

การสังเคราะห์และศึกษาสมบัติของเส้นใยนาโนไฟเบอร์ซิงค์ออกไซด์  
โดยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง  
SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF ZnO NANOFIBERS  
BY ELECTROSPINNING TECHNIQUE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2557

การสังเคราะห์และศึกษาสมบัติของเส้นใยนาโนไฟเบอร์ซิงค์ออกไซด์  
โดยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง  
SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF ZnO NANOFIBERS  
BY ELECTROSPINNING TECHNIQUE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานปีการศึกษา 2557 นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF ZnO NANOFIBERS  
BY ELECTROSPINNING TECHNIQUE



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN APPLIED PHYSICS  
DEPARTMENT OF PHYSICS  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หัวข้อโครงการพิเศษ** การสังเคราะห์และศึกษาสมบัติของเส้นใยนาโนไฟเบอร์ซึ่งออกไซด์โดยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง  
SYNTHESIS AND CHARZCTERIZATION OF ZnO NANOFIBERS BY ELECTROSPINNING TECHNIQUE

**ชื่อนักศึกษา** นางสาวเกวลี โลหะศิริ รหัสนักศึกษา 54050486  
นางสาวดวงฤทัย ทรายละเอียด รหัสนักศึกษา 54050521

**ปริญญา** วิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์  
**ภาควิชา** ฟิสิกส์

**ปีการศึกษา** 2557

**อาจารย์ที่ปรึกษา** รองศาสตราจารย์ ดร.วราวุฒิ เถาสัตตา

**อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม** ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
อ.สุรชาติ กมลติลก	
รศ.สาทราย เล็กชะอุ่ม	
อ.ธนภรณ์ สีลาวัฒนานนท์	
รศ.ดร.วราวุฒิ เถาสัตตา	
ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี	

**ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การสังเคราะห์และศึกษาสมบัติของเส้นใยนาโนไฟเบอร์ซิงค์ออกไซด์ โดยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง

ชื่อนักศึกษา นางสาวเกวลี โลหะศิริ รหัสนักศึกษา 54050486  
นางสาวดวงฤทัย ทรายละเอียด รหัสนักศึกษา 54050521

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต  
ภาควิชา ฟิสิกส์  
ปีการศึกษา 2557

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. วรารุณี เถาถัดตา  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญญี

### บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษนี้เป็นการสังเคราะห์และศึกษาสมบัติของนาโนไฟเบอร์ซิงค์ออกไซด์ เส้นใยนาโนนี้เป็นการสังเคราะห์โดยกระบวนการโซลเจลและเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง โดยใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) และซิงค์อะซิเตรทเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์เส้นใย องค์ประกอบและขนาดของเส้นใยจะตรวจวิเคราะห์โดยEDXและFE-SEM ในการพิจารณาผลของPVAต่ออัตราส่วนของซิงค์อะซิเตรท, อัตราการไหลของสารละลาย, การเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า, เส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มเหล็ก, ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับเส้นใยและอุณหภูมิในการอบเส้นใยนาโนที่มีลักษณะเรียบและความยาวที่ต่อเนื่องโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้เล็กที่สุด 163nm โดยใช้PVA 5g ต่อ ซิงค์อะซิเตรท 5g ใช้อัตราการไหล 800  $\mu\text{L}/\text{min}$ , ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV, เส้นผ่านศูนย์กลางของเข็ม0.35 (เข็มเบอร์ 23), ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นรองรับเส้นใย 10cm และอุณหภูมิในการอบ 400°C โดยการเพิ่มอุณหภูมิในอัตรา 5°C /นาที่ เป็นเวลา 1ชั่วโมง จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในการอบมีผลต่อองค์ประกอบและขนาดของเส้นใยนาโน

คำสำคัญ : เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์, อิเล็กโทรสปินนิง

<b>Title</b>	SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF ZnO NANOFIBERS BY ELECTROSPINNING TECHNIQUE	
<b>Students</b>	MISS KAVALEE LOHASIRI	Student ID 54050486
	Miss DUANGRUTHAI SAILAEAD	Student ID 54050521
<b>Degree</b>	Bachelor of science	
<b>Department</b>	Physics	
<b>Academic Year</b>	2014	
<b>Advisor</b>	Associate Professor Dr. Warawoot Thowladda	
<b>Co-Advisor</b>	Dr. S.Tipawan Khalayboonme	

### ABSTRACT

The purposes of this special project are to synthesis and characterize ZnO nanofibers. These nanofibers were fabricated by sol-gel processing and an electrospinning technique. Polyvinyl alcohol (PVA) and zinc acetate were used as precursors of nanofibers. The composition and size of the nanofiber characterized by EDX and FE-SEM were considerably affected by PVP/zinc-acetate ratio, solution flow rate, applied high voltage, needle diameter, needle to collector distance and calcination temperature. Long and smooth nanofibers with the smallest diameter of 163 nm were obtained for the electrospun PVA/zinc-acetate containing a PVA content of 5 g and zinc acetate of 5 g with a flow rate of 800 ml/min, an applied voltage of 20 kV, a needle diameter of 0.35 mm (a 23 gauge), a needle to collector distance of 10 cm and a calcination temperature of 400 °C at an increasing rate of 5°C /min under remaining for 1 h at this temperature. The experimental results suggest that the calcination temperature has a positive influence on the determination of composition and size of nanofibers.

**Keywords :** Electrospinning, ZnO nanofibers

# กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีนั้น เนื่องจากการได้รับการสนับสนุนและความอนุเคราะห์เป็นอย่างดีจาก รศ.ดร. วราวุฒิ เถาลัดดา อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งคอยให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิดพร้อมทั้งเสนอแนวทางแก้ไขปัญหาต่างๆในโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณ ดร.ศ. ทิพวรรณ คล้ายบุญมี อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมโครงการพิเศษ ที่คอยให้ความช่วยเหลือในการจัดหาเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆในการทำโครงการพิเศษและช่วยเหลือในการตรวจสอบความถูกต้องในระหว่างการทำโครงการพิเศษและตรวจสอบความเรียบร้อยของรูปเล่มโครงการพิเศษจนสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความรู้และชี้แนะปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างทำโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณผลงานวิจัยและเอกสารอ้างอิงต่างๆที่ข้าพเจ้าใช้เป็นเอกสารอ้างอิงและทำการศึกษาจนเกิดความรู้ ความเข้าใจในการทำโครงการพิเศษครั้งนี้ ซึ่งหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการพิเศษเล่มนี้จะเกิดประโยชน์ต่อผู้อ่านและผู้สนใจเกี่ยวกับการสังเคราะห์และศึกษาสมบัติของเส้นใยนาโนไฟเบอร์ซึ่งคือออกไซด์โดยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง

สุดท้ายคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากงานวิจัยเล่มนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้แก่บิดา มารดาและครอบครัวที่เป็นที่รักยิ่ง ตลอดจนคุณครู อาจารย์ที่เคารพรักทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ต่างๆแก่ข้าพเจ้า

นางสาว เกวลี โลหะศิริ  
นางสาว ดวงฤทัย ทรายละเอียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ณ
คำย่อและสัญลักษณ์	ฎ
<b>บทที่1 บทนำ</b>	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตการทำงาน	2
1.4 ขั้นตอนในการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
<b>บทที่2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	3
2.1 เส้นใยนาโน	3
2.2 การผลิตเส้นใยระดับนาโน	3
2.2.1 Drawing	4
2.2.2 Template Synthesis	4
2.2.3 Phase separation	5
2.2.4 Self-Assembly	6
2.2.5 Electrospinning	7
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะและขนาดของเส้นใยนาโน	8
2.3.1 ตัวแปรด้านสารละลาย	8
2.3.2 ตัวแปรในระบบ	8
2.3.3 สภาพแวดล้อม	9
2.4 สารประกอบ ZnO	9
2.4.1 สมบัติของสารซิงก์ออกไซด์ (Zinc oxide; ZnO )	9
2.4.2 สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)	10
2.5 เทคนิคการวิเคราะห์สมบัติของเส้นใยนาโน ZnO	10
2.5.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	11
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน</b>	15
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	16
	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และส่งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.1.1 แหล่งจ่ายไฟ	17
3.1.2 ส่วนควบคุม	17
3.1.3 ส่วนสารละลาย	19
3.2 ขั้นตอนการทดลอง	26
3.2.1 ขั้นตอนในการผสมสารละลายแบ่งเป็น 3 ตอน	26
3.2.2 ขั้นตอนในการสังเคราะห์เส้นใยด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง	28
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล</b>	<b>32</b>
4.1 ผลการทดลองของเส้นใยพอลิเมอร์	32
4.2 ผลการทดลองของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์	43
4.2.1 ความเข้มข้นระหว่างสารละลาย Zinc acetate กับสารละลาย PVA	44
4.2.2 ความเข้มข้นระหว่างสารละลาย Zinc acetate กับสารละลาย PVP	53
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	<b>70</b>
5.1 สรุปผลการทดลอง	70
5.2 ข้อเสนอแนะ	70
เอกสารอ้างอิง	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนในการวิจัย	2
4.1.1 ความเข้มข้นระหว่างสารละลายไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์กับสารละลายโพลีสไตรีน ในอัตราส่วน 10:1.5 ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 10 ซม.	32
4.1.2 ความเข้มข้นระหว่างสารละลายไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์กับสารละลายโพลีสไตรีน	34
4.1.3 ความเข้มข้นระหว่างสารละลายไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์กับสารละลายโพลีสไตรีน	35
4.1.4 ความเข้มข้นระหว่างสารละลายไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์กับสารละลายโพลีสไตรีน ในอัตราส่วน 10:2 ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 15 ซม.	36
4.1.5 ความเข้มข้นระหว่างสารละลายไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์กับสารละลายโพลีสไตรีน ในอัตราส่วน 10:2.5 ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 10 ซม.	37
4.1.6 ความเข้มข้นระหว่างสารละลายไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์กับสารละลายโพลีสไตรีน ในอัตราส่วน 10:2.5 ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 15 ซม.	38
4.1.7 ความเข้มข้นระหว่างสารละลายไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์กับสารละลายโพลีสไตรีน ในอัตราส่วน 10:3 ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 10 ซม.	39
4.1.8 ความเข้มข้นระหว่างสารละลายไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์กับสารละลายโพลีสไตรีน ในอัตราส่วน 10:3 ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 15 ซม.	40
4.1.9 ความเข้มข้นระหว่างสารละลายไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์กับสารละลายโพลีสไตรีน ในอัตราส่วน 10:1.5 ที่ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 10 ซม.	41
4.1.10 ความเข้มข้นระหว่างสารละลายไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์กับสารละลายโพลีสไตรีน ในอัตราส่วน 10:2 ที่ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 15 ซม.	41
4.1.11 ความเข้มข้นระหว่างสารละลายไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์กับสารละลายโพลีสไตรีน ในอัตราส่วน 10:2.5 ที่ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 10 ซม.	42
4.1.12 ความเข้มข้นระหว่างสารละลายไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์กับสารละลายโพลีสไตรีน ในอัตราส่วน 10:3 ที่ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 10 ซม.	42
4.2.1 ผลการวิเคราะห์โดย Scanning electron microscope (SEM) เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่ความเข้มข้นของ Zn 5g: PVA 5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5	44
4.2.2 ผลการวิเคราะห์โดย Scanning electron microscope (SEM) เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ ความเข้มข้นของ Zn 5g: PVA 7.5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และจ้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.2.17 ผลการวิเคราะห์โดย Scanning electron microscope (SEM) เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ ความเข้มข้นของ Zn 5g: PVA 5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5 อบที่อุณหภูมิ 500 °c	61
4.2.18 ผลการวิเคราะห์โดย Scanning electron microscope (SEM) เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ ความเข้มข้นของ Zn 5g: PVA 5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5 เวลาในการอบ 1 ชั่วโมง โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการอบเส้นใย	63
4.2.19 ความเข้มข้นของ Zn 5g: PVA 5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5 เวลาในการอบ 1 ชั่วโมงโดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการอบเส้นใย	64
4.2.20 ความเข้มข้นของ Zn 5g: PVA 5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5 เวลาในการอบ 1 ชั่วโมงโดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการอบเส้นใย แก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นกับเส้นใยโดยใช้เข็มใหม่, ฉีดแล้วอบทันทีและใช้เตาอบที่ติดตั้งด้วยระบบPID	67

# สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 Drawing	4
2.2 Template synthesis	5
2.3 Phase separation	6
2.4 Self assembly	6
2.5 หลักการทำงานของ ES	7
2.6 โครงสร้างสารซิงก์ออกไซด์	10
2.7 สมบัติการนำไฟฟ้าของธาตุชนิดต่างๆ	11
2.8 สารกึ่งตัวนำชนิด N และ ชนิด P	13
2.9 โครงสร้างรอยต่อ P-N ของสารกึ่งตัวนำ	13
2.10 การไบแอสตรง	14
2.11 การไบแอสกลับ	14
2.12 องค์ประกอบภายในกล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	16
3.1 High Voltage Power Supply	17
3.2 Step motor 5phase	17
3.3 Keypad ขนาด 4X4	18
3.4 LCD ขนาด 16X4	18
3.5 Zinc acetate	19
3.6 PVP	19
3.7 PVA	20
3.8 น้ำกลั่นบริสุทธิ์	20
3.9 Ethanol	21
3.10 2-methoxyethanol	21
3.11 Ethanolamine	22
3.12 Magnetic stirrer	22
3.13 Magnetic Bar	23
3.14 กระจกฟรอยด์	23
3.15 Syringe	24
3.16 หัวเข็มเหล็ก	24
3.17 ปีกเกอร์ (Beaker)	25
3.18 ค่าความยาวของ Syringe	28
3.19 ปริมาตรของ Syringe	28
3.20 ปริมาตรของสารละลายที่ต้องการฉีดโดยเป็นหน่วยไมโครลิตร	29
3.21 เลือกหน่วยอัตราเร็วในขณะที่ฉีดสารละลาย	29
3.22 อัตราเร็วที่เราต้องการฉีดสารละลาย	30
3.23 มอเตอร์เริ่มทำงาน	30

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.24 เสร็จสิ้นกระบวนการ	31
1.1 EDX Spectrum ของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของ Zn 5g: PVA 5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5 (ไม่อบ)	49
4.1.2 EDX Spectrum ของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของ Zn 5 g: PVA 5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5 (อบที่อุณหภูมิ 500 °c เป็นเวลา1ชั่วโมง)	50
4.1.3 EDX Spectrum ของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของ Zn 5g: PVA 7.5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5 (ไม่อบ)	50
4.1.5 EDX Spectrum ของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของ Zn 7.5 g: PVA 7.5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5 (ไม่อบ)	51
4.1.4 EDX Spectrum ของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของ Zn 5g: PVA 7.5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5 (อบที่อุณหภูมิ 500 °c เป็นเวลา1 ชั่วโมง)	51
4.1.6 EDX Spectrum ของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของ Zn 7.5g: PVA 7.5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5 (อบที่อุณหภูมิ 500 °c เป็นเวลา 1ชั่วโมง)	52
4.1.7 EDX Spectrum ของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของ Zn 10g: PVA 7.5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5 (ไม่อบ)	52
4.1.8 EDX Spectrum ของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของ Zn 10 g: PVA 7.5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5 (อบที่อุณหภูมิ 500 °c เป็นเวลา 1ชั่วโมง)	53
4.2.1 EDX Spectrum ของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของ Zn 0.3g: PVP 5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 1:1 (ไม่อบ)	59
4.2.2 EDX Spectrum ของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของ Zn 2g: PVP 5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 1:1 (ไม่อบ)	60
4.2 3 EDX Spectrum ของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของ Zn 2g: PVP 5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 1:1 (อบที่อุณหภูมิ 500 °c เป็นเวลา1 ชั่วโมง)	60
4.2.4 ผลการวิเคราะห์โดย Scanning electron microscope (SEM) ของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของ Zn 5g: PVA 5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5 อบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง	65

## คำย่อและสัญลักษณ์

c	คือ ความเร็วของแสง (Velocity of light)
°C	คือ องศาเซลเซียส
cm	คือ เซนติเมตร
DC	คือ ไฟฟ้ากระแสตรง
DI	คือ น้ำกลั่นบริสุทธิ์
$d_{hkl}$	คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ
DMF	คือ ไดเมทิลฟอร์มามิเด
EDX	คือ Energy Dispersive X-ray Spectrometer
E <sub>g</sub>	คือ พลังงานของช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap energy)
ES	คือ Electrospinning
eV	คือ อิเล็กตรอนโวลต์
g	คือ กรัม
h	คือ ค่าคงที่ของแพลงค์ (Planck constant)
kV	คือ กิโลโวลต์
L	คือ ขนาดของวัตถุที่ได้
ml	คือ มิลลิลิตร
nm	คือ นาโนเมตร
n	คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน
PS	คือ โพลีสไตรีน
PVA	คือ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์
PVP	คือ โพลีไวนิลโพลีโดน
s	คือ วินาที
SEM	คือ Scanning Electron Microscope
X	คือ กำลังขยาย
XRD	คือ X-ray diffraction spectrometer
ul/min	คือ ไมโครลิตรต่อนาที
um	คือ ไมโครเมตร
UV	คือ รังสีอัลตราไวโอเล็ต
Zn	คือ ซิงค์
ZnO	คือ ซิงค์ออกไซด์
%	คือ เปอร์เซ็นต์
$\lambda$	คือ ค่าความยาวคลื่นที่ปล่อยออกมา (Emitted wavelength)
☉	คือ มุมสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอ็กซ์ซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันทุกประเทศให้ความสำคัญกับการพัฒนาด้านการวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์และนาโนเทคโนโลยีเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการแก้ปัญหาด้านสุขภาพ พลังงานและสิ่งแวดล้อม ซึ่งมีผลกระทบต่อเศรษฐกิจและการแข่งขันของประเทศ นาโนเทคโนโลยีเป็นเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการผลิตและการประยุกต์ใช้สารที่มีขนาดเล็กซึ่งในปัจจุบันมีบทบาทสำคัญมากต่อมนุษย์ทั้งทางตรงและทางอ้อมและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นอีกในอนาคต นาโนเทคโนโลยีเกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดการ การสร้าง การวิเคราะห์ วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องจักร ผลิตภัณฑ์ การออกแบบเครื่องมือเพื่อใช้สร้างหรือวิเคราะห์วัสดุในระดับที่เล็กมาก ส่งผลให้โครงสร้างของวัสดุหรืออุปกรณ์มีคุณสมบัติพิเศษขึ้นและสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ในที่นี้จะทำการสังเคราะห์เส้นใยนาโนด้วยซิงค์ออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์มีประโยชน์มากในหลายๆด้านเช่นในด้านอิเล็กทรอนิกส์หรืออุปกรณ์ตรวจจับแก๊สหรือในทางการแพทย์ที่กำลังเป็นที่น่าสนใจอยู่ในตอนนี้ ซิงค์ออกไซด์เป็นสารที่ใช้ยับยั้งแบคทีเรีย (Anti-bacteria) ไม่มีพิษต่อร่างกาย นอกจากฆ่าแบคทีเรียแล้วยังช่วยป้องกันและยับยั้งการแบ่งเซลล์ของแบคทีเรียได้ ด้วยเหตุผลนี้ ซิงค์ออกไซด์จึงเป็นส่วนหนึ่งในการเป็นยาต้านแบคทีเรียและสามารถป้องกันรังสี UV-A ,UV-B และช่วยระงับกลิ่นอันไม่พึงประสงค์ได้อีกด้วยซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้จะเลือกใช้วิธีการสังเคราะห์เส้นใยนาโนโดยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง (Electrospinning) หรือการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เพราะเป็นวิธีที่ง่ายไม่ยุ่งยาก มีค่าใช้จ่ายน้อย สามารถใช้งานได้สะดวก และสามารถผลิตเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระดับนาโนเมตรถึงหลายไมโครเมตรได้

