



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ผลของการเจืออลูมิเนียมต่อสมบัติทางโครงสร้าง ทางแสงและทางไฟฟ้าของ
เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

Effect of Al-doping on the structure, optical and electrical properties
of electrospun zinc oxide nanofibers

กัญจน์ชญา หงส์เลิศคงสกุล

จิราภรณ์ พงษ์โสภา

ภัททิรา หอมหวน

ดุสิต งามรุ่งโรจน์

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้
จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๖๐

มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 2560A10802202

สัญญาเลขที่ 85/2560

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ผลของการเจืออลูมิเนียมต่อสมบัติทางโครงสร้าง ทางแสง และ

ทางไฟฟ้าของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

Effect of Al-doping on the structure, optical and electrical
properties of electrospun zinc oxide nanofibers

กัญจน์ชญา หงส์เลิศคงสกุล

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

จิราภรณ์ พงษ์โสภา

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต

ภัททิรา หอมหวาน

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์

ดุสิต งามรุ่งโรจน์

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 85/2560

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยนี้ ขอขอบคุณฝ่ายส่งเสริมการวิจัย มหาวิทยาลัยบูรพา สำหรับการประสานงานอย่างดี และขอขอบคุณ ภาควิชาฟิสิกส์ และหน่วยบริการนวัตกรรมการทาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ และสถานที่สำหรับทำงานวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยนี้ ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของท่านดังกล่าว ข้างต้น คณะผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่งจึงใคร่ขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

คณะผู้วิจัย

2562

ผลของการเจืออลูมิเนียมต่อสมบัติทางโครงสร้าง ทางแสงและทางไฟฟ้าของ เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตการสังเคราะห์และการวิเคราะห์

บทคัดย่อภาษาไทย

เส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์จะสังเคราะห์ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิตซึ่งมีสารซิงค์อะซีเตท โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ และอลูมิเนียมไนเตรต โนนาไฮเดรตเป็นสารตั้งต้น เส้นใยนาโนของสารละลาย ZnAc:PVA ที่มีปริมาณสารอลูมิเนียมไนเตรต โนนาไฮเดรตที่แตกต่างกัน คือ 0, 1, 3, 5 และ 7 g จะปั่นลงบนแผ่นรองรับ ในการปั่นจะใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกันคือ 18 20 22 และ 24 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับที่แตกต่างกันคือ 8 9 10 11 และ 12 cm เส้นใยนาโนที่ปั่นได้จะนำไปอบที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันคือ 400 450 500 550 และ 600°C เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้ทั้งหมดจะนำไปวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้าง ทางแสง และทางไฟฟ้า

การวัดลักษณะทางสัณฐานของเส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าเส้นใยที่ได้ทั้งหมดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตร ลักษณะทางโครงสร้างผลึกที่ศึกษาด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD) ยืนยันว่าเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ทั้งที่ไม่เจือและเจือด้วยอลูมิเนียมมีโครงสร้างความเป็นผลึก การวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเครื่อง Uv-Vis spectroscopy พบว่า ค่าแถบพลังงานแสงของเส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์อยู่ในช่วง 3.02-3.23 eV ในขณะที่การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าพบว่า เส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์มีสภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ในช่วง 1.50×10^{-4} - 1.98×10^{-4} Ω m สมบัติทางโครงสร้าง ทางแสงและทางไฟฟ้าของเส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์จะขึ้นกับปริมาณของอลูมิเนียมไนเตรต โนนาไฮเดรต ความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ และอุณหภูมิที่ใช้ออบ

คำสำคัญ: เส้นใยนาโน, ซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียม, การปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

Effect of Al-doping on the structure, optical and electrical properties of electrospun zinc oxide nanofibers

ABSTRACT

Aluminium doped Zinc Oxide (AZO) nanofibers were synthesized by electrospinning technique using zinc acetate, polyvinyl alcohol and aluminium nitrate nonahydrate as precursors. The nanofibers of ZnAc: PVA solution, which has various aluminium nitrate nonahydrate quantity such as 0, 1, 3, 5 and 7 g, were spun on the substrate. To spin will run at different voltages, such as 18, 20, 22 and 24 kV and at different distances between needle tip and substrate, such as 8, 9, 10, 11 and 12 cm. The spun nanofibers were annealed at different annealing temperatures, such as 400, 450, 500, 550 and 600° C. All of AZO nanofibers were analyzed on the structural, optical and electrical properties.

The morphology measurement of AZO nanofibers by Scanning Electron Microscope (SEM) showed that the diameter of all AZO fibers is in the nanometer range. Structural characterization by X-ray diffraction (XRD) technique confirmed being of crystallization of undoped and doped ZnO nanofibers from aluminium. Optical characterization by Uv-Vis spectroscopy showed that optical energy bandgap of a AZO nanofibers was found in the range 3.02-3.23 eV. While the resistivity measurement showed that the resistivity of AZO nanofibers was found in the range of 1.50×10^{-4} - $1.98 \times 10^{-4} \Omega \text{m}$. The structural, optical and electrical properties of AZO nanofibers depend upon the aluminium nitrate nonahydrate quantity, voltages, distances between needle tip and substrate and annealing temperature.

Key words: Nanofibers, Aluminium doped Zinc Oxide, Electrospinning

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
Abstract.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	5
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.4 ขอบเขตของงาน.....	5
1.5 แนวทางดำเนินงาน.....	5
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 เส้นใยนาโน.....	7
2.2 ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์.....	9
2.3 เทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	11
2.4 เครื่องมือวิเคราะห์.....	13
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	19
3.1 การศึกษาข้อมูล.....	19
3.2 สารเคมี วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง.....	19
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	20
3.4 การวิเคราะห์ผล.....	24

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	25
4.1 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของเส้นใยนาโน AZO ด้วยเครื่อง SEM.....	25
4.2 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของเส้นใยนาโน AZO ด้วยเครื่อง XRD	31
4.3 การวิเคราะห์สมบัติทางแสงของเส้นใยนาโน AZO ด้วยเครื่อง UV-Vis.....	35
4.4 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของเส้นใยนาโน AZO ด้วยเครื่องวัดสภาพ ต้านทานไฟฟ้า	41
5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	44
5.1 สรุปและอภิปรายผลการทดลอง	44
5.2 ข้อเสนอแนะ และประโยชน์ในทางประยุกต์ของผลการวิจัย.....	46
บรรณานุกรม	47
ประวัติย่อผู้ทำวิจัย.....	50

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองเมื่อแปรค่าปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA..... 22
3.2	เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองเมื่อแปรค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 22
3.3	เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองเมื่อแปรค่าระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ..... 23
3.4	เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองเมื่อแปรค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 23
4.1	ค่าสเปกตรัมการส่องผ่านแสง (%) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และค่าช่องว่างแถบพลังงานของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ปริมาณของ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA แตกต่างกันคือ 0, 1, 3, 5 และ 7 g เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C..... 35
4.2	ค่าสเปกตรัมการส่องผ่านแสง (%) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และค่าช่องว่างแถบพลังงานของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูงที่แตกต่างกันคือ 18 20 22 และ 24 kV เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C..... 37
4.3	ค่าสเปกตรัมการส่องผ่านแสง (%) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และค่าช่องว่างแถบพลังงานของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับแตกต่างกันคือ 8 9 10 11 และ 12 cm เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV และอุณหภูมิในการอบ 550 °C..... 38

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.4 ค่าสเปกตรัมการส่องผ่านแสง (%) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และค่าช่องว่างแถบพลังงานของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 400 450 500 550 และ 600 °C เมื่อปริมาณ $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm	40
4.5 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ปริมาณของ $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA แตกต่างกันคือ 0, 1, 3, 5 และ 7 g เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C	41
4.6 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูงที่แตกต่างกันคือ 18 20 22 และ 24 kV เมื่อปริมาณ $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C.....	42
4.7 ตารางค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับแตกต่างกันคือ 8 9 10 11 และ 12 cm เมื่อปริมาณ $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV และอุณหภูมิในการอบ 550°C.....	43
4.8 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน โน AZO ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 400 450 500 550 และ 600°C เมื่อปริมาณ $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm	43

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1	ลักษณะโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ 1
2.1	ตัวอย่างภาพ SEM ของเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคการปั่น ด้วยไฟฟ้าสถิต..... 8
2.2	โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์..... 10
2.3	การสังเคราะห์เส้นใยนาโนด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต..... 11
2.4	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด..... 14
2.5	ส่วนประกอบและหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 15
2.6	เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์..... 16
2.7	ระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของ Bragg's law..... 16
2.8	ตัวอย่างสเปกตรัมการส่องผ่านแสงกับค่าความยาวคลื่น..... 17
2.9	รูปแบบวิธีการวัดแบบสองโพรบ..... 18
4.1	ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่าของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ ที่ปริมาณของ $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA แตกต่างกัน คือ 0, 1, 3, 5 และ 7 g เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm และอุณหภูมิในการอบ $550^{\circ}C$ 26
4.2	ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่าของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูงแตกต่างกันคือ 18 20 22 และ 24 kV เมื่อปริมาณ $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm และอุณหภูมิในการอบ $550^{\circ}C$ 28

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
4.3	<p>ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่าของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับแตกต่างกัน คือ 8 9 10 11 และ 12 cm เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายยั้งตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV และอุณหภูมิในการอบ 550°C.....</p>	29
4.4	<p>ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่าของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 400 450 500 550 และ 600°C เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายยั้งตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm</p>	30
4.5	<p>รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ปริมาณของ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายยั้งตั้งต้น ZnA:PVA แตกต่างกัน คือ 0, 1, 3, 5 และ 7 g เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C.....</p>	31
4.6	<p>รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูงที่แตกต่างกันคือ 18 20 22 และ 24 kV เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายยั้งตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C.....</p>	32

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
4.7	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับแตกต่างกัน คือ 8 9 10 11 และ 12 cm เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลาย ตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV และอุณหภูมิในการอบ 550°C	33
4.8	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน โน AZO ที่สังเคราะห์ที่ อุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 400 450 500 550 และ 600°C เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ความต่างศักย์ไฟฟ้า แรงดันสูง 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยา กับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm	34
4.9	สเปกตรัมการส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 200-900 นาโนเมตรของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ปริมาณของ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA แตกต่างกันคือ 0, 1, 3, 5 และ 7 g เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้า แรงดันสูง 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm และ อุณหภูมิในการอบ 550°C	36
4.10	สเปกตรัมการส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 200-900 นาโนเมตรของเส้นใย นาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูงที่แตกต่างกัน คือ 18 20 22 และ 24 kV เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลาย ตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่น โลหะรองรับ 8 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C	37

สารบัญภาพ (ต่อ)

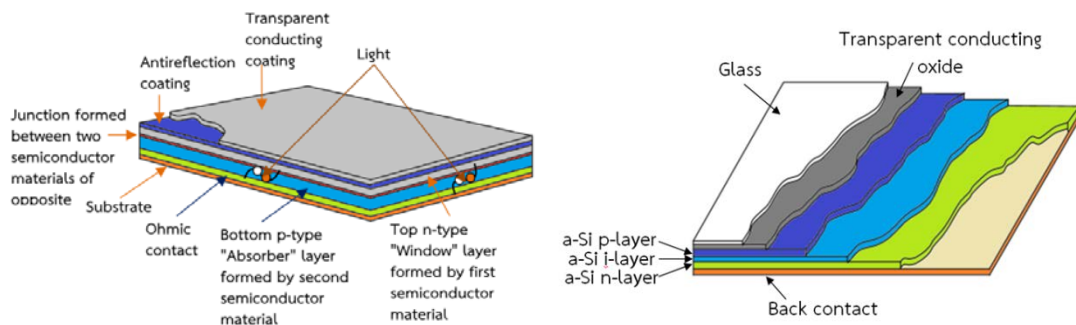
ภาพที่	หน้า
4.11	
สเปกตรัมการส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 200-900 นาโนเมตรของเส้นใย	
นาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะ	
รองรับแตกต่างกันคือ 8 9 10 11 และ 12 cm เมื่อปริมาณ $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$	
ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง	
20 kV และอุณหภูมิในการอบ 550 °C.....	
	39
4.12	
สเปกตรัมการส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 200-900 นาโนเมตรของเส้นใยนาโน AZO	
ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 400 450 500 550 และ 600 °C	
เมื่อปริมาณ $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g	
ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับ	
แผ่นโลหะรองรับ 8 cm	
	40

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การขยายตัวของเศรษฐกิจในประเทศไทยเติบโตไปพร้อมกับการต้องการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นอย่างมากมาย พลังงานหลักที่ใช้ในปัจจุบันเป็นพลังงานทางไฟฟ้า ซึ่งส่วนใหญ่จะผลิตจากเชื้อเพลิงฟอสซิลทำให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมตามมา การหาพลังงานทางเลือกจึงเป็นทางออกที่ควรพิจารณาในปัจจุบัน พลังงานทางเลือกหรือพลังงานทดแทนอื่นที่จะใช้แทนพลังงานทางไฟฟ้ามีมากมาย ได้แก่ พลังงานลม พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานจากคลื่น พลังงานจากแสงอาทิตย์ เป็นต้น สำหรับพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทางเลือกที่สะอาดได้มาจากแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่มีศักยภาพสูง และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นักวิทยาศาสตร์ได้มีการพัฒนาการนำพลังงานจากแสงอาทิตย์มาผลิตเป็นไฟฟ้าได้โดยตรงผ่านเซลล์แสงอาทิตย์ และได้พยายามพัฒนาต่อยอดให้ได้เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในปัจจุบันเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์มีด้วยกันหลายแบบ เช่น แบบกระจกเคลือบสีย้อมร่วมกับฟิล์มออกไซด์ที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ (Dye-Sensitized Oxide Solar Cell; DSSC) (Tang, Tress, & Inganä, 2014) หรือแบบฟิล์มบางออกไซด์ที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ (CÁRABE, & GANDIA, 2004) เป็นต้น



