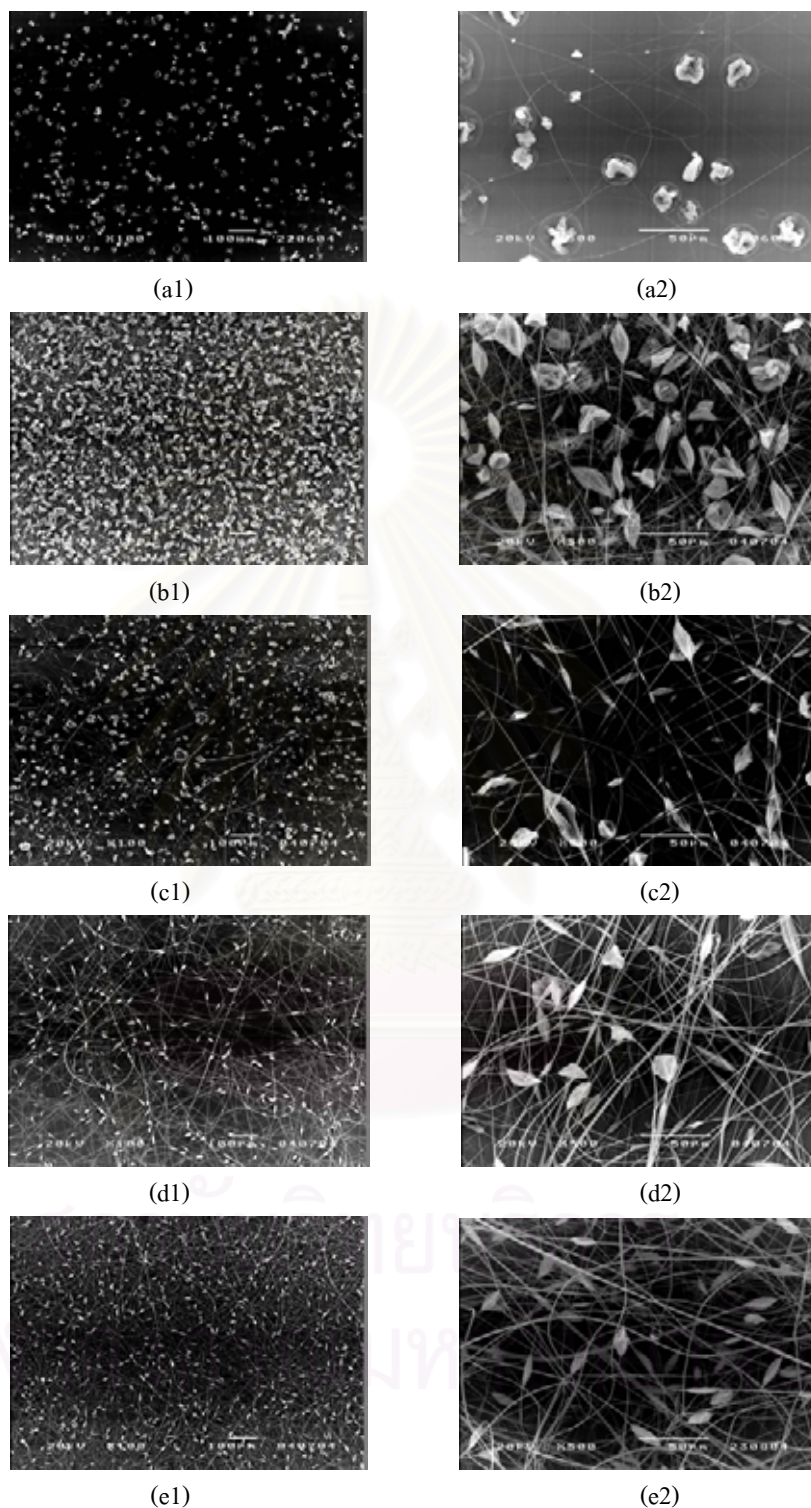
รูปที่ 9. ภาพ SEM ของเส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลาย PS/MEH-PPV ในเตตระไฮโดรฟิวแรนที่ความเข้มข้น (a) 16% (w/v) ส่วน (b) เส้นใยจากสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% (w/v) ที่เติมเกลือ PF ลงไป 8% (v/v) โดยสภาวะที่ใช้เตรียมเส้นใย คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV และระยะเวลาในการเก็บเส้นใย 10 cm

1.1.3. ผลของการเติมเกลืออินทรีย์ลงในสารละลายที่มีต่อขนาดและลักษณะของเส้นใยอิเล็กโตรสปิน PS/ MEH-PPV

จากความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตในปัจจุบันที่ว่า การเติมเกลือลงในสารละลายสามารถเพิ่มความสามารถในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (electrospinnability) ได้ [33, 34] ดังนั้นการเติมเกลือบางชนิดลงในสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% (w/v) ก็น่าจะช่วยเพิ่มความสามารถในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตได้เช่นกัน ซึ่งเกลือที่สามารถนำมาใช้ในการทดลองนี้มีข้อจำกัดที่ว่าต้องเป็นเกลือที่ละลายในสารอินทรีย์ได้เพราะตัวทำละลายที่ใช้ในการทดลองเป็นตัวทำละลายอินทรีย์ เกลือชนิดหนึ่งที่เหมาะสมก็คือเกลือไพริดีเนียม ฟอर्मेट (pyridinium formate) หรือเกลือ PF เนื่องจากเป็นเกลืออินทรีย์ที่เตรียมได้ง่าย ซึ่งผลการทดลองการเติมเกลือดังกล่าวก็เป็นไปตามที่คาดไว้ กล่าวคือ การเติมเกลือ PF ลงในสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% (w/v) นั้นจะเพิ่มความสามารถในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตขึ้น จากการปั่นเส้นใยที่ได้ปมของพอลิเมอร์เพียงอย่างเดียวก็สามารถขึ้นรูปเส้นใยมีปมได้มากขึ้น (ดูรูปที่ 7(d) 8(c) และ 9(b) ซึ่งแสดงผลการขึ้นรูปเส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลายที่ละลายในคลอโรฟอร์ม 1,2-ไดคลอโรอีเทน และ เตตระไฮโดรฟิวแรน ตามลำดับ)

1.1.4. ผลของปริมาณเกลืออินทรีย์ที่เติมลงในสารละลายที่มีต่อขนาดและลักษณะของเส้นใยอิเล็กโตรสปิน PS/ MEH-PPV

เนื่องจากผลการทดลองจากตัวทำละลายทั้งสามชนิด สารละลาย PS/MEH-PPV ในคลอโรฟอร์มความเข้มข้น 8.5% (w/v) ให้ผลการปั่นเส้นใยเป็นปมพอลิเมอร์และเส้นใยผิวเรียบขนาดเล็กผสมกัน จึงใช้สารละลายดังกล่าวเป็นสารละลายตัวอย่างในการศึกษาผลของปริมาณเกลือ PF ที่เติมลงในสารละลาย ซึ่งผลของการปั่นเส้นใยด้วยสารละลายดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 10 และตารางที่ 4 กล่าวคือ รูปที่ 10 แสดงภาพ SEM ที่สองกำลังขยาย ส่วนตารางที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณของตัวอย่างดังกล่าว ในการทดลองนี้ใช้การเติมเกลือ PF ลงในสารละลายทำให้เกลือมีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0 ถึง 10% (v/v) ซึ่งพบว่า การเติมเกลือ PF ลงไปในสารละลายเพียงแค่ 2% (v/v) เท่านั้น ผลการเตรียมเส้นใยก็เปลี่ยนจากปมพอลิเมอร์และเส้นใยผิวเรียบขนาดเล็กกลายเป็นเส้นใยมีปมจำนวนมากเกิดขึ้น และขนาดของปมก็ใหญ่ขึ้นด้วย (ขนาดปมประมาณ 5 ถึง 30 μm) จากนั้นถ้าเติมเกลือมากขึ้นเป็น 4% (v/v) จะไม่ส่งผลกับขนาดของปมที่เกิดขึ้นมากนัก แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเกลือต่อไปอีกจนถึง 8 และ 10% (v/v) ปมที่ได้จากการเตรียมเส้นใยจะมีขนาดเล็กลง (ขนาดปมประมาณ 4 ถึง 10 μm) และไม่เพียงแต่ขนาดของปมเท่านั้นรูปร่างของปมก็เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณเกลือ PF ที่เติมลงไปด้วย โดยปมจะมีรูปร่างคล้ายกระสวย (spindle-like) มากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ PF ที่คิดหลังจากเติมลงในสารละลายแล้วมีมากขึ้น (ดูรูปที่ 10)



รูปที่ 10. ภาพ SEM ของเส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลาย PS/MEH-PPV ในคลอโรฟอร์มความเข้มข้น 8.5% (w/v) ที่เติมเกลือ PF ลงไปในปริมาณที่ต่างกัน (a) 0 (b) 2 (c) 4 (d) 8 และ (e) 10% (v/v) ตามลำดับ ซึ่ง “1” และ “2” ของแต่ละรูปหมายถึงกำลังขยาย 100 และ 500 เท่าตามลำดับ โดยสภาวะที่ใช้เตรียมเส้นใย คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV และระยะในการเก็บเส้นใย 10 cm

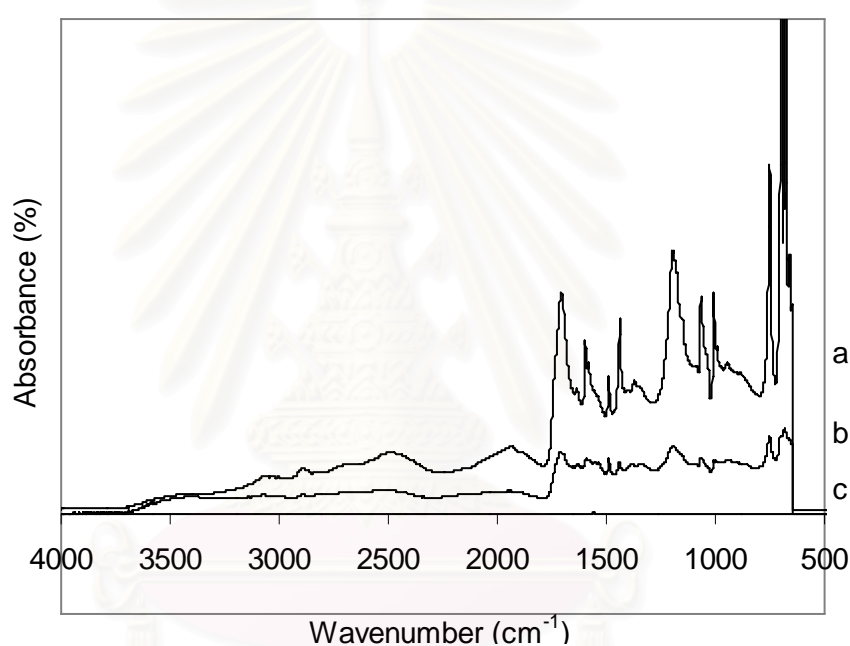
การวิเคราะห์ผลของการเติมเกลือ PF โดยการวิเคราะห์เชิงปริมาณพบว่าค่าความหนาแน่นของปมจะลดลงเมื่อปริมาณของเกลือ PF สูงขึ้น (ความเข้มข้นของ PF ระหว่าง 0 ถึง 8% (v/v)) แต่ถ้าเพิ่มปริมาณ PF สูงขึ้นไปอีกจนถึง 10% (v/v) ความหนาแน่นของปมจะกลับมากขึ้นอีกครั้ง ส่วนความหนาแน่นของเส้นใยจะมีแนวโน้มตรงกันข้าม คือ ความหนาแน่นของเส้นใยมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณ PF ที่สูงขึ้น ซึ่งเราสามารถนำค่าความหนาแน่นทั้งสองค่านี้มาเปรียบเทียบกับกัน โดยการหาร (normalization) กลายเป็นค่าสัดส่วนเส้นใยต่อปมเพื่อใช้เป็นมาตรฐานสำหรับบอกความสามารถในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตได้ ซึ่งพบว่าสัดส่วนเส้นใยต่อปมดังกล่าวนั้นมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณของเกลือ PF มีค่าสูงขึ้น จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าการเติมเกลือ PF ลงในสารละลาย PS/MEH-PPV นั้น ไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเท่านั้น แต่ยังช่วยเพิ่มปริมาณของพอลิเมอร์ที่ผ่านออกจากปลายเข็ม (mass throughput) หรือเพิ่มปริมาณเส้นใยที่เตรียมได้อีกด้วย (ที่สรุปเช่นนี้ได้เพราะทุกการทดลองใช้ระยะเวลาการเตรียมเส้นใยเท่ากัน คือ 1 นาที) ผลการทดลองดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่าการเติมเกลือ PF นั้นช่วยเพิ่มการนำไฟฟ้าของสารละลายทำให้แรงจากไฟฟ้าสถิตที่ช่วยดึงเส้นใยจากปลายเข็มไปยังฉากรับเส้นใยนั้นมีมากขึ้น และผลของปริมาณพอลิเมอร์ที่ผ่านออกจากปลายเข็มที่มากขึ้นนี้เป็นเหตุผลที่สามารถนำไปอธิบายได้ว่าทำไมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยอิเล็กโตรสปินจึงสูงขึ้นเมื่อปริมาณเกลือ PF ที่เติมลงไปมีมากขึ้น (ดูตารางที่ 4) [34]