### 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการทำงานการสังเคราะห์เส้นใยนาโนไฟเบอร์ซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง

1.2.2 เพื่อทำการสังเคราะห์เส้นใยนาโนไฟเบอร์ซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง

1.2.3 เพื่อทำการวิเคราะห์สมบัติของเส้นใยนาโนไฟเบอร์ซิงค์ออกไซด์

### 1.3 ขอบเขตการทำงาน

- 1.3.1 ศึกษาหลักการการทำงานของเทคนิคอิเล็กโตรสปีนนิ่ง
- 1.3.2 เพื่อสังเคราะห์เส้นใยนาโนไฟเบอร์ซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปีนนิ่ง
- 1.3.3 ทำการหาเงื่อนไขในการสังเคราะห์เพื่อควบคุมสมบัติของเส้นใยนาโน
- 1.3.4 ตรวจสอบวิเคราะห์สมบัติของเส้นใยนาโนด้วยเทคนิค SEM, EDX

### 1.4 ขั้นตอนในการวิจัย

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนในการวิจัย

ช่วงเวลา	ขั้นตอนในการดำเนินงาน
ส.ค – ธ.ค พ.ศ.2557	<ul style="list-style-type: none"> <li>– ศึกษาหลักการการทำงานของเครื่องอิเล็กโตรสปีนนิ่ง</li> <li>– ศึกษาวิธีการผสมสารละลายก่อนนำไปสังเคราะห์เป็นเส้นใยนาโน</li> </ul>
ม.ค – ก.พ พ.ศ.2558	เตรียมสารละลายซิงค์ออกไซด์เพื่อทำการสังเคราะห์เป็นเส้นใยนาโน
มี.ค – เม.ย พ.ศ.2558	<ul style="list-style-type: none"> <li>– วิเคราะห์สมบัติเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค SEM, EDX</li> </ul>
พ.ค – มิ.ย พ.ศ.2558	<ul style="list-style-type: none"> <li>– วิเคราะห์ผลที่ได้และสรุปผลโครงการพิเศษ</li> </ul>

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทำให้ทราบถึงหลักการการทำงานของเทคนิคอิเล็กโตรสปีนนิ่ง
- 1.5.2 สามารถสังเคราะห์เส้นใยนาโนไฟเบอร์ซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปีนนิ่งได้
- 1.5.3 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยี
- 1.5.4 มีความรู้ความสามารถในการแก้ปัญหาที่เกี่ยวกับโครงการนี้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 เส้นใยนาโน

เส้นใยนาโนเป็นโครงสร้างนาโนของวัสดุสังเคราะห์ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยของของแข็งที่อยู่ในกลุ่มของสารอินทรีย์และมีขนาดเล็กระดับนาโนเมตร โดยเส้นใยนาโนนี้ต้องเป็นเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงระหว่าง 1 - 100 นาโนเมตร โดยมากแล้วโครงสร้างวัสดุต่างๆที่อยู่ในลักษณะของเส้นใยจะเป็นลักษณะของโครงสร้างพื้นฐาน ที่ทำให้เกิดโครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวที่มีความจำเพาะสูงคือเป็นพื้นที่ผิวที่ทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ได้เป็นอย่างดีอย่างเช่น เป็นโครงสร้างที่มีความสามารถในการยืดหยุ่นได้ดี มีความแข็งแรงและความทนทานที่สูงขึ้นซึ่งสามารถที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลายด้าน เส้นใยนาโนสังเคราะห์ที่มีการสังเคราะห์ขึ้นมา นั้น โดยมากจะถูกสังเคราะห์เพื่อนำมาใช้งานด้วยคุณสมบัติพิเศษทางด้านการนำไฟฟ้าและคุณสมบัติเชิงกลของโครงสร้างนี้ เช่นการสังเคราะห์เส้นใยนาโนพอลิเมอร์อิลีคทรอนิกส์ เพื่อนำมาใช้ในการผลิตและสร้างอุปกรณ์ระดับนาโนทางอิลีคทรอนิกส์ต่างๆเช่นการใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าสร้างตัวเก็บประจุ ทรานซิสเตอร์ ไดโอด และนำมาใช้งานทางด้านเทคโนโลยีการเก็บข้อมูลหรือใช้ในระบบการส่งผ่านข้อมูลเช่น การสร้างหน่วยความจำและชิปสำหรับคอมพิวเตอร์และการสังเคราะห์เส้นใยวัสดุผสมระดับนาโน เพื่อนำมาใช้เตรียมหน่วยโครงสร้างพื้นฐานสำหรับการสร้างอุปกรณ์และโครงสร้างทางอิลีคทรอนิกส์ที่มีคุณสมบัติพิเศษที่สามารถตอบสนองความต้องการในการใช้งานของมนุษย์ได้ เช่น การนำมาใช้งานทางด้านเทคโนโลยีทางด้านการแปลงรูปพลังงานและการกักเก็บพลังงาน เช่น แบตเตอรี่หรือในเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell) หรือใช้เป็นส่วนผสมในเชิงโครงสร้างสำหรับใช้งานในเทคโนโลยีการบินทั้งในอากาศและในอวกาศหรือแม้กระทั่งประยุกต์ใช้สำหรับระบบการขนส่งยาและเกี่ยวกับประโยชน์ทางวิศวกรรมเนื้อเยื่อ เป็นต้น

### 2.2 การผลิตเส้นใยระดับนาโน

นาโนไฟเบอร์ที่มีการนำไปใช้ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของผืนเส้นใยที่ไม่ได้ทอ (Nonwoven nanofiber) แต่ก็ยังมีนาโนไฟเบอร์อีกหลายลักษณะ เช่น นาโนไฟเบอร์ที่มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยไปในทิศทางเดียวกัน (Aligned nanofiber) หรืออยู่ในลักษณะของเส้นด้าย (Yarn nanofiber) เป็นต้น ซึ่งรูปแบบต่างๆ ของนาโนไฟเบอร์นั้นขึ้นกับกระบวนการผลิต กระบวนการผลิตนาโนไฟเบอร์มีหลายวิธี ได้แก่

#### 2.2.1 Drawing

#### 2.2.2 Template Synthesis

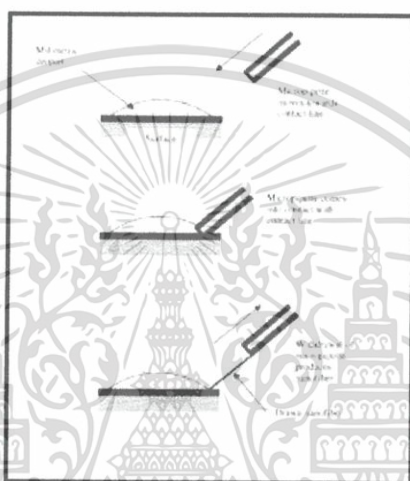
#### 2.2.3 Phase Separation

#### 2.2.4 Self-Assembly

#### 2.2.5 Electrospinning

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

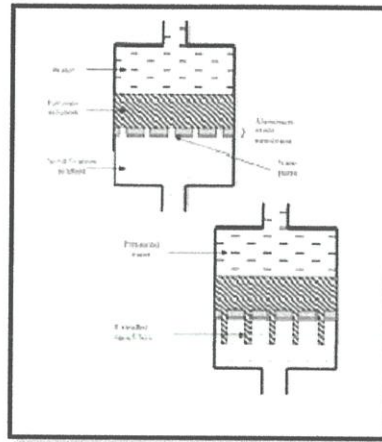
2.2.1 Drawing เป็นกระบวนการผลิตนาโนไฟเบอร์ที่ค้นพบโดย Ondarcuhu and Joachim ในปี 1998 วิธีการคือ หยดสารละลายของ sodium citrate ใน chloroauric acid ในขนาดไมโครเมตรใช้ ไมโครปิเปต จุ่มลงในหยดของสารใกล้กับ contact line จากนั้นดึงไมโครปิเปต ออกอย่างรวดเร็วโดยใช้ความเร็วประมาณ  $1 \times 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$  นาโนไฟเบอร์จะถูกดึงออกมา พร้อมๆ กับการระเหยไปของตัวทำละลาย เทคนิคนี้ จะต้องมีการทำซ้ำหลายครั้งจึงจะได้นาโนไฟเบอร์ใน ปริมาณที่มากพอต่อการนำไปใช้ ระบบจึงไม่สามารถทำได้อย่างต่อเนื่อง ในกระบวนการ drawing จะต้องใช้วัสดุที่มี viscoelastic เพียงพอต่อการเปลี่ยนรูปร่างในระหว่างการดึงโดยเทคนิคนี้มักจะ เรียกได้อีกอย่างว่า dry spinning at a molecular level



รูปที่ 2.1 Drawing

2.2.2 Template Synthesis เป็นกระบวนการผลิตนาโนไฟเบอร์ที่ใช้ แม่พิมพ์ที่ ประกอบด้วยรูที่มีขนาดในระดับนาโนเมตรFengและคณะปี2002ใช้Polyacrylonitrileละลายใน Dimethylformamide นำมาผ่านแม่พิมพ์เส้นผ่านศูนย์กลางระดับนาโนเมตร ภายใต้แรงดันน้ำ สารละลายพอลิเมอร์จะออกมาเป็นเส้นใยขนาดนาโนเมตร เข้าสู่ solidifying solution กระบวนการนี้ลักษณะเส้นใยที่ได้จะเป็นรูปท่อหรือหลอด ที่มีลักษณะไม่ต่อเนื่องจึงเป็นวิธีที่ไม่ได้รับความนิยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

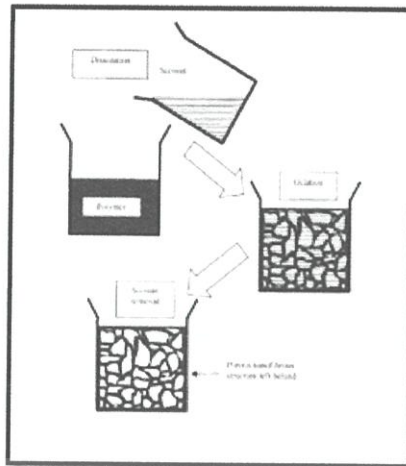


รูปที่ 2.2 Template synthesis

2.2.3 Phase separation ในกระบวนการนี้ มีหลักการคือพอลิเมอร์จะละลายในตัวทำละลายที่ละลายพอลิเมอร์ได้ทีก่อนและจึงเปลี่ยนตัวทำละลายที่พอลิเมอร์นั้นละลายได้ไม่ตึงไปทำให้เกิดเป็นนาโนไฟเบอร์ขึ้น Ma and Zhang ค.ศ.1999 ได้ทำการศึกษา แบ่งกระบวนการออกเป็น

1. Polymer dissolution ละลาย Poly (L-lactic) acid PLLA ใน THF (tetrahydrofuran) คนที่  $60^{\circ}\text{C}$  2 ชั่วโมง
2. Gelation เท 2 ml ของสารละลาย  $50^{\circ}\text{C}$  ใน Teflon vial ย้ายไปเก็บที่อุณหภูมิ  $-18^{\circ}\text{C}$  ถึง  $45^{\circ}\text{C}$  ทำให้เกิดการฟอร์มเจล
3. Solvent extraction นำ vial ที่มีเจลจุ่มลงในน้ำกลั่น ทำให้เกิดการแยกวัฏภาคเป็นเวลา 2 วัน
4. Freezing นำเจลออกจากน้ำกลั่นบนกระดาษกรองให้แห้งนำไปไว้ที่อุณหภูมิ  $-18^{\circ}\text{C}$  เป็น เวลา 2 ชั่วโมง
5. Freezing dry นำเจลไป freeze-dried ที่  $-55^{\circ}\text{C}$  ใน vacuum

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 Phase separation

2.2.4 Self-Assembly กระบวนการผลิตนาโนไฟเบอร์ที่เกิดขึ้นได้เองจากสภาวะที่เหมาะสม โดยใช้โมเลกุลขนาดเล็ก เป็นพื้นฐานในการสร้างนาโนไฟเบอร์ เมื่อมีโมเลกุลมากขึ้นทำให้เกิดแรงระหว่างกันเกิดการจัดเรียงตัวดังรูป Zhang ซึ่งเป็นหนึ่งในทีมวิจัยได้ศึกษาเกี่ยวกับประโยชน์ต่าง ๆ ของสาย เปปไทด์ที่สามารถประกอบตัวเองได้ (Peptide self assembling) จนกระทั่งในปี 1991 ได้ค้นพบด้วยความบังเอิญว่า เมื่อสายเปปไทด์อยู่ในสารละลายน้ำเกลือ จะเกิดการจับกันเป็นโครงร่าง โดยมีอัตราส่วนของโครงร่าง คือ เป็นน้ำ 99% และ 1% เป็นสายเปปไทด์ สายเปปไทด์นี้ประกอบด้วยกรดอะมิโน 3 ชนิดคือ อาร์จินีน (Argenine), อะลานีน (Alanine) และ กรดกลูตามิก (Glutamic acid) 16 โมเลกุลเรียงเข้าไปมาและมีโครงร่างแบบเบต้าชีส



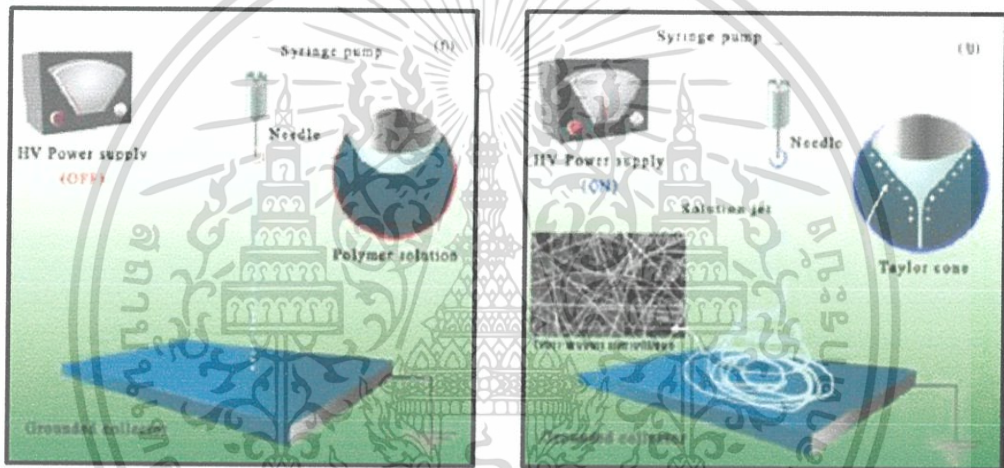
รูปที่ 2.4 Self assembly

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 Electrospinning เป็นกระบวนการที่อาศัยแรงทางไฟฟ้าที่เกิดจากศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง โดยประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วนคือ แหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง (High voltage power supply) หลอดบรรจุสารละลายที่ติดเข็มโลหะ (syringe with needle) และวัสดุรองรับที่เป็นโลหะ (metal collector) เป็นระบบที่มีความซับซ้อนน้อยต้นทุนต่ำ สามารถควบคุมขนาดและปริมาณการเกิดเส้นใยได้ต่อเนื่องมากยิ่งขึ้น

หลักการทำงาน Electrospinning

หลักการทำงานของอิเล็กโทรสปินนิ่งอาศัยแรงทางไฟฟ้าที่เกิดจากศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง (High voltage power supply) ในการทำให้เกิดแรงดึงของสารละลายที่บรรจุอยู่ในหลอดบรรจุสารละลายที่ติดเข็มโลหะ (syringe with needle) เพื่อให้เส้นใยตกลงบนวัสดุรองรับที่เป็นโลหะ (metal collector) ซึ่งเป็นอีกด้านหนึ่งของขั้วไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.5 แสดงหลักการการทำงานของ ES



รูปที่ 2.5 หลักการทำงานของ ES

(ก) ช่วงก่อนการให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง (ข) ให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงที่มีความพอแก่ระบบจนเกิดเส้นใย

จากรูปที่ 2.5 แสดงหลักการการทำงานของ ES (ก) เมื่อยังไม่ให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงแก่ระบบ อิเล็กโทรสปินนิ่ง จะไม่พบการเกิดขึ้นของเส้นใยนาโน แต่พบว่าที่บริเวณปลายเข็มโลหะซึ่งติดอยู่กับหลอดบรรจุสารละลายมีสารละลายจำนวนหนึ่งรวมตัวกันเป็นหยดรูปร่างครึ่งทรงกลม ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากแรงตึงผิว (surface tension) แต่เมื่อให้แรงดันไฟฟ้ากำลังสูงแก่ระบบ ดังรูปที่ 2.5 แสดงหลักการการทำงานของ ES (ข) จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าครอบคลุมตรงส่วนปลายเข็มของโลหะและมีประจุเกิดขึ้นในทิศตรงกันข้ามกับแรงตึงผิว เกิดแรงผลักทางไฟฟ้าส่งผลให้รูปร่างครึ่งทรงกลมของสารละลายที่อยู่ปลายเข็มยืดออกเป็นรูปร่างทรงกรวยที่เรียกว่า กรวยเทย์เลอร์ (Taylor's cone) และเมื่อสนามไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบมีค่าเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่งจะเกิดแรงผลักให้สารละลายพุ่งออกมาเป็นลา (solution jet) ต่อมาลาของสารละลายนี้จะยืดออกจนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กถึงระดับนาโนเมตรแล้วตกลงบนวัสดุรองรับในลักษณะที่ไม่เกิดการถักทอ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(nonwoven nanofibers) หรือเป็นเพียงการวางเรียงตัวซ้อนกันเป็นชั้นๆ ในระหว่างที่เส้นใยถูกดึงออกมาจากปลายเข็มโลหะ จะเกิดปรากฏการณ์การบิดโค้งที่ไม่มีเสถียรภาพ (bending instability) สารละลายจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ผิวของสารละลาย และด้วยสนามไฟฟ้าภายนอกที่เกิดขึ้นเนื่องจากความต่างศักย์ระหว่างปลายเข็มถึงวัสดุรองรับที่เป็นตัวนำทั้งสอง จึงส่งผลให้เกิดลำของประจุขึ้น เกิดเป็นแรงที่ไม่สมดุล (unbalance force) ทำให้สารละลายยืดออกในเส้นทางที่ซับซ้อน ส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยลดลงอย่างมาก และยังรอบการบิดโค้งมีจำนวนมากขึ้น จะทำให้สารละลายยืดออกเป็นเส้นที่เล็ก รวมกับการระเหยออกไปของตัวทำละลาย ในที่สุดเกิดเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับนาโนได้ ในโครงการพิเศษนี้ใช้เทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่งเนื่องจากเป็นระบบที่มีความซับซ้อนน้อย ต้นทุนต่ำ และสามารถควบคุมขนาดและปริมาณการเกิดเส้นใยได้ต่อเนื่องมากยิ่งขึ้น

## 2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะและขนาดของเส้นใยนาโน

ปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อลักษณะและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิ่ง สามารถแบ่งตัวแปรที่สำคัญได้ 3 กลุ่ม คือ

2.3.1 ตัวแปรด้านสารละลาย สมบัติของสารละลายเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์เส้นใยนาโนด้วยวิธีอิเล็กโทรสปินนิ่งเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งขนาดและรูปร่างของเส้นใย