ภาพที่ 1.1 ลักษณะโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์

จากภาพที่ 1.1 แสดงตัวอย่างพื้นฐานโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ จะเห็นว่าโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องประกอบด้วยชั้นของกระจกนำไฟฟ้า เนื่องจากเป็นชั้นที่ให้แสงอาทิตย์ผ่านและนำไฟฟ้าได้ การพัฒนาชั้นกระจกนำไฟฟ้าทั้งในด้านการนำไฟฟ้าและการโปร่งแสงจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ให้สูงขึ้น ซึ่งอาจทำได้โดยการเคลือบฟิล์มบางออกไซด์นำไฟฟ้าชนิดโปร่งแสง (Transparent Conducting Oxide; TCO) ที่มีสมบัติกึ่งตัวนำไฟฟ้าที่โปร่งแสงในย่านความถี่ที่ตาคนมองเห็นได้ มีความเสถียรต่อแรงทางกลและสารเคมี โดยทั่วไปฟิล์มบางออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสงมักทำมาจากฟิล์มทินออกไซด์ (SnO_2) หรือฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) แต่เนื่องจากมีต้นทุนในการผลิตที่ค่อนข้างมีราคาสูง จึงทำให้ไม่เหมาะนำมาศึกษาและพัฒนาในการเพิ่มประสิทธิภาพ จากเหตุผลด้านราคาและการใช้งาน นักวิทยาศาสตร์จึงได้ปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโดยเฉพาะวัสดุในกลุ่มโลหะออกไซด์อื่นๆ เช่น อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3), ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2), แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3), อินเดียมออกไซด์ (In_2O_3), ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นต้น สำหรับสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากเนื่องจากหาได้ง่าย ราคาไม่สูงมาก จึงได้มีการวิจัยและพัฒนาฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์นำไฟฟ้าชนิดโปร่งแสงนี้ให้มีประสิทธิภาพทางการนำไฟฟ้า การส่งผ่านแสง และทางโครงสร้างอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ได้ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์นำไฟฟ้าชนิดโปร่งแสงที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

โดยทั่วไปฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์นำไฟฟ้าชนิดโปร่งแสงจัดเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ที่มีความโปร่งแสงสูง มีสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) อยู่ในช่วง $6 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$ มีช่องว่างของแถบพลังงาน (Energy gap) ค่อนข้างกว้าง อยู่ที่ 3.37 อิเล็กตรอนโวลต์ และมีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเอกซ์ซิตอน (Exciton binding energy) สูงถึง 60 มิลลิโวลต์ ณ อุณหภูมิห้อง มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอล เป็นสารที่มีต้นทุนที่ต่ำและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม การเพิ่มประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์นำไฟฟ้าชนิดโปร่งแสงสามารถทำได้ด้วยการเจืออะตอมของธาตุกลุ่มโลหะ เช่น ทองแดง (Cu) แพลเลเดียม (Pd) และอลูมิเนียม (Al) เป็นต้น

สำหรับเทคนิคที่ใช้สังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสงมีหลายเทคนิค ได้แก่ เทคนิคการสะสมไอเชิงเชิงเคมี (Chemical vapor deposition; CVD) (Chang *et al.*, 2004), เทคนิคการสะสมไอเชิงเชิงกายภาพ (Physical vapor deposition; PVD) (Cadena *et al.*, 2010), เทคนิคโซล-เจล (Sol-gel) (Znaidi *et al.*, 2012) (Jurablu, Farahmandjou, & Firoozabadi, 2015) เทคนิคการ

กราฟต์เชิงเคมี (Chemical grafting) (Rui *et al.*, 2008) และเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning) (Imran *et al.*, 2017) เป็นต้น เทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นเทคนิคที่สามารถสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กในระดับนาโนเมตรได้ และมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (Surface-to-volume ratio) สูง และทำให้วัสดุที่สังเคราะห์ขึ้นมีสมบัติพิเศษที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ จากสมบัติทางโครงสร้างของวัสดุนาโนหนึ่งมิติ (One Dimensional Nanostructure) ของซิงค์ออกไซด์ที่ได้นี้หากนำไปใช้ประกอบกับเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ (Dong, Kennedy, & Wu, 2011) โดยการปั่นเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ลงบนชั้นของฟิล์มบาง TCO จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานที่จำกัดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเดิม เพราะอิเล็กตรอนมีการกระเจิงตรงรอยต่อ (Interface Scattering) สูง และมีการเคลื่อนย้ายที่ (Mobility) ที่จำกัด ทำให้เกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนก่อนที่จะถึงขั้วไฟฟ้า การเปลี่ยนขั้วที่รับแสง (Photoelectrode) เป็นเส้นใยนาโน จะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส (Chuangchote, Sagawa, & Yoshikawa, 2008) ทำให้เกิดการส่งผ่านอนุภาคต่างๆ ได้ดีขึ้น จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดีขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับการใช้ฟิล์มบางของวัสดุกิ่งตัวนำโลหะออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคอื่นๆ

ในการสังเคราะห์เส้นใยนาโนด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตนี้ ในปัจจุบันได้รับความสนใจมาก เนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีอุปกรณ์ไม่ซับซ้อน ราคาไม่แพง และประหยัดเวลาในการผลิตเส้นใยนาโนอาศัยหลักการดีสารละลายที่เหนียวหนืดด้วยแรงทางไฟฟ้าจากประจุสถิตที่อยู่ในสารละลายและแผ่นประจุ โดยมีพอลิเมอร์ผสมเป็นสารตั้งต้นเพื่อควบคุมความหนืดให้กับสารละลาย และมีแผ่นรองรับที่วางบนแผ่นโลหะเป็นแผ่นรองรับการตกสะสมของเส้นใยนาโน จากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าตัวแปรที่มีผลในการควบคุมสมบัติของเส้นใยนาโนได้แก่ อัตราส่วนความเข้มข้นของสารตั้งต้น ขนาดของความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ และอัตราการใช้ของสารตั้งต้น รวมทั้งอุณหภูมิที่ใช้ในการอบเส้นใยที่สังเคราะห์ได้ (Kurecic, 2013) เป็นต้น ดังนั้นหากนำเทคนิคข้างต้นมาใช้ในการผลิตเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์โปร่งแสงนำไฟฟ้าที่เจือด้วยอลูมิเนียมคาดว่า จะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้นได้ อย่างไรก็ตามการควบคุมตัวแปรที่ใช้ในการผลิตวัสดุเส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์จะทำให้โครงสร้างและขนาดรูปร่างของวัสดุนาโนนั้นเปลี่ยนไป ส่งผลให้สมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมีของวัสดุเปลี่ยนตามด้วย

ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของ Mauro และคณะวิจัยได้ศึกษาการสังเคราะห์เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจืออลูมิเนียม โดยใช้เงื่อนไขคือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 18 kV และทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบที่มีผลต่อเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจืออลูมิเนียม ที่อุณหภูมิในช่วง 350-650°C จากการวิเคราะห์ด้วย SEM พบว่าเส้นใยนาโนที่ไม่ผ่านการอบมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใยประมาณ 156 ± 37 nm และเมื่อนำเส้นใยไปอบที่ 550°C พบว่าเส้นใยมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงอยู่ที่ 48 ± 10 nm จากการวิเคราะห์ด้วย XRD จะพบพีค 2θ เท่ากับ 31.5° 34.5° และ 36.2° ซึ่งสอดคล้องกับค่ามาตรฐาน JCPDS36-1451 ของซิงค์ออกไซด์ที่เจืออลูมิเนียมที่ระนาบ (100) (002) และ (101) ตามลำดับ และความเป็นผลึกจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและจากการวิเคราะห์ UV-Vis สามารถหาค่าช่องว่างของแถบพลังงานได้ประมาณ 3.2 eV เป็นต้น (Mauro *et al.*, 2016)

งานวิจัยของ Sutanto และคณะวิจัยได้ศึกษาการสังเคราะห์เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ไม่เจือและเจือด้วยอลูมิเนียม โดยใช้เงื่อนไขคือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นรองรับประมาณ 8 cm อัตราการไหลของสารละลายที่ 6ml/min ในการเจืออลูมิเนียมที่ความเข้มข้น 1, 2, 3, 4 at.% ในการศึกษาเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมที่ไม่ผ่านการอบและผ่านการอบที่อุณหภูมิ 500°C ปรากฏว่าการวิเคราะห์ UV-Vis สามารถหาค่าช่องว่างของแถบพลังงานของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ไม่เจือด้วยอลูมิเนียมได้ประมาณ 3.52 eV และค่าช่องว่างของแถบพลังงานของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมที่ความเข้มข้น 1, 2, 3, 4 at.% มีค่าประมาณ 3.42, 3.44, 3.48, 3.50 eV ตามลำดับ (Sutanto *et al.*, 2018)

งานวิจัยของ Kondratiev และคณะวิจัยได้ศึกษาการสังเคราะห์เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือและไม่เจืออลูมิเนียม โดยใช้เงื่อนไขคือ อัตราการให้ความร้อน และการลดความร้อนในการอบขึ้นงานทั้งในสภาวะอากาศและในสภาวะสุญญากาศ และวิเคราะห์การส่องผ่านแสงของเส้นใยที่ได้ ซึ่งผลการวิจัยพบว่า เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจืออลูมิเนียมที่อบในสภาวะอากาศมีการส่องผ่านแสง (Optical transmittance) ที่สูงกว่าขึ้นงานที่อบในสภาวะสุญญากาศ และมีค่าการส่องผ่านแสงเพิ่มขึ้นถึง 85-90% (Kondratiev *et al.*, 2007)

ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้นคณะผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาการสังเคราะห์และการวิเคราะห์เส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิต จากนั้นนำเส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ไปศึกษาสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติทางโครงสร้าง ทางแสง และทางไฟฟ้า เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อสังเคราะห์เส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิต
2. เพื่อศึกษาสมบัติทางโครงสร้าง ทางแสงและทางไฟฟ้าของเส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิต

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิต
2. ได้ทราบสมบัติทางโครงสร้าง ทางแสง และทางไฟฟ้าของเส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิต

1.4 ขอบเขตของงาน

งานวิจัยนี้จะสังเคราะห์เส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิต และนำเส้นใยที่ได้จากการสังเคราะห์ไปวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) และเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction; XRD) สมบัติทางแสงด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Visible Spectrophotometer; UV-Vis) และสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

1.5 แนวทางดำเนินงาน

1. ศึกษาเทคนิคการปั่นเส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิต
2. จัดเตรียมสารละลาย ZnA:PVA ที่มีปริมาณของ $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ แตกต่างกัน สำหรับใช้ในการปั่นเส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิต

3. ปั่นเส้นใยนาโนด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิตในเงื่อนไขที่แตกต่างกัน ได้แก่
 - ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง
 - ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ
4. ออบเส้นใยนาโนที่ปั่นได้ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน
5. วิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้าง สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้าของเส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่องมือ เช่น
 - SEM และ XRD: ทางโครงสร้าง
 - UV-Vis: ทางแสง
 - เครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า: ทางไฟฟ้า
6. ประมวลผลและวิเคราะห์ผลการวิจัย
7. สรุปผลการวิจัยและเขียนรายงานการวิจัยและแนวทางการพัฒนา

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เส้นใยนาโน

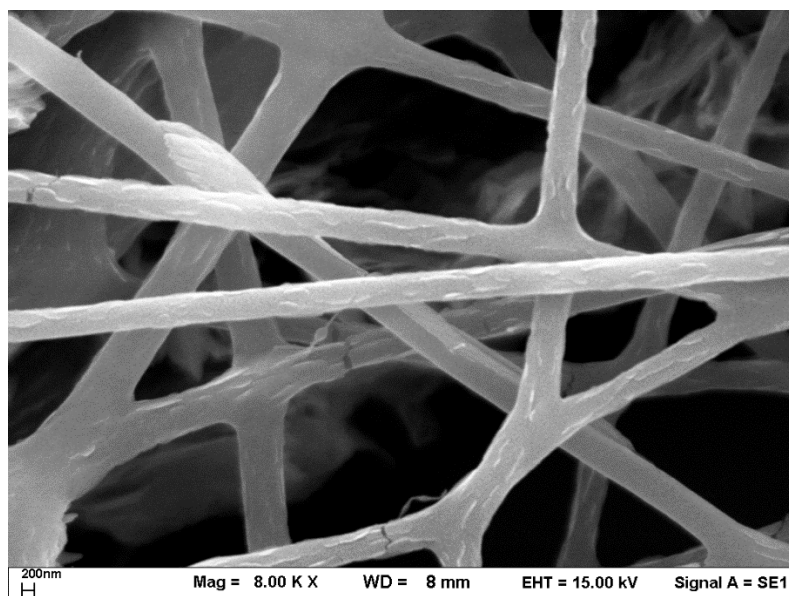
นาโนเทคโนโลยีคือเป็นเทคโนโลยีขนาดระดับนาโนเมตร ตัวอย่างโครงสร้างที่เป็นระดับนาโนเมตร ได้แก่ ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube) ควอนตัมดอท (quantum dot) เส้นลวดนาโน (nanowire) และเส้นใยนาโน (nanofibers) เป็นต้น ในส่วนของเส้นใยมีหลายชนิดทั้งจากเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ โดยมากเป็นเส้นใยที่มีขนาดระดับไมโครเมตร ซึ่งถือว่าเป็นขนาดใหญ่ ทำให้มีข้อจำกัดในการนำไปประยุกต์ใช้กับงานที่เป็นด้านเฉพาะเจาะจง เช่น งานทางการแพทย์ งานด้านวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ งานด้านพลังงาน งานด้านสิ่งแวดล้อมและเทคโนโลยีชีวภาพ เป็นต้น นักวิทยาศาสตร์จึงมีการพัฒนาผลิตเส้นใยให้มีขนาดเล็กลงจนถึงระดับนาโนเมตรเพื่อการใช้งานเฉพาะด้าน

เส้นใยนาโน มีลักษณะโครงสร้างเป็นเส้นใยของของแข็งขนาดเล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตร ดังแสดงในภาพที่ 2.1 โดยมากแล้วโครงสร้างวัสดุต่างๆ ที่อยู่ในลักษณะของเส้นใยนี้จะเป็นลักษณะของโครงสร้างพื้นฐานที่ทำให้เกิดโครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวที่มีความจำเพาะสูง คือเป็นพื้นที่ผิวที่ทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ได้เป็นอย่างดีเช่น เป็นโครงสร้างที่มีความสามารถในการยึดหยุ่นได้ดี มีความแข็งแรงและความทนทานที่สูงขึ้น เป็นต้น นอกจากนี้เส้นใยนาโนมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (Surface-To-Volume Ratio) สูง คือ มีพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่สูง จากลักษณะโดยทั่วไปทำให้เส้นใยนาโนเหมาะนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านที่ต้องการความได้เปรียบของวัสดุสังเคราะห์ที่มีขนาดเล็กมากๆ พร้อมกับมีสมบัติพิเศษต่างๆ ที่ดีมากขึ้น อาทิเช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติทางชีวภาพ เป็นต้น