ตารางที่ 4. ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณของเส้นใยอิเล็กโตรสปินที่เตรียมจากสารละลาย PS/MEH-PPV ในคลอโรฟอร์ม ความเข้มข้น 8.5% (w/v) (สัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่าง PS และ MEH-PPV เท่ากับ 7.5:1) ซึ่งเติมเกลือ PF ลงไปด้วยปริมาณที่แตกต่างกันในช่วง 2 ถึง 10% (v/v)

ปริมาณเกลือ PF [% (v/v)]	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย (μm)	ความหนาแน่นของปม [$\text{ปม}/(\text{cm})^2$]	ช่วงขนาดของปม (μm)	ความหนาแน่นของเส้นใย [$\text{เส้น}/(\text{cm})^2$]	สัดส่วนเส้นใยต่อปม
2	0.62 ± 0.26	9.19×10^4	5 - 30	0.97×10^6	10.5
4	0.59 ± 0.28	3.97×10^4	5 - 30	0.93×10^6	23.4
8	0.68 ± 0.34	2.54×10^4	4 - 10	1.52×10^6	59.8
10	0.85 ± 0.37	4.05×10^4	4 - 10	2.50×10^6	61.7

การเติมเกลืออินทรีย์ลงในสารละลายพอลิเมอร์เพื่อช่วยลดหรือป้องกันการเกิดปมระหว่างการขึ้นรูปเส้นใยด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตนั้นมีการศึกษาและรายงานไว้แล้ว [33, 34] แต่ดังที่กล่าวไปแล้วว่าความสามารถในการละลายของเกลืออินทรีย์ในตัวทำละลายอินทรีย์นั้นมีข้อจำกัด ดังนั้นเกลืออินทรีย์อย่าง PF จึงเป็นทางเลือกที่ดีที่สุดของการทดลองนี้ ซึ่งนอกจากเหตุผลข้างต้นแล้ว เกลือ PF ยังมีข้อดีอีกอย่างหนึ่งคือ เกลือชนิดนี้เป็นเกลือที่ระเหยได้จึงสามารถระเหยออกจากเส้นใยอย่างสมบูรณ์ไปพร้อมๆ กับการระเหยของตัวทำละลายได้ เพื่อศึกษาสมบัติดังกล่าวของเกลือ PF จึงมีการทดลองหาหมู่โครงสร้างทางเคมีของ PF ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (infrared spectroscopy) โดยใช้เซลล์บรรจุตัวอย่างชนิดของเหลวในการทดสอบและสภาวะที่ใช้ทดสอบคือที่อุณหภูมิห้อง ผลการทดลองดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 11 ซึ่งจะเห็นได้

ว่าหลังจากทิ้งไว้ 15 นาทีจะไม่มีสเปกตรัมเดิมของ PF เกิดขึ้นเลยแสดงให้เห็นว่าเกลือ PF สามารถระเหยเป็นไอได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งการที่เกลือ PF และตัวทำละลายที่ใช้ละลาย PS/MEH-PPV สามารถระเหยได้อย่างสมบูรณ์นั้น แสดงว่าเส้นใยอิเล็กโตรสปินที่เตรียมได้จากสารละลายที่มีการเติม PF ลงไปยังคงสมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพ (สมบัติที่ไม่เกี่ยวกับโครงสร้างทางเคมี) บางประการไว้เช่นเดิม ไม่มีปัญหาเรื่องของสารเคมีที่ค้างค้ำอยู่ในเส้นใย ดังรูปที่ 12 ซึ่งแสดงภาพสเปกตรัม IR ของเส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% (w/v) ในคลอโรฟอร์ม ทั้งที่เติมเกลือ PF ลงไป 8% (v/v) และที่ไม่เติมเกลือใดๆ จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าสเปกตรัมของเส้นใยจากสารละลายทั้งที่เติมและไม่เติม PF นั้นเหมือนกันมาก และไม่มีเส้นสเปกตรัมของ PF เกิดขึ้นในเส้นใยที่เตรียมจากสารละลายที่มี PF เลย

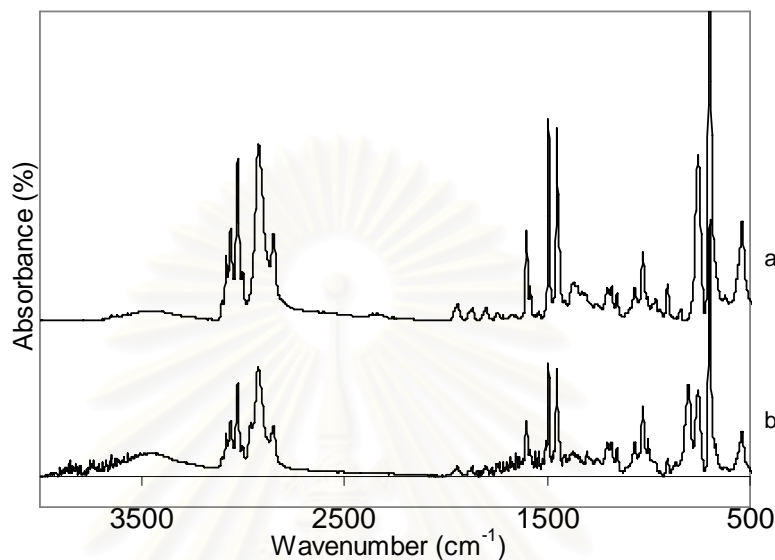


รูปที่ 11. สเปกตรัม IR ของเกลือ PF หลังทิ้งไว้ในเซลล์บรรจุของเหลวที่ปล่อยให้เกลือดังกล่าวสัมผัสอากาศที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา (a) 2 (b) 10 และ (c) 15 นาที ตามลำดับ

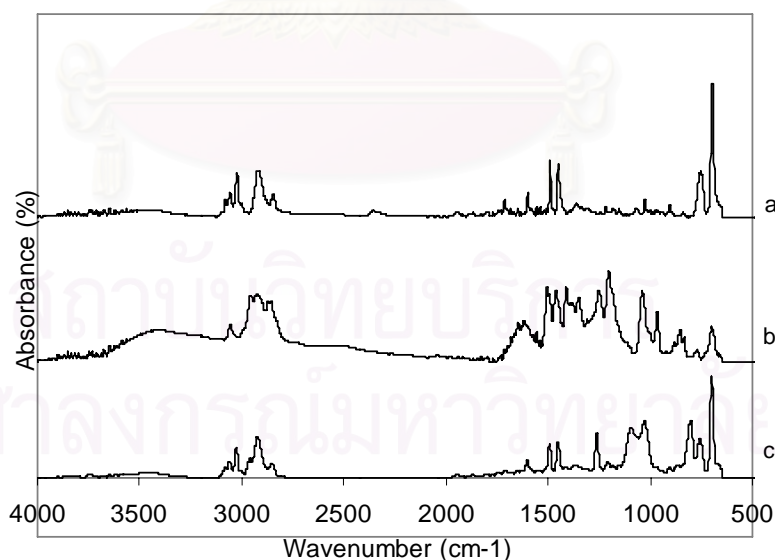
1.1.5. การทดสอบเพื่อยืนยันว่ามี MEH-PPV ผสมอยู่ในเส้นใยอิเล็กโตรสปินที่เตรียมได้

คำถามที่สำคัญอีกข้อของการทดลองนี้ก็คือเส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลาย PS/MEH-PPV ที่เตรียมได้นั้นมี MEH-PPV ผสมอยู่จริงหรือไม่ เพื่อการหาคำตอบของคำถามดังกล่าวจึงมีการตรวจสอบเส้นใยที่เตรียมได้ด้วย IR สเปกโตรสโคป แล้วนำสเปกตรัมของเส้นใยที่เตรียมจากสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 23.5% (w/v) ในคลอโรฟอร์มกับสเปกตรัมของเส้นใยที่เตรียมจากสารละลาย PS ที่ความเข้มข้นเท่ากันและตัวทำละลายเดียวกัน และสเปกตรัมของพอลิเมอร์ MEH-PPV บริสุทธิ์เพียงอย่างเดียวมาเปรียบเทียบกัน ดังแสดงในรูปที่ 13 และตำแหน่งเส้นสเปกตรัม IR ที่สำคัญบางเส้นของเส้นใยอิเล็กโตรสปิน PS/MEH-PPV เปรียบเทียบกับ MEH-PPV บริสุทธิ์นั้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 5 ซึ่งตำแหน่งเส้นกราฟที่สำคัญที่แสดงถึงหมู่โครงสร้างของ MEH-PPV คือที่ 1027 และ 1261 cm^{-1} จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าเส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลาย

PS/MEH-PPV นั้นมี MEH-PPV ผสมอยู่จริง ถึงแม้ว่าสารละลายที่นำมาวิเคราะห์นั้นจะมี MEH-PPV อยู่ในสัดส่วนที่น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายความเข้มข้นอื่นๆ ที่ใช้ในการทดลองก็ตาม



รูปที่ 12. สเปกตรัม IR ของเส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% (w/v) ในคลอโรฟอร์ม (a) ไม่เติมเกลือ PF (b) เติมเกลือ PF ลงไป 8% (v/v)



รูปที่ 13. สเปกตรัม IR ของ (a) เส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลาย PS ความเข้มข้น 23.5% (w/v) ในคลอโรฟอร์ม (b) MEH-PPV บริสุทธิ์ และ (c) เส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 23.5% (w/v) ในคลอโรฟอร์ม โดยสภาวะที่ใช้เตรียมเส้นใย คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV และระยะในการเก็บเส้นใย 10 cm

ตารางที่ 5. ผลการวิเคราะห์สเปกตรัม IR ของเส้นใยโพลีเอทิลีนไตรสปีน PS/MEH-PPV ที่เตรียมจากสารละลายความเข้มข้น 23.5% (w/v) ในคลอโรฟอร์มเปรียบเทียบกับ MEH-PPV บริสุทธิ์

เส้นกราฟที่พบใน MEH-PPV บริสุทธิ์ [21] (cm^{-1})	เส้นกราฟที่พบในเส้นใยโพลีเอทิลีน ไตรสปีน PS/MEH-PPV (cm^{-1})	โครงสร้างที่สื่อถึง
2960	2961	การยืดแบบไม่สมมาตรของพันธะ C-H ใน -CH ₃
2931	2923	การยืดแบบไม่สมมาตรของพันธะ C-H ใน -CH ₂
2871/2873	2850	การยืดแบบสมมาตรของพันธะ C-H ใน -CH ₂
1691	1601	การยืดของพันธะ C=C
1463	1451	การงอแบบไม่สมมาตรของพันธะ C-H ใน -CH ₃
1255	1261	การยืดแบบไม่สมมาตรของโครงสร้างเอริล-แอลคิล อีเทอร์ (aryl-alkyl ether) (C-O-C)
1205	1207	การยืดของวงแหวนและการเสียรูปของพันธะ C-H
1043	1027	การยืดแบบสมมาตรของโครงสร้างเอริล-แอลคิล อีเทอร์ (aryl-alkyl ether) (C-O-C)

