

สมบัติทางโครงสร้างและไฟฟ้าของเส้นใยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปั่นด้วยวิธีการปั่นเส้นใย  
ด้วยไฟฟ้าสถิต

พรพิพัฒน์ บุญบาร์ตัน

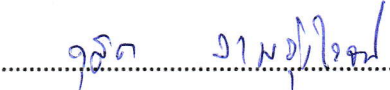
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์  
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา  
พฤศจิกายน 2560  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

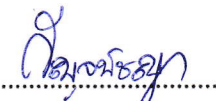
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการคุมสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา  
วิทยานิพนธ์ของ พรพิพัฒน์ บุญบาร์ตัน ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

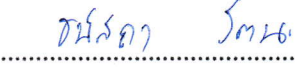
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

 .....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัญจน์ชญา หงส์เลิศคงสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


 .....ประธาน  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุสิต งามรุ่งโรจน์)

 .....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัญจน์ชญา หงส์เลิศคงสกุล)

 .....กรรมการ  
(ดร.ชนัสตา รัตนะ)

 .....กรรมการ  
(ดร.ศรัณย์ กิบาลชนม์)

คณะวิทยาศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยบูรพา

 .....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกรัตน์ ศรีสุข)

วันที่ 27 เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2560

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กัญจน์ชญา หงส์เลิศคงสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วนและเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

เนื่องจากการวิจัยครั้งนี้ส่วนหนึ่งได้รับการสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จึงขอขอบพระคุณ ณ ที่นี้ด้วย

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ให้กำลังใจ ส่งเสริม และสนับสนุนผู้วิจัยในทุก ๆ ด้าน รวมทั้งเพื่อน ๆ สาขาฟิสิกส์ทุกท่านที่ช่วยเหลือ เป็นกำลังใจและสร้างบรรยากาศทางวิชาการที่ดีตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูเวทิตาแด่ บุพการี บุรพจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้ที่มีการศึกษาและประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

พรพิพัฒน์ บุญบาร์ตัน

56910073: สาขาวิชา: ฟิสิกส์; วท.ม. (ฟิสิกส์)

คำสำคัญ: เส้นใยนาโน/ ชิงค์ออกไซด์/ การปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

พรพิพัฒน์ บุษบารัตน์: สมบัติทางโครงสร้างและไฟฟ้าของเส้นใยนาโนชิงค์ออกไซด์ที่ปั่นด้วยวิธีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (STRUCTURAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF ZnO NANOFIBERS SPUN BY ELECTROSPINNING METHOD) คณะกรรมการควบคุม  
วิทยานิพนธ์: ศึกษานิพนธ์ฯ หงส์เลิศกมลกุล, วท.ด. 40 หน้า, ปี พ.ศ. 2560.

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติทางโครงสร้างและทางไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต เงื่อนไขในการวิจัยนี้คือ (1) อัตราส่วนของ ZnAc:PVA อยู่ในช่วง (2:2)–(6:2) (2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า อยู่ในช่วง 16-24 kV (3) ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ อยู่ในช่วง 12-15 cm และ (4) อุณหภูมิในการอบอยู่ในช่วง 450-600 °C เส้นใยนาโน ZnO จะถูกนำไปวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างด้วย SEM และ XRD และวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า จากการวิเคราะห์ด้วย SEM พบว่า ZnO ที่สังเคราะห์ได้มีความเป็นเส้นใยและมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร (120-560 nm) จากการวิเคราะห์ด้วย XRD จะพบพีค  $2\theta$  ที่  $31.5^\circ$   $34.5^\circ$  และ  $36.2^\circ$  ซึ่งสอดคล้องกับค่ามาตรฐาน JCPDS 36-1451 ของ ZnO ที่ระนาบ (100) (002) และ (101) ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า พบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO อยู่ในช่วง 113-186  $\Omega\text{m}$  สำหรับเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เส้นใยนาโน ZnO ที่สุดคือ อัตราส่วนของ ZnAc:PVA ที่ (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 20 kV อุณหภูมิที่ 550 °C และระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับที่ 15 cm เนื่องจากเป็นเส้นใยที่มีการแตกหักน้อย ไม่เกิดรูพรุน มีความเป็นผลึกที่สูงที่สุด และมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำที่สุด

56910073: MAJOR: PHYSICS; M.Sc. (PHYSICS)

KEYWORDS: NANOFIBERS/ ZINC OXIDE/ ELECTROSPINNING

PORNPIPAT BOOSABARAT: STRUCTURAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF ZnO NANOFIBERS SPUN BY ELECTROSPINNING METHOD. ADVISORY COMMITTEE: KANCHAYA HONGLERTKONGSKUL, D.Sc. 40 P. 2017.

This research studied the structural and electrical properties of ZnO nanofibers spun by electrospinning. The conditions of this research are (1) ZnAc:PVA ratio is in the range of (2:2)-(6:2) (2) voltage is in the range of 16-24 kV (3) spacing between needle tip and metal supporting plate is in the range of 12-15 cm and (4) temperature annealing is in the range of 450-600 °C. ZnO nanofibers were analyzed the structural properties by SEM and XRD and the electrical properties by electrical resistivity testers. SEM analysis showed that synthetic ZnO is fibrous with being in range of nanometer scale (120-560 nm). XRD analysis showed that  $2\theta$  peak at 31.5 ° 34.5 ° and 36.2 ° according to the standard JCPDS 36-1451 of ZnO peak plane (100) (002) and (101), respectively. Electrical resistivity testers analysis showed that resistivity is in the range of 113-186  $\Omega$ m. The optimal conditions is at (4:2) ZnAc:PVA ratio, 20 kV voltage, 550 °C annealing temperature, and 15 cm spacing between needle tip and metal supporting plate due to the fibers showed that the less cracked, non-porous, the highest crystallinity and lowest electrical resistivity.

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฅ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เส้นใยนาโน.....	4
2.2 การปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	4
2.3 ซิงค์ออกไซด์.....	7
2.4 เครื่องมือวิเคราะห์.....	7
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
3 วิธีการดำเนินงาน.....	14
3.1 การศึกษาข้อมูล.....	14
3.2 วัสดุอุปกรณ์.....	14
3.2 เครื่องมือวิเคราะห์.....	15
3.4 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	15
3.5 การวิเคราะห์.....	17

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
4	ผลและอภิปรายการวิจัย.....	18
	4.1 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของเส้นใยนาโน ZnO ด้วยเครื่อง SEM.....	18
	4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเส้นใยนาโน ZnO ด้วยเครื่อง XRD.....	23
	4.3 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ด้วยเครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า.....	27
5	สรุปผลการทดลอง.....	30
	5.1 สรุปผล.....	30
	5.2 ข้อเสนอแนะ.....	32
	บรรณานุกรม.....	33
	ภาคผนวก.....	35
	ประวัติผู้วิจัย.....	40

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	ผลของอัตราส่วน ZnAc:PVA.....	16
3.2	ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้า.....	16
3.3	ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ.....	17
3.4	ผลของระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ.....	17
4.1	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA แตกต่างกันคือ (2:2) (3:2) (4:2) (5:2) และ (6:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C .....	27
4.2	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกันคือ 16 18 20 22 และ 24 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C.....	28
4.3	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับที่ใช้แตกต่างกันคือ 12 13 14 และ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C.....	29
4.4	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 450 500 550 และ 600 °C.....	29



## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	เส้นใยนาโน ZnO ที่ได้จากเครื่อง SEM ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต.	4
2.2	การทำงานของเครื่องปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	5
2.3	โครงสร้างแบบเวทซ์ไซท์ของ ZnO .....	7
2.4	การกระเจิงของรังสีเอกซ์.....	8
2.5	หลักการทำงานของเครื่อง SEM.....	9
2.6	รูปแบบวิธีการวัดแบบสองโพรบ.....	12
4.1	ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่าของเส้นใยนาโน ZnAc:PVA ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA แตกต่างกันคือ (2:2) (3:2) (4:2) (5:2) และ (6:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C.....	19
4.2	ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่าของเส้นใยนาโน ZnAc:PVA ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกันคือ 16 18 20 22 และ 24 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C.....	20
4.3	ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่าของเส้นใยนาโน ZnAc:PVA ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับที่ใช้แตกต่างกันคือ 12 13 14 และ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C.....	21
4.4	ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่าของเส้นใยนาโน ZnAc:PVA ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 450 500 550 และ 600 °C.....	22

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.5	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA แตกต่างกันคือ (2:2) (3:2) (4:2) (5:2) และ (6:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C.....	23
4.6	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกันคือ 16 18 20 22 และ 24 kV ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C .....	24
4.7	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับที่ใช้แตกต่างกันคือ 12 13 14 และ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550°C .....	25
4.8	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 450 500 550 และ 600 °C .....	26

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันวัสดุนาโนถูกนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุปกรณ์ต่าง ๆ ทั้งทางด้าน เลเซอร์(laser) (Zhang et al., 2010) (Lai, Chen, Chang, Chou, & Lu, 2015) อุปกรณ์ตรวจจับ (sensors) (Zhoua, Hu, Yu, Pan, & Wang, 2015) (Santos et al., 2014) และ โซลาร์เซลล์ (solar cell) (Söderström et al., 2010) (Hu et al., 2010) เป็นต้น ส่วนใหญ่ในการทำโซลาร์เซลล์จะใช้วัสดุนาโนฟิล์มบางทำหน้าที่ในการรับอิเล็กตรอนซึ่งปริมาณอิเล็กตรอนที่รับได้ขึ้นกับพื้นที่ผิวสัมผัส แต่เนื่องจากฟิล์มบางมีพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยพื้นที่น้อย นักวิทยาศาสตร์จึงได้มีการพัฒนาวัสดุที่เป็นเส้นใยนาโนมาใช้ทดแทนฟิล์มบาง เนื่องจากลักษณะทางโครงสร้างของเส้นใยนาโนมีพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่สูง จึงทำให้มีการรับอิเล็กตรอนที่ดีกว่าฟิล์มบาง โดยทั่วไปโซลาร์เซลล์มักจะใช้ฟิล์มบางของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide;  $\text{TiO}_2$ ) เป็นชั้นที่ทำหน้าที่นำไฟฟ้าเนื่องจากการใช้ฟิล์มบางชนิดนี้จะทำให้ประสิทธิภาพของโซลาร์เซลล์ทำงานได้สูงขึ้นมากกว่า 10% แต่อย่างไรก็ตามไทเทเนียมเป็นสารที่มีราคาสูงจึงมีนักวิทยาศาสตร์พยายามนำสารอื่นมาใช้ในการผลิตแทน เพื่อที่จะลดต้นทุนในการผลิตให้ได้มากที่สุด ซึ่งสารที่สามารถนำมาใช้แทน  $\text{TiO}_2$  อย่างเช่น Zinc oxide ( $\text{ZnO}$ ) (Yang, Shao, Guan, Li, & Gong, 2004) (Apostolopoulou, Karageorgopoulos, Rapsomanikis, & Stathato, 2016) Tin dioxide ( $\text{SnO}_2$ ), Niobium pentoxide ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ) (Aegerter, Schmitt, & Guo, 2002) และ Strontium titanate ( $\text{SrTiO}_3$ ) (Husein, Putra, Aminullah, Syafutra, & Alatas, 2016) สาเหตุที่สารเหล่านี้สามารถนำมาใช้แทน  $\text{TiO}_2$  เพราะสารเหล่านี้เป็นสารที่มีแถบช่องว่างพลังงานที่ใกล้เคียงกับ  $\text{TiO}_2$  คือมีแถบช่องว่างพลังงานอยู่ที่ประมาณ 3.37 eV สำหรับสารที่น่าสนใจที่จะมาใช้แทนไทเทเนียมมากที่สุดคือ  $\text{ZnO}$  เนื่องจากเป็นสารที่มีราคาถูก ไม่เป็นพิษ มีความเสถียรและยังมีตำแหน่งของแถบช่องว่างพลังงานใกล้เคียงกับ  $\text{TiO}_2$  อีกด้วย

ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Mauro, Zimbone, Fragala, and Impellizzeri (2016) ได้ทำการสังเคราะห์เส้นใยนาโน  $\text{ZnO}$  โดยเงื่อนไขคือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ 18 kV และทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบที่มีต่อเส้นใยนาโน  $\text{ZnO}$  อุณหภูมิที่ใช้ในการอบของงานวิจัยนี้อยู่ในช่วง 350-650°C ผลจากการวิเคราะห์ด้วย SEM พบว่าเส้นใยนาโนที่ไม่ผ่านการอบมีขนาดเส้นใยประมาณ  $156 \pm 37$  nm และเมื่อนำเส้นใยไปอบที่ 550°C ผลปรากฏว่าเส้นใยมีขนาดเล็กลงอยู่ที่

ประมาณ  $48 \pm 10$  nm จากการวิเคราะห์ด้วย XRD จะพบพีค  $2\theta$  เท่ากับ  $31.5^\circ$   $34.5^\circ$  และ  $36.2^\circ$  ซึ่งสอดคล้องกับค่ามาตรฐาน JCPDS 36-1451 ของ ZnO ที่ระนาบ (100) (002) และ (101) ตามลำดับ ความเป็นผลึกจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการอบและจากการวิเคราะห์ UV-Vis สามารถหาค่าแถบช่องว่างพลังงานได้ประมาณ 3.2 eV งานวิจัยของ Imran, Haider, Ahmad, Mahmood, and Waheed (2017) ได้ทำการสังเคราะห์เส้นใยนาโน ZnO โดยมีเงื่อนไขที่ใช้คือระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ 25 kV โดยทำการศึกษาผลของอัตราส่วนความเข้มข้นของ ZnAc:PVA ในช่วง 5-15 wt.% ผลจากการวิเคราะห์ด้วย SEM พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยนาโน ที่สังเคราะห์ที่อัตราส่วนของ ZnAc:PVA เท่ากับ 5 wt.% และ 15 wt.% ที่ไม่ผ่านการอบอยู่ที่ 278 nm และ 423 nm ตามลำดับและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยนาโน ZnO ที่อัตราส่วนของ ZnAc:PVA เท่ากับ 5 wt.% และ 15 wt.% ที่ผ่านการอบอยู่ที่ 124 nm และ 197 nm ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ด้วย XRD จะพบพีค  $2\theta$  เท่ากับ  $31.5^\circ$   $34.5^\circ$  และ  $36.2^\circ$  ซึ่งสอดคล้องกับค่ามาตรฐาน JCPDS 36-1451 ของ ZnO ที่ระนาบ (100) (002) และ (101) ตามลำดับและพบว่าผลของอัตราส่วน ZnAc:PVA มีผลทำให้เส้นใยมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนเพิ่มขึ้น งานวิจัยของ Yang et al. (2004) ได้ทำการสังเคราะห์เส้นใยนาโน ZnO โดยมีเงื่อนไขที่ใช้คือความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ 15 kV อัตราส่วนของ ZnAc:PVA เท่ากับ 10 wt.% อุณหภูมิในการอบ  $700^\circ\text{C}$  ผลการวิเคราะห์ด้วย SEM พบว่าเส้นใยที่ได้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50-100 nm จากการวิเคราะห์ด้วย XRD จะพบพีค  $2\theta$  เท่ากับ  $31.5^\circ$   $34.5^\circ$  และ  $36.2^\circ$  ซึ่งสอดคล้องกับค่ามาตรฐาน JCPDS 36-1451 ของ ZnO ที่ระนาบ (100) (002) และ (101) ตามลำดับ

ดังนั้นงานวิจัยนี้สนใจที่จะสังเคราะห์เส้นใยนาโนของ ZnO ที่เตรียมด้วยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตโดยตัวแปรที่จะศึกษาคือ อัตราส่วนของ ZnAc:PVA ความต่างศักย์ไฟฟ้า อุณหภูมิในการอบและระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ โดยเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ได้จะนำไปวิเคราะห์โครงสร้างของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction: XRD) และวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistivity)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เตรียมเส้นใยนาโนของ ZnO ด้วยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต
2. ศึกษาสมบัติทางโครงสร้าง และสมบัติทางไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ที่ปั่นด้วยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

### 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบวิธีการเตรียมเส้นใยนาโน ZnO ด้วยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต
2. ทราบสมบัติทางโครงสร้างและสมบัติทางไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ที่ปั่นด้วยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

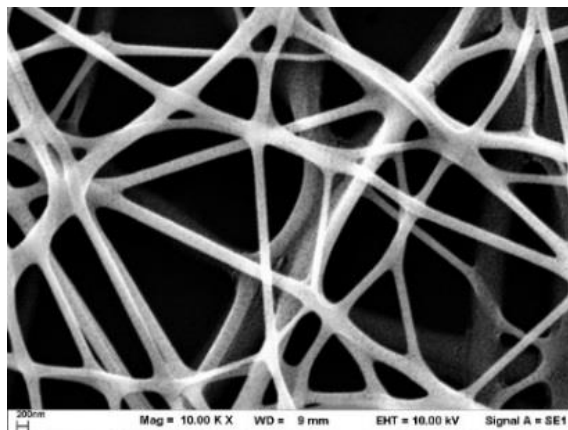
งานวิจัยนี้จะสังเคราะห์เส้นใยนาโน ZnO ด้วยวิธีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า ซึ่งมีตัวแปรที่ศึกษาอยู่ 4 ตัวแปรคือ อัตราส่วนระหว่าง ZnAc:PVA ความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ และ อุณหภูมิในการอบ แล้วนำเส้นใยที่ได้ไปวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างด้วย XRD และ SEM และวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 เส้นใยนาโน

เส้นใยนาโน (nanofibers) เป็นโครงสร้างนาโนของวัสดุสังเคราะห์ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยของของแข็งซ้อนทับกันอย่างไม่เป็นระเบียบและมีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร ดังภาพที่ 2.1 เส้นใยนาโนจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตรถึงหลายไมโครเมตร มีคุณสมบัติพิเศษคือมีพื้นที่สัมผัสต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่สูงจึงทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายด้าน เช่น ด้านการแพทย์ ด้านวัสดุศาสตร์ ด้านสิ่งแวดล้อมและเทคโนโลยีชีวภาพ ด้านวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และพลังงาน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ที่จะนำไปใช้งาน สำหรับวิธีที่นิยมนำมาใช้สังเคราะห์เส้นใยนาโนและมีประสิทธิภาพมากที่สุดคือวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต (ณัฐฐา ศักดิ์ศิลาพร และ รัชฎ์รัตน์ ท้าวสบาย, 2010)



ภาพที่ 2.1 เส้นใยนาโน ZnO ที่ได้จากเครื่อง SEM ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

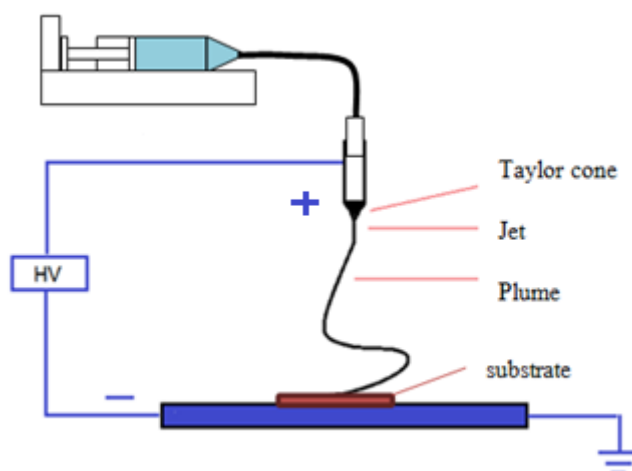
#### 2.2 การปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

การปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นเทคนิคที่ใช้สังเคราะห์เส้นใยนาโนซึ่งเป็นเทคนิคที่ง่ายและราคาถูกเนื่องจากสามารถสังเคราะห์เส้นใยในความดันบรรยากาศได้จึงไม่จำเป็นต้องสร้างระบบสุญญากาศ การปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจะมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 4 ส่วนได้แก่ หลอดบรรจุ

สารละลายที่ติดปลายเข็ม แผ่นโลหะรองรับ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากำลังสูง และเครื่องควบคุมอัตราการไหลของสารละลาย

### 2.2.1 กระบวนการเกิดเส้นใยด้วยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

เส้นใยนาโนจะเริ่มจากการให้สารละลายไหลผ่านเครื่องควบคุมอัตราการไหลของสารละลายและจ่ายศักย์ไฟฟ้าขั้วบวกให้กับปลายเข็มโลหะ และขั้วลบให้กับแผ่นรองรับทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นระหว่างปลายเข็มกับแผ่นรองรับ สนามไฟฟ้าจะทำให้หยดของสารละลายที่ติดอยู่ปลายเข็มยืดออก หยดของสารละลายที่ยืดออกนี้เรียกว่า “กรวยเทย์เลอร์” (Taylor’s cone) จากนั้นเมื่อมีเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้า จะทำให้กรวยเทย์เลอร์ยืดออกจนเป็นเส้นใยนาโนปั่นลงบนวัสดุรองรับแบบไร้อากาศและแห้งในที่สุดดังแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 การทำงานของการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

### 2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อเส้นใย

ปัจจัยที่มีผลต่อเส้นใยมีอยู่ 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่

#### 1. สารละลาย

1.1 ความหนืดของสารละลาย ถ้าสารละลายมีความหนืดน้อยจะทำให้สารละลายจับตัวกันเป็นก้อนทรงกลมลักษณะคล้ายเม็ดลูกปัด ที่เรียกว่า “บีตส์” (beats) ถ้าสารละลายมีความหนืดมากจะทำให้สารละลายยืดออกได้ดีขึ้นและลดการเกิดบีตส์ลง แต่ถ้าสารละลายมีความหนืดมากเกินไป สารละลายจะเกิดการแห้งตัวอย่างรวดเร็วที่ปลายเข็มโลหะทำให้เข็มอุดตันได้

1.2 ความเข้มข้นของสารละลาย ถ้าสารละลายมีความเข้มข้นสูง จะช่วยลดการเกิดบิตส์ แต่ถ้าสารละลายมีความเข้มข้นสูงเกินไป จะทำให้เส้นทางในการเคลื่อนที่ของสารละลายลดลง และขนาดของเส้นใยจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้น

1.3 สภาพนำไฟฟ้า ถ้าสารละลายมีสภาพนำไฟฟ้าที่ดีจะช่วยลดการเกิดบิตส์ และทำให้สารละลายยึดออกได้ดีขึ้น

1.4 ค่าไดอิเล็กตริก ถ้าสารละลายมีค่าไดอิเล็กตริกสูงจะช่วยลดการเกิดบิตส์ และทำให้ขนานเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจะลดลง

## 2. ระบบการปั่น

2.1 ความต่างศักย์ไฟฟ้า ถ้าความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูง จะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเล็กลง และมีส่วนทำให้ตัวทำละลายระเหยได้เร็วขึ้น

2.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มโลหะ ถ้าเข็มโลหะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก เส้นใยก็จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงด้วย แต่ถ้าเข็มโลหะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กเกินไป สารละลายอาจจะไม่ไหลออกมาได้

2.3 วัสดุรองรับ เนื่องจากกระบวนการการปั่นด้วยไฟฟ้าสติดเป็นกระบวนการที่อาศัยสนามไฟฟ้าระหว่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับ ดังนั้นวัสดุรองรับต้องมีสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า

2.4 อุณหภูมิของสารละลาย ถ้าสารละลายมีอุณหภูมิสูง สารละลายจะยึดออกได้ง่ายและเส้นใยจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง

2.5 อัตราการไหลของสารละลาย ถ้าอัตราการไหลมีค่าสูงจะทำให้เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่และเกิดบิตส์ขนาดใหญ่