2.3.1.1 ความหนืดของสารละลาย (solution viscosity) ถ้าสารละลายมีความหนืดน้อย โมเลกุลของตัวทำละลาย ที่ไม่ได้จับกับโมเลกุลของพอลิเมอร์จะมีความหนาแน่นมาก ส่งผลให้จับตัวกันเป็นก้อนทรงกลม ลักษณะคล้ายเม็ดลูกบิด ที่เรียกว่า บีดส์ เนื่องจากแรงตึงผิว แต่ในกรณีที่สารละลายมีความหนืดมาก จะเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของตัวทำละลายกับโมเลกุลของพอลิเมอร์มากขึ้น ส่งผลให้สารละลายยืดออกดีขึ้นและลดการเกิดบีดส์ลงได้ แต่ถ้าสารละลายมีความหนืดมากเกินไป จะเกิดการแห้งตัวอย่างรวดเร็วที่ปลายเข็มโลหะทำให้เข็มอุดตันได้

2.3.1.2 ความเข้มข้นของสารละลาย (solution concentration) ถ้าใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นมากขึ้น จะได้เส้นใยที่มีบีดส์หรือหยดขนาดเล็กลดลง ดังรูปที่ 2.8 แต่ถ้าความเข้มข้นของสารละลายมีค่ามากไป จะลดปรากฏการณ์การบิดโค้งที่ไม่มีเสถียรภาพ ส่งผลให้เส้นทางการเคลื่อนที่ของสารละลายลดลง จะทำให้เส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้น

2.3.1.3 สภาพการนำไฟฟ้า (conductivity) เนื่องจากการยืดออกเป็นเส้นของสารละลาย ส่วนหนึ่ง เป็นผลของประจุที่ผิวของสารละลาย ดังนั้นถ้าสารละลายมีสภาพการนำไฟฟ้าที่ดีจะส่งผลให้มีประจุเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้การเพิ่มสภาพนำไฟฟ้าอาจทำได้โดยการเติมไอออน (ion) ลงในสารละลายซึ่งจะมีส่วนให้สารละลายยืดออกได้ดีขึ้นและช่วยลดการเกิดบีดส์ในเส้นใยอีกด้วย

2.3.1.4 ค่าไดอิเล็กตริก (dielectric constant) ค่าไดอิเล็กตริกของตัวทำละลาย มีนัยสำคัญต่อกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิ่ง ในแง่ที่ว่าหากสารละลายมีสมบัติทางไดอิเล็กตริกสูงจะช่วยลดการเกิดบีดส์และขนาดของเส้นใยลงได้ ดังนั้นอาจเติมตัวทำละลายที่มีค่าไดอิเล็กตริกสูง เช่น ไดมethylฟอมาไมด์ (N, N-Dimethylformamide) ลงในสารละลายเพื่อเพิ่มสมบัติทางไดอิเล็กตริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาตราหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังพบว่าถ้าไดอิเล็กตริกมีค่าสูงจะส่งผลให้การบิดโค้งที่ไม่มีเสถียรภาพเกิดเพิ่มมากขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มพื้นที่การเกิดเส้นใยบนวัสดุรองรับ

**2.3.2 ตัวแปรในระบบ** ปัจจัยที่สำคัญมากอีกกลุ่มหนึ่งในกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่ง คือ ตัวแปรของระบบที่ใช้สังเคราะห์เส้นใย โดยตัวแปรกลุ่มนี้ล้วนมีผลต่อลักษณะของเส้นใยแต่ส่งผลน้อยกว่าตัวแปรในกลุ่มด้านสารละลาย เช่น

**2.3.2.1 แรงดันไฟฟ้า (voltage)** โดยส่วนใหญ่หากแรงดันไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้ขนาดของเส้นใยเล็กลง รวมทั้งมีส่วนทำให้ตัวทำละลายระเหยได้เร็วขึ้น

**2.3.2.2 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเข็มโลหะ (diameter of needle)** ถ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มเล็กลง พบว่าขนาดของเส้นใยจะเล็กลงด้วย เนื่องจากความตึงผิวของหยดสารละลายมากขึ้น ทำให้ระยะเวลาที่เส้นใยยึดออกก่อนตกลงบนวัสดุรองรับมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเข็มที่มีขนาดเล็กเกินไปอาจไม่สามารถทำให้สารละลายไหลออกมาได้

**2.3.2.3 วัสดุรองรับ (collector)** เนื่องจากกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่งต้องอาศัยสนามไฟฟ้าระหว่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับ ดังนั้นวัสดุรองรับควรมีสสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า เช่น แผ่นทองแดง

**2.3.2.4 อุณหภูมิของสารละลาย (Temperature)** ถ้าอุณหภูมิของสารละลายสูงจะเพิ่มอัตราการระเหยให้สูงขึ้น สารละลายมีความหนืดน้อยลงและพอลิเมอร์ละลายในตัวทำละลายได้ดีขึ้น ส่งผลให้สารละลายยึดออกได้ง่ายและทำให้ขนาดของเส้นใยนาโนเล็กลงอีกด้วย

**2.3.2.5 อัตราการไหลของสารละลาย (feed rate)** ถ้าอัตราการไหลมีความมากจะทำให้เส้นใยและบิดมีขนาดใหญ่มากขึ้นแต่ทั้งนี้การเพิ่มอัตราการไหลจะช่วยให้เส้นใยมีขนาดใหญ่อขึ้นระดับหนึ่งเท่านั้น เนื่องจากปริมาณสารละลายจะออกมามากเกินไป ส่งผลให้ตัวทำละลายระเหยออกไม่ทันดังนั้นเส้นใยที่ได้จะมีลักษณะเป็นหยด

**2.3.2.6 ระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ (distance between tip and collector)** ถ้าระยะห่างมีค่ามากขึ้น เส้นใยจะมีขนาดเล็กเพราะลำของสารละลายมีเวลาในการยึดออกนานมากขึ้น แต่ในบางกรณีเมื่อเพิ่มระยะห่างแต่ขนาดของเส้นใยมีค่ามากขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากสนามไฟฟ้ามีค่าน้อยลงทำให้แรงที่ทำให้สารละลายยึดออกนั้นน้อยลงอย่างไรก็ตาม หากระยะห่างมากเกินไปจะไม่เกิดเส้นใยขึ้นบนวัสดุรองรับ ดังนั้นการเพิ่มระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ สามารถทำได้เพียงระดับหนึ่งเท่านั้น

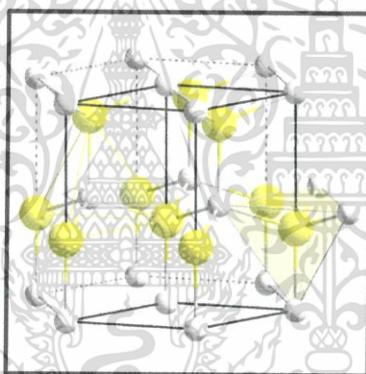
**2.3.3 สภาพแวดล้อม** ปัจจัยในกลุ่มนี้ ผลจากสภาพแวดล้อมมีผลต่อสารละลายและทำให้ลักษณะเส้นใยเปลี่ยนไป เช่น ความชื้น (humidity) ในกรณีที่มีความชื้นสูงจะเกิดปรากฏการณ์คล้ายกับการควบแน่นเป็นหยดน้ำบนผิวของเส้นใย ทำให้ลักษณะของเส้นใยมีการเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะพอลิเมอร์ที่ละลายในตัวทำละลายที่ระเหยได้ ความชื้นสูงจะทำให้เกิดรูพรุนบนเส้นใยในปริมาณที่มากขึ้น เส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 สารประกอบ ZnO

### 2.4.1 สมบัติของสารซิงก์ออกไซด์ (Zinc oxide; ZnO )

เนื่องจากสารซิงก์ออกไซด์มีโครงสร้างเป็นแบบเฮกซะโกนอล ในบางครั้ง การอธิบายระนาบของสารซิงก์ออกไซด์ด้วยระบบ (hkl) นั้น ไม่สามารถอธิบายได้ดี เพราะเวกเตอร์ a และเวกเตอร์ b ในการบอกทิศทางในผลึกไม่อยู่ในทิศของแกน x หรือ y โดยที่ a และ b ทำมุมกัน 120 องศา ดังนั้นจึงเป็นเหตุทำให้การอธิบายระนาบในโครงสร้างเฮกซะโกนอลจำเป็นต้องใช้ตัวแปรถึง 4 ตัว คือเพิ่มตัวแปร i โดยที่  $i = -(h+k)$  ซึ่งจะเขียนเป็นระบบ (hkil) ยกตัวอย่างเช่น ระนาบ (1 10) เป็น (1 1-2 0) เป็นต้น ซึ่งระบบ (hkil) จะมีประโยชน์อย่างมากในการใช้อธิบายโครงสร้างของผลึกเกี่ยวกับการวิเคราะห์หาระนาบที่เท่ากันแต่ระบบ (hkl) ต่างกัน ยกตัวอย่างระนาบ (110) เมื่อใช้ระบบ (hkl) จะสามารถหาระนาบอื่นๆ ได้คือ (110) และ (-1-10) แต่เมื่อใช้ระบบ (hkil) แล้วจะได้ระนาบ(11-20) (-1-120) (2-1-10) (-2110) (-12-10) (1-210) เป็นต้น จะเห็นว่า ระบบ (hkil) ใช้อธิบายได้หลากหลายกว่า ซึ่งจะใช้วิเคราะห์เส้นเข็มขัดนาโนซิงก์ออกไซด์



รูปที่ 2.6 โครงสร้างสารซิงก์ออกไซด์

เนื่องจาก ซิงก์ออกไซด์ ( Zinc oxide; ZnO ) เป็นสารกึ่งตัวนำแถบพลังงานกว้างคือ จะมีค่าพลังงานของแถบพลังงานมากกว่า 3.3 eV ขึ้นไปซึ่งอุปกรณ์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำช่องว่างแถบพลังงานกว้าง (Wide band gap semiconductor) นี้จะมีประสิทธิภาพสูงมาก ในงานที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิสูงๆ(High temperature) และกำลังสูงๆ (High power) เนื่องจากมีช่องว่างแถบพลังงานที่กว้างจึงสามารถประยุกต์ใช้ในอุณหภูมิที่สูงๆดีกว่าสารกึ่งตัวนำ ที่ไม่ใช่ แถบพลังงานกว้าง(Wide band gap) ค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมีความสัมพันธ์กับค่าความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) ตามสมการดังนี้

$$E_g = hc / \lambda \text{ หรือ } E_g \text{ (eV)} = 1240 / \lambda \text{ (in nm)} \dots\dots (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ Eg คือ พลังงานของช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap energy)

C คือ ความเร็วของแสง (Velocity of light)

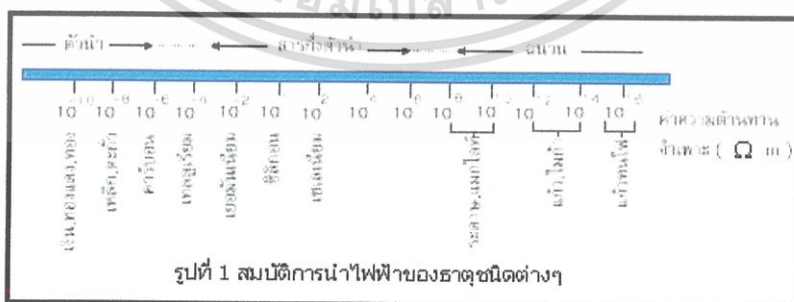
h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck constant)

$\lambda$  คือ ค่าความยาวคลื่นที่ปล่อยออกมา (Emitted wavelength)

จากสมการจะเห็นได้ว่า สารกึ่งตัวนำช่องว่างแถบพลังงานกว้างก็เปล่งแสงในช่วงความยาวคลื่นสั้น เช่น แสงสีฟ้า เป็นต้น ซึ่งสารซิงก์ออกไซด์ (ZnO) จะมีค่าช่องว่างแถบพลังงาน ที่ทำให้เปล่งแสงออกมาในช่วงความยาวคลื่นสั้น ดังนั้น ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) จึงได้รับความสนใจในการนำมาประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่เปล่งแสงความยาวคลื่นสั้น นอกจากนี้แล้วสารซิงก์ออกไซด์ (ZnO) ยังถูกนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆอีก เช่น ทางด้านแสง (Optical) และอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic) เช่น ในอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าจากแสง (Solar cells), ตัวนำโปร่งใส (Transparent conductor), จอแสดง (Displays), Varistors, UV Detectors และอุปกรณ์ปล่อยแสง (Light emitters) เป็นต้น

#### 2.4.2 สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)

สารกึ่งตัวนำเป็นสารที่มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวน เช่น ซิลิกอน เยอรมันเนียม เทลลูเรียม เป็นต้น สารดังกล่าวเหล่านี้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ คือมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระอยู่น้อยจึงไม่สามารถให้กระแสไฟฟ้าไหลเป็นจำนวนมาก ฉะนั้นลำพังสารน้อยอย่างเดียวแล้วไม่สามารถทำประโยชน์อะไรได้มากนัก ดังนั้น เพื่อให้จะได้กระแสไฟฟ้าไหลเป็นจำนวนมากเราจึงต้องมีการปรุงแต่งโดยการเจือปนอะตอมของธาตุอื่นลงไปเนื้อสารเนื้อเดียวเหล่านี้ หรือเอาอะตอมของธาตุบางชนิดมาทำปฏิกิริยากันให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ สารกึ่งตัวนำที่สร้างขึ้นโดยวิธีดังกล่าวนี้เรียกว่า สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ หรือสารกึ่งตัวนำแบบสารประกอบตามลำดับ ซึ่งจะเป็นสารที่ใช้ทำทรานซิสเตอร์ และไดโอดชนิดต่างๆสำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีเฉพาะอะตอมของธาตุชนิดเดียว คือไม่มีอะตอมของธาตุชนิดอื่นปนอยู่เลยแสดงดังรูป



รูปที่ 2.7 สมบัติการนำไฟฟ้าของธาตุชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

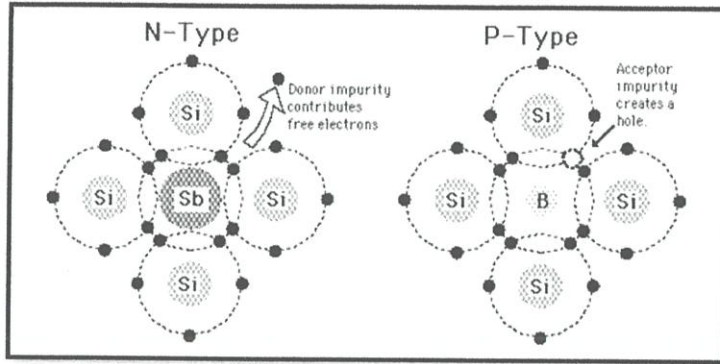
2.4.2.1 สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ คือ ธาตุกึ่งตัวนำที่ยังไม่ได้เติมสารเจือปน (Doping) ใดๆ ลงไป ธาตุกึ่งตัวนำที่นิยมนำไปทำเป็นสารกึ่งตัวนำในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์คือ ธาตุกึ่งตัวนำซิลิกอน และ ธาตุกึ่งตัวนำเยอรมันเนียม ธาตุทั้งสองชนิดนี้จะมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว แต่อิเล็กตรอนทั้งหมดจะไม่เท่ากัน โดยซิลิกอนจะมีอิเล็กตรอนทั้งหมด 14 ตัว ส่วนเยอรมันเนียมจะมีอิเล็กตรอนทั้งหมด 32 ตัว ต่อหนึ่งอะตอม โครงสร้างอะตอมของธาตุซิลิกอน และโครงสร้างอะตอมของธาตุเยอรมันเนียม เมื่ออยู่รวมกันหลายๆ อะตอมจะจับกันเป็นผลึกในรูปของพันธะโควาเลนต์ (Covalence Bond) ดังนั้นหนึ่งอะตอมจะต้องใช้อิเล็กตรอนร่วมกันกับอะตอมข้างเคียง 4 อะตอม จึงจะมีอิเล็กตรอนวงนอกสุดครบ 8 ตัว เพื่อให้อะตอมอยู่ในสภาพเสถียร

2.4.2.2 สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ คือการนำเอาธาตุซิลิกอนหรือธาตุเยอรมันเนียมบริสุทธิ์มาเติมเจือปนลงไป โดยใช้ธาตุเจือปนที่มีอิเล็กตรอนวงนอกสุด 3 ตัว หรือธาตุเจือปนที่มีอิเล็กตรอนวงนอกสุด 5 ตัว ลงไปในอัตราส่วน 108: 1 คือธาตุกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ 108 ส่วนต่อสารเจือปน 1 ส่วน ซึ่งจะทำให้ได้สารกึ่งตัวนำใหม่ขึ้นมา คือถ้าเติมธาตุเจือปนที่วาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัวลงไป ตัวนำชนิดเอ็น แต่ถ้าเติมธาตุเจือปนที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว ลงไปจะได้สารกึ่งตัวนำชนิดพีธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว ที่นำมาใช้เป็นธาตุเจือปนเช่น โบรอน อินเดียม แกลเลียม และอลูมิเนียม ส่วนธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัวที่นำมาใช้เป็นธาตุเจือปน เช่น ฟอสฟอรัส อาเซนิก

2.4.2.3 สารกึ่งตัวนำชนิด P และ ชนิด N สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic Semiconductor) จะมีสภาพการนำ ไฟฟ้าที่ไม่ดี เพราะอิเล็กตรอนวงนอกจะจับตัวรวมกัน โดยใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน เพื่อให้เกิดภาวะเสถียร เสมือนมีอิเล็กตรอนวงนอก 8 ตัวจึงไม่เหมาะต่อการใช้งาน ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงมีการเติมสารอื่นเข้าไป เพื่อให้เกิดสภาพนำ ไฟฟ้าที่ดีกว่าเดิมเหมาะกับการใช้งาน โดยการเติมสารหรือที่เรียกกันทับศัพท์ว่าการโด๊ป (Doping) สารนั้น จะมีได้ 2 ลักษณะ

1. เติมสารที่มีอิเล็กตรอนวงนอก 3 ตัว เช่น อลูมิเนียม หรือแกลเลียม ลงไป ทำให้เกิดสภาวะขาดอิเล็กตรอนคือจะมีที่ว่างของอิเล็กตรอนซึ่งเรียกว่า โฮล (Hole) มากกว่าจำนวนอิเล็กตรอนอิสระ ด้วยเหตุที่โฮลมีสภาพเป็นประจุไฟฟ้าบวกและเป็นพาหะส่วนใหญ่ของสาร ส่วนอิเล็กตรอนจะเป็นพาหะส่วนน้อยเราจึงเรียกสารกึ่งตัวนำ ประเภทนี้ว่า สารกึ่งตัวนำชนิด P(P-type Semiconductor)
2. เติมสารที่มีอิเล็กตรอนวงนอก 5 ตัว เช่น สารหนู หรือฟอสฟอรัส ลงไป ทำให้เกิดสภาวะมีอิเล็กตรอนอิสระมากกว่าจำนวนของโฮล ด้วยเหตุที่อิเล็กตรอนมีประจุไฟฟ้าลบและเป็นพาหะส่วนใหญ่ ส่วนโฮลเป็นพาหะส่วนน้อยของสารเราจึงเรียกว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด N (N-type Semiconductor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 สารกึ่งตัวนำชนิด N และ ชนิด P

2.4.2.4 รอยต่อ PN เมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิด P และ สารกึ่งตัวนำชนิด N มาเชื่อมต่อกัน จะเกิดการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลบริเวณใกล้รอยต่อนั้น โดยอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิด N จะรวมตัวกับโฮลของสารกึ่งตัวนำชนิด P ทำให้อะตอมบริเวณรอยต่อของสารกึ่งตัวนำชนิด N จะขาดอิเล็กตรอนไปเกิดเป็นสภาวะเป็นประจุไฟฟ้าบวก ซึ่งจะต้านการเคลื่อนที่ของโฮล ในขณะที่อะตอมบริเวณรอยต่อของสาร P จะมีอิเล็กตรอนเกินมาทำให้มีประจุไฟฟ้าลบซึ่งจะผลักอิเล็กตรอนอิสระที่จะวิ่งเข้ามาทางฝั่งของสาร P ดังรูป