1.2. ระบบตัวทำละลายผสม

1.2.1. ผลของสัดส่วนตัวทำละลายที่มีผลต่อขนาดและสัญญาณของเส้นใยโพลีเอทิลีนไตรสปีน PS/MEH-PPV

เพื่อศึกษาถึงผลของระบบตัวทำละลายผสมที่มีต่อขนาด รูปร่าง และลักษณะของเส้นใยโพลีเอทิลีนไตรสปีน ในการทดลองนี้เลือกตัวทำละลายเป็นคลอโรฟอร์มและ 1,2-ไดคลอโรอีเทนเนื่องจากความสามารถในการการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตของสารละลายจากตัวทำละลายแต่ละตัว โดยสัดส่วนตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรฟอร์มและ 1,2-ไดคลอโรอีเทนนั้นเท่ากับ 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100 ที่ความเข้มข้นของ PS/MEH-PPV เท่ากับ 8.5% (w/v) และเติมเกลือ PF ลงไปคิดเป็นความเข้มข้นเท่ากับ 8% (v/v) ซึ่งผลการทดลองพบว่าแรงดึงผิวของสารละลายที่เตรียมในคลอโรฟอร์มที่มีค่าประมาณ 19.1 mN/m และค่าดังกล่าวจะสูงขึ้นเมื่อสัดส่วนของ 1,2-ไดคลอโรอีเทนมากขึ้น (จนถึงค่าแรงดึงผิวของสารละลายที่เตรียมใน 1,2-ไดคลอโรอีเทนที่เท่ากับประมาณ 24.2 mN/m) (ดูตารางที่ 6)

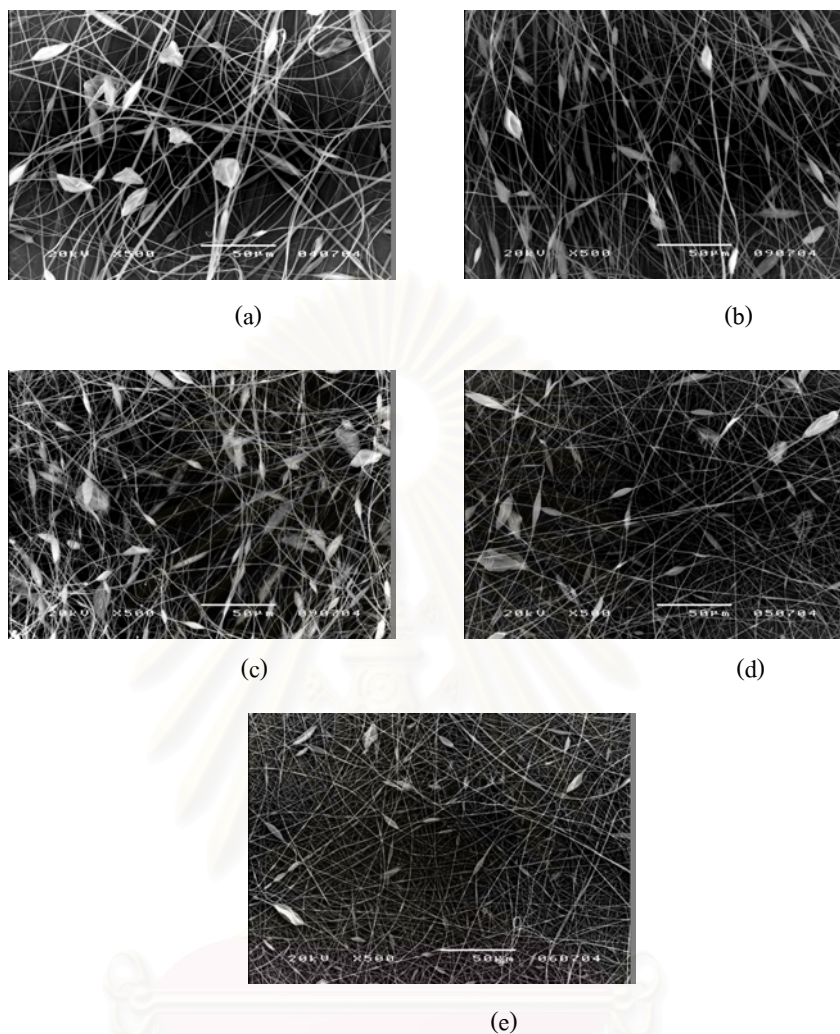
ตารางที่ 6. ค่าแรงดึงผิวของสารละลาย PS/MEH-PPV ในตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรฟอร์มและ 1,2-ไดคลอโรอีเทนที่ผสมกันด้วยสัดส่วนปริมาตรที่ต่างกัน โดยสารละลายแต่ละชนิดนั้นมีการเติมเกลือ PF ลงไปด้วยจนได้ความเข้มข้นของ PF เท่ากับ 8% (v/v)

สัดส่วนคลอโรฟอร์มต่อ 1,2-ไดคลอโรอีเทน	ค่าแรงดึงผิว (mN/m)
100/0	19.1
75/25	19.2
50/50	21.0
25/75	23.2
0/100	24.2

รูปที่ 14 แสดงภาพ SEM ของเส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลาย PS/MEH-PPV ในตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรฟอร์มและ 1,2-ไดคลอโรอีเทนที่ความเข้มข้น 8.5% (w/v) ส่วนการวิเคราะห์ผลเชิงปริมาณจากภาพดังกล่าวนี้ได้สรุปไว้ใน**ตารางที่ 7** กล่าวคือเส้นใยอิเล็กโตรสปินที่เตรียมจากสารละลายในคลอโรฟอร์มนั้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 0.68 μm และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยนี้จะมีขนาดลดลงเรื่อยๆ เมื่อสัดส่วนของ 1,2-ไดคลอโรอีเทนมีค่าสูงขึ้น จนถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่เตรียมจากสารละลายใน 1,2-ไดคลอโรอีเทนที่เท่ากับประมาณ 0.30 μm นอกจากนี้ยังพบว่าความหนาแน่นของปมที่พบมากที่สุดจะเกิดในสารละลายผสมที่มีสัดส่วนการผสม 50/50 (v/v) ส่วนความหนาแน่นของเส้นใยนั้นมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อสัดส่วนของ 1,2-ไดคลอโรอีเทนมีค่าสูงขึ้น

ตารางที่ 7. ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณของเส้นใยอิเล็กโตรสปินที่เตรียมจากสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% (w/v) (สัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่าง PS และ MEH-PPV เท่ากับ 7.5:1) ในตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรฟอร์มและ 1,2-ไดคลอโรอีเทนที่สัดส่วนการผสมต่างๆ กัน และเติมเกลือ PF ลงไป 8% (v/v)

สัดส่วนคลอโรฟอร์มต่อ 1,2-ไดคลอโรอีเทน	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (μm)	ความหนาแน่นของปม [$\text{ปม}/(\text{cm})^2$]	ความหนาแน่นของเส้นใย [$\text{เส้น}/(\text{cm})^2$]	สัดส่วนเส้นใยต่อปม
100/0	0.68 ± 0.34	2.54×10^4	1.52×10^6	59.8
75/25	0.56 ± 0.15	2.84×10^4	1.71×10^6	60.2
50/50	0.38 ± 0.12	4.26×10^4	2.61×10^6	61.3
25/75	0.34 ± 0.07	3.55×10^4	2.95×10^6	83.1
0/100	0.30 ± 0.08	2.70×10^4	3.68×10^6	136.3



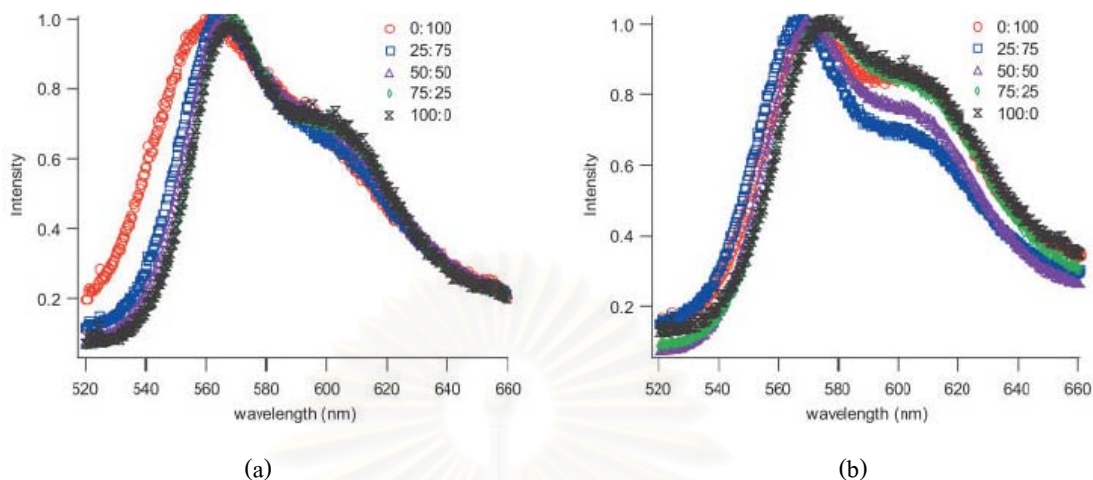
รูปที่ 14. ภาพ SEM ของเส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% (w/v) ในตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรฟอร์มและ 1,2-ไดคลอโรอีเทนที่สัดส่วนการผสมต่างๆ กัน (a) 100/0, (b) 75/25, (c) 50/50, (d) 25/75 และ (e) 0/100 โดยสารละลายแต่ละชนิดนั้นมีการเติมเกลือ PF ลงไปด้วยจนได้ความเข้มข้นของ PF เท่ากับ 8% (v/v) สภาวะที่ใช้เตรียมเส้นใย คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV และระยะในการเก็บเส้นใย 10 cm

เมื่อนำความหนาแน่นของเส้นใยและความหนาแน่นของปมมาเปรียบเทียบกันจะพบว่าค่าสัดส่วนเส้นใยต่อปมที่เตรียมได้มีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณตัวทำละลาย 1,2-ไดคลอโรอีเทนมีค่าสูงขึ้น ทำให้สรุปได้ว่าการเติมตัวทำละลาย 1,2-ไดคลอโรอีเทนเพื่อใช้เป็นตัวทำละลายผสมนั้นช่วยเพิ่มความสามารถในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตได้ ซึ่งเป็นผลการทดลองที่ไม่สอดคล้องกับค่าแรงดึงผิวของสารละลาย เนื่องจากค่าแรงดึงผิวมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณของ 1,2-ไดคลอโรอีเทนมีค่าสูงขึ้น (ดูตารางที่ 6) ดังนั้นความสามารถในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตก็น่าจะลดลงเพราะปริมาณปมที่เพิ่มขึ้น (ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าแรงดึงผิวมีผลต่อความหนาแน่นของปมในช่วงแรกของ

การเพิ่มสัดส่วนของ 1,2-ไดคลอโรอีเทน ทำให้ความหนาแน่นดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นจนสัดส่วนปริมาตรของตัวทำละลายมีค่าเท่ากับ 50/50) แต่ผลการทดลองกลับพบว่าความสามารถในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตกลับเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนของ 1,2-ไดคลอโรอีเทน (ดูจากสัดส่วนเส้นใยต่อปม) ผลการทดลองนี้น่าจะเป็นผลเนื่องมาจากการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของสารละลาย ซึ่งเป็นผลโดยตรงจากค่าคงที่ไดอิเล็กตริกซ์ของ 1,2-ไดคลอโรอีเทนที่สูงกว่าคลอโรฟอร์มนั่นเอง (ดูตารางที่ 1)