2.6 ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นรองรับ ถ้าปลายเข็มกับแผ่นรองรับมีระยะห่างที่มากก็จะทำให้เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก แต่ในบางกรณีระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นรองรับมากก็อาจมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่เพิ่มขึ้นก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วย เช่น ถ้าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่ำและระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นรองรับมากจะทำให้เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มากและเกิดบิตส์ หรือความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงและระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นรองรับน้อยก็จะทำให้เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กและอาจทำให้สารละลายไหลออกมาไม่ทันเกิดการแห้งของสารละลาย ดังนั้นควรเลือกความต่างศักย์ไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นรองรับที่เหมาะสมกัน

## 3. สภาพแวดล้อม

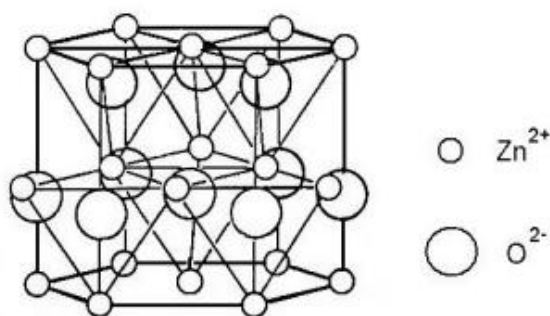
นอกจากสารละลายและระบบการปั่นแล้ว สภาพแวดล้อมก็มีผลต่อเส้นใยด้วยเหมือนกัน เช่น ความชื้น เมื่อความชื้นสูงจะเกิดปรากฏการณ์คล้ายกับการควบแน่นเป็นหยดน้ำบนผิวของ



เส้นใยทำให้ลักษณะของเส้นใยมีการเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะพอลิเมอร์ที่ละลายในตัวทำละลายที่ระเหยได้ ความชื้นสูงยังทำให้เกิดรูพรุนบนเส้นใยในปริมาณที่มากขึ้นและเส้นใยมีขนาดเพิ่มขึ้น (ณัฐฐา ศักดิ์ศิลาพร และธัญรัตน์ ท้าวสบาย, 2010)

## 2.3 ชิงค์ออกไซด์

ZnO เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) มีแถบช่องว่างพลังงาน 3.37 eV โครงสร้างผลึก ZnO เป็นแบบเฮกซะโกนอลโครสแพค (Hexagonal Closed Pack: hcp) ภายในโครงสร้างมีออกซิเจนไอออนแทรกอยู่กึ่งกลางระหว่างซิงค์ไอออนซึ่งทำพันธะกันแบบเตตระฮีดรอน (Tetrahedron) เรียกว่า เวิทซ์ไซต์ (Wurtzite) มีค่าคงที่ของผลึก  $a=3.24 \text{ \AA}$  และ  $c=5.19 \text{ \AA}$  ดังแสดงในภาพที่ 2.3 (นันทนัช วัฒนสุภิญโญ, 2010) มีมวลโมเลกุล 81.4084 g/mol มีสัดส่วนของน้ำหนักของซิงค์ต่อออกซิเจนประมาณ 66/34 ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 20 °C เท่ากับ 5.67526 g/cm<sup>3</sup> จุดหลอมเหลว 1975 °C จุดเดือด 2360 °C



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างแบบเวิทซ์ไซต์ของ ZnO (นันทนัช วัฒนสุภิญโญ, 2010)

## 2.4 เครื่องมือวิเคราะห์

### 2.4.1 เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จะใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยจะวัดค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่สะท้อนจากผลึก และอาศัยทฤษฎีของแบรกก์ (Bragg's Theory) ที่ได้เสนอแนวคิดไว้ว่าผลึกประกอบด้วยชั้น (Layer) หรือระนาบ (Plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมที่ตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้คลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่าง ๆ

ดังกล่าวจะมีความเข้มและแทรกสอดแบบเสริมกัน ถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดินของคลื่นที่อยู่ระนาบที่อยู่ข้างเคียงจะมีค่าเป็นจำนวนเท่าของคลื่นที่ตกกระทบดังสมการที่ (1)

$$n\lambda = 2d_{hkl}\sin\theta \quad (1)$$

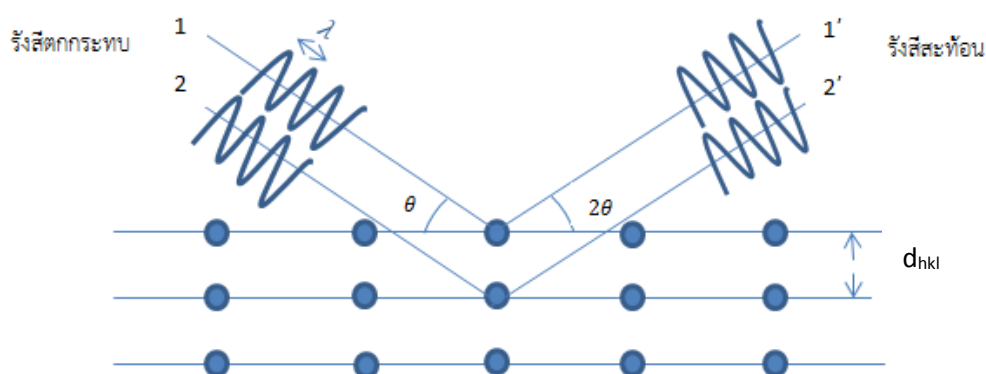
เมื่อ  $d_{hkl}$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ

$\theta$  คือ มุมสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอ็กซ์ซึ่งเท่ากับมุมตกกระทบ

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่น

$n$  คือ อันดับการเลี้ยวเบน ( $n = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$ )

ระนาบต่าง ๆ ของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่าระนาบแบรกก์ (Bragg's Plane) และมุมรังสีสะท้อนกับรังสีตกกระทบเรียกว่ามุมเลี้ยวเบน ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ  $2\theta$  แสดงดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 การกระเจิงของรังสีเอ็กซ์

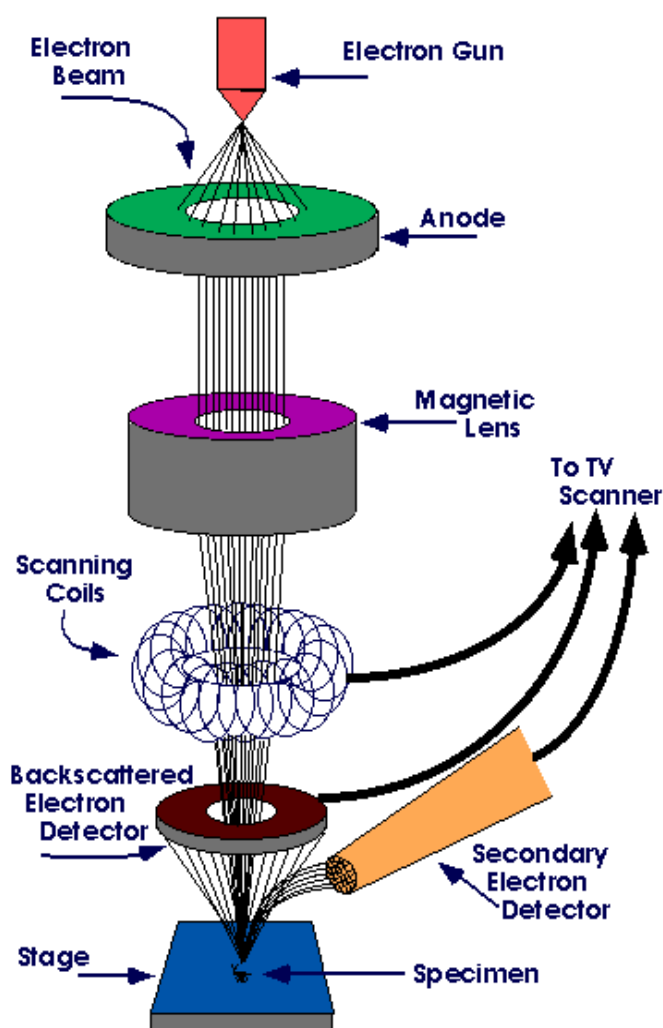
สัญญาณที่ตรวจจับได้จะแสดงออกมาในภาพแบบของการเลี้ยวเบนรังสี ความเข้มของสัญญาณขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกันเช่น โครงสร้างของวัสดุ ปริมาณของวัสดุที่แผ่รังสี รูปแบบของการหักเห การวางชิ้นงาน เป็นต้น

บางครั้งตำแหน่งของภาพแบบการเลี้ยวเบนที่วัดได้อาจจะเลื่อนไปด้วยค่ามุมที่สูงขึ้น เนื่องจากผลของความเค้นคงค้าง (Residual Stress) ในผิวของสารนั่นเอง ส่วนความเข้มของสัญญาณที่อาจไม่เป็นไปตามค่ามาตรฐาน JCPDS เพราะเกิดจากการเรียงตัวในทิศทางที่ชอบ

(Preferred Orientation) ของอะตอมในสสาร นอกจากนี้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ยังสามารถให้ข้อมูลที่บ่งบอกถึงส่วนผสมทางเคมีของเฟส (Phase Composition) และค่าพารามิเตอร์ของแลตทิซ (Lattice Parameter)

#### 2.4.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นเครื่องมือที่มีกำลังขยายมากกว่า 30,00 เท่า จนถึงมากกว่า 100,000 เท่า โดยแจกแจงความละเอียดของภาพเป็นไปได้ถึง 3 nm ใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา หรือ โครงสร้างจุลภาค เช่น ลักษณะพื้นผิว ภาพร่างและขนาดเกรน จึงเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 2.5 หลักการทำงานของเครื่อง SEM (อมรรัตน์ คำบุญ, 2551)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงในภาพที่ 2.5 มีหลักการทำงานโดยลำอิเล็กตรอนสแกนลงบนตัวอย่างที่บรรจุในภาชนะสุญญากาศ โดยลำอิเล็กตรอนนี้เกิดจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงที่สามารถปรับค่าได้ จากนั้นจึงถูกดึงคู่ลงสู่เบื้องล่างโดยแผ่นอาโนดภายใต้ภาวะความดันสุญญากาศ  $10^{-5}$  ถึง  $10^{-7}$  torr และมีชุดคอนเดนเซอร์เลนส์ที่จะปรับลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็กลง เพื่อเป็นการเพิ่มความเข้มของลำอิเล็กตรอน จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะวิ่งลงสู่เบื้องล่างผ่านเลนส์วัตถุ ซึ่งทำหน้าที่ในการปรับลำอิเล็กตรอนทุติยภูมิให้มีจุดโฟกัสบนผิวตัวอย่างพอดี และลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบผิววัตถุหรือตัวอย่างจะมีขนาดในช่วง 5 ถึง 200 nm โดยมีชุดควบคุมการส่องกราดของลำอิเล็กตรอนทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนบนพื้นผิวตัวอย่าง ขณะที่ลำอิเล็กตรอนกระทบผิวตัวอย่างจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนทุติยภูมิกับอะตอมของธาตุในวัตถุหรือตัวอย่างและเกิดการถ่ายโอนพลังงานที่ขึ้นความลึกจากพื้นผิวที่ระดับต่าง ๆ ทำให้เกิดการปลดปล่อยสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดต่าง ๆ ออกมา

การวิเคราะห์ SEM กรณีที่วัสดุไม่นำไฟฟ้าจะมีประจุลบเนื่องจากการสะสมอิเล็กตรอนบนผิวหน้าและไม่สามารถระบายออกได้ จึงทำให้เกิดประจุลบสะสมอยู่บนผิวหน้าประจุทำให้เกิดแรงผลักอิเล็กตรอนจากลำอิเล็กตรอนที่กวาดไปบนพื้นผิวทำให้ความคมชัดของภาพลดลง การขยายภาพหาได้จากอัตราส่วนของภาพบนจอมอนิเตอร์ต่อความยาวที่ถูกสแกนอาจมีค่าสูงถึงแสนเท่าสำหรับความคมชัดของภาพ แต่จะถูกจำกัดด้วยขนาดของลำอิเล็กตรอนที่ต้องโฟกัสให้เล็กที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งขนาดของลำอิเล็กตรอนก็จะถูกกำหนดด้วยการแผ่กระจายพลังงานของอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยด้วยความร้อนมีค่าประมาณ 8 nm ในกรณีที่มีความต้องการให้มีความคมชัดควรลดกระแสอิเล็กตรอนและความลึกของสนาม ขนาดของลำอิเล็กตรอนควรมีค่าประมาณ  $1 \mu\text{m}$  การเพิ่มเติมอุปกรณ์บางอย่างให้กับเครื่อง SEM จะทำให้ได้รับข้อมูลรายละเอียดเพิ่มขึ้นและหนึ่งในจำนวนเครื่องมือที่มีประโยชน์ก็คือเครื่องสเปกโตรสโคปีแบบแยกกระจายพลังงาน (Energy Dispersive Spectroscopy: EDX) สามารถใช้หาส่วนประกอบทางเคมีของผิวหน้าสาร โดยมักใช้ร่วมกับ SEM

