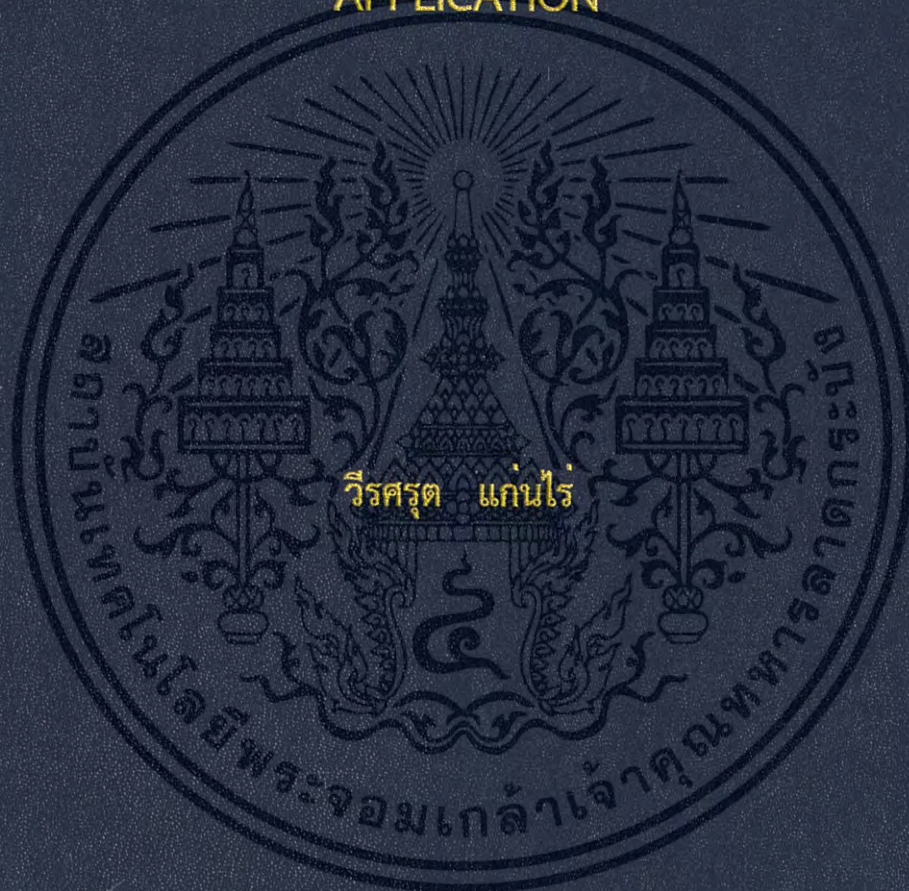


การสังเคราะห์ PVA/ZnO นาโนไฟเบอร์ที่มีความเข้มข้นต่างกัน  
ด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปิน เพื่อนำมาใช้เป็นก๊าซเซ็นเซอร์

SYNTHESIS OF PVA/ZNO NANOFIBER WITH DIFFERENT  
CONCENTRATION BY ELECTROSPIN FOR GAS SENSOR  
APPLICATION



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

การสังเคราะห์ PVA/ZnO นาโนไฟเบอร์ที่มีความเข้มข้นต่างกัน  
ด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปิน เพื่อนำมาใช้เป็นก๊าซเซ็นเซอร์  
SYNTHESIS OF PVA/ZNO NANOFIBER WITH DIFFERENT  
CONCENTRATION BY ELECTROSPIN FOR GAS SENSOR  
APPLICATION



b.00265390  
i.....

TB00123

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SYNTHESIS OF PVA/ZNO NANOFIBER WITH DIFFERENT  
CONCENTRATION BY ELECTROSPIN FOR GAS SENSOR  
APPLICATION



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

ACADEMIC YEAR 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ      สังเคราะห์ PVA/ZnO นาโนไฟเบอร์ที่มีความเข้มข้นต่างกันด้วยเทคนิค  
อิเล็กโทรสปิน เพื่อนำมาใช้เป็นก๊าซเซ็นเซอร์  
Synthesis of PVA/ZnO Nanofiber with Different Concentration  
by Electrospin for Gas Sensor Application

ชื่อนักศึกษา                    นายวีรศรุต แก่นไร่                    รหัสนักศึกษา      55051616  
ปริญญา                        วิทยาศาสตร์บัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชา                        ฟิสิกส์  
ปีการศึกษา                    2558  
อาจารย์ที่ปรึกษา              ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม      ผศ.ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม ประธานกรรมการ	
ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข กรรมการ	
ดร.พิศาล สุขวิสูตร กรรมการ	
ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	
ผศ.ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	สังเคราะห์ PVA/ZnO นาโนไฟเบอร์ที่มีความเข้มข้นต่างกันด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปิน เพื่อนำมาใช้เป็นก๊าซเซ็นเซอร์
ชื่อนักศึกษา	นายวีรศรุต แก่นไร่ รหัสนักศึกษา 55051616
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง(สจล.)
ปีการศึกษา	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง

### บทคัดย่อ

ผู้วิจัยได้สังเคราะห์เส้นใยนาโนด้วยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ลงบนแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ ด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปิน ภายใต้เงื่อนไขความต่างศักย์ 15 kV ระยะระหว่างแผ่นสะสม 15 cm โดยเส้นใยชุดแรกสังเคราะห์ขึ้นด้วยความเข้มข้น 2.5%wt, 5%wt, 7.5%wt, 10%wt ที่อัตราการไหล 1.0 ml/hr และ 1.5 ml/hr เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เส้นใยชุดที่สองถูกสังเคราะห์ขึ้นโดยการเพิ่มซิงค์ออกไซด์ 1%wt ภายใต้เงื่อนไขเดียวกันกับชุดการทดลองแรก หลังจากเตรียมเส้นใยดังกล่าวแล้ว นำมาตรวจสอบลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทดสอบคุณสมบัติด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด และเครื่องมือวัดมุมสัมผัส โดยผลการทดลองคือ ลักษณะกายภาพของเส้นใยชุดแรกจะมีลักษณะแบบเรียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150-200 nm ชุดที่สองมีซิงค์ออกไซด์แทรกตัวในเส้นใยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นและอัตราการไหล คุณสมบัติมีการส่องผ่านแสงน้อยลงเมื่อเติมซิงค์ออกไซด์ ไม่มีปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างโพลีไวนิลแอลกอฮอล์และซิงค์ออกไซด์ มีความมุมสัมผัสน้อยที่สุดคือ PVA/ZnO 10%wt และ PVA 7.5%wt ที่อัตราการไหล 1.0 ml/hr โดยเงื่อนไขที่เหมาะสมนำไปประยุกต์ใช้มากที่สุดคือ PVA/ZnO 10%wt

**คำสำคัญ :** ก๊าซเซ็นเซอร์ ซิงค์ออกไซด์ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ อิเล็กโทรสปิน

<b>Title</b>	Synthesis of PVA/ZnO Nanofiber with Different Concentration by Electrospin for Gas Sensor Application
<b>Student</b>	Mr.Weerasaruth Kaenrai Student ID 55051616
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Applied Physics)
<b>Department</b>	Physics
<b>Faculty</b>	Science
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
<b>Academic Year</b>	2015
<b>Advisor</b>	Asst.Prof.Dr.Nathaporn Promros
<b>Co-Advisor</b>	Asst.Prof.Dr.Boonchoat Paosawatyanong

### Abstract

Polyvinylalcohol (PVA) nanofibers were synthesized on aluminum foil by electrospin method using voltage of 15 kV and distance between collector and needle of 15 cm. In the first condition, PVA nanofibers were synthesized at the concentration of 2.5 %wt, 5 %wt, 7.5 %wt, 10 %wt and flow rate of 1.0 mL/hr and 1.5 mL/hr (1 hr). In the second condition, ZnO was added in melt process and synthesized PVA nanofibers at the same with the first condition. After PVA nanofibers preparation, we investigated the important properties of PVA nanofibers by SEM, FTIR and Contact Angle. The result of the first condition showed the PVA nanofibers diameter of 150 – 200 nm. The result of second condition showed the PVA nanofiber diameter increased with increasing concentration and flow rate. The transmittance decreased when we added ZnO to PVA. The obtained transmittance results showed that no chemical reaction between PVA and ZnO. Our PVA nanofiber has the contact angle of  $20.43^\circ$  at the conditions of PVA/ZnO 10 %wt and PVA 7.5 %wt at flow rate of 1.0 mL/hr. The condition of PVA/ZnO 10 %wt is suitable to apply for gas sensor.

**Keywords:** Gas Sensor, Zinc oxide, Polyvinyl Alcohol, Electrospin

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่ได้มอบหมายหัวข้อโครงการพิเศษเรื่องนี้แก่ผู้วิจัย สนับสนุนด้านอุปกรณ์และสถานที่ปฏิบัติงานรวมถึงคำแนะนำอธิบายชี้แจงความรู้ที่เกี่ยวข้องเพื่อนำไปใช้ประยุกต์ในการปฏิบัติงาน อันมีส่วนส่งผลทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วง

ผศ.ดร. บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ฝึกงานและอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆในช่วงปิดภาคเรียนเพื่อให้คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาและปฏิบัติงานเกี่ยวกับทฤษฎีและหลักการ

รศ.สาทร่าย เล็กชะอุ่ม รศ.วิชิต ศิริโชติ ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข ดร.พิศาล สุขวิสูตร คณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้สละเวลาอันมีค่าของพวกท่านและให้เกียรติอย่างมากในการเป็นคณะกรรมการสอบวิชาโครงการพิเศษนี้แก่ผู้วิจัย รวมถึงให้คำแนะนำในการปรับปรุงเนื้อหาและเล่มโครงการพิเศษนี้

คณาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้มอบวิชาความรู้ต่างๆด้านฟิสิกส์ให้แก่ผู้วิจัยเพื่อนำไปใช้ประกอบวิชาชีพ

นายพงศภัค สิทธิมาตร นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ค้อยให้ปรึกษาตลอดการทำวิจัยในครั้งนี้

นางสาวณัชชนันท์ จันทเพชร นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สอนการใช้งานอุปกรณ์ และให้คำปรึกษาในการทำงานวิจัยครั้งนี้

หน่วยงาน AUN/SEED-Net JICA ที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านงบประมาณในการดำเนินงานวิจัยโครงการพิเศษนี้

วีรศรุต แก่นไร่

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำย่อ/สัญลักษณ์	ญ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินการ	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>3</b>
2.1 เส้นใยนาโน	3
2.1.1 จุดเด่นเส้นใยนาโน	4
2.1.2 การประยุกต์ใช้เส้นใยนาโน	4
2.2 โพลีไวนิลแอลกอฮอล์	5
2.2.1 คุณสมบัติการละลายในน้ำ	5
2.2.2 โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่ไม่ละลายในน้ำ	5
2.3 ซิงค์ออกไซด์	6
2.3.1 ลักษณะสมบัติเฉพาะ	6
2.3.2 คุณสมบัติความเป็นกึ่งตัวนำ	7
2.4 กระบวนการอิเล็กทรอนิกส์	7
2.4.1 หลักการทำงานของกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์	9
2.4.2 ผลึกเหลว	10
2.4.3 ตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์	11
2.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	14
2.6 เครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด	16
2.7 มุมสัมผัส	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	18
3.1 สารเคมี	18
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์	19
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานและวิธีการทดลอง	19
3.4 การตรวจสอบสมบัติต่างๆของเส้นใย	21
3.4.1 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของเส้นใย	21
3.4.2 ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของเส้นใย	21
3.4.3 ศึกษาสมบัติความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ	21
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล</b>	22
4.1 ลักษณะทางกายภาพเส้นใยนาโนผ่านกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์	22
4.2 การวิเคราะห์สมบัติต่างๆของเส้นใย PVA และ PVA/ZnO	41
<b>บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	51
5.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพ	51
5.2 ผลการศึกษาสมบัติต่างๆ ของเส้นใย PVA และ PVA/ZnO	51
5.3 ข้อเสนอแนะ	52
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	
<b>ภาคผนวก</b>	

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการดำเนินการ	2
2.1 แสดงถึงคุณสมบัติที่ซึ่งค็อกซ์แสดงถึงความเป็นก๊าซเซ็นเซอร์	7
2.2 เปรียบเทียบขนาดและพื้นที่ผิวต่อมวลของเส้นใยชนิดต่างๆ	8
2.3 พอลิเมอร์และตัวทำละลายที่ใช้ในเทคนิคอิเล็กโทรสปิน	12
2.4 แสดงมุมสัมผัสค่าต่างๆ	17
3.1 แสดงค่าตัวแปรที่ศึกษาในการทดลองของสารละลาย PVA และ สารละลาย PVA/ZnO	20
4.1 การสังเคราะห์เส้นใย PVA ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 2.5 %wt อัตราการไหล 1.0 ml/hr	23
4.2 การสังเคราะห์เส้นใย PVA ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 5 %wt อัตราการไหล 1.0 ml/hr	24
4.3 การสังเคราะห์เส้นใย PVA ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 7.5 %wt อัตราการไหล 1.0 ml/hr	25
4.4 การสังเคราะห์เส้นใย PVA ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 10 %wt อัตราการไหล 1.0 ml/hr	26
4.5 การสังเคราะห์เส้นใย PVA ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 2.5 %wt อัตราการไหล 1.5 ml/hr	27
4.6 การสังเคราะห์เส้นใย PVA ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 5 %wt อัตราการไหล 1.5 ml/hr	28
4.7 การสังเคราะห์เส้นใย PVA ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 7.5 %wt อัตราการไหล 1.5 ml/hr	29
4.8 การสังเคราะห์เส้นใย PVA ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 10 %wt อัตราการไหล 1.5 ml/hr	30
4.9 การสังเคราะห์เส้นใย PVA/ZnO ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 2.5 %wt อัตราการไหล 1.0 ml/hr	32
4.10 การสังเคราะห์เส้นใย PVA/ZnO ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 5 %wt อัตราการไหล 1.0 ml/hr	33
4.11 การสังเคราะห์เส้นใย PVA/ZnO ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 7.5 %wt อัตราการไหล 1.0 ml/hr	34
4.12 การสังเคราะห์เส้นใย PVA/ZnO ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 10 %wt อัตราการไหล 1.0 ml/hr	35
4.13 การสังเคราะห์เส้นใย PVA/ZnO ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 2.5 %wt อัตราการไหล 1.5 ml/hr	36
4.14 การสังเคราะห์เส้นใย PVA/ZnO ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 5 %wt อัตราการไหล 1.5 ml/hr	37
4.15 การสังเคราะห์เส้นใย PVA/ZnO ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 7.5 %wt อัตราการไหล 1.5 ml/hr	38
4.16 การสังเคราะห์เส้นใย PVA/ZnO ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 10 %wt อัตราการไหล 1.5 ml/hr	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.17 ภาพมุมสัมผัสของเส้นใย PVA ที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่อัตราการไหล 1.0 ml/hr	46
4.18 ภาพมุมสัมผัสของเส้นใย PVA ที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่อัตราการไหล 1.5 ml/hr	47
4.19 ภาพมุมสัมผัสของเส้นใย PVA ที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่อัตราการไหล 1.0 ml/hr	48
4.20 ภาพมุมสัมผัสของเส้นใย PVA ที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่อัตราการไหล 1.0 ml/hr	49
4.21 ค่ามุมสัมผัสของเส้นใยที่สังเคราะห์ที่เงื่อนไขต่างๆ	50