1.2.2. สมบัติการเปล่งแสงของสารละลายและเส้นใยอิเล็กโตรสปิน PS/MEH-PPV

สมบัติอีกประการของสารละลายและเส้นใยที่สำคัญและจำเป็นต้องมีการศึกษา คือ สมบัติการเปล่งแสง ซึ่งสเปกตรัมการเปล่งแสง (photoluminescence spectra) ของสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% (w/v) ในตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์มกับ 1,2-ไดคลอโรอีเทนที่สัดส่วนปริมาตรต่างๆ กัน และเส้นใยที่เตรียมได้จากสารละลายเหล่านั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 15 จะเห็นได้ว่าสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย PS/MEH-PPV นั้นมีการเลื่อนตำแหน่งจุดสูงสุดและไหล่ (shoulder) ของกราฟที่ความยาวคลื่นประมาณ 605 nm เมื่อปริมาณของ 1,2-ไดคลอโรอีเทนมีค่าสูงขึ้น ส่วนสเปกตรัมการเปล่งแสงของเส้นใยที่เตรียมได้นั้นแตกต่างจากสเปกตรัมของสารละลาย กล่าวคือ การเปล่งแสงของเส้นใยจะเลื่อนไปทางช่วงความยาวคลื่นที่สูงกว่า (red shift) เมื่อเปรียบเทียบกับสารละลาย ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ศึกษาสมบัติการเปล่งแสงของเส้นใยอิเล็กโตรสปินของ MEH-PPV บริสุทธิ์ ที่พบการเลื่อนไปทางช่วงความยาวคลื่นที่สูงกว่าเช่นเดียวกัน [21] แต่การเปล่งแสงของเส้นใยอิเล็กโตรสปินนั้นไม่มีแนวโน้มการเลื่อนตำแหน่งจุดสูงสุดและไหล่ของกราฟตามการเพิ่มของปริมาณตัวทำละลาย 1,2-ไดคลอโรอีเทนเหมือนในสารละลาย ทั้งนี้ น่าจะเป็นผลเนื่องมาจากโมเลกุลของพอลิเมอร์ในแต่ละตัวอย่างนั้นผ่านการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่แตกต่างกันระหว่างการเตรียมเส้นใยด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ซึ่งรายละเอียดในเรื่องดังกล่าวนี้ควรจะมีการศึกษาต่อไป



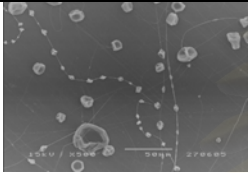
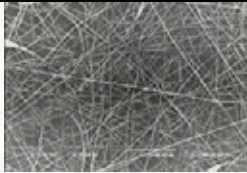
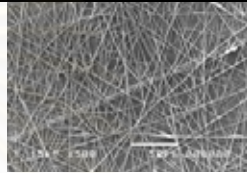
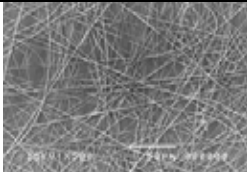
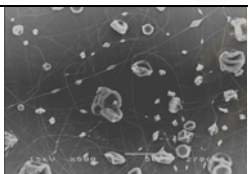
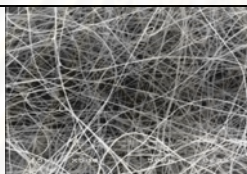
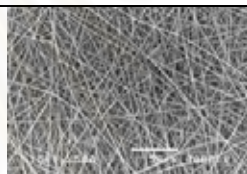
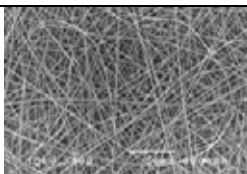
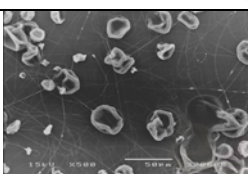
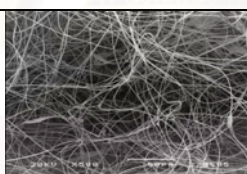
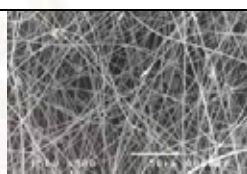
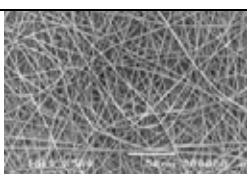
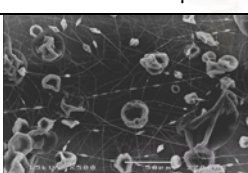
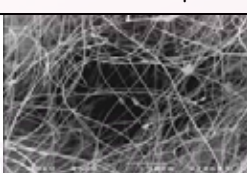
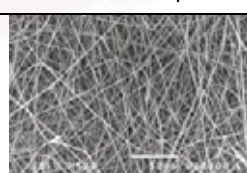
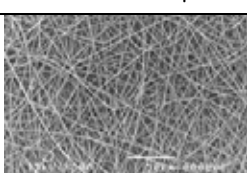
รูปที่ 15. สเปกตรัมการเปล่งแสง (photoluminescence spectra) ของ (a) สารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% (w/v) ในตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์มกับ 1,2-ไดคลอโรอีเทนที่สัดส่วนปริมาตรต่างๆ กัน โดยมีการเติมเกลือ PF ลงไป 8% (v/v) PF (b) สเปกตรัมที่ได้จากเส้นใยอิเล็กโตรสปิน PS/MEH-PPV จากสารละลายดังกล่าว

2. การศึกษาผลของการเติมเกลืออินทรีย์ (PF) ที่มีต่อสัญญาณ สี และ สมบัติการเปล่งแสงของเส้นใยอิเล็กโตรสปิน

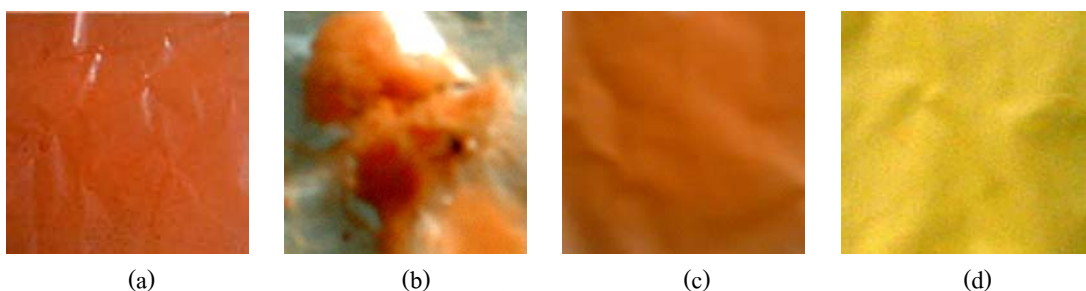
ผลการทดลองจากการศึกษาผลของการเติมเกลืออินทรีย์ (PF) ที่มีต่อสัญญาณ สี และ สมบัติการเปล่งแสงของเส้นใยอิเล็กโตรสปินนั้นแสดงไว้ใน **ตารางที่ 8** และ **รูปที่ 16** ซึ่ง **ตารางที่ 8** แสดงภาพถ่าย SEM และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยอิเล็กโตรสปินที่เตรียมด้วยการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่ค่าศักย์ไฟฟ้าต่างๆ จากสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% (w/v) ใน 1,2-ไดคลอโรอีเทนทั้งที่ไม่เติมเกลือ และมีการเติมเกลือ PF คิดเป็น 8% (v/v) และที่เวลาหลังการเติมเกลือที่ต่างกัน ส่วนรูปถ่ายจุลทรรศน์ของเส้นใยอิเล็กโตรสปินที่เตรียมจากสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% ใน 1,2-ไดคลอโรอีเทนทั้งที่ไม่เติมเกลือ และมีการเติมเกลือ PF คิดเป็น 8% (v/v) ที่เวลาหลังการเติมเกลือก่อนนำไปเตรียมเส้นใยที่ต่างกันนั้นแสดงไว้ใน **รูปที่ 16** ซึ่งเส้นใยดังกล่าวเตรียมภายใต้ศักย์ไฟฟ้า 15 kV

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 8. ภาพ SEM (กำลังขยาย 500x สเกลบาร์ยาว 50 μm) และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยอิเล็กโตรสปีนจากสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% (w/v) (PS:MEH-PPV = 7.5:1) ใน 1,2-ไดคลอโรอีเทนทั้งที่ไม่เติมเกลือ และมีการเติมเกลือ PF คิดเป็น 8% (v/v) และที่เวลาหลังการเติมเกลือที่ต่างกัน โดยสภาวะที่ใช้เตรียมเส้นใย คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในช่วง 7.5-15 kV ระยะในการเก็บเส้นใย 10 cm และเวลาในการเก็บเส้นใย 1 นาที

	ไม่เติมเกลือ	หลังเติมเกลือ PF เป็นเวลา 10 นาที	หลังเติมเกลือ PF เป็นเวลา 12 ชั่วโมง	หลังเติมเกลือ PF เป็นเวลา 1 เดือน
7.5 kV	 $0.165 \pm 0.064 \mu\text{m}$	 $0.796 \pm 0.227 \mu\text{m}$	 $0.883 \pm 0.301 \mu\text{m}$	 $0.965 \pm 0.282 \mu\text{m}$
10 kV	 $0.172 \pm 0.082 \mu\text{m}$	 $0.856 \pm 0.278 \mu\text{m}$	 $0.895 \pm 315 \mu\text{m}$	 $1.085 \pm 322 \mu\text{m}$
12.5 kV	 $0.184 \pm 0.096 \mu\text{m}$	 $0.867 \pm 0.302 \mu\text{m}$	 $0.889 \pm 395 \mu\text{m}$	 $1.143 \pm 0.386 \mu\text{m}$
15 kV	 $0.202 \pm 0.124 \mu\text{m}$	 $0.943 \pm 0.382 \mu\text{m}$	 $0.961 \pm 359 \mu\text{m}$	 $1.190 \pm 0.384 \mu\text{m}$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 16. รูปถ่ายจุลทรรศน์ของเส้นใยอิเล็กโตรสปินที่เตรียมจากสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% ใน 1,2-ไดคลอโรอีเทนซึ่งที่ไม่เติมเกลือ (a) และมีการเติมเกลือ PF กิดเป็น 8% (v/v) (PS:MEH-PPV = 7.5:1) ที่เวลาหลังการเติมเกลือก่อนนำไปเตรียมเส้นใยที่ต่างกันเป็น 10 นาที 12 ชั่วโมง และ 1 เดือน (b-d ตามลำดับ) โดยสภาวะที่ใช้เตรียมเส้นใย คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV ระยะในการเก็บเส้นใย 10 cm และเวลาในการเก็บเส้นใย 1 นาที

2.1. ผลของศักย์ไฟฟ้าที่มีต่อขนาดและลักษณะของเส้นใยอิเล็กโตรสปิน PS/ MEH-PPV

สำหรับผลของศักย์ไฟฟ้าที่มีต่อการเตรียมเส้นใยอิเล็กโตรสปิน ผลการทดลองเป็นเช่นเดียวกับการศึกษาช่วงแรกที่กำลังกล่าวไปแล้วในตอนต้น กล่าวคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยมีค่าสูงขึ้นเมื่อค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการเตรียมเส้นใยมีค่าสูงขึ้น เป็นผลเนื่องมาจากการเพิ่มจำนวนประจุไฟฟ้าในลำพอลิเมอร์ระหว่างกระบวนการปั่นเส้นใย ทำให้แรงไฟฟ้าสถิตที่ใช้ดึงเส้นใยมีค่าสูงขึ้น การเพิ่มขึ้นของขนาดเส้นใยนี้สามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลที่เป็นไปได้สองประการ ประการแรกคือการเพิ่มขึ้นของอัตราการผลิตของพอลิเมอร์ที่สูงขึ้นเมื่อค่าแรงไฟฟ้าสถิตมีค่าสูงขึ้น อีกประการหนึ่งคือการลดลงของเส้นทางการเคลื่อนที่ของลำพอลิเมอร์จากปลายหัวฉีดถึงฉากรับพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของความเร็วในการเคลื่อนที่ของลำพอลิเมอร์ [34]

2.2. ผลของการเติมเกลือที่มีต่อขนาดและลักษณะของเส้นใยอิเล็กโตรสปิน PS/ MEH-PPV

ในการทดลองที่ไม่มีการเติมเกลือพบว่าการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตจากสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% (w/v) ใน 1,2-ไดคลอโรอีเทนนั้นได้ผลเช่นเดียวกับการทดลองที่กำลังกล่าวไปแล้วในตอนต้น คือไม่ให้เส้นใยอิเล็กโตรสปินที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสม่ำเสมอ แต่ได้เป็นเส้นใยที่มีปมที่มีขนาดของปมอยู่ในช่วง 4-30 μm เท่านั้น (ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยลักษณะดังกล่าวที่แสดงไว้ใน **ตารางที่ 8** วัดได้จากช่วงระหว่างปมที่มองเห็นเป็นเส้นใย) ส่วนการทดลองที่มีการเติมเกลือ PF ลงไปในสารละลายก่อนนำไปเตรียมเส้นใยโดยยังไม่คำนึงถึงเวลาในการเติมเกลือก่อนเตรียมเส้นใยนั้นพบว่าเส้นใยที่ได้จะเรียบและสม่ำเสมอมากขึ้น โดยมีปมให้เห็นในบางจุดเท่านั้น