ในทางปฏิบัติลักษณะการใช้งาน SEM อาจแบ่งได้ 4 กลุ่มหลัก ได้แก่

1 แบบโหมด High Resolution สำหรับงานที่ต้องการกำลังขยายสูง จึงต้องการจุดตกกระทบขนาดเล็ก

2 แบบโหมด High Depth สำหรับงานที่ต้องการความชัดลึกสูง จึงต้องการใช้มุมคอนเวอร์เจนต์ (Convergent) ของลำอิเล็กตรอนเล็ก ๆ

3 แบบโหมด High Current สำหรับการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีโดยใช้รังสีเอกซ์ ต้องการปริมาณกระแสมาก ๆ เพื่อเพิ่มความไวต่อการตรวจวัดปริมาณของธาตุ

4 แบบโหมด Low Voltage นอกเหนือไปจากการใช้งาน SEM ในแบบต่าง ๆ ข้างต้น ในปัจจุบัน SEM บางแบบยังสามารถวัดได้ดีที่ค่าต่ำกว่า 5 kV เนื่องจากใช้งาน SEM ลักษณะนี้จะได้พื้นผิวที่ดีขึ้น อีกทั้งยังลดปริมาณประจุสะสมบนผิว จึงสามารถศึกษาตัวอย่างที่ไม่นำไฟฟ้าโดยไม่ต้องเคลือบคาร์บอน

### 2.4.3 เครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่พื้นผิววัสดุมีหลายวิธี ได้แก่ วิธีวัดโดยตรงหรือวิธีวัดแบบสองโพรบ วิธีวัดสองโพรบแบบจุด วิธีสี่โพรบแบบจุด เป็นต้น วิธีวัดแบบสองโพรบเป็นวิธีที่ใช้ปลายโพรบกดทับสัมผัสพื้นผิววัสดุที่ใช้ทดสอบที่มีรูปแบบเป็นสี่เหลี่ยมหรือรูปทรงต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการวัดดังแสดงในภาพที่ 2.6 โดยจะจ่ายความถี่ให้กับตัวอย่าง จากนั้นวัดค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวอย่าง ( $V_1$ ) และความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทาน ( $V_2$ ) จากนั้นนำค่า ( $V_1$ ) และ ( $V_2$ ) มาคำนวณ โดยเริ่มจากการคำนวณหาค่ากระแส ( $I$ ) ที่ไหลผ่านตัวต้านทาน ( $R$ ) จากค่าของ ( $V_2$ ) จากสูตร

$$I = \frac{V_2}{R} \quad (2)$$

เมื่อ  $R$  คือ ความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานในวงจรระหว่างผิว

$I$  คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานในวงจร

จากนั้นนำค่า ( $I$ ) ที่ได้มาเขียนกราฟระหว่าง ( $I$ ) กับ ( $V_1$ ) โดยให้ ( $I$ ) อยู่บนแกน X และให้ ( $V_1$ ) อยู่บนแกน Y เพื่อหาค่าความชัน จากนั้นนำค่าความชันไปคำนวณหาค่าความต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ( $R_F$ )

จากนั้นนำค่า  $R_F$  ที่ได้ไปคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจากสูตร

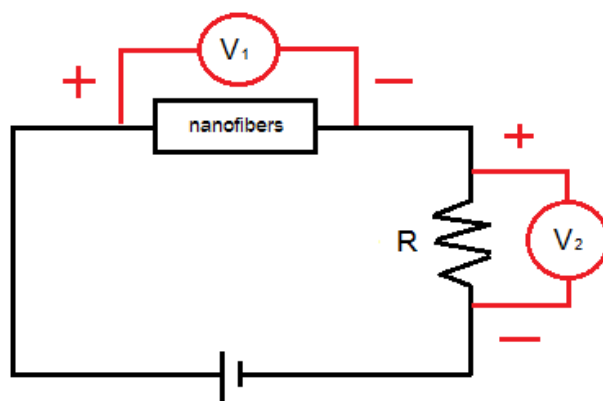
$$R_F = \frac{\rho l}{A} \quad (3)$$

เมื่อ  $R_F$  ความต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน

$\rho$  คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า

$l$  คือ ช่องว่างระหว่างหัววัดไฟฟ้า

$A$  คือ พื้นที่ของหัววัดไฟฟ้า



ภาพที่ 2.6 รูปแบบวิธีการวัดแบบสองโพรบ

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Mauro et al. (2016) ได้ทำการสังเคราะห์เส้นใยนาโน ZnO โดยเงื่อนไขคือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ 18 kV และทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบที่มีต่อเส้นใยนาโน ZnO ที่อุณหภูมิที่ใช้ในการอบของงานวิจัยนี้อยู่ในช่วง 350-650°C ผลจากการวิเคราะห์ด้วย SEM พบว่าเส้นใยนาโนที่ไม่ผ่านการอบมีขนาดเส้นใยประมาณ  $156 \pm 37$  nm และเมื่อนำเส้นใยไปอบที่ 550°C ผลปรากฏว่าเส้นใยมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงอยู่ที่ประมาณ  $48 \pm 10$  nm จากการวิเคราะห์ด้วย XRD จะพบพีค  $2\theta$  เท่ากับ  $31.5^\circ$   $34.5^\circ$  และ  $36.2^\circ$  ซึ่งสอดคล้องกับค่ามาตรฐาน JCPDS 36-1451 ของ ZnO ที่ระนาบ (100) (002) และ (101) ตามลำดับ ความเป็นผลึกจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ และจากการวิเคราะห์ UV-Vis สามารถหาค่าแถบช่องว่างพลังงานได้ประมาณ 3.2 eV

งานวิจัยของ Imran et al. (2017) ได้ทำการสังเคราะห์เส้นใยนาโน ZnO โดยมีเงื่อนไขที่ใช้คือระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับวัสดุโลหะรองรับ 15 cm ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ 25 kV โดยทำการศึกษาผลของอัตราส่วนความเข้มข้นของ ZnAc:PVA ในช่วง 5-15 wt.% ผลจากการวิเคราะห์ด้วย SEM พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ที่อัตราส่วนของ ZnAc:PVA เท่ากับ 5 wt.% และ 15 wt.% ที่ไม่ผ่านการอบอยู่ที่ 278 nm และ 423 nm ตามลำดับ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยนาโน ZnO ที่อัตราส่วนของ ZnAc:PVA เท่ากับ 5 wt.% และ 15 wt.% ที่ผ่านการอบอยู่ที่ 124 nm และ 197 nm ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ด้วย XRD จะพบพีค  $2\theta$  เท่ากับ  $31.5^\circ$ ,  $34.5^\circ$  และ  $36.2^\circ$  ซึ่งสอดคล้องกับค่ามาตรฐาน JCPDS 36-1451 ของ ZnO ที่ระนาบ (100) (002) และ (101) ตามลำดับ และพบว่าผลของอัตราส่วน ZnAc:PVA มีผลทำให้เส้นใยมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนเพิ่มขึ้น

งานวิจัยของ Yang et al. (2004) ได้ทำการสังเคราะห์เส้นใยนาโน ZnO เพื่อศึกษาลักษณะของเส้นใยนาโน ZnO โดยมีเงื่อนไขที่ใช้คือความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ 15 kV อัตราส่วนของ ZnAc:PAV คือ 10 wt.% อุณหภูมิในการอบ  $700^\circ\text{C}$  ผลปรากฏจากการวิเคราะห์ด้วย SEM เส้นใยที่ได้มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ 50-100 nm จากการวิเคราะห์ด้วย XRD จะพบพีค  $2\theta$  เท่ากับ  $31.5^\circ$ ,  $34.5^\circ$  และ  $36.2^\circ$  ซึ่งสอดคล้องกับค่ามาตรฐาน JCPDS 36-1451 ของ ZnO ที่ระนาบ (100) (002) และ (101) ตามลำดับ

งานวิจัยของ Ren et al. (2009) ได้ทำการสังเคราะห์เส้นใยนาโน ZnO เพื่อศึกษาลักษณะของเส้นใยนาโน ZnO โดยมีเงื่อนไขที่ใช้คือความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ 25 kV อัตราส่วนของ ZnAc:PAV คือ 6 wt.% อุณหภูมิในการอบ  $700^\circ\text{C}$  ผลปรากฏจากการวิเคราะห์ด้วย SEM เส้นใยที่ได้มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ 232 nm จากการวิเคราะห์ด้วย XRD จะพบพีค  $2\theta$  เท่ากับ  $31.5^\circ$ ,  $34.5^\circ$  และ  $36.2^\circ$  ซึ่งสอดคล้องกับค่ามาตรฐาน JCPDS 36-1451 ของ ZnO ที่ระนาบ (100) (002) และ (101) ตามลำดับ

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

#### 3.1 การศึกษาข้อมูล

การศึกษาข้อมูลมีอยู่ 3 เรื่องที่สำคัญคือ

1. การศึกษาเส้นใยนาโน จะศึกษาขนาด ลักษณะเส้นใย และการสังเคราะห์เส้นใย
2. การศึกษาเครื่องการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต จะศึกษาการใช้งาน ตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดเส้นใย รวมไปถึงการป้องกันไม่ให้เกิดอันตราย
3. การศึกษาสมบัติของเส้นใยนาโน ได้แก่ โครงสร้างของเส้นใยด้วย XRD และ SEM ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเส้นใยด้วยเครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

#### 3.2 วัสดุและอุปกรณ์

##### 3.2.1 สารเคมีที่ใช้

1. ซิงค์อะซิเตท (Zinc Acetate, ZnAc) ( $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , M.W. 219.49)
2. พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol, PVA)
3. น้ำกลั่น (Deionized Water) (type I)
4. เอทานอล (Ethanol)
5. อะซิโตน (Acetone)

##### 3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. บีกเกอร์ (Beaker) (ขนาด 250 ml)
2. เครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน (Hotplate Stirrer)
3. เครื่องควบคุมอัตราการไหล (Syringe Pump)
4. เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (DC Power Supply) (ขนาด 0-25 kV)
5. เข็มฉีดยา (Needle), (ขนาด 0.8x25 mm)
6. หลอดฉีดยา (Syringe), (ขนาด 20ml)
7. ท่อซิลิโคน (Silicone Tube)
8. แผ่นซิลิกอน (Silicon Plate) (Type: P, Orientation: (100), Resistivity:

$1 \sim 20 \times 10^{-2} \Omega\text{m}$ )



9. แผ่นโลหะรองรับ (Metal Plate)

10. เครื่องอัลตราโซนิค (Ultrasonic Cleaner)

### 3.3 เครื่องมือวิเคราะห์

1. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
3. เครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

### 3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

#### 3.4.1 การเตรียมสารละลาย

การเตรียมสารละลาย ZnAc:PVA เริ่มจากการละลาย PVA 5 g ในบีกเกอร์ที่มีน้ำกลั่นซึ่งเป็นตัวทำละลายปริมาณ 50 ml มีอุณหภูมิ 60 °C กวนเป็นเวลา 6 h จากนั้นนำ ZnAc เติมลงไปตามความเข้มข้นที่ต้องการแล้วกวนสารละลายให้เข้ากันที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 6 h อีกครั้ง ก็จะได้สารละลาย ZnAc:PVA ซึ่งในการเตรียมสารละลาย ZnAc:PVA จะเป็นการเตรียมในอัตราส่วน (2:2) (3:2) (4:2) (5:2) และ (6:2) โดยมวล ตัวอย่างเช่นกรณีของ ZnAc:PVA (6:2) จะใช้ ZnAc 30 g และ PVA 5 g