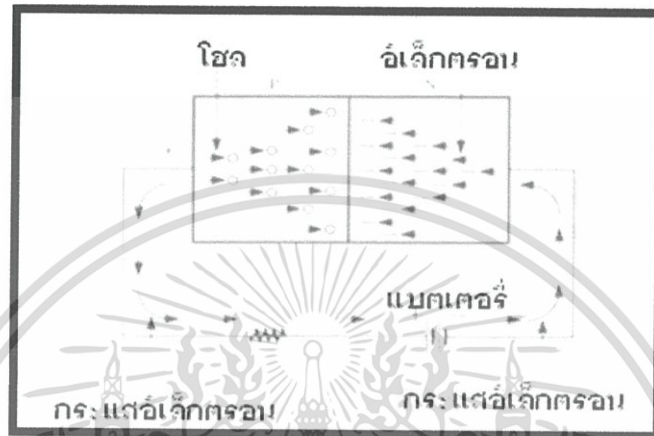


รูปที่ 2.9 โครงสร้างรอยต่อ P-N ของสารกึ่งตัวนำ

บริเวณดังกล่าว จึงเป็นบริเวณปลอดพาหะ (Depletion Region) โดยจะเสมือนกำแพงกั้นไม่ให้ อิเล็กตรอน และโฮลของอะตอมอื่นๆ ภายในสารกึ่งตัวนำมารวมกัน ถ้าต้องการให้พาหะทั้งสองฝั่งมารวมตัวกัน จะต้องให้แรงดันไฟฟ้า แก่สารให้มากกว่าระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากประจุบริเวณ รอยต่อ โดยถ้าเป็นสารกึ่งตัวนำที่ทำมาจากซิลิกอน ระดับแรงดันดังกล่าวจะอยู่ประมาณ 0.7 โวลต์ และในกรณีสารกึ่งตัวนำที่ทำมาจากเยอรมันเนียม ระดับแรงดันดังกล่าวจะมีค่าต่ำกว่า โดยจะมี ค่าประมาณ 0.3 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.5 การไบแอสรอยต่อ PN เมื่อเราจ่ายแรงดันให้แก่สารในลักษณะ ต่อขั้วบวกของแบตเตอรี่เข้ากับสารกึ่งตัวนำชนิด P และต่อขั้วลบเข้ากับสารกึ่งตัวนำชนิด N จะทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานเพิ่มมากขึ้น โดยถ้าแรงดันแบตเตอรี่ที่จ่ายมีระดับแรงดันสูงกว่าแรงดันต้านกลับบริเวณรอยต่อ ก็จะทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงพอ ที่จะข้ามมายังฝั่งตรงข้ามได้ เกิดมีกระแสไฟฟ้าไหลเราเรียกการต่อแรงดันในลักษณะนี้ว่าการไบแอสตรง (Forward Bias) ดังรูป



รูปที่ 2.10 การไบแอสตรง

ในทางตรงกันข้ามหากเราทำ การจ่ายแรงดันกลับด้าน โดยให้ขั้วบวกของแบตเตอรี่ต่อเข้ากับสารกึ่งตัวนำ ชนิด N และต่อขั้วลบเข้ากับสารกึ่งตัวนำ ชนิด P จะทำให้มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนไม่ให้ข้ามมายังฝั่งตรงข้าม ทำให้ไม่เกิดกระแสไหล เราเรียกลักษณะการต่อแรงดันในลักษณะนี้ว่าการไบแอสกลับ (Reverse Bias)



รูปที่ 2.11 การไบแอสกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

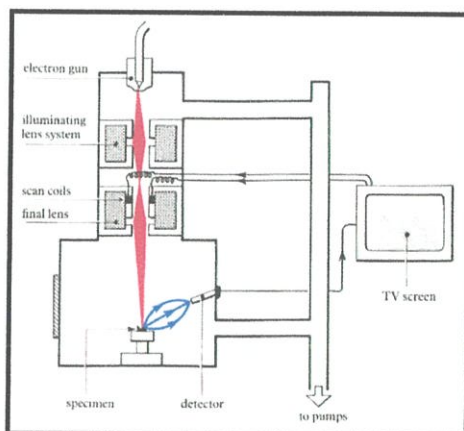
ในสภาวะไบอัสกลับนี้ พาหะส่วนน้อย คือ อิเล็กตรอนในสาร P และ โฮลในสาร N จะถูกกระตุ้นจากแบตเตอรี่ให้มารวมกัน ทำให้เกิดกระแสไหลแต่มีปริมาณน้อยมากมีค่าเป็น ไมโครแอมป์หรือนาโนแอมป์ เราเรียกกระแสนี้ว่า กระแสรั่วไหล (Leakage Current) โดยสารกึ่งตัวนำชนิดซิลิกอนจะมีขนาดของกระแสรั่วไหลต่ำกว่าเยอรมันเนียม

## 2.5 เทคนิคการวิเคราะห์สมบัติของเส้นใยนาโน ZnO

2.5.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) โครงสร้างของพื้นผิวของชิ้นตัวอย่าง การสร้างภาพจะต้องป้อนลำอิเล็กตรอนด้วยเลนส์ออฟเฟกที่ฟจนมีลักษณะเป็น Electron probe โฟกัสลงบนชิ้นตัวอย่าง สัญญาณอิเล็กตรอนจึงเกิดเฉพาะจุดที่ปลาย Electron probe ตกกระทบ การสร้างภาพไมโครไม่สามารถฉายไปบนฉากเรืองแสง จึงจำเป็นต้องอาศัยระบบส่องกราดบนที่กำหนดบนชิ้นตัวอย่าง และเลือกรับสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดใด ๆ จุดต่อจุดที่ปลาย Electron probe เลื่อนไป เพื่อนำไปสร้างภาพขยายที่เข้าจังหวะกัน (Synchronize) บนพื้นที่ของจอภาพแคโทดเรย์ ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจึงต้องมีชุดขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าควบคุมการส่องกราด (Scanning coil) และชุดกำเนิดภาพเพิ่มขึ้น ชุดควบคุมการส่องกราดจะทำหน้าที่บังคับให้ Electron probe เคลื่อนในแนวแกนนอนและแกนตั้งบนระนาบของตัวอย่าง

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดประกอบด้วยโครงสร้างที่สำคัญ 5 ส่วนคือ

1. ระบบอิเล็กตรอนออปติก (Electron optics system)
2. ระบบสุญญากาศ (Vacuum system)
3. ระบบระบายความร้อน (Cooling system)
4. ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power supply system)
5. ระบบสร้างและบันทึกภาพ (Image translating and photo recording)



รูปที่ 2.12 องค์ประกอบภายในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โครงการพิเศษเรื่องการพัฒนาาระบบอิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่งเพื่อการสังเคราะห์เส้นใยนาโน  
(Development of Electrospinning system for nanofibers synthesis)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# วิธีดำเนินงานวิจัย

### 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.1.1 แหล่งจ่ายไฟ

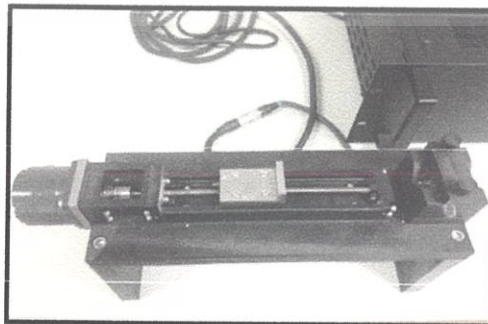
3.1.1.1 High Voltage Power Supply ใช้ในการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับระบบโดยใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงศักย์สูง



รูปที่ 3.1 High Voltage Power Supply

#### 3.1.2 ส่วนควบคุม

3.1.2.1 Step motor 5 phase ของบริษัท Vexta รุ่น PH\_544-NA 0.72% DC 0.75A พร้อมแท่นวางใช้เป็นตัวควบคุมอัตราการฉีดสารละลาย



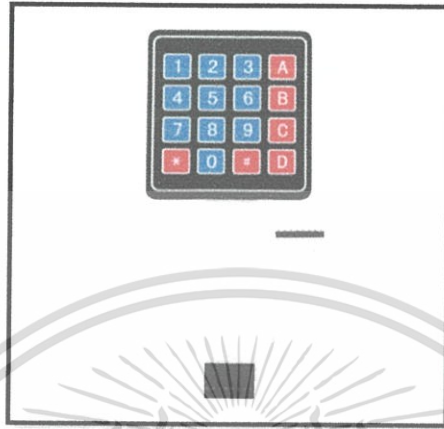
รูปที่ 3.2 Step motor 5 phase

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.2 Driver step motor 5 phase ใช้เป็นตัวขับ Step motor 5 phase

3.1.2.3 Microcontroller ET.BASE51 V.30 ใช้เป็นตัวควบคุม step motor

3.1.2.4 Keypad ขนาด 4X4 ใช้เป็นตัวสั่งการควบคุมระบบ



รูปที่ 3.3 Keypad ขนาด 4X4

3.1.2.5 LCD ขนาด16X4 ใช้แสดงผลคำสั่ง

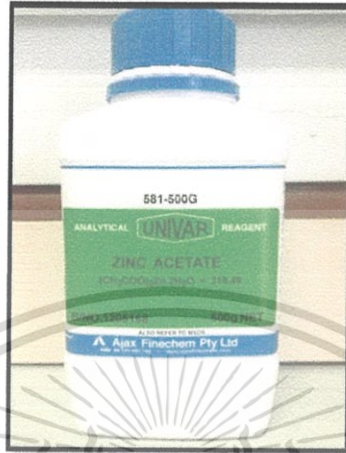


รูปที่ 3. 4 LCD ขนาด 16X4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 ส่วนสารละลาย

#### 3.1.3.1 Zinc acetate



รูปที่ 3.5 Zinc acetate

#### 3.1.3.2 Poly Vinyl Pyrrolidone (PVP)



รูปที่ 3.6 PVP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3.3 Poly Vinyl Alcohol (PVA)



รูปที่ 3.7 PVA

### 3.1.3.4 น้ำกลั่นบริสุทธิ์

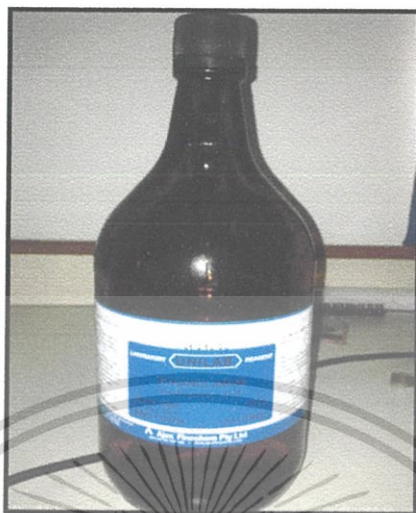


รูปที่ 3.8 น้ำกลั่นบริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### 3.1.3.7 Ethanolamine



รูปที่ 3.11 Ethanolamine

### 3.1.4 อุปกรณ์อื่นๆ

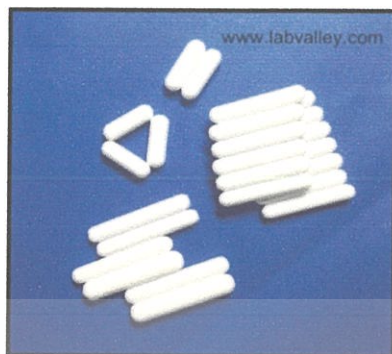
#### 3.1.4.1 Magnetic stirrer ใช้สำหรับคนสารและให้ความร้อน



รูปที่ 3.12 Magnetic stirrer

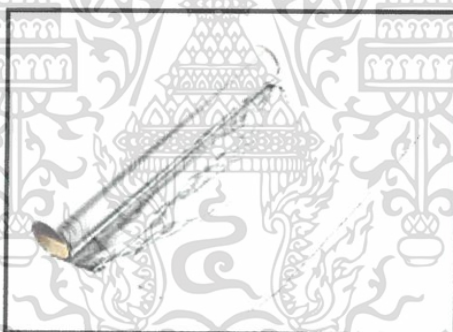
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.4.2 Magnetic Bar ใช้สำหรับคนสาร



รูปที่ 3.13 Magnetic Bar

### 3.1.4.3 กระดาษฟรอยด์ ใช้สำหรับรองรับเส้นใย



รูปที่ 3.14 กระดาษฟรอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 3.1.4.4 Syringe ใช้สำหรับฉีดเส้นใย



รูปที่ 3.15 Syringe

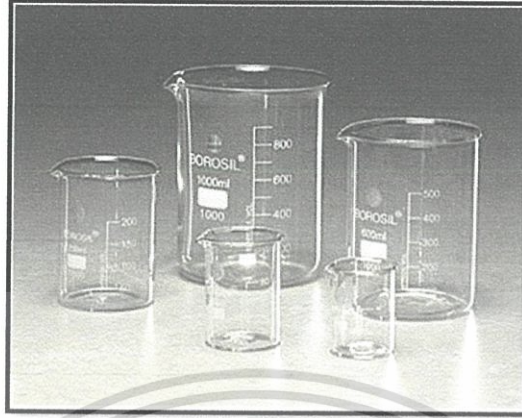
#### 3.1.4.5 หัวเข็มเหล็ก เบอร์ที่ใช้คือ 22, 23, 24



รูปที่ 3.16 หัวเข็มเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.4.6 ปีกเกอร์ (Beaker) ใช้สำหรับผสมสารละลาย



รูปที่ 3.17 ปีกเกอร์ (Beaker)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 ขั้นตอนการทดลอง

### 3.2.1 ขั้นตอนในการผสมสารละลายแบ่งเป็น 3 ตอน

**ตอนที่ 1** สังเคราะห์พอลิเมอร์ ใช้ Polystyrene (PS) และ Dimethylformamide (DMF) เป็นสารตั้งต้น

1. ผสมสาร DMF และ PS ในอัตราส่วน 10:1.5 คนอย่างต่อเนื่องด้วย magnetic stirrer ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ประมาณ 4-5 ชั่วโมง
2. เมื่อได้สารละลาย PS แล้วให้นำมาฉีดเป็นพอลิเมอร์ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ดังนี้ -เข็มโลหะเบอร์ 22, 23, 24  
-ระยะห่างจากปลายเข็มถึงแผ่นรองรับวัสดุ 10, 15 เซนติเมตร  
-ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15, 20 กิโลโวลต์  
-อัตราเร็วในการฉีดสารละลาย 400, 600, 800 ไมโครลิตร/นาที
3. เมื่อได้พอลิเมอร์แล้วให้นำไปส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงเพื่อดูลักษณะของพอลิเมอร์และวัดขนาดของพอลิเมอร์ที่ได้
4. ทำการทดลองซ้ำในข้อที่ 2 - 3 โดยทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนในการผสมสารละลายดังนี้ อัตราส่วน 10: 2, 10: 2.5 และ 10: 3

(จากการทดลองในตอนที่ 1 เปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ฉีดพอลิเมอร์เพื่อหาค่าที่ดีที่สุดว่าค่าพารามิเตอร์ค่าใดที่ทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีขนาดเล็กที่สุดเพื่อนำมาใช้เป็นตัวแปรควบคุมการสังเคราะห์เส้นใยนาโน)

**ตอนที่ 2** ใช้ซิงค์อะซิเตตและ PVA เป็นสารตั้งต้น ใช้ น้ำกลั่นบริสุทธิ์เป็นตัวทำละลาย (อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5)

1. ชั่งสารซิงค์อะซิเตต 5g และ PVA 5g ตวงน้ำกลั่นบริสุทธิ์ปริมาตร 25ml 2 ปีกเกอร์ นำซิงค์อะซิเตต ละลายด้วยน้ำกลั่นบริสุทธิ์ 25ml แล้วคนต่อเนื่องด้วย magnetic stirrer ที่ อุณหภูมิห้อง ประมาณ 10-15 นาที หรือจนกว่าซิงค์อะซิเตตจะละลายหมด
2. นำ PVA ละลายด้วยน้ำกลั่นบริสุทธิ์ 25ml แล้วคนด้วย magnetic stirrer ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ประมาณ 1 ชั่วโมง
3. จากนั้นนำปิเปตตวงสารละลายซิงค์อะซิเตตที่ได้จากข้อที่ 2 ในปริมาตร 10 ml เติมลงในสารละลาย PVA ที่ได้จากข้อที่ 3 คนอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อีกประมาณ 3 ชั่วโมง
4. เมื่อได้สารละลายซิงค์ออกไซด์ให้นำมาฉีดเส้นใยนาโนโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากตอนที่ 1 ทำการฉีดเส้นใย 2 ชั้น ซึ่งจะใช้ในการอบ 1 ชั้น และไม่อบ 1 ชั้น เพื่อทำการเปรียบเทียบ
5. เมื่อได้เส้นใยให้นำไปอบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
6. ทำการทดลองซ้ำตามข้อที่ 2-6 โดยการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายซิงค์ออกไซด์ ดังนี้ ซิงค์อะซิเตต 5g และ PVA 7.5g, ซิงค์อะซิเตต 7.5g และ PVA 7.5g, ซิงค์อะซิเตต 10g และ PVA 7.5g ตามลำดับ
7. นำเส้นใยนาโนที่ได้วิเคราะห์ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- SEM เพื่อดูลักษณะของเส้นใยและวัดขนาดของเส้นใย
- EDX เพื่อตรวจสอบว่าเส้นใยนาโนที่ได้มีธาตุที่เป็นส่วนประกอบของซิงค์ออกไซด์จริง

ตอนที่ 3 ใช้ซิงค์อะซิเตตและPVPเป็นสารตั้งต้น (อัตราส่วนของสารละลายเป็น 1:1)

1. ชั่งสารซิงค์อะซิเตต 0.3gและPVP 5g ตวง 2-methoxyethanol 10ml, ethanol 6.5ml, ethanolamine 0.1ml
2. นำซิงค์อะซิเตตละลายด้วย ethanol 6.5ml แล้วคนด้วย magnetic stirrer ที่อุณหภูมิห้อง ประมาณ10-15นาทีหรือจนกว่าซิงค์อะซิเตตจะละลายหมด
3. นำPVPละลายด้วย 2-methoxyethanol 10ml แล้วคนด้วย magnetic stirrerที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสประมาณ30นาที
4. เติมethanolamine 0.1ml ลงในสารละลายในข้อที่3 จากนั้นคนต่อที่อุณหภูมิ60องศาเซลเซียส อีก2ชั่วโมง
5. นำสารละลายที่ได้จากข้อที่ 2 เติมลงในสารละลายในข้อที่4 จากนั้นคนต่อที่อุณหภูมิ60องศาเซลเซียสอีก2ชั่วโมง
6. เมื่อได้สารละลายซิงค์ออกไซด์ให้นำมาฉีดเส้นใยนาโนโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากตอนที่1 ทำการสังเคราะห์เส้นใย2ชั้นซึ่งจะใช้ในการอบ1ชั้นและไม่อบ1ชั้นเพื่อทำการเปรียบเทียบ
7. เมื่อได้เส้นใยให้นำไปอบที่อุณหภูมิ500องศาเซลเซียสเป็นเวลา1ชั่วโมง
8. ทำการทดลองซ้ำตามข้อที่2-7โดยการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายซิงค์ออกไซด์ ดังนี้ซิงค์อะซิเตต 2gและPVP 5g, ซิงค์อะซิเตต 3.7gและPVP 5g, ซิงค์อะซิเตต 5.4gและPVP 5g ตามลำดับ
9. นำเส้นใยนาโนที่ได้วิเคราะห์ด้วย