เป็นที่ทราบกันแล้วว่าการเติมเกลือลงในสารละลายก่อนการนำไปเตรียมเส้นใยนั้นสามารถเพิ่มความสามารถในการเตรียมเส้นใยของสารละลายได้ [11, 33-35] ซึ่งจาก **ตารางที่ 8** (โดยไม่คำนึงถึงระยะเวลาการเติมเกลือก่อนการเตรียมเส้นใย) จะเห็นได้ชัดเจนว่าการเติมเกลือ PF นั้นช่วยเพิ่มความสามารถในการเตรียมเส้นใยได้อย่างมาก (กล่าวคือ จำนวนของปมพอลิเมอร์น้อยลง ขณะที่ขนาดและจำนวนของเส้นใยมีค่าสูงขึ้น) ซึ่ง

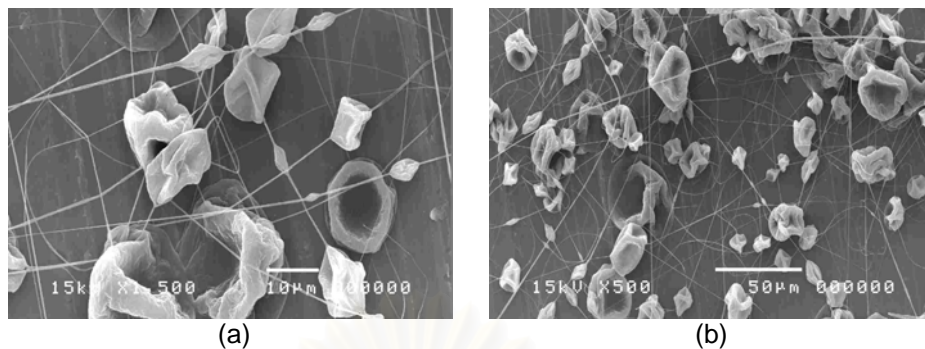
อธิบายได้จาก การเพิ่มขึ้นของจำนวนประจุไฟฟ้าในลำพอลิเมอร์จากสารละลายที่มีการเติมเกลือ ซึ่งส่งผลให้แรงไฟฟ้าสถิตที่ใช้ดึงเส้นใยมีค่าสูงขึ้น

2.3. ผลของเวลาหลังการเติมเกลือที่มีต่อขนาดและลักษณะของเส้นใยอิเล็กโตรสปิน PS/ MEH-PPV

การเตรียมเส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลาย PS/MEH-PPV ที่ทิ้งสารละลายไว้เพียง 10 นาทีหลังการเติมเกลือ PF นั้นให้เส้นใยที่ค่อนข้างเรียบ สม่ำเสมอ และมีปมน้อย แต่เส้นใยที่ได้ไม่رابไปกับฉากรับแต่เป็นเส้นใยที่มีลักษณะฟูขึ้นมา (ดูคอลัมน์ที่ 3 ของ **ตารางที่ 8** และ **รูปที่ 16b**) ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าหลังการเติมเกลือก่อนเตรียมเส้นใยที่ระยะเวลาสั้นๆ นั้น เกลือ PF ยังกระจายตัวในสารละลายได้ไม่ดีนัก เกลือ PF ส่วนใหญ่จะสะสมอยู่บริเวณผิวของเส้นใย ซึ่งทำให้ประจุของลำพอลิเมอร์ระหว่างการเตรียมเส้นใยในบางจุดนั้นมีจำนวนสูงขึ้น และประจุเหล่านี้เองที่จะคอยดันประจุแบบเดียวกันที่อยู่ในลำพอลิเมอร์สายอื่นๆ ที่กำลังจะตกลงมาบนฉากรองรับ ทำให้ได้เป็นเส้นใยที่มีลักษณะฟูดังกล่าว ซึ่งเมื่อนำเส้นใยที่ฟูนี้ไปตรวจสอบด้วย SEM ก็จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเส้นใยดังกล่าวเกิดจากการที่เส้นใยตบกันแบบหลวมๆ ซึ่งถ้าเวลาการเติมเกลือเพิ่มขึ้นจาก 10 นาทีเป็น 12 ชั่วโมงและ 1 เดือน จะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและจำนวนเส้นใยมีค่าสูงขึ้นขณะที่ปมพอลิเมอร์มีจำนวนลดลงตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประจุในลำพอลิเมอร์นั้นมีจำนวนมากขึ้น แต่เพราะเวลาการหลังเติมเกลือที่สูงขึ้นจึงทำให้การกระจายตัวของประจุดีขึ้น เส้นใยที่เตรียมได้จึงเป็นเส้นเรียบ ไม่มีลักษณะเส้นใยที่ฟู

เพื่อให้แน่ใจว่าเส้นใยที่มีลักษณะเป็นเส้นเรียบไม่มีปมนั้นเป็นผลเนื่องมาจากการเติมเกลือ PF ลงในสารละลายด้วย ไม่ใช่ผลของเวลาในการเก็บสารละลายก่อนนำมาปั่นเป็นเส้นใยเพียงอย่างเดียว การทดลองปั่นเส้นใยจากสารละลาย PS/MEH-PPV เข้มข้น 8 % (w/v) ที่เตรียมไว้นาน 1 เดือนโดยไม่มีการเติมเกลือจึงถูกนำมาศึกษา ซึ่งพบว่าผลการปั่นเส้นใยจากสารละลายดังกล่าวนี้ให้เส้นใยมีปมจำนวนเหมือนกับการปั่นเส้นใยจากสารละลายที่เตรียมใหม่ (เปรียบเทียบคอลัมน์ที่ 2 ของ **ตารางที่ 8** กับ **รูปที่ 17**) แสดงให้เห็นว่าการที่เส้นใยมีลักษณะเรียบขึ้นนั้นเป็นผลจากการเติม PF ลงไปในสารละลายไม่ใช่ผลของการทิ้งสารละลายไว้เป็นเวลานานเพียงอย่างเดียว และถึงแม้จะทิ้งสารละลายที่มีการเติมเกลือไว้นาน เกลือก็ยังคงช่วยให้การปั่นเส้นใยให้เป็นเส้นใยที่เรียบได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



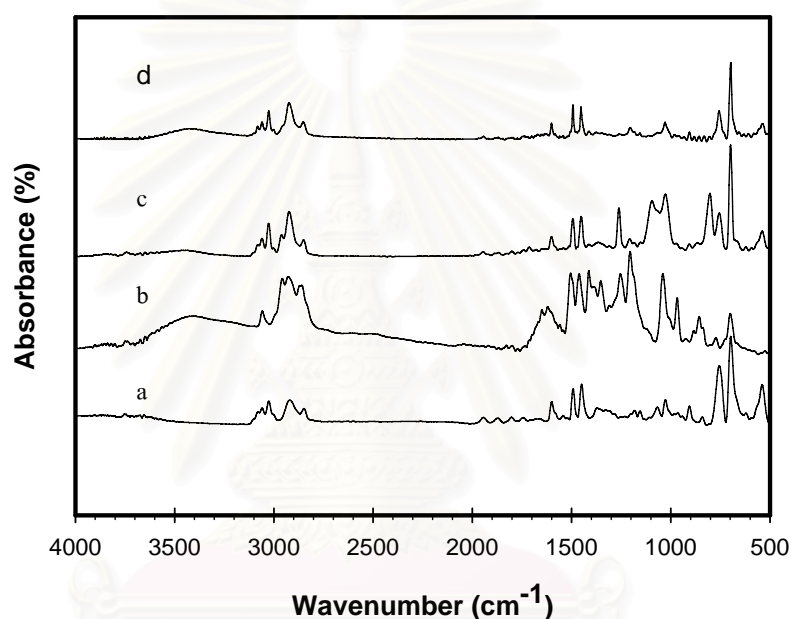
รูปที่ 17. ภาพ SEM ของเส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% (w/v) ในตัวทำละลาย 1,2-ไดคลอโรอีเทนที่เตรียมไว้ 1 เดือนก่อนนำไปปั่นเป็นเส้นใยโดยไม่มีการเติมเกลือ PF (a) ที่กำลังขยาย 500x (b) ที่กำลังขยาย 1,500x สภาวะที่ใช้เตรียมเส้นใย คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV ระยะในการเก็บเส้นใย 10 cm และเวลาในการเก็บเส้นใย 1 นาที เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่วัดจากภาพดังกล่าวเท่ากับ 0.206-0.284 μm

2.4. ผลของเวลาหลังการเติมเกลือ PF ที่มีต่อสี และ สมบัติการเปล่งแสงของเส้นใยอิเล็กโตรสปิน และการวิเคราะห์หาปริมาณหมู่แทนที่ MEH ที่ลดลง

ไม่เพียงแต่ขนาดและลักษณะของเส้นใยที่ได้ และความสามารถในการปั่นเป็นเส้นใยของสารละลาย PS/MEH-PPV เท่านั้น เกลือ PF ยังมีผลต่อการสีในการเปล่งแสงของเส้นใยด้วย จากรูปที่ 16 จะเห็นได้ว่าเส้นใยที่เตรียมจากสารละลายที่มีการเติมเกลือ PF แล้วทิ้งไว้ 1 เดือนก่อนนำไปปั่นเป็นเส้นใยนั้น ให้สีของเส้นใยเป็นสีเหลืองต่างจากเส้นใยที่เตรียมจากสภาวะอื่นที่ให้เส้นใยที่มีสีส้ม ซึ่งโดยปกติแล้วสีของเส้นใยควรจะเป็นสีส้มเท่านั้นเพราะเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าการเปล่งแสงของ MEH-PPV นั้นอยู่ในช่วงสีส้ม-แดง พอลิเมอร์ที่ให้แสงช่วงสีเหลือง-เขียว นั้นไม่ใช่ MEH-PPV แต่เป็น PPV ที่ยังไม่มีการเติมหมู่แทนที่ใดๆ ในสายโซ่ [36] ดังนั้นจากการทดลองที่พบว่าสามารถเตรียมเส้นใยสีเหลืองจากการปั่นเส้นใยด้วยสารละลาย PS/MEH-PPV ก็สันนิษฐานได้ว่าที่เวลาหลังการเติมเกลือ 1 เดือนนั้น PF อาจเข้าไปเปลี่ยนแปลงความยาวของพันธะคอนจูเกจ (พันธะเดี่ยวสลับพันธะคู่) ของ MEH-PPV หรือด้วยสมบัติความเป็นกรดของเกลือ PF ที่ให้ค่า pH เท่ากับ 4.5 จึงอาจไปทำให้โครงสร้างทางเคมีของ MEH-PPV เปลี่ยนแปลงไปโดยเกิดการลดหมู่แทนที่ของ MEH-PPV ลงก็เป็นได้ เพื่อพิสูจน์สมมุติฐานดังกล่าวจึงมีการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยอิเล็กโตรสปินสีเหลืองที่เตรียมจากสารละลาย PS/MEH-PPV เข้มข้น 8.5% (w/v) ใน 1,2-ไดคลอโรอีเทนที่มีการเติมเกลือ PF และทิ้งไว้ 1 เดือนด้วยเทคนิค FT-IR และนำไปเปรียบเทียบกับโครงสร้างของเส้นใยสีส้มที่เตรียมจากสารละลายชนิดเดียวกันแต่มีเวลาหลังการเติมเกลือเพียง 12 ชั่วโมง รวมทั้งนำไปเปรียบเทียบกับเม็ดพลาสติก PS และ MEH-PPV ด้วย