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ภาพถ่ายจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงภาพพื้นผิวของเส้นใย PVP/ZnO	3
2.2 เส้นใยลักษณะต่างๆที่ใช้เทคนิคอิเล็กโทรสปิน	9
2.3 แสดงการติดตั้งของระบบในกระบวนการอิเล็กโทรสปิน	9
2.4 การประยุกต์ใช้สนามไฟฟ้ากับการจัดเรียงตัวในของเหลวของเทคนิคอิเล็กโทรสปิน	11
2.5 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	15
2.6 แสดงสเปกตรัม FTIR ของ ZnO(A) PVA/ZnO(B) และ PVA(C)	16
2.7 แสดงแสดงมุมสัมผัส (contact angle : $\theta$ ) มุมสัมผัสเป็นมุมระหว่างระนาบ	17
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	18
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	19
3.3 การให้ความร้อนและเขย่าสารผงแป้งโพลีไวนิลแอลกอฮอล์	20
3.4 ระบบอิเล็กโทรสปินที่ใช้ในการทดลอง	21
4.1 ภาพถ่ายของชิ้นงานหลังจากผ่านกระบวนการสังเคราะห์เส้นใยเรียบร้อยแล้ว	22
4.2 ภาพถ่ายเส้นใย PVA ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 2.5 %wt อัตราการไหล 1.0 mL/hr จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	23
4.3 ภาพถ่ายเส้นใย PVA ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 5 %wt อัตราการไหล 1.0 mL/hr จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	24
4.4 ภาพถ่ายเส้นใย PVA ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 7.5 %wt อัตราการไหล 1.0 mL/hr จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	25
4.5 ภาพถ่ายเส้นใย PVA ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 10 %wt อัตราการไหล 1.0 mL/hr จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	26
4.6 ภาพถ่ายเส้นใย PVA ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 2.5 %wt อัตราการไหล 1.5 mL/hr จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	27
4.7 ภาพถ่ายเส้นใย PVA ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 5 %wt อัตราการไหล 1.5 mL/hr จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	28
4.8 ภาพถ่ายเส้นใย PVA ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 7.5 %wt อัตราการไหล 1.5 mL/hr จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	29
4.9 ภาพถ่ายเส้นใย PVA ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 10 %wt อัตราการไหล 1.5 mL/hr จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	30

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย PVA กับความเข้มข้นของ PVA	31
4.11 ภาพถ่ายเส้นใย PVA/ZnO ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 2.5 %wt อัตราการไหล 1.0 ml/hr จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	32
4.12 ภาพถ่ายเส้นใย PVA/ZnO ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 5 %wt อัตราการไหล 1.0 ml/hr จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	33
4.13 ภาพถ่ายเส้นใย PVA/ZnO ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 7.5 %wt อัตราการไหล 1.0 ml/hr จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	34
4.14 ภาพถ่ายเส้นใย PVA/ZnO ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 10 %wt อัตราการไหล 1.0 ml/hr จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	35
4.15 ภาพถ่ายเส้นใย PVA/ZnO ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 2.5 %wt อัตราการไหล 1.5 ml/hr จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	36
4.16 ภาพถ่ายเส้นใย PVA/ZnO ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 5 %wt อัตราการไหล 1.5 ml/hr จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	37
4.17 ภาพถ่ายเส้นใย PVA/ZnO ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 7.5 %wt อัตราการไหล 1.5 ml/hr จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	38
4.18 ภาพถ่ายเส้นใย PVA/ZnO ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 10 %wt อัตราการไหล 1.5 ml/hr จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	39
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย PVA/ZnO กับความเข้มข้นของ PVA	40
4.20 ภาพถ่ายชิ้นงานที่ถูกตัดเป็นขนาดเล็กเพื่อเตรียมนำไปทดสอบคุณสมบัติ	41
4.21 สเปกตรัมการส่องผ่านแสงของเส้นใย PVA	42
4.22 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเส้นใย PVA	42
4.23 สเปกตรัมการส่องผ่านของเส้นใย PVA/ZnO	43
4.24 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเส้นใย PVA/ZnO	43
4.25 สเปกตรัมการส่องผ่านของผง ZnO	44
4.26 สเปกตรัมการดูดกลืนของผง ZnO	44
4.27 สเปกตรัมการส่องผ่านของ PVA,PVA/ZnO,ZnO	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
PVA	polyvinylalcohol
ZnO	Znic Oxide
ml	ปริมาตร มีหน่วยเป็น มิลลิลิตร
%wt	อัตราส่วนต่อปริมาตรทั้งหมด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

เส้นใยนาโนจัดว่าเป็นวัสดุที่น่าสนใจอย่างมากซึ่งเป็นโครงสร้างของวัสดุสังเคราะห์ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยของแข็ง และมีขนาดเล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดระดับตั้งแต่นาโนเมตรถึงหลายไมโครเมตร ทั้งนี้เส้นใยนาโนมีคุณสมบัติที่น่าสนใจมากมาย อาทิเช่น มีพื้นที่ผิวสัมผัสที่มีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับปริมาตร ความหนาแน่นต่ำ มีความแข็งแรง และความทนทานสูง ลักษณะเหล่านี้จึงสามารถทำให้นำไปประยุกต์ใช้ได้เป็นหลายรูปแบบ เช่น เยื่อหุ้มเซลล์ และ ฉนวนความร้อน แม้กระทั่งทางการแพทย์ ได้มีการนำเส้นใยนาโนมาทำเป็นผ้าปิดแผลทำให้แผลหายเร็วมากขึ้น เนื่องจากมีโครงสร้างพื้นที่ผิวสูงจึงทำให้เซลล์มาเกาะได้ดี ในปัจจุบันเส้นใยนาโนสามารถสังเคราะห์ได้จากโพลิเมอร์หลากหลายชนิดเช่น โพลีไวนิลไพโรลิดีน (Polyvinylpyrrolidone: PVP) โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinylalcohol: PVA) พอลิแล็กติก-โค-ไกลโคลิกแอซิด (poly(lactic-co-glycolic acid): PLGA) พอลิแล็กติกแอซิด (Polylactic acid: PLA) เส้นใยเหล่านี้สามารถสังเคราะห์ได้จากหลากหลายเทคนิค และเทคนิคที่ได้รับความนิยมอย่างหนึ่งคืออิเล็กโทรสปินเพราะง่ายและราคาถูกสามารถผลิตเส้นใยได้ต่อเนื่อง และเทคนิคอิเล็กโทรสปินสามารถนำไปใช้ในการสังเคราะห์เส้นใยพอลิเมอร์ได้ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ทั้งนี้ผู้ทำวิจัยสนใจโพลิเมอร์ที่สามารถหาซื้อได้ทั่วไป ราคาถูก และสามารถจัดซื้อได้ภายในประเทศ ซึ่งผู้วิจัยได้เลือก PVA ซึ่งเป็นโพลิเมอร์สังเคราะห์ที่ไม่มีสารพิษ ไม่มีกลิ่น และละลายน้ำ PVA มีความเค้นดึงและความยืดหยุ่นสูง รวมถึงมีปริมาณออกซิเจนที่สูงและมีคุณสมบัติป้องกันการระเหยของกลิ่นและน้ำมัน ทั้งนี้คุณสมบัติดังกล่าวขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นด้วย หากความชื้นสูงขึ้น น้ำก็จะถูกดูดซับได้มากขึ้น โดย PVA เหล่านี้โดยปกติแล้วจะอยู่ในรูปของแข็งซึ่งต้องผ่านกระบวนการหลอมเหลวโดยใช้ตัวทำละลายให้ PVA ละลายเป็นของเหลว และใช้เทคนิคอิเล็กโทรสปินเพื่อสังเคราะห์เส้นใยนาโน เพื่อนำเส้นใยที่ได้มาศึกษา และผู้วิจัยได้เพิ่มซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide: ZnO) ลงไปในกระบวนการเพื่อศึกษาผลของ ZnO ที่มีต่อคุณสมบัติของ PVA โดยผู้วิจัยได้เลือก ZnO ซึ่งมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ความเป็นพิษต่ำ มีเสถียรภาพทางเคมี และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับชีวการแพทย์ได้อีกด้วย โดยผู้วิจัยมีความคาดหวังว่าเส้นใยนาโน PVA/ZnO ที่สังเคราะห์ได้อาจจะสามารถนำไปใช้เป็นก๊าสเซ็นเซอร์

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) สังเคราะห์เส้นใยนาโน PVA และ PVA/ZnO ด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปิน
- 2) ศึกษาคุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของเส้นใย PVA กับ PVA/ZnO
- 3) ศึกษาผลของตัวแปรที่ส่งผลต่อเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาการทำงานของเทคนิคอิเล็กโทรสปินเพื่อสังเคราะห์เส้นใยนาโน
- 2) ศึกษาคุณสมบัติของเส้นใยนาโน PVA และ PVA/ZnO ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกัน อาทิเช่น ความเข้มข้นโดยน้ำหนักของสารละลาย อัตราการไหล
- 3) ศึกษาคุณสมบัติของเส้นใยนาโน PVA และ PVA/ZnO ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพ หมู่ฟังก์ชันของเส้นใย และสมบัติความชอบและไม่ชอบน้ำ

### 1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินการ

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

การดำเนินการ	ระยะเวลา											
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.
ค้นคว้าทฤษฎี	←→											
ศึกษาเครื่องมือ		←→										
สังเคราะห์เส้นใยด้วย PVA			←→									
สังเคราะห์เส้นใยด้วย PVA/ZnO						←→						
ตรวจสอบคุณสมบัติ								←→				
วิเคราะห์และสรุปผล										←→		

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบถึงวิธีการและเครื่องมือในการสังเคราะห์เส้นใยนาโน PVA และ PVA/ZnO ด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปิน
- 2) ทราบคุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมีของเส้นใยนาโน PVA และ PVA/ZnO
- 3) ทราบถึงผลของตัวแปรต่างๆ ที่ปรับเปลี่ยนในงานวิจัย

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึงหลักการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยโดยอธิบายนิยามเบื้องต้นของเส้นใยนาโน คุณสมบัติของสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย เทคนิคอิเล็กโตรสปินที่ใช้ในงานวิจัย รวมถึงเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติ

### 2.1 เส้นใยนาโน (Nanofibers)

เส้นใยนาโน (Nanofibers) [1] เป็นโครงสร้างนาโนของวัสดุสังเคราะห์ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยของของแข็งที่อยู่ในกลุ่มของสารอินทรีย์ และมีขนาดเล็กระดับนาโนเมตรโดยเส้นใยนาโนจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตรถึงหลายไมโครเมตร มีลักษณะซ้อนทับ ดังรูปที่ 2.1 โดยโครงสร้างที่อยู่ในลักษณะของเส้นใยนี้จะเป็นลักษณะของโครงสร้างพื้นฐานที่ทำให้เกิดโครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวที่มีความจำเพาะสูง จึงเป็นโครงสร้างที่มีความสามารถในการยืดหยุ่นได้ดีมีความแข็งแรงและความทนทานที่สูง ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้งาน ได้อย่างหลากหลายด้าน



รูปที่ 2.1 ภาพถ่ายจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงภาพพื้นผิวของเส้นใย PVP/ZnO [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1 จุดเด่นของเส้นใยนาโน

เนื่องจากเป็นเส้นใยที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร จึงทำให้เส้นใยนาโนมีจุดเด่นคือ มีอัตราส่วนระหว่างพื้นผิวต่อปริมาตรสูง (surface-to-volume ratio) และมีขนาดรูพรุนที่เล็กมากส่งผลทำให้มีสมบัติพิเศษต่างๆ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้า หรือสมบัติทางชีวภาพที่ดีมากเหมาะสำหรับงานเฉพาะด้านซึ่งต้องการความได้เปรียบของขนาดที่เล็กมากโดยจุดเด่นที่ได้ของเส้นใยนาโนจะต้องขึ้นอยู่กับวิธีและสารที่นำมาใช้ประดิษฐ์

### 2.1.2 การประยุกต์ใช้เส้นใยนาโน

ปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้เส้นใยนาโนทางด้านต่างๆ อย่างกว้างขวาง เช่น การประยุกต์ใช้งานของเส้นใยนาโนพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ ไม่เป็นพิษ และมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ สำหรับงานทางด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ ผ้าปิดแผล ระบบนำส่งยา ระบบการกรองอย่างละเอียด เป็นต้น ตัวอย่างในการประยุกต์ใช้งานเส้นใยนาโนในแต่ละด้าน มีดังนี้

1) **ด้านการแพทย์** เส้นใยนาโนที่ประดิษฐ์ขึ้นจากพอลิเมอร์ในธรรมชาติเช่น ไคโตซาน (chitosan) ไหม (silk) คอลลาเจน (collagen) รวมทั้งพอลิเมอร์สังเคราะห์บางประเภทสามารถนำมาประยุกต์ใช้ด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ (tissue engineering) และด้านการแพทย์เนื่องจากการมีสมบัติทางชีวภาพ (biocompatibility) และมีสมบัติการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradability) เส้นใยเหล่านี้จึงย่อยสลายตัวเองภายในร่างกายของเราได้เหมือนไหมเย็บแผลที่ใช้ในปัจจุบัน รวมทั้งยังมีการศึกษาเพื่อนำเส้นใยนาโนมาใช้เป็นระบบนำส่งยา (drug delivery system) รวมถึงเครื่องสำอางอีกด้วย

2) **ด้านวัสดุศาสตร์** เส้นใยนาโนบางชนิดถูกนำมาใช้กับวัสดุอื่นเพื่อทำให้มีสมบัติที่ดีขึ้นเช่น เส้นใยนาโนคาร์บอน (carbon nanofiber) ซึ่งมีค่า Young's modulus และความแข็งแรงสูง (strength) อีกทั้งค่าแรงต้านทานแรงดึงตามยาว (tensile strength) ที่สูงกว่าเหล็ก ในขณะที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าเหล็ก จึงสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุเสริมโครงสร้างในวัสดุคอมโพสิตเพื่อให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น นอกจากนี้เส้นใยนาโนเพอโรอิเล็กทริกเซรามิก (ferroelectric ceramic) เช่น เส้นใยนาโนแบเรียมสตรอนเทรียมไททานेट ((Ba,Sr)TiO<sub>3</sub>, BST) [3] สามารถใช้เป็นวัสดุเสริมในวัสดุคอมโพสิตทำให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น และสามารถเพิ่มหน้าที่ความเป็นเพอโรอิเล็กทริกเซรามิกให้แก่วัสดุอีกทางหนึ่งด้วย

3) **ด้านสิ่งแวดล้อมและเทคโนโลยีชีวภาพ** โดยปัจจุบันจากการศึกษาเส้นใยนาโนได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตเสื้อผ้า สิ่งทอ ซึ่งผ้าที่ได้เหล่านี้จะมีความละเอียด และมีขนาดช่องว่างเล็กกว่าผ้าที่ทอจากเส้นใยขนาดใหญ่ อีกทั้งแผ่นเส้นใยที่ถักทอจากเส้นใยที่เล็กในระดับนาโนเมตรสามารถกรองอนุภาคได้จำนวนมาก จึงสามารถนำมาใช้สร้างระบบกรองที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อลดมลภาวะทั้งทางอากาศ และทางน้ำ หรือพัฒนาเป็นระบบกรองน้ำจืดจากน้ำทะเล หรือแม้กระทั่งการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสีย สำหรับการประยุกต์ใช้ในด้านเทคโนโลยีชีวภาพได้ มีการนำเส้นใยนาโนมาใช้เป็นแผ่นเมมเบรนคัดแยก (affinity membrane) สำหรับการแยกโมเลกุลให้บริสุทธิ์โดยอาศัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี หรือหน้าที่เฉพาะทางชีวภาพของโมเลกุลนั้น แผ่นเมมเบรนคัดแยก จะทำการแยกโมเลกุลโดยอาศัยคุณสมบัติความเลือกจำเพาะของเมมเบรน ทำให้เกิดระบบคัดแยกที่มี ข้อดีกว่าการใช้คอลัมน์โครมาโตกราฟีแบบดั้งเดิม นอกจากนี้ยังมีการนำเส้นใยนาโนมาเคลือบบน ชุดเครื่องแบบทหาร เพื่อป้องกันอาวุธทางชีวภาพ สารพิษทางเคมี สารพิษจากนิวเคลียร์

4) **ด้านวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และพลังงาน** ในกรณีที่เส้นใยมีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีหรือ สมบัติของสารกึ่งตัวนำ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์โดยเฉพาะเทคโนโลยีด้านตัว ตรวจจับต่างๆเช่น ตัวตรวจจับก๊าซ (gas sensor) ตัวตรวจจับความร้อน (thermal sensor) เป็นต้น นอกจากนี้เส้นใยนาโนเซรามิกบางชนิดสามารถนำไปใช้ในการพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทน เช่น การ นำเส้นใย  $TiO_2$  ไปเป็นส่วนประกอบหนึ่งในเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อม (dye-sensitized solar cell) หรือการนำเส้นใยโซเดียมโคบอลต์ออกไซด์ ( $NaCo_2O_4$ ) ซึ่งเป็นวัสดุประเภทเทอร์โมอิเล็กทริกส์ (วัสดุ ที่สามารถสร้างไฟฟ้าจากความร้อน) ไปประยุกต์ใช้ทางแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากความร้อนได้ และเส้นใยนาโนสังเคราะห์ที่มีการสังเคราะห์ขึ้นมานั้นโดยมากจะถูกสังเคราะห์เพื่อนำมาใช้คุณสมบัติ พิเศษทางด้าน การนำไฟฟ้า และคุณสมบัติเชิงกลของโครงสร้างเช่น การสังเคราะห์เส้นใยนาโน พอลิ เมอร์อิเล็กทริกส์ เพื่อนำมาใช้ในการผลิตและสร้างอุปกรณ์ระดับนาโนทางอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น การใช้เป็นตัวนำไฟฟ้า สร้างตัวเก็บประจุทรานซิสเตอร์ไดโอด และนำมาผลิตหน่วยความจำ และ ชิพสำหรับคอมพิวเตอร์ รวมทั้งการนำเส้นใยนาโนมาใช้งานด้านเทคโนโลยีการแปลงรูปพลังงาน และ การเก็บพลังงานเช่น แบตเตอรี่หรือในเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell) การใช้เส้นใยนาโนเป็นส่วนผสมใน โครงสร้างสำหรับงานด้านเทคโนโลยีการบินทั้งในอากาศและในอวกาศ โดยเส้นใยนาโนเหล่านี้มี วิธีการประดิษฐ์ได้หลายวิธีส่วนวิธีที่นิยมและมีประสิทธิภาพมากที่สุดคือ เทคนิคอิเล็กโทรสปิน

## 2.2 โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinylalcohol: PVA)

โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ เป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีสมบัติพิเศษคือสามารถย่อยสลายได้โดย วิธีการทางชีวภาพและดีดีไฟ นอกจากนี้ยังสามารถละลายในน้ำได้ จุดหลอมเหลวที่ต่ำ การใช้งานของ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะได้แก่

### 2.2.1 คุณสมบัติการละลายในน้ำ

เป็นตัวช่วยทำให้ระบบอิมัลชันและแขวนลอยต่างๆเช่นชั้นและใช้แผ่นฟิล์มเคลือบ กระดาษโดยจะทำให้มีความใสเหนียวและทนต่อการขีดข่วน

### 2.2.2 โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่ไม่ละลายในน้ำ

สามารถดูดน้ำและความชื้นได้เป็นอย่างดี (ประมาณ 30% โดยน้ำหนัก) จึงใช้เป็น เส้นใยแทนฝ้ายได้ ฝ้ายที่ทำด้วยเส้นใยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์จะสามารถสวมใส่ได้สบาย ซักง่ายทนทาน ต่อการสีกรอ และสามารถคงรูปได้เป็นอย่างดี โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นพอลิเมอร์ที่มีไฮดรอกซิล เป็นองค์ประกอบ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์มีความหนาแน่นเท่ากับ  $1.298 \text{ g/cm}^3$  มีอุณหภูมิของการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature:  $T_g$ ) ประมาณ 85 องศาเซลเซียส หมายความว่าที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส คุณสมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะเป็นของแข็งเปราะเช่นเดียวกับแก้ว พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีความเสถียรทางด้านเคมีที่ดีสามารถเตรียมเป็นเยื่อเลือกผ่านได้และมีความชอบน้ำสูง (High Hydrophilicity) สามารถละลายน้ำ และสารละลายผสมระหว่างน้ำกับแอลกอฮอล์ได้ แต่จะไม่ละลายหรือละลายได้เพียงเล็กน้อยในตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไป ความสามารถในการละลาย ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะผันตามตึกริกการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันและไฮโดรไลซิส โดยที่พอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะละลายในน้ำได้ดีที่สุดเมื่อมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ร้อยละ 88 ในโมเลกุล แต่ถ้ามีร้อยละของหมู่ไฮดรอกซิลสูงกวานี้ ความสามารถในการละลายจะลดต่ำลงตามลำดับ เพราะเกิดพันธะไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นตามลำดับ [4]

## 2.3 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide: ZnO)

มีลักษณะเป็นผงอนุภาคละเอียดสีขาว มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำแถบพลังงานกว้างจะมีพลังงานของแถบพลังงานมากกว่า 3.3 eV ขึ้นไป ซึ่งอุปกรณ์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำของว่างแถบพลังงานกว้าง (Wide band gap semiconductor) นี้จะมีประสิทธิภาพสูงมากในงานที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิสูง (High-temperature) และกำลังสูง (High-power) เนื่องจากที่มีช่องว่างแถบพลังงานที่กว้างจึงสามารถประยุกต์ใช้ในอุณหภูมิที่สูง ได้ดีกว่าสารกึ่งตัวนำประเภทที่ไมใช่แถบพลังงานกว้าง (Wide band gap) และยังเป็นสารที่ใช้ยับยั้งแบคทีเรีย (Anti-bacteria) ไม่มีความเป็นพิษต่อร่างกาย นอกจากฆ่าแบคทีเรียแล้วยังช่วยป้องกันและยับยั้งการแบ่งเซลล์ของแบคทีเรีย ด้วยเหตุนี้ซิงค์ออกไซด์จึงเป็นสารที่สำคัญในการเป็นยาต้านแบคทีเรีย และยังสามารถป้องกันรังสี UV [5]

### 2.3.1 ลักษณะสมบัติเฉพาะ [6]

1) การมีค่าดัชนีหักเหสูง (high refractive index) การทนความร้อนและอุณหภูมิสูงได้ดี โดยซิงค์ออกไซด์มีค่าดัชนีหักเหแสงประมาณ 1.95-2.10 ทำให้วัสดุที่ถูกเคลือบด้วยซิงค์ออกไซด์เกิดการสะท้อนแสงได้ดี และวัสดุที่ถูกเคลือบจะมีความสว่างสูงและมีความเสถียรทางอุณหภูมิแม้ว่าอุณหภูมิสูงถึง 1800 องศาเซลเซียส ทำให้มีสมบัติในการปั่นตัวกลางไฟฟ้าได้ดี ทนความร้อนได้ดี และสามารถนำไปใช้ได้หลายอุตสาหกรรม

2) ลักษณะสมบัติทางแสง จากการที่ซิงค์ออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีค่าช่องว่างของแถบพลังงาน band gap เป็น 3.37eV ซึ่งใกล้เคียงกับค่าช่องว่างของแถบพลังงาน 3.39 eV ของแกเลียมไนไตรด์ (GaN) แต่เนื่องจากซิงค์ออกไซด์มีราคาถูกกว่ามากโดยปัจจุบันนิยมนำมาใช้แทนวัสดุ GaN สำหรับการนำไปใช้เป็นเครื่องมืออิเลคทรอนิกส์ ที่ทำงานในช่วงของแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ดี เช่น LEDs, laser diodes หรือ photodetectors เป็นต้น

3) คุณสมบัติการเป็นผลึกเดี่ยวของซิงค์ออกไซด์ โดยมีลักษณะเป็นสารกึ่งตัวนำแบบ n-type ซึ่งในปัจจุบันได้มีความพยายามในงานวิจัยที่จะพัฒนาผลึกเดี่ยวของซิงค์ออกไซด์ให้เป็นแบบ p-type โดยจากงานวิจัยบางงานได้รายงานถึงการสังเคราะห์ p-type polycrystalline film

เอกสารนี้เป็นเอกสารทงวนไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยผลึกเดี่ยวของซิงค์ออกไซด์สามารถขยายให้มีขนาดใหญ่ขึ้นได้โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และความดัน

4) คุณสมบัติการนำไฟฟ้า ซิงค์ออกไซด์มีลักษณะสมบัติที่สามารถถูกเหนี่ยวนำให้มีลักษณะเป็น ferromagnetic ได้ดีโดยการเจือด้วยธาตุที่มีสมบัติเป็นสารแม่เหล็ก เช่น เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล เป็นต้น หรือ เจือด้วยธาตุที่ไม่มีสมบัติเป็นแม่เหล็ก เช่น ไททาเนียม วานาเดียม เป็นต้น ซึ่งสามารถนำมาใช้งานในเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ได้หลายชนิด นอกจากนี้การเจือด้วยธาตุต่างๆ ยังทำให้ซิงค์ออกไซด์มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้นได้ เช่น การเจือด้วยลิเทียม จะส่งผลให้ซิงค์ออกไซด์มีค่าต้านทานสูง ( $> 10^{12}$  โอห์มเซนติเมตร) การเจือด้วยอินเดียม (In) ทำให้ซิงค์ออกไซด์สามารถนำพาอิเล็กตรอนได้ดี โดยมีความหนาแน่นพาหะได้มากถึง  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  จากลักษณะสมบัติเหล่านี้ทำให้ซิงค์ออกไซด์นำไปใช้กันอย่างแพร่หลายในเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์

5) การเป็นสารเร่งปฏิกิริยา (photocatalyst) เป็นลักษณะเฉพาะของซิงค์ออกไซด์ในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสง ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในเวลาอันสั้น ซึ่งมาจากคุณสมบัติของการสารเป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ของซิงค์ออกไซด์

### 2.3.2 คุณสมบัติความเป็นก๊าซเซอร์

จากงานวิจัยของ B. Adhikari และคณะ [7] ได้รายงานถึงคุณสมบัติของธาตุสารเคมี สารประกอบ สารอินทรีย์ และ สารอนินทรีย์ ที่มีคุณสมบัติตรวจจับ หรือมีคุณสมบัติที่สามารถเป็นเซ็นเซอร์ได้ โดยซิงค์ออกไซด์เป็นสารประกอบตัวหนึ่งที่ได้รายงานไว้ในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 2.1 แสดงถึงคุณสมบัติที่ซิงค์ออกไซด์แสดงถึงความเป็นก๊าซเซ็นเซอร์

ประเภทของเซ็นเซอร์	วัสดุ	การวิเคราะห์
Semiconducting metal oxide sensors	ZnO	H <sub>2</sub> , CO, O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, AsH <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , NH <sub>3</sub> , CH <sub>4</sub> , Alcohol

## 2.4 กระบวนการอิเล็กโทรสปิน (Electrospinning)

กระบวนการอิเล็กโทรสปิน [8] เป็นเทคนิคที่สามารถสังเคราะห์เส้นใยที่มีขนาดเล็กซึ่งเตรียมได้จากสารละลายหรือสารหลอมเหลวของพอลิเมอร์ได้มากกว่า 200 ชนิด เส้นใยที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 10 นาโนเมตรถึงมากกว่า 1 ไมโครเมตร และมีข้อดีต่างๆดังนี้

1) เส้นใยที่สังเคราะห์ได้มีอัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรสูง (surface to volume ratio) และมีความเป็นรูพรุนสูง ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวของแผ่นเส้นใยของแผ่นเส้นใยที่สังเคราะห์ได้มีความเหมาะสมในการใช้งานหลากหลายด้าน เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคการขึ้นรูปเส้นใยด้วยเทคนิคอื่น ๆ ดังแสดงที่ตารางที่ 2.2 พบว่าเส้นใยที่สังเคราะห์ได้จากเทคนิคอิเล็กโทรสปินมีขนาดเล็กกว่าอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบขนาดและพื้นที่ผิวต่อมวลของเส้นใยชนิดต่างๆ

ชนิดของเส้นใย	ขนาดของเส้นใย ( $\mu\text{m}$ )	พื้นที่ผิวต่อมวลของเส้นใย ( $\text{m}^2/\text{g}$ )
เส้นใยจากเทคนิคอิเล็กโทรสปิน	0.05	80.00
เส้นใยสปันบอนด์ (spunbond fiber)	20.00	0.20
เส้นใยที่ได้จากกระบวนการ melt blown	2.00	2.00

2) สามารถเลือกวัสดุที่สังเคราะห์เป็นแผ่นเส้นใยได้หลากหลาย เช่น พอลิเมอร์ เซรามิกส์ หรือแม้กระทั่งโลหะ

3) สามารถประยุกต์รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ได้หลากหลายเพื่อสนองต่อความต้องการในการผลิตเส้นใยในหลากหลายรูปแบบ ทั้งการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยภายหลังการสังเคราะห์เส้นใย หรือการประยุกต์การติดตั้งเพื่อใช้ในการผลิตเส้นใยแบบแกนใน - เปลือกนอก (core - shell fiber)