- SEM เพื่อดูลักษณะของเส้นใยและวัดขนาดของเส้นใย

- EDX เพื่อตรวจสอบว่าเส้นใยนาโนที่ได้มีธาตุที่เป็นส่วนประกอบของซิงค์ออกไซด์จริง

(จากการทดลองในตอนี่2และตอนที่3 ทำการทดลองเพื่อเปรียบเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ว่าเส้นใยนาโนที่ใช้สารตั้งต้นที่แตกต่างกัน สารตั้งต้นชนิดใดที่ทำให้เกิดเส้นใยที่ดีที่สุด)

เมื่อได้เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์จากการตั้งต้นที่ดีที่สุดแล้วจึงนำเส้นใยนาโนที่ได้มาทำการทดลองเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการอบและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบเส้นใยดังนี้

1. เปลี่ยนแปลงเวลาอบเส้นใยที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส คือ 30นาที, 1ชั่วโมง, 2ชั่วโมง และ 3ชั่วโมง
2. เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการอบเส้นใยโดยใช้เวลาในการอบจากข้อที่ 1 คือ 300 °c, 400°c, 500°c และ 600°c

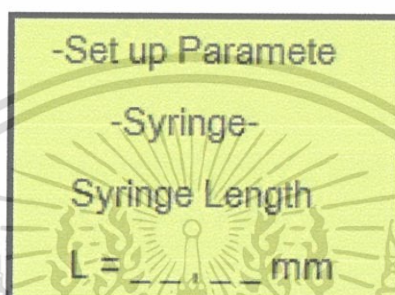
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 ขั้นตอนในการสังเคราะห์เส้นใยด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง

1. ดูดสารละลายขึ้นมาด้วย Syringe
2. เชื่อมต่อ Syringe กับ Step motor เข้าด้วยกัน
3. ต่อ High Voltage ขั้วบวกหนีบไว้ที่ปลายเข็มโลหะ ขั้วลบหนีบไว้กับฉากรองรับวัสดุที่หุ้มด้วยอะลูมิเนียมฟรอยด์

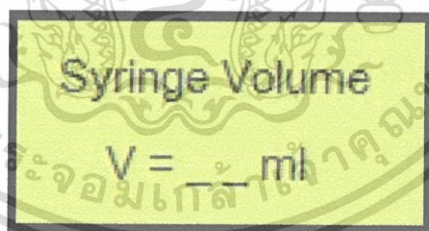
#### 4. ขั้นตอนการตั้งค่า Step motor

4.1 เมื่อเปิดเครื่องแล้ว กดปุ่ม SET จอ LCD แสดงข้อความดังรูป ให้ทำการใส่ค่าความยาวของ Syringe



รูปที่ 3.18 ค่าความยาวของ Syringe

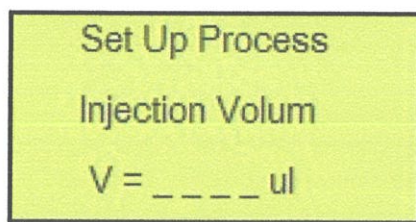
4.2 เมื่อจอ LCD แสดงข้อความดังรูป ให้ทำการใส่ปริมาตรของ Syringe



รูปที่ 3.19 ปริมาตรของ Syringe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 เมื่อจอ LCD แสดงข้อความดังรูป ให้ทำการใส่ปริมาตรของสารละลายที่ต้องการฉีดโดยเป็นหน่วยไมโครลิตร



รูปที่ 3.20 ปริมาตรของสารละลายที่ต้องการฉีดโดยเป็นหน่วยไมโครลิตร

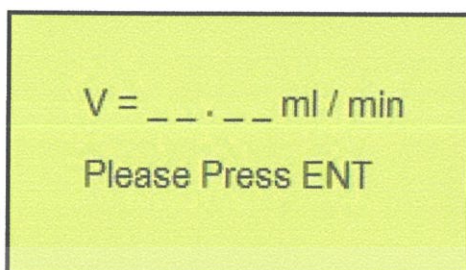
4.4 เมื่อจอ LCD แสดงข้อความดังรูป ให้ทำการเลือกหน่วยอัตราเร็วในขณะที่ฉีดสารละลาย



รูปที่ 3.21 เลือกหน่วยอัตราเร็วในขณะที่ฉีดสารละลาย

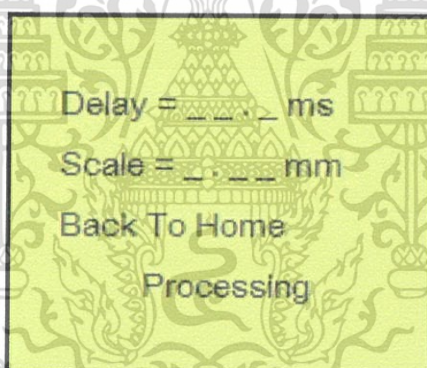
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ใส่อัตราเร็วที่เราต้องการฉีดสารละลาย จอ LCD จะแสดงข้อความดังรูป ให้กดปุ่ม ENT เพื่อเริ่มกระบวนการ



รูปที่ 3.22 อัตราเร็วที่เราต้องการฉีดสารละลาย

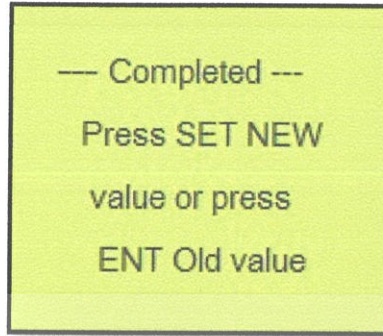
4.6 เมื่อจอ LCD แสดงข้อความดังรูป แสดงว่ามอเตอร์เริ่มทำงาน



รูปที่ 3.23 มอเตอร์เริ่มทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7 เมื่อจอ LCD แสดงข้อความดังรูป แสดงว่าเสร็จสิ้นกระบวนการ



รูปที่ 3.24 เสร็จสิ้นกระบวนการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากการศึกษาวิธีการสังเคราะห์เส้นใยนาโนโดยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงโดยการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. ขนาดหัวเข็มโลหะ (เบอร์ 22, 23, 24)
2. ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ (10 ซม., 15 ซม.)
3. ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง (15 kV, 20 kV)
4. อัตราเร็วในการฉีดสารละลาย (400 uL/min, 600 uL/min, 800 uL/min)

### 4.1 ผลการทดลองของเส้นใยพอลิเมอร์

จากการดำเนินการทดลองได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

- 4.1.1 ความเข้มข้นระหว่างสารละลายไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์กับสารละลายโพลีสไตรีนในอัตราส่วน 10: 1.5
- 4.1.2 ความเข้มข้นระหว่างสารละลายไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์กับสารละลายโพลีสไตรีนในอัตราส่วน 10: 2.0
- 4.1.3 ความเข้มข้นระหว่างสารละลายไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์กับสารละลายโพลีสไตรีนในอัตราส่วน 10: 2.5
- 4.1.4 ความเข้มข้นระหว่างสารละลายไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์กับสารละลายโพลีสไตรีนในอัตราส่วน 10: 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1.1 ความเข้มข้นระหว่างสารละลายไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์กับสารละลาย โพลีสไตรีน ในอัตราส่วน 10: 1.5 ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 10 ซม.

ครั้งที่	เบอร์เข็ม	อัตราเร็ว (ul/min)	ความต่างศักย์ (kV)	ขนาดของเส้นใย (um)	หมายเหตุ
1	22	800	15	วัดไม่ได้	บีตส์เยอะ
2	22	800	20	3.66	บีตส์เยอะ
3	22	600	15	วัดไม่ได้	บีตส์เยอะ
4	22	600	20	วัดไม่ได้	บีตส์เยอะ
5	22	400	15	4.34	บีตส์เยอะ
6	22	400	20	3.27	บีตส์เยอะ
7	23	800	15	วัดไม่ได้	บีตส์เยอะ
8	23	800	20	2.53	บีตส์เยอะ
9	23	600	15	วัดไม่ได้	บีตส์เยอะ
10	23	600	20	2.53	บีตส์เยอะ
11	23	400	15	วัดไม่ได้	บีตส์เยอะ
12	23	400	20	4.22	บีตส์เยอะ
13	24	800	15	วัดไม่ได้	บีตส์เยอะ
14	24	800	20	3.10	บีตส์เยอะ
15	24	600	15	3.58	บีตส์เยอะ
16	24	600	20	2.50	บีตส์เยอะ
17	24	400	15	วัดไม่ได้	บีตส์เยอะ
18	24	400	20	วัดไม่ได้	บีตส์เยอะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1.2 ความเข้มข้นระหว่างสารละลายไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์กับสารละลาย โพลีสไตรีน ในอัตราส่วน 10: 1.5 ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 15 ซม.

ครั้งที่	เบอร์เข็ม	อัตราเร็ว (ul/min)	ความต่างศักย์ (kV)	ขนาดของเส้นใย (um)	หมายเหตุ
1	22	800	15	3.93	ปิดสียะอะ
2	22	800	20	5.56	ปิดสียะอะ
3	22	600	15	วัดไม่ได้	ปิดสียะอะ
4	22	600	20	4.44	ปิดสียะอะ
5	22	400	15	3.48	ปิดสียะอะ
6	22	400	20	4.67	ปิดสียะอะ
7	23	800	15	4.98	ปิดสียะอะ
8	23	800	20	4.09	ปิดสียะอะ
9	23	600	15	2.70	ปิดสียะอะ
10	23	600	20	2.99	ปิดสียะอะ
11	23	400	15	3.16	ปิดสียะอะ
12	23	400	20	2.53	ปิดสียะอะ
13	24	800	15	5.23	ปิดสียะอะ
14	24	800	20	3.20	ปิดสียะอะ
15	24	600	15	วัดไม่ได้	ปิดสียะอะ
16	24	600	20	2.86	ปิดสียะอะ
17	24	400	15	3.90	ปิดสียะอะ
18	24	400	20	4.30	ปิดสียะอะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1.3 ความเข้มข้นระหว่างสารละลายโตเมทิลฟอร์มมาร์ไมด์กับสารละลาย โพลีสไตรีน ในอัตราส่วน 10: 2 ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 10 ซม.

ครั้งที่	เบอร์เข็ม	อัตราเร็ว (ul/min)	ความต่างศักย์ (kV)	ขนาดของเส้นใย (um)	หมายเหตุ
1	22	800	15	3.42	ปิดส้นน้อย
2	22	800	20	4.41	ปิดส้นน้อย
3	22	600	15	3.85	ปิดส้นน้อย
4	22	600	20	3.74	ปิดส้นน้อย
5	22	400	15	4.99	ปิดส้นน้อย
6	22	400	20	3.90	ปิดส้นน้อย
7	23	800	15	2.83	ปิดส้นน้อย
8	23	800	20	4.73	ปิดส้นน้อย
9	23	600	15	3.19	ปิดส้นน้อย
10	23	600	20	3.46	ปิดส้นน้อย
11	23	400	15	4.74	ปิดส้นน้อย
12	23	400	20	3.44	ปิดส้นน้อย
13	24	800	15	6.68	ปิดส้นน้อย
14	24	800	20	4.08	ปิดส้นน้อย
15	24	600	15	4.99	ปิดส้นน้อย
16	24	600	20	3.31	ปิดส้นน้อย
17	24	400	15	4.12	ปิดส้นน้อย
18	24	400	20	3.01	ปิดส้นน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1.4 ความเข้มข้นระหว่างสารละลายไดเมทิลฟอร์มาไรด์กับสารละลาย โพลีสไตรีน ในอัตราส่วน 10: 2 ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 15 ซม.

ครั้งที่	เบอร์เข็ม	อัตราเร็ว ( $\mu\text{l}/\text{min}$ )	ความต่างศักย์ (kV)	ขนาดของเส้นใย ( $\mu\text{m}$ )	หมายเหตุ
1	22	800	15	4.95	บีดส์น้อย
2	22	800	20	5.44	บีดส์น้อย
3	22	600	15	4.88	บีดส์น้อย
4	22	600	20	4.02	บีดส์น้อย
5	22	400	15	3.30	บีดส์น้อย
6	22	400	20	3.56	บีดส์น้อย
7	23	800	15	3.90	บีดส์น้อย
8	23	800	20	4.12	บีดส์น้อย
9	23	600	15	2.78	บีดส์น้อย
10	23	600	20	5.11	บีดส์น้อย
11	23	400	15	4.23	บีดส์น้อย
12	23	400	20	3.46	บีดส์น้อย
13	24	800	15	3.36	บีดส์น้อย
14	24	800	20	4.22	บีดส์น้อย
15	24	600	15	3.47	บีดส์น้อย
16	24	600	20	4.28	บีดส์น้อย
17	24	400	15	3.77	บีดส์น้อย
18	24	400	20	3.80	บีดส์น้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1.5 ความเข้มข้นระหว่างสารละลายไดเมทิลฟอร์มาไรเมดกับสารละลาย โพลีสไตรีนในอัตราส่วน 10: 2.5 ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 10 ซม.

ครั้งที่	เบอร์เข็ม	อัตราเร็ว (uL/min)	ความต่างศักย์ (kV)	ขนาดของเส้นใย (um)	หมายเหตุ
1	22	800	15	4.69	มีบีตส์บางส่วน
2	22	800	20	2.68	มีบีตส์บางส่วน
3	22	600	15	4.48	มีบีตส์บางส่วน
4	22	600	20	3.96	มีบีตส์บางส่วน
5	22	400	15	4.58	มีบีตส์บางส่วน
6	22	400	20	3.85	มีบีตส์บางส่วน
7	23	800	15	2.49	มีบีตส์บางส่วน
8	23	800	20	2.40	มีบีตส์บางส่วน
9	23	600	15	2.68	มีบีตส์บางส่วน
10	23	600	20	3.82	มีบีตส์บางส่วน
11	23	400	15	5.09	มีบีตส์บางส่วน
12	23	400	20	4.88	มีบีตส์บางส่วน
13	24	800	15	4.83	มีบีตส์บางส่วน
14	24	800	20	3.41	มีบีตส์บางส่วน
15	24	600	15	6.14	มีบีตส์บางส่วน
16	24	600	20	3.48	มีบีตส์บางส่วน
17	24	400	15	5.80	มีบีตส์บางส่วน
18	24	400	20	4.02	มีบีตส์บางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1.6 ความเข้มข้นระหว่างสารละลายไดเมทิลฟอร์มาไรด์กับสารละลาย โพลีสไตรีน ในอัตราส่วน 10: 2.5 ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 15 ซม.

ครั้งที่	เบอร์เข็ม	อัตราเร็ว (u/min)	ความต่างศักย์ (kV)	ขนาดของเส้นใย (um)	หมายเหตุ
1	22	800	15	4.66	มีบีตส์บางส่วน
2	22	800	20	4.60	มีบีตส์บางส่วน
3	22	600	15	4.87	มีบีตส์บางส่วน
4	22	600	20	4.05	มีบีตส์บางส่วน
5	22	400	15	3.08	มีบีตส์บางส่วน
6	22	400	20	4.96	มีบีตส์บางส่วน
7	23	800	15	3.57	มีบีตส์บางส่วน
8	23	800	20	4.07	มีบีตส์บางส่วน
9	23	600	15	4.21	มีบีตส์บางส่วน
10	23	600	20	3.56	มีบีตส์บางส่วน
11	23	400	15	4.43	มีบีตส์บางส่วน
12	23	400	20	4.36	มีบีตส์บางส่วน
13	24	800	15	4.23	มีบีตส์บางส่วน
14	24	800	20	4.17	มีบีตส์บางส่วน
15	24	600	15	4.53	มีบีตส์บางส่วน
16	24	600	20	4.91	มีบีตส์บางส่วน
17	24	400	15	4.30	มีบีตส์บางส่วน
18	24	400	20	5.22	มีบีตส์บางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1.7 ความเข้มข้นระหว่างสารละลายไดเมทิลฟอร์มาไรด์กับสารละลาย โพลีสไตรีน ในอัตราส่วน 10:3 ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 10 ซม.

ครั้งที่	เบอร์เข็ม	อัตราเร็ว (ul/min)	ความต่างศักย์ (kV)	ขนาดของเส้นใย (um)	หมายเหตุ
1	22	800	15	4.93	ไม่มีปดส์
2	22	800	20	6.60	ไม่มีปดส์
3	22	600	15	5.76	ไม่มีปดส์
4	22	600	20	5.05	ไม่มีปดส์
5	22	400	15	8.02	ไม่มีปดส์
6	22	400	20	5.99	ไม่มีปดส์
7	23	800	15	4.70	ไม่มีปดส์
8	23	800	20	3.53	ไม่มีปดส์
9	23	600	15	6.56	ไม่มีปดส์
10	23	600	20	3.99	ไม่มีปดส์
11	23	400	15	4.02	ไม่มีปดส์
12	23	400	20	11.19	ไม่มีปดส์
13	24	800	15	10.17	ไม่มีปดส์
14	24	800	20	11.22	ไม่มีปดส์
15	24	600	15	4.07	ไม่มีปดส์
16	24	600	20	8.18	ไม่มีปดส์
17	24	400	15	8.18	ไม่มีปดส์
18	24	400	20	6.30	ไม่มีปดส์

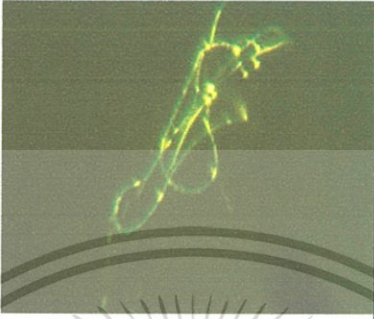
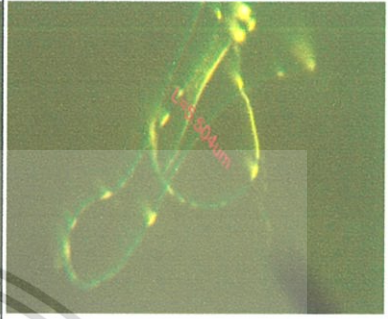
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1.8 ความเข้มข้นระหว่างสารละลายไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์กับสารละลาย โพลีสไตรีน ในอัตราส่วน 10: 3 ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 15 ซม.

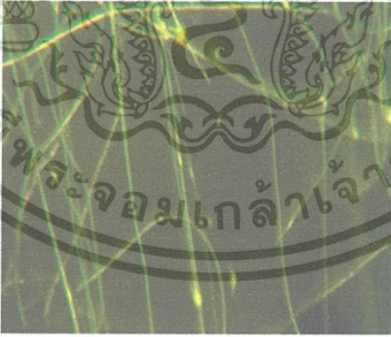
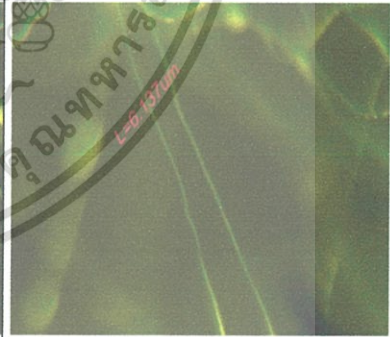
ครั้งที่	เบอร์เข็ม	อัตราเร็ว (ul/min)	ความต่างศักย์ (kV)	ขนาดของเส้นใย (um)	หมายเหตุ
1	22	800	15	11.83	ไม่มีปีตส์
2	22	800	20	12.21	ไม่มีปีตส์
3	22	600	15	4.26	ไม่มีปีตส์
4	22	600	20	4.67	ไม่มีปีตส์
5	22	400	15	7.74	ไม่มีปีตส์
6	22	400	20	8.72	ไม่มีปีตส์
7	23	800	15	5.56	ไม่มีปีตส์
8	23	800	20	9.49	ไม่มีปีตส์
9	23	600	15	4.61	ไม่มีปีตส์
10	23	600	20	4.79	ไม่มีปีตส์
11	23	400	15	7.17	ไม่มีปีตส์
12	23	400	20	6.40	ไม่มีปีตส์
13	24	800	15	8.98	ไม่มีปีตส์
14	24	800	20	8.84	ไม่มีปีตส์
15	24	600	15	6.07	ไม่มีปีตส์
16	24	600	20	8.07	ไม่มีปีตส์
17	24	400	15	7.22	ไม่มีปีตส์
18	24	400	20	6.07	ไม่มีปีตส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1.9 ความเข้มข้นระหว่างสารละลายไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์กับสารละลาย โพลีสไตรีน ในอัตราส่วน 10: 1.5 ที่ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 10 ซม. ทำให้เกิดเส้นใยที่มีขนาดเล็กที่สุดเท่ากับ 2.50 ไมโครเมตร



เบอร์ เข็ม	อัตราเร็ว ( $\mu\text{l}/\text{min}$ )	V (kV)	รูปจากผลการทดลอง	
			กำลังขยาย 6x	กำลังขยาย 11x
24	600	20		

ตารางที่ 4.1.10 ความเข้มข้นระหว่างสารละลายไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์กับสารละลาย โพลีสไตรีนในอัตราส่วน 10: 2 ที่ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 15 ซม. ทำให้เกิดเส้นใยที่มีขนาดเล็กที่สุดเท่ากับ 2.78 ไมโครเมตร

เบอร์ เข็ม	อัตราเร็ว ( $\mu\text{l}/\text{min}$ )	V (kV)	รูปจากผลการทดลอง	
			กำลังขยาย 6x	กำลังขยาย 11x
23	600	15		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1.11 ความเข้มข้นระหว่างสารละลายไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์กับสารละลายโพลีสไตรีนในอัตราส่วน 10: 2.5 ที่ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 10 ซม. ทำให้เกิดเส้นใยที่มีขนาดเล็กที่สุดเท่ากับ 2.40 ไมโครเมตร

เบอร์ เข็ม	อัตราเร็ว ( $\mu\text{l}/\text{min}$ )	V (kV)	รูปจากผลการทดลอง	
			กำลังขยาย 6x	กำลังขยาย 11x
23	800	20		

ตารางที่ 4.1.12 ความเข้มข้นระหว่างสารละลายไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์กับสารละลายโพลีสไตรีนในอัตราส่วน 10: 3 ที่ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 10 ซม. ทำให้เกิดเส้นใยที่มีขนาดเล็กที่สุดเท่ากับ 3.53 ไมโครเมตร

เบอร์ เข็ม	อัตราเร็ว ( $\mu\text{l}/\text{min}$ )	V (kV)	รูปจากผลการทดลอง	
			กำลังขยาย 6x	กำลังขยาย 11x
23	800	20		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการคำนวณขนาดเส้นใยจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Light microscope)

$$\text{ขนาดของวัตถุจริง} = \frac{L10}{2(x)} ; x \text{ คือ กำลังขยาย}$$

L คือ ขนาดของวัตถุที่วัดได้

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\begin{aligned} \text{ขนาดของเส้นใย} &= \frac{5.415 \times 10}{2(11)} \\ &= 2.40 \text{ um} \end{aligned}$$

หมายเหตุ เนื่องจากตารางข้อมูลดังกล่าวทำให้เห็นว่าที่ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 10 ซม. เข็มเบอร์ 23 อัตราการฉีดที่ 800 uL/min และศักย์ไฟฟ้า 20 kV ทำให้เกิดเส้นใยที่มีขนาดเล็กที่สุดเท่ากับ 2.4009 ไมโครเมตร ดังนั้นจึงนำเงื่อนไขที่ทำให้เส้นใยมีขนาดเล็กที่สุดมาประยุกต์ใช้กับการสังเคราะห์เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์

#### 4.2 ผลการทดลองของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์

จากผลการทดลองผลิตเส้นใยนาโนพอลิเมอร์โดยใช้เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิ่งโดยการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขต่างๆที่ทำให้เกิดเส้นใยที่มีขนาดเล็กที่สุดโดยเงื่อนไขที่ใช้คือ

1. เข็มโลหะเบอร์ 23
2. ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 10 ซม.
3. ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 20kV
4. อัตราเร็วในการฉีดสารละลาย 800uL/min

ในการทดลองนี้จะแบ่งการสังเคราะห์เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ออกเป็น 2 ตอนโดยการใช้โพลีเมอร์ที่ต่างกันคือโพลีไวนิลแอลกอฮอล์และโพลีไวนิลไพโรลิดอน เพื่อทำการเปรียบเทียบว่าโพลีเมอร์ชนิดใดที่สามารถทำให้เกิดเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีขนาดเล็กที่สุดและดีที่สุด

#### 4.2.1 ความเข้มข้นระหว่างสารละลาย Zinc acetate กับ สารละลาย PVA ใช้น้ำ DI เป็นตัวทำละลายในอัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5

จากการดำเนินการทดลองเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้


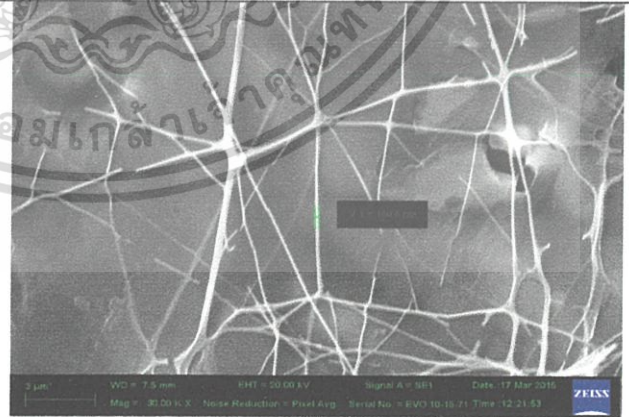
4.2.1.1. ความเข้มข้นของ Zn 5g: PVA 5g ละลายในน้ำ DI 25ml

4.2.1.2 ความเข้มข้นของ Zn 5g: PVA 7.5g ละลายในน้ำ DI 25ml

4.2.1.3 ความเข้มข้นของ Zn 7.5g: PVA 7.5g ละลายในน้ำ DI 25ml



4.2.1.4 ความเข้มข้นของ Zn 10g: PVA 7.5g ละลายในน้ำ DI 25ml

ตารางที่ 4.2.1 ผลการวิเคราะห์โดย Scanning electron microscope (SEM) เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่ความเข้มข้นของ Zn 5g: PVA 5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5

เบอร์ เข็ม	อัตราเร็ว ( $\mu\text{l}/\text{min}$ )	V (kV)	รูปจากผลการทดลอง
23	800	20	
		อพบ	

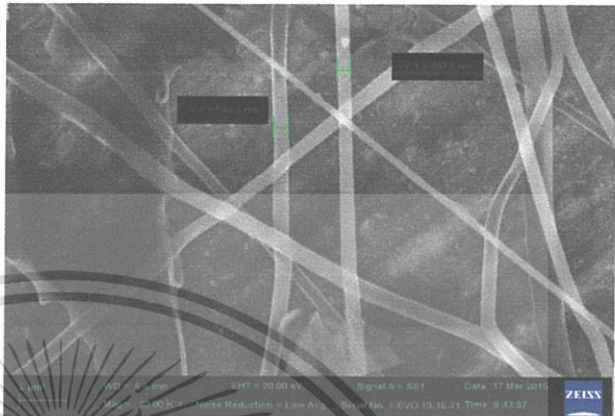

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2.2 ผลการวิเคราะห์โดย Scanning electron microscope (SEM) เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ ความเข้มข้นของ Zn 5g: PVA 7.5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5

เบอร์ เข็ม	อัตราเร็ว (uL/min)	V (kV)	รูปจากผลการทดลอง	
23	800	20	ไม่อบ	
			อบ	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2.3 ผลการวิเคราะห์โดย Scanning electron microscope (SEM) เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่ความเข้มข้นของ Zn 7.5g: PVA 7.5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5

เบอร์ เข็ม	อัตราเร็ว ( $\mu\text{L}/\text{min}$ )	V (kV)	รูปจากผลการทดลอง	
23	800	20	ไม่อบ	
			อบ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2.4 ผลการวิเคราะห์โดย Scanning electron microscope (SEM) เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่ความเข้มข้นของ Zn 10g: PVA 7.5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5

เบอร์ เข็ม	อัตราเร็ว ( $\mu\text{l}/\text{min}$ )	V (kV)	รูปจากผลการทดลอง	
23	800	20	ไม่อบ	
			อบ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการวิเคราะห์โดย Scanning electron microscope (SEM) ข้างต้นสามารถสรุปขนาดของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ใช้ซิงค์อะซิเตตและPVAเป็นสารตั้งต้นที่ความเข้มข้นต่างๆได้ดังนี้

ตารางที่ 4.2.5 ขนาดของเส้นใยนาโน ZnO ที่ความเข้มข้นของ Zn 5g: PVA 5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5

เบอร์เข็ม	อัตราการฉีด ( $\mu\text{L}/\text{min}$ )	ระยะห่าง(cm)	ความต่างศักย์ (kV)	ขนาดของเส้นใย (nm)	หมายเหตุ
23	800	10	20	567.5	ไม่อบ
23	800	10	20	180.6	อบ

ตารางที่ 4.2.6 ขนาดของเส้นใยนาโน ZnO ที่ความเข้มข้นของ Zn 5g: PVA 7.5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5

เบอร์เข็ม	อัตราการฉีด ( $\mu\text{L}/\text{min}$ )	ระยะห่าง (cm)	ความต่างศักย์ (kV)	ขนาดของเส้นใย (nm)	หมายเหตุ
23	800	10	20	361.1	ไม่อบ
23	800	10	20	490.1	อบ

ตารางที่ 4.2.7 ขนาดของเส้นใยนาโน ZnO ที่ความเข้มข้นของ Zn 7.5g: PVA 7.5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5

เบอร์ เข็ม	อัตราการฉีด ( $\mu\text{L}/\text{min}$ )	ระยะห่าง(cm)	ความต่างศักย์ (kV)	ขนาดของเส้นใย (nm)	หมายเหตุ
23	800	10	20	580.4	ไม่อบ
23	800	10	20	258.0	อบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

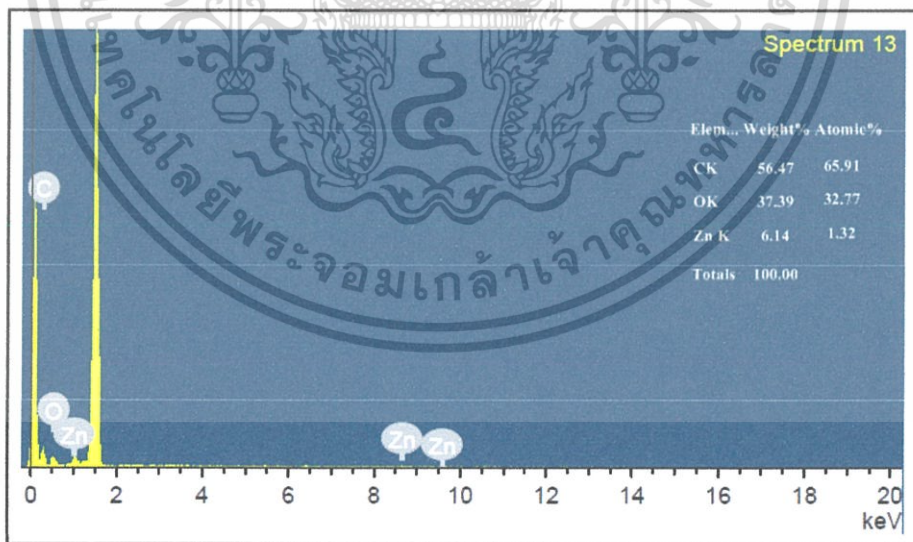
ตารางที่ 4.2.8 ขนาดของเส้นใยนาโน ZnO ที่ความเข้มข้นของ Zn 10g: PVA 7.5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5

เบอร์เข็ม	อัตราการฉีด (ul/min)	ระยะห่าง(cm)	ความต่างศักย์ (kV)	ขนาดของเส้นใย (nm)	หมายเหตุ
23	800	10	20	567.5	ไม่อบ
23	800	10	20	335.5	อบ

จากการสังเคราะห์เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ซึ่งใช้ซิงค์อะซิเตตและPVAเป็นสารตั้งต้นโดยใช้น้ำDIเป็นตัวทำละลายที่ความเข้มข้นของ Zn 5g: PVA 5g ละลายในน้ำ DI 25ml ในอัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5 ทำให้เกิดเส้นใยที่มีขนาดเล็กที่สุดเท่ากับ180.6นาโนเมตร ซึ่งเป็นเส้นใยที่ผ่านการอบเพื่อไล่ โพลีเมอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา1ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นที่ต่างกันในการทดลอง

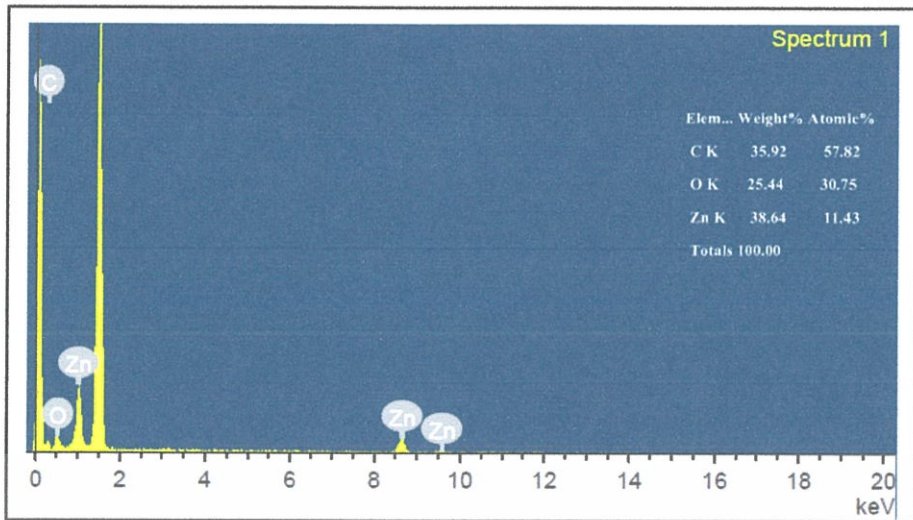
#### ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX Spectrum ของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์

ผลการวิเคราะห์จาก EDX เป็นการบอกองค์ประกอบของธาตุภายในเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่ทำการทดลองโดยใช้ซิงค์อะซิเตตและPVAเป็นสารตั้งต้นที่ความเข้มข้นต่างกัน

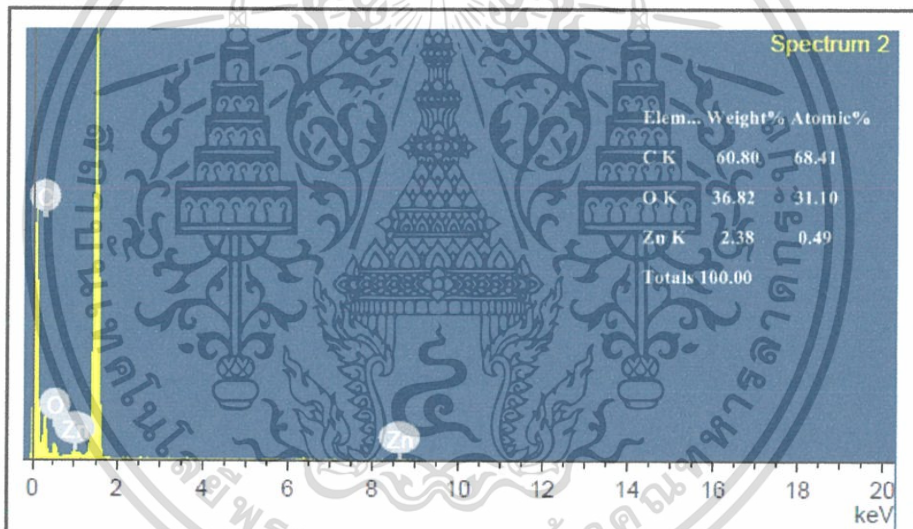


รูปที่ 4.1.1 EDX Spectrum ของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของ Zn 5g: PVA 5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5 (ไม่อบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

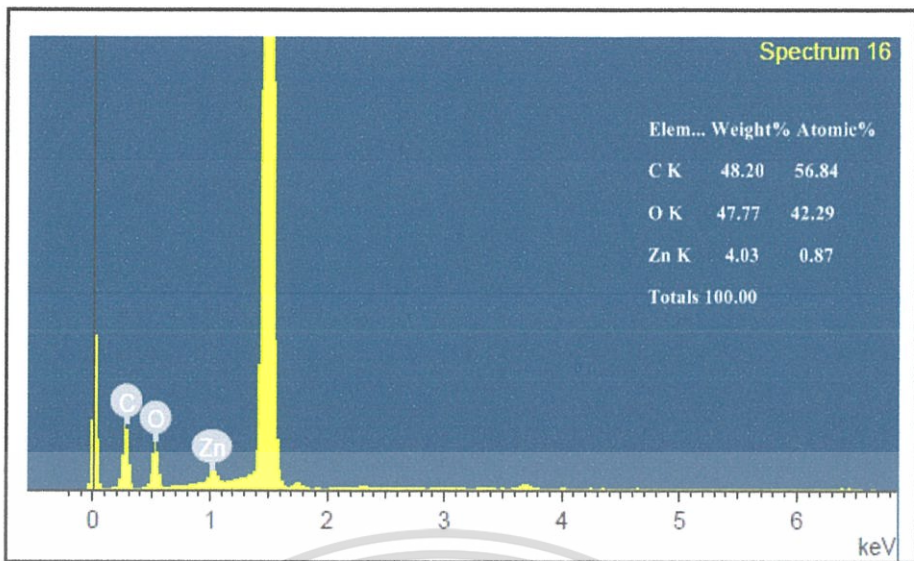


รูปที่ 4.1.2 EDX Spectrum ของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของ Zn 5 g: PVA 5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5 (อบที่อุณหภูมิ 500 °c เป็นเวลา1ชั่วโมง)

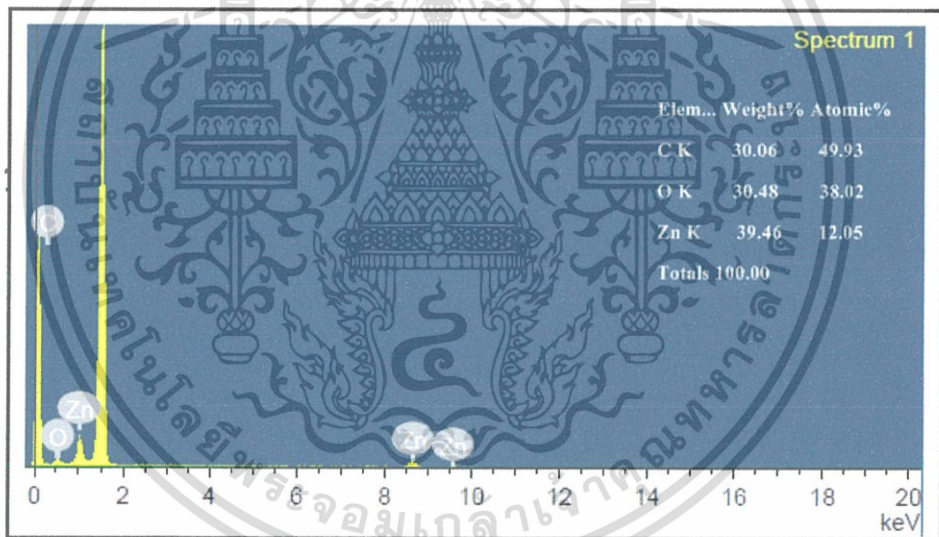


รูปที่ 4.1.3 EDX Spectrum ของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของ Zn 5g: PVA 7.5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5 (ไม่อบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