รูปที่ 18 แสดงสเปกตรัม IR ของเส้นใยอิเล็กโตรสปิน PS/MEH-PPV ส่วนตารางที่ 9 สรุปผลการวิเคราะห์สเปกตรัมดังกล่าวเฉพาะส่วนของโครงสร้าง MEH-PPV เท่านั้น ซึ่งถ้าพิจารณาจากรูปที่ 18 จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟของโครงสร้าง PS นั้นพบได้ในสเปกตรัม IR ของทุกเส้นใยตัวอย่าง แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของ PS นั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาหลังการเติมเกลือมีค่ามากขึ้น จากนั้นถ้าพิจารณาสเปกตรัม IR ของเส้นใยอิเล็ก

โตรสปีน PS/MEH-PPV ที่แสดงในรูปที่ 18 และดูตารางที่ 9 จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟในตำแหน่งที่แสดงโครงสร้างของ MEH-PPV ของเส้นใย PS/MEH-PPV ที่เตรียมจากสารละลายที่ทิ้งไว้หลังเติมเกลือ PF เป็นเวลา 1 เดือน (ที่ตำแหน่ง 1029 และ 1254 cm^{-1}) นั้นมีค่าลดลงเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับเส้นกราฟที่ตำแหน่งเดียวกันของเส้นใย PS/MEH-PPV ที่เตรียมจากสารละลายที่ทิ้งไว้หลังเติมเกลือเป็นเวลาเพียง 12 ชั่วโมง (ที่ตำแหน่ง 1027 และ 1261 cm^{-1}) ตำแหน่งเส้นกราฟดังกล่าวนี้แสดงถึงโครงสร้างพันธะแบบแอริล-แอลคิล อีเทอร์ (aryl-alkyl ether) (C-O-C) ของหมู่แทนที่ MEH ผลการทดลองดังกล่าวจึงชี้ให้เห็นว่าเมื่อเวลาหลังการเติมเกลือ PF เพิ่มขึ้นจาก 12 ชั่วโมงเป็น 1 เดือนจะทำให้เกิดการลดลงของหมู่แทนที่ MEH ที่เป็นโครงสร้างกิ่งของ MEH-PPV



รูปที่ 18. สเปกตรัม IR ของ (a) เม็ดพลาสติก PS (b) MEH-PPV บริสุทธิ์ และเส้นใยอิเล็กโตรสปีนจากสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% (w/v) (PS:MEH-PPV = 7.5:1 w/w) ใน 1,2-ไดคลอโรอีเทน ที่มีการเติมเกลือ PF ลงไปคิดเป็น 8% (v/v) และทิ้งไว้เป็นเวลา (c) 12 ชั่วโมง และ (d) 1 เดือน ตามลำดับ โดยสภาวะที่ใช้เตรียมเส้นใย คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV และระยะในการเก็บเส้นใย 10 cm

เพื่อให้ทราบปริมาณที่แน่ชัดของหมู่แทนที่ของ MEH-PPV จากเส้นใยที่เตรียมจากการทิ้งสารละลาย PS/MEH-PPV ที่มีการเติมเกลือ PF ไว้เป็นเวลา 1 เดือนนั้น มีค่าลดลงจากการทิ้งสารละลาย PS/MEH-PPV ที่มีการเติมเกลือ PF ไว้เป็นเวลา 12 ชั่วโมงคิดเป็นร้อยละเท่าไรถึงทำให้สีของเส้นใยเปลี่ยนจากสีส้มเป็นสีเหลือง จึงมีการวิเคราะห์เชิงปริมาณจากผลที่ได้จาก FT-IR โดยใช้ตำแหน่งเส้นกราฟที่ 1601 cm^{-1} (การยึดของพันธะ C=C) เป็นตำแหน่งอ้างอิงในการเปรียบเทียบความเข้มของเส้นกราฟ (absorbance, Abs.) เนื่องจากตำแหน่งดังกล่าวแสดงถึงโครงสร้างของสายโซ่หลักของ PPV ที่คาดว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ จากนั้นนำค่า Abs. ที่ตำแหน่งต่างๆ มาหาค่าอัตราส่วนสัมพัทธ์ (อัตราส่วนระหว่าง Abs. ที่ตำแหน่งนั้นๆ กับ Abs. ที่ตำแหน่งอ้างอิง) รวมทั้งค่าผลต่างของอัตราส่วนสัมพัทธ์ระหว่างเวลาในการเติมเกลือ PF 1 เดือนกับ 12 ชั่วโมง ซึ่งผลจากการคำนวณได้

แสดงไว้ใน**ตารางที่ 9** จะเห็นว่าที่ตำแหน่งที่สื่อถึงโครงสร้างของหมู่แทนที่ MEH [การยึดของโครงสร้างแอริล-แอลคิล อีเทอร์ (aryl-alkyl ether) (C-O-C) ทั้งแบบสมมาตรและไม่สมมาตร] จะให้ค่าดังกล่าวมากที่สุด แสดงให้เห็นว่าเวลาในการเติมเกลือ 1 เดือนนั้นทำให้หมู่แทนที่ MEH ลดลงจริง ซึ่งสามารถนำค่าดังกล่าวมาคำนวณหาค่าร้อยละการลดลงของหมู่แทนที่ได้โดยใช้ความสัมพันธ์ต่อไปนี้

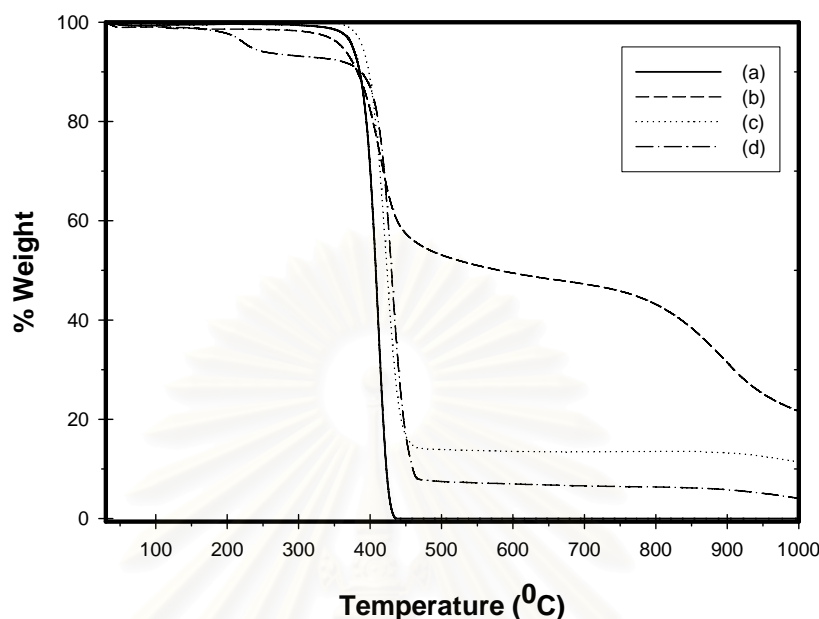
$$\text{ร้อยละการลดลงของหมู่แทนที่ MEH} = \frac{A_{C-O-C,12hr} / A_{C=C,12hr} - A_{C-O-C,1month} / A_{C=C,1month}}{A_{C-O-C,12hr} / A_{C=C,12hr}} \times 100 \quad (1)$$

ซึ่งจากการคำนวณดังกล่าวได้ค่าร้อยละการลดลงของหมู่ MEH เท่ากับ 14-16%

มีการนำการวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมแกรวิเมตริกซ์ (Thermogravimetric Analysis, TGA) มาใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะการเสื่อมสภาพทางความร้อนของเส้นใยอิเล็กโตรสปิน PS/MEH-PPV และใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณหมู่แทนที่ MEH ที่ลดลงของเส้นใยเส้นใยอิเล็กโตรสปิน PS/MEH-PPV ที่เตรียมจากสารละลายที่ทิ้งไว้ 1 เดือนหลังการเติม PF **รูปที่ 19** แสดงกราฟเทอร์โมแกรมจาก TGA ของเส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% (w/v) ใน 1,2-ไดคลอโรอีเทน ที่มีการเติมเกลือ PF ลงไปคิดเป็น 8% (v/v) และทิ้งไว้เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และ 1 เดือน ตามลำดับ แล้วนำผลการทดลองไปเปรียบเทียบกับเม็ดพลาสติก PS และ MEH-PPV บริสุทธิ์ จะเห็นได้ว่าเม็ดพลาสติก PS มีการเสื่อมสภาพทางความร้อนแบบน้ำหนักลดลงขึ้นเดียวที่อุณหภูมิประมาณ 392°C ขณะที่ MEH-PPV บริสุทธิ์มีการเสื่อมสภาพทางความร้อนแบบน้ำหนักลดลงสองขั้นคือที่อุณหภูมิประมาณ 385 และ 800°C ตามลำดับ ซึ่งการเสื่อมสภาพทางความร้อนของ MEH-PPV ดังกล่าวสอดคล้องกับเอกสารงานวิจัยที่มีรายงานไว้แล้ว [37, 38] ส่วนเส้นใยอิเล็กโตรสปิน PS/MEH-PPV ที่เตรียมหลังจากทิ้งสารละลายที่มีการเติมเกลือไว้ 12 ชั่วโมงมีการเสื่อมสภาพทางความร้อนแบบน้ำหนักลดลงสองขั้นเช่นกัน แต่การสลายตัวขั้นที่สองนั้นมองเห็นไม่ชัดเจนนักเนื่องจาก MEH-PPV ในเส้นใยพอลิเมอร์ผสมนั้นมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับ PS สิ่งที่น่าสนใจก็คือปริมาณของแข็งที่เหลืออยู่หลังการสลายตัว (solid residue) ของการสลายตัวขั้นแรกนั้นมีค่าประมาณ 13% ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณทางทฤษฎีของ MEH-PPV ที่มีค่าเท่ากับ 12% สุดท้ายเส้นใยอิเล็กโตรสปิน PS/MEH-PPV ที่เตรียมหลังจากทิ้งสารละลายที่มีการเติมเกลือไว้ 1 เดือนมีการเสื่อมสภาพทางความร้อนแบบน้ำหนักลดลงสามขั้น ซึ่งขั้นที่สามเป็นการลดลงที่มองเห็นได้ไม่ชัดเจน จากการสังเกตการลดลงของน้ำหนักในขั้นแรกที่อุณหภูมิประมาณ 200°C จะพบว่ามี การลดลง 7% ซึ่งน่าจะเป็นการลดลงเนื่องจากการสลายตัวของสารที่เติมเป็นหมู่แทนที่ MEH ที่หลุดออกมาจากสายโซ่ของ MEH-PPV ระหว่างทิ้งสารละลายไว้ 1 เดือนหลังการเติมเกลือ ถ้ากลับไปพิจารณาผลเชิงปริมาณจาก FT-IR จะพบว่าหมู่ MEH ที่ลดลงจากที่วิเคราะห์ได้มีค่าประมาณ 15% (คิดเป็น 24 g/mol) ของโครงสร้างซ้ำในสายโซ่ MEH-PPV ที่คิดเป็น 260 g/mol) ซึ่งตรงกับ การลดลงของน้ำหนักจากการสลายตัวทางความร้อนที่มีค่าประมาณ 9% (คิดเป็น 24 g/mol) ของโครงสร้างซ้ำในสายโซ่ MEH-PPV ที่คิดเป็น 260 g/mol) แสดงให้เห็นว่าผลการวิเคราะห์ทางปริมาณจาก FT-IR และ ผลการทดลองจาก TGA นั้นให้ผลที่สอดคล้องกัน

ตารางที่ 9. ผลการวิเคราะห์สเปกตรัม IR ของเส้นใยอิเล็กโตรสปิน PS/MEH-PPV ที่เตรียมจากสารละลายความเข้มข้น 8.5% (w/v) (PS:MEH-PPV = 7.5:1 w/w) ใน 1,2-ไดคลอโรอีเทน ที่มีการเติมเกลือ PF ลงไปคิดเป็น 8% (v/v) แล้วทิ้งสารละลายไว้เป็นเวลา 12 ชั่วโมงเปรียบเทียบกับ 1 เดือนก่อนนำไปเตรียมเป็นเส้นใย