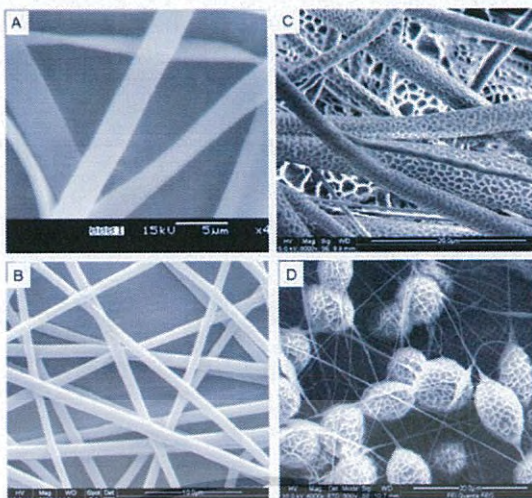
4) สะดวกและง่ายต่อการรวมวัสดุตั้งต้นหลายชนิดเข้าด้วยกันเพื่อเตรียมเป็นสารละลายเพื่อใช้เทคนิคอิเล็กโทรสปิน

5) เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอื่นๆ การอิเล็กโทรสปิน ใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำ เป็นกระบวนการที่ง่าย ค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์และติดตั้งถูก สามารถใช้งานได้ตั้งแต่ระดับห้องปฏิบัติการถึงในระดับอุตสาหกรรม

6) สามารถสังเคราะห์เส้นใยลงบนวัสดุรองรับหลากหลายชนิด เช่น โลหะ แก้ว เส้นใยไมโครและน้ำ

7) มีกำลังการผลิตสูง ทำให้หลายบริษัทเลือกใช้เทคนิคอิเล็กโทรสปินในการผลิตเส้นใยนาโนระดับอุตสาหกรรมและสามารถผลิตเส้นใยได้หลากหลายรูปแบบดังแสดงนรูปที่ 2.3

8) เส้นใยสังเคราะห์ที่ได้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในหลายด้าน เช่น ใช้ผลิตวัสดุทางการแพทย์ วัสดุสำหรับกรองสาร ด้านอิเล็กทรอนิกส์ เกษตรกรรม อุตสาหกรรมสิ่งทอ การนำไปประยุกต์ใช้เป็นระบบนำส่งยา และอื่นๆ

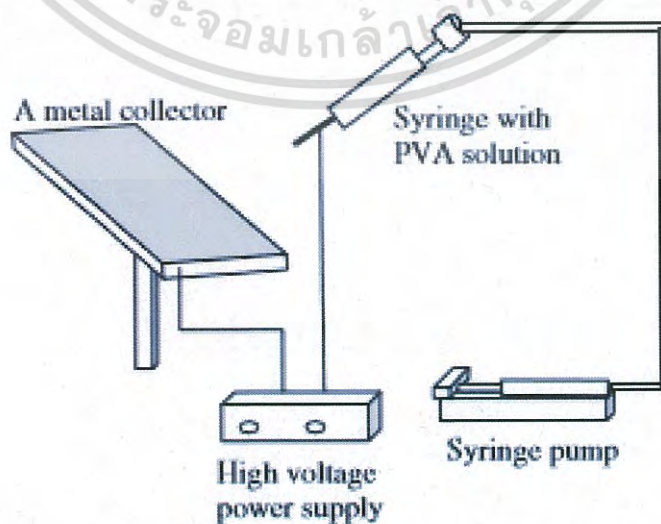


รูปที่ 2.2 เส้นใยลักษณะต่างๆที่ใช้เทคนิคอิเล็กโตรสปิน [9]

- A) เส้นใยแบบแบน
- B) เส้นใยแบบเรียบ
- C) เส้นใยแบบหลุม
- D) เส้นใยแบบมีลูกบิด

#### 2.4.1 หลักการทำงานของกระบวนการอิเล็กโตรสปิน

การทำงานของกระบวนการอิเล็กโตรสปินจะอาศัยแรงทางไฟฟ้าที่เกิดจากการให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงแก่ระบบ ในระบบพื้นฐานของกระบวนการอิเล็กโตรสปินมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ 3 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง (high voltage power supply) หลอดบรรจุสารละลายที่ติดเข็มโลหะ (syringe with needle) และวัสดุรองรับที่เป็นโลหะ (metal collector) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 แสดงการติดตั้งของระบบในกระบวนการอิเล็กโตรสปิน [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาตรให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อยังไม่ให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงแก่ระบบ สารละลายจะรวมตัวกันเป็นหยดรูปร่างครึ่งทรงกลมที่บริเวณปลายเข็มโลหะเนื่องจากแรงตึงผิวของสารละลาย (surface tension) แต่เมื่อให้ความต่างศักย์กำลังสูงแก่ระบบ จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าครอบคลุมส่วนปลายของเข็มโลหะและมีประจุเกิดขึ้นที่ผิวของสารละลาย เกิดแรงผลักทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic repulsion) ในทิศตรงกันข้ามกับแรงตึงผิว ถ้าสนามไฟฟ้ามีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดแรงผลักมากกว่าแรงตึงผิวจะส่งผลให้รูปร่างครึ่งทรงกลมของสารละลายที่อยู่ปลายเข็มยืดอกออกเป็นรูปร่างทรงกลวยที่เรียกว่า กรวยเทลเลอร์ (Taylor's cone) และเมื่อสนามไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบมีค่ามากขึ้นจะเกิดแรงขับเคลื่อนให้สารละลายพุ่งออกมาเป็นลำ (solution jet) โดยลำของสารละลายนี้จะยืดอกจนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงถึงระดับนาโนเมตร แล้วตกลงบนวัสดุรองรับ

## 2.4.2 ผลึกเหลว

ผลึกเหลว [11] ก็คือสารที่อยู่ในสถานะพิเศษระหว่าง ของแข็งกับของเหลวนั่นเอง กล่าวคือ มันจะมีความเป็นระเบียบในการจัดเรียงโมเลกุลในบางทิศทาง คล้ายกับของแข็ง แต่ขณะเดียวกันสามารถไหลตัวไปได้ในบางทิศทาง คล้ายกับของเหลว นักพฤกษศาสตร์ชาวออสเตรียชื่อ ฟรีดริช ไรนิตเซอร์ (Friedrich Reinitzer) เป็นผู้ค้นพบผลึกเหลวเป็นครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1860 ในสารอินทรีย์ คอเลสตรีน เบนโซเอท (Cholesteryl benzoate) เมื่อความร้อนกับสารนี้ มันจะเปลี่ยนสถานะจากของแข็ง ไปเป็นกึ่งอนัญงเหียงคล้ายหมอก ซึ่งก็คือผลึกเหลวนั่นเอง และเมื่อให้ความร้อนต่อไปก็จะกลายเป็นของเหลว ปัจจุบันผลึกเหลวที่พบส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ ออกไซด์ของโลหะบางชนิดที่มีน้ำอยู่ด้วย เช่น สนิมเหล็ก ( $Fe_2O_3 \cdot xH_2O$ ) ก็จัดว่าเป็นผลึกเหลวชนิดหนึ่งเช่นเดียวกัน ผลึกเหลวแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มตามวิธีการเกิด

1) ผลึกเหลวชนิดเทอร์โมโทรปิก (thermotropic liquid crystal) เกิดจากการให้ความร้อน อย่างเช่นคอเลสตรีน เบนโซเอท เป็นต้น ผลึกเหลวชนิดนี้ยังแบ่งได้เป็นอีก 2 ชนิด คือ ชนิดเส้นด้าย (nematic) และชนิดไอหรือเมือก (smectic)

2) ผลึกเหลวชนิดไลโอโทรปิก (lyotropic liquid crystal) ทำให้เกิดขึ้นโดยการผสมสารบางชนิด เช่น สบู่หรือผงซักฟอก, กรดไขมัน, เกลือของกรดไขมัน ฯลฯ ลงในน้ำหรือตัวทำละลายที่มีขั้ว

สมบัติที่น่าสนใจอย่างมากของผลึกเหลวก็คือ เมื่อให้พลังงานจากภายนอก เช่น ความร้อน, แรงแต้น หรือสนามแม่เหล็กไฟฟ้า กับผลึกเหลว จะทำให้การจัดเรียงตัวของ โมเลกุลของผลึกเหลวเกิดการเปลี่ยนแปลง ส่งผลทำให้สมบัติทางแสง เช่น สี, ความโปร่งแสง รวมถึงการยอมให้แสงที่มีขั้ว (polarized light) ผ่านได้เปลี่ยนไปด้วยเช่นกัน ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายประการ ที่เรารู้จักกันดีก็คือ ใช้ทำเป็นจอแสดงผลในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรือที่เราเรียกกันติดปากว่าจอ LCD นอกจากนั้นแล้ว ผลึกเหลวยังสามารถใช้งานทางการแพทย์ เพื่อตรวจความผิดปกติในร่างกาย รวมถึงในการตรวจสอบชิ้นส่วนโลหะแบบไม่ทำลาย (nondestructive testing) ได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 การประยุกต์ใช้สนามไฟฟ้ากับการจัดเรียงตัวในของเหลวของเทคนิคอิเล็กโตรสปิน

### 2.4.3 ตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการอิเล็กโตรสปิน

1) น้ำหนักโมเลกุลและความหนืดของสารละลาย สมบัติของสารละลายเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์เส้นใยนาโนอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งขนาดและรูปร่างของเส้นใย น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นขึ้นกับความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ หากสารละลายนั้นมีความเข้มข้นที่เท่ากัน น้ำหนักโมเลกุลจะเป็นตัวแปรสำคัญที่จะกำหนดความหนืดของสารละลาย เนื่องจากพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จะมีส่วนเกี่ยวข้องกัน(entanglement) ของสายโซ่พอลิเมอร์มาก ทำให้ในสารละลายพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเคลื่อนไหวสายโซ่ได้ยาก แรงผลักทางไฟฟ้าจึงมีปริมาณไม่มากพอที่จะทำให้สารละลายพอลิเมอร์ถูกผลักรอกจากปลายของเข็มโลหะ ทั้งนี้เมื่อลดความหนืดของสารละลายลงจะส่งผลทำให้เส้นใยที่ได้มีเม็ดลูกปัดบนเส้นใยน้อย อาจจะได้เส้นใยที่มีลักษณะเป็นเส้นใยที่เรียวยาวด้วย (smooth fibers) โดยความหนืดต่ำที่สุดของสารละลายที่เหมาะสมสำหรับเทคนิคอิเล็กโตรสปิน คือความหนืดที่ไม่ทำให้เส้นใยที่ได้มีเม็ดลูกปัด

2) แรงตึงผิว (surface tension) เม็ดลูกปัดที่เกิดขึ้นบนเส้นใยในกระบวนการอิเล็กโตรสปินนั้นจะขึ้นกับปัจจัยเรื่องแรงตึงผิวของสารละลาย โดยกระบวนการอิเล็กโตรสปินในช่วงแรกสารละลายพอลิเมอร์ที่อยู่บริเวณปลายของเข็มโลหะจะมีลักษณะเป็นทรงกลม ทั้งนี้เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าแก่ระบบจะส่งผลให้เกิดประจุทางไฟฟ้าขึ้นบริเวณหยดของสารละลาย เมื่อประจุไฟฟ้ามากพอที่จะเอาชนะแรงตึงผิวของสารละลายได้ หยดของพอลิเมอร์จะเกิดการยืดออกกลายเป็นเส้นใย ตัวทำละลายที่ถูกใช้ในกระบวนการอิเล็กโตรสปินส่วนใหญ่มีแนวโน้มเป็นตัวทำละลายที่มีแรงตึงผิวต่ำ แต่ในกรณีที่ใช้ น้ำเป็นตัวทำละลาย น้ำจะเป็นตัวทำละลายที่มีแรงตึงผิวสูง เทคนิคอิเล็กโตรสปินโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายจะส่งผลให้ลำของสารละลายพอลิเมอร์เกิดการแตกออก ทำให้พบลักษณะของเม็ดลูกปัดบนเส้นใย การแทนที่น้ำด้วยตัวทำละลายอื่นๆหรือการผสมด้วยตัวทำละลายที่มีแรงตึงผิวต่ำ จะส่งผลทำให้แรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์ที่เตรียมได้ลดลง ทำให้เส้นใยที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเส้นใยที่เรียวยาวขึ้น

3) ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย (solution conductivity) การยึดออกของสารละลายพอลิเมอร์ในเทคนิคอิเล็กโทรสปินจะขึ้นกับปริมาณประจุที่อยู่บนสารละลาย กล่าวคือเมื่อสารละลายที่เตรียมได้มีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงขึ้น จะทำให้เกิดประจุในสารละลายพอลิเมอร์มาก ส่งผลให้ลำของสารละลายพอลิเมอร์เคลื่อนที่ออกจากปลายปลายเข็มโลหะได้ นอกจากนี้ตัวทำละลายที่นำมาเตรียมเป็นสารละลายพอลิเมอร์หากมีค่าการนำไฟฟ้าสูงจะส่งผลให้ได้เส้นใยที่สังเคราะห์ได้มีปริมาณเม็ดลูกปัดที่พบบนเส้นใยน้อยกว่าเส้นใยที่สังเคราะห์ได้จากสารละลายที่มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำ โดยพอลิเมอร์และตัวทำละลายที่นิยมใช้ในการเตรียมสารละลายสำหรับกระบวนการอิเล็กโทรสปิน แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 พอลิเมอร์และตัวทำละลายที่ใช้ในเทคนิคอิเล็กโทรสปิน

พอลิเมอร์	ตัวทำละลาย
เรยอน (rayon)	อะซิโตน และ แอลกอฮอล์ (alcohol)
อะคริลิกเรซิน (acrylic resin)	ไดเมทิลฟอมาไมด์ (dimethyl formamide:DMF)
สไตรีน-บิวตะไดอิน-สไตรีน ไตรบล็อก (styrene-butadiene-styrene triblock)	72:25เตตระไฮโดรฟูแรน (tetrahydrofuran:THF)/ ไดเมทิลฟอมาไมด์ (dimethyl formamide:DMF)
พอลิอะคริโรไนไตรด์ (PAN)	ไดเมทิลฟอมาไมด์ (dimethyl formamide:DMF)
พอลิอะคริโรไนไตรด์ (PAN), พอลิเอทีลีนออกไซด์ (PEO)	คลอโรฟอร์ม

โดยการเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายจะเป็นการเพิ่มคุณภาพของเส้นใยที่สังเคราะห์ได้ในกรณีที่เส้นใยมีลักษณะเป็นลูกปัดบนเส้นใยนั้น การกระตุ้นสารละลายด้วยเกลือจะทำให้ลักษณะของเม็ดลูกปัดที่พบบนเส้นใยลดลง เนื่องจากสารละลายพอลิเมอร์มีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น การเติมเกลือจะทำให้ลำของสารละลายพอลิเมอร์มีการยึดตัวออกที่ดีขึ้น