#### 3.4.2 การทดลอง

การสังเคราะห์เส้นใยนาโนจะสังเคราะห์ด้วยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ซึ่งจะใช้ระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะกับแผ่นโลหะรองรับประมาณ 15 cm วัสดุรองรับจะใช้เป็นแผ่นซิลิกอนที่มีขนาด 1x1 cm<sup>2</sup> ที่ผ่านการล้างด้วย อะซิโตน เอทานอลและน้ำกลั่นตามลำดับ นำสารละลายที่เตรียมได้ มาบรรจุลงในหลอดฉีดยาที่ติดท่อซิลิโคนและเข็มโลหะแล้วนำไปติดตั้งกับเครื่องควบคุมอัตราการไหล แล้วปรับค่าอัตราการไหลที่ 0.3 ml/h ต่อเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง โดยต่อขั้วบวกเข้ากับปลายเข็มที่เป็นโลหะและต่อขั้วลบเข้ากับแผ่นโลหะรองรับที่ใช้วางวัสดุรองรับ จากนั้นจ่ายไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าประมาณ 20 kV ให้กับขั้วไฟฟ้าที่ต่อเข้ากับปลายเข็มโลหะกับแผ่นโลหะรองรับทำให้เกิดการปั่นเส้นใยแล้วตกลงไปที่วัสดุรองรับเป็นเวลา 30 min จากนั้นนำวัสดุรองรับไปอบเป็นเวลา 5 h เพื่อกำจัดพอลิเมอร์

#### 3.4.3 เงื่อนไขการทดลอง

เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองจะมีอยู่ 4 ตัวแปร คือ (1) ผลของอัตราส่วน ZnAc:PVA อัตราส่วนที่ใช้ศึกษา คือ (2:2) (3:2) (4:2) (5:2) และ (6:2) โดยมีความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับและอุณหภูมิในการอบ คงที่ รายละเอียดจะแสดงในตารางที่

3.1 (2) ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้คือ 16 18 20 22 และ 24 kV โดยมีอัตราส่วน ZnAc:PVA ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับและอุณหภูมิในการอบ คงที่ รายละเอียดจะแสดงในตารางที่ 3.2 (3) ผลของระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับที่ใช้คือ 12 13 14 และ 15 cm โดยมีอัตราส่วน ZnAc:PVA ความต่างศักย์ไฟฟ้าและอุณหภูมิในการอบ คงที่ รายละเอียดจะแสดงในตารางที่ 3.3 (4) ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบคือ 450 500 550 และ 600 °C โดยมีอัตราส่วน ZnAc:PVA ความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ คงที่ รายละเอียดจะแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.1 ผลของอัตราส่วน ZnAc:PVA

อัตราส่วน (ZnAc:PVA)	ความต่างศักย์ (kV)	ระยะห่าง (cm)	อุณหภูมิ (°C)
(2:2)			
(3:2)			
(4:2)	20	15	550
(5:2)			
(6:2)			

ตารางที่ 3.2 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้า

อัตราส่วน (ZnAc:PVA)	ความต่างศักย์ (kV)	ระยะห่าง (cm)	อุณหภูมิ (°C)
	16		
	18		
(4:2)	20	15	550
	22		
	24		

ตารางที่ 3.3 ผลของระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ

อัตราส่วน (ZnAc:PVA)	ความต่างศักย์ (kV)	ระยะห่าง (cm)	อุณหภูมิ (°C)
(4:2)	20	12	550
		13	
		14	
		15	

ตารางที่ 3.4 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ

อัตราส่วน (ZnAc:PVA)	ความต่างศักย์ (kV)	ระยะห่าง (cm)	อุณหภูมิ (°C)
(4:2)	20	15	450
			500
			550
			600

### 3.5 การวิเคราะห์

การวิเคราะห์โครงสร้างของเส้นใยนาโนจะทำการวิเคราะห์ด้วยการนำเส้นใยที่สังเคราะห์ลงบนซิลิกอนไปอบ จากนั้นนำไปวิเคราะห์ลักษณะของเส้นใยด้วยเครื่อง SEM วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง XRD และวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

## บทที่ 4

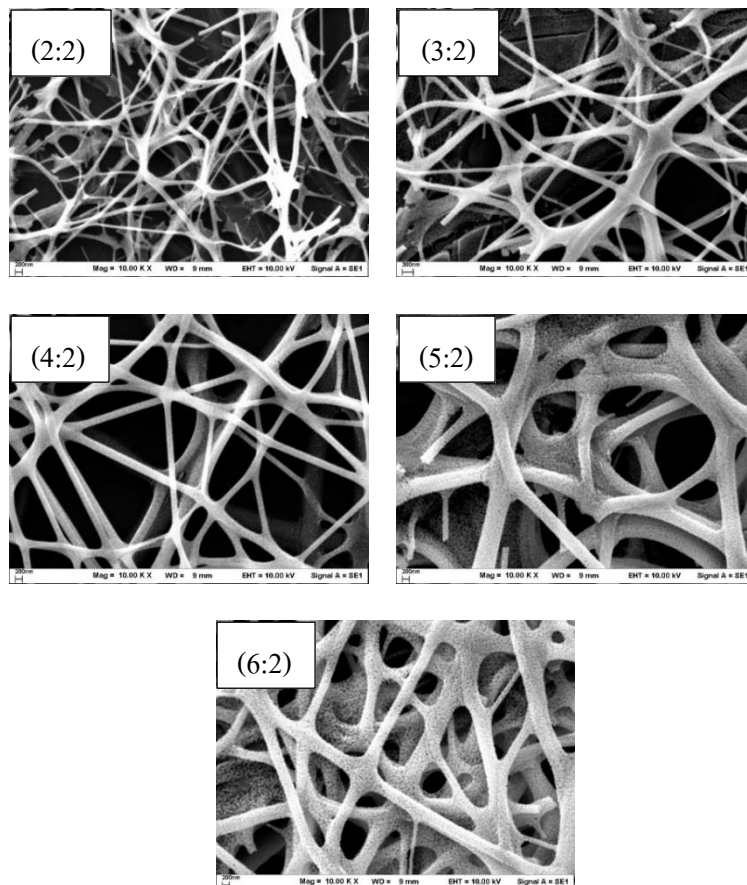
### ผลและอภิปรายการวิจัย

บทนี้จะกล่าวถึงข้อมูลที่ได้จากการทดลองตามแนวทางการศึกษาในบทที่ 3 โดยเริ่มจากการวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างของเส้นใยนาโน ZnO จากข้อมูลของ SEM และ XRD จากนั้นวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.1 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของเส้นใยนาโน ZnO ด้วยเครื่อง SEM

##### 4.1.1 อัตราส่วน ZnAc:PVA

จากภาพที่ 4.1 แสดงภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่าของเส้นใยนาโน ZnAc:PVA ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA แตกต่างกันคือ (2:2) (3:2) (4:2) (5:2) และ (6:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm อุณหภูมิในการอบ 550 °C ผลปรากฏว่าขนาดของเส้นใยนาโน ZnAc:PVA ที่อัตราส่วน (2:2) มีขนาด 120-160 nm ที่อัตราส่วน (3:2) มีขนาด 120-240 nm ที่อัตราส่วน (4:2) มีขนาด 160-280 nm ที่อัตราส่วน (5:2) มีขนาด 200-560 nm และที่อัตราส่วน (6:2) มีขนาด 200-560 nm เส้นใยนาโน ZnAc:PVA จะมีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระ เกิดรูพรุน เกิดการแตกหักและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วน ZnAc:PVA นั้นแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณของ ZnAc จะเป็นการเพิ่มขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยนาโน ZnAc:PVA

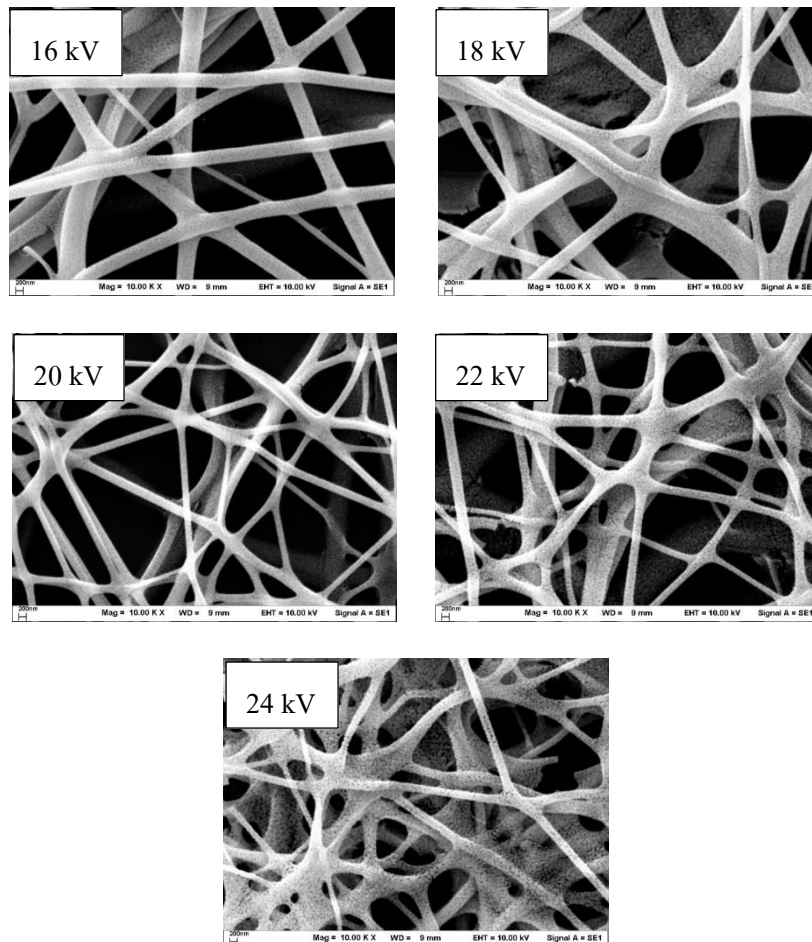


ภาพที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่าของเส้นใยนาโน ZnAc:PVA ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA ต่างกันคือ (2:2) (3:2) (4:2) (5:2) และ (6:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C

#### 4.1.2 ความต่างศักย์ไฟฟ้า

จากภาพที่ 4.2 แสดงภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่าของเส้นใยนาโน ZnAc:PVA ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกันคือ 16 18 20 22 และ 24 kV ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm อุณหภูมิในการอบ 550 °C ผลปรากฏว่าขนาดของเส้นใยนาโน ZnAc:PVA ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 16 kV มีขนาด 160-480 nm ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 18 kV มีขนาด 200-480 nm ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV มีขนาด 160-280 nm ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 22 kV มีขนาด 160-360 nm และที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 24 kV มีขนาด

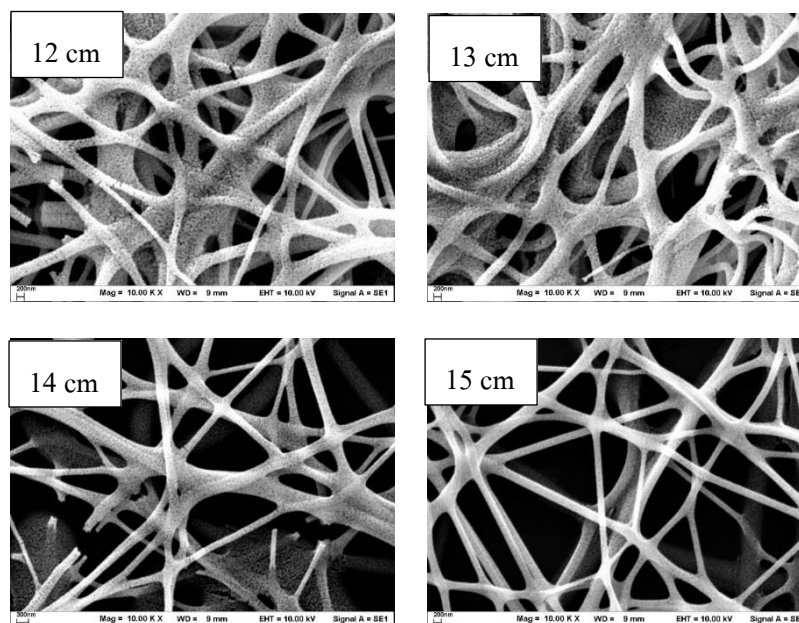
200-320 nm ขนาดของเส้นใยมีแนวโน้มลดลงและปริมาณของเส้นใยเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจาก สนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทำให้สามารถเอาชนะแรงตึงผิวได้ง่ายขึ้นจึงทำให้เส้นใยมีขนาดเล็กลงและ ปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นนั่นเอง



ภาพที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่าของเส้นใยนาโน ZnAc:PVA ที่สังเคราะห์ด้วย อัตราส่วนของ ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกันคือ 16 18 20 22 และ 24 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่น โลหะรองรับ 15 cm อุณหภูมิในการอบ 550 °C

#### 4.1.3 ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ

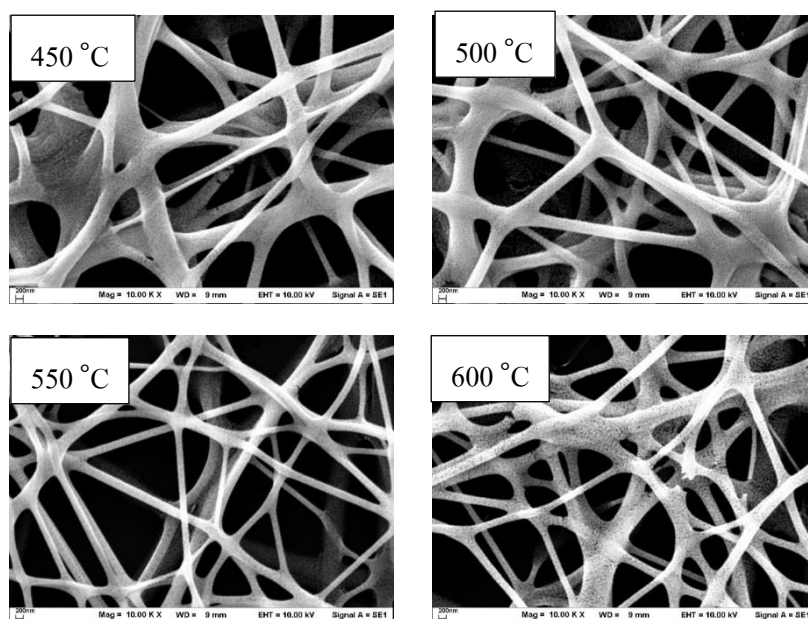
จากภาพที่ 4.3 แสดงภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่าของเส้นใยนาโน ZnAc:PVA ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับที่ใช้แตกต่างกันคือ 12 13 14 และ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C ผลปรากฏว่าขนาดของเส้นใยนาโน ZnAc:PVA ที่ระยะห่าง 12 cm มีขนาด 120-280 nm ที่ระยะห่าง 13 cm มีขนาด 160-320 nm ที่ระยะห่าง 14 cm มีขนาด 120-360 nm และที่ระยะห่าง 15 cm มีขนาด 160-280 nm เมื่อระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับลดลงจะทำให้ปริมาณของเส้นใยเพิ่มมากขึ้น เป็นผลมาจากสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ทำให้เส้นใยที่ถูกปั่นออกมาปริมาณเพิ่มมากขึ้น และจากภาพจะสังเกตเห็นว่าเส้นใยมีการรวมตัวกันของเส้นใยเป็นผลมาจากระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับใกล้เกินไปทำให้เส้นใยที่ถูกปั่นออกมาแข็งตัวไม่ทันเมื่อตกลงบนวัสดุรองรับจึงเกิดการรวมตัวกันนั่นเอง



ภาพที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่าของเส้นใยนาโน ZnAc:PVA ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับที่ใช้แตกต่างกันคือ 12 13 14 และ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C

#### 4.1.4 อุณหภูมิในการอบ

จากภาพที่ 4.4 แสดงภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่าของเส้นใยนาโน ZnAc:PVA ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 450 500 550 และ 600 °C ผลปรากฏว่า ขนาดของเส้นใยนาโน ZnAc:PVA ที่อุณหภูมิ 450 °C มีขนาด 160-480 nm ที่อุณหภูมิ 500 °C มีขนาด 160-360 nm ที่อุณหภูมิ 550 °C มีขนาด 160-280 nm ที่อุณหภูมิ 600 °C มีขนาด 120-240 nm เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบจะทำให้เส้นใยมีขนาดเล็กลง เป็นผลมาจากการอบเป็นการกำจัดพอลิเมอร์เพราะฉะนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบขึ้นจะทำให้กำจัดพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น จึงทำให้เส้นใยมีขนาดเล็กลงนั่นเอง



ภาพที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่าของเส้นใยนาโน ZnAc:PVA ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 450 500 550 และ 600 °C

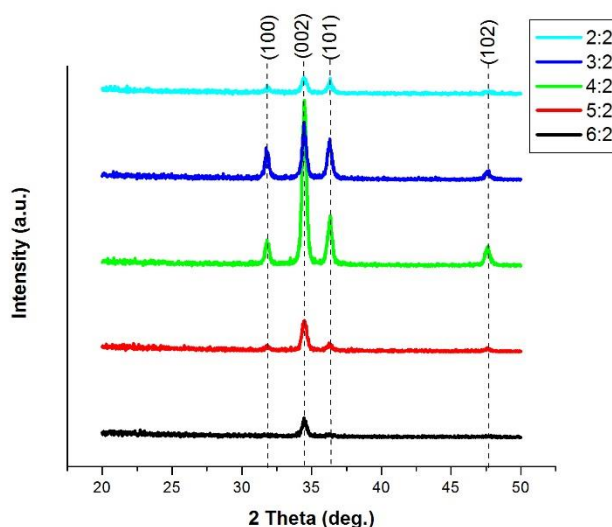


## 4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเส้นใยนาโน ZnO ด้วยเครื่อง XRD

### 4.2.1 อัตราส่วน

จากภาพที่ 4.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA แตกต่างกันคือ (2:2) (3:2) (4:2) (5:2) และ (6:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C พบพีคที่มุม  $2\theta$  ประมาณ 31.5° 34.5° และ 36.5° เมื่อนำไปเทียบกับค่ามาตรฐาน JCPDS เลขที่ 36-1451 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) พบว่าตรงกับ ZnO ที่ระนาบ (100) (002) และ (101) ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าพีคทุกระนาบมีลักษณะแบบเดียวกันคือฐานพีคไม่กว้างยอดพีคมีปลายแหลมและพีคจะสูงขึ้นตามอัตราส่วนของ ZnAc:PVA จาก (2:2) ไปจนถึง (4:2) และพีคจะลดลงเมื่ออัตราส่วนเกิน (4:2) สาเหตุที่พีคสูงขึ้นเป็นผลมาจากปริมาณที่เพิ่มขึ้นของ ZnAc ทำให้มีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออัตราส่วนที่เกิน (4:2) ความเป็นผลึกจะลดลงนั้นเป็นผลมาจากขนาดของเส้นใยที่มีขนาดใหญ่เกินไปทำให้ ZnAc มีการรวมตัวกันเป็นผลึกน้อยเมื่อผ่านการอบ สังเกตได้จากภาพที่ 4.1 ที่อัตราส่วน (5:2) และ (6:2) เส้นใยจะมีรูพรุนเกิดขึ้นเมื่อผ่านการอบ

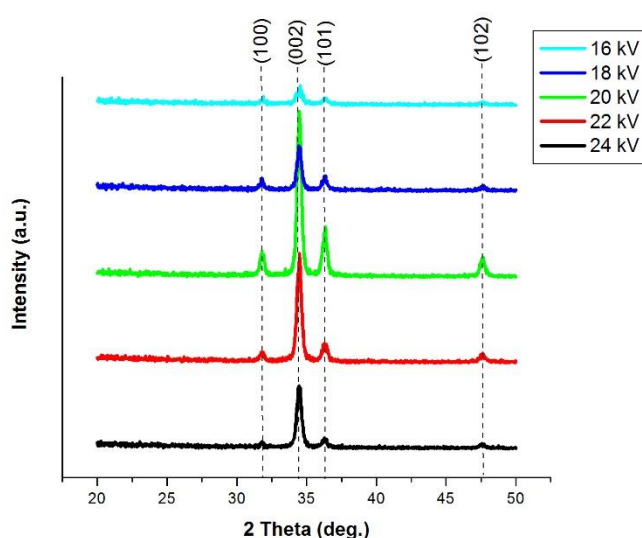


ภาพที่ 4.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA แตกต่างกันคือ (2:2) (3:2) (4:2) (5:2) และ (6:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C

#### 4.2.2 ความต่างศักย์ไฟฟ้า

จากภาพที่ 4.6 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกันคือ 16 18 20 22 และ 24 kV ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C พบพิกที่มุม  $2\theta$  ประมาณ 31.5 ° 34.5 ° และ 36.5 ° เมื่อนำไปเทียบกับค่ามาตรฐาน JCPDS เลขที่ 36-1451 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) พบว่าตรงกับ ZnO ที่ระนาบ (100) (002) และ (101) ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าพิกทุกระนาบมีลักษณะแบบเดียวกันคือฐานพิกไม่กว้างยอดพิกมีปลายแหลมและพิกจะสูงขึ้นตามความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก 16 kV ไปจนถึง 20 kV และพิกจะลดลงเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า 20 kV สาเหตุที่พิกสูงขึ้น เป็นผลมาจากความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำเกินไปจึงทำให้แรงไฟฟ้าเอาชนะแรงดึงดูดของสารละลายได้ยากทำให้เส้นใยที่ปั่นได้มีขนาดใหญ่ จึงทำให้ความเป็นผลึกที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่น้อยกว่าต่ำกว่าความเป็นผลึกที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงกว่าและสาเหตุที่ความเป็นผลึกลดลงเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า 20 kV เป็นผลมาจากความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงเกินไปทำให้แรงไฟฟ้าเอาชนะแรงดึงดูดได้ง่าย ทำให้เส้นใยที่ถูกปั่นตกลงวัสดุรองรับเร็วเกินไปจึงทำให้เส้นใยเกิดการรวมตัวกัน เมื่อนำเส้นใยที่มีการรวมตัวกันไปอบจะทำให้เส้นใยเกิดรูพรุน จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้มีความเป็นผลึกลดลงนั่นเอง

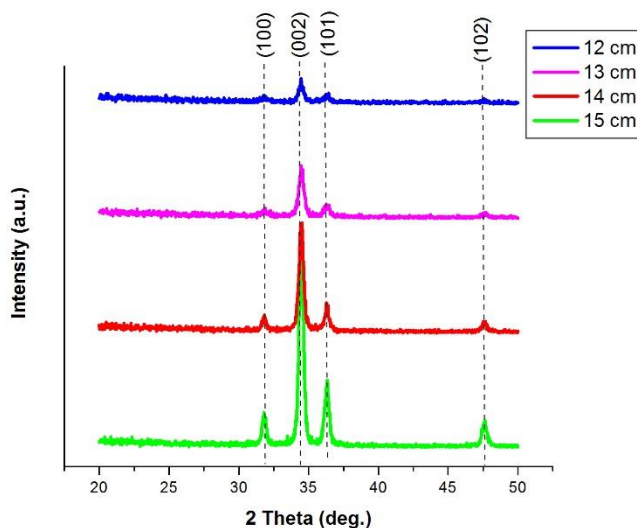


ภาพที่ 4.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกันคือ 16 18 20 22 และ 24 kV ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C