เวลาในการเติมเกลือ 12 ชั่วโมง			เวลาในการเติมเกลือ 1 เดือน			ผลต่าง ของ อัตรา ส่วน สัมพัทธ์	โครงสร้างที่สื่อถึง
ตำแหน่ง เส้น กราฟ (cm^{-1})	Abs.	อัตราส่วน ระหว่าง Abs. ที่ตำแหน่งใดๆ กับ Abs. ที่ 1601 cm^{-1}	ตำแหน่ง เส้น กราฟ (cm^{-1})	Abs.	อัตราส่วน ระหว่าง Abs. ที่ตำแหน่ง ใดๆ กับ Abs. ที่ 1601 cm^{-1}		
2961	0.355	1.01	-	-	-	-	การยืดแบบไม่สมมาตร ของพันธะ C-H ใน -CH ₃
2923	0.392	1.11	2922	0.564	1.06	0.05	การยืดแบบไม่สมมาตร ของพันธะ C-H ใน -CH ₂
2850	0.347	0.99	2851	0.534	1.01	0.02	การยืดแบบสมมาตรของ พันธะ C-H ใน -CH ₂
1601	0.352	1.00	1601	0.531	1.00	0.00	การยืดของพันธะ C=C
1451	0.384	1.09	1452	0.557	1.05	0.04	การงอแบบไม่สมมาตร ของพันธะ C-H ใน -CH ₃
1261	0.397	1.13	1254	0.514	0.97	0.16	การยืดแบบไม่สมมาตร ของโครงสร้างเอริล- แอลคิล อีเทอร์ (aryl- alkyl ether) (C-O-C)
1207	0.348	0.99	1204	0.525	0.99	0.00	การยืดของวงแหวนและ การเสี้ยวรูปของพันธะ C-H
1027	0.419	1.19	1029	0.533	1.00	0.19	การยืดแบบสมมาตรของ โครงสร้างเอริล- แอลคิล อีเทอร์ (aryl- alkyl ether) (C-O-C)



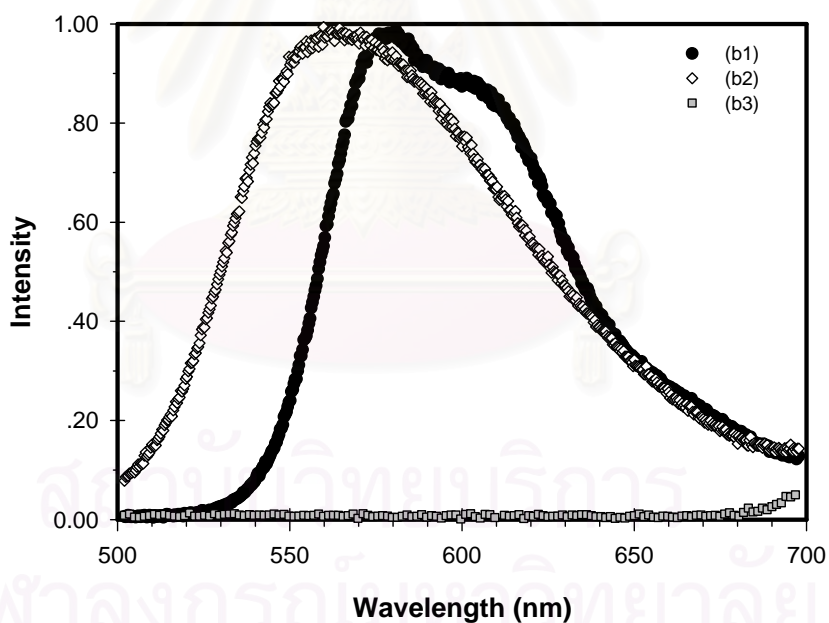
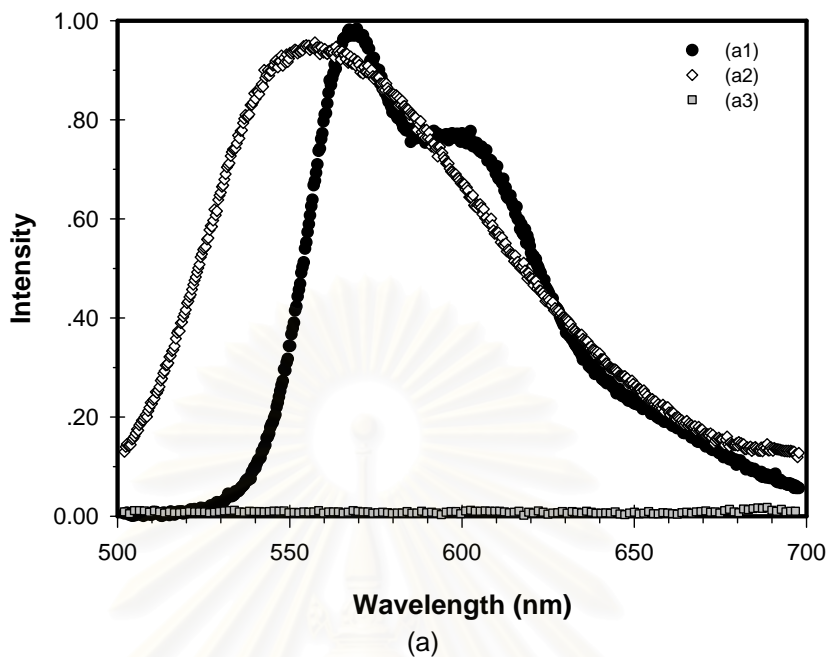
รูปที่ 19. เทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์ด้วย TGA ของ (a) เม็ดพลาสติก PS (b) MEH-PPV บริสุทธิ์ และเส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% (w/v) (PS:MEH-PPV = 7.5:1 w/w) ใน 1,2-ไดคลอโรอีเทน ที่มีการเติมเกลือ PF ลงไปคิดเป็น 8% (v/v) และทิ้งไว้เป็นเวลา (c) 12 ชั่วโมง และ (d) 1 เดือน ตามลำดับ โดยสภาวะที่ใช้เตรียมเส้นใย คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV และระยะในการเก็บเส้นใย 10 cm

รูปที่ 20 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสง (photoluminescence spectra) ของสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% (w/v) ในตัวทำละลาย 1,2-ไดคลอโรอีเทนที่มีการเติมเกลือ PF ลงไปคิดเป็น 8% (v/v) และทิ้งไว้เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และ 1 เดือน รวมทั้งเส้นใยที่เตรียมได้จากสารละลายเหล่านั้นด้วย นอกจากนี้ยังศึกษาสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย PS เข้มข้น 20% (w/v) ในตัวทำละลาย 1,2-ไดคลอโรอีเทนและเส้นใยที่เตรียมได้จากสารละลายดังกล่าวแล้วนำมาเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของสารละลายและเส้นใย PS/MEH-PPV ด้วย ผลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าสารละลาย PS และเส้นใย PS นั้นไม่แสดงการเปล่งแสงหลังฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต สารละลาย PS/MEH-PPV ใน 1,2-ไดคลอโรอีเทนที่มีการเติมเกลือ PF และทิ้งไว้ 12 ชั่วโมง มีการเปล่งแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 568 nm และมีไหล่ของกราฟที่ประมาณ 600 nm ขณะที่เส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลายดังกล่าวมีการเปล่งแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 578 nm และมีไหล่ของกราฟที่ประมาณ 604 nm ส่วนสารละลาย PS/MEH-PPV ใน 1,2-ไดคลอโรอีเทนที่มีการเติมเกลือ PF และทิ้งไว้ 1 เดือนมีการเปล่งแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 557 nm ขณะที่เส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลายดังกล่าวมีการเปล่งแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 563 nm โดยที่ทั้งคู่ไม่แสดงไหล่ของกราฟที่ตำแหน่งความยาวคลื่นที่สูงกว่าเลย จะเห็นได้ว่าสารละลาย PS/MEH-PPV ที่มีการเติมเกลือ PF และทิ้งไว้ 1 เดือน และเส้นใยที่ได้จากสารละลายดังกล่าวไม่มีไหล่ของสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่นของแสงสีแดงนั้นทำให้สีของสารละลายและเส้นใยเป็นสีเหลืองนั่นเอง สุดท้ายถ้า

เปรียบเทียบการเปล่งแสงระหว่างสารละลายตัวอย่างหนึ่งกับเส้นใยที่เตรียมจากสารละลายนั้นจะเห็นว่า การเปล่งแสงของเส้นใยจะเลื่อนไปทางช่วงความยาวคลื่นที่สูงกว่า (red shift) เมื่อเปรียบเทียบกับ การเปล่งแสงของสารละลาย ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่เคยมีการรายงานไว้แล้ว [21, 35]



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 20. สเปกตรัมการเปล่งแสง (photoluminescence spectra) ของ (a) สารละลายที่ใช้ในการเตรียมเส้นใย [ประกอบด้วยสารละลาย PS/MEH-PPV ความเข้มข้น 8.5% (w/v) (PS:MEH-PPV = 7.5:1 w/w) ในตัวทำละลาย 1,2-ไดคลอโรอีเทนที่มีการเติมเกลือ PF ลงไปคิดเป็น 8% (v/v) และทิ้งไว้เป็นเวลา (1) 12 ชั่วโมง (2) 1 เดือน ตามลำดับ และ (3) สารละลาย PS เข้มข้น 20% (w/v) ในตัวทำละลาย 1,2-ไดคลอโรอีเทน] และ (b) สเปกตรัมที่ได้จากเส้นใยอิเล็กโตรสปิน PS/MEH-PPV จากสารละลายดังกล่าวข้างต้น ซึ่งสภาวะที่ใช้เตรียมเส้นใย คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV และระยะในการเก็บเส้นใย 10 cm

สรุปผลการวิจัย

การปั่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์ปั่นผสมระหว่างพอลิไทรอินและพอลิ(2-เมธอกซี,5-(2'-เอธิลเฮกซิลออกซี)-พารา-ฟีนิลีนไวโนลีน) (PS/ MEH-PPV) โดยใช้กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตนั้น สามารถขึ้นรูปเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยขนาดเล็กอยู่ในช่วง 0.30 ถึง 5.11 μm ได้ โดยใช้สารละลาย PS/ MEH-PPV ที่ละลายในคลอโรฟอร์ม 1,2-ไดคลอโรอีเทน เตตระไฮโดรฟูแรน และตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรฟอร์มและ 1,2-ไดคลอโรอีเทน ที่ความเข้มข้น 8.5, 16 และ 23.5% (w/v) (สัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่าง PS และ MEH-PPV คือ 7.5:1, 15:1 และ 22.5:1 ตามลำดับ) ผลการทดลองพบว่าคลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลายที่ทำให้สารละลายมีความสามารถในการขึ้นรูปเป็นเส้นใยมากที่สุด รองลงมาคือ 1,2-ไดคลอโรอีเทน และเตตระไฮโดรฟูแรนตามลำดับ แต่ถ้าไม่สนใจผลของตัวทำละลาย การเพิ่มศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการปั่นเส้นใยจะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์ปั่นมีขนาดใหญ่ขึ้นและการเกิดปมของเส้นใยลดลง ส่วนผลของความเข้มข้นพบว่าความสามารถในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตจะสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงขึ้น ปมพอลิเมอร์และเส้นใยมีปมนั้นจะเกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมีค่าต่ำ (8.5% (w/v)) การเพิ่มความสามารถในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตของสารละลาย PS/MEH-PPV ที่มีความเข้มข้นต่ำดังกล่าวนี้ สามารถทำได้โดยการเติมเกลืออินทรีย์โพธิเนียม ฟอรัม (PF) ลงไปในสารละลาย เพราะ PF จะช่วยเพิ่มการนำไฟฟ้าให้กับสารละลายหรืออาจใช้การเพิ่มสัดส่วนตัวทำละลาย 1,2-ไดคลอโรอีเทนในระบบตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรฟอร์มและ 1,2-ไดคลอโรอีเทนก็ได้ เพราะค่าคงที่ไดอิเล็กตริกซ์ของ 1,2-ไดคลอโรอีเทนมีค่ามากกว่าคลอโรฟอร์มนั่นเอง และจากการทดสอบสมบัติการเปล่งแสงของเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์ปั่นที่เตรียมได้พบว่าเส้นใยมีการเปล่งแสงที่เลื่อนไปทางช่วงความยาวคลื่นที่สั้นกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลการเปล่งแสงของสารละลาย