สำหรับตัวอย่างการประยุกต์ใช้เส้นใยนาโนในงานด้านต่างๆ เช่น

- (1) ด้านการแพทย์ จากสมบัติการย่อยสลายได้ และสมบัติทางชีวภาพ (Biocompatibility) ของเส้นใยนาโนพอลิเมอร์ในธรรมชาติ เช่น ไคโตซาน (Chitosan) ไหม (Silk) และคอลลาเจน (Collagen) สามารถนำไปใช้กับงานด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ (Tissue Engineering) ฝ้ายปิดแผลหรือไหมเย็บแผลพิเศษ เป็นต้น (Chaisri, Thomas, & Siri, 2011) (Rujitanaroj, Pimpha, Supaphol, 2008) (Suwantong *et al.*, 2012) (Khil *et al.*, 2005)

- (2) ด้านวัสดุศาสตร์ จากสมบัติเชิงกลของเส้นใยนาโนคาร์บอน (Carbon Nanofiber) ที่มีค้ำยั้งมอดูลัส (Young's Modulus) และความแข็งแรง (Strength) สูง สามารถใช้เป็นวัสดุเสริมโครงสร้างในวัสดุคอมโพสิตได้ (Faccini *et al.*, 2015) (Nawanil, & Vittayakorn, 2011)
- (3) ด้านสิ่งแวดล้อมและเทคโนโลยีชีวภาพ จากสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี สมบัติเฉพาะทางชีวภาพของโมเลกุล และสมบัติความเลือกจำเพาะของเมมเบรนของเส้นใยนาโนไททานเนตขนาดเล็กทำให้ระบบกรองมีความละเอียดและมีช่องกรองเล็กลงได้ ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ในระบบกรองมลภาวะทั้งทางอากาศ และทางน้ำ ระบบกรองน้ำจืดจากน้ำทะเล ระบบกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสีย หรือแผ่นเมมเบรนคัดแยก (Affinity Membrane) ได้ (Suwantong *et al.*, 2007) และ
- (4) ด้านวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากสมบัติการนำไฟฟ้า และสมบัติเชิงกลของนาโนพอลิเมอร์อิเล็กทรอนิกส์ สามารถนำไปใช้ในอุปกรณ์ระดับนาโนทางอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ตัวนำไฟฟ้า ตัวเก็บประจุ ทรานซิสเตอร์ ไดโอด หน่วยความจำและชิพในคอมพิวเตอร์ เป็นต้น



ภาพที่ 2.1 ตัวอย่างภาพ SEM ของเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

2.2 ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์

ซิงค์ออกไซด์ มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอลโครสแพค (Hexagonal Closed Pack: hcp) ภายในโครงสร้างมีออกซิเจนไอออน (Oxygen Ions, O^{2-}) แทรกอยู่ตรงตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างซิงค์ไอออน (Zinc Ions, Zn^{2+}) ซึ่งทำพันธะกันแบบเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) เรียกว่า โครงสร้างแบบ “เวิร์ตไซต์” (Wurtzite Structure) ซิงค์ออกไซด์มีค่าคงที่ผลึก (Lattice Constants) ดังนี้ $a = 3.24 \text{ \AA}$ และ $c = 5.19 \text{ \AA}$ มีสัดส่วนของน้ำหนักของซิงค์ต่อออกซิเจนมีค่าประมาณ 66/34 ดังแสดงในภาพที่ 2.2 มีสมบัติทั่วไปคือ จัดเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ที่มีมวลโมเลกุล 81.4084 g/mol ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 20°C เท่ากับ 5.67526 g/cm³ จุดหลอมเหลวเท่ากับ 1975°C จุดเดือดเท่ากับ 2360°C มีสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) อยู่ในช่วง $6 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-6} \Omega m$ มีช่องว่างของแถบพลังงาน (Energy gap) ค่อนข้างกว้าง อยู่ที่ 3.37 อิเล็กตรอนโวลต์ มีความโปร่งแสงสูง และมีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเอกซ์ซิตอน (Exciton binding energy) สูงถึง 60 มิลลิโวลต์ ณ อุณหภูมิห้อง จึงเหมาะสมแก่การนำมาใช้ทำชั้นกระจกนำไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ รวมทั้งเป็นสารที่มีต้นทุนที่ต่ำและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

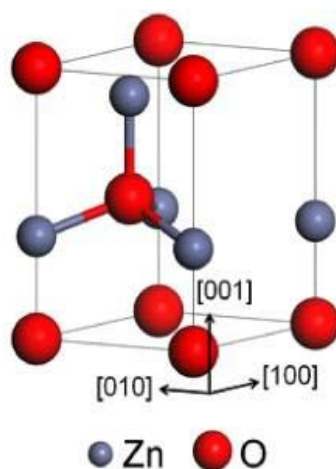
การเพิ่มประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าของซิงค์ออกไซด์สามารถทำได้โดย

- (1) การเจืออะตอมของธาตุกลุ่มโลหะ เช่น ทองแดง (Cu) แพลเลเดียม (Pd) และอลูมิเนียม (Al) เพื่อเพิ่มสมบัติพิเศษที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน หรือ
- (2) การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ให้มีโครงสร้างเป็นหนึ่งมิติเพื่อเพิ่มสมบัติเฉพาะตัว สำหรับเครื่องที่ใช้ในการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ให้มีโครงสร้างหนึ่งมิติ หรือเป็นเส้นใยนาโนที่ได้รับความนิยมมากที่สุดและมีประสิทธิภาพมากที่สุดคือ การสังเคราะห์ด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตนั่นเอง

สำหรับตัวอย่างการประยุกต์ใช้เส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ในงานด้านต่างๆ (Doshi, & Reneker, 1995) (Huang *et al.*, 2003) (Deitzel *et al.*, 2001) เช่น

- (1) งานด้านเภสัชกรรมและการแพทย์จะใช้นาโนซิงค์ออกไซด์เป็นยาสมานแผล ลดการอักเสบยับยั้งแบคทีเรียได้ และรักษาโรคติดเชื้อที่ผิวหนัง

- (2) งานด้านเครื่องสำอางและผลิตภัณฑ์กันแดดจะใช้นาโนซิงค์ออกไซด์เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์กันแดดและในเครื่องสำอาง เพื่อปกป้องรังสี UV-A และ UV-B ทำให้เกิดสัมผัสนุ่มลื่น โปรงใส และไม่มีสีหลังจากที่ทาลงบนผิว
- (3) งานอุตสาหกรรมสิ่งทอและอุตสาหกรรมเคมีอื่นๆ จะใช้นาโนซิงค์ออกไซด์ในการป้องกันแบคทีเรียและเชื้อรา การกำจัดกลิ่นของเสื้อผ้า เสื้อผ้าทำความสะอาดตัวเอง ผลิตภัณฑ์ใยและสิ่งทอที่จะสามารถป้องกัน UV และ
- (4) งานด้านอุตสาหกรรมอาหารและยาจะใช้นาโนซิงค์ออกไซด์เติมในอาหารและยาของคนและสัตว์ ซึ่งนาโนซิงค์ออกไซด์จะมีอัตราของการดูดซึมเข้าสู่ร่างกายสูงกว่าไมโครซิงค์ออกไซด์ ทำให้ลดปริมาณการเติมซิงค์ออกไซด์ในอาหารและยาได้
- (5) งานด้านอุตสาหกรรมเซรามิกจะใช้นาโนซิงค์ออกไซด์ในการให้สีขาวบนเซรามิก เพื่อช่วยลดอุณหภูมิการเผาเซรามิกให้เหลือเพียง 400-600°C และช่วยให้ผิวของเซรามิกมีความมันวาวราวกับกระจก
- (6) งานด้านอุตสาหกรรมสี จะใช้นาโนซิงค์ออกไซด์เป็นสารป้องกันไฟฟ้าสถิต ป้องกันรังสี UV และใช้ในการทำสีที่ทำความสะอาดตัวเองได้ เป็นต้น
- (7) งานด้านอุตสาหกรรมการผลิตยางจะใช้นาโนซิงค์ออกไซด์เป็นสารลดแรงตึงผิว ป้องกันการขีดข่วน ช่วยยืดอายุการใช้งานของยางได้



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์

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

2.3 เทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

เทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตหรือเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงเป็นเทคนิคที่ใช้สังเคราะห์เส้นใยนาโน โดยอาศัยพื้นฐานทางไฟฟ้าสถิต เป็นเทคนิคที่ใช้งานง่าย ไม่ซับซ้อน ราคาถูก มีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน ดังแสดงในภาพที่ 2.3 ได้แก่

(1) เครื่องควบคุมอัตราการไหลของสารละลายพร้อมหลอดบรรจุสารละลาย

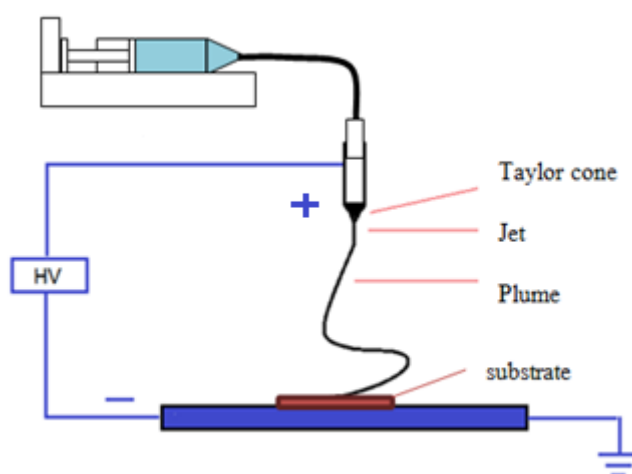
เครื่องควบคุมอัตราการไหลของสารละลายจะทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของสารละลาย ที่ออกจากหลอดบรรจุสารละลายให้คงที่ เพื่อทำให้เกิดการสังเคราะห์เส้นใยอย่างต่อเนื่อง สม่ำเสมอและมีประสิทธิภาพ และเกิดการควบคุมขนาดและปริมาณการเกิดเส้นใยได้

(2) เข็มโลหะ และแผ่นโลหะรองรับที่นำไฟฟ้า

เข็มโลหะจะใช้เป็นขั้วแอโนดของเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันและทำหน้าที่เป็นหัวฉีด ในระบบการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต สำหรับแผ่นโลหะรองรับที่นำไฟฟ้าจะใช้เป็นขั้วแคโทดของเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ทำหน้าที่รองรับเส้นใยนาโน และจัดเรียงเส้นใยให้มีรูปแบบต่างๆ เพื่อเหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป

(3) แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากำลังสูง

แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากำลังสูงทำหน้าที่จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงระดับกิโลโวลต์ให้แก่ระบบ การปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ทำให้เกิดความต่างศักย์และเกิดแรงทางไฟฟ้าระหว่างขั้วทั้งสองขึ้น ส่งผลให้เกิดการดึงสารละลายให้ยืดออกเป็นเส้นใยนาโน



ภาพที่ 2.3 การสังเคราะห์เส้นใยนาโนด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

สำหรับขั้นตอนการทำงานของการทำงานของการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต จะเริ่มจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากำลังสูงจ่าย ศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงให้แก่ระบบทำให้มีศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นไปเลยที่ปลายเข็มโลหะ ผิวของสารละลาย จะถูกดึงเนื่องจากแรงทางไฟฟ้า ส่งผลให้สารละลายที่ปลายเข็มโลหะเปลี่ยนรูปร่างจากครึ่งทรงกลม เป็นรูปกรวยที่เรียกว่า “กรวยของเทเลอร์” (Taylor’s Cone) และเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าจนถึงค่าหนึ่ง แรงทางไฟฟ้าสถิตจะมากกว่าแรงตึงผิวของสารละลาย ทำให้สารละลายพุ่งออกมาเป็นลำ (Jet) ออกจากปลายเข็มโลหะ ซึ่งถือว่าการเริ่มต้นการทำงานของการทำงานของการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ภายหลังจากที่ลำ ของสารละลายได้ยืดออกมาห่างจากจุดเริ่มต้นระยะหนึ่งจะพบว่าสารละลายถูกเหนี่ยวนำให้เกิดประจุ ที่ผิวของสารละลาย และด้วยสนามไฟฟ้าภายนอกที่เกิดจากความต่างศักย์ระหว่างปลายเข็มถึงวัสดุ รองรับ จึงส่งผลให้เกิดลำของประจุขึ้น ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าเป็นความไม่เสถียรของการบิดโค้ง (Bending Instability) แรงที่เกิดขึ้นจึงไม่สมดุล ทำให้ลำสารละลายยืดออกในเส้นทางที่ซับซ้อน ส่งผลให้เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลงอย่างมาก และยิ่งรอบของการบิดโค้งมีจำนวนมาก ขึ้นจะทำให้สารละลายยืดออกเป็นเส้นที่เล็กลงและเกิดการระเหยของตัวทำละลายมากขึ้น ในที่สุดจึง เกิดเป็นเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับนาโนเมตรตกลงบนวัสดุรองรับที่นำ

สำหรับการสังเคราะห์เส้นใยนาโนด้วยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต จะมีตัวแปรที่มีส่งผลต่อลักษณะ และขนาดของเส้นใยนาโน ได้แก่ ตัวแปรสารละลาย และตัวแปรระบบ เป็นต้น สำหรับตัวแปร สารละลายที่มีผลต่อเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้จากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ได้แก่