4) อุณหภูมิของของสารละลาย (Temperature of Solvent) เป็นที่เข้าใจกันดีว่าเมื่อสารละลายมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น จะส่งผลให้ความหนืดของสารละลายลดลง และเมื่อความหนืดของสารละลายลดลงเส้นใยที่ประดิษฐ์จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ลดลงตามไปด้วย อย่างไรก็ตามขีดจำกัดในการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่สารละลายกลับส่งผลในอีกแง่หนึ่งด้วย กล่าวคือเมื่อสารละลายมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ตัวทำละลายมีอัตราการระเหยที่เร็วมากขึ้น ทำให้ลำของสารละลายพอลิเมอร์เกิดการยึดยาวออกได้ไม่มากพอ เส้นใยที่ได้จึงมีลักษณะเป็นลูกปัดบนเส้นใย ทั้งนี้นอกจากการเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลต่อขนาดของเส้นใยแล้ว ยังส่งผลต่อลักษณะของเส้นใยที่ประดิษฐ์ได้อีกด้วย

5) ความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage) ศักย์ไฟฟ้ามีความสำคัญต่อกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โทรสปินมาก โดยปกติค่าศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบของอิเล็กทรอนิกส์โทรสปินควรมีค่ามากกว่า 6 kV เพื่อให้หยดของสารละลายบริเวณปลายเข็มฉีดยาเปลี่ยนรูปร่างจนมีลักษณะเป็นกรวยเทเลอร์ ทั้งนี้การปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามีอิทธิพลอย่างมากในกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โทรสปิน ตั้งแต่กระทบต่อจำนวนประจุที่ให้กับสารละลาย ถ้าอัตราเร็วในการฉีดสารละลายถูกควบคุมให้คงที่การปรับเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าให้เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้กรวยกรวยเทเลอร์มีขนาดเล็กลง และมีความเสถียรน้อย โดยจะทำให้ประจุเกิดบนสารละลายมากขึ้น ซึ่งเป็นการลดระยะเวลาการเคลื่อนที่ของสารละลายจากปลายเข็มโลหะไปยังวัสดุรองรับ แต่มีแนวโน้มทำให้เส้นใยที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะของเม็ดลูกปัดบนเส้นใยมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้จากการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่ระบบจะส่งผลให้ระยะเวลาในการยืดออกมีมากพอ และในระบบที่มีการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้ามีปริมาณต่ำจนเกินไป ประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของสารละลายมีมากพอ ความเร็วในการเปลี่ยนจากหยดของสารละลายเป็นลำของพอลิเมอร์จะลดต่ำลงทำให้ไม่พบลักษณะของเส้นใยของพอลิเมอร์บนวัสดุรองรับ

6) อัตราการไหลของสารละลาย (Feed Rate) โดยทั่วไปอัตราการไหลของสารละลายจะไม่ส่งผลต่อเส้นใยที่ได้จากกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โทรสปินมากนัก อย่างไรก็ตามอัตราการไหลของสารละลายควรมีความสมดุลกับการอัตราการระเหยออกของตัวละลายในระหว่างที่สารละลายเคลื่อนที่จากปลายเข็มโลหะสู่วัสดุรองรับ การเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายจะทำให้ขนาดของเส้นใยเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายเสมือนกับเป็นการเพิ่มปริมาณของสารละลายที่ออกจากปลายเข็มโลหะและเพิ่มรัศมีของลำพอลิเมอร์ซึ่งนำไปสู่การลดความเสถียร ทำให้เส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้น

7) ชนิดของวัสดุรองรับ (Type of Collector) วัสดุรองรับที่ใช้ส่งผลโดยตรงต่อปริมาณของเส้นใยที่ได้รับและการจัดเรียงของเส้นใย สำหรับวัสดุรองรับที่นำไฟฟ้าไม่ดี จะส่งผลทำให้ปริมาณเส้นใยที่เคลื่อนตัวไปยังวัสดุรองรับมีปริมาณไม่มากพอ ทำให้เส้นใยที่พบบริเวณวัสดุรองรับมีปริมาณน้อย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้วัสดุรองรับที่นำไฟฟ้าได้ดีจะทำให้เกิดการส่งผ่านของประจุไฟฟ้าได้ดีขึ้น เส้นใยที่ถูกพบบนวัสดุรองรับจะมีมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากความสามารถในการนำไฟฟ้าของวัสดุรองรับแล้ว การเลือกใช้งานวัสดุรองรับแบบหมุนยังส่งผลทำให้เส้นใยที่ทำการสังเคราะห์มีการจัดเรียงตัวที่ดีกว่าวัสดุรองรับแบบตั้งฉากอีกด้วย

8) ระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะกับวัสดุรองรับ ระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะกับวัสดุรองรับเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลถึงระยะเวลาในการเคลื่อนที่ของลำพอลิเมอร์ก่อนจะตกลงสู่วัสดุรองรับ ถ้าให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ ความเข้มของสนามไฟฟ้าจะแปรผกผันกับอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะกับวัสดุรองรับ โดยทั่วไปเทคนิคอิเล็กทรอนิกส์โทรสปินจะจัดให้ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับมีระยะความกว้างประมาณ 10-15 เซนติเมตร ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมที่ทำให้ตัวทำละลายเกิดการระเหยออกและเกิดเป็นเส้นใยขึ้นบนวัสดุรองรับ ถ้าระยะห่างระหว่าง

ปลายเข็มโลหะกับวัสดุรองรับน้อยจนเกินไปตัวทำละลายจะไม่มีเวลาไม่มากพอที่จะระเหยออกจากลำพอลิเมอร์จนหมด เส้นที่ได้จึงเกิดการหลอมติดกันและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่มาก

9) **ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มโลหะ** ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มโลหะเป็นอีกปัจจัยหนึ่งซึ่งเป็นตัวกำหนดขนาดของเส้นใยที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการอิเล็กโตรสปิน ทั้งนี้การเลือกใช้เข็มโลหะที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กย่อมส่งผลทำให้เส้นใยที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเล็กย่อมส่งผลทำให้เส้นใยที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กตามไปด้วย อย่างไรก็ตามการเลือกใช้เข็มโลหะที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กจนเกินไปมักจะเกิดปัญหาในการผลึกสารละลายพอลิเมอร์เคลื่อนที่ออกจากเข็มโลหะไปยังวัสดุรองรับ เนื่องจากหยดของสารละลายที่มีขนาดเล็กจะมีแรงตึงผิวสูง ทำให้แรงทางไฟฟ้าไม่มากพอจะผลักให้สารละลายเคลื่อนที่ออกจากปลายเข็มโลหะ จึงมักจะทำให้เกิดการอุดตันของสารละลายพอลิเมอร์บริเวณเข็มโลหะได้ง่าย

10) **ค่าความชื้นสัมพัทธ์** สภาพแวดล้อมมีผลต่อสารละลายที่เตรียมได้และทำให้ลักษณะของเส้นใยที่สังเคราะห์ผ่านเทคนิคอิเล็กโตรสปินเปลี่ยนแปลงไป โดยอุณหภูมิและความชื้นในสิ่งแวดล้อมจะส่งผลต่ออัตราการระเหยของตัวทำละลายและลักษณะทางกายภาพของเส้นใยที่เตรียมได้ ทั้งนี้จะพบลักษณะเม็ดลูกบิดบนเส้นใยที่เตรียมภายใต้สภาวะที่มีความชื้นที่มากกว่า 50% เมื่อความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์เท่ากัน ความชื้นที่มากกว่าจะส่งผลให้เส้นใยที่สังเคราะห์ได้มีรูพรุนบนพื้นผิวของเส้นใย เนื่องจากในกระบวนการเกิดการควบแน่นของหยดน้ำขนาดเล็กบริเวณพื้นผิวบริเวณของลำพอลิเมอร์

ดังนั้นการนำกระบวนการอิเล็กโตรสปินมาใช้สังเคราะห์เส้นใยขนาดเล็กจึงต้องคำนึงถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด เพื่อให้ได้เส้นใยที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ซึ่งหากมีระบบที่ควบคุมปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ได้อย่างสะดวกและแม่นยำแล้ว จะส่งผลให้การสังเคราะห์เส้นใยขนาดเล็กด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

## 2.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

ในการศึกษาและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์นั้น กล้องจุลทรรศน์มีความสำคัญและบทบาทเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถใช้ศึกษาลักษณะของสารตัวอย่างในระดับที่เล็กลงไปมากกว่าที่จะมองเห็นด้วยตาเปล่า และจำแนกรายละเอียดได้ดังจะเห็นได้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical or light microscopes) เป็นอุปกรณ์สำคัญของห้องปฏิบัติการเกือบทุกแห่ง ไม่ว่าจะเป็นห้องปฏิบัติการทางการแพทย์ ชีววิทยา เคมี วัสดุศาสตร์ และอื่นๆอีกจำนวนมากในขณะที่ความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์มีการพัฒนาขึ้นนักวิทยาศาสตร์ยังมีความต้องการที่จะศึกษาในรายละเอียดที่ระดับเล็กลงไปเรื่อยๆ แต่ก็ประสบปัญหาตามมาเนื่องจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงไม่สามารถตอบสนองความต้องการ ทำให้นักวิทยาศาสตร์คิดค้นและประดิษฐ์เครื่องมือขึ้นมาเพื่อทดแทนกล้องจุลทรรศน์แบบแสง นั่นเป็นเหตุผลทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดถูกมาพัฒนาขึ้นมาใช้แทนที่สาเหตุก็เนื่องจากข้อจำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงเอง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดประกอบด้วยโครงสร้างที่สำคัญ 5 ส่วนคือ

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



รูปที่ 2.5 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเหมาะกับการสร้างภาพของกลุ่มสัญญาณในการศึกษาโครงสร้างของพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่าง การสร้างภาพจะต้องบีบลำอิเล็กตรอนด้วยเลนส์ ออพเจกทีฟจนมีลักษณะเป็น Electron probe โฟกัสลงบนชิ้นตัวอย่าง สัญญาณอิเล็กตรอนจึงเกิดเฉพาะจุดที่ปลาย Electron probe ตกกระทบการสร้างภาพไมโครไม่สามารถฉายไปบนฉากเรืองแสง จึงจำเป็นต้องอาศัยระบบส่องกราดบนที่กำหนดบนชิ้นตัวอย่างและเลือกรับสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดใดจุดต่อจุดที่ปลาย Electron probe เลื่อนไปเพื่อนำไปสร้างภาพขยายที่เข้าจังหวะกัน (Synchronize) บนพื้นที่ของจอภาพแคโทดเรย์

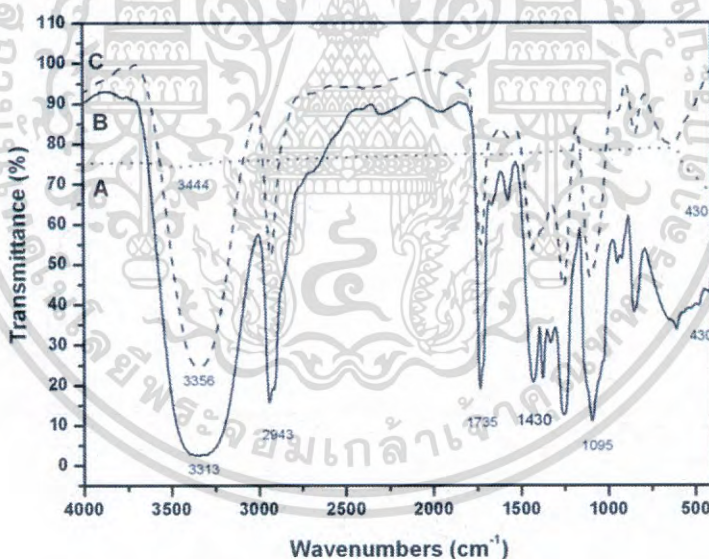
ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจึงต้องมีชุดขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าควบคุมการส่องกราด (Scanning coil) และชุดกำเนิดภาพเพิ่มขึ้นชุดควบคุมการส่องกราดจะทำหน้าที่บังคับให้ Electron probe เคลื่อนในแนวแกนนอนและแกนตั้งบนระนาบของตัวอย่างเป็นพื้นที่ สี่เหลี่ยมผืนผ้าคล้ายระบบสแกนของโทรทัศน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 เครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด: Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy

เครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรดเป็นหนึ่งในเทคนิคทางด้าน Infrared Spectroscopic ที่มีประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพันธะเคมีในโมเลกุล รวมถึงสามารถบอกถึงปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารผสมตัวอย่างที่ไม่ทราบชนิด ใช้ระยะเวลาในการตรวจสอบน้อยกว่าเทคนิคอื่นๆ ทั้งที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊ส FTIR ได้เข้ามาแทนที่ Dispersive Infrared Spectrometer เมื่อไม่นานมานี้ เพื่อใช้ในงานที่ต้องการความรวดเร็วและความไวสูง นอกจากนี้ยังช่วยให้สามารถวิเคราะห์สารในช่วงที่ Dispersive วิเคราะห์ได้ยากหรือเกือบจะเป็นไปไม่ได้

2.6.1 การดูดกลืนรังสีอินฟราเรด ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ อะตอมทุกตัวในโมเลกุลจะมีการสั่นอยู่ตลอดเวลา เมื่อความถี่ของการสั่นมีค่าเท่ากับความถี่ของรังสีอินฟราเรดที่ฉายมายังโมเลกุล โมเลกุลก็จะดูดกลืนรังสี จำนวนแถบการดูดกลืนทั้งหมดที่สังเกตได้จะมีค่าไม่เท่ากับการสั่นมูลฐานของโมเลกุลทั้งหมด โดยจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เพราะจะมีบางแถบพลังงานที่ไม่มีการตอบสนองต่อพลังงานในช่วงรังสีอินฟราเรด



รูปที่ 2.6 แสดงสเปกตรัม FTIR ของ ZnO(A) PVA/ZnO(B) และ PVA(C) [5]

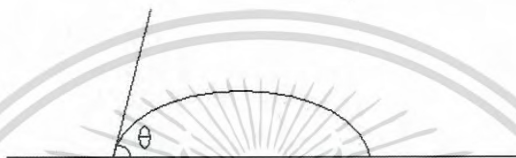
2.6.2 การประยุกต์ใช้งาน โดยทั่วไป IR/FTIR นั้นจะใช้ในการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์ทุกประเภทและ สารประกอบอนินทรีย์ บางประเภท รวมถึงหมู่ฟังก์ชันในสารตัวอย่าง เช่น อินทรีย์วัตถุ สี โลหะ พอลิเมอร์ พลาสติก เรซิน สารเคลือบ ยา ยาฆ่าแมลง หรือสารปนเปื้อน เป็นต้น โดยทำการจับคู่สเปกตรัมของสารประกอบที่ต้องการเข้ากับสเปกตรัมอ้างอิง IR/FTIR ยังใช้ในการตรวจวัดโครงสร้างและสัญญาณของไอโซเมอร์ ใช้ในการบ่งบอกองค์ประกอบของสารที่เป็นตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดปฏิกิริยาหรือใช้ในการศึกษาการเคลื่อนไหวของปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังใช้ในการตรวจสอบปริมาณของสารผสม สารที่ไม่บริสุทธิ์หรือสารที่เติมเข้าไปประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ และในบางกรณีนั้นสามารถตรวจสอบได้ต่ำถึง 0.01 เปอร์เซ็นต์

## 2.7 มุมสัมผัส (Contact Angle)

ความสำคัญในการยึดติดกันของวัสดุสองชิ้น แรงยกตัว หรือ capillary effect ก็เป็นผลมาจากภาวะการเปียก และแรงพื้นผิวที่กำหนดภาวะการเปียก รูปร่างของหยดของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง จะมีรูปร่างเป็นรูปทรงหยดน้ำค้าง



รูปที่ 2.7 แสดงแสดงมุมสัมผัส (contact angle : $\theta$ ) มุมสัมผัสเป็นมุมระหว่างระนาบ

มุมสัมผัสนี้ก็จะบอกแนวโน้มที่หยดของเหลวจะกระจายตัวในพื้นที่ผิวเรียบของของแข็ง โดยมุมสัมผัสจะแปรผกผันกับความสามารถในการกระจายตัวของของเหลว

มุมสัมผัสที่น้อยกว่า  $90^\circ$  โดยทั่วไปจะหมายถึง ภาวะการเปียกของพื้นผิวอยู่ในระดับดีมาก และของเหลวจะกระจายออกไปเป็นบริเวณกว้าง มุมสัมผัสที่มากกว่า  $90^\circ$  โดยทั่วไปจะหมายถึงภาวะการเปียกของพื้นผิวอยู่ในระดับไม่ดี และของเหลวจะสัมผัสกับพื้นผิวของเหลวเพียงเล็กน้อยและจะก่อตัวเป็นทรงหยดน้ำค้าง

สำหรับกรณีถ้าของเหลวนั้นเป็นน้ำ, พื้นผิวที่มีการกระจายตัวได้ดีจะถูกเรียกว่า hydrophilic และพื้นผิวที่มีการกระจายตัวไม่ดีจะถูกเรียกว่า hydrophobic พื้นผิวที่มีการกระจายตัวไม่ดีอย่างยิ่งยวด (Super hydrophobic) จะให้มุมสัมผัสที่มากกว่า  $150^\circ$  ทำให้มีหน้าสัมผัสระหว่างของเหลวและของแข็งน้อยมากๆ ซึ่งกรณีนี้บางครั้งถูกเรียกว่า "Lotus effect" หรือ "ปรากฏการณ์ใบบัว" [12]

ตารางที่ 2.4 แสดงมุมสัมผัสค่าต่างๆ

มุมสัมผัส	ระดับของมุมสัมผัส
$\theta = 0$	ชอบน้ำมาก
$0 < \theta < 90^\circ$	ชอบน้ำ
$90^\circ \leq \theta < 180^\circ$	ไม่ชอบน้ำ
$\theta = 180^\circ$	ไม่ชอบน้ำมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยส่วนที่ 1 จะเป็นการเตรียมสารละลาย PVA และนำสารละลายที่เตรียมไปสังเคราะห์เป็นเส้นใย PVA ส่วนที่ 2 เตรียมสาร PVA และเติมผง ZnO ลงไปในสารละลายเพื่อสังเคราะห์เป็นเส้นใย PVA/ZnO โดยทั้งสองส่วนใช้วิธีการอิเล็กโทรสปินเพื่อสังเคราะห์เส้นใย และในส่วนที่ 3 นำตัวอย่างเส้นใยที่สังเคราะห์ได้ไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของเส้นใยที่ได้จากการสังเคราะห์ โดยศึกษาสมบัติทางกายภาพ หมู่ฟังก์ชันของเส้นใย และสมบัติความชอบและไม่ชอบน้ำ

#### 3.1 สารเคมี

- โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinylalcohol: PVA) บริษัท เคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด
- ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide: ZnO) บริษัท เคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด
- น้ำปอดประจุ (Di water)

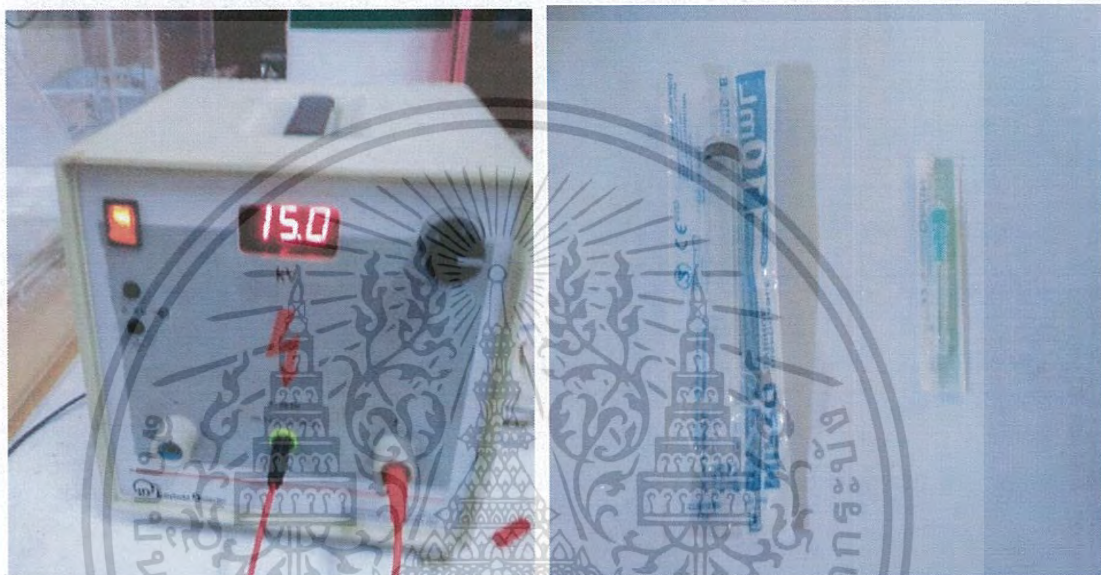


รูปที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์

- เครื่องให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง (High voltage power supply) ขนาด 0-25 kV ของบริษัท LEYBOLD DIDACTIC GMBH ประเทศเยอรมนี
- เครื่องควบคุมการไหลของสารละลาย (Syringe pump) ของบริษัท New Eva Pump system, Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา
- กระบอกฉีดยา (Syringe) ขนาด 10 mL ของบริษัท Nipro ประเทศไทย
- เข็มฉีดยาโลหะ (Needle) เบอร์ 21 ขนาด 0.8x25mm ของบริษัท Nipro ประเทศไทย



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานและวิธีการทดลอง

#### การเตรียมสารละลายเพื่อใช้สังเคราะห์เส้นใย

ในการเตรียมสารละลายโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ โดยการเตรียมนั้นเบื้องต้นจากบริษัทผู้ผลิตจะได้เป็นผงแป้งโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ซึ่งต้องนำมาละลายกับตัวทำละลาย ซึ่งโพลีไวนิลแอลกอฮอล์จะละลายในน้ำสะอาดซึ่งในการทดลองผู้วิจัยได้เลือกได้น้ำปลอดประจุเป็นตัวทำละลาย เพื่อรักษาความสะอาดและป้องกันสารปนเปื้อนที่มากับแหล่งน้ำอื่น นำโพลีไวนิลแอลกอฮอล์มาทำละลายกับน้ำปลอดประจุผ่านการให้อุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส และเขย่าสารต่อเนื่องตลอด เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



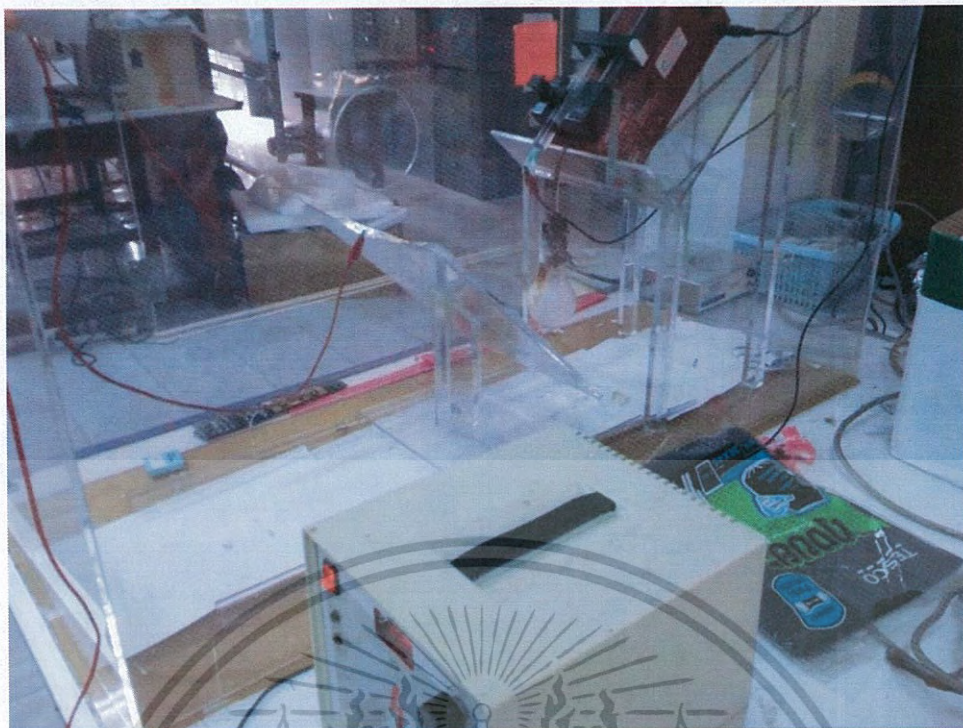
รูปที่ 3.3 การให้ความร้อนและเขย่าสารผงแป้งโพลีไวนิลแอลกอฮอล์

เมื่อได้สารละลายโพลีไวนิลแอลกอฮอล์แล้ว นำสารละลายที่ได้บรรจุลงในกระบอกฉีดยาขนาด 10 mL และต่อเข้ากับเครื่องควบคุมการไหลของสารละลาย เชื่อมต่อเครื่องให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงโดยใช้ศักย์ไฟฟ้าที่ 15 kV และนำวัสดุรองรับเส้นใยที่สังเคราะห์ได้กำหนดระยะระหว่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับเท่ากับ 15 cm เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยศึกษาตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องในการสังเคราะห์ตามตารางที่ 3.1

ตาราง 3.1 แสดงค่าตัวแปรที่ศึกษาในการทดลองของสารละลาย PVA และ สารละลาย PVA/ZnO

ตัวแปรที่ศึกษา	ค่าที่ศึกษา
ค่าความเข้มข้นของสาร	2.5, 5, 7.5, และ 10%wt
อัตราการไหลของสารละลาย	1.0 และ 1.5 mL/hr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการทดลอง

### 3.4 การตรวจสอบสมบัติต่างๆของเส้นใย PVA และ PVA/ZnO

#### 3.4.1 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของเส้นใย

เช่น ลักษณะพื้นผิว ลักษณะเส้นใย การจัดเรียงตัวของเส้นใย การกระจายตัวของเส้นใย และขนาดของเส้นใย ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

#### 3.4.2 ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของเส้นใย

เพื่อศึกษาความแตกต่างของหมู่ฟังก์ชันของเส้นใย PVA กับ PVA/ZnO และผลกระทบจากการเตรียมสารละลาย ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีต่างๆ การดูดกลืนแสง และการส่องผ่านของแสง

#### 3.4.3 ศึกษาสมบัติความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ

ศึกษาด้วยเทคนิคการวัดมุมสัมผัสของน้ำ โดยนำชิ้นงานมาค่อยๆหยดด้วยน้ำกลั่น และถ่ายภาพของหยดน้ำหลังจากผ่านไป 1 วินาที

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการเตรียมสารละลายเพื่อสังเคราะห์เส้นใย โดยใช้เทคนิคอิเล็กโตรสปิน ตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ที่เงื่อนไขต่างๆ และส่วนที่สองเป็นการตรวจสอบสมบัติต่างๆของเส้นใย PVA และ PVA/ZnO ที่เตรียมได้

#### 4.1 ลักษณะทางกายภาพเส้นใยนาโนผ่านกระบวนการอิเล็กโตรสปิน

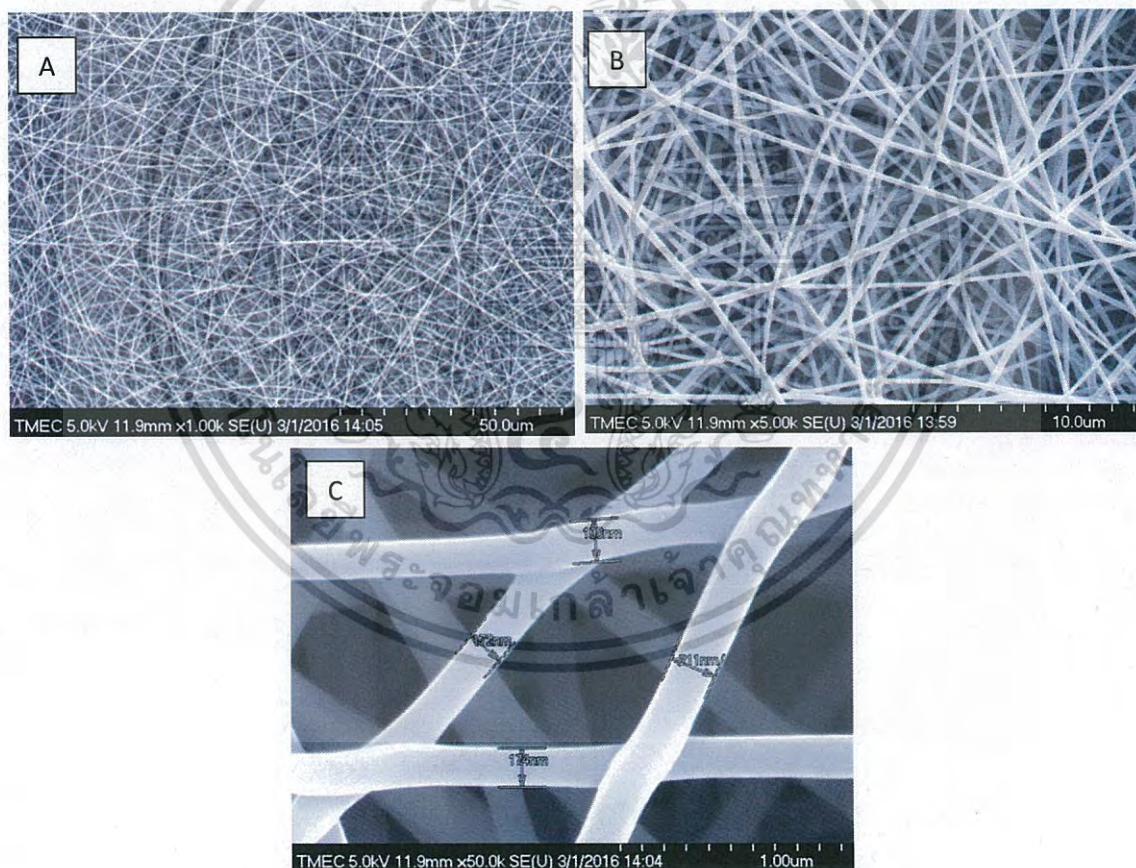
กระบวนการอิเล็กโตรสปินสามารถผลิตเส้นใยที่มีขนาดในระดับนาโนเมตรไปจนถึงระดับไมโครเมตร ทั้งนี้การปรับเปลี่ยนสภาวะต่างๆในการขึ้นรูปจะส่งผลต่อลักษณะเส้นใยที่เตรียมได้ โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อเส้นใยในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ความเข้มข้น อัตราการไหล และการเติม ZnO โดยจะนำเสนอลักษณะทางกายภาพของเส้นใยที่สังเคราะห์ได้จากการถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แล้วนำภาพถ่ายที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายของชิ้นงานหลังจากผ่านกระบวนการสังเคราะห์เส้นใยเรียบร้อยแล้ว

ตารางที่ 4.1 การสังเคราะห์เส้นใย PVA ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 2.5 %wt อัตราการไหล 1.0 ml/hr

ตัวแปรในการทดลอง	เงื่อนไข
ความเข้มข้น PVA	2.5 %wt
การเจือสาร	ไม่มี
ระยะเวลาการกวนสาร	2 ชั่วโมง
อุณหภูมิที่ใช้ในการกวนสาร	80 °C
ระยะระหว่างแผ่นสะสม	15 เซนติเมตร
ค่าความต่างศักย์	15 kV
อัตราการไหล	1.0 ml/hr
ชนิดแผ่นสะสม	อลูมิเนียมฟอยล์
ระยะเวลากระบวนการอิเล็กโทรสปิน	1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายเส้นใย PVA ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 2.5 %wt อัตราการไหล 1.0 ml/hr

จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

A) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 1000 เท่า

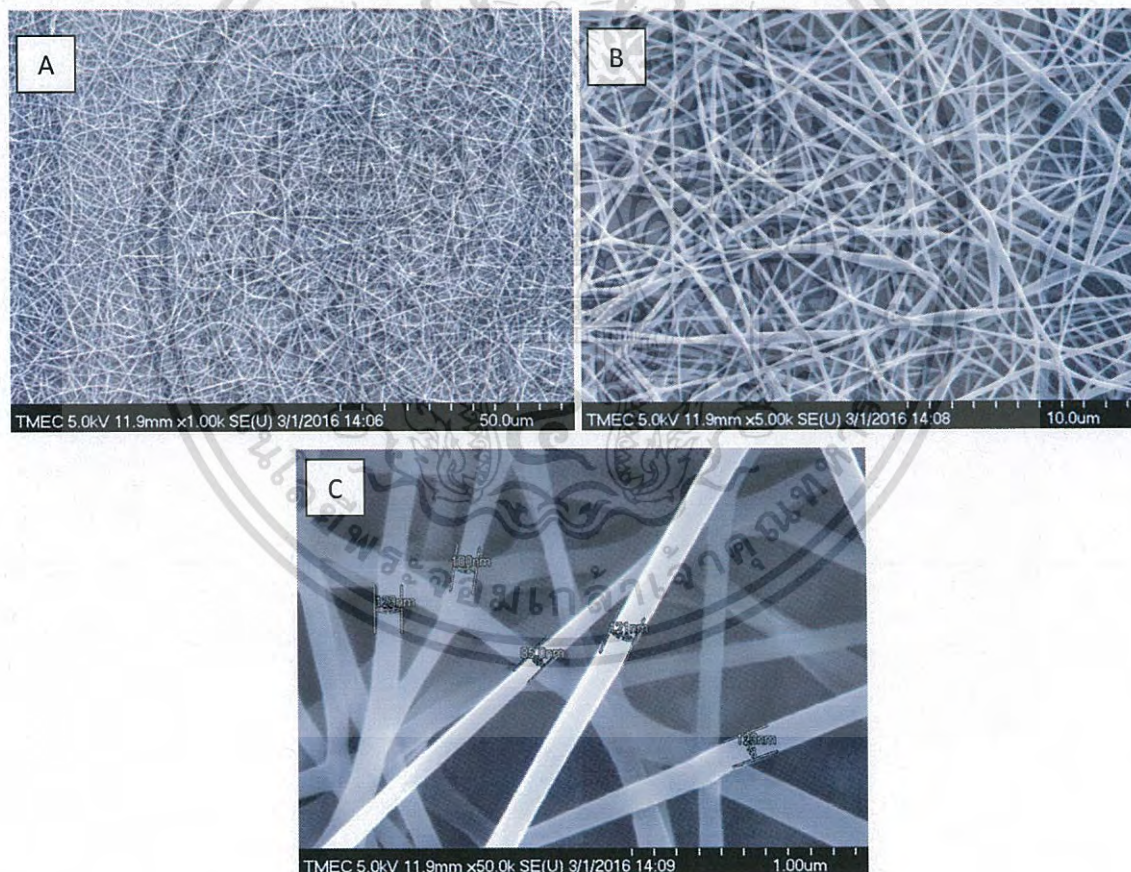
B) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 5000 เท่า

C) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 50000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 การสังเคราะห์เส้นใย PVA ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 5 %wt อัตราการไหล 1.0 ml/hr

ตัวแปรในการทดลอง	เงื่อนไข
ความเข้มข้น PVA	5 %wt
การเจือสาร	ไม่มี
ระยะเวลาการกวนสาร	2 ชั่วโมง
อุณหภูมิที่ใช้ในการกวนสาร	80 °C
ระยะระหว่างแผ่นสะสม	15 เซนติเมตร
ค่าความต่างศักย์	15 kV
อัตราการไหล	1.0 ml/hr
ชนิดแผ่นสะสม	อลูมิเนียมฟอยล์
ระยะเวลากระบวนการอิเล็กโตรสปิน	1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายเส้นใย PVA ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 5 %wt อัตราการไหล 1.0 ml/hr จากห้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

A) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 1000 เท่า

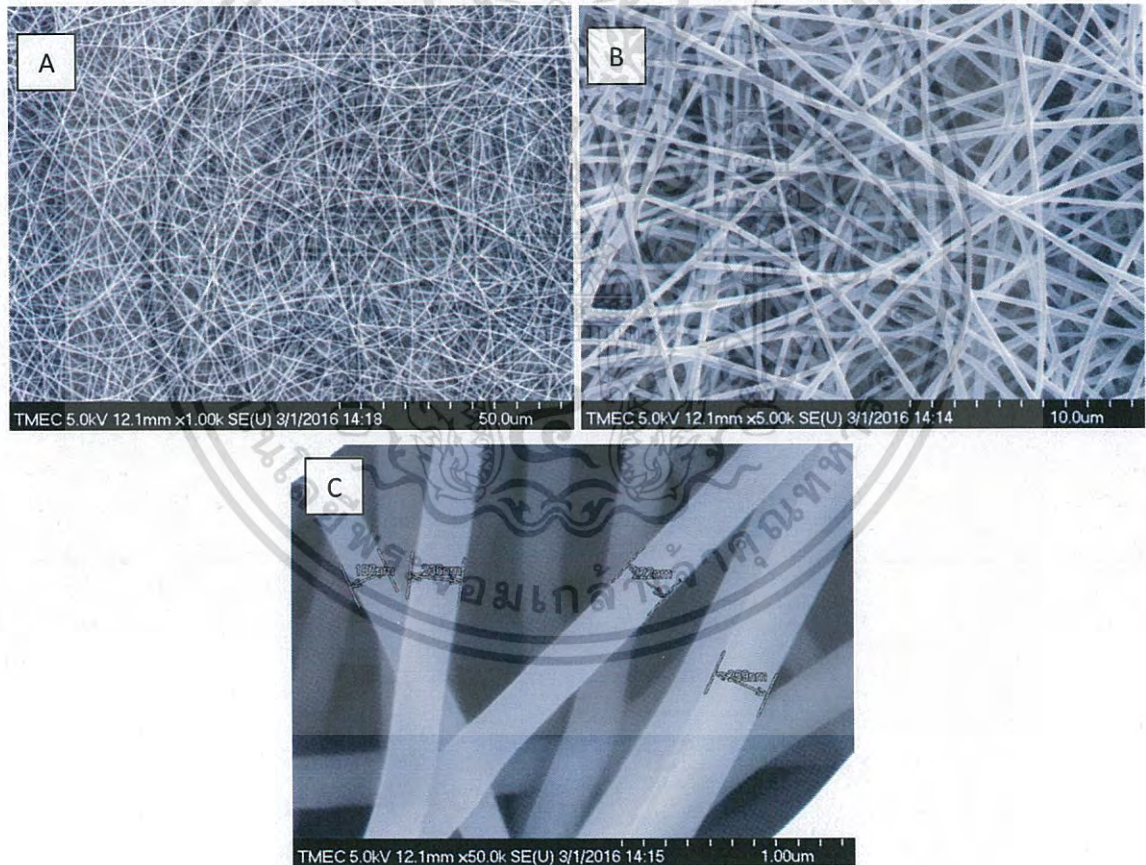
B) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 5000 เท่า

C) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 50000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 การสังเคราะห์เส้นใย PVA ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 7.5 %wt อัตราการไหล 1.0 ml/hr

ตัวแปรในการทดลอง	เงื่อนไข
ความเข้มข้น PVA	7.5 %wt
การเจือสาร	ไม่มี
ระยะเวลาการกวนสาร	2 ชั่วโมง
อุณหภูมิที่ใช้ในการกวนสาร	80 °C
ระยะระหว่างแผ่นสะสม	15 เซนติเมตร
ค่าความต่างศักย์	15 kV
อัตราการไหล	1.0 ml/hr
ชนิดแผ่นสะสม	อลูมิเนียมฟอยล์
ระยะเวลากระบวนการอิเล็กโทรสปิน	1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายเส้นใย PVA ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 7.5 %wt อัตราการไหล 1.0 ml/hr จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

A) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 1000 เท่า

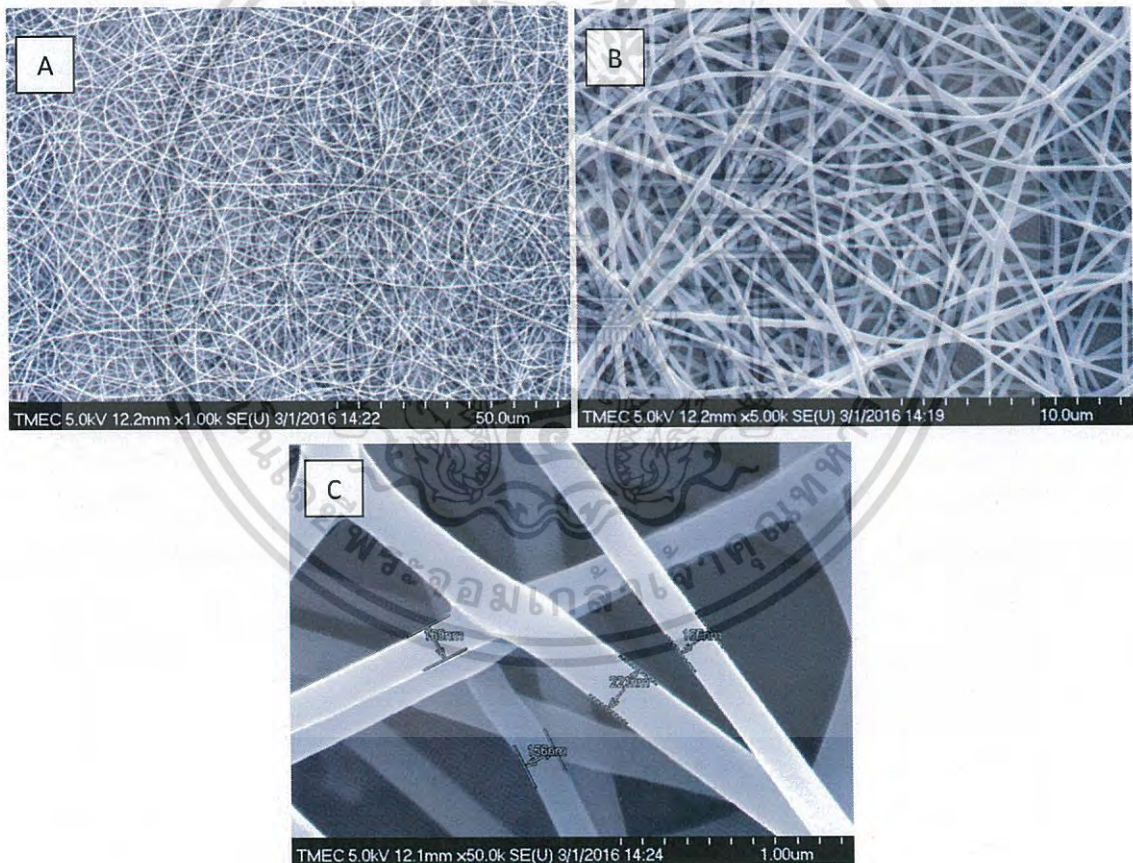
B) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 5000 เท่า

C) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 50000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 การสังเคราะห์เส้นใย PVA ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 10 %wt อัตราการไหล 1.0 ml/hr

ตัวแปรในการทดลอง	เงื่อนไข
ความเข้มข้น PVA	10 %wt
การเจือสาร	ไม่มี
ระยะเวลาการกวนสาร	2 ชั่วโมง
อุณหภูมิที่ใช้ในการกวนสาร	80 °C
ระยะระหว่างแผ่นสะสม	15 เซนติเมตร
ค่าความต่างศักย์	15 kV
อัตราการไหล	1.0 ml/hr
ชนิดแผ่นสะสม	อลูมิเนียมฟอยล์
ระยะเวลากระบวนการอิเล็กโทรสปิน	1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายเส้นใย PVA ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 10 %wt อัตราการไหล 1.0 ml/hr

จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

A) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 1000 เท่า

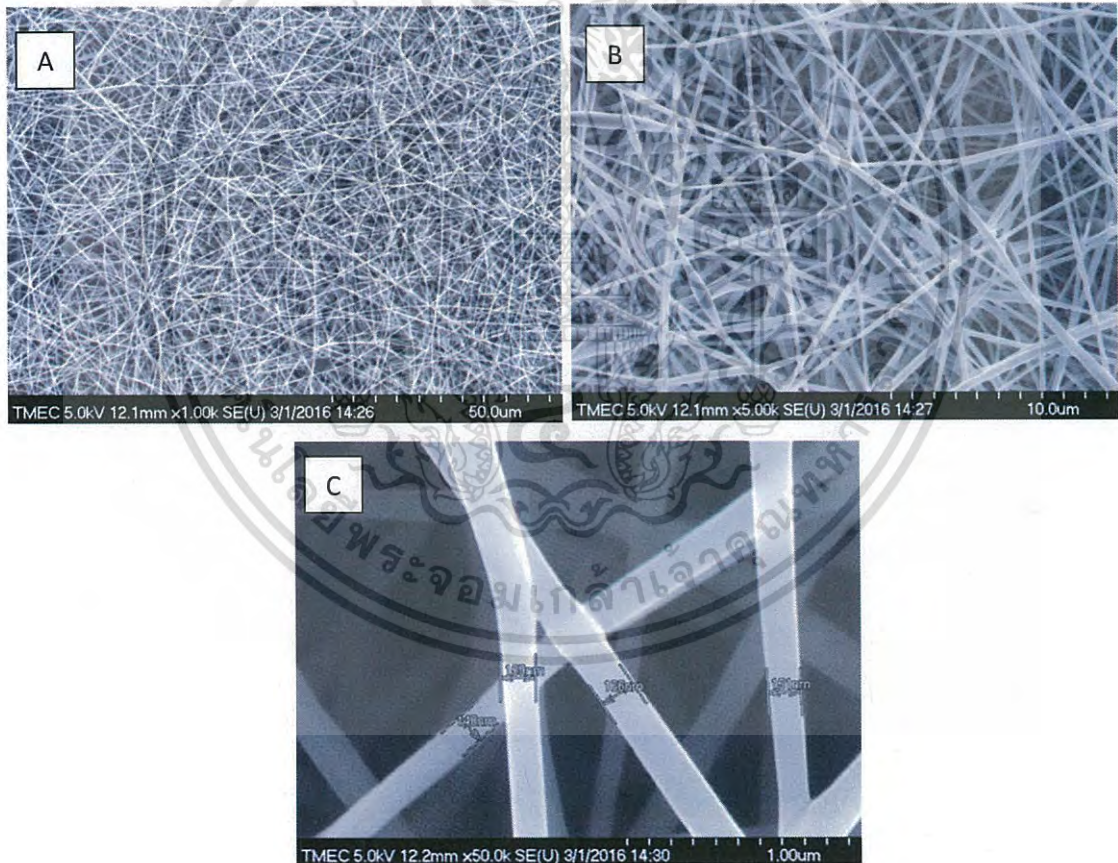
B) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 5000 เท่า

C) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 50000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 การสังเคราะห์เส้นใย PVA ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 2.5 %wt อัตราการไหล 1.5 ml/hr

ตัวแปรในการทดลอง	เงื่อนไข
ความเข้มข้น PVA	2.5 %wt
การเจือสาร	ไม่มี
ระยะเวลาการกวนสาร	2 ชั่วโมง
อุณหภูมิที่ใช้ในการกวนสาร	80 °C
ระยะระหว่างแผ่นสะสม	15 เซนติเมตร
ค่าความต่างศักย์	15 kV
อัตราการไหล	1.5 ml/hr
ชนิดแผ่นสะสม	อลูมิเนียมฟอยล์
ระยะเวลากระบวนการอิเล็กโทรสปิน	1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายเส้นใย PVA ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 2.5 %wt อัตราการไหล 1.5 ml/hr

จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

A) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 1000 เท่า

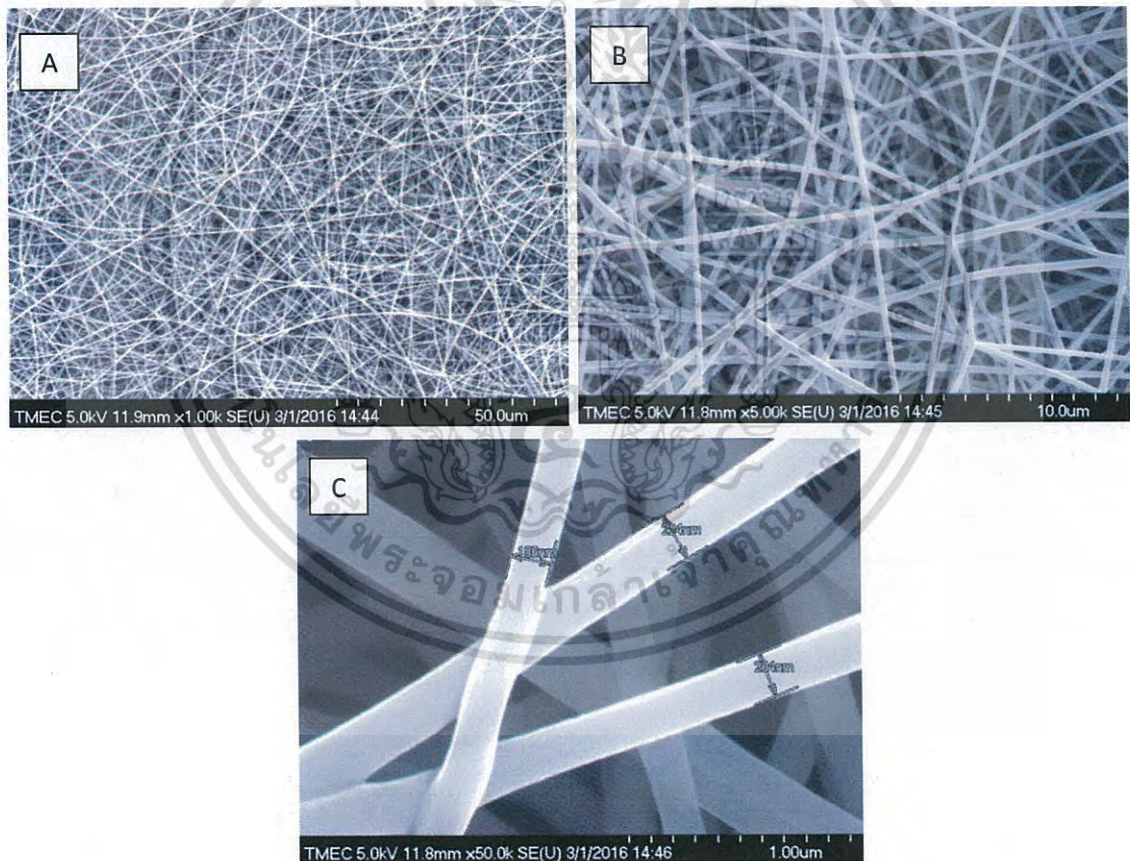
B) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 5000 เท่า

C) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 50000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 การสังเคราะห์เส้นใย PVA ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 5 %wt อัตราการไหล 1.5 ml/hr

ตัวแปรในการทดลอง	เงื่อนไข
ความเข้มข้น PVA	5 %wt
การเจือสาร	ไม่มี
ระยะเวลาการกวนสาร	2 ชั่วโมง
อุณหภูมิที่ใช้ในการกวนสาร	80 °C
ระยะระหว่างแผ่นสะสม	15 เซนติเมตร
ค่าความต่างศักย์	15 kV
อัตราการไหล	1.5 ml/hr
ชนิดแผ่นสะสม	อลูมิเนียมฟอยล์
ระยะเวลากระบวนการอิเล็กโทรสปิน	1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายเส้นใย PVA ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 5 %wt อัตราการไหล 1.5 ml/hr

จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

A) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 1000 เท่า

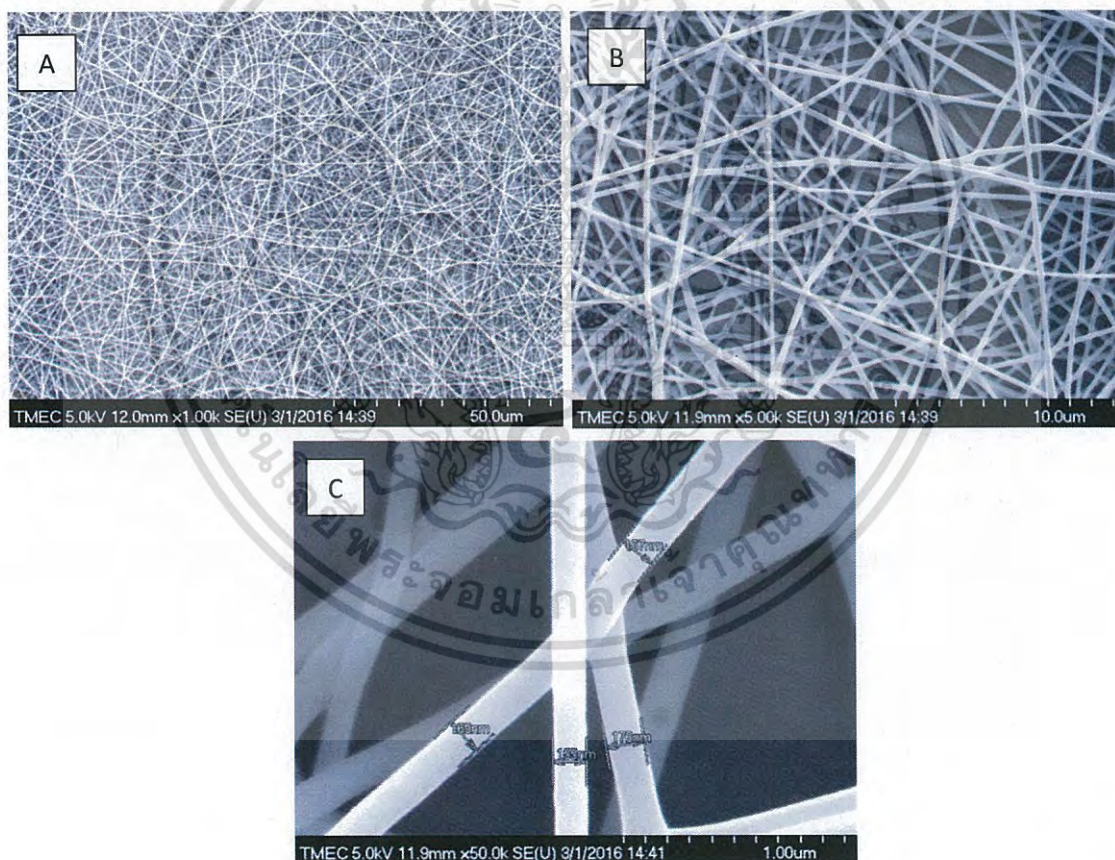
B) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 5000 เท่า

C) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 50000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 การสังเคราะห์เส้นใย PVA ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 7.5 %wt อัตราการไหล 1.5 ml/hr

ตัวแปรในการทดลอง	เงื่อนไข
ความเข้มข้น PVA	7.5 %wt
การเจือสาร	ไม่มี
ระยะเวลาการกวนสาร	2 ชั่วโมง
อุณหภูมิที่ใช้ในการกวนสาร	80 °C
ระยะระหว่างแผ่นสะสม	15 เซนติเมตร
ค่าความต่างศักย์	15 kV
อัตราการไหล	1.5 ml/hr
ชนิดแผ่นสะสม	อลูมิเนียมฟอยล์
ระยะเวลากระบวนการอิเล็กโทรสปิน	1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายเส้นใย PVA ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 7.5 %wt อัตราการไหล 1.5 ml/hr จากห้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

A) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 1000 เท่า

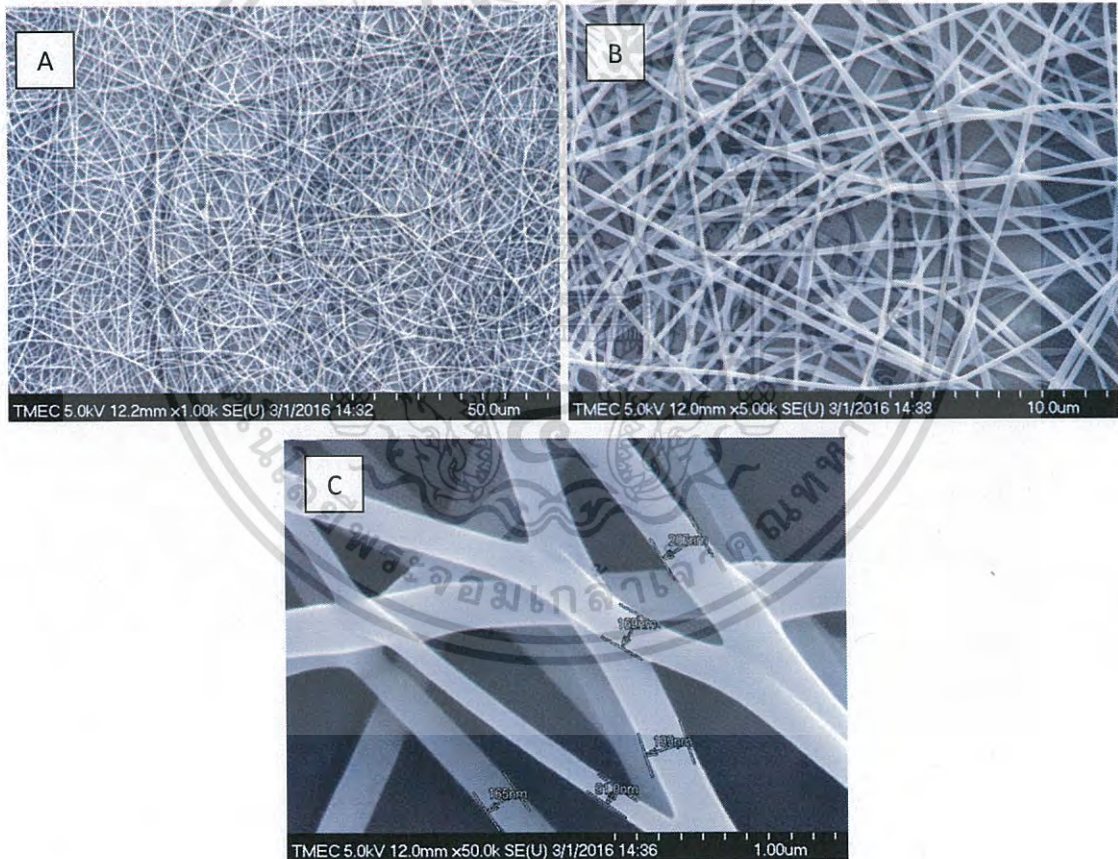
B) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 5000 เท่า

C) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 50000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 การสังเคราะห์เส้นใย PVA ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 10 %wt อัตราการไหล 1.5 ml/hr

ตัวแปรในการทดลอง	เงื่อนไข
ความเข้มข้น PVA	10 %wt
การเจือสาร	ไม่มี
ระยะเวลาการกวนสาร	2 ชั่วโมง
อุณหภูมิที่ใช้ในการกวนสาร	80 °C
ระยะระหว่างแผ่นสะสม	15 เซนติเมตร
ค่าความต่างศักย์	15 kV
อัตราการไหล	1.5 ml/hr
ชนิดแผ่นสะสม	อลูมิเนียมฟอยล์
ระยะเวลากระบวนการอิเล็กโทรสปิน	1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายเส้นใย PVA ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 10 %wt อัตราการไหล 1.5 ml/hr จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