#### 4.2.3 ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ

จากภาพที่ 4.7 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV อุณหภูมิในการอบ 550 °C และระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับที่ใช้แตกต่างกันคือ 12 13 14 และ 15 cm พบพีคที่มุม  $2\theta$  ประมาณ 31.5 ° 34.5 ° และ 36.5 ° เมื่อนำไปเทียบกับค่ามาตรฐาน JCPDS เลขที่ 36-1451 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) พบว่าตรงกับ ZnO ที่ระนาบ (100) (002) และ (101) ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าพีคทุกระนาบมีลักษณะแบบเดียวกันคือฐานพีคไม่กว้างยอดพีคมีปลายแหลมและพีคจะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับมากขึ้น เป็นผลมาจากระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับที่ใกล้เกินไปทำให้แรงไฟฟ้าเอาชนะแรงดึงดูดของสารละลายได้ง่าย ทำให้เส้นใยที่ถูกปั่นตกลงวัสดุรองรับเร็วเกินไปจึงทำให้เส้นใยเกิดการรวมตัวกัน เมื่อนำเส้นใยที่มีการรวมตัวกันไปอบจะทำให้เส้นใยเกิดรูพรุน จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้มีความเป็นผลึกลดลงนั่นเอง

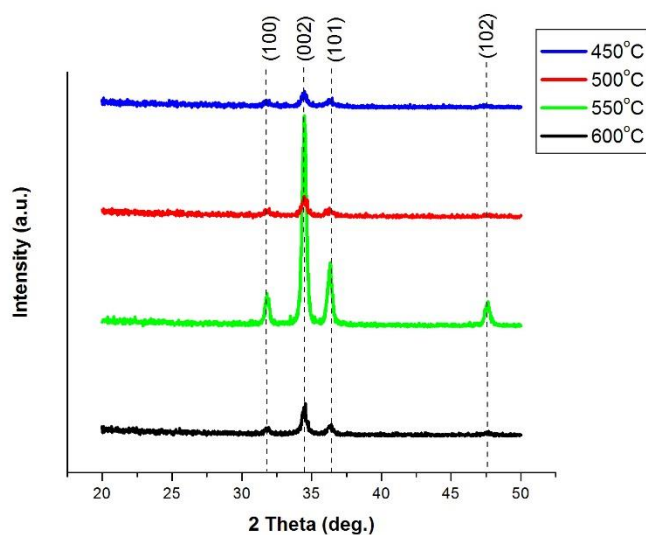


ภาพที่ 4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับที่ใช้แตกต่างกันคือ 12 13 14 และ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C

#### 4.2.4 อุณหภูมิในการอบ

จากภาพที่ 4.8 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 450 500 550 และ 600 °C พบพิกที่มุม  $2\theta$  ประมาณ 31.5° 34.5° และ 36.5° เมื่อนำไปเทียบกับค่ามาตรฐาน JCPDS เลขที่ 36-1451 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) พบว่าตรงกับ ZnO ที่ระนาบ (100) (002) และ (101) ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าพิกที่มุมระนาบมีลักษณะแบบเดียวกันคือฐานพิกไม่กว้างยอดพิกมีปลายแหลมและพิกที่ได้ค่อนข้างต่ำยกเว้น พิกของตัวอย่างที่ 550 °C เป็นผลมาจากตัวอย่างที่อบด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า 550 °C มีการกำจัดพอลิเมอร์ออกได้ไม่พอดีทำให้การรวมตัวกันเป็นผลึกของ ZnO ไม่ดีพอจึงทำให้มีความเป็นผลึกน้อยและตัวอย่างที่อบสูงกว่า 550 °C คือตัวอย่างที่อบด้วยอุณหภูมิ 600 °C เกิดจากอุณหภูมิที่สูงเกินไปทำให้เส้นใยเกิดการแตกหักและเกิดรูพรุน



ภาพที่ 4.8 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 450 500 550 และ 600 °C

### 4.3 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ด้วยเครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

#### 4.3.1 อัตราส่วน

จากตารางที่ 4.1 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA แตกต่างกันคือ (2:2) (3:2) (4:2) (5:2) และ (6:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C ผลปรากฏว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่มีค่าน้อยที่สุดคือที่อัตราส่วน (4:2) และเมื่อนำค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าไปเทียบกับภาพ SEM และ XRD ของผลส่วนที่เป็นอัตราส่วนพบว่ามีความสอดคล้องกัน นั่นคือจากภาพ SEM ที่อัตราส่วน (2:2) (3:2) เส้นใยมีขนาดเล็กและมีการแตกหัก ส่วนที่อัตราส่วน (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 4.1 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA แตกต่างกันคือ (2:2) (3:2) (4:2) (5:2) และ (6:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C

อัตราส่วน (ZnAc:PVA)	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ( $\Omega$ m)
(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

### 4.3.2 ความต่างศักย์ไฟฟ้า

จากตารางที่ 4.2 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกันคือ 16 18 20 22 และ 24 kV ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C ผลปรากฏว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ที่มีค่าน้อยที่สุดคือเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV

ตารางที่ 4.2 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกันคือ 16 18 20 22 และ 24 kV ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C

ความต่างศักย์ไฟฟ้า (kV)	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ( $\Omega$ m)
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

### 4.3.3 ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับ

จากตารางที่ 4.3 แสดงตารางค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นโลหะรองรับที่ใช้แตกต่างกันคือ 12 13 14 และ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C ผลปรากฏว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่มีค่าน้อยที่สุดคือที่ระยะห่าง 15 cm ทั้งนี้เป็นผลมาจากเส้นใยนาโนที่ระยะห่าง 15 cm ไม่มีการรวมตัวกันของเส้นใยนาโนขณะทำการปั่นและเส้นใยที่ผ่านการอบไม่เกิดการแตกหักและมีรูพรุน จึงเป็นสาเหตุทำให้เส้นใยนาโนที่ระยะห่าง 15 cm มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าน้อยที่สุดนั่นเอง

ตารางที่ 4.3 ตารางค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับที่ใช้แตกต่างกันคือ 12 13 14 และ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C

ระยะห่าง (cm)	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ( $\Omega$ m)
12	167.0 $\pm$ 2.8
13	154.2 $\pm$ 1.3
14	123.2 $\pm$ 1.4
15	113.7 $\pm$ 0.6

#### 4.3.4 อุณหภูมิในการอบ

จากตารางที่ 4.4 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 450 500 550 และ 600 °C ผลปรากฏว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่มีค่าน้อยที่สุดคือที่อุณหภูมิ 550°C เป็นผลมาจากการอบที่อุณหภูมิต่ำกว่า 550°C มีการกำจัด PVA ออกไม่มากพอจึงทำให้มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าเส้นใยนาโนที่อบด้วยอุณหภูมิ 550°C และเส้นใยที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 600°C จะเกิดครุพุนและการแตกหักของเส้นใยนาโนจึงทำให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าเส้นใยนาโนที่อบด้วยอุณหภูมิ 550°C

ตารางที่ 4.4 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนของ ZnAc:PVA (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอุณหภูมิในการอบแตกต่างกันคือ 450 500 550 และ 600 °C

อุณหภูมิ (°C)	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ( $\Omega$ m)
450	163.5 $\pm$ 1.8
500	157.0 $\pm$ 1.5
550	113.7 $\pm$ 0.6
600	122.3 $\pm$ 1.2

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผล

การศึกษาลักษณะของเส้นใยนาโน ZnO ที่ปั่นด้วยวิธีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตด้วยเครื่อง SEM อัตราส่วนของ ZnAc:PVA เพิ่มขึ้นขนาดของเส้นใยนาโน ZnO จะมีขนาดเพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากปริมาณของ ZnAc ที่เพิ่มขึ้น เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นขนาดของเส้นใยนาโน ZnO จะเล็กลงและปริมาณของเส้นใยจะเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทำให้สามารถเอาชนะแรงดึงผิวได้ง่ายขึ้นจึงทำให้เส้นใยมีขนาดเล็กและมีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณของเส้นใยเพิ่มมากขึ้น เป็นผลมาจากสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ทำให้เส้นใยที่ถูกปั่นออกมามีปริมาณเพิ่มมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้เส้นใยนาโน ZnO มีขนาดเล็กลง เป็นผลมาจากการอุณหภูมิในการอบที่เพิ่มขึ้นจะทำให้กำจัด PVA ได้ดีกว่าจึงทำให้เส้นใยมีขนาดเล็กลง

การศึกษาโครงสร้างผลึกของเส้นใยนาโน ZnO ที่ปั่นด้วยวิธีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตด้วยเครื่อง XRD พบว่าในทุกเงื่อนไขของการสังเคราะห์เส้นใยนาโน ZnO ด้วยการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต พบพีคที่มุม  $2\theta$  ประมาณ  $31.5^\circ$   $34.5^\circ$  และ  $36.5^\circ$  เมื่อนำไปเทียบกับค่ามาตรฐาน JCPDS เลขที่ 36-1451 ของ ZnO ที่ระนาบ (100) (002) และ (101) ตามลำดับ เมื่ออัตราส่วนของ ZnAc:PVA เพิ่มขึ้นจะทำให้เส้นใยนาโน ZnO มีความเป็นผลึกมากขึ้น แต่ถ้าอัตราส่วนมากเกินไปเส้นใยจะมีความเป็นผลึกของเส้นใยนาโน ZnO น้อยลง เนื่องจากขนาดของเส้นใยที่มีขนาดใหญ่เกินไปทำให้ ZnAc มีการรวมตัวกันเป็นผลึกน้อยเมื่อผ่านการอบ เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเป็นผลึกของเส้นใยนาโน ZnO เพิ่มขึ้น แต่ความต่างศักย์ไฟฟ้ามากเกินไปจะทำให้ความเป็นผลึกของเส้นใยนาโน ZnO ลดลง เป็นผลมาจากความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำเกินไปจึงทำให้แรงไฟฟ้าเอาชนะแรงดึงผิวของสารละลายได้ยากทำให้เส้นใยที่ปั่นได้มีขนาดใหญ่ แต่ถ้าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงเกินไปทำให้แรงไฟฟ้าเอาชนะแรงดึงผิวได้ง่าย ทำให้เส้นใยที่ถูกปั่นตกลงวัสดุรองรับเร็วเกินไปจึงทำให้เส้นใยเกิดการรวมตัวกัน เมื่อนำเส้นใยที่มีการรวมตัวกันไปอบจะทำให้เส้นใยเกิดรูพรุน จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้มีความเป็นผลึกลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเป็นผลึกของเส้นใยนาโน ZnO เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะว่าเมื่อระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับที่ใกล้เกินไปทำให้แรงไฟฟ้าเอาชนะแรงดึงผิวของสารละลายได้ง่าย ทำให้เส้นใยที่ถูกปั่นตกลงวัสดุรองรับเร็วเกินไปจึงทำให้เส้นใยเกิดการรวมตัวกัน



เมื่อนำเส้นใยที่มีการรวมตัวกันไปอบจะทำให้เส้นใยเกิดรูพรุน จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้มีความเป็นผลึกลดลง เมื่ออุณหภูมิในการอบเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเป็นผลึกของเส้นใยนาโน ZnO เพิ่มขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิในการอบมากเกินไปจะทำให้ความเป็นผลึกของเส้นใยนาโน ZnO ลดลง เนื่องจากจะทำให้เส้นใยเกิดการแตกหัก

การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า เมื่ออัตราส่วน ZnAc:PVA เพิ่มขึ้นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะลดลง แต่ถ้าอัตราส่วน ZnAc:PVA สูงเกินไปจะทำให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากถ้าอัตราส่วนต่ำเกินไป เส้นใยนาโน ZnO จะมีขนาดเล็ก มีการแตกหักและมีความเป็นผลึกต่ำ ถ้าอัตราส่วน ZnAc:PVA สูงเกินไปเส้นใยนาโน ZnO จะมีการแตกหัก เกิดรูพรุนขึ้นและมีความเป็นผลึกต่ำนั่นเอง เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นค่าสภาพนำไฟฟ้ามีแนวโน้มจะลดลง เป็นผลมาจากความต่างศักย์ไฟฟ้าทำให้ขนาดของเส้นใยนาโน ZnO ลดลงและปริมาณของเส้นใยเพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นใยนาโน ZnO ลดลงนั่นเอง เมื่อระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าลดลงเป็นผลมาจากที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับน้อย ทำให้มีการรวมตัวกันของเส้นใยมาก ทำให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงนั่นเองเมื่ออุณหภูมิในการอบเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าลดลง เป็นผลมาจากที่อุณหภูมิสูงสามารถกำจัด PVA ได้ดีกว่า จึงทำให้มีค่าสภาพต้านทานที่ต่ำกว่านั่นเอง

จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า สามารถสรุปได้ว่าเงื่อนไขที่ทำให้เส้นใยนาโน ZnO มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำที่สุดคือ อัตราส่วน (4:2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับที่ 15 cm และอุณหภูมิในการอบ 550 °C เส้นใยมีความสมบูรณ์และความเป็นผลึกมากที่สุดนั่นเอง

ในงานวิจัยนี้พบว่า หากต้องการนำเส้นใยนาโน ZnO ไปใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสง ควรเลือกเส้นใยนาโน ZnO ที่สังเคราะห์ด้วยเงื่อนไข อัตราส่วน ZnAc:PVA 4:2 ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะกับแผ่นโลหะรองรับ 15 cm และอบที่อุณหภูมิ 550 °C เนื่องจากเส้นใยนาโน ZnO ที่มีความสมบูรณ์ที่สุดคือ เป็นเส้นใยที่ไม่เกิดการแตกหัก ไม่เกิดรูพรุน มีความเป็นผลึกสูงที่สุดและมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่น้อยที่สุดนั่นเอง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการเตรียมเส้นใยนาโน ZnO เส้นใยต่าง ๆ มีความสัมพันธ์กันอย่างมาก เพราะฉะนั้นในการเลือกเส้นใยควรเลือกเส้นใยที่เหมาะสมกันที่สุดเพื่อให้ง่ายต่อการสังเคราะห์เส้นใยนาโน ZnO และหากจะนำเส้นใยนาโน ZnO ไปประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ เช่น นำไปประยุกต์ใช้งานในเซลล์แสงอาทิตย์ ควรทำการวิเคราะห์สมบัติทางแสงเพิ่มเติมเพื่อให้การนำไปประยุกต์ใช้งานเกิดประสิทธิภาพสูงสุดนั่นเอง

## บรรณานุกรม

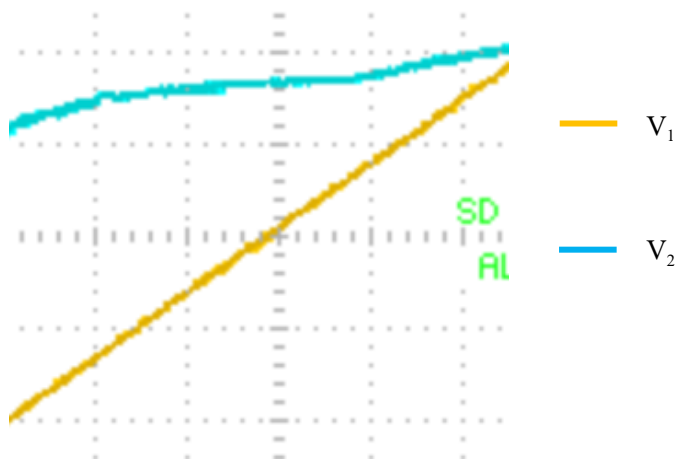
- ณัฐฐา ศักดิ์ศิลาพร และชัญรัตน์ ท้าวสบาย. (2553). *การผลิตเส้นใยนาโนทั้งสเดนออกไซด์ด้วยวิธีอิเล็กโทรสปินนิง*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- นันทน์ วัฒนสุภิญญา. (2553). *สมบัติทางกายภาพของฟิล์มบาง ZnO เจือด้วยอลูมิเนียมและอินเดียมเตรียมโดยเทคนิค ดีซี แมกนีตรอน สเปดเตอร์ริง*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาฟิสิกส์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- อมรรัตน์ คำบุญ. (2551). *ผลของความต่างศักย์ไบแอสต่อโครงสร้างของฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบด้วยวิธีรีแอคทีฟ สเปดเตอร์ริง ที่มีผลต่อการเกิดopa ไลท์*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาฟิสิกส์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- Aegerter, M. A., Schmitt, M., & Guo, Y. (2002). Sol-gel niobium pentoxide coatings: Applications to photovoltaic energy conversion and electrochromism. *Intentionnal Journal of Photoenergy*, 4, 1-10.
- Apostolopoulou, A., Karageorgopoulos, D., Rapsomanikis, A., & Stathatos, E. (2016). Dye-Sensitized Solar Cells with Zinc Oxide Nanostructured Films Made with Amine Oligomers as Organic Templates and Gel Electrolytes. *Journal of Clean Energy Technologies*, 4, 311-315.
- 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.
- Hu, Y. H., Chen, Y. C., Xu, H. J., Gao, H., Jiang, W. H., Hu, F., & Wang, Y. X. (2010). Texture ZnO Thin-Films and their Application as Front Electrode in Solar Cells. *Engineering*, 2, 973-978.
- Irzaman, Putra, I.R., Aminullah, Syafutra, H., & Alatas, H. (2016). Development of ferroelectric solar cells of Barium Strontium Titanate ( $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ ) for Substituting Conventional Battery in LAPAN-IPB Satellite (LISAT). *Procedia Environmental Sciences*, 33, 607-614.

- Imran, M., Haider, S., Ahmad, K., Mahmood, A., & Waheed, A. A. (2017). Fabrication and characterization of zinc oxide nanofibers for renewable energy applications. *Arabian Journal of Chemistry*, *10*, S1067–S1072.
- Lai, Y. Y., Chen, J. W., Chang, T. C., Chou, Y. H., & Lu, T. C. (2015). Manipulation of exciton and photon lasing in a membrane-type ZnO microcavity. *Applied Physics Letters*, *106*, 131106-131106.4.
- Ren, H., Ding, Y., Jiang, Y., Xu, Y., Long, Z., & Zhang, P. (2009). Synthesis and properties of ZnO nanofibers prepared by electrospinning. *J Sol-Gel Sci Technol*, *52*, 287-290.
- Santos, J.P., Fernández, M. J., Fontecha, J. L., Matatagui, D., Sayago, I., Horrillo, M. C., & Gracia, I. (2014). Nanocrystalline Tin Oxide Nanofibers Deposited by a Novel Focused Electrospinning Method. *Sensors*, *14*, 24231-24243.
- Söderström, T., Dominé, D., Feltrin, A., Despeisse, M., Meillaud, F., Bugnon, G., Boccard, M., Cuony, P., Haug, F. J., Faÿ, S., Nicolay S., & Ballif, C. (2010). ZnO Transparent conductive oxide for thin film silicon solar cells. *Proc. of SPIE*, *7603*,76030B-76030B.12.
- Yang, X., Shao, C., Guan, H., Li, X., & Gong, J. (2004). Preparation and characterization of ZnO nanofibers by using electrospun PVA/zinc acetate composite fiber as precursor. *Inorganic Chemistry Communications*, *7*, 176-178.
- Zhang, Q., Qi, J., Li, X., Yi, F., Wang, Z., & Zhang, Y. (2012). Electrically pumped lasing from single ZnO micro/nanowire and poly (3,thylenedioxythiophene):poly (styrenexulfonate) hybrid heterostructures. *Applied Physics Letters*, *101*, 043119-1-043119-5.
- Zhoua, R., Hu, G., Yu, R., Pan, C., & Wang, Z. L. (2015). Piezotronic effect enhanced detection of flammable/toxic gases by ZnO micro/nanowire sensors. *Nano Energy*, *12*, 588–596.

ภาคผนวก

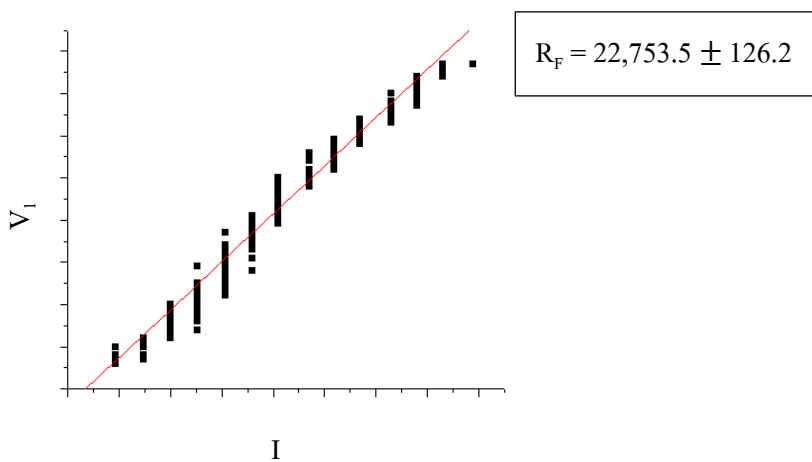
### การคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

ในการคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะคำนวณจากค่า  $V_1$  และ  $V_2$  ที่อ่านได้จากเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ตามภาพภาคผนวก ก-1



ภาพภาคผนวก ก-1 ค่าที่อ่านได้จากเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

โดยจะนำค่า  $V_2$  ไปคำนวณหาค่า  $I$  แล้วนำไปพล็อตกราฟระหว่าง  $I$  กับ  $V_1$  ซึ่งจะให้  $I$  อยู่บนแกน X และ  $V_1$  อยู่บนแกน Y เพื่อหาค่าความชัน ( $R_F$ ) ดังแสดงในภาพภาคผนวก ก-2



ภาพภาคผนวก ก-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $I$  และ  $V_1$

จากนั้นนำค่า  $R_F$  ที่ได้มาคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจากสมการ  $R_F = \frac{\rho l}{A}$  จากการทดลองใช้  $l=1 \text{ mm}$  และ  $A=5 \text{ mm}^2$  จากตัวอย่างในภาพภาคผนวก ก-2 สามารถคำนวณออกมาได้ว่า

$$\rho = \frac{(22753.5 \pm 126.2) \times 5}{1} \Omega\text{m}$$

เพราะฉะนั้นจะได้

$$\rho = 113.7 \pm 0.6 \Omega\text{m}$$

### เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือที่ใช้ในการหาค่าสภาพต้านไฟฟ้าได้แก่ เครื่องฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ (Function Generator) และเครื่องออสซิลโลสโคป

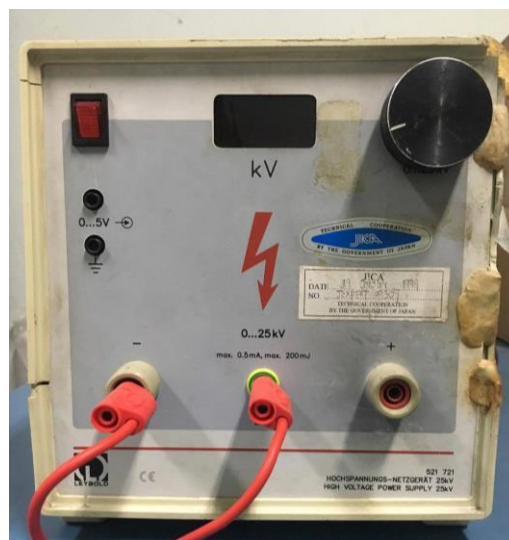


ภาพภาคผนวก ก-3 ได้แก่ เครื่องฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ (Function Generator)



ภาพภาคผนวก ก-4 เครื่องออสซิลโลสโคป

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองได้แก่ เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง เครื่องควบคุมอัตราการไหล และแผ่นโลหะรองรับที่ติดกับขาตั้งที่สามารถปรับระยะได้



ภาพภาคผนวก ก-5 เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง





ภาพภาคผนวก ก-6 เครื่องควบคุมอัตราการไหล



ภาพภาคผนวก ก-7 แผ่น โลหะรองรับที่ติดกับขาตั้งที่สามารถปรับระยะได้