- (1) ความหนืดของสารละลาย (Solution Viscosity) จะส่งผลของลักษณะต่อเส้นใยนาโนคือ ถ้า สารละลายมีความหนืดน้อย โมเลกุลของตัวทำละลายที่ไม่ได้จับกับโมเลกุลของพอลิเมอร์ จะ มีความหนาแน่นมาก ส่งผลให้จับตัวกันเป็นก้อนทรงกลมคล้ายเม็ดปิตส์ ถ้าสารละลายมีความ หนืดมาก สารละลายจะเกิดการแห้งตัวอย่างรวดเร็วที่ปลายเข็มโลหะทำให้เข็มอุดตัน
- (2) ความเข้มข้นของสารละลาย (Solution Concentration) จะส่งผลของลักษณะต่อเส้นใยนา โนคือ ถ้าสารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้นจะได้เส้นใยที่มีปิตส์หรือหยดขนาดเล็กลดลง แต่ถ้า ความเข้มข้นของสารละลายมีค่ามากไปจะลดปรากฏการณ์การบิดโค้งที่ไม่มีเสถียรภาพ ส่งผล ให้เส้นทางการเคลื่อนที่ของสารละลายลดลงจะทำให้เส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้น
- (3) สภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity) จะส่งผลของลักษณะต่อเส้นใยนาโนคือ ถ้าสารละลายมี สภาพการนำไฟฟ้าดีจะทำให้การยืดออกเป็นเส้นใยของสารละลายดีขึ้นและลดการเกิดปิตส์

สำหรับตัวแปรระบบที่มีผลต่อเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้จากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ได้แก่

- (1) อัตราการไหลของสารละลาย (Flow Rate) จะมีผลของลักษณะต่อเส้นใยนาโนคือ ถ้าอัตราการไหลมีค่ามากจะทำให้เส้นใยและปัดส์มีขนาดใหญ่มากขึ้น
- (2) อุณหภูมิของสารละลาย (Temperature) จะมีผลของลักษณะต่อเส้นใยนาโนคือถ้าอุณหภูมิของสารละลายสูงจะเพิ่มอัตราการระเหยให้สูงขึ้น พอลิเมอร์ละลายในตัวทำละลายได้ดีขึ้น และสารละลายจะมีความหนืดน้อยลง ส่งผลให้สารละลายยืดออกได้ง่ายและทำให้ขนาดของเส้นใยนาโนเล็กลง
- (3) ระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ (Distance Between Tip And Collector) จะมีผลของลักษณะต่อเส้นใยนาโนคือ ถ้าระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงวัสดุรองรับมีค่ามากขึ้น เส้นใยจะมีขนาดเล็กกว่าเพราะลำของสารละลายมีเวลาในการยืดออกนานมากขึ้น
- (4) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มโลหะ (Diameter Of Needle) จะมีผลของลักษณะต่อเส้นใยนาโนคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มเล็กกว่า จะส่งผลให้ขนาดของเส้นใยเล็กกว่าเนื่องจากความตึงผิวของหยดสารละลายมากขึ้นทำให้ระยะเวลาที่เส้นใยยืดออกก่อนตกลงบนวัสดุรองรับมากขึ้น
- (5) แรงดันไฟฟ้า (Voltage) จะมีผลของลักษณะต่อเส้นใยนาโนคือ ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบมีค่าสูงขึ้น จะส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเล็กกว่า และทำให้ตัวทำละลายระเหยได้เร็วขึ้น

2.4 เครื่องมือวิเคราะห์

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก และเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่าลักษณะพื้นฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษา และกำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดาที่มีค่าต่ำ ใช้ดูวัตถุเล็กสุดประมาณ 0.2 ไมโครเมตร และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3,000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงมีความสามารถในการแยกดี เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้นเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมี

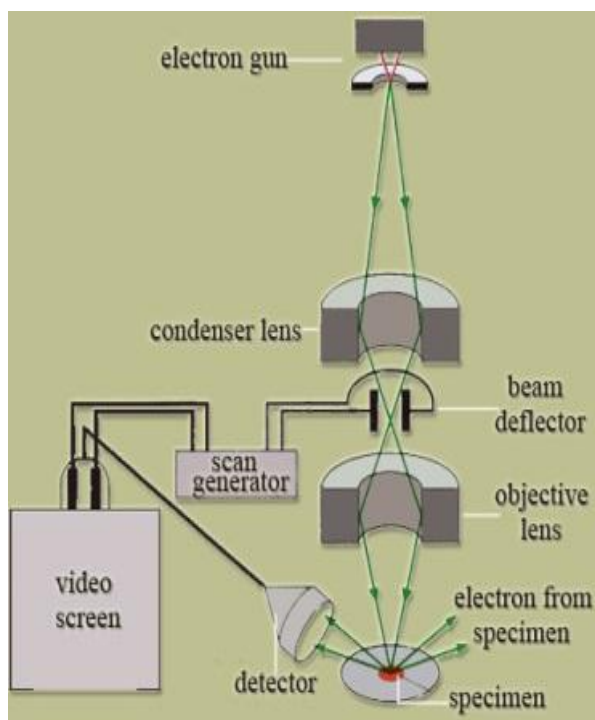
กำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 100,000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพ ซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 -100 μm อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น (Energy Dispersive Spectrometry, EDS) และ (Wavelength Dispersive Spectrometry, WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน ซึ่งภาพที่ 2.4 แสดงกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด



ภาพที่ 2.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(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

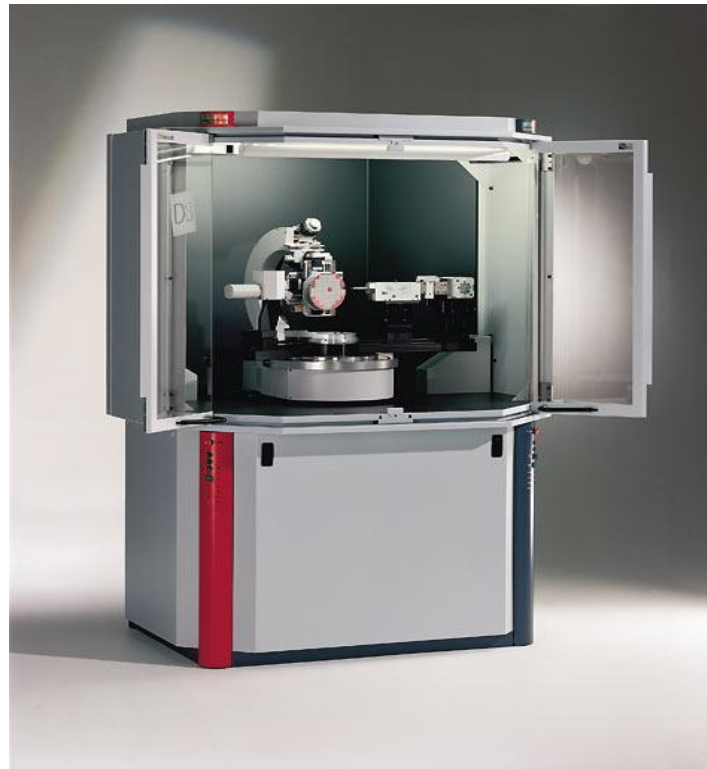


ภาพที่ 2.5 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

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

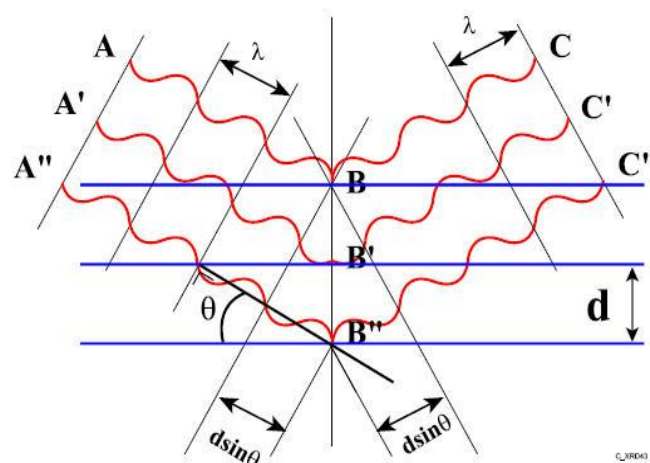
2. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction; XRD)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยไม่ทำลายชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 2.6 อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในตัวอย่าง ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิดจะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากัน รูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างแต่ละชนิดที่ออกมาจึงไม่เท่ากัน ทำให้ทราบได้ว่าในตัวอย่างนั้นๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณหาปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่าง คำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละหน่วยเซลล์ ความเครียดของตัวอย่าง ค่าความเป็นผลึกของตัวอย่างได้อีกด้วย การคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ยิงผ่านชั้นผลึกที่อยู่ในตัวอย่าง 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)

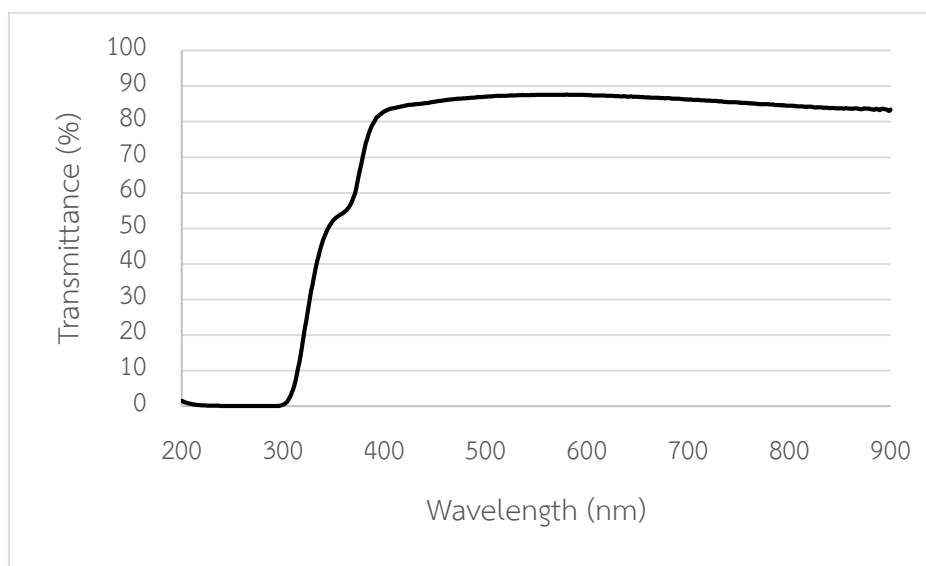


ภาพที่ 2.7 ระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของ Bragg's law

(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 ตัวอย่างสเปกตรัมการส่องผ่านแสงกับค่าความยาวคลื่น

4. เครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าบนพื้นผิววัสดุมีหลายวิธี ได้แก่ วิธีวัดโดยตรงหรือวิธีวัดแบบสองโพรบ วิธีวัดสองโพรบแบบจุด วิธีสี่โพรบแบบจุด เป็นต้น วิธีวัดแบบสองโพรบเป็นวิธีที่ใช้ปลาย โพรบกดทับสัมผัสพื้นผิววัสดุที่ใช้ทดสอบที่มีรูปแบบเป็นสี่เหลี่ยมหรือรูปทรงต่างๆ สำหรับวงจรและวิธีการวัด

แสดงในภาพที่ 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

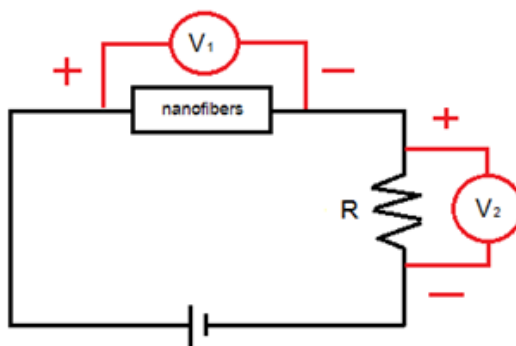
นำค่า (I) ที่ได้มาเขียนกราฟระหว่าง (I) กับ (V_1) โดยให้ (I) อยู่บนแกน X และให้ (V_1) อยู่บนแกน Y เพื่อหาค่าความชัน จากนั้นนำค่าความชันไปคำนวณหาค่าความต้านทานของเส้นใยนาโน (R_F) จากนั้นนำค่า R_F ที่ได้ไปคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจากสูตร

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

เมื่อ ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า

l คือ ช่องว่างระหว่างหัววัดไฟฟ้า

A คือ พื้นที่ของหัววัดไฟฟ้า



ภาพที่ 2.9 รูปแบบวิธีการวัดแบบสองโพรบ

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

บทนี้กล่าวถึงการศึกษาข้อมูลในภาพรวม สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย วัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์เส้นใย และเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง ตลอดจนขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ได้แก่ การเตรียมสารละลาย การเตรียมชิ้นงาน การปั่นเส้นใย และเงื่อนไขการทดลอง

3.1 การศึกษาข้อมูล

การศึกษาการสังเคราะห์เส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิต จะศึกษาหลักการทำงานของกระบวนการปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิต และศึกษาสมบัติของสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA ที่มีปริมาณของสาร $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ ที่แตกต่างกัน ดังต่อไปนี้ 0, 1, 3, 5 และ 7 g สำหรับปัจจัยในการสังเคราะห์และปั่นเส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์ที่มีผลต่อสมบัติของเส้นใยที่ศึกษาในงานวิจัยนี้มี 4 หัวข้อได้แก่ (1) ปริมาณของ $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA (2) ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง (3) ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ และ (4) อุณหภูมิในการอบเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้จะใช้เครื่อง SEM วิเคราะห์ลักษณะสัณฐาน เครื่อง XRD วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึก เครื่อง UV-Vis วิเคราะห์สมบัติทางแสง และเครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้า เป็นต้น

3.2 สารเคมี วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

1. สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย

1. ซิงค์อะซิเตท (Zinc Acetate, ZnAc) ($Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$, M.W.219.49)
2. พอลิไวน์ิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol, PVA)
3. อลูมิเนียมไนเตรต (Aluminium Nitrate, Nanohydrate) ($Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$, M.W. 375.13)
4. น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water) (type I)
5. เอทานอล (Ethanol)
6. อะซิโตน (Acetone)

2. วัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์เส้นใย

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),
Resistivity: $1-20 \times 10^{-2} \Omega\text{m}$)
12. แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminum Foil Plate)
13. แผ่นกระจก (Glass plate) (ขนาด $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$)

3. เครื่องมือวิเคราะห์

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

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์เส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิต ซึ่งมีขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยดังนี้