การศึกษาผลของการเติมเกลือ PF ที่มากขึ้นพบว่าสามารถเตรียมเส้นใย PS/ MEH-PPV ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่อยู่ในช่วง 0.165 ถึง 1.190 μm จากสารละลาย PS/ MEH-PPV เข้มข้น 8.5% (w/v) (PS:MEH-PPV = 7.5:1 w/w) ในตัวทำละลาย 1,2-ไดคลอโรอีเทนทั้งที่ไม่มีเกลือและมีการเติมเกลือ PF ลงไปคิดเป็น 8% (v/v) ได้ ภายใต้สภาวะที่ใช้เตรียมเส้นใย คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วง 7.5-15 kV ระยะในการเก็บเส้นใย 10 cm และเวลาในการเก็บเส้นใย 1 นาที ผลการทดลองพบว่าการเติมเกลือ PF นั้นช่วยความสามารถในการเตรียมเส้นใยของสารละลาย PS/MEH-PPV ได้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและจำนวนเส้นใยมีค่าสูงขึ้นขณะที่จำนวนปมพอลิเมอร์ลดลงเมื่อศักย์ไฟฟ้าที่ใช้เตรียมเส้นใยมีค่าสูงขึ้นและเมื่อมีการเติมเกลือ PF ลงในสารละลาย รวมทั้งเมื่อเวลาหลังการเติมเกลือ PF ก่อนเตรียมเส้นใยที่สูงขึ้นด้วย ผลการวิเคราะห์เส้นใยสีเหลืองที่เตรียมจากสารละลาย PS/ MEH-PPV เข้มข้น 8.5% (w/v) ที่มีการเติมเกลือ PF และทิ้งไว้ 1 เดือน พบว่าการวิเคราะห์ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรสโคป (FT-IR) แสดงปริมาณหมู่แทนที่ MEH ของ MEH-PPV ที่ลดลงเท่ากับ 15% ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกซ์ (TGA) ที่แสดงการลดลงของหมู่แทนที่เท่ากับ 7% ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ดังกล่าวช่วยยืนยันได้ว่าการที่สารละลาย PS/ MEH-PPV ที่มีการเติมเกลือ PF และทิ้งไว้ 1 เดือนรวมทั้งเส้นใยที่เตรียมได้จากสารละลายดังกล่าวเปลี่ยนสีจากสีส้มเป็นสีเหลืองนั้นเป็นผลเนื่องมาจากการลดลงของหมู่แทนที่ MEH นั่นเอง

ข้อเสนอแนะ

ผลงานวิจัยที่ได้รายงานข้างต้นนี้เป็นประโยชน์กับการพัฒนาเทคโนโลยีการขึ้นรูปอุปกรณ์เปล่งแสงขนาดเล็กจากพอลิเมอร์ เพราะผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถขึ้นรูปเส้นใยจากพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติเปล่งแสงให้มีขนาดอยู่ในระดับเล็กกว่าไมโครเมตรจนถึงนาโนเมตรด้วยการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตได้ และเส้นใยอิเล็กโตรสปินนิงก็สามารถเปล่งแสงได้ถึงแม้จะมีสัดส่วนการผสมของพอลิเมอร์เปล่งแสงค่อนข้างน้อย การศึกษาผลกระทบจากตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อสัณฐานและขนาดของเส้นใยอิเล็กโตรสปินนิงนั้นนอกจากจะช่วยให้ความรู้ความเข้าใจในหลักการของกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแล้ว ยังช่วยให้หาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเส้นใยและหาวิธีเพิ่มความสามารถในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตได้อีกด้วย

งานวิจัยนี้ไม่มีอุปสรรคมากนัก ปัญหาส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับกระบวนการขึ้นรูปเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตในช่วงแรกของการวิจัยเท่านั้น ซึ่งเป็นปัญหาที่แก้ไขได้ไม่ยากและสำเร็จไปได้ด้วยดี และจากผลการทดลองที่กล่าวไว้ข้างต้นจะเห็นได้ว่า ในช่วงแรกนั้นงานวิจัยนี้เป็นไปตามโครงการที่ได้เสนอไว้เพราะผู้วิจัยได้วางแผนการทำงานไว้อย่างเป็นขั้นตอน และดำเนินงานวิจัยตามขั้นตอนดังกล่าว แต่เมื่อผู้วิจัยดำเนินงานวิจัยมาถึงขั้นตอนสุดท้ายที่เคยวางแผนว่าจะออกแบบกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่สามารถเก็บเส้นใยให้มีการจัดเรียงเส้นใยในทิศทางเดียว กลับพบว่าในระหว่างการเตรียมสารละลายที่มีการเดิมเกลือแล้วทิ้งสารละลายไว้เป็นเวลานาน สารละลายดังกล่าวเปลี่ยนจากสีส้มที่ควรจะเป็นกลายเป็นสีเหลือง ผู้วิจัยเห็นว่าเป็นเรื่องที่น่าสนใจและไม่เกินขอบเขตของโครงการที่เสนอไว้ จึงมุ่งศึกษาผลของการเดิมเกลือที่มีต่อการปั่นเส้นใยต่อโดยศึกษาเพิ่มเติมอย่างละเอียดขึ้น โดยเฉพาะผลที่มีต่อสีในการเปล่งแสงของเส้นใย ซึ่งผลการทดลองที่ได้ก็เป็นที่น่าพอใจและมีประโยชน์

งานวิจัยที่น่าจะมีการศึกษาต่อไปก็คือ การออกแบบกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต รวมทั้งวิธีการเก็บเส้นใยระหว่างการขึ้นรูปเพื่อให้สามารถผลิตเส้นใยที่มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยในทิศทางเดียวได้ดังที่เคยวางแผนไว้ เพื่อศึกษาผลของการจัดเรียงตัวของเส้นใยต่อสมบัติด้านการเปล่งแสงของเส้นใยที่ได้หลังจากที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง (photoluminescence) นอกจากนี้ การศึกษาผลของการยึดตัวของเส้นใยที่มีต่อสมบัติด้านการเปล่งแสงดังกล่าวก็เป็นสิ่งที่น่าสนใจ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิง

1. Gibson, P., Schreuder-Gibson, H., Rivin, D. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **2001**, 469, 187-188.
2. Jacobsen, M. (1991). *Nonwovens Industry*.
3. Kenaway, E. R., Bowlin, G. L., Mansfield, K., Layman, J., Simpson, D. G., Sanders, E. H., Wnek, G. E. *Journal of Controlled Release* **2002**, 81, 57-64.
4. Matthews, J. A., Boland, E. D., Wnek, G. E., Simpson, D. G., Bowlin, G. L. *Journal of Bioactive Compatible Polymer* **2003**, 18, 125-134.
5. Yoshimoto, H., Shin, Y. M., Terai, H., Vacanti, J.P. *Biomaterials* **2003**, 24, 2077-2082.
6. Wnek, G., Carr, M. E., Simpson, D. G., Bowlin, G. L. *Nano Letters* **2003**, 3(2), 213-216.
7. Hongu, T., Phillips, G. O. (1997). *New Fibers*, 2nd edition. Cambridge: Woodhead Publishing.
8. Zhang, D., Sun, C., Wadsworth, L. C. *Textile Research Journal* **2001**, 71(4), 301-308.
9. Li, D.; Xia, Y. *Advance Materials* **2004**, 16, 1151.
10. Frenot, A.; Chronakis, I. S. *Curr Opin Colloid Interface Sci* **2003**, 8, 64.
11. Huang, Z. M.; Zhang, Y. Z.; Kotaki, M.; Ramakrishna, S. *Compos Sci Technol* **2003**, 63, 2223.
12. Reneker, D. H., Chun, I. *Nanotechnology* **1996**, 7, 216-223.
13. Chun, I. (1995). *PhD Dissertation*, The University of Akron.
14. <http://www.isiwebofknowledge.com> (June 4, 2004)
15. Wang, Y.; Santigano-Aviles, J. J. *J Appl Phys* **2003**, 94, 1721.
16. Zhou, Y.; Freitag, M.; Hone, J.; Staii, C.; Johnson, A. T., Jr.; Pinto, N. J.; MacDiarmid, A. G. *Appl Phys Lett* **2003**, 83, 3800.
17. Pinto, N. J.; Johnson, A. T., Jr.; MacDiarmid, A. G.; Mueller, C. H.; Theofylaktos, N.; Robinson, D. C.; Miranda, F. A. *Appl Phys Lett* **2003**, 83, 4244.
18. Li, D.; Wang, Y.; Xia, Y. *Nano Lett* **2003**, 3, 1167.
19. Neef, C. J.; Ferraris, J. P. *Macromolecules* **2000**, 33, 2311.
20. Moses, D.; Dogariu, A.; Heeger, A. J. *Chem Phys Lett* **2000**, 316, 356.
21. Madhugiri, S.; Dalton, A.; Gutierrez, J.; Ferraris, J. P.; Balkus, K. J., Jr. *J Am Chem Soc* **2003**, 125, 14531.
22. Friend, R. H., *Pure Appl Chem* **2001**, 73, 425-430.
23. Acierno, D., Amendola, E., Bellone, S., et.al. *Journal of Non-Crystalline Solids* **2004**.
24. Formhals, A. (1934). *US Patent No. 1,975,504*.
25. Torres, B. (2001). *Proceeding of The National Conference on Undergraduate Research*, The University of Kentucky.

26. Yang, H., Zhu, P., Xie, Y., Zhang, X., Li., G. *Polymer* **2000**, 41, 499-504.
27. Lee, K. H., Kim, H. Y., La, Y. M., Lee, D. R., Sung, N. H. *Journal of Polymer Science: Polymer Physics* **2002**, 40, 2259-2268.
28. Friend, R. H., Greenham, N. C. (1998). *Handbook of Conductive Polymers*. New York:Marcel Dekker.
29. Damlin, P., Kvarstrom, C., Peter, A., Ek, P., Dunsch, L., Ivaska, A. *Journal of Solid State Electrochemistry* **2001**, 6, 291-301.
30. Knupfer, M., Fink, J., Zojer, E., Leising, G., Fichou, D. *Chemical Physical Letter* **2000**, 318, 585-589.
31. Anoop, M., Dong, H., Niazinbetova, Z. I., Rothberg, L. J., Galvin, M. E. *Chem Mater* **2002**, 14, 3668-3675.
32. Wannatong, L.; Sirivat, A.; Supaphol, P. *Polym Int* **2004**, 53, 1851.
33. Fong, H.; Chun, I.; Reneker, D. H. *Polymer* **1999**, 40, 4585.
34. Mit-uppatham, C.; Nithitanakul, M.; Supaphol, P. *Macromol Chem Phys* **2004**, 205, 2327.
35. Wutticharoenmongkol, P., Supaphol, P., Srihirin, T., Kerdcharoen, T., Osotchan, T. *J Polym Sci - Polym Phys* **2005**, 43, 1881.
36. Friend, R. H., Gymer, R. W., Holmes, A. B., Burroughes, J. H., Marks, R. N., Taliani, C. D., Bradley, D. C., Dos Santos, D. A., Brédas, J. L., Lögdlund, M., Salaneck, W. R. *Nature* **1999**, 397, 121.
37. Cossiello, R. F., Akcelrud, L. T., Atvars, D. Z., Braz, J. *Chem Soc* **2005**, 16, 74.
38. Jing, C., Chen, L., Shi, Y., Jin, X. *Eur Polym J* **2005**, 41, 2388.

ผลงานที่ตีพิมพ์หรือตอบรับให้ตีพิมพ์

1. P. Wutticharoenmongkol, P. Supaphol, T. Srihirin, T. Kerdcharoen, and T. Osotchan (2005) "Electrospinning of Polystyrene/Poly(2-methoxy-5-(2'-ethylhexyloxy)-1,4-phenylene vinylene) Blends," *Journal of Polymer Science - B: Polymer Physics*, 43(14), 1881-1891. (July)
2. S. Chuangchote, T. Srihirin, and P. Supaphol, "The Change in Color of Electrospun Polystyrene/MEH-PPV Fibers from Orange to Yellow through Partial Decomposition of MEH Side Groups," *Macromolecular Rapid Communications*, accepted.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย