



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การสังเคราะห์และการวิเคราะห์เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิค
การปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิต

Synthesis and characterization of ZnO nanofibers by
electrospinning technique

กัญจน์ชญา หงส์เลิศคงสกุล

จิราภรณ์ พงษ์โสภา

ภัททิรา หอมหวน

ดุสิต งามรุ่งโรจน์

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้
จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๙

มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 2559A10802183

สัญญาเลขที่ 98/2559

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การสังเคราะห์และการวิเคราะห์เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิค
การปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิต

Synthesis and characterization of ZnO nanofibers by
electrospinning technique

กัญจน์ชญา หงส์เลิศคงสกุล

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

จิราภรณ์ พงษ์โสภา

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต

ภัททิรา หอมหวาน

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี

ดุสิต งามรุ่งโรจน์

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 98/2559

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยนี้ ขอขอบคุณฝ่ายส่งเสริมการวิจัย มหาวิทยาลัยบูรพา สำหรับการประสานงานอย่างดียิ่ง และขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ และสถานที่สำหรับทำงานวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยนี้ ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของท่านดังกล่าว ข้างต้น คณะผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่งใคร่ขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

คณะผู้วิจัย

2561

การสังเคราะห์และการวิเคราะห์เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิค

การปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิต

บทคัดย่อภาษาไทย

เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์จะสังเคราะห์ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิต เส้นใยนาโนของสารละลาย ZnAc:PVA ที่อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnA:PVA ที่แตกต่างกันคือ (2:2) (3:2) (4:2) (5:2) และ (6:2) จะปั่นลงบนแผ่นรองรับ ในการปั่นจะใช้ความต่างศักย์ที่แตกต่างกันคือ 16 18 20 22 และ 24 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับที่แตกต่างกันคือ 12 13 14 และ 15 cm เส้นใยนาโนที่ปั่นได้จะนำไปอบที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันคือ 450 500 550 และ 600 °C เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้ทั้งหมดจะนำไปวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้าง ทางแสง และทางไฟฟ้า

การวัดลักษณะทางสัณฐานของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าเส้นใยที่ได้ทั้งหมดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตร โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่พบในช่วง 25-530 นาโนเมตร ลักษณะทางโครงสร้างผลึกที่ศึกษาด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD) ยืนยันว่า เส้นใยที่ได้เป็นเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ เนื่องจากมีผลึกของซิงค์ออกไซด์ ค่าการส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงแสงที่ตามองเห็นของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้มีค่าสูงกว่า 85% ค่าแถบพลังงานแสงและค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์มีค่าอยู่ในช่วง 2.73-3.26 eV และ 113-186 Ωm ตามลำดับ

คำสำคัญ: เส้นใยนาโน, ซิงค์ออกไซด์, การปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

Synthesis and characterization of ZnO nanofibers by electrospinning technique

ABSTRACT

Zinc Oxide nanofibers were synthesized by electrospinning technique. The nanofibers of ZnAc:PVA solution, which has various ZnAc:PVA concentration ratios such as (2:2), (3:2), (4:2), (5:2), and (6:2), were spun on the substrate. To spin will run at different voltages, such as 16, 18, 20, 22 and 24 kV and at different distances between needle tip and substrate, such as 12, 13, 14 and 15 cm. The spun nanofibers were annealed at different annealing temperatures, such as 450, 500, 550 and 600°C. All of Zinc Oxide nanofibers were analyzed on the structural, optical and electrical properties.

The morphology measurement of zinc oxide nanofibers by Scanning Electron Microscope (SEM) showed that the diameter of all fibers is in the nanometer range and which is in the range of 25-530 nm. Structural characterization by X-ray diffraction (XRD) technique confirmed that these fibers are zinc oxide nanofibers due to being of zinc oxide crystalline structure. An average transmittance of above 85% in the visible wavelength region was obtained for zinc oxide nanofibers. The optical energy bandgap and resistivity of zinc oxide nanofibers were found in the range 2.73-3.26 eV and 113-186 Ωm ; respectively.

Key words: Nanofibers, Zinc Oxide, Electrospinning

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
Abstract.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.4 ขอบเขตของงาน	4
1.5 แนวทางดำเนินงาน.....	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 เส้นใยนาโน.....	5
2.2 ซิงค์ออกไซด์	7
2.3 เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์.....	8
2.4 เทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต	10
2.5 เครื่องมือวิเคราะห์	13
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	19
3.1 สารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง.....	19
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	20
3.3 การวิเคราะห์ผล.....	23

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	24
4.1 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของเส้นใยนาโน ZnO ด้วยเครื่อง SEM.....	24
4.2 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของเส้นใยนาโน ZnO ด้วยเครื่องXRD	33
4.3 การวิเคราะห์สมบัติทางแสงของเส้นใยนาโน ZnO ด้วยเครื่อง UV-Vis.....	38
4.4 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ด้วยเครื่องวัดสภาพ ต้านทานไฟฟ้า	44
5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	48
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	48
5.2 ข้อเสนอแนะ และประโยชน์ในทางประยุกต์ของผลการวิจัย.....	50
บรรณานุกรม	51
ประวัติย่อผู้ทำวิจัย.....	54

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้เส้นใยนาโนในงานด้านต่างๆ	6
2.2 สมบัติทั่วไปของซิงค์ออกไซด์	8
2.3 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ในงานด้านต่างๆ.....	9
2.4 ตัวแปรสารละลายที่มีผลต่อเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้จากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต	12
2.5 ตัวแปรระบบที่มีผลต่อเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้จากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	12
3.1 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองเมื่อแปรค่าอัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnA:PVA	21
3.2 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองเมื่อแปรค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า	22
3.3 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองเมื่อแปรค่าระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับ แผ่นโลหะรองรับ.....	22
3.4 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองเมื่อแปรค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ	23
4.1 สเปกตรัมการส่องผ่านแสง (%) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และ ค่าช่องว่างแถบพลังงานของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อัตราส่วน ความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA แตกต่างกันคือ (2:2) (3:2) (4:2) (5:2) และ (6:2) เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็ม กับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C	39
4.2 ค่าสเปกตรัมการส่องผ่านแสง (%) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และค่าช่องว่างแถบพลังงานของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ ไฟฟ้าแตกต่างกันคือ 16 18 20 22 และ 24 kV เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของ สารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C.....	41

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.3	ค่าสเปกตรัมการส่องผ่านแสง (%) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และค่าช่องว่างแถบพลังงานของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับแตกต่างกันคือ 12 13 14 และ 15 cm เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และอุณหภูมิในการอบ 550°C.....	42
4.4	ค่าสเปกตรัมการส่องผ่านแสง (%) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และค่าช่องว่างแถบพลังงานของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 450 500 550 และ 600°C เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm	44
4.5	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA แตกต่างกันคือ (2:2) (3:2) (4:2) (5:2) และ (6:2) เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C.....	45
4.6	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกันคือ 16 18 20 22 และ 24 kV อุณหภูมิในการอบ 550°C และระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm.....	45
4.7	ตารางค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับแตกต่างกันคือ 12 13 14 และ 15 cm เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และอุณหภูมิในการอบ 550°C.....	46

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.8	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 450 500 550 และ 600 °C เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm..... 47

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1	ลักษณะโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ 3
2.1	ภาพ SEM ของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต..... 5
2.2	โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์..... 7
2.3	การสังเคราะห์เส้นใยนาโนด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต..... 11
2.4	กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด..... 14
2.5	ส่วนประกอบและหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 15
2.6	เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์..... 16
2.7	ระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของ Bragg's law..... 16
2.8	สเปกตรัมการส่องผ่านแสงกับค่าความยาวคลื่น..... 17
2.9	รูปแบบวิธีการวัดแบบสองโพรบ..... 18
4.1	ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่าของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA แตกต่างกันคือ (2:2) (3:2) (4:2) (5:2) และ (6:2) เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C..... 25
4.2	ภาพฮิสโตรแกรมของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA แตกต่างกันคือ (2:2) (3:2) (4:2) (5:2) และ (6:2) เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C 26
4.3	ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่าของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกันคือ 16 18 20 22 และ 24 kV เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C 28

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.4 ภาพฮิสโตแกรมของเส้นโยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกันคือ 16 18 20 22 และ 24 kV เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C.....	29
4.5 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่าของเส้นโยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับแตกต่างกันคือ 12 13 14 และ 15 cm เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และอุณหภูมิในการอบ 550°C	30
4.6 ภาพฮิสโตแกรมของเส้นโยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับแตกต่างกันคือ 12 13 14 และ 15 cm เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และอุณหภูมิในการอบ 550°C	31
4.7 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่าของเส้นโยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 450 500 550 และ 600°C เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm.....	32
4.8 ภาพฮิสโตแกรมของเส้นโยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 450 500 550 และ 600°C เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm.....	33
4.9 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นโยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA แตกต่างกันคือ (2:2) (3:2) (4:2) (5:2) และ (6:2) เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C	34

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.10	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกันคือ 16 18 20 22 และ 24 kV เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C 36
4.11	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับแตกต่างกันคือ 12 13 14 และ 15 cm เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และอุณหภูมิในการอบ 550°C 37
4.12	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 450 500 550 และ 600°C เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm 38
4.13	สเปกตรัมการส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตรของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA แตกต่างกันคือ (2:2) (3:2) (4:2) (5:2) และ (6:2) เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C 39
4.14	สเปกตรัมการส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตรของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกันคือ 16 18 20 22 และ 24 kV เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C 40

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.15	สเปกตรัมการส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตรของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับแตกต่างกันคือ 12 13 14 และ 15 cm เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และอุณหภูมิในการอบ 550°C	42
4.16	สเปกตรัมการส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตรของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 450 500 550 และ 600°C เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm.....	43

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

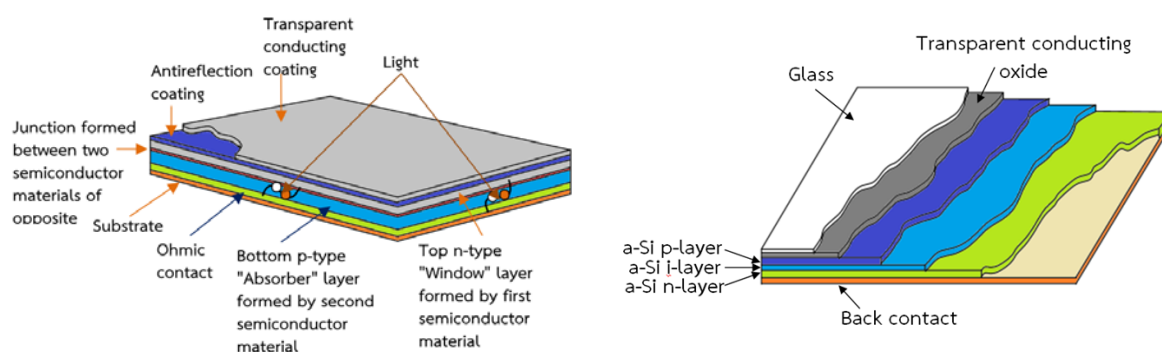
ในศตวรรษที่ 21 ประชากรมีการเติบโตที่สูงขึ้นอย่างมาก จึงมีการขยายเมืองและอุตสาหกรรมขนาดใหญ่เพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้มีความต้องการด้านพลังงานสูงขึ้นตาม ในขณะที่ปัญหาด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลแบบเดิมของอุตสาหกรรมยังคงมีอยู่อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นการเปลี่ยนการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลแบบเดิมไปเป็นการใช้พลังงานจากแหล่งพลังงานสะอาดน่าจะเป็นทางเลือกที่ดีในอนาคต (Li *et al.*, 2012) สำหรับพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานสะอาดที่มีอยู่อย่างไม่จำกัด มีศักยภาพสูง และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นักวิทยาศาสตร์ได้มีการพัฒนาเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อให้ได้เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดขึ้น ในปัจจุบันเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์มีด้วยกันหลายแบบเช่น แบบฟิล์มบาง (CÁRABE, & GANDIA, 2004) หรือแบบกระจกเคลือบสีย้อมร่วมกับฟิล์มออกไซด์ที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ (Dye-Sensitized Oxide Solar Cell; DSSC) (Tang, Tress, & Inganä, 2014) ทั้งนี้ไม่ว่าจะเป็นเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ลักษณะใดก็ตาม เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์นั้นต้องมีฟิล์มบางชั้นหนึ่งที่มีลักษณะเป็นกระจกนำไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 1.1 ซึ่งอาจทำได้โดยการเคลือบฟิล์มบางออกไซด์นำไฟฟ้าชนิดโปร่งแสง (Transparent Conducting Oxide; TCO) เพราะฟิล์มบางออกไซด์นำไฟฟ้าชนิดโปร่งแสง มีสมบัติกึ่งตัวนำไฟฟ้าที่โปร่งแสงในย่านความถี่ที่ตาคนมองเห็นได้ มีความเสถียรต่อสารเคมีและแรงทางกล ฟิล์มบางออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสงส่วนใหญ่มักทำมาจากฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) และฟิล์มทินออกไซด์ (SnO_2) แต่เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านต้นทุนในการผลิตที่ค่อนข้างมีราคาสูง จึงทำให้ไม่เหมาะกับงานวิจัยเพื่อศึกษาและพัฒนาในการเพิ่มประสิทธิภาพมากกว่าการผลิตและนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ซึ่งมีต้นทุนในการผลิตที่สูง จากเหตุผลทางด้านราคาและการใช้งาน จึงได้มีการวิจัยและพัฒนาฟิล์มบางออกไซด์นำไฟฟ้าชนิดโปร่งแสงชนิดใหม่ขึ้น คือ ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ต่อมานักวิทยาศาสตร์ได้มีการพัฒนาฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์นำไฟฟ้าชนิดชนิดโปร่งแสงนี้ให้มีประสิทธิภาพทางการโปร่งแสง การนำไฟฟ้า และทางโครงสร้างอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ได้ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์นำไฟฟ้าชนิดโปร่งแสงที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

และเมื่อนักวิทยาศาสตร์ได้ค้นพบวิธีผลิตวัสดุนาโนโครงสร้างแบบหนึ่งมิติ (One Dimensional Nanostructure) อันทำให้เกิดการค้นพบสมบัติใหม่ๆ ของวัสดุนาโนตามมานั้น นักวิทยาศาสตร์ได้มีการค้นคว้าและวิจัยที่จะนำวัสดุนาโนมาใช้เป็นพลังงานสะอาดในเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ (Dong, Kennedy, & Wu, 2011) เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงแบบเดิมจะมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานที่จำกัด เพราะอิเล็กตรอนมีการกระเจิงตรงรอยต่อ (Interface Scattering) สูง และมีการเคลื่อนย้ายที่ (Mobility) ที่จำกัด ทำให้เกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนก่อนที่จะถึงขั้วไฟฟ้า การนำเส้นใยนาโนมาใช้เป็นขั้วที่รับแสง (Photoelectrode) จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการปรับปรุงประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากการทำให้พื้นผิวเพิ่มขึ้น (Chuangchote, Sagawa, & Yoshikawa, 2008) ดังนั้นหากนำแนวคิดทางด้านโครงสร้างแบบหนึ่งมิติหรือที่มีมิติต่ำๆ มาใช้ในการผลิตเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์โปร่งแสงนำไฟฟ้าก็น่าจะช่วยให้ประสิทธิภาพของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้นได้ อย่างไรก็ตามการควบคุมพารามิเตอร์ที่ใช้ในการผลิตวัสดุเส้นใยนาโนจะทำให้โครงสร้างและขนาดรูปร่างของวัสดุนาโนนั้นเปลี่ยนไป ส่งผลให้สมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมีของวัสดุนั้นเปลี่ยนตามด้วย

สำหรับเทคนิคที่สังเคราะห์วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์มีหลายเทคนิค ได้แก่ เทคนิคการสะสมไอเชิงกายภาพ (Physical vapor deposition; PVD) (Cadena *et al.*, 2010), เทคนิคการสะสมไอเชิงเคมี (Chemical vapor deposition; CVD) (Chang *et al.*, 2004) , เทคนิคการกราฟต์เชิงเคมี (Chemical grafting) (Rui *et al.*, 2008) เทคนิคโซล-เจล (Sol-gel) (Znaidi *et al.*, 2012) (Jurablu, Farahmandjou, & Firoozabadi, 2015) และเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning) (Imran *et al.*, 2017) เป็นต้น ซึ่งแต่ละเทคนิคมีทั้งข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับความต้องการในการนำไปใช้งาน ในบรรดาเทคนิคต่าง ๆ เทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning) เป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถผลิตวัสดุนาโนหนึ่งมิติ และเป็นเทคนิคที่ใช้งานง่ายและประหยัดเวลาในการผลิตเส้นใยนาโนพอลิเมอร์ อนินทรีย์ และเส้นใยนาโนไฮบริด (Haider *et al.*, 2012) (Haider, & Park, 2009) มีการรายงานว่าตัวแปรที่มีผล และสามารถควบคุมสมบัติของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์จากกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตที่สำคัญได้แก่ อัตราการไหลของสารตั้งต้น ขนาดของไฟฟ้าแรงดันสูง ระยะห่างระหว่างแผ่นรองรับกับปลายเข็ม และอัตราส่วนความเข้มข้นของสารตั้งต้น รวมทั้งอุณหภูมิที่ใช้ในการอบเส้นใยที่สังเคราะห์ได้ (Kurecic, 2013) เป็นต้น สำหรับสมบัติของเส้นใยนาโนที่ได้จากเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต จะพบว่าเส้นใยนาโนที่ได้จะมีขนาดเส้น

ผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กในระดับนาโน มีรูพรุนขนาดเล็กอยู่เป็นจำนวนมาก มีอัตราส่วนระหว่างพื้นผิวต่อปริมาตร (Surface-to-volume ratio) สูง จากสมบัติของเส้นใยนาโนต่างๆ เหล่านี้ เมื่อสังเคราะห์เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตลงบนชั้นของฟิล์มบาง TCO จะทำให้เกิดการส่งผ่านอนุภาคต่างๆ ได้ดีขึ้น ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ได้

ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้นคณะผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาการสังเคราะห์และการวิเคราะห์เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิต จากนั้นนำเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ไปศึกษาสมบัติต่างๆ ได้แก่ ลักษณะพื้นฐานด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) สมบัติทางแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectroscopy (UV-Vis) และสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า เป็นต้น



ภาพที่ 1.1 ลักษณะโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อสังเคราะห์เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต
2. เพื่อศึกษาสมบัติทางโครงสร้าง ทางแสง และทางไฟฟ้าของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่

สังเคราะห์ด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ทราบสมบัติทางโครงสร้าง ทางแสง และทางไฟฟ้าของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

1.4 ขอบเขตของงาน

1. ได้เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต
2. ได้สมบัติทางโครงสร้าง ทางแสง และทางไฟฟ้าของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

1.5 แนวทางดำเนินงาน

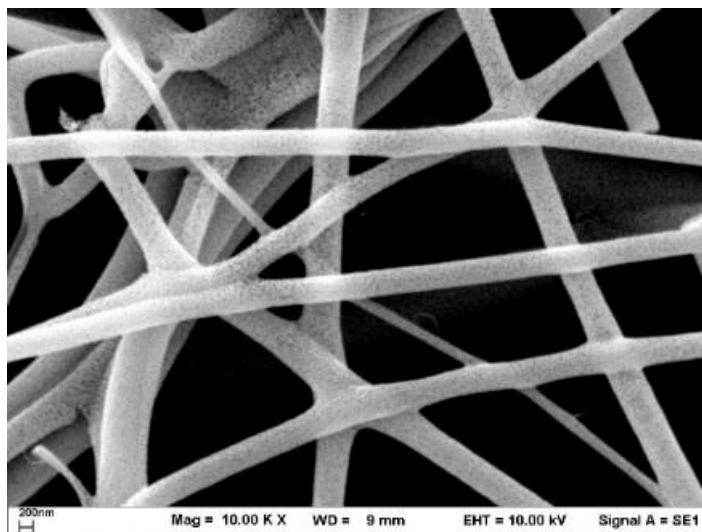
1. ศึกษาเทคนิคการปั่นเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยไฟฟ้าสถิต
2. จัดซื้อสารเคมี แผ่นรองรับ และวัสดุต่างๆ ที่ใช้ในการสังเคราะห์เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์
3. จัดเตรียมสารตั้งต้นที่ใช้ในการปั่นเส้นใยที่มีอัตราส่วนความเข้มข้น ZnA: PVA ที่แตกต่างกัน
4. ปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิตในเงื่อนไขที่แตกต่างกัน ได้แก่
 - ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง
 - ระยะห่างระหว่างเข็มฉีดยากับแผ่นรองรับ
5. ออบเส้นใยนาโนที่ปั่นได้ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน
6. วิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้าง สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้าของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่องมือ เช่น
 - SEM และ XRD: ทางโครงสร้าง
 - UV-Vis: ทางแสง
 - เครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า: ทางไฟฟ้า
7. ประมวลผลและวิเคราะห์ผลการวิจัย
8. สรุปผลการวิจัยและเขียนรายงานการวิจัยและแนวทางการพัฒนา

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เส้นใยนาโน

เส้นใยนาโน (nanofibers) มีลักษณะโดยทั่วไปเป็นเส้นใยของของแข็งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กอยู่ในระดับนาโนเมตร ดังแสดงในภาพที่ 2.1 มีอัตราส่วนระหว่างพื้นผิวต่อปริมาตร (Surface-To-Volume Ratio) สูง นั่นคือมีพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่สูง จากลักษณะโดยทั่วไปทำให้เส้นใยนาโนเหมาะนำไปประยุกต์ใช้ในงานเฉพาะด้านที่ต้องการความได้เปรียบของวัสดุสังเคราะห์ที่มีขนาดเล็กมากๆ พร้อมกับมีสมบัติพิเศษต่างๆ ที่ดีมากขึ้น อาทิเช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติทางชีวภาพ เป็นต้น ปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้เส้นใยนาโนในงานด้านต่างๆ อย่างกว้างขวาง เช่น ด้านการแพทย์ (Chaisri, Thomas, & Siri, 2011) (Rujitanaroj, Pimpha, Supaphol, 2008) (Suwantong *et al.*, 2012) (Khil *et al.*, 2005) ด้านวัสดุศาสตร์ (Faccini *et al.*, 2015) (Nawanil, & Vittayakorn, 2011) ด้านสิ่งแวดล้อมและเทคโนโลยีชีวภาพ (Suwantong *et al.*, 2007) และด้านวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 2.1 สำหรับเครื่องที่ใช้ในการสังเคราะห์เส้นใยนาโนที่ได้รับความนิยมมากที่สุดและมีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ การสังเคราะห์ด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต



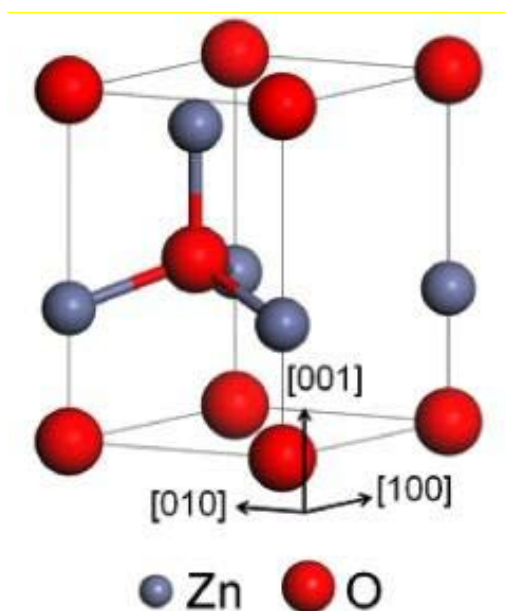
ภาพที่ 2.1 ภาพ SEM ของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้เส้นใยนาโนในงานด้านต่างๆ

ด้านการประยุกต์ใช้เส้นใยนาโน	คุณสมบัติพิเศษ	เส้นใย	ตัวอย่าง
การแพทย์	สมบัติการย่อยสลายได้ และ สมบัติทางชีวภาพ (Biocompatibility)	เส้นใยนาโนพอลิเมอร์ในธรรมชาติ เช่น ไคโตซาน (Chitosan) ไหม (Silk) คอลลาเจน (Collagen) เป็นต้น	- ใช้ด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ (Tissue Engineering) - ผ้าปิดแผล - ไหมเย็บแผล
ด้านวัสดุศาสตร์	สมบัติเชิงกล	เส้นใยนาโนคาร์บอน (Carbon Nanofiber) (มีค่า Young's Modulus) และความแข็งแรง (Strength) สูง)	- ใช้เป็นวัสดุเสริมโครงสร้างในวัสดุคอมโพสิต
ด้านสิ่งแวดล้อมและด้านเทคโนโลยีชีวภาพ	สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี สมบัติเฉพาะทางชีวภาพของโมเลกุล สมบัติความเลือกจำเพาะของเมมเบรน	เส้นใยนาโนไททานเนียมขนาดเล็กทำให้ระบบกรองมีความละเอียดและมีช่องกรองเล็กลงได้และเพิ่มสมบัติทางเคมี	-ระบบกรองมลภาวะทั้งทางอากาศ และทางน้ำ -ระบบกรองน้ำจืดจากน้ำทะเล -ระบบกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสีย -แผ่นเมมเบรนคัดแยก (Affinity Membrane)
ด้านวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์	สมบัติการนำไฟฟ้า และสมบัติเชิงกล	-ใช้นาโนพอลิเมอร์อิเล็กทรอนิกส์	-อุปกรณ์ระดับนาโนทางอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ตัวนำไฟฟ้า ตัวเก็บประจุ ทรานซิสเตอร์ ไดโอด หน่วยความจำและชิพในคอมพิวเตอร์

2.2 ซิงค์ออกไซด์

ซิงค์ออกไซด์ มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอลโครสแพค (Hexagonal Closed Pack: hcp) ภายในโครงสร้างมีออกซิเจนไอออน (Oxygen Ions, O^{2-}) แทรกอยู่ตรงตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างซิงค์ไอออน (Zinc Ions, Zn^{2+}) ซึ่งทำพันธะกันแบบเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) เรียกว่า โครงสร้างแบบ “เวิทซ์ไฮท์” (Wurtzite Structure) ซิงค์ออกไซด์มีค่าคงที่ผลึก (Lattice Constants) ดังนี้ $a = 3.24 \text{ \AA}$ และ $c = 5.19 \text{ \AA}$ ดังแสดงในภาพที่ 2.2 และมีสมบัติทั่วไปของซิงค์ออกไซด์แสดงในตารางที่ 2.2 เนื่องจากซิงค์ออกไซด์มีแถบพลังงานกว้าง จึงใช้งานในที่มีอุณหภูมิสูงได้ดีกว่าสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานแคบ



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์

(ที่มา: http://ej.iop.org/images/0953-8984/25/13/135002/Full/cm453799f1_online.jpg)

ตารางที่ 2.2 สมบัติทั่วไปของซิงค์ออกไซด์

ชนิดสารกึ่งตัวนำ	เอ็น (N-type)
มวลโมเลกุล	81.4084 g/mol
สัดส่วนของน้ำหนักของซิงค์ต่อออกซิเจน	มีประมาณ 66/34
ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 20°C	5.67526 g/cm ³
จุดหลอมเหลว	1975°C
จุดเดือด	2360°C
ช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน	ประมาณ 3.37 eV (Wide Band Gap)

2.3 เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์

จากหัวข้อที่ 2.1 ที่กล่าวถึงสมบัติและการประยุกต์ใช้งานของเส้นใยนาโน และในหัวข้อที่ 2.2 ที่กล่าวถึงซิงค์ออกไซด์ หากนำซิงค์ออกไซด์มาสังเคราะห์เป็นเส้นใยนาโนก็จะช่วยเพิ่มสมบัติที่โดดเด่นของซิงค์ออกไซด์ และสามารถนำเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้นี้ไปประยุกต์ในงานด้านต่างได้มากยิ่งขึ้น ตัวอย่างการประยุกต์ใช้เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ในงานด้านต่างๆ (Doshi, & Reneker, 1995) (Huang *et al.*, 2003) (Deitzel *et al.*, 2001) เช่น ด้านด้านเภสัชกรรม ด้านเครื่องสำอาง และผลิตภัณฑ์กันแดด อุตสาหกรรมอาหารและยา อุตสาหกรรมการผลิตยางอุตสาหกรรมเซรามิก อุตสาหกรรมสิ่งทอและอุตสาหกรรมเคมีอื่นๆ และอุตสาหกรรมสี แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ในงานด้านต่างๆ

ด้านการใช้งาน	ตัวอย่างประยุกต์ใช้เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์
ด้านเภสัชกรรม	- เป็นยาสมานแผล ลดการอักเสบ ยับยั้งแบคทีเรียได้ และรักษาโรคติดเชื้อที่ผิวหนัง
ด้านเครื่องสำอางและผลิตภัณฑ์กันแดด	- เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์กันแดด และในเครื่องสำอาง เพื่อปกป้องรังสี UV-A และ UV-B ทำให้เกิดสัมผัสนุ่มลื่น โปร่งใส และไม่มีสีหลังจากที่ทาลงบนผิว
อุตสาหกรรมอาหารและยา	- ใช้เติมในอาหารและยาของคนและสัตว์ นาโนซิงค์ออกไซด์จะมีอัตราการดูดซึมเข้าสู่ร่างกายสูงกว่าไมโครซิงค์ออกไซด์ ทำให้ลดปริมาณการเติมซิงค์ออกไซด์ในอาหารและยาได้
อุตสาหกรรมการผลิตยาง	- ใช้เป็นสารลดแรงตึงผิว ป้องกันการขีดข่วน ช่วยยืดอายุการใช้งานของยางได้
อุตสาหกรรมเซรามิก	- การใช้นาโนซิงค์ออกไซด์ในการให้สีขาวบนเซรามิกจะช่วยลดอุณหภูมิการเผาเซรามิกให้เหลือเพียง 400-600°C และช่วยให้ผิวของเซรามิกมีความมันวาวราวกับกระจก
อุตสาหกรรมสิ่งทอและอุตสาหกรรมเคมีอื่นๆ	- ใช้ในการป้องกันแบคทีเรียและเชื้อรา การกำจัดกลิ่นของเสื้อผ้า เสื้อผ้าทำความสะอาดตัวเอง ผลิตเส้นใยและสิ่งทอที่สามารถป้องกัน UV
อุตสาหกรรมสี	- ใช้เป็นสารป้องกันไฟฟ้าสถิต และป้องกันรังสี UV และใช้ในการทำสีที่ทำความสะอาดตัวเองได้

2.4 เทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

เทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตหรือเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงเป็นเทคนิคที่ใช้งานง่าย ไม่ซับซ้อน ราคาถูก สำหรับใช้สังเคราะห์เส้นใยนาโนในโดยอาศัยพื้นฐานทางไฟฟ้าสถิต ภาพที่ 2.3 จะแสดงการสังเคราะห์เส้นใยนาโนด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน ได้แก่

1. เครื่องควบคุมอัตราการไหลของสารละลายพร้อมหลอดบรรจุสารละลาย

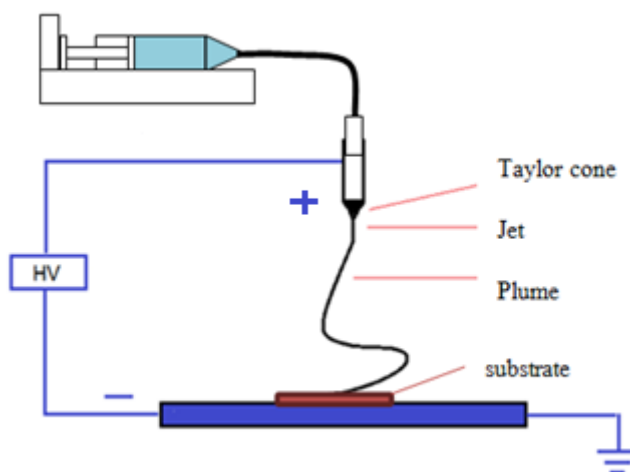
เมื่อบรรจุสารละลายในหลอดบรรจุสารละลายแล้ว ให้นำหลอดบรรจุสารละลายไปต่อเข้ากับท่อซิลิโคนที่มีเข็มโลหะอยู่อีกด้าน และนำหลอดบรรจุสารละลายไปติดตั้งกับเครื่องควบคุมอัตราการไหลของสารละลาย เครื่องควบคุมอัตราการไหลของสารละลายจะทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของสารละลายที่ออกจากหลอดบรรจุสารละลายให้คงที่ เพื่อทำให้เกิดการสังเคราะห์เส้นใยอย่างต่อเนื่อง สม่ำเสมอและมีประสิทธิภาพ และเกิดการควบคุมขนาดและปริมาณการเกิดเส้นใยได้

2. เข็มโลหะ และวัสดุรองรับที่นำไฟฟ้า

เข็มโลหะจะใช้เป็นขั้วแอโนดของเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ซึ่งจะต่อกับท่อซิลิโคนและหลอดบรรจุสารละลาย เข็มโลหะนี้จะทำหน้าที่เป็นหัวฉีดในระบบการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต สำหรับแผ่นโลหะรองรับที่นำไฟฟ้าจะใช้เป็นขั้วแคโทดของเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ซึ่งจะใช้วางชิ้นงาน (แผ่นซิลิกอน, แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ และกระจกควอทซ์) ที่รองรับเส้นใยนาโนที่เกิดขึ้น รวมทั้งการจัดเรียงเส้นใยให้มีรูปแบบต่างๆ เพื่อเหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป

3. แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากำลังสูง

แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากำลังสูงเป็นเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงระดับกิโลโวลต์ให้แก่ระบบการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต โดยขั้วแอโนดของเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงจะเชื่อมไว้ที่ปลายเข็ม และขั้วแคโทดของเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงจะเชื่อมไว้ที่แผ่นโลหะรองรับที่นำไฟฟ้า ทำให้เกิดความต่างศักย์และเกิดแรงทางไฟฟ้าระหว่างขั้วทั้งสองขึ้น ส่งผลให้เกิดการดึงสารละลายให้ยืดออกเป็นเส้นใยนาโน



ภาพที่ 2.3 การสังเคราะห์เส้นใยนาโนด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

สำหรับขั้นตอนการทำงานของการทำงานการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต จะเริ่มจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากำลังสูงจ่าย ศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงให้แก่ระบบทำให้มีศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นที่ปลายเข็มโลหะ ผิวของสารละลาย จะถูกดึงเนื่องจากแรงทางไฟฟ้า ส่งผลให้สารละลายที่ปลายเข็มโลหะเปลี่ยนรูปร่าง จากครึ่งทรงกลม เป็นรูปกรวยที่เรียกว่า “กรวยของเทเลอร์” (Taylor’s Cone) และ เมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าจนถึงค่าหนึ่ง แรงทางไฟฟ้าสถิตจะมากกว่าแรงตึงผิวของสารละลาย ทำให้สารละลายพุ่งออกมาเป็นลำ (Jet) ออก จากปลายเข็มโลหะ ซึ่งถือว่าการเริ่มต้นการทำงานของการทำงานการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ภายหลังจากที่ลำ ของสารละลายได้ยืดออกมาห่างจากจุดเริ่มต้นระยะหนึ่ง จะพบว่าสารละลายถูกเหนี่ยวนำให้เกิด ประจุที่ผิวของสารละลาย และด้วยสนามไฟฟ้าภายนอกที่เกิดจากความต่างศักย์ระหว่างปลายเข็มถึง วัสดุรองรับ จึงส่งผลให้เกิดลำของประจุขึ้น ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า เป็นความไม่เสถียรของการบิด โค้ง (Bending Instability) แรงที่เกิดขึ้นจึงไม่สมดุล ทำให้ลำสารละลายยืดออกในเส้นทางที่ซับซ้อน ส่งผลให้เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลงอย่างมาก และยิ่งรอบของการบิดโค้งมีจำนวนมากขึ้นจะทำให้สารละลายยืดออกเป็นเส้นที่เล็กลงและเกิดการระเหยของตัวทำละลายมากขึ้น ในที่สุดจึง เกิดเป็นเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับนาโนเมตรตกลงบนวัสดุรองรับที่นำ

สำหรับการสังเคราะห์เส้นใยนาโนด้วยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต จะมีตัวแปรที่มีส่งผลต่อลักษณะ และขนาดของเส้นใยนาโน ได้แก่ ตัวแปรสารละลาย และตัวแปรระบบ ซึ่งแสดงรายละเอียดในตาราง ที่ 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.4 ตัวแปรสารละลายที่มีผลต่อเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้จากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

ตัวแปรสารละลาย	ผลของลักษณะต่อเส้นใยนาโน
ความหนืดของสารละลาย (Solution Viscosity)	ถ้าสารละลายมีความหนืดน้อย โมเลกุลของตัวทำละลายที่ไม่ได้จับกับโมเลกุลของพอลิเมอร์ จะมีความหนาแน่นมาก ส่งผลให้จับตัวกันเป็นก้อนทรงกลมคล้ายเม็ดป๊อปคอร์น ถ้าสารละลายมีความหนืดมาก สารละลายจะเกิดการแห้งตัวอย่างรวดเร็วที่ปลายเข็มโลหะทำให้เข็มอุดตัน
ความเข้มข้นของสารละลาย (Solution Concentration)	ถ้าสารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้น จะได้เส้นใยที่มีปิตส์หรือหยดขนาดเล็กลดลง แต่ถ้าความเข้มข้นของสารละลายมีค่ามากไป จะลดปรากฏการณ์การบิดโค้งที่ไม่มีเสถียรภาพ ส่งผลให้เส้นทางการเคลื่อนที่ของสารละลายลดลงจะทำให้เส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้น
สภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity)	ถ้าสารละลายมีสภาพการนำไฟฟ้าที่ดี ส่งผลต่อการยึดออกเกิดเป็นเส้นของสารละลายได้ดีขึ้น และลดการเกิดปิตส์

ตารางที่ 2.5 ตัวแปรระบบที่มีผลต่อเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้จากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

ตัวแปรระบบ	ผลของลักษณะต่อเส้นใยนาโน
แรงดันไฟฟ้า (Voltage)	ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบมีค่าสูงขึ้น จะส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเล็กลง และทำให้ตัวทำละลายระเหยได้เร็วขึ้น
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มโลหะ (Diameter Of Needle)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มเล็กลง จะส่งผลให้ขนาดของเส้นใยเล็กลงด้วย เนื่องจากความตึงผิวของหยดสารละลายมากขึ้นทำให้ระยะเวลาที่เส้นใยยึดออกก่อนตกลงบนวัสดุรองรับมากขึ้น

ตารางที่ 2.5 ตัวแปรระบบที่มีผลต่อเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้จากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต (ต่อ)

ตัวแปรระบบ	ผลของลักษณะต่อเส้นใยนาโน
อุณหภูมิของสารละลาย (Temperature)	ถ้าอุณหภูมิของสารละลายสูงจะเพิ่มอัตราการระเหยให้สูงขึ้น สารละลายมีความหนืดน้อยลงและพอลิเมอร์ละลายในตัวทำละลายได้ดีขึ้นส่งผลให้สารละลายยืดออกได้ง่ายและทำให้ขนาดของเส้นใยนาโนเล็กลง
อัตราการไหลของสารละลาย (Flow Rate)	ถ้าอัตราการไหลมีค่ามากจะทำให้เส้นใยและปิตส์มีขนาดใหญ่มากขึ้น
ระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึง วัสดุรองรับ (Distance Between Tip And Collector)	ถ้าระยะห่างมีค่ามากขึ้น เส้นใยจะมีขนาดเล็กกว่าเพราะลำของสารละลายมีเวลาในการยืดออกนานมากขึ้น

2.5 เครื่องมือวิเคราะห์

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก และเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่าลักษณะพื้นฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษา และกำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดาที่มีค่าต่ำ ใช้ดูวัตถุเล็กสุดประมาณ 0.2 ไมโครเมตร และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3,000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง มีความสามารถในการแยกดี เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้นเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 100,000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพ ซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 -100 μm อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการ

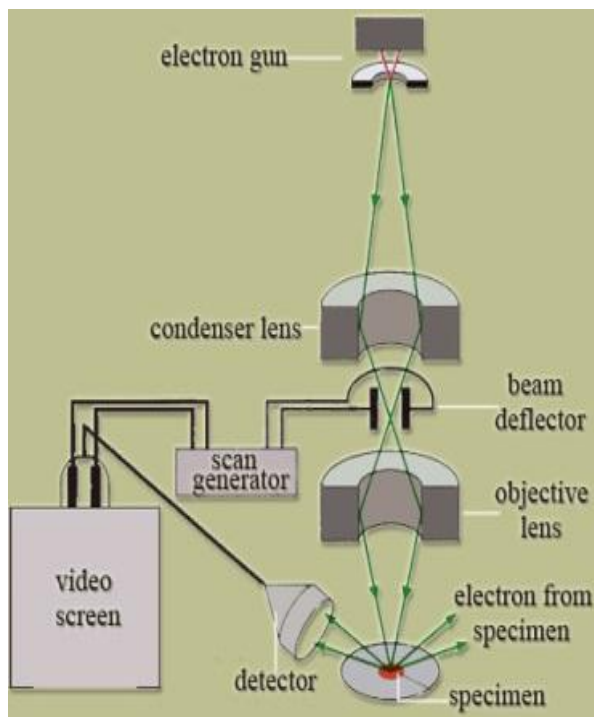
วิเคราะห์อื่น เช่น (Energy Dispersive Spectrometry, EDS) และ (Wavelength Dispersive Spectrometry, WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน ซึ่งภาพที่ 2.4 แสดงกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด



ภาพที่ 2.4 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

(ที่มา: <http://www.microscopic.center.sci.buu.ac.th/service-SEM.html>)

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser Lens) เพื่อให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการหากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป แสดงส่วนประกอบและหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังภาพที่ 2.5

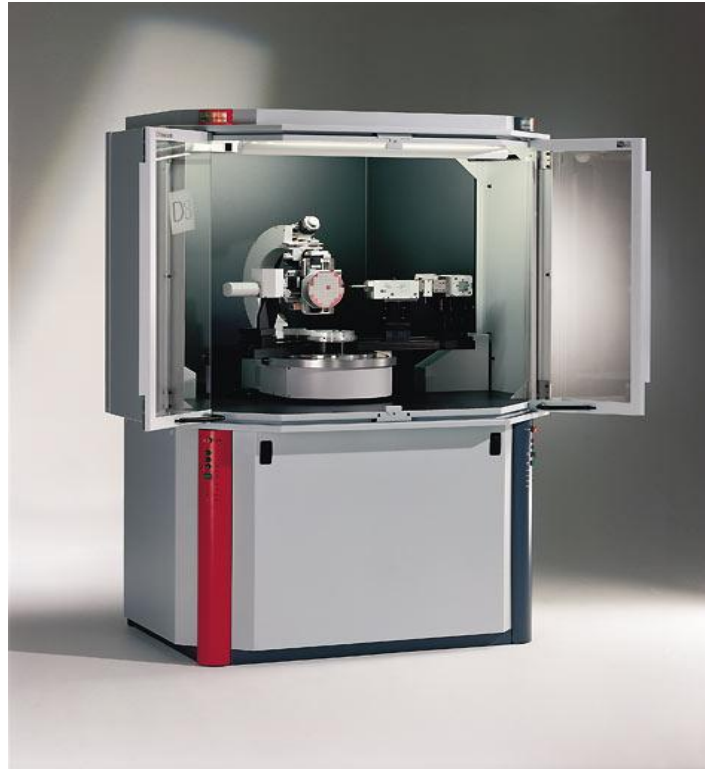


ภาพที่ 2.5 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

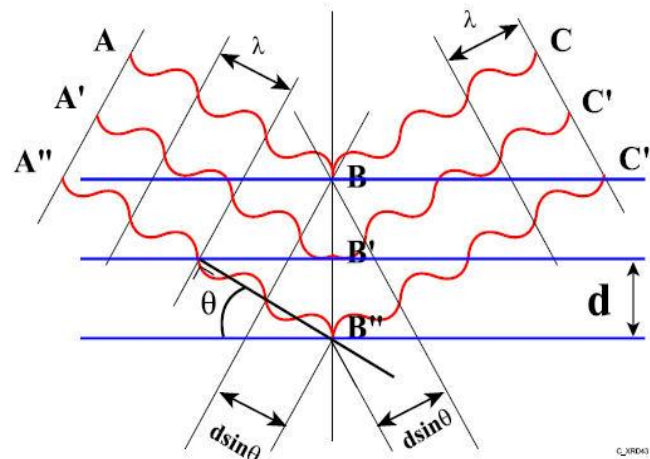
(ที่มา: <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>)

2. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction; XRD)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก โดยไม่ทำลายชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 2.6 อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในตัวอย่าง ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิดจะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากัน รูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างแต่ละชนิดที่ออกมาจึงไม่เท่ากัน ทำให้ทราบได้ว่าในตัวอย่างนั้นๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณหาปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่าง คำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละหน่วยเซลล์ ความเครียดของตัวอย่าง ค่าความเป็นผลึกของตัวอย่างได้อีกด้วยการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ยังผ่านชั้นผลึกที่อยู่ในตัวอย่าง จะใช้ตัวตรวจจับและรับความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างๆ และนำมาหาระยะห่างระหว่างอะตอมของตัวอย่าง จากสมการของแบร็ก (Bragg's Equation) หรือ $2d \sin \theta = n\lambda$ ดังแสดงในภาพที่ 2.7



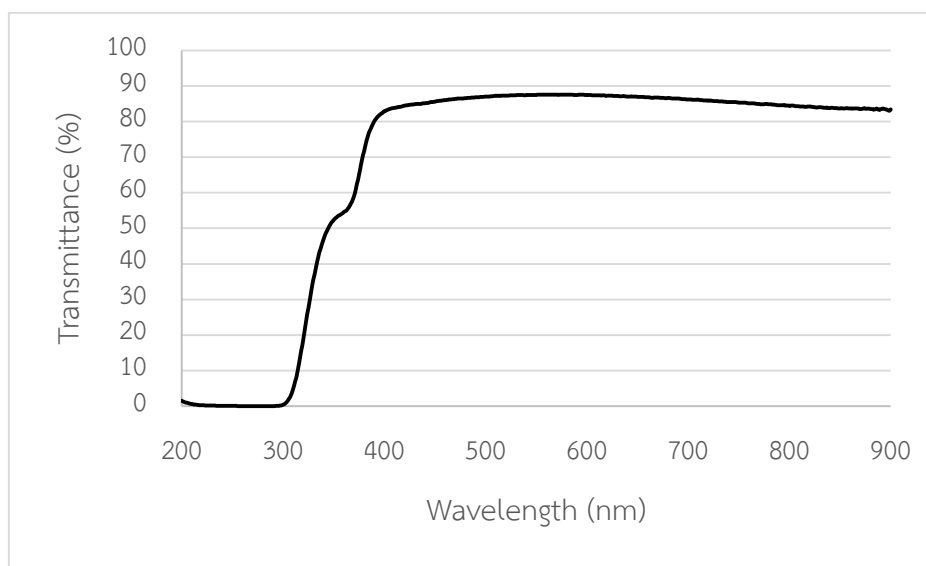
ภาพที่ 2.6 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
(ที่มา: http://www.kmitl.ac.th/sisc/XRD/GettingStratOf_XRD1.htm)



ภาพที่ 2.7 ระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของ Bragg's law
(ที่มา: <http://www.mfu.ac.th/>)

3. เครื่อง UV-Visible Spectroscopy (UV-Vis)

UV/VIS Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์สารตัวอย่างได้แก่ สารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน หรือสารอนินทรีย์ ทั้งที่มีสีและไม่มีสี โดยอาศัยหลักการดูดกลืนหรือทะลุผ่านของรังสีในช่วงรังสี Ultra violet (UV) ที่มีความยาวคลื่น 190-350 nm และช่วงรังสี Visible (VIS) ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 350-1000 nm ที่ผ่านสารตัวอย่าง อาศัยหลักการวิเคราะห์คือ สารตัวอย่างแต่ละชนิดจะดูดกลืนรังสีในช่วงความยาวคลื่นเฉพาะที่แตกต่างกันไป และปริมาณการดูดกลืนรังสีก็ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารนั้น ค่าการดูดกลืนแสงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร เครื่อง UV-Vis นี้จึงสามารถวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณได้และเป็นการวัดที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง จึงนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ผลที่ได้เรียกว่า Spectrum ตัวอย่างสเปกตรัมการส่องผ่านแสงกับค่าความยาวคลื่นแสดงดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 สเปกตรัมการส่องผ่านแสงกับค่าความยาวคลื่น

4. เครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าบนพื้นผิววัสดุมีหลายวิธี ได้แก่ วิธีวัดโดยตรงหรือวิธีวัดแบบสองโพรบ วิธีวัดสองโพรบแบบจุด วิธีสี่โพรบแบบจุด เป็นต้น วิธีวัดแบบสองโพรบเป็นวิธีที่ใช้ปลายโพรบกดทับสัมผัสพื้นผิววัสดุที่ใช้ทดสอบที่มีรูปแบบเป็นสี่เหลี่ยมหรือรูปทรงต่างๆ สำหรับวงจรและวิธีการวัดแสดงในภาพที่ 2.9 จะเริ่มจากจ่ายความถี่ให้กับตัวอย่าง จากนั้นวัดความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวอย่าง (V_1) และความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทาน (V_2) จากนั้นนำค่า (V_1) และ (V_2) มาคำนวณ โดยเริ่มจากการคำนวณหาค่ากระแส (I) ที่ไหลผ่านตัวต้านทาน (R) จากค่าของ (V_2) จากสูตร

$$I = V_2 / R \quad (1)$$

เมื่อ R คือ ความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานในวงจรระหว่างผิว

I คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานในวงจร

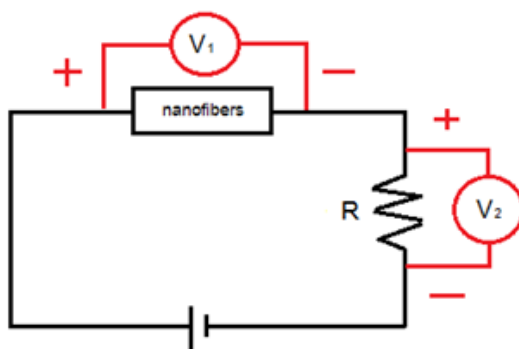
นำค่า (I) ที่ได้มาเขียนกราฟระหว่าง (I) กับ (V_1) โดยให้ (I) อยู่บนแกน X และให้ (V_1) อยู่บนแกน Y เพื่อหาค่าความชัน จากนั้นนำค่าความชันไปคำนวณหาค่าความต้านทานของเส้นใยนาโน (R_F) จากนั้นนำค่า R_F ที่ได้ไปคำนวณหาสภาพต้านทานไฟฟ้าจากสูตร

$$R_F = \rho / lA \quad (2)$$

เมื่อ ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า

l คือ ช่องว่างระหว่างหัววัดไฟฟ้า

A คือ พื้นที่ของหัววัดไฟฟ้า



ภาพที่ 2.9 รูปแบบวิธีการวัดแบบสองโพรบ

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาการผลิตเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิต จะศึกษาหลักการทำงานของกระบวนการปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิต และศึกษาสมบัติของสารและอัตราส่วนความเข้มข้นของ ZnA:PVA ที่นำมาใช้ในการผลิตเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ ปัจจัยในการปั่นและผลิตเส้นใยนาโนที่มีผลต่อสมบัติของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ศึกษาในงานวิจัยนี้มี 4 หัวข้อได้แก่ (1) อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnA:PVA (2) ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง (3) ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ และ (4) อุณหภูมิการอบ สำหรับเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จะใช้เครื่อง SEM วิเคราะห์ลักษณะสัญญาณ เครื่อง XRD วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึก เครื่อง UV-Vis วิเคราะห์สมบัติทางแสง และเครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้า เป็นต้น

3.1 สารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

1. สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ซิงค์อะซิเตท (Zinc Acetate, ZnAc) ($Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$, M.W. 219.49)
2. พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol, PVA)
3. น้ำกลั่น (Deionized Water) (type I)
4. เอทานอล (Ethanol)
5. อะซิโตน (Acetone)

2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน (Hotplate Stirrer)
2. เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic Cleaner)
3. เครื่องควบคุมอัตราการไหล (Syringe Pump)
4. เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (DC Power Supply) (ขนาด 0-25 kV)
5. เครื่องอบ (Drying machine)
6. ปีกเกอร์ (Beaker) (ขนาด 250 ml)
7. เข็มฉีดยา (Needle) (ขนาด 0.8x25 mm)
8. หลอดบรรจุสารละลาย (Syringe) (ขนาด 20ml)
9. ท่อซิลิโคน (Silicone Tube)
10. แผ่นโลหะรองรับ (Metal Plate)

11. แผ่นซิลิกอน (Silicon Plates) (Type: P, Orientation: (100))
12. แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminum Foil Plate)
13. กระจกควอทซ์

3. เครื่องมือวิเคราะห์

1. เครื่อง SEM
2. เครื่อง XRD
3. เครื่อง UV-Vis
4. เครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. การเตรียมสารละลาย

การเตรียมสารละลาย ZnAc:PVA เริ่มจากการนำ PVA ใส่ในบีกเกอร์ที่มีน้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย กวนให้เข้ากันที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 6 h จากนั้นนำ ZnAc มาเติมลงไปบีกเกอร์ที่มีสารละลาย PVA ตามอัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnA:PVA ที่ต้องการแล้วกวนให้เข้ากันที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 6 h อีกครั้ง จะได้สารละลาย ZnAc:PVA สำหรับงานวิจัยนี้มีอัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnA:PVA ที่ใช้ได้แก่ (2:2), (3:2), (4:2), (5:2) และ (6:2)

2. ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

ในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานจะตัดวัสดุรองรับแผ่นซิลิกอน แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ และกระจกควอทซ์ขนาดประมาณ 1x1 cm² สำหรับแผ่นซิลิกอน และกระจกควอทซ์แล้วนำไปล้างด้วยน้ำสะอาด จากนั้นล้างในเครื่องอัลตราโซนิก ด้วยอะซิโตน เอทานอล และน้ำ DI ตามลำดับซึ่งแต่ละการล้างจะใช้เวลา 15 min

3. ขั้นตอนการปั่นเส้นใย

เมื่อบรรจุสารละลาย ZnA:PVA ในหลอดบรรจุสารละลาย และนำหลอดบรรจุสารละลายไปต่อเข้ากับท่อซิลิโคนที่มีเข็มโลหะอยู่อีกด้าน และนำหลอดบรรจุสารละลายไปติดตั้งกับเครื่องควบคุมอัตราการไหลของสารละลายและเปิดเครื่อง กำหนดค่าอัตราการไหลของสารละลายอยู่ที่ 0.1 ml/h ปรับฐานของแผ่นโลหะรองรับให้ได้ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับตามเงื่อนไขการทดลอง นำแผ่นซิลิกอน แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ และกระจกควอทซ์ที่เตรียมไว้มาวางบนแผ่นโลหะรองรับ นำเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงมาต่อที่ปลายเข็มโลหะและแผ่นโลหะรองรับ โดยขั้วแอโนดของเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงจะเชื่อมไว้ที่ปลายเข็ม และขั้วแคโทดของเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงจะเชื่อมไว้ที่แผ่นโลหะรองรับ จากนั้นจ่ายไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้า

ตามเงื่อนไขการทดลอง ทำให้เกิดการปั่นเส้นใยตกลงไปที่ชิ้นงานเป็นเวลา 30 min จากนั้นนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิต่างๆ ตามเงื่อนไขการทดลอง เพื่อกำจัดพอลิเมอร์ เป็นเวลา 6 h

4. เงื่อนไขการทดลอง

เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองจะมีอยู่ 4 ตัวแปร คือ

(1) อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnA:PVA

อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnA:PVA ที่แตกต่างกันคือ (2:2) (3:2) (4:2) (5:2) และ (6:2) เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองเมื่อแปรค่าอัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnA:PVA

เงื่อนไข	รายละเอียด
อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnA:PVA	แปรค่า (2:2) (3:2) (4:2) (5:2) และ (6:2)
ความต่างศักย์ไฟฟ้า	20 kV
ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ	15 cm
อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ	550°C
อัตราการไหล	0.1 mL/H
เวลาที่ใช้ในการปั่น	30 min
เวลาที่ใช้ในการอบ	6 H

(2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า

ความต่างศักย์ที่แตกต่างกันคือ 16 18 20 22 และ 24 kV เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองเมื่อแปรค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

เงื่อนไข	รายละเอียด
อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnA:PVA	(4:2)
ความต่างศักย์ไฟฟ้า	แปรค่า 16 18 20 22 และ 24 kV
ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ	15 cm
อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ	550°C
อัตราการไหล	0.1 mL/H
เวลาที่ใช้ในการปั่น	30 min
เวลาที่ใช้ในการอบ	6 H

(3) ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ

ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับที่แตกต่างกันคือ 12 13 14 และ 15 cm เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และอุณหภูมิในการอบ 550°C ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองเมื่อแปรค่าระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ

เงื่อนไข	รายละเอียด
อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnA:PVA	(4:2)
ความต่างศักย์ไฟฟ้า	20 kV
ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ	แปรค่า 12 13 14 และ 15 cm
อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ	550°C
อัตราการไหล	0.1 mL/H
เวลาที่ใช้ในการปั่น	30 min
เวลาที่ใช้ในการอบ	6 H

(4) อุณหภูมิการอบ

อุณหภูมิในการอบที่แตกต่างกันคือ 450 500 550 และ 600°C เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm ในการทดลองจะกำหนดเงื่อนไขในการทดลองสังเคราะห์เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองเมื่อแปรค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ

เงื่อนไข	รายละเอียด
อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnA:PVA	(4:2)
ความต่างศักย์ไฟฟ้า	20 kV
ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ	15 cm
อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ	แปรค่า 450 500 550 และ 600°C
อัตราการไหล	0.1 mL/H
เวลาที่ใช้ในการปั่น	30 min
เวลาที่ใช้ในการอบ	6 H

3.3 การวิเคราะห์ผล

เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จะนำไปวิเคราะห์ดังนี้

1. วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของเส้นใยนาโน ZnO ด้วยเครื่อง SEM
2. วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของเส้นใยนาโน ZnO ด้วยเครื่อง XRD
3. วิเคราะห์สมบัติทางแสงของเส้นใยนาโน ZnO ด้วยเครื่อง UV-Vis และ
4. วิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ด้วยเครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

บทที่ 4

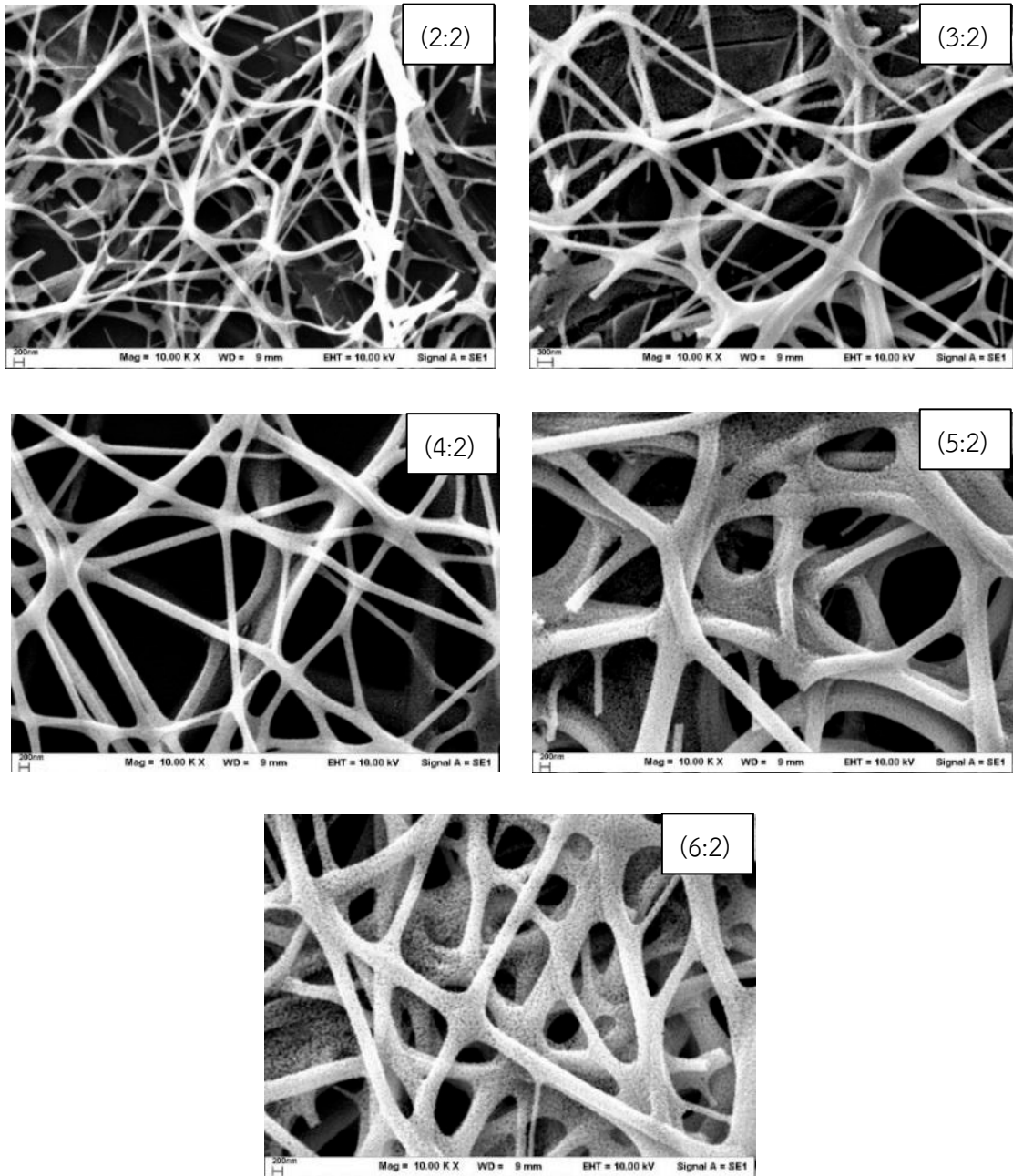
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ในบทนี้จะเสนอผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลองตามแนวทางวิธีการดำเนินงานวิจัยของบทที่ผ่านมา เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิตจะนำไปวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานและลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง SEM และ XRD ตามลำดับ และวิเคราะห์สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง UV-Vis และเครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ตามลำดับ ผลของ (1) อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnA:PVA (2) ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง (3) ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ และ (4) อุณหภูมิการอบ ที่มีต่อเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์จะเสนอตามหัวข้อของการวิเคราะห์ข้างต้น ดังนี้

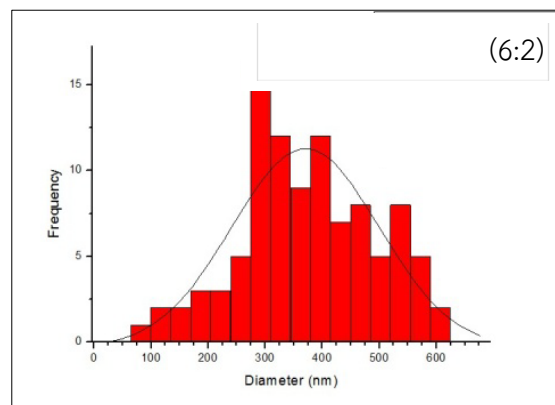
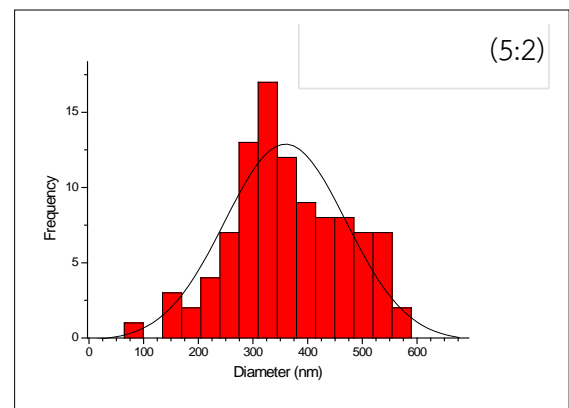
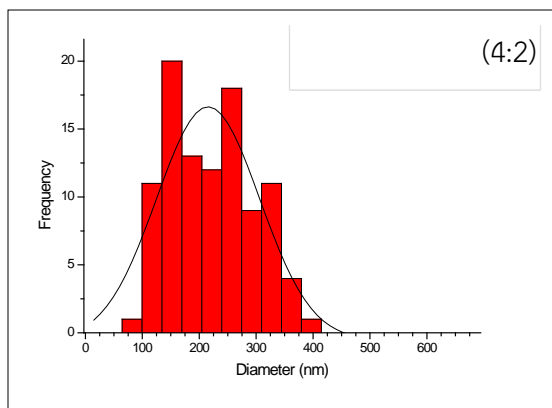
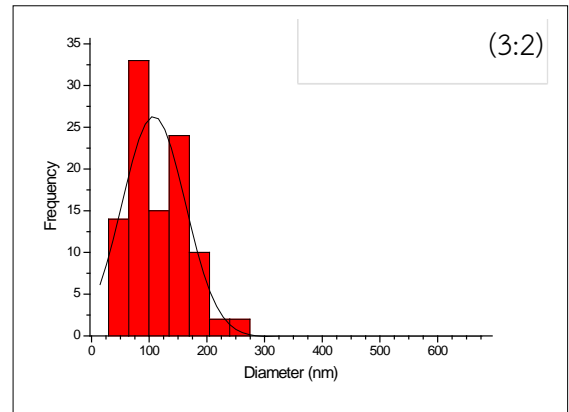
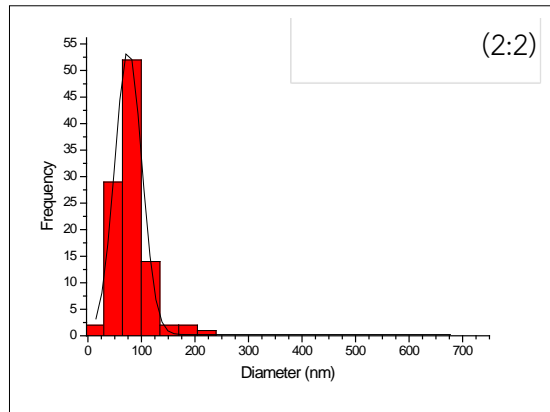
4.1. การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของเส้นใยนาโน ZnO ด้วยเครื่อง SEM

1. อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnA:PVA

ภาพที่ 4.1 แสดงภาพถ่าย SEM และภาพที่ 4.2 แสดงภาพฮิสโตแกรมของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA แตกต่างกันคือ (2:2) (3:2) (4:2) (5:2) และ (6:2) เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA เท่ากับ (2:2), (3:2), (4:2), (5:2) และ (6:2) อยู่ในช่วง 25-100, 40-175, 100-350, 210-500 และ 250-500 nm ตามลำดับ แสดงว่าการเพิ่มอัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnA:PVA ทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnA:PVA เป็นการเพิ่มปริมาณของ ZnA ทำให้เกิดการลดปรากฏการณ์การบิดโค้งที่ไม่มีเสถียรภาพ ส่งผลให้เส้นทางการเคลื่อนที่ของสารละลายลดลงจึงทำให้เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้น



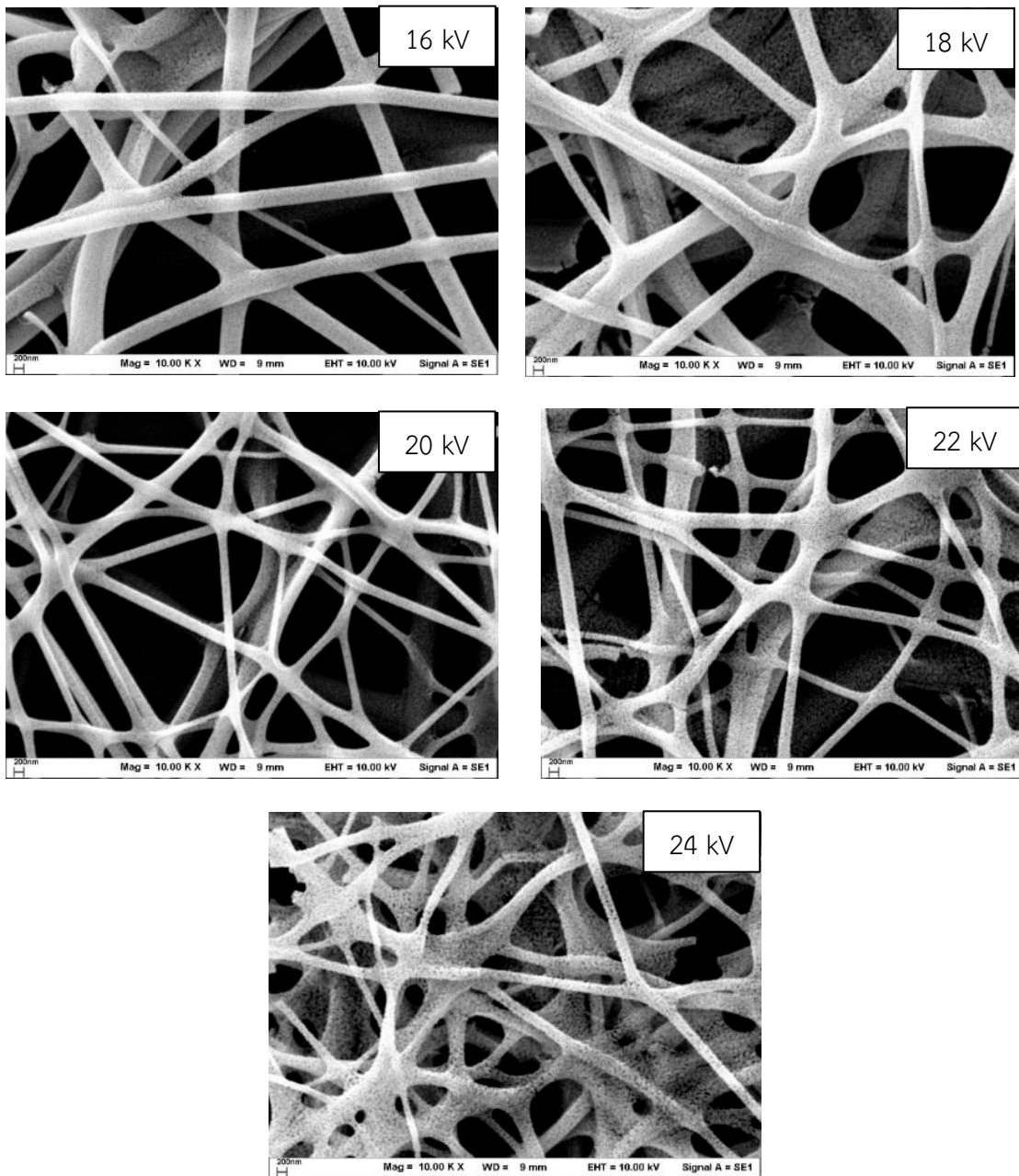
ภาพที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่าของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA แตกต่างกันคือ (2:2) (3:2) (4:2) (5:2) และ (6:2) เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C



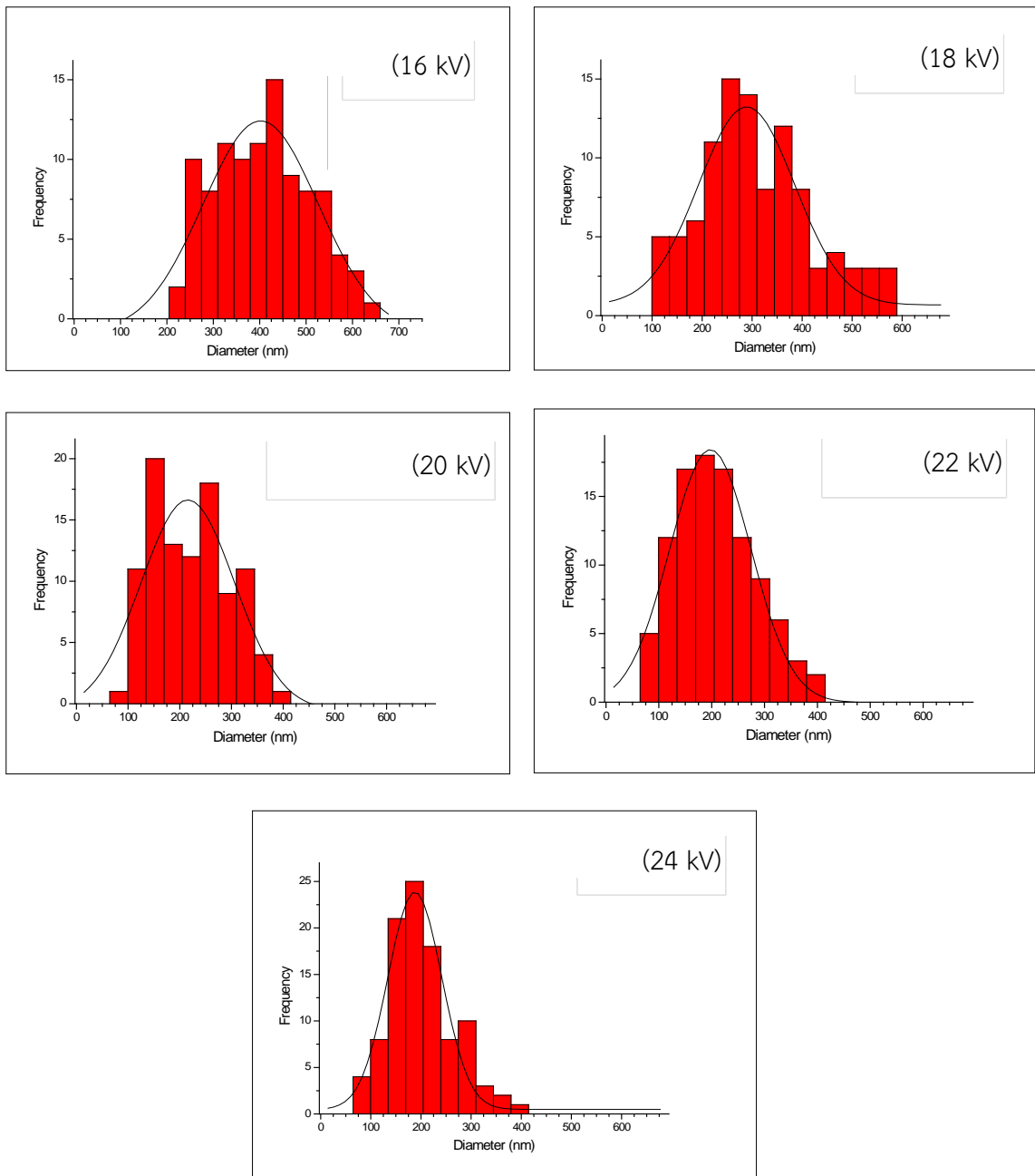
ภาพที่ 4.2 ภาพฮิสโตแกรมของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA แตกต่างกันคือ (2:2) (3:2) (4:2) (5:2) และ (6:2) เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C

2. ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง

ภาพที่ 4.3 แสดงภาพถ่าย SEM และภาพที่ 4.4 แสดงภาพฮิสโตแกรมของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกัน คือ 16 18 20 22 และ 24 kV เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกันเท่ากับ 16, 18, 20, 22 และ 24 kV อยู่ในช่วง 275-530, 175-410, 110-300, 105-280 และ 110-230 nm ตามลำดับ แสดงว่า การเพิ่มค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง ทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยนาโนซึ่งคือออกไซด์มีขนาดเล็กลง แต่ปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง เป็นการเพิ่มสนามไฟฟ้า ทำให้แรงไฟฟ้าขณะแรงดึงผิวของสารละลายได้ง่ายขึ้น ส่งผลทำให้เส้นใยนาโนซึ่งคือออกไซด์ที่ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง และปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น



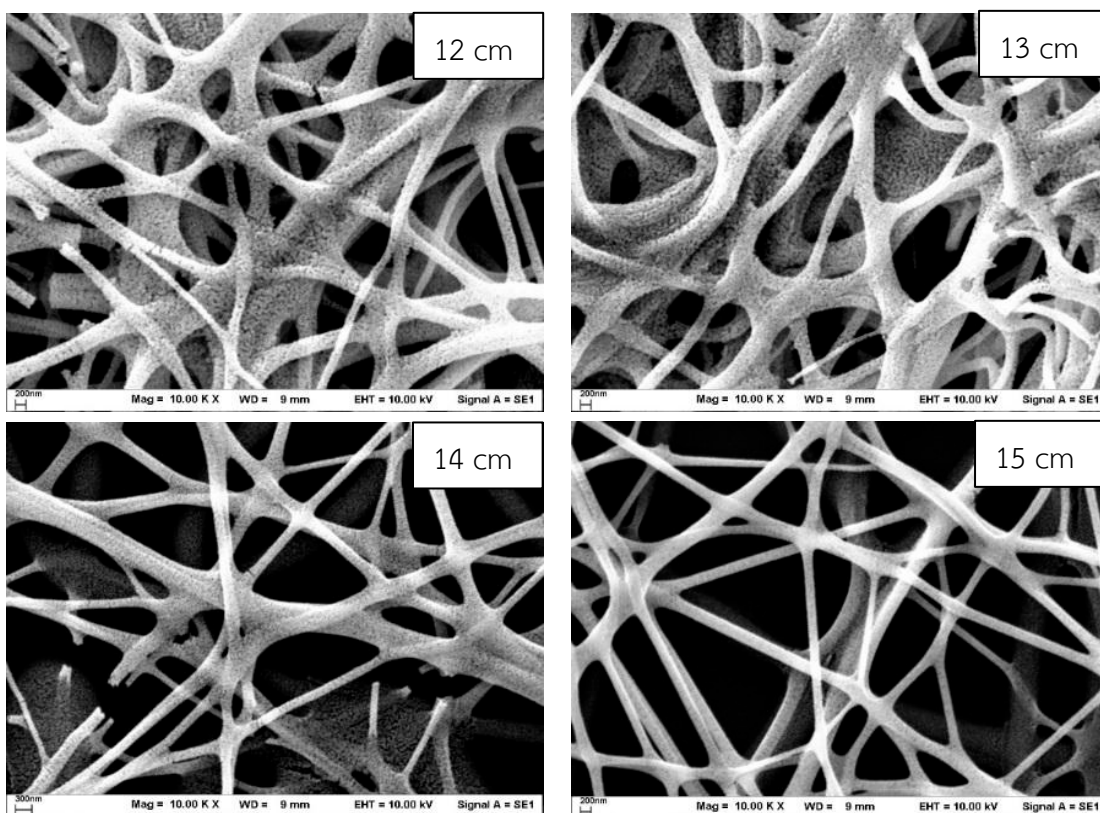
ภาพที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่าของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกันคือ 16 18 20 22 และ 24 kV เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C



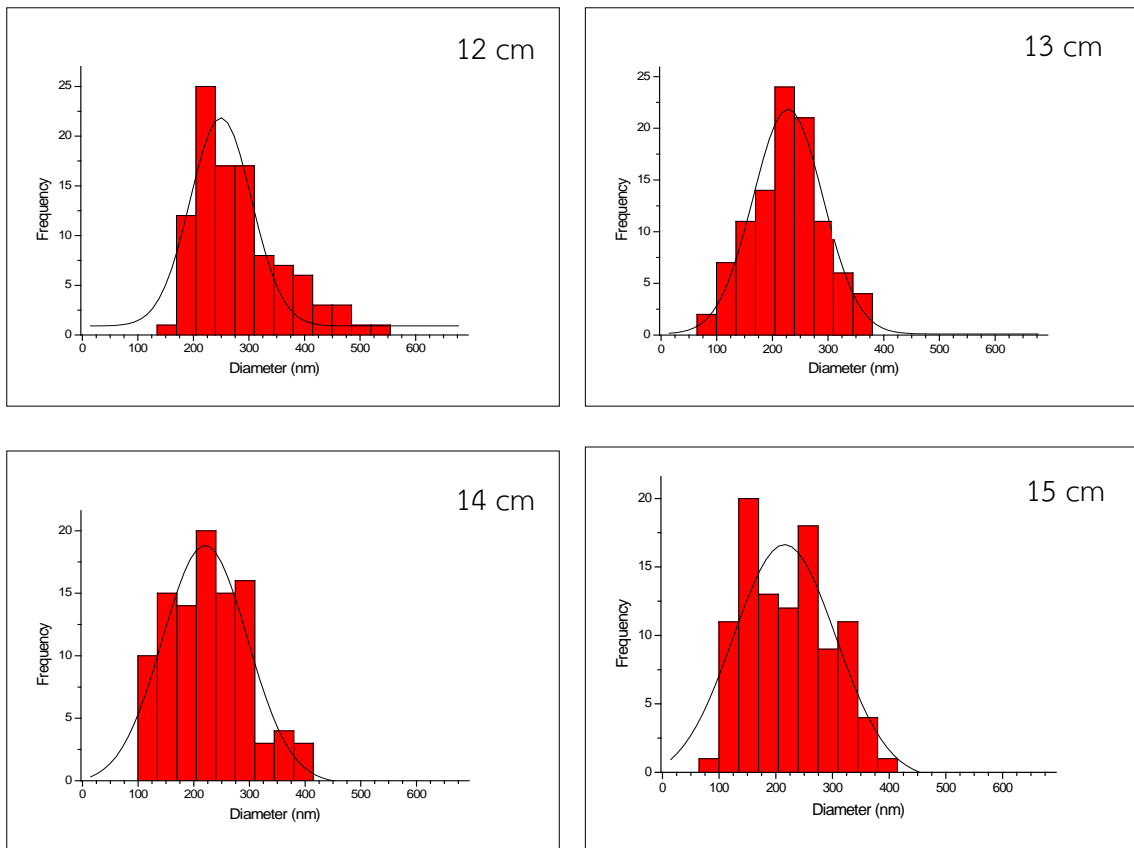
ภาพที่ 4.4 ภาพฮิสโตแกรมของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกันคือ 16 18 20 22 และ 24 kV เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C

3. ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ

ภาพที่ 4.5 แสดงภาพถ่าย SEM และภาพที่ 4.6 แสดงภาพฮิสโตแกรมของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับแตกต่างกันคือ 12 13 14 และ 15 cm เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และอุณหภูมิในการอบ 550°C พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับเท่ากับ 12, 13, 14 และ 15 cm อยู่ในช่วง 190-300, 160-290, 125-300 และ 120-300 nm ตามลำดับ แสดงว่าเมื่อระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับเพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์มีขนาดเล็กลง เนื่องจากเมื่อระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับมาก ลำของสารละลายมีเวลาในการยึดออกนานมากขึ้น จึงทำให้เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง



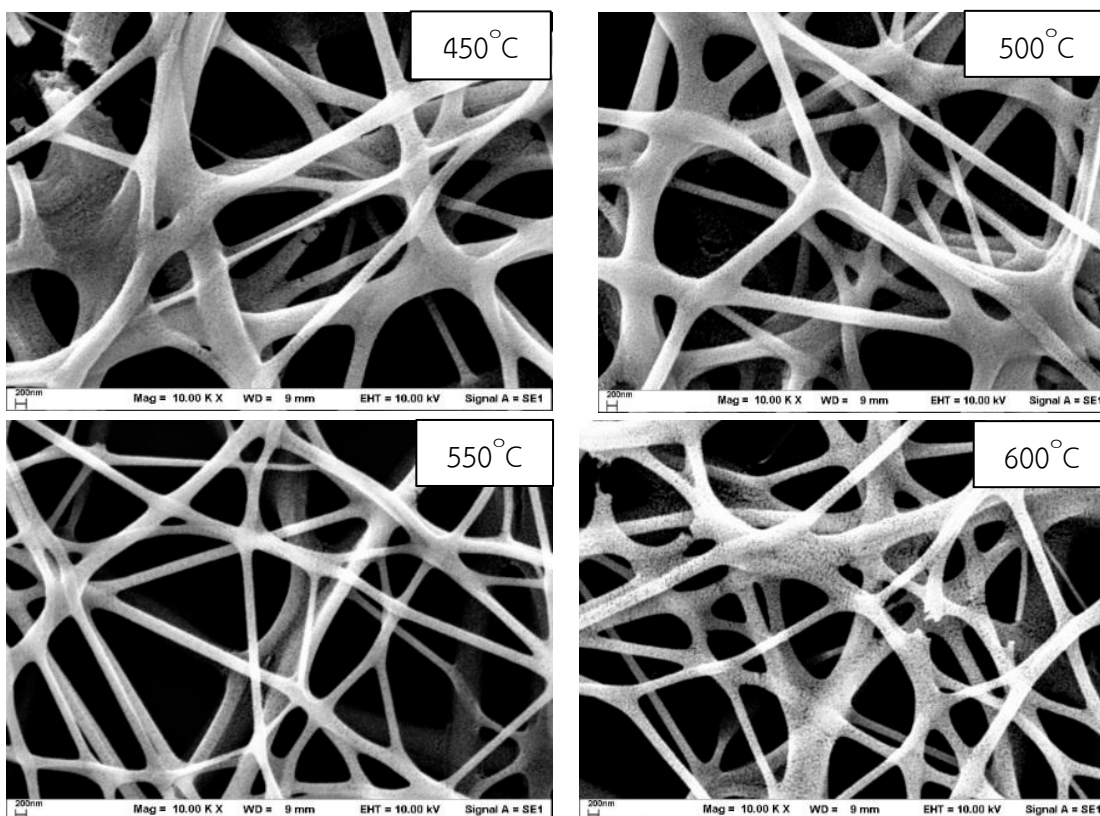
ภาพที่ 4.5 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่าของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับแตกต่างกันคือ 12 13 14 และ 15 cm เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และอุณหภูมิในการอบ 550°C



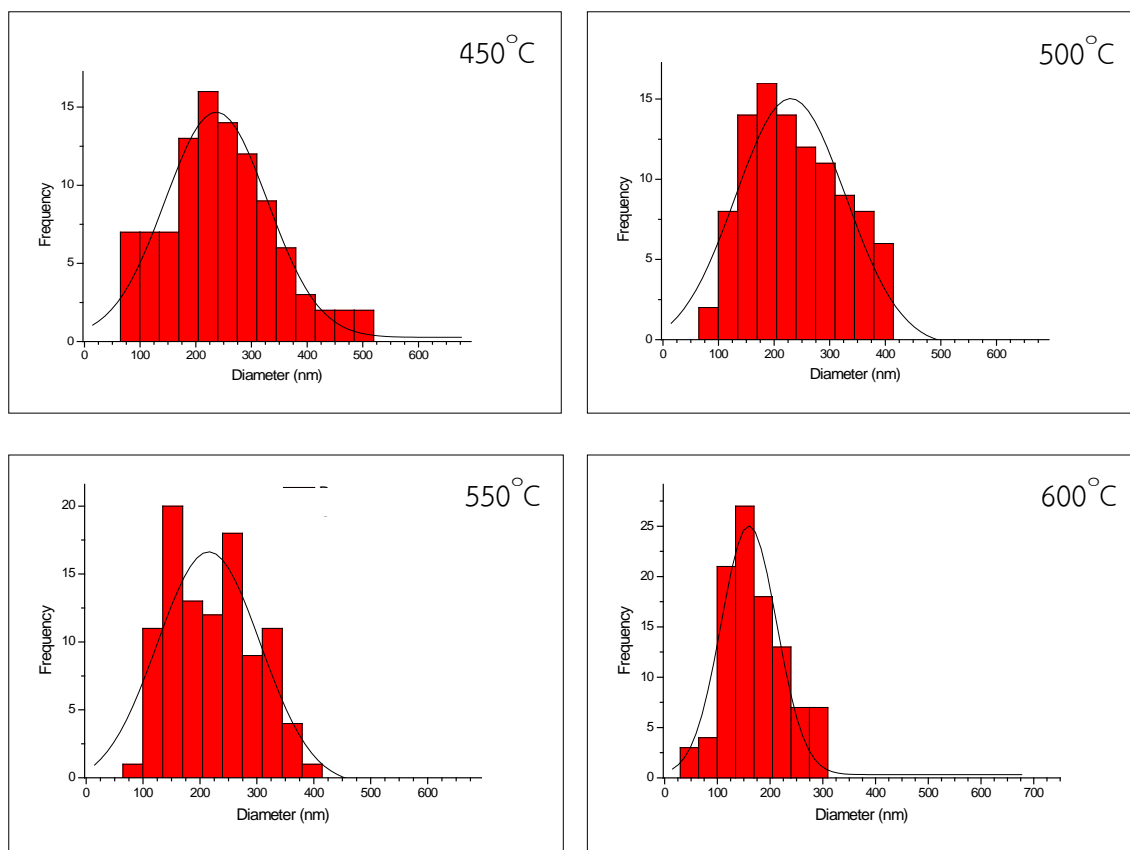
ภาพที่ 4.6 ภาพฮิสโตแกรมของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับแตกต่างกันคือ 12 13 14 และ 15 cm เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และอุณหภูมิในการอบ 550°C

4. อุณหภูมิการอบ

ภาพที่ 4.7 แสดงภาพถ่าย SEM และภาพที่ 4.8 แสดงภาพฮิสโตแกรมของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 450 500 550 และ 600 °C เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิในการอบเท่ากับ 450, 500, 550 และ 600 °C อยู่ในช่วง 125-350, 110-340, 125-300 และ 100-225 nm ตามลำดับ แสดงว่า การเพิ่มอุณหภูมิในการอบเส้นใยจะทำให้เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง เนื่องจากการอบเป็นการกำจัดพอลิเมอร์ การเพิ่มอุณหภูมิในการอบขึ้นจะทำให้เกิดการกำจัดพอลิเมอร์ในเส้นใยได้ดีขึ้นจึงทำให้เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงนั่นเอง



ภาพที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่าของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 450 500 550 และ 600 °C เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm



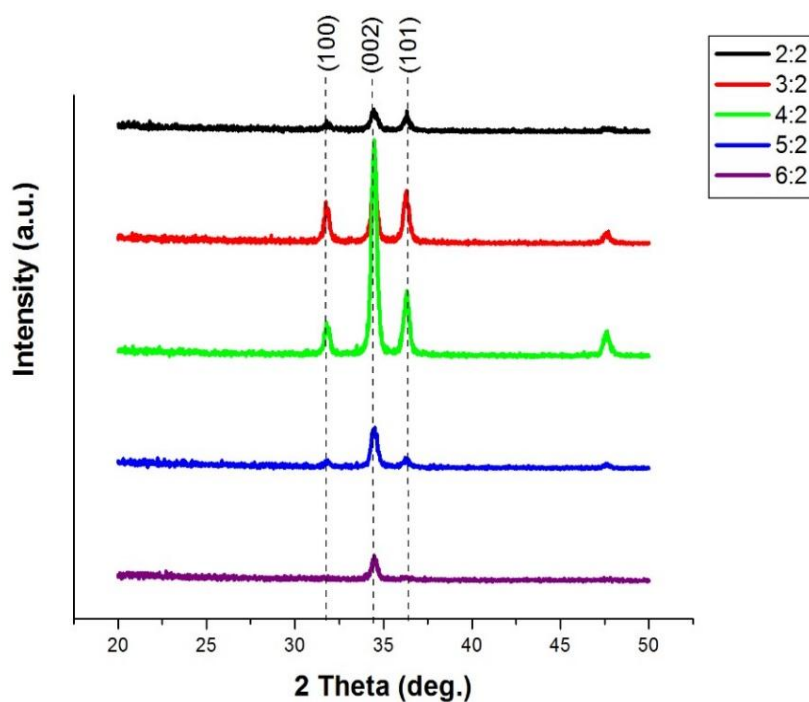
ภาพที่ 4.8 ภาพฮิสโตแกรมของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 450 500 550 และ 600 °C เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm

4.2. การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของเส้นใยนาโน ZnO ด้วยเครื่อง XRD

1. อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnA:PVA

ภาพที่ 4.9 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA แตกต่างกันคือ (2:2) (3:2) (4:2) (5:2) และ (6:2) เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C ซึ่งพบพีคที่มุม 2θ ประมาณ 31.5 34.5 และ 36.5 องศา เมื่อนำไปเทียบกับค่ามาตรฐาน JCPDS เลขที่ 36-1451 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) พบว่าตรงกับ ZnO ที่ระนาบ (100) (002) และ (101) ตามลำดับ พีคทุกระนาบมีลักษณะแบบเดียวกันคือฐานพีคไม่กว้างยอดพีคมีปลายแหลม และพีคจะสูงขึ้นตามอัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA จาก (2:2) ไปจนถึง (4:2) และพีคจะลดลงเมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA เกิน

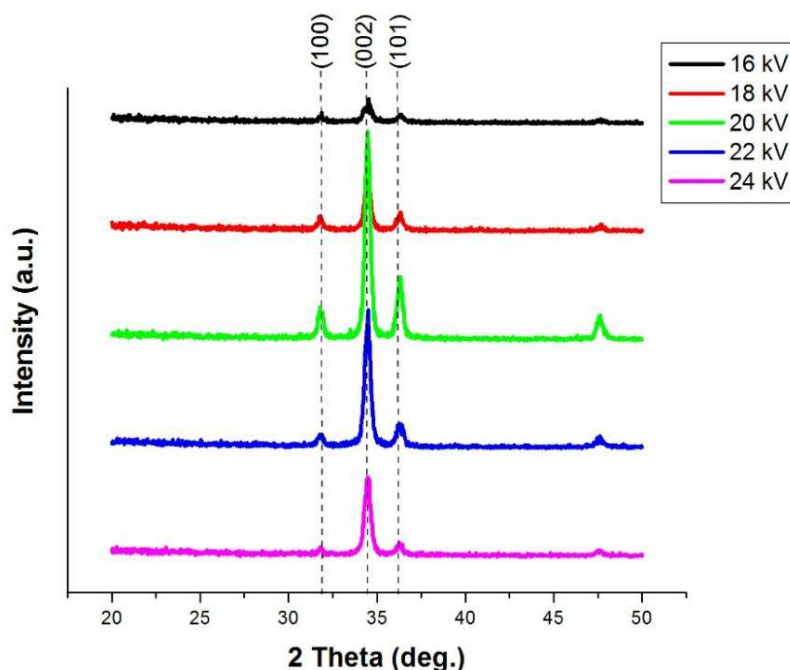
(4:2) สาเหตุที่พีคสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA จาก (2:2) ไปจนถึง (4:2) เพราะการเพิ่มอัตราส่วนในช่วงดังกล่าว เป็นการเพิ่มปริมาณของ ZnAc ที่ทำให้ได้เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีการกระจายของซิงค์กับออกซิเจนอย่างสม่ำเสมอ จึงเห็นผลึก ZnO ขึ้นอย่างชัดเจน แต่เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA มากกว่า (4:2) ความเป็นผลึกจะลดลง เพราะปริมาณของซิงค์ที่จะจับกับออกซิเจนแล้วเกิดเป็น ผลึก ZnO นั้นไม่เหมาะสม ซึ่งจากภาพถ่าย SEM สังเกตได้ว่าเส้นใยที่ปั่นที่อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA มากกว่า (4:2) จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ และมีรูพรุนเกิดขึ้น ดังนั้นความเป็นผลึกของ ZnO จึงลดลง



ภาพที่ 4.9 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA แตกต่างกันคือ (2:2) (3:2) (4:2) (5:2) และ (6:2) เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C

2. ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง

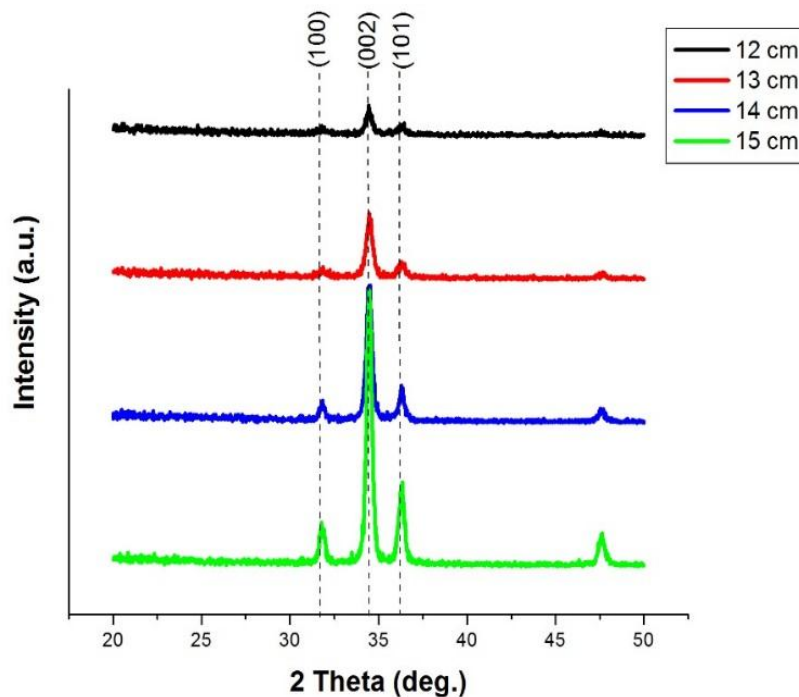
ภาพที่ 4.10 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน ZnO ที่ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกันคือ 16 18 20 22 และ 24 kV เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C ซึ่งพบพีคที่มุม 2θ ประมาณ 31.5 34.5 และ 36.5 องศา เมื่อนำไปเทียบกับค่ามาตรฐาน JCPDS เลขที่ 36-1451 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) พบว่าตรงกับ ZnO ที่ระนาบ (100) (002) และ (101) ตามลำดับ พีคทุกระนาบมีลักษณะแบบเดียวกันคือฐานพีคไม่กว้าง ยอดพีคมีปลายแหลม และพีคจะสูงขึ้นตามความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก 16 kV ไปจนถึง 20 kV และพีคจะลดลงเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า 20 kV สาเหตุที่พีคสูงขึ้นตามความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก 16 kV ไปจนถึง 20 kV เพราะช่วงดังกล่าวมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าน้อย แรงไฟฟ้าจะเอาชนะแรงดึงดูดของสารละลายได้ยาก เส้นใยที่ปั่นได้จึงมีขนาดใหญ่ จึงทำให้ความเป็นผลึก ZnO ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่น้อยกว่าต่ำกว่าความเป็นผลึกที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงกว่า และสาเหตุที่ความเป็นผลึกลดลงเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า 20 kV เป็นผลมาจากความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงเกินไปทำให้แรงไฟฟ้าเอาชนะแรงดึงดูดได้ง่าย ทำให้เส้นใยที่ถูกปั่นตกลงวัสดุรองรับเร็วเกินไปจึงทำให้เส้นใยเกิดการรวมตัวกัน เมื่อนำเส้นใยมีการรวมตัวกันไปอบจะทำให้เส้นใยเกิดรูพรุน จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้มีความเป็นผลึกลดลงนั่นเอง



ภาพที่ 4.10 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกันคือ 16 18 20 22 และ 24 kV เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C

3. ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ

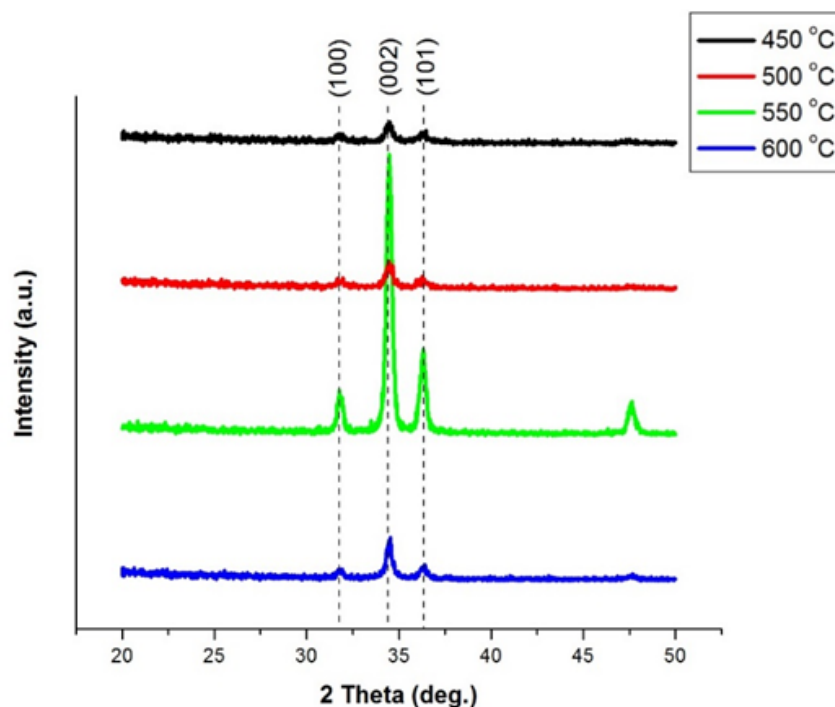
ภาพที่ 4.11 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับแตกต่างกันคือ 12 13 14 และ 15 cm เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และอุณหภูมิในการอบ 550°C ซึ่งพบพีคที่มุม 2θ ประมาณ 31.5 34.5 และ 36.5 องศา เมื่อนำไปเทียบกับค่ามาตรฐาน JCPDS เลขที่ 36-1451 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) พบว่าตรงกับ ZnO ที่ระนาบ (100) (002) และ (101) ตามลำดับ พีคทุกระนาบมีลักษณะแบบเดียวกันคือฐานพีคไม่กว้าง ยอดพีคมีปลายแหลม และพีคจะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับมากขึ้น ผลของระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับที่ใกล้เกินไป ทำให้แรงไฟฟ้าเอาชนะแรงตึงผิวของสารละลายได้ง่าย ทำให้เส้นใยที่ถูกปั่นตกลงวัสดุรองรับเร็วเกินไปจึงทำให้เส้นใยเกิดการรวมตัวกัน เมื่อนำเส้นใยที่มีการรวมตัวกันไปอบจะทำให้เส้นใยเกิดรูพรุน จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้มีความเป็นผลึกลดลงนั่นเอง



ภาพที่ 4.11 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับแตกต่างกันคือ 12 13 14 และ 15 cm เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และอุณหภูมิในการอบ 550°C

4. อุณหภูมิการอบ

ภาพที่ 4.12 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 450 500 550 และ 600°C เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm ซึ่งพบพีคที่มุม 2θ ประมาณ 31.5 34.5 และ 36.5 องศา เมื่อนำไปเทียบกับค่ามาตรฐาน JCPDS เลขที่ 36-1451 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) พบว่าตรงกับ ZnO ที่ระนาบ (100) (002) และ (101) ตามลำดับ พีคทุกระนาบมีลักษณะแบบเดียวกันคือฐานพีคไม่กว้างยอดพีคมีปลายแหลม และพีคที่ได้ค่อนข้างต่ำยกเว้นพีคของตัวอย่างที่ 550°C ตัวอย่างที่อบด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า 550°C มีการกำจัดพอลิเมอร์ออกได้ไม่พอดี ทำให้การรวมตัวกันเป็นผลึกของ ZnO ไม่ดีพอจึงทำให้มีความเป็นผลึกน้อย และตัวอย่างที่อบสูงกว่า 550°C คือตัวอย่างที่อบด้วยอุณหภูมิ 600°C เกิดจากอุณหภูมิที่สูงเกินไปทำให้เส้นใยเกิดการแตกหักและเกิดรูพรุน

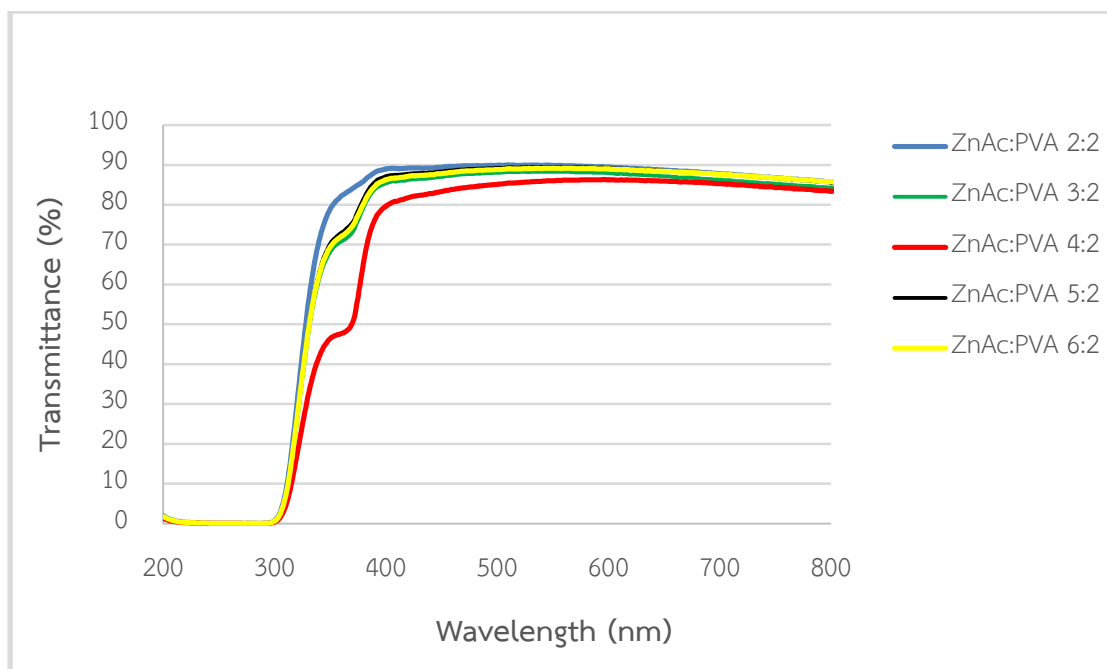


ภาพที่ 4.12 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 450 500 550 และ 600 °C เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm

4.3.การวิเคราะห์สมบัติทางแสงของเส้นใยนาโน ZnO ด้วยเครื่อง UV-Vis

1. อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnA:PVA

ภาพที่ 4.13 แสดงสเปกตรัมการส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตรของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA แตกต่างกันคือ (2:2) (3:2) (4:2) (5:2) และ (6:2) เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C พบว่าตัวอย่างทุกเงื่อนไขมีการส่องผ่านในช่วงแสงสีขาวย และที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร สูงกว่าร้อยละ 85 จากข้อมูลการส่องผ่านของแสงนี้สามารถไปคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานซึ่งพบว่า ช่องว่างแถบพลังงานอยู่ในช่วง 2.73-3.09 eV โดยผลสเปกตรัมการส่องผ่านแสง (%) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และค่าช่องว่างแถบพลังงานของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA แตกต่างกันคือ (2:2) (3:2) (4:2) (5:2) และ (6:2) เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C แสดงในตารางที่ 4.1



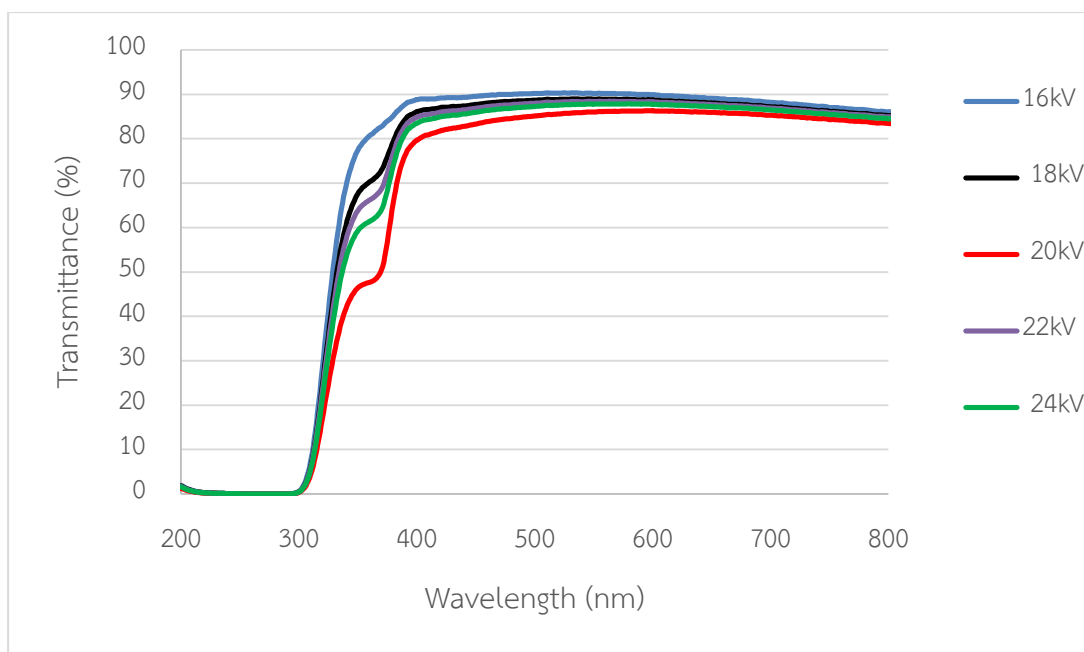
ภาพที่ 4.13 สเปกตรัมการส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตรของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA แตกต่างกันคือ (2:2) (3:2) (4:2) (5:2) และ (6:2) เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C

ตารางที่ 4.1 ค่าสเปกตรัมการส่องผ่านแสง (%) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และค่าช่องว่างแถบพลังงานของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA แตกต่างกันคือ (2:2) (3:2) (4:2) (5:2) และ (6:2) เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C

อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA	สเปกตรัมการส่องผ่านแสง (%) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร	ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (eV)
(2:2)	89.90	3.09
(3:2)	88.26	2.96
(4:2)	86.02	2.73
(5:2)	89.43	3.00
(6:2)	89.14	2.98

2. ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง

ภาพที่ 4.14 แสดงสเปกตรัมการส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตรของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกันคือ 16 18 20 22 และ 24 kV เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C พบว่าตัวอย่างทุกเงื่อนไขมีการส่องผ่านในช่วงแสงสีขาบ และที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร สูงกว่าร้อยละ 85 จากข้อมูลการส่องผ่านของแสงนี้สามารถไปคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานซึ่งพบว่า ช่องว่างแถบพลังงานอยู่ในช่วง 2.69-3.26 eV โดยผลสเปกตรัมการส่องผ่านแสง (%) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และค่าช่องว่างแถบพลังงานของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกันคือ 16 18 20 22 และ 24 kV เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C แสดงในตารางที่ 4.2



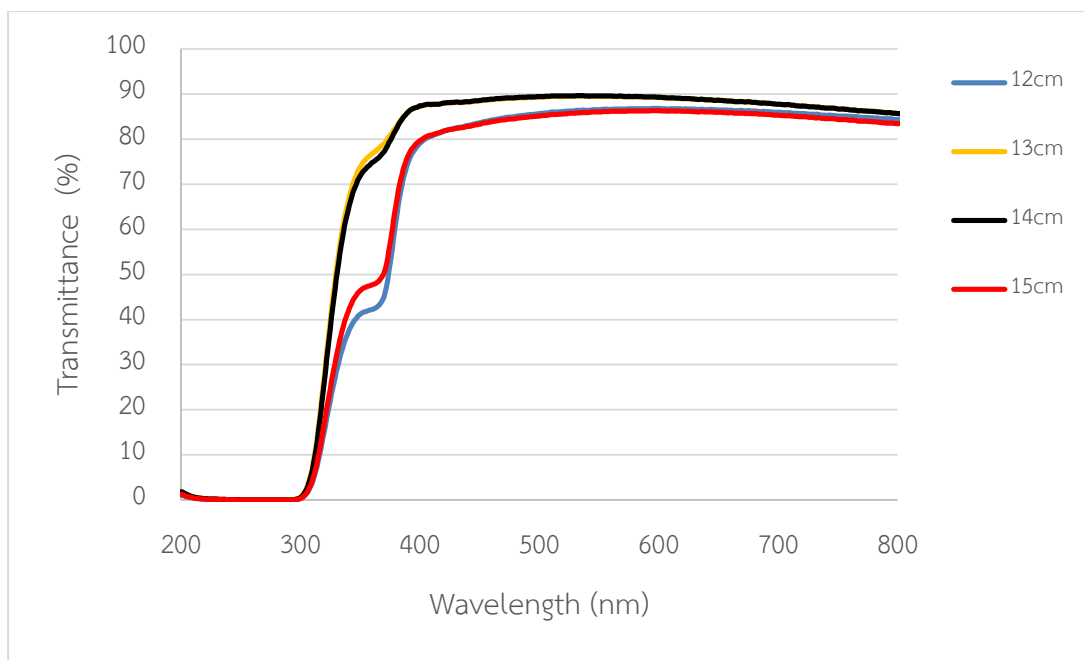
ภาพที่ 4.14 สเปกตรัมการส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตรของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกันคือ 16 18 20 22 และ 24 kV เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C

ตารางที่ 4.2 ค่าสเปกตรัมการส่องผ่านแสง (%) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และค่าช่องว่างแถบพลังงานของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกันคือ 16 18 20 22 และ 24 kV เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C

ความต่างศักย์ไฟฟ้า (kV)	สเปกตรัมการส่องผ่านแสง (%) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร	ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (eV)
16	90.21	3.26
18	88.91	2.96
20	86.02	2.73
22	88.38	2.86
24	87.77	2.69

3. ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ

ภาพที่ 4.15 แสดงสเปกตรัมการส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตรของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับแตกต่างกันคือ 12 13 14 และ 15 cm เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และอุณหภูมิในการอบ 550°C พบว่าตัวอย่างทุกเงื่อนไขมีการส่องผ่านในช่วงแสงสีขาวยุค และที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร สูงกว่าร้อยละ 85 จากข้อมูลการส่องผ่านของแสงนี้สามารถไปคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานซึ่งพบว่า ช่องว่างแถบพลังงานอยู่ในช่วง 2.68-3.03 eV โดยผลสเปกตรัมการส่องผ่านแสง (%) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และค่าช่องว่างแถบพลังงานของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับแตกต่างกันคือ 12 13 14 และ 15 cm เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และอุณหภูมิในการอบ 550°C แสดงในตารางที่ 4.3



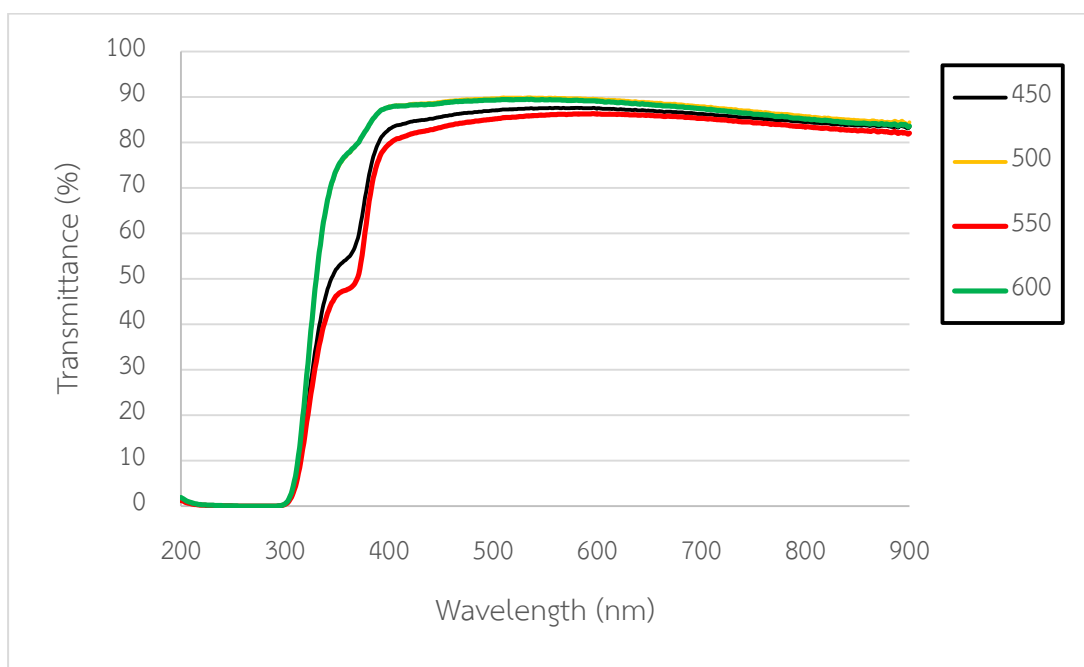
ภาพที่ 4.15 สเปกตรัมการส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตรของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับแตกต่างกันคือ 12 13 14 และ 15 cm เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และอุณหภูมิในการอบ 550°C

ตารางที่ 4.3 ค่าสเปกตรัมการส่องผ่านแสง (%) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และค่าช่องว่างแถบพลังงานของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับแตกต่างกันคือ 12 13 14 และ 15 cm เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และอุณหภูมิในการอบ 550°C

ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ (cm)	สเปกตรัมการส่องผ่านแสง (%) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร	ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (eV)
12	86.53	2.68
13	89.47	3.03
14	89.56	3.01
15	86.02	2.73

4. อุณหภูมิการอบ

ภาพที่ 4.16 แสดงสเปกตรัมการส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตรของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 450 500 550 และ 600°C เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm พบว่าตัวอย่างทุกเงื่อนไขมีการส่องผ่านในช่วงแสงสีขาบ และที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร สูงกว่าร้อยละ 85 จากข้อมูลการส่องผ่านของแสงนี้สามารถไปคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานซึ่งพบว่า ช่องว่างแถบพลังงานอยู่ในช่วง 2.73-3.05 eV โดยผลสเปกตรัมการส่องผ่านแสง (%) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และค่าช่องว่างแถบพลังงานของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 450 500 550 และ 600°C เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm แสดงในตารางที่ 4.4



ภาพที่ 4.16 สเปกตรัมการส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตรของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 450 500 550 และ 600°C เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm

ตารางที่ 4.4 ค่าสเปกตรัมการส่องผ่านแสง (%) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และค่าช่องว่างแถบพลังงานของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 450 500 550 และ 600 °C เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm

อุณหภูมิในการอบ (°C)	สเปกตรัมการส่องผ่านแสง (%) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร	ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (eV)
450	87.51	2.82
500	89.81	3.04
550	86.02	2.73
600	89.38	3.05

4.4. การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ด้วยเครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

1. อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnA:PVA

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA แตกต่างกันคือ (2:2) (3:2) (4:2) (5:2) และ (6:2) เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C พบว่าผลปรากฏว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่มีค่าน้อยที่สุดคือที่อัตราส่วน (4:2) และเมื่อนำค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าไปเทียบกับภาพ SEM และ XRD ของผลส่วนที่เป็นอัตราส่วนพบว่ามีความสอดคล้องกัน นั่นคือจากภาพ SEM ที่อัตราส่วน (2:2) (3:2) เส้นใยมีขนาดเล็กและมีการแตกหัก และที่อัตราส่วน (5:2) (6:2) เส้นใยนาโนมีการแตกหักและเกิดรูพรุนขึ้น ส่วนที่อัตราส่วน (4:2) เส้นใยนาโนมีความสมบูรณ์มากที่สุด จากภาพ XRD พบว่าความเป็นผลึกของเส้นใยนาโนที่อัตราส่วน (4:2) มีความเป็นผลึกมากที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่น ๆ เพราะฉะนั้นสาเหตุที่ทำให้เส้นใยนาโน ZnO ที่อัตราส่วน (4:2) มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าน้อยที่สุดคือเส้นใยนาโนไม่มีการแตกหัก ไม่เกิดรูพรุน และมีความเป็นผลึกมาก จึงทำให้ที่อัตราส่วน (4:2) มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าน้อยที่สุดนั่นเอง

ตารางที่ 4.5 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA แตกต่างกันคือ (2:2) (3:2) (4:2) (5:2) และ (6:2) เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C

อัตราส่วน (ZnAc:PVA)	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Ωm)
(2:2)	164.4 \pm 1.9
(3:2)	125.2 \pm 1.5
(4:2)	113.7 \pm 0.6
(5:2)	170.7 \pm 2.1
(6:2)	167.3 \pm 4.8

2. ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกันคือ 16 18 20 22 และ 24 kV เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C พบว่า ผลปรากฏว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ที่มีค่าน้อยที่สุดคือ เส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV

ตารางที่ 4.6 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกันคือ 16 18 20 22 และ 24 kV อุณหภูมิในการอบ 550°C และระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm

ความต่างศักย์ไฟฟ้า (kV)	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Ωm)
16	126.2 \pm 0.9
18	186.4 \pm 4.8
20	113.7 \pm 0.6
22	158.5 \pm 2.1
24	118.9 \pm 1.4

3. ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับแตกต่างกันคือ 12 13 14 และ 15 cm เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และอุณหภูมิในการอบ 550°C พบว่า ผลปรากฏว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่มีค่าน้อยที่สุดคือที่ระยะห่าง 15 cm ทั้งนี้เป็นผลมาจากเส้นใยนาโนที่ระยะห่าง 15 cm ไม่มีการรวมตัวกันของเส้นใยนาโนขณะทำการปั่นและเส้นใยที่ผ่านการอบไม่เกิดการแตกหักและมีรูพรุน จึงเป็นสาเหตุทำให้เส้นใยนาโนที่ระยะห่าง 15 cm มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าน้อยที่สุดนั่นเอง

ตารางที่ 4.7 ตารางค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับแตกต่างกันคือ 12 13 14 และ 15 cm เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และอุณหภูมิในการอบ 550°C

ระยะห่าง (cm)	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Ωm)
12	167.0±2.8
13	154.2±1.3
14	123.2±1.4
15	113.7±0.6

4. อุณหภูมิการอบ

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 450 500 550 และ 600°C เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm พบว่า ผลปรากฏว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่มีค่าน้อยที่สุดคือที่อุณหภูมิ 550°C เป็นผลมาจากการอบที่อุณหภูมิต่ำกว่า 550°C มีการกำจัด PVA ออกไม่มากพอจึงทำให้มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าเส้นใยนาโนที่อบด้วยอุณหภูมิ 550°C และเส้นใยที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 600°C จะเกิดรูพรุนและการแตกหักของเส้นใยนาโนจึงทำให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าเส้นใยนาโนที่อบด้วยอุณหภูมิ 550°C

ตารางที่ 4.8 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 450 500 550 และ 600°C เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm

อุณหภูมิ (°C)	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Ωm)
450	163.5±1.8
500	157.0±1.5
550	113.7±0.6
600	122.3±1.2

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการสังเคราะห์เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้า สถิติจะนำไปวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานและลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง SEM และ XRD ตามลำดับ และวิเคราะห์สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง UV-Vis และเครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิติจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับนาโนเมตร โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่พบในช่วง 25-530 nm ทั้งนี้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการทดลอง ซึ่งพบว่า ถ้าอัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnA:PVA เพิ่มขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์จะใหญ่ขึ้นและความหนาแน่นของเส้นใยจะมากขึ้น เมื่อพิจารณาถึงความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างปลายเข็มและแผ่นโลหะรองรับสูงขึ้น ในช่วง 16 kV ถึง 24 kV ขนาดของเส้นใยจะมีขนาดเล็กลง เนื่องจากมีแรงดึงดูดจากสนามไฟฟ้าที่มากขึ้น จึงส่งผลให้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง โดยเมื่อพิจารณาจากความหนาแน่นของเส้นใยพบว่า ความหนาแน่นของเส้นใยมีค่าสูงมากขึ้น เมื่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นน่าจะเนื่องมาจากแรงทางไฟฟ้าที่สูงขึ้น จึงส่งผลให้จำนวนเส้นใยที่มาถึงแผ่นรองรับเป็นส่วนใหญ่ เมื่อพิจารณาถึงระยะห่างระหว่างปลายเข็มและแผ่นโลหะรองรับในช่วง 12 cm ถึง 15 cm พบว่า เมื่อระยะห่างมากขึ้นขนาดเส้นใยเล็กลง และมีความหนาแน่นที่ลดลง ที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อระยะห่างมากขึ้น ค่าสนามไฟฟ้าจะลดลง เนื่องจากสนามไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับค่าความต่างศักย์และแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อระยะห่างระหว่างปลายเข็มที่เป็นขั้วไฟฟ้าหนึ่งกับแผ่นโลหะรองรับซึ่งเป็นอีกขั้วไฟฟ้าหนึ่งอยู่ห่างกันมากขึ้น จะทำให้แรงทางไฟฟ้าลดลง ส่งผลให้มีปริมาณเส้นใยที่มีขนาดใหญ่ แต่มาถึงแผ่นได้ยาก และมีปริมาณเส้นใยบางส่วนหลุดออกนอกแผ่นรองรับมากขึ้น เมื่อพิจารณาอุณหภูมิในการอบที่ทำการทดลองในช่วง 450 -600^oC พบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีขนาดเล็กลงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น รวมทั้งความหนาแน่นของเส้นใยมีค่าน้อยลง ซึ่งผลเกิดจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสารพอลิเมอร์จะถูกระเหยออกไปทำให้เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลง

2. รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิตจะพบ พีคที่มุม 2θ ประมาณ 31.5 34.5 และ 36.5 องศา เมื่อนำไปเทียบกับค่ามาตรฐาน JCPDS เลขที่ 36-1451 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) พบว่าตรงกับผลึกของ ZnO ที่ระนาบ (100) (002) และ (101) ตามลำดับ และพบว่า เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnA:PVA เพิ่มขึ้น หรือความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างปลายเข็มและแผ่นโลหะรองรับเพิ่มขึ้น หรืออุณหภูมิในการอบเพิ่มขึ้น เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จะมีค่าความเป็นผลึกสูงขึ้น แต่ถ้าอัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnA:PVA หรือความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างปลายเข็มและแผ่นโลหะรองรับ หรืออุณหภูมิในการอบเพิ่มขึ้นมากเกินไป จนทำให้เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้มีรูพรุน หรือแตกหัก ค่าความเป็นผลึกก็จะลดลง เมื่อพิจารณาถึงระยะห่างระหว่างปลายเข็มและแผ่นโลหะรองรับที่เพิ่มขึ้นพบว่า เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์มีค่าความเป็นผลึกมากขึ้น ดังนั้น ค่าความเป็นผลึกของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์จะมีความสัมพันธ์กับลักษณะของเส้นใย คือหากเส้นใยมีรูพรุน หรือแตกหัก ค่าความเป็นผลึกก็จะต่ำ

3. การวิเคราะห์สมบัติทางแสงของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิต พบว่า เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์จะมีการส่องผ่านในช่วงแสงสีขาวย และที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรจะมีค่าการส่องผ่านสูงอยู่ในช่วงร้อยละ 86.02-90.21 ซึ่งจากข้อมูลการส่องผ่านของแสงนี้ เมื่อนำไปคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานซึ่งพบว่า ช่องว่างแถบพลังงานที่พบจะอยู่ในช่วง 2.73-3.26 eV

4. ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิตจะอยู่ในช่วง 113-186 (Ωm) ในกรณีที่เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ไม่มีรูพรุน หรือแตกหัก เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลาย ZnA:PVA เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้แนวโน้มของสภาพต้านทานมีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากมีปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น รวมทั้งขนาดเส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีความหนาแน่นของเส้นใยที่มากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามียุทธศาสตร์ที่ลดลง ซึ่งกล่าวคือสภาพนำไฟฟ้าจะมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าพบว่าค่าสภาพต้านทานไม่มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน น่าจะเนื่องจากความต่างศักย์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ได้ขนาดของเส้นใยที่เล็กลง แต่มีความหนาแน่นของเส้นใยที่มากขึ้น ขนาดที่เล็กลงจะส่งผลให้ค่าสภาพต้านทานน่าจะสูงขึ้น แต่ความหนาแน่นที่มากขึ้นจะทำให้ค่าสภาพต้านทานลดลง จึงชดเชยค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ากัน ดังนั้นสภาพต้านทานไม่มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาถึงระยะห่างระหว่างปลายเข็มและแผ่นโลหะรองรับ และอุณหภูมิการอบที่เพิ่มขึ้น พบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามียุทธศาสตร์ที่ลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ และประโยชน์ในทางประยุกต์ของผลการวิจัย

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการสังเคราะห์เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิตจะทำให้ได้เส้นใยนาโนที่มีมิติต่ำ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตร มีค่าการส่องผ่านแสงสูง แต่ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ได้มีค่าสูงเมื่อเทียบกับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ดังนั้นหากนำเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ไปประยุกต์ใช้งานในการทำเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ควรเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์นี้ ซึ่งสามารถทำได้โดยการเจือสารหมู่ 3 เข้าไปเพิ่มเช่น การเจืออลูมิเนียม เป็นต้น ทั้งนี้หากมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำแล้วก็สามารถนำมาใช้เป็นชั้นของฟิล์มบางออกไซด์ ซึ่งน่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดีขึ้น

บรรณานุกรม

- Cadena, G., Comini, E., Ferroni, M., Vomiero, A., & Sberveglieri, G. (2010). Synthesis of different ZnO nanostructures by modified PVD process and potential use for 1 dye-sensitized solar cells. *Materials Chemistry and Physics*, 124, 694–698.
- CÁRABE, J., & GANDIA, J.J. (2004). Thin film silicon solar cell. *Opto-Electronics Review*, 12(1), 1–6.
- Chaisri, P., Thomas. I., & Siri, S. (2011). Effects of some parameters on poly ϵ -caprolactone electrospun fibers produced by the KKU drum electrospinning unit. *KKU Research Journal*, 16(4), 371-383.
- Chang, P.C., Fan, Z., Wang, D., Tseng, W. Y., Chiou, W. A., Hong, J., & Lu, J. G. (2004). ZnO nanowires synthesized by vapor trapping CVD method. *Chemistry of Materials*, 16, 5133-5137.
- Chuangchote, S., Sagawa, T., & Yoshikawa, S. (2008). Efficient dye-sensitized solar cells using electrospun TiO₂ nanofibers as a light harvesting layer. *Applied Physics Letters*, 93, 033310-033313.
- Deitzel, J.M., Kleinmeyer, J., Harris, D. & Beck Tan N.C. (2001). The effect of processing variables on the morphology of electrospun nanofibers and textiles. *Polymer*, 42(1), 261-267.
- Dong, Z., Kennedy, S.J., & Wu, Y. (2011). Electrospinning materials for energy-related applications and devices. *Journal of Power Sources*, 196, 4886-4904.
- Doshi, J. & Reneker, D. H. (1995). Electrospinning process and applications of electrospun fibers. *Journal Electrostatics*, 35(2-3), 151-160.
- Faccini, M., Borja, G., Boerrigter, M., Martin, D. M., Crespiera, S. M., Campos, S. V., Aubouy, L., & Amantia, D. (2015). Electrospun carbon nanofiber membranes for filtration of nanoparticles from water. *Journal of Nanomaterials*, 1, 1-9.

- Haider, S., & Park, S. Y. (2009). Preparation of the electrospun chitosan nanofibers and their applications to the adsorption of Cu(II) and Pb(II) ions from an aqueous solution. *Journal of Membrane Science*, 328(1-2), 90-96.
- Haider, S., Zeghayer, Y. A., Masry, W. A., & Ali, F. A. (2012). Fabrication of chitosan nanofibers membrane with improved stability and britility. *Advanced Science Letters*, 17(1), 217-223.
- Huang, Z. M., Zhang, Y. Z., Kotaki, M. & Ramakrishna, S. (2003). A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 63, 2223–2253.
- Imran, M., Haider, S., Ahmad, K., Mahmood, A., & Al-Masry, W. A. (2017). Fabrication and characterization of zinc oxide nanofibers for renewable energy applications. *Arabian Journal of Chemistry*, 10(1), 1067-1072.
- Jurablu, S., Farahmandjou, M., & Firoozabadi, T. P. (2015). Sol-Gel synthesis of zinc oxide (ZnO) nanoparticles: study of structural and optical properties. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 26(3), 281-285.
- Khil, M. S., Bhattarai, S. R., Kim, H. Y., Kim, S. Z. & Lee, K. H. (2005). Novel fabricated matrix via electrospinning for tissue engineering. *Journal of Biomedical Materials Research. Part B, Applied Biomaterials*, 72, 117–124.
- Kurecic, M. (2013). Electrospinning: nanofibre production method, *Tekstilec*, 56(1), 4-12.
- Li, L., Zhai, T., Bando, Y., & Golberg, D. (2012). Recent progress of one-dimensional ZnO nanostructured solar cells. *Nano Energy*, 1, 91-106.
- Nawanil, C., & Vittayakorn, N. (2011). Ceramic nanofibers. *Journal of Science Ladkrabang*, 20(2), 13-28.
- Rui, M., Yi, S. L., Xin, F., Weijun, Y., & Bo, L. (2008). Graft modification of ZnO nanoparticles with silane coupling agent KH570 in mixed solvent. *Journal of Shanghai University (English Edition)*, 12 (3), 278-282.

- Rujitanaroj, P. O., Pimpha, N. & Supaphol, P. (2008). Wound-dressing materials with antibacterial activity from electrospun gelatin fiber mats containing silver nanoparticles. *Polymer*, *49*, 4723-4732.
- Suwantong, O., Pankongadisak, S., Deachathai, S. & Supaphol, P. (2012). Electrospun poly(Llactic acid) fiber mats containing a crude *Garcinia cowa* extract for wound dressing applications. *Journal of Polymer Research*, *19*, 9896.
- Suwantong, O., Opanasopit, P., Ruktanonchai, U., & Supaphol, P. (2007). Electrospun cellulose acetate fiber mats containing curcumin and release characteristic of the herbal substance. *Polymer*, *48*, 7546-7557.
- Tang, Z., Tress, W., & Ingana, O. (2014). Light trapping in thin film organic solar cells. *Materials Today*, *17*(8), 389-396.
- Znaidi, L., Touam, T., Vrel, D., Souded, N., Yahia, S. B., Brinza, O., Fischer, A., & Boudrioua, A. (2012). ZnO Thin Films Synthesized by Sol-Gel Process for Photonic Applications. *Acta Physica Polonica A*, *121*(1), 165-168.