1. การเตรียมสารละลาย

การเตรียมสารละลายตั้งต้น เริ่มจากการละลาย PVA ปริมาณ 10 g ในบีกเกอร์ที่มีน้ำปราศจากไอออนซึ่งเป็นตัวทำละลายปริมาณ 100 ml กวนให้เข้ากันที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 3 H จากนั้นนำสาร ZnAc ปริมาณ 20 g เติมลงในสารละลาย PVA แล้วกวนที่อุณหภูมิ 60 °C ต่อเป็นเวลาอีก 2 H และขั้นตอนสุดท้ายนำ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ เติมลงไปตามปริมาณที่ต้องการแล้วกวนสารละลายให้เข้ากันที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลาอีก 2 H อีกครั้ง เมื่อกวนสารละลายทั้งหมดครบ 7 H แล้วจึงนำสารละลายตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 12 H ในการเตรียมสารละลายตั้งต้นจะเตรียมด้วยเงื่อนไขของปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้ 0, 1, 3, 5 และ 7 g

2. ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

ในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานจะตัดวัสดุรองรับแผ่นซิลิกอน แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ และกระจกขนาดประมาณ $1 \times 1 \text{ cm}^2$ สำหรับแผ่นซิลิกอน และกระจกจะนำไปล้างด้วยน้ำสะอาด จากนั้นล้างในเครื่องอัลตราโซนิก ด้วยอะซิโตน เอทานอล และน้ำ DI ตามลำดับซึ่งแต่ละการล้างจะใช้เวลา 15 min

3. ขั้นตอนการปั่นเส้นใย

เมื่อบรรจุสารละลายตั้งต้นในหลอดบรรจุสารละลาย และนำหลอดบรรจุสารละลายไปต่อเข้ากับท่อซิลิโคนที่มีเข็มโลหะอยู่อีกด้าน และนำหลอดบรรจุสารละลายไปติดตั้งกับเครื่องควบคุมอัตราการไหลของสารละลายและเปิดเครื่อง กำหนดค่าอัตราการไหลของสารละลายอยู่ที่ 0.1 ml/H ปรับฐานของแผ่นโลหะรองรับให้ได้ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับตามเงื่อนไขการทดลอง นำแผ่นซิลิกอน แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ และกระจกควอทซ์ที่เตรียมไว้มาวางบนแผ่นโลหะรองรับ นำเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงมาต่อที่ปลายเข็มโลหะและแผ่นโลหะรองรับ โดยขั้วแอโนดของเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงจะเชื่อมไว้ที่ปลายเข็ม และขั้วแคโทดของเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงจะเชื่อมไว้ที่แผ่นโลหะรองรับ จากนั้นจ่ายไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าตามเงื่อนไขการทดลอง ทำให้เกิดการปั่นเส้นใยตกลงไปที่ชิ้นงานเป็นเวลา 30 min จากนั้นนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิต่างๆ ตามเงื่อนไขการทดลอง เพื่อกำจัดพอลิเมอร์ เป็นเวลา 6 H

4. เงื่อนไขการทดลอง

เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองจะมีอยู่ 4 ตัวแปร คือ

(1) ปริมาณของ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA

ปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA ที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้ 0, 1, 3, 5 และ 7 g เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองเมื่อแปรค่าปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA

เงื่อนไข	รายละเอียด
ปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA	แปรค่า 0, 1, 3, 5 และ 7 g
ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง	20 kV
ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ	8 cm
อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ	550°C
อัตราการไหลของสารละลาย	0.1 mL/H
เวลาที่ใช้ในการปั่น	30 min
เวลาที่ใช้ในการอบ	6 H

(2) ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง

ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูงที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้ 18 20 22 และ 24 kV เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองเมื่อแปรค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง

เงื่อนไข	รายละเอียด
ปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA	3 g
ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง	แปรค่า 18 20 22 และ 24 kV
ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ	8 cm
อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ	550°C
อัตราการไหลของสารละลาย	0.1 mL/H
เวลาที่ใช้ในการปั่น	30 min
เวลาที่ใช้ในการอบ	6 H

(3) ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ

ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้ 8 9 10 11 และ 12 cm เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV และอุณหภูมิในการอบ 550°C ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองเมื่อแปรค่าระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ

เงื่อนไข	รายละเอียด
ปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA	3 g
ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง	20 kV
ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ	แปรค่า 8 9 10 11 และ 12 cm
อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ	550°C
อัตราการไหลของสารละลาย	0.1 mL/H
เวลาที่ใช้ในการปั่น	30 min
เวลาที่ใช้ในการอบ	6 H

(4) อุณหภูมิในการอบ

อุณหภูมิในการอบที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้ 400 450 500 550 และ 600°C เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองเมื่อแปรค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ

เงื่อนไข	รายละเอียด
ปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA	3 g
ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง	20 kV
ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ	8 cm
อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ	แปรค่า 400 450 500 550 และ 600°C
อัตราการไหลของสารละลาย	0.1 mL/H
เวลาที่ใช้ในการปั่น	30 min
เวลาที่ใช้ในการอบ	6 H

3.4 การวิเคราะห์ผล

เส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์สังเคราะห์ได้จะนำไปวิเคราะห์ดังนี้

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

บทที่ 4

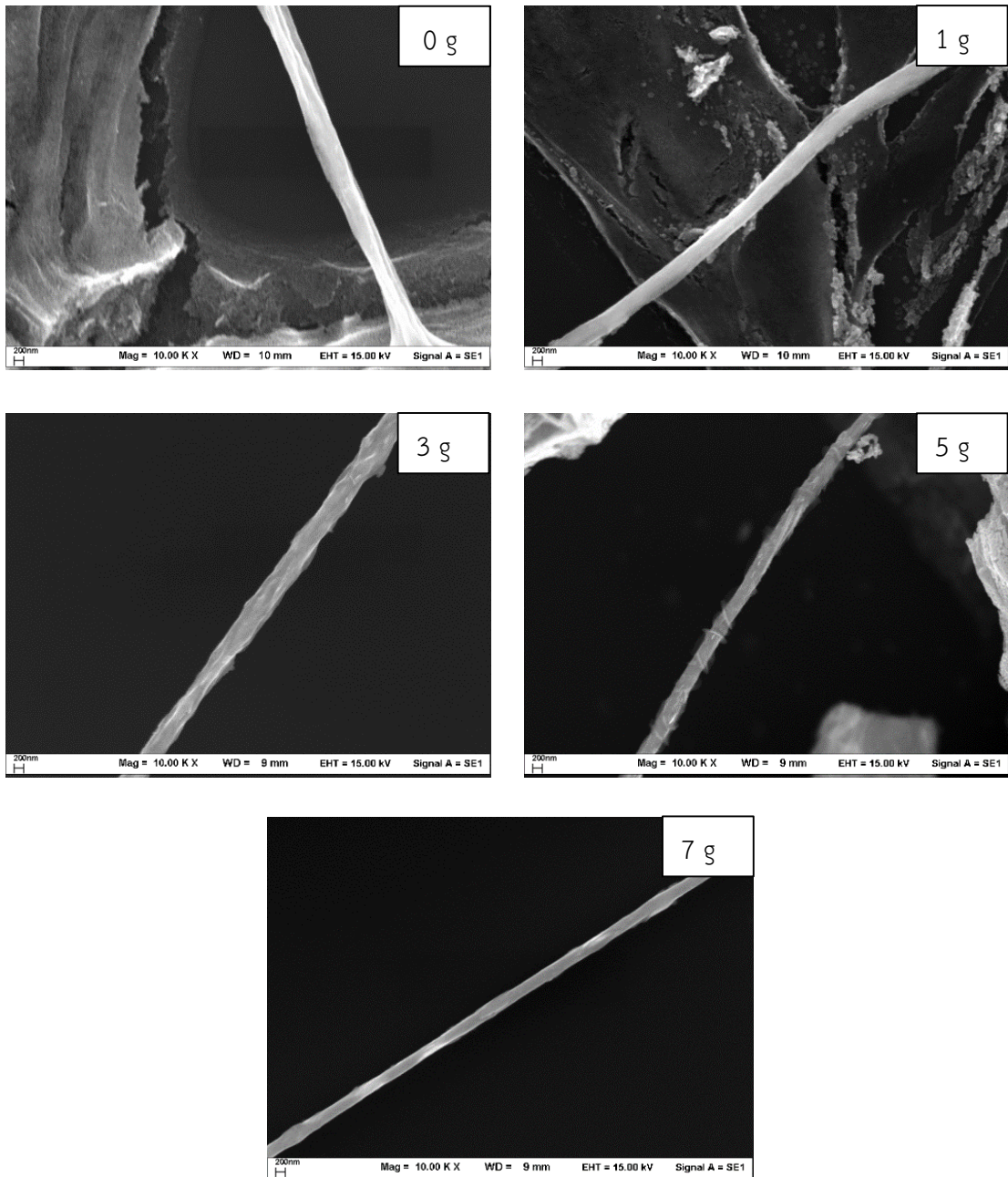
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ในบทนี้จะเสนอผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลองตามแนวทางวิธีการดำเนินงานวิจัยของบทที่ผ่านมา เส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิตจะนำไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานและลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง SEM และ XRD ตามลำดับ และวิเคราะห์สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง UV-Vis และเครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ตามลำดับ ผลของ (1) ปริมาณของ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA (2) ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง (3) ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ และ (4) อุณหภูมิในการอบ ที่มีต่อเส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์จะเสนอตามหัวข้อของการวิเคราะห์ข้างต้น ดังนี้

4.1. การวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของเส้นใยนาโน AZO ด้วยเครื่อง SEM

1. ปริมาณของ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA

ภาพที่ 4.1 แสดงภาพถ่าย SEM ของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ปริมาณของ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA แตกต่างกันคือ 0, 1, 3, 5 และ 7 g เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ปริมาณของ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 0, 1, 3, 5 และ 7 g มีขนาดประมาณ 500, 450, 425, 320 และ 250 nm ตามลำดับ แสดงว่า การเพิ่มปริมาณของ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA ทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์มีขนาดเล็กลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เป็นการเพิ่มการนำไฟฟ้าและความหนืดของสารละลายตั้งต้น ทำให้สารละลายยืดออกได้ยากขึ้น จึงทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดเล็กลง



ภาพที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่าของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ปริมาณของ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA แตกต่างกันคือ 0, 1, 3, 5 และ 7 g เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C

2. ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง

ภาพที่ 4.2 แสดงภาพถ่าย SEM ของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูงที่แตกต่างกันคือ 18 20 22 และ 24 kV เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูงเท่ากับ 18 20 22 และ 24 kV มีขนาดประมาณ 650, 425, 375 และ 200 nm ตามลำดับ แสดงว่า การเพิ่มค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง ทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์มีขนาดเล็กลง เนื่องจากการเพิ่มค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง เป็นการเพิ่มสนามไฟฟ้า ทำให้แรงไฟฟ้าชนะแรงตึงผิวของสารละลายได้ง่ายขึ้น ส่งผลทำให้เส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์ที่ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง

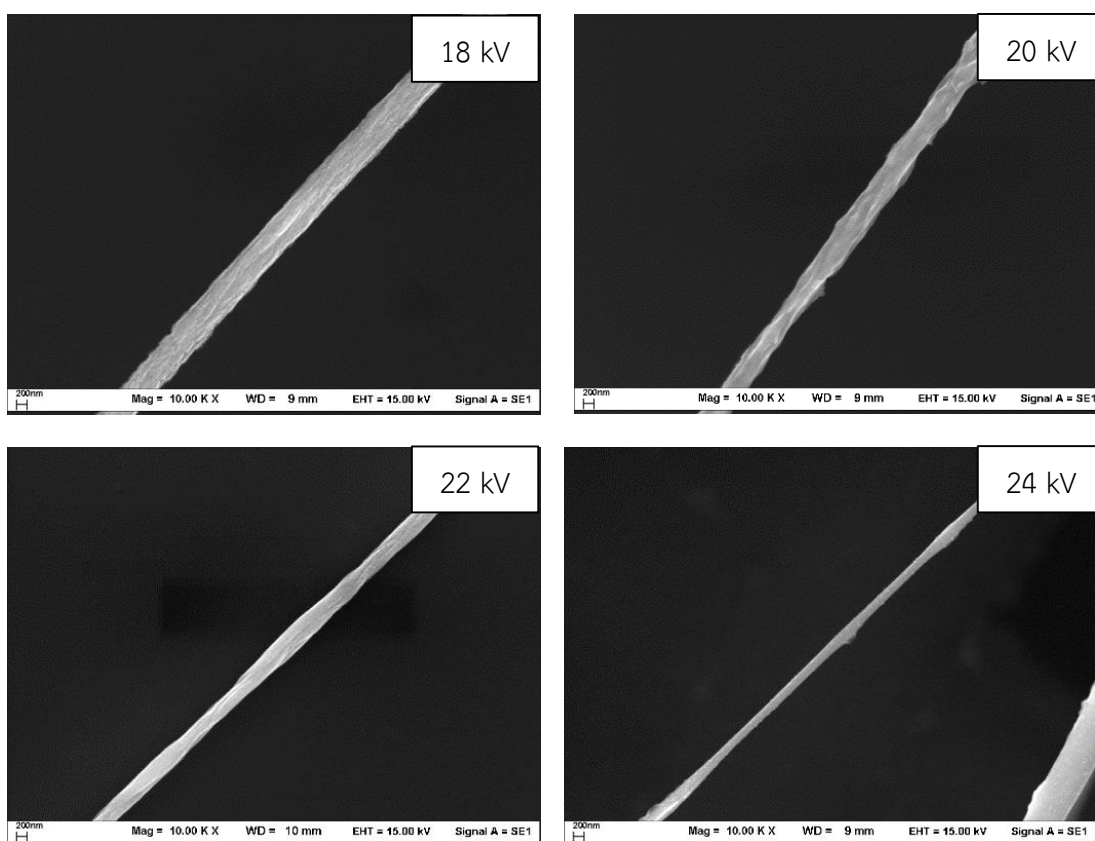
3. ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ

ภาพที่ 4.3 แสดงภาพถ่าย SEM ของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับแตกต่างกันคือ 8 9 10 11 และ 12 cm เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV และอุณหภูมิในการอบ 550°C พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับเท่ากับ 8 9 10 11 และ 12 cm มีขนาดประมาณ 425, 450, 400, 300 และ 150 nm ตามลำดับ แสดงว่าเมื่อระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับเพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์มีขนาดเล็กลง เนื่องจากเมื่อระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับมาก ลำของสารละลายมีเวลาในการยืดออกนานมากขึ้น จึงทำให้เส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง

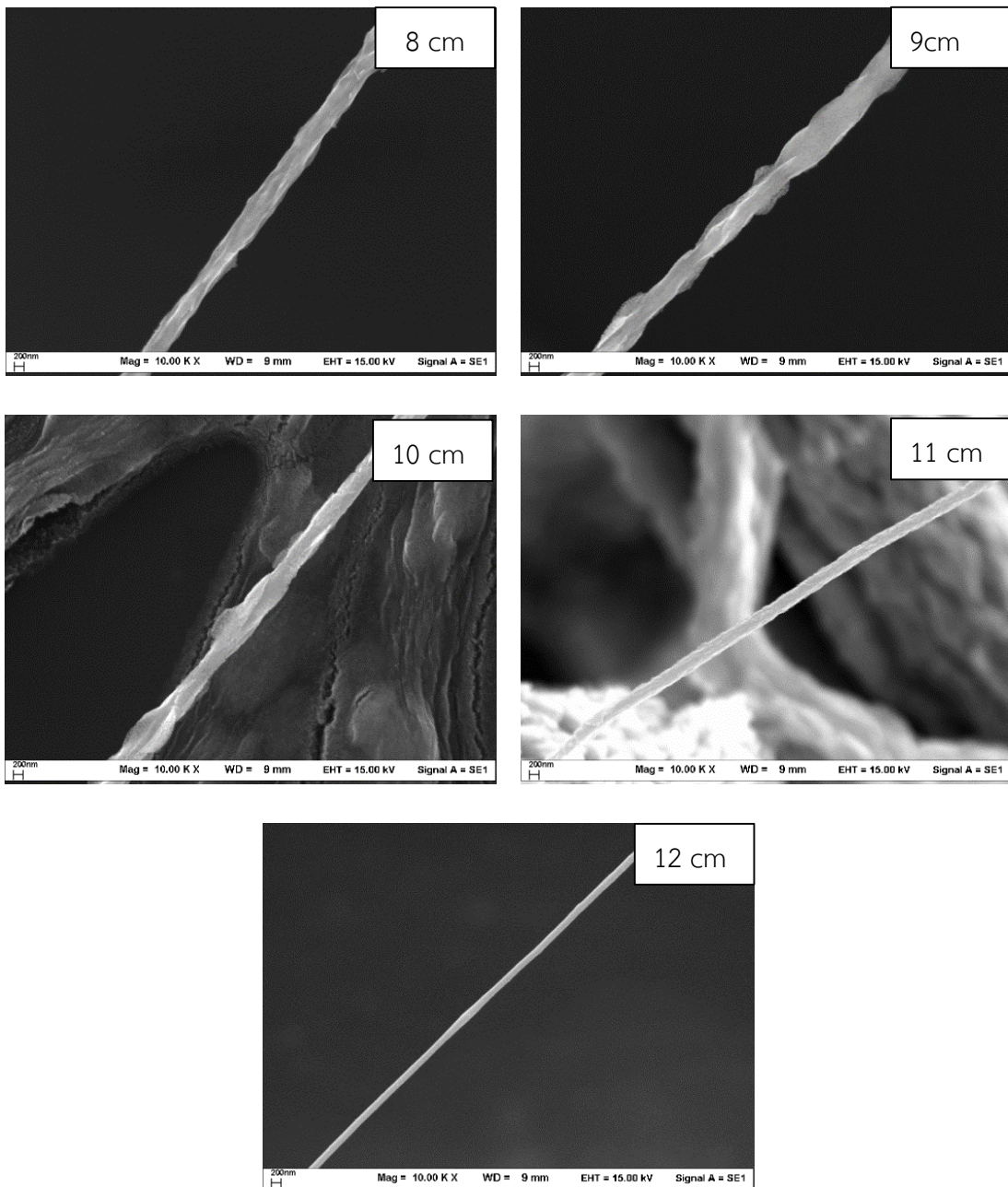
4. อุณหภูมิในการอบ

ภาพที่ 4.4 แสดงภาพถ่าย SEM ของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 400 450 500 550 และ 600°C เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ

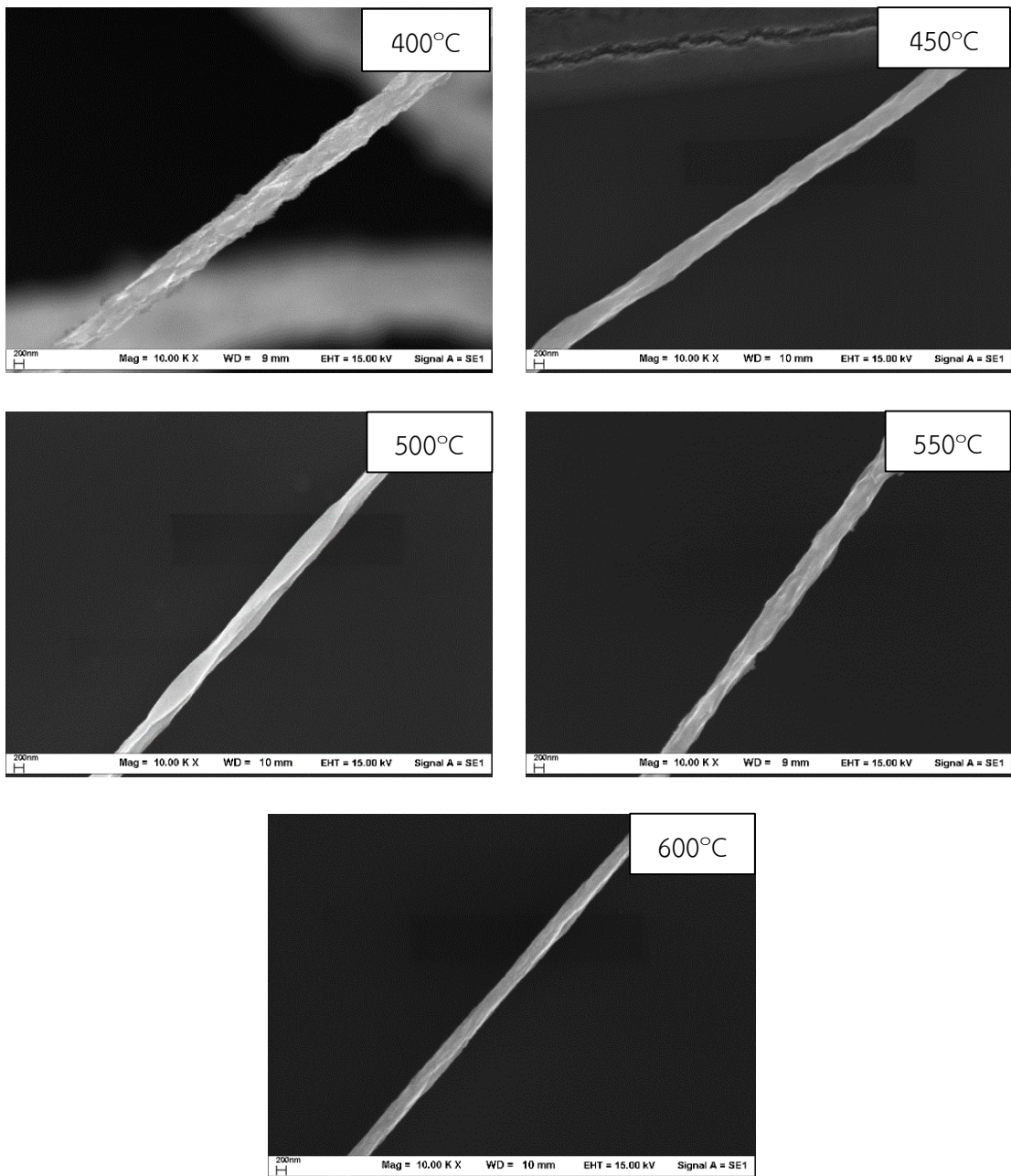
ในการอบเท่ากับ 400, 450, 500, 550 และ 600°C มีขนาดประมาณ 600, 475, 450, 425 และ 350 nm ตามลำดับ แสดงว่า การเพิ่มอุณหภูมิในการอบเส้นใยจะทำให้เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง เนื่องจากการอบเป็นการกำจัดพอลิเมอร์ การเพิ่มอุณหภูมิในการอบขึ้นจะทำให้เกิดการกำจัดพอลิเมอร์ในเส้นใยได้ดีขึ้นจึงทำให้เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงนั่นเอง



ภาพที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่าของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูงแตกต่างกันคือ 18 20 22 และ 24 kV เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C



ภาพที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่าของเส้นโยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับแตกต่างกันคือ 8 9 10 11 และ 12 cm เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV และอุณหภูมิในการอบ 550°C

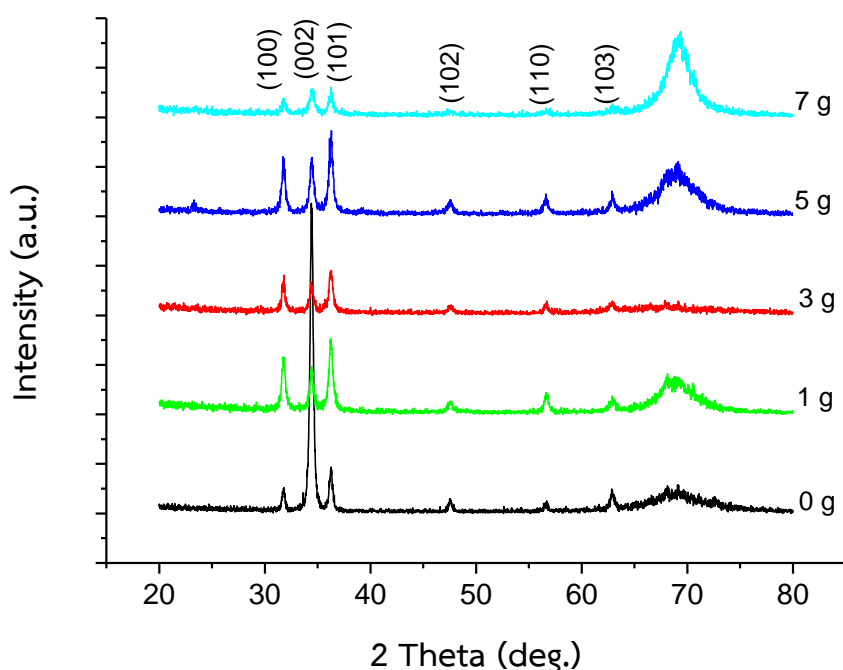


ภาพที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่าของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 400 450 500 550 และ 600°C เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm

4.2. การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของเส้นใยนาโน AZO ด้วยเครื่อง XRD

1. ปริมาณของ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA

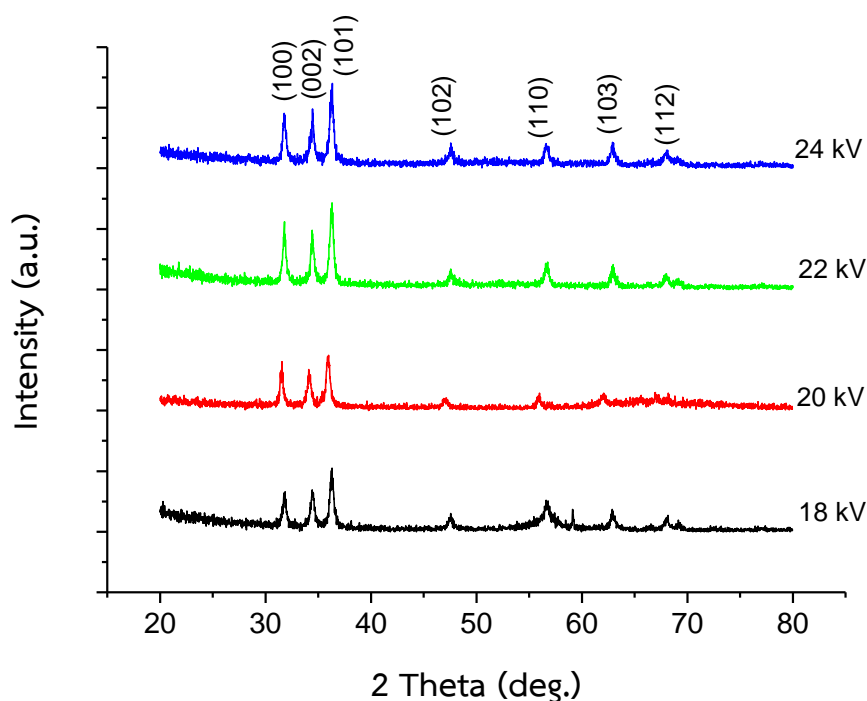
ภาพที่ 4.5 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ปริมาณของ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA แตกต่างกันคือ 0, 1, 3, 5 และ 7 g เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C ซึ่งพบพีคที่มุม 2θ ประมาณ 31.77 34.38 36.15 47.50 56.54 และ 62.88 องศา เมื่อนำไปเทียบกับค่ามาตรฐาน JCPDS เลขที่ 36-1451 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) พบว่าตรงกับพีคของ ZnO ที่ระนาบ (100) (002) (101) (102) (110) และ (103) ตามลำดับ พีคทุกระนาบมีลักษณะแบบเดียวกันคือฐานพีคไม่กว้างยอดพีคมีปลายแหลม



ภาพที่ 4.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ปริมาณของ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA แตกต่างกัน คือ 0, 1, 3, 5 และ 7 g เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C

2. ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง

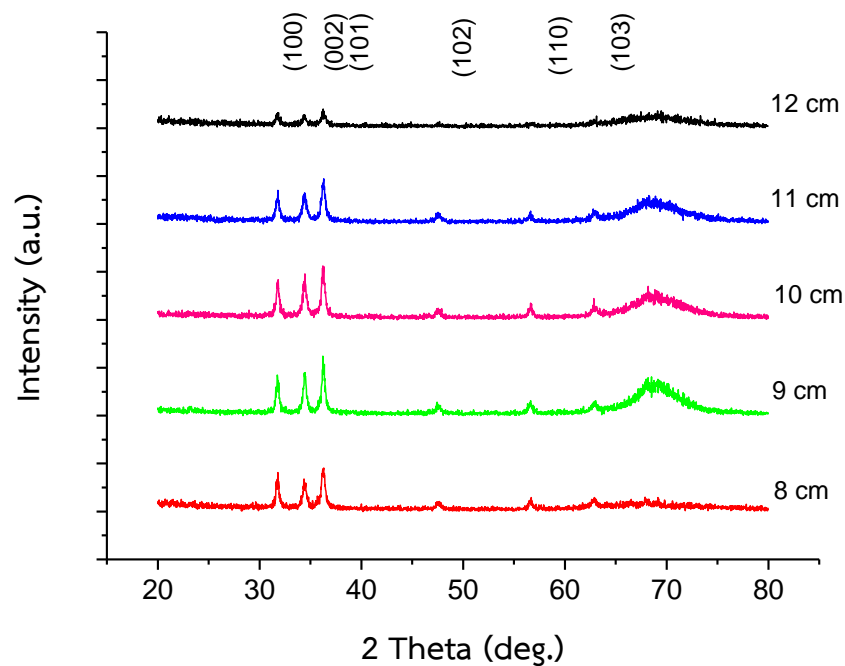
ภาพที่ 4.6 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูงที่แตกต่างกันคือ 18 20 22 และ 24 kV เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C ซึ่งพบพีคที่มุม 2θ ประมาณ 31.77 34.38 36.15 47.50 56.54 62.88 และ 67.98 องศา เมื่อนำไปเทียบกับค่ามาตรฐาน JCPDS เลขที่ 36-1451 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) พบว่าตรงกับพีคของ ZnO ที่ระนาบ (100) (002) (101) (102) (110) (103) และ (112) ตามลำดับ พีคทุกระนาบมีลักษณะแบบเดียวกันคือฐานพีคไม่กว้างยอดพีคมีปลายแหลม



ภาพที่ 4.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูงที่แตกต่างกันคือ 18 20 22 และ 24 kV เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C

3. ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ

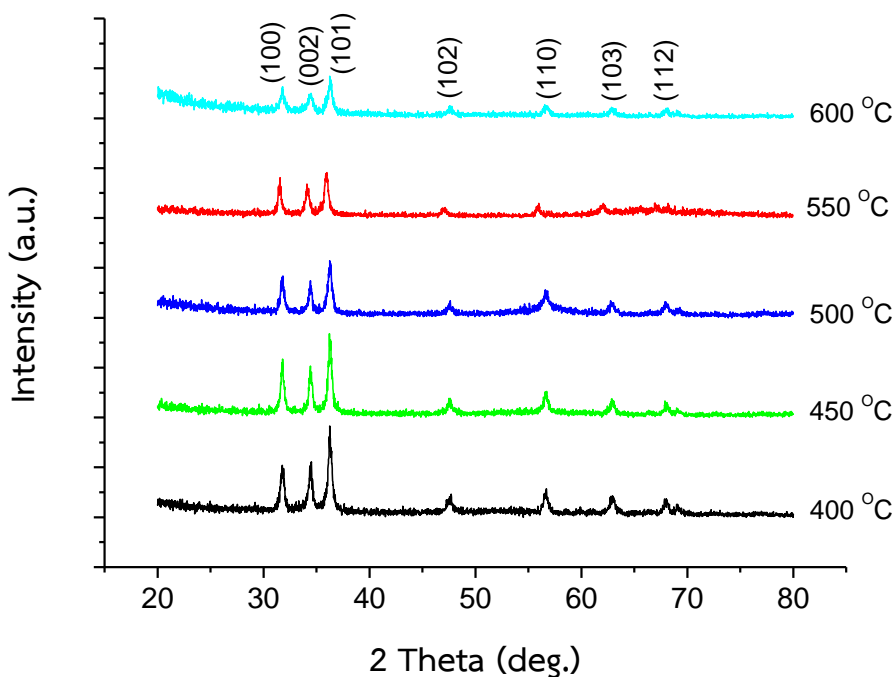
ภาพที่ 4.7 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับแตกต่างกันคือ 8 9 10 11 และ 12 cm เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV และอุณหภูมิในการอบ 550°C ซึ่งพบพีคที่มุม 2θ ประมาณ 31.77 34.38 36.15 47.50 56.54 และ 62.88 องศา เมื่อนำไปเทียบกับค่ามาตรฐาน JCPDS เลขที่ 36-1451 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) พบว่าตรงกับพีคของ ZnO ที่ระนาบ (100) (002) (101) (102) (110) และ (103) ตามลำดับ พีคทุกระนาบมีลักษณะแบบเดียวกันคือฐานพีคไม่กว้างยอดพีคมีปลายแหลม



ภาพที่ 4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับแตกต่างกันคือ 8 9 10 11 และ 12 cm เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV และอุณหภูมิในการอบ 550°C

4. อุณหภูมิการอบ

ภาพที่ 4.8 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 400 450 500 550 และ 600°C เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm ซึ่งพบพีคที่มุม 2θ ประมาณ 31.77 34.38 36.15 47.50 56.54 62.88 และ 67.98 องศา เมื่อนำไปเทียบกับค่ามาตรฐาน JCPDS เลขที่ 36-1451 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) พบว่าตรงกับพีคของ ZnO ที่ระนาบ (100) (002) (101) (102) (110) (103) และ (112) ตามลำดับ พีคทุกระนาบมีลักษณะแบบเดียวกันคือฐานพีคไม่กว้างยอดพีคมีปลายแหลม



ภาพที่ 4.8 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 400 450 500 550 และ 600°C เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm

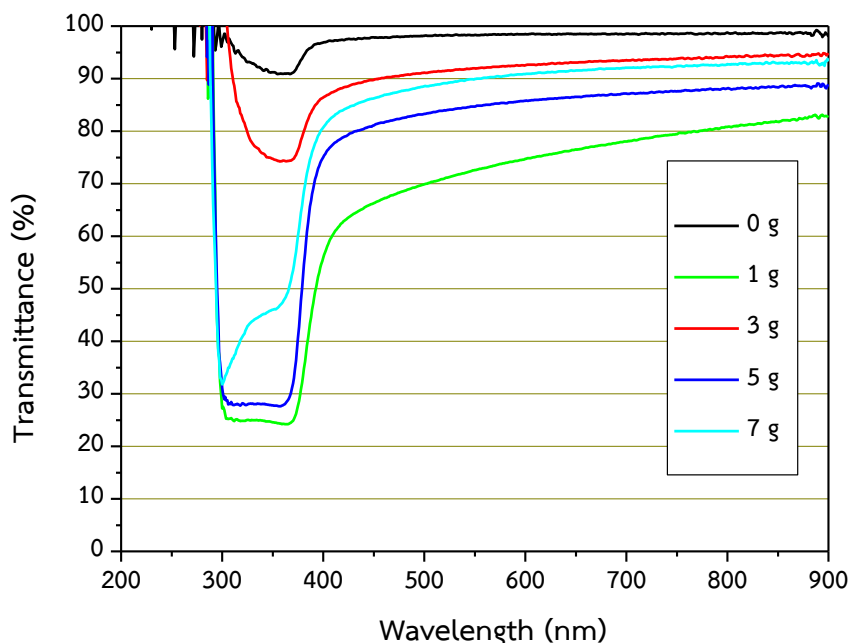
4.3. การวิเคราะห์สมบัติทางแสงของเส้นใยนาโน AZO ด้วยเครื่อง UV-Vis

1. ปริมาณของ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA

ภาพที่ 4.9 แสดงสเปกตรัมการส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 200-900 นาโนเมตรของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ปริมาณของ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA แตกต่างกัน คือ 0, 1, 3, 5 และ 7 g เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C พบว่าตัวอย่างทุกเงื่อนไขมีการส่องผ่านในช่วงแสงสีขาวย และที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร สูงกว่าร้อยละ 70 จากข้อมูลการส่องผ่านของแสงนี้สามารถไปคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานซึ่งพบว่า ช่องว่างแถบพลังงานอยู่ในช่วง 3.14-3.23 eV โดยผลสเปกตรัมการส่องผ่านแสง (%) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และค่าช่องว่างแถบพลังงานของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ปริมาณของ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA แตกต่างกัน คือ 0, 1, 3, 5 และ 7 g เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าสเปกตรัมการส่องผ่านแสง (%) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และค่าช่องว่างแถบพลังงานของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ปริมาณของ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA แตกต่างกันคือ 0, 1, 3, 5 และ 7 g เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C

ปริมาณของ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (g)	สเปกตรัมการส่องผ่านแสง (%) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร	ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (eV)
0	98.30	3.19
1	72.58	3.14
3	91.95	3.15
5	84.70	3.22
7	89.93	3.23

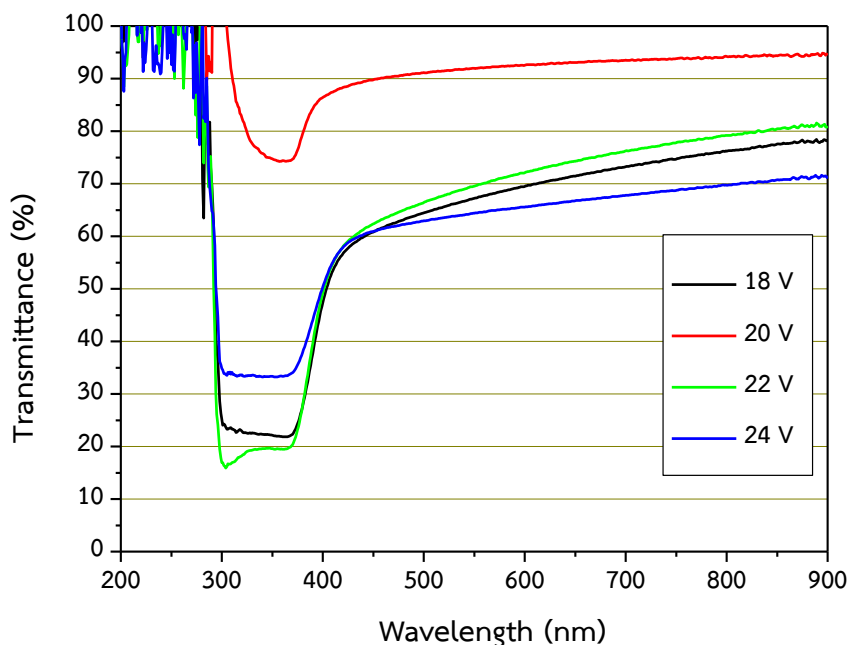


ภาพที่ 4.9 สเปกตรัมการส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 200-900 นาโนเมตรของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ปริมาณของ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA แตกต่างกันคือ 0, 1, 3, 5 และ 7 g เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C

2. ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง

ภาพที่ 4.10 แสดงสเปกตรัมการส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 200-900 นาโนเมตรของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูงที่แตกต่างกันคือ 18 20 22 และ 24 kV เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C พบว่าตัวอย่างทุกเงื่อนไขมีการส่องผ่านในช่วงแสงสีขาวย และที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร สูงกว่าร้อยละ 60 จากข้อมูลการส่องผ่านของแสงนี้สามารถไปคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานซึ่งพบว่า ช่องว่างแถบพลังงานอยู่ในช่วง 3.02-3.16 eV โดยผลสเปกตรัมการส่องผ่านแสง (%) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และค่าช่องว่างแถบพลังงานของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูงที่แตกต่างกันคือ 18 20 22 และ 24 kV เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g

ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C แสดงในตารางที่ 4.2



ภาพที่ 4.10 สเปกตรัมการส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 200-900 นาโนเมตรของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูงที่แตกต่างกันคือ 18 20 22 และ 24 kV เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C

ตารางที่ 4.2 ค่าสเปกตรัมการส่องผ่านแสง (%) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และค่าช่องว่างแถบพลังงานของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูงที่แตกต่างกันคือ 18 20 22 และ 24 kV เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C

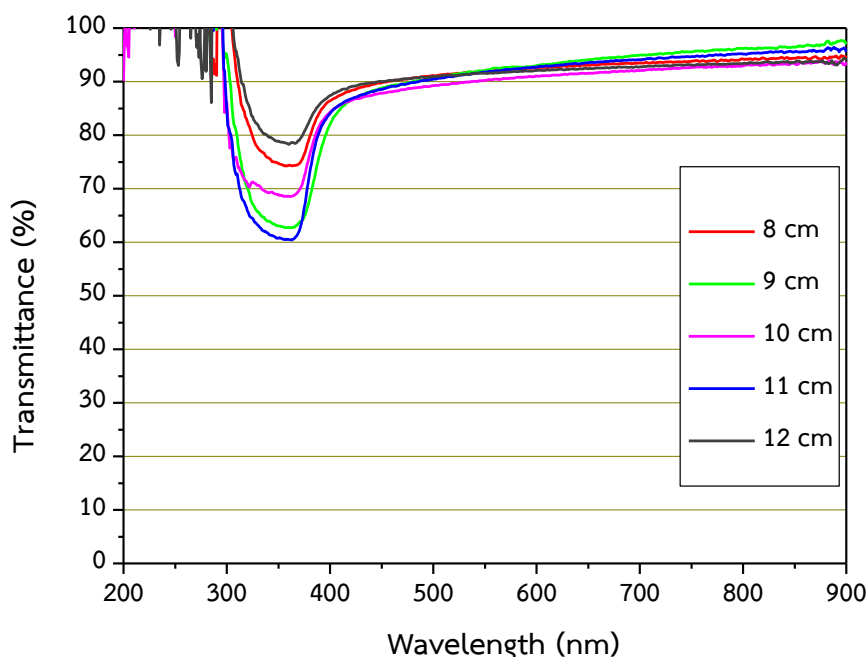
ความต่างศักย์ไฟฟ้า (kV)	สเปกตรัมการส่องผ่านแสง (%) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร	ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (eV)
18	67.25	3.08
20	91.95	3.15
22	69.55	3.16
24	64.39	3.02

3. ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ

ภาพที่ 4.11 แสดงสเปกตรัมการส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 200-900 นาโนเมตรของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับแตกต่างกันคือ 8 9 10 11 และ 12 cm เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV และอุณหภูมิในการอบ 550 °C พบว่าตัวอย่างทุกเงื่อนไขมีการส่องผ่านในช่วงแสงสีขาวยาว และที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร สูงกว่าร้อยละ 90 จากข้อมูลการส่องผ่านของแสงนี้สามารถไปคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานซึ่งพบว่า ช่องว่างแถบพลังงานอยู่ในช่วง 3.13-3.21 eV โดยผลสเปกตรัมการส่องผ่านแสง (%) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และค่าช่องว่างแถบพลังงานของ เส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับแตกต่างกันคือ 8 9 10 11 และ 12 cm เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV และอุณหภูมิในการอบ 550 °C แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าสเปกตรัมการส่องผ่านแสง (%) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และค่าช่องว่างแถบพลังงานของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับแตกต่างกันคือ 8 9 10 11 และ 12 cm เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV และอุณหภูมิในการอบ 550 °C

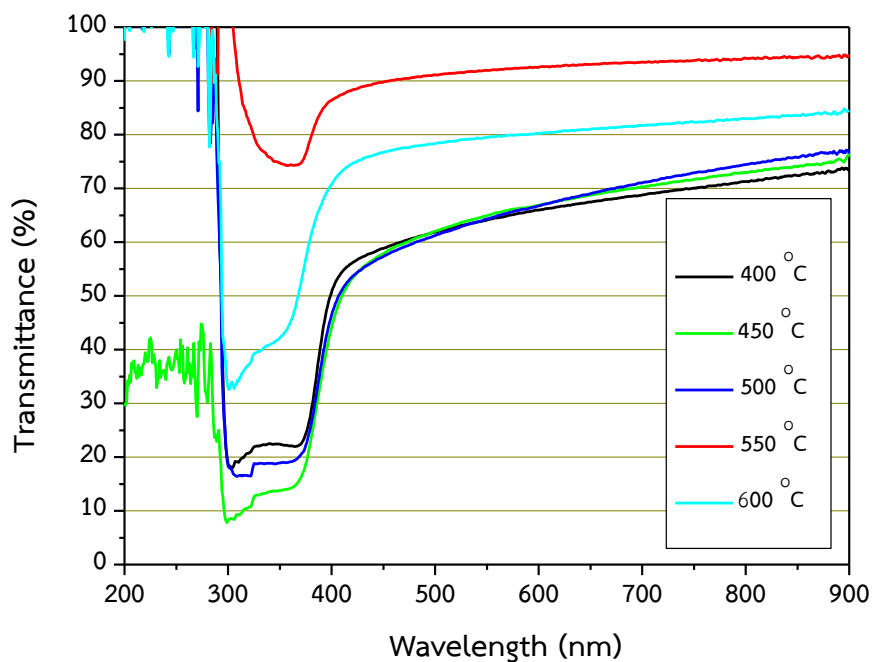
ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ (cm)	สเปกตรัมการส่องผ่านแสง (%) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร	ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (eV)
8	91.95	3.15
9	92.09	3.16
10	90.23	3.16
11	91.75	3.21
12	91.55	3.13



ภาพที่ 4.11 สเปกตรัมการส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 200-900 นาโนเมตรของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับแตกต่างกันคือ 8 9 10 11 และ 12 cm เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV และอุณหภูมิในการอบ 550 °C

4. อุณหภูมิในการอบ

ภาพที่ 4.12 แสดงสเปกตรัมการส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 200-900 นาโนเมตรของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 400 450 500 550 และ 600 °C เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm พบว่าตัวอย่างทุกเงื่อนไขมีการส่องผ่านในช่วงแสงสีขาวย และที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร สูงกว่าร้อยละ 60 จากข้อมูลการส่องผ่านของแสงนี้สามารถไปคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานซึ่งพบว่า ช่องว่างแถบพลังงานอยู่ในช่วง 3.10-3.19 eV โดยผลสเปกตรัมการส่องผ่านแสง (%) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และค่าช่องว่างแถบพลังงานของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 400 450 500 550 และ 600 °C เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm แสดงในตารางที่ 4.4



ภาพที่ 4.12 สเปกตรัมการส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 200-900 นาโนเมตรของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 400 450 500 550 และ 600 °C เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm

ตารางที่ 4.4 ค่าสเปกตรัมการส่องผ่านแสง (%) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และค่าช่องว่างแถบพลังงานของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 400 450 500 550 และ 600 °C เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm

อุณหภูมิในการอบ (°C)	สเปกตรัมการส่องผ่านแสง (%) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร	ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (eV)
400	64.10	3.10
450	64.93	3.14
500	64.31	3.14
550	91.95	3.15
600	79.50	3.19

4.4. การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของเส้นใยนาโน AZO ด้วยเครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

1. ปริมาณของ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ปริมาณของ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA แตกต่างกันคือ 0, 1, 3, 5 และ 7 g เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C ผลปรากฏว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน AZO ที่มีค่าน้อยที่สุดคือ เส้นใยนาโน AZO ที่มีปริมาณของ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA 1 g และเมื่อเพิ่มปริมาณของ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ มากกว่า 1 g พบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.5 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ปริมาณของ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA แตกต่างกันคือ 0, 1, 3, 5 และ 7 g เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C

ปริมาณของ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (g)	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Ωm)
0	1.74×10^{-4}
1	1.52×10^{-4}
3	1.60×10^{-4}
5	1.66×10^{-4}
7	1.98×10^{-4}

2. ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูงที่แตกต่างกันคือ 18 20 22 และ 24 kV เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C ผลปรากฏว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน AZO ที่มีค่าน้อยที่สุดคือ เส้นใยนาโน AZO ที่มีความต่างศักย์ 20 kV และเมื่อเพิ่มค่าความต่างศักย์มากกว่า 20 kV พบว่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.6 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูงที่แตกต่างกันคือ 18 20 22 และ 24 kV เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C

ความต่างศักย์ไฟฟ้า (kV)	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Ωm)
18	1.65×10^{-4}
20	1.60×10^{-4}
22	1.62×10^{-4}
24	1.72×10^{-4}

3. ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับแตกต่างกันคือ 8 9 10 11 และ 12 cm เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV และอุณหภูมิในการอบ 550°C ผลปรากฏว่าเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับที่จะทำให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน AZO มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และจะมีค่าลดลงที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับเท่ากับ 12 cm

4. อุณหภูมิในการอบ

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 450 500 550 และ 600°C เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm ผลปรากฏว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบจะทำให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน AZO มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.7 ตารางค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน AZO ที่สังเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับแตกต่างกันคือ 8 9 10 11 และ 12 cm เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV และอุณหภูมิในการอบ 550°C

ระยะห่าง (cm)	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Ωm)
8	1.60×10^{-4}
9	1.65×10^{-4}
10	1.64×10^{-4}
11	1.68×10^{-4}
12	1.55×10^{-4}

ตารางที่ 4.8 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน โน AZO ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 400 450 500 550 และ 600°C เมื่อปริมาณ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เท่ากับ 3 g ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ 8 cm

อุณหภูมิ ($^\circ\text{C}$)	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Ωm)
400	1.50×10^{-4}
450	1.55×10^{-4}
500	1.57×10^{-4}
550	1.60×10^{-4}
600	1.59×10^{-4}

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

จากการศึกษาการสังเคราะห์เส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์ ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิตจะนำไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานและลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง SEM และ XRD ตามลำดับ และวิเคราะห์สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง UV-Vis และเครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าตามลำดับ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การเจืออลูมิเนียมในเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ ด้วยการใส่สาร $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA และนำไปปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิตพบว่า ขนาดของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมที่สังเคราะห์ได้ทั้งหมดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยอลูมิเนียม เนื่องจากการเจืออลูมิเนียมจะเป็นการเพิ่มปริมาณของ Al^{3+} ในสารละลายตั้งต้น ส่งผลทำให้เพิ่มการนำไฟฟ้าและเพิ่มความหนืดของสารละลายตั้งต้น ดังนั้นสารละลายตั้งต้นจะยึดออกมาเป็นเส้นใยนาโนได้ยากขึ้น จึงทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดเล็กลง นอกจากนี้พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์ยังขึ้นกับเงื่อนไขการปั่นเส้นใย ได้แก่ ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ และ อุณหภูมิในการอบ เป็นต้น ทั้งนี้จะเห็นว่าผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ เช่น งานวิจัยของ Kondratiev และคณะวิจัย (Kondratiev *et al.*, 2007) งานวิจัยของ Sutanto และคณะวิจัย (Sutanto *et al.*, 2018) และงานวิจัยของ Lin และคณะวิจัย (Lin *et al.*, 2007) เป็นต้น

2. ลักษณะทางโครงสร้างผลึกของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียม จะพบพีคที่มีลักษณะฐานพีคไม่กว้าง ยอดพีคมีปลายแหลมที่มุม 2θ ประมาณ 31.77 34.38 36.15 47.50 56.54 62.88 และ 67.98 องศา เมื่อนำไปเทียบกับค่ามาตรฐาน JCPDS เลขที่ 36-1451 ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) พบว่าสอดคล้องกับพีคของ ZnO ที่ระนาบ (100) (002) (101) (102) (110) (103) และ (112) ตามลำดับ นั่นแสดงว่า โครงสร้างผลึกของเส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์จะปรากฏพีคที่มุม 2θ ใกล้เคียงกันกับโครงสร้างผลึกของเส้นใยนาโนซิงค์ออก

ไซด์ นอกจากนี้พบว่าค่าความเป็นผลึกยังขึ้นกับเงื่อนไขการปั่นเส้นใย ได้แก่ ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ และ อุณหภูมิในการอบ เป็นต้น ทั้งนี้จะเห็นว่าผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ เช่น งานวิจัยของ Sutanto และคณะวิจัย (Sutanto *et al.*, 2018) และงานวิจัยของ Lin และคณะวิจัย (Lin *et al.*, 2007) เป็นต้น

3. สมบัติทางแสงของเส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์ พบว่าการใส่สาร $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA ขนาด 1 และ 3 กรัม ส่งผลทำให้เส้นใยนาโนที่ได้มีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.14 และ 3.15 eV ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ไม่เจือด้วยอลูมิเนียมที่มีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.19 eV แต่หากเพิ่มปริมาณสาร $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA เป็น 5 และ 7 กรัม จะทำให้เส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์มีช่องว่างแถบพลังงานเพิ่มขึ้นตามปริมาณอลูมิเนียม และสูงกว่าเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ไม่เจือด้วยอลูมิเนียม นั้นแสดงว่าการเจืออลูมิเนียมปริมาณน้อยในเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์จะส่งผลให้เกิดการส่งผ่านอิเล็กทรอนิกส์ระหว่างชั้นแถบพลังงานได้ดีขึ้น หากเปรียบเทียบการส่งผ่านในช่วงแสงสีขาวยุค และที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ของเส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์ที่มีการเจือสาร $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA ขนาด 3 กรัม มีการส่งผ่านในช่วงแสงสีขาวยุคร้อยละ 91.95 ซึ่งสูงมากกว่าการเจือขนาด 1 กรัม ที่มีการส่งผ่านในช่วงแสงสีขาวยุคเพียงร้อยละ 72.58 นอกจากนี้ยังพบว่าร้อยละการส่งผ่านในช่วงแสงสีขาวยุค และค่าช่องว่างแถบพลังงานยังขึ้นกับเงื่อนไขการปั่นเส้นใย ได้แก่ ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ และ อุณหภูมิในการอบ เป็นต้น สำหรับเส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ในงานวิจัยนี้ พบว่ามีการส่งผ่านในช่วงแสงสีขาวยุค ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร อยู่ในช่วงร้อยละ 60-93 และมีค่าช่องว่างแถบพลังงานอยู่ในช่วง 3.02-3.23 eV ทั้งนี้จะเห็นว่าผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ เช่น งานวิจัยของ Kondratiev และคณะวิจัย (Kondratiev *et al.*, 2007) และงานวิจัยของ Sutanto และคณะวิจัย (Sutanto *et al.*, 2018) เป็นต้น

4. สมบัติทางไฟฟ้าแสงของเส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์ พบว่าการใส่สาร $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ ในสารละลายตั้งต้น ZnA:PVA ขนาด 1 กรัม จะทำให้เส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่าเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ไม่ได้เจืออลูมิเนียม หากมีการเจืออลูมิเนียมปริมาณ

เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าสูงขึ้น นั่นแสดงว่าการเจืออลูมิเนียมในปริมาณน้อยจะทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำลงได้ อย่างไรก็ตามสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์ยังขึ้นกับเงื่อนไขการปั่นเส้นใย ได้แก่ ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นโลหะรองรับ และ อุณหภูมิในการอบ เป็นต้น สำหรับเส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ในงานวิจัยนี้ พบว่ามีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ในช่วง 1.50×10^{-4} - $1.98 \times 10^{-4} \Omega$ ทั้งนี้จะเห็นว่าผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ เช่น งานวิจัยของ Lin และคณะวิจัย (Lin *et al.*, 2007) เป็นต้น

5.2 ข้อเสนอแนะ และประโยชน์ในทางประยุกต์ของผลการวิจัย

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการสังเคราะห์เส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิตจะทำให้ได้เส้นใยนาโนที่มีมิติต่ำ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตร มีค่าการส่องผ่านแสงสูง และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำกว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ ดังนั้นหากนำเส้นใยนาโนอลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์ไปประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์ก็น่าจะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ดีขึ้นได้ อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษา และพัฒนาต่อยอดต่อไป

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., Martín, 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.

- 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.
- Kondratiev, V. I., Kink, I., Romanov, A. E. & Dolgov, L. (2016). Transparent films from aluminum-doped zinc oxide fibers prepared by electrospinning method. *Materials Physics and Mechanics*, 27, 133-141.
- Kurecic, M. (2013). Electrospinning: nanofibre production method, *Tekstilec*, 56(1), 4-12.
- Lin, D., Pan, W. & Wu, H. (2007). Morphological Control of Centimeter Long Aluminum-Doped Zinc Oxide Nanofibers Prepared by Electrospinning. *Journal of the American ceramic society*, 90(1), 71-76.
- Mauro, A. D., Zimbone, M., Fragala, M. E., & Impellizzeri, G. (2016). Synthesis of ZnO nanofibers by the electrospinning process. *Materials Science in semiconductor Processing*, 42, 98-101.
- 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.
- Sutanto, B, Arifin, Z. & Suyitno (2018). Structural characterisation and optical properties of aluminum-doped zinc oxide nanofibers synthesized by electrospinning. *Journal of Engineering Science and Technology*, 13(3), 715-724.
- 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.