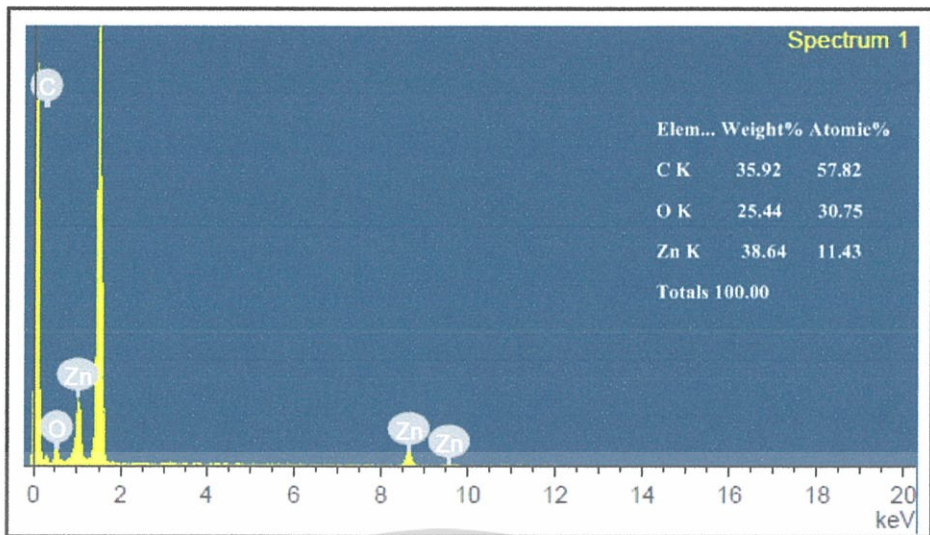


รูปที่ 4.1.4 EDX Spectrum ของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของ Zn 5g: PVA 7.5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5 (อบที่อุณหภูมิ 500 °c เป็นเวลา 1 ชั่วโมง)

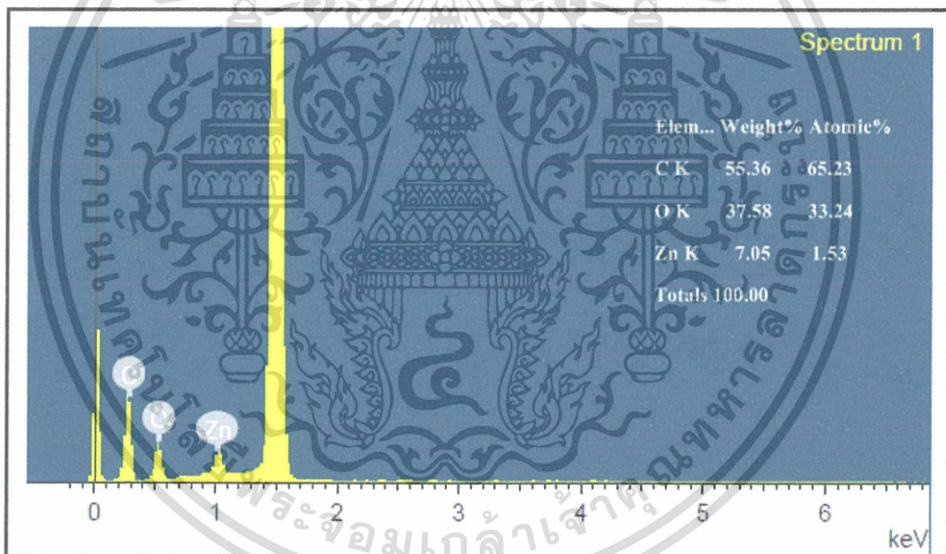


รูปที่ 4.1.5 EDX Spectrum ของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของ Zn 7.5 g: PVA 7.5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5 (ไม่อบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

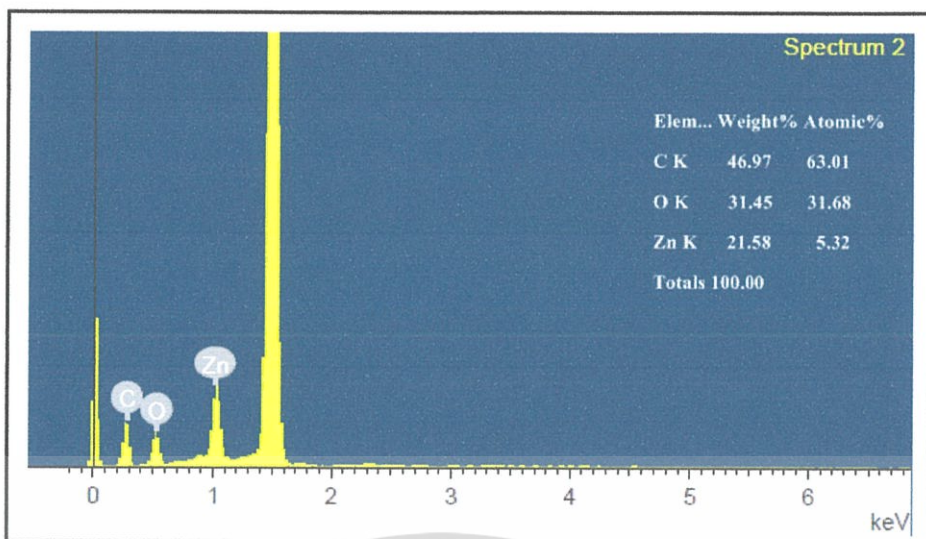


รูปที่ 4.1.6 EDX Spectrum ของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของ Zn 7.5g: PVA 7.5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5 (อบที่อุณหภูมิ 500 °c เป็นเวลา1ชั่วโมง)



รูปที่ 4.1.7 EDX Spectrum ของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของ Zn 10g: PVA 7.5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5 (ไม่อบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1.8 EDX Spectrum ของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของ Zn 10 g: PVA 7.5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5 (อบที่อุณหภูมิ 500 °c เป็นเวลา 1 ชั่วโมง)

จากผลการวิเคราะห์โดย EDX ข้างต้นสามารถบ่งชี้องค์ประกอบของธาตุภายในเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ได้ซึ่งประกอบไปด้วย ธาตุสังกะสี (Zn), คาร์บอน (C), ออกซิเจน (O)

#### 4.2.2 ความเข้มข้นระหว่างสารละลาย Zinc acetate กับ สารละลาย PVP

จากการดำเนินการทดลองเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.2.2.1. ความเข้มข้นของ Zn 0.3g: PVP 5g

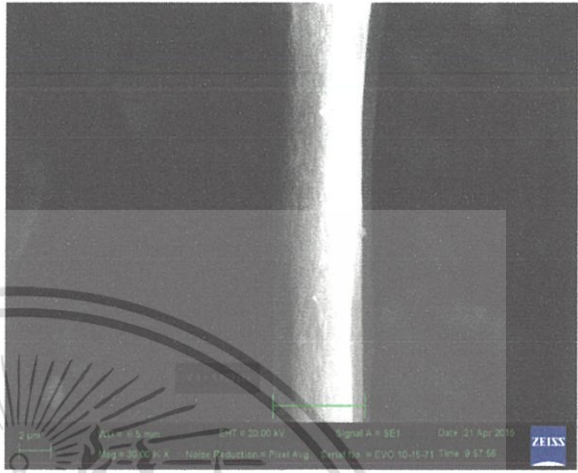

4.2.2.2 ความเข้มข้นของ Zn 2g: PVP 5g

4.2.2.3 ความเข้มข้นของ Zn 3.7g: PVP 5g

4.2.2.4 ความเข้มข้นของ Zn 5.4g: PVP 5g



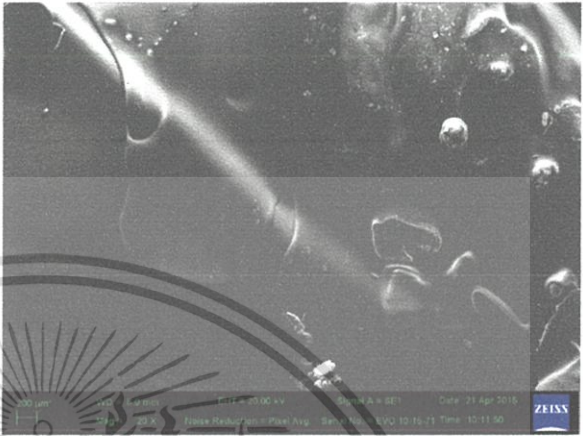
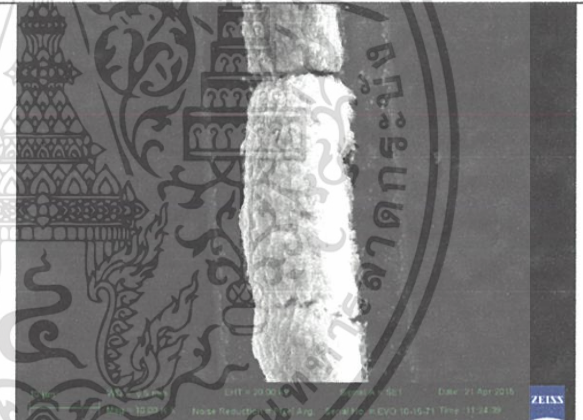
ตารางที่ 4.2.10 ผลการวิเคราะห์โดย Scanning electron microscope (SEM) เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่ความเข้มข้นของ Zn 2g: PVP 5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 1:1

เบอร์เข็ม	อัตราเร็ว (uL/min)	V (kV)	รูปจากผลการทดลอง	
23	800	20	ไม่อบ	
			อบ	

จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.2.10 พบว่าเส้นใยหลังการอบมีลักษณะแตกต่างไม่เป็นเส้นจึงวิเคราะห์ได้ว่าปริมาณความเข้มข้นของซิงค์ที่เพิ่มขึ้นอาจจะมีผลต่อเส้นใย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

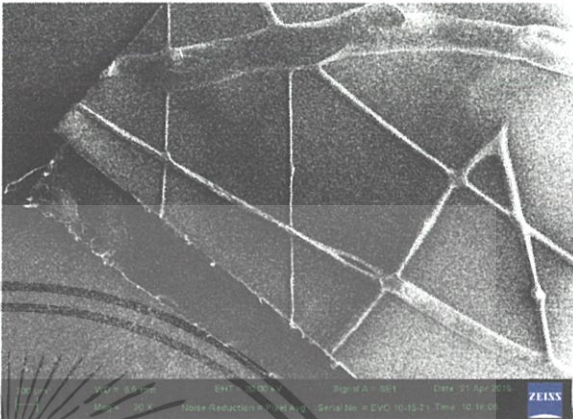

ตารางที่ 4.2.11 ผลการวิเคราะห์โดย Scanning electron microscope (SEM) เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่ความเข้มข้นของ Zn 3.7g: PVP 5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 1:1

เบอร์เข็ม	อัตราเร็ว (ul/min)	V (kV)	รูปจากผลการทดลอง
23	800	20	<div style="display: flex; flex-direction: column;"> <div style="text-align: center; margin-bottom: 10px;"> <p>ไม่อบ</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>อบ</p>  </div> </div>

จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.2.11 พบว่าเส้นใยมีลักษณะแตกต่างกันไม่เป็นเส้นจึงวิเคราะห์ได้ว่าปริมาณความเข้มข้นของซิงค์ที่เพิ่มขึ้นอาจจะมีผลต่อเส้นใย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2.12 ผลการวิเคราะห์โดย Scanning electron microscope (SEM) เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่ความเข้มข้นของ Zn 5.4g: PVP 5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 1:1

เบอร์ เข็ม	อัตราเร็ว ( $\mu\text{L}/\text{min}$ )	V (kV)	รูปจากผลการทดลอง	
23	800	20	ไม่อบ	
			อบ	

จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.2.12 พบว่าเส้นใยมีลักษณะแตกต่างไม่เป็นเส้นจึงวิเคราะห์ได้ว่าปริมาณความเข้มข้นของซิงค์ที่เพิ่มขึ้นอาจจะมีผลต่อเส้นใย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการวิเคราะห์โดย Scanning electron microscope (SEM) ข้างต้นสามารถสรุปขนาดของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ใช้ซิงค์อะซิเตตและPVPเป็นสารตั้งต้นที่ความเข้มข้นต่างๆได้ดังนี้

ตารางที่ 4.2.13 ขนาดของเส้นใยนาโน ZnO ที่ความเข้มข้นของ Zn 0.3g: PVP 5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 1:1

เบอร์ เข็ม	อัตราการฉีด ( $\mu\text{L}/\text{min}$ )	ระยะห่าง (cm)	ความต่างศักย์ (kV)	ขนาดของเส้นใย (nm)	หมายเหตุ
23	800	10	20	356.1	ไม่อบ
23	800	10	20	วัดไม่ได้	อบ

ตารางที่ 4.2.14 ขนาดของเส้นใยนาโน ZnO ที่ความเข้มข้นของ Zn 2g: PVP 5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 1:1

เบอร์ เข็ม	อัตราการฉีด ( $\mu\text{L}/\text{min}$ )	ระยะห่าง (cm)	ความต่างศักย์ (kV)	ขนาดของเส้นใย (nm)	หมายเหตุ
23	800	10	20	5820	ไม่อบ
23	800	10	20	วัดไม่ได้	อบ

ตารางที่ 4.2.15 ขนาดของเส้นใยนาโน ZnO ที่ความเข้มข้นของ Zn 3.7g: PVP 5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 1:1

เบอร์ เข็ม	อัตราการฉีด ( $\mu\text{L}/\text{min}$ )	ระยะห่าง (cm)	ความต่างศักย์ (kV)	ขนาดของเส้นใย (nm)	หมายเหตุ
23	800	10	20	วัดไม่ได้	ไม่อบ
23	800	10	20	วัดไม่ได้	อบ

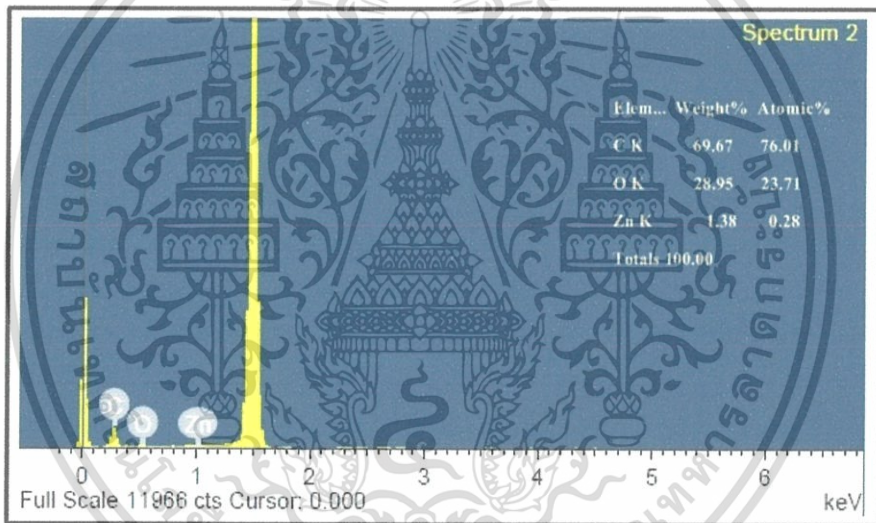
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2.16 ขนาดของเส้นใยนาโน ZnO ที่ความเข้มข้นของ Zn 5.4g: PVP 5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 1:1

เบอร์ เข็ม	อัตราการฉีด ( $\mu\text{L}/\text{min}$ )	ระยะห่าง (cm)	ความต่างศักย์ (kV)	ขนาดของเส้นใย (nm)	หมายเหตุ
23	800	10	20	วัดไม่ได้	ไม่อบ
23	800	10	20	วัดไม่ได้	อบ

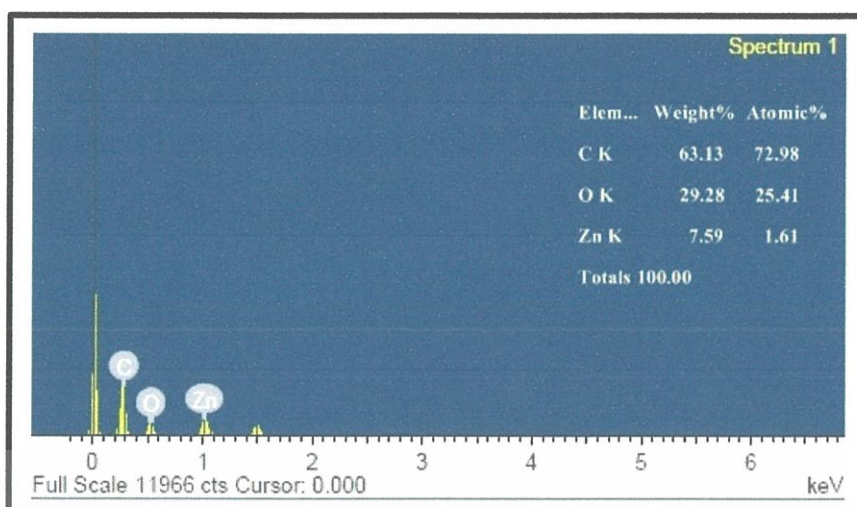
### ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX Spectrum ของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์

ผลการวิเคราะห์จาก EDX เป็นการบอกองค์ประกอบของธาตุภายในเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่ทำการทดลองโดยใช้ซิงค์อะซิเตตและPVPเป็นสารตั้งต้นที่ความเข้มข้นต่างกัน

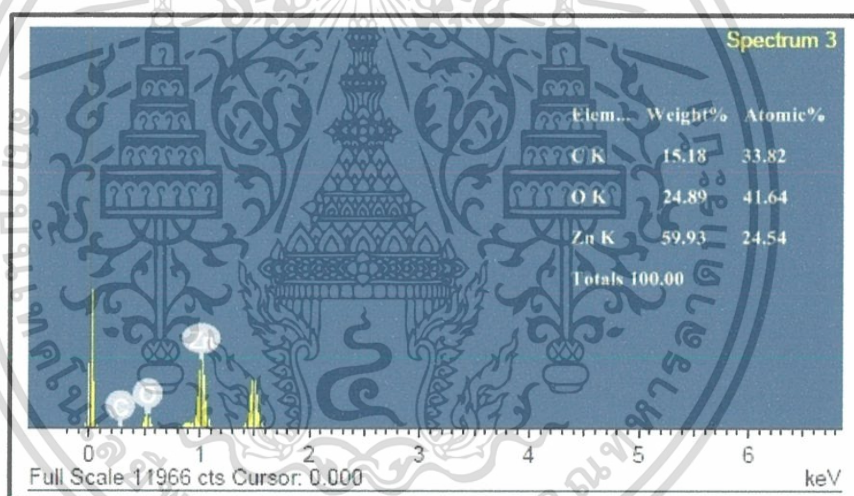


รูปที่ 4.2.1 EDX Spectrum ของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของ Zn 0.3g: PVP 5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 1:1 (ไม่อบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2.2 EDX Spectrum ของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของ Zn 2g: PVP 5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 1:1 (ไม่อบ)

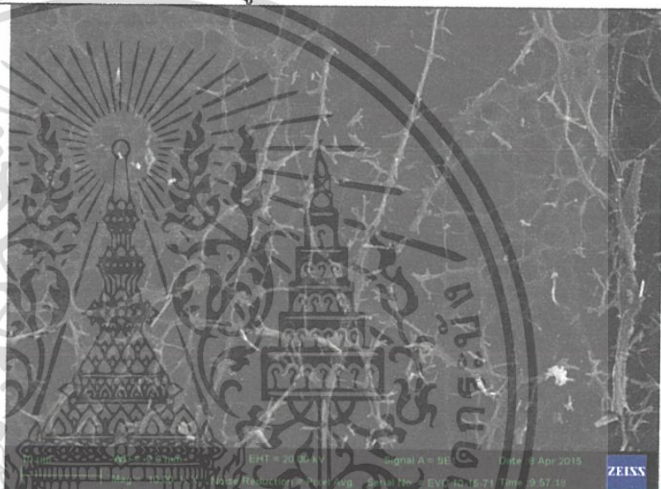
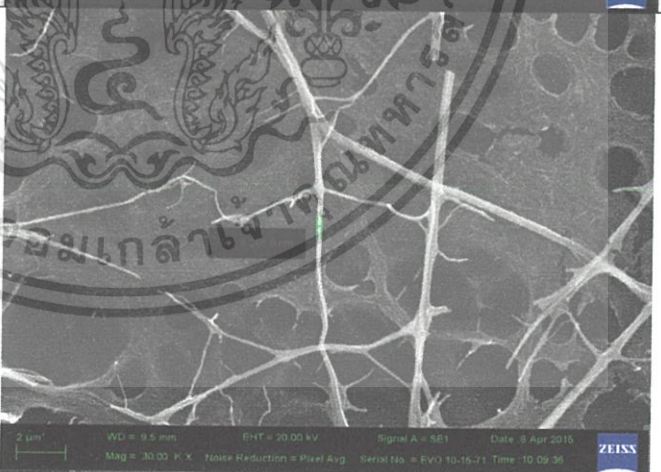


รูปที่ 4.2 3 EDX Spectrum ของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของ Zn 2g: PVP 5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 1:1 (อบที่อุณหภูมิ 500 °c เป็นเวลา 1 ชั่วโมง)

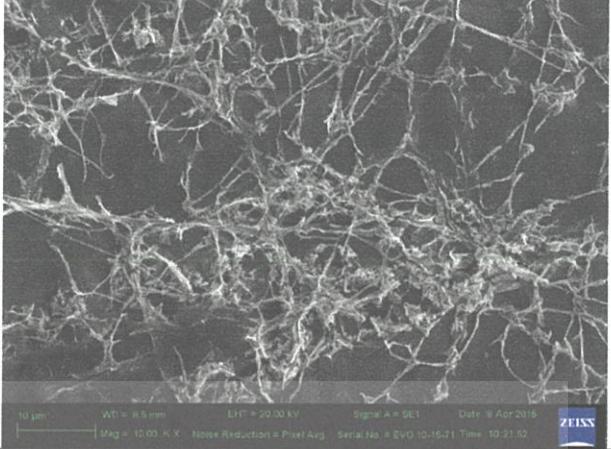

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปรียบเทียบสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ระหว่าง PVA กับ PVP พบว่า PVA ทำให้เกิดเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์มีขนาดเล็กกว่าเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ใช้ PVP เป็นสารตั้งต้น จึงนำผลการทดลองที่ได้มาทำการทดลองต่อเพื่อให้ได้ลักษณะและขนาดของเส้นใยที่ดีที่สุดโดยการสังเคราะห์เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของ Zn 5g: PVA 5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5 แล้วทำการเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการอบดังนี้

ตารางที่ 4.2.17 ผลการวิเคราะห์โดย Scanning electron microscope (SEM) เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ ความเข้มข้นของ Zn 5g: PVA 5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5 อบที่อุณหภูมิ 500 °c

ระยะเวลาในการอบเส้นใย(ชม.)	รูปผลการทดลอง
0.5	
1	



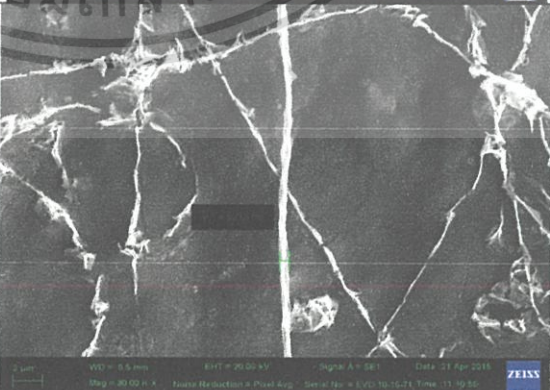
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะเวลาในการอบเส้นใย(ชม.)	รูปผลการทดลอง
2	
3	

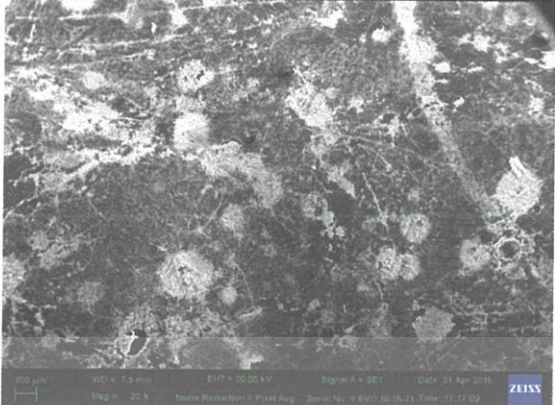
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงเวลาในการอบเส้นใยแล้วพบว่าที่อุณหภูมิ 500 °c เวลาที่เหมาะสมที่สุดคือการอบเส้นใยที่อุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ทำให้ได้เส้นใยที่มีขนาดเล็กที่สุดและดีที่สุด จากผลการทดลองที่ได้จึงนำมาทำการทดลองต่อโดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการอบโดยกำหนดเวลาอบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.2.18 ผลการวิเคราะห์โดย Scanning electron microscope (SEM) เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ ความเข้มข้นของ Zn 5g: PVA 5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5 เวลาในการอบ 1 ชั่วโมงโดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการอบเส้นใย

อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ (องศาเซลเซียส)	ผลการทดลอง
300	
400	
500	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ (องศาเซลเซียส)	ผลการทดลอง
600	

ตารางที่ 4.2.19 ความเข้มข้นของ Zn 5g: PVA 5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5 เวลาในการอบ 1 ชั่วโมงโดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการอบเส้นใย

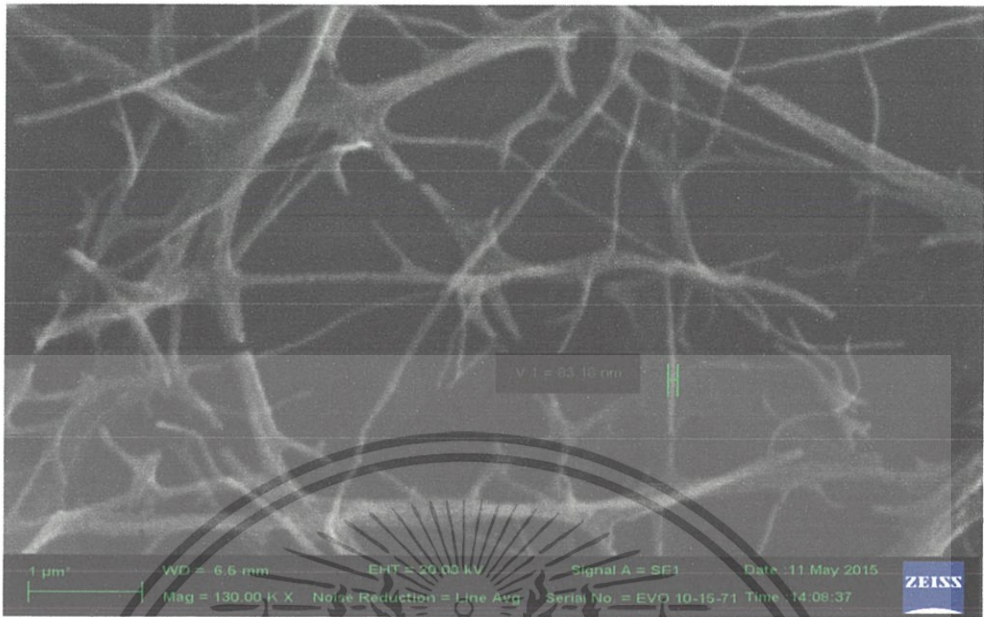
อุณหภูมิที่ใช้อบเส้นใย (องศาเซลเซียส)	ขนาดของเส้นใย (nm)
300	409.6
400	652.8
500	690.8
600	วัดไม่ได้

จากการสังเคราะห์เส้นใยนาโนซึ่งค่อออกไซด์โดยการเปลี่ยนเวลาในการอบเส้นใยและเปลี่ยนอุณหภูมิในการอบเส้นใยพบว่าเส้นใยเกิดความผิดปกติจึงตั้งสมมติฐานว่าเกิดจาก 3 สาเหตุดังนี้

1. เมื่อฉีดยาเส้นใยแล้วไม่ได้ทำการอบทันที
2. เข้มที่ใช้ฉีดยา
3. เตาที่ใช้อบ

จึงทำการแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นกับเส้นใยนาโนตามสมมติฐานที่ตั้งไว้

## 1. เมื่อฉีดเส้นใยแล้วทำการอบทันที



รูปที่ 4.2.4 ผลการวิเคราะห์โดย Scanning electron microscope (SEM) ของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของ Zn 5g: PVA 5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5 อบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง

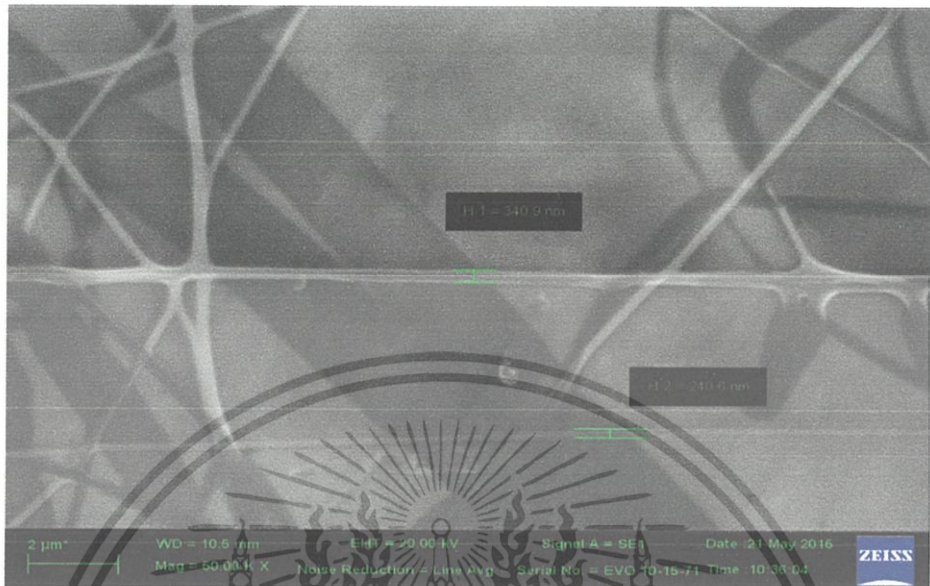
## 2. เปลี่ยนเข็มใหม่



รูปที่ 4.2.5 ผลการวิเคราะห์โดย Scanning electron microscope (SEM) ของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของ Zn 5g: PVA 5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5 อบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

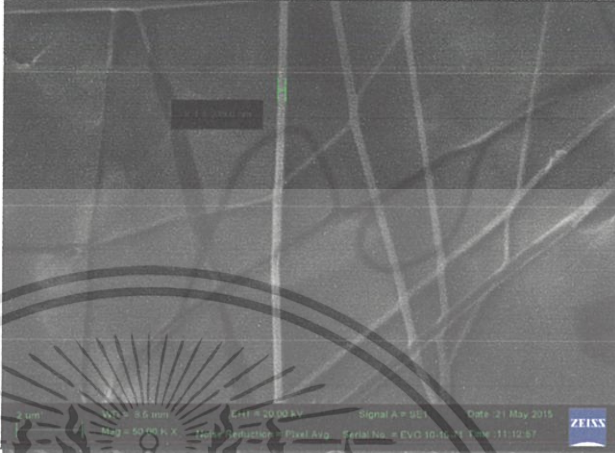


3. เปลี่ยนเตาที่ใช้ในการอบ โดยอบที่อุณหภูมิ 500°C 1 ชม. อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิคือ 5 °C/min โดยใช้เตาที่ติดตั้งระบบ PID



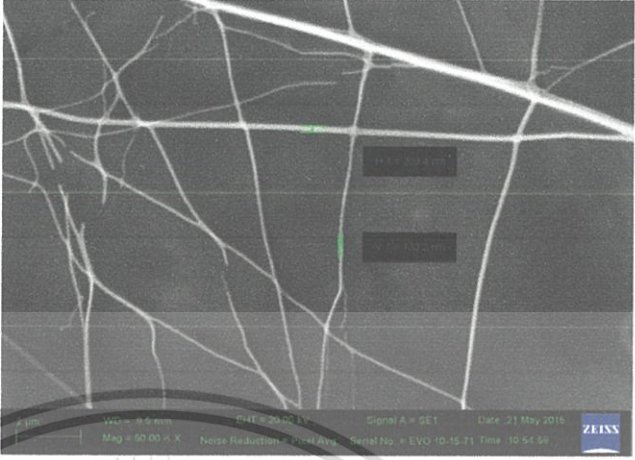
รูปที่ 4.2.6 ผลการวิเคราะห์โดย Scanning electron microscope (SEM) ของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของ Zn 5g: PVA 5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5 อบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2.20 ความเข้มข้นของ Zn 5g: PVA 5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5 เวลาในการอบ 1 ชั่วโมงโดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการอบเส้นใย แก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นกับเส้นใยโดยการใช้เข็มใหม่, ฉีดแล้วอบทันที และ ใช้เตาอบที่ติดตั้งด้วยระบบ PID

อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ (องศาเซลเซียส)	ผลการทดลอง
300	
400	
500	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการอบ (องศาเซลเซียส)	ผลการทดลอง
600	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## อภิปรายผลการทดลอง

จากผลการทดลองในตอนที่ 1 การสังเคราะห์พอลิเมอร์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีขนาดเล็กที่สุดเท่ากับ 2.4 ไมโครเมตร ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นตัวแปรควบคุมในการสังเคราะห์เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์คือ เข้มโลหะเบอร์ 23, อัตราเร็วในการฉีดเส้นใยคือ 800uL/min, ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงวัสดุที่รองรับเส้นใยคือ 10cm

จากผลการทดลองในตอนที่ 2 การสังเคราะห์เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ จากการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารละลาย 4 ความเข้มข้นที่ใช้ซิงค์อะซิเตดและPVAเป็นสารตั้งต้น ทั้งที่ทำการอบและไม่อบเส้นใย เพื่อทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เกิดขึ้น พบว่าเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของซิงค์อะซิเตด 5g: PVA 5g อัตราส่วนระหว่างสารละลายทั้งสองคือ 2:5 เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์หลังการอบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง ทำให้ได้เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีขนาดเล็กที่สุดเท่ากับ 180nm และจากการผลวิเคราะห์จาก EDX พบว่าภายในเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ประกอบด้วยธาตุ คาร์บอน (C), ออกซิเจน (O), สังกะสี (Zn)

จากผลการทดลองในตอนที่ 3 การสังเคราะห์เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ จากการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารละลาย 4 ความเข้มข้น ที่ใช้ซิงค์อะซิเตดและPVP เป็นสารตั้งต้น ทั้งที่ทำการอบและไม่อบเส้นใย เพื่อทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เกิดขึ้น พบว่าเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของซิงค์อะซิเตด 0.3g: PVP 5g อัตราส่วนระหว่างสารละลายทั้งสองคือ 1:1 เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ไม่ได้ผ่านการอบ ทำให้ได้เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีขนาดเล็กที่สุดเท่ากับ 356.1nm และจากการผลวิเคราะห์จาก EDX พบว่าภายในเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ประกอบด้วยธาตุ คาร์บอน (C), ออกซิเจน (O), สังกะสี (Zn) แต่ผลการทดลองในตอนที่ 3 จากการเพิ่มความเข้มข้นของซิงค์ทำให้ผงของซิงค์อะซิเตดมีมากเกินไปจนทำให้ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันเมื่อทำการฉีดจึงทำให้ไม่เกิดเป็นเส้นใย

เมื่อเปรียบเทียบเส้นใยในตอนที่ 2 และตอนที่ 3 พบว่าเส้นใยที่ใช้ซิงค์อะซิเตดและPVAเป็นสารตั้งต้นทำให้ได้เส้นใยที่ดีกว่าเส้นใยที่ใช้ซิงค์อะซิเตดและPVPเป็นสารตั้งต้น ทำการปรับปรุงเส้นใยโดยเปลี่ยนระยะเวลาในการอบเป็น 30 นาที, 1 ชั่วโมง, 2 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง พบว่าเส้นใยที่อบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสที่ระยะเวลา 1 ชั่วโมง ทำให้ได้เส้นใยที่ดีที่สุด และทำการปรับปรุงเส้นใยโดยการเปลี่ยนอุณหภูมิในการอบคือ 300°C, 400°C, 500°C, 600°C เส้นใยที่ได้เกิดความผิดปกติคือมีลักษณะไม่เป็นเส้นใยและขาดไม่เป็นเส้นที่ต่อเนื่องจึงตั้งสมมติฐานว่าสาเหตุที่ทำให้เส้นใยเกิดความผิดปกติมี 3 ข้อ คือ 1. ฉีดเส้นใยแล้วไม่ได้ทำการอบทันที 2. เข้มที่ใช้ฉีดต้น 3. เตาที่ใช้ในการอบพบว่าเมื่อทำการปรับปรุงการฉีดเส้นใยตามสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้ ทำให้เส้นใยมีลักษณะเป็นเส้นและความต่อเนื่องเพิ่มมากขึ้น

## บทที่ 5

# สรุปและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองสังเคราะห์เส้นใยนาโนซิงออกไซด์โดยใช้ซิงค์อะซิเตตและPVAเป็นสารตั้งต้นที่ความเข้มข้น Zn 5g: PVA 5g อัตราส่วนระหว่างสารละลายทั้งสองคือ 2:5 โดยใช้เข็มโลหะเบอร์ 24 อัตราเร็วในการฉีดสารละลายคือ 800uL/min ระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะถึงวัสดุรองรับเส้นใยคือ10cmและความต่างศักย์ไฟฟ้า 20kV อนุภาคอนุกรม 400 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1ชั่วโมง โดยใช้เตาอบเส้นใยที่ติดตั้งระบบ PID ทำให้ได้เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ขนาด 163.2 nm โดยที่ลักษณะของเส้นใยมีความต่อเนื่อง จากผลการทดลองพบว่าเส้นใยที่อบที่อุณหภูมิ 400องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1ชั่วโมง โดยใช้เตาอบเส้นใยที่ติดตั้งระบบ PID เส้นใยมีขนาดเล็กกว่า 163.2 nm แต่ลักษณะของเส้นใยขาดไม่ต่อเนื่อง

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ใช้ความต่างศักย์สูงจึงระมัดระวังขณะทำการฉีดเส้นใย
2. สารละลายที่ผสมแล้วเก็บไว้ได้ 2 วัน
3. เมื่อฉีดเส้นใยแล้วให้อบทันที
4. เตาที่ใช้อบควรเป็นเตาที่มีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ
5. ไม่ควรใช้เข็มเดิมซ้ำหลายครั้ง

## เอกสารอ้างอิง

มานิตา ชนะหิรัญกุลเดชและมุกดา ธรพรหมแก้ว. 2556. “การพัฒนากระบวนการผลิตเส้นใยนาโนเพื่อ การสังเคราะห์เส้นใยนาโน.” โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

R. Rangkupan, Electrospinning process of polymer melts, Ph.D. Dissertation, The University of Akron, Akron, OH, USA, 2002

Rangkupan, R. and Reneker, D. H., Electrospinning Process of Molten Polypropylene In Vacuum, J. Metals, Materials and Minerals

[Online]. Available: [www.material.chula.ac.th/RADIO47/January/radio1-1.htm](http://www.material.chula.ac.th/RADIO47/January/radio1-1.htm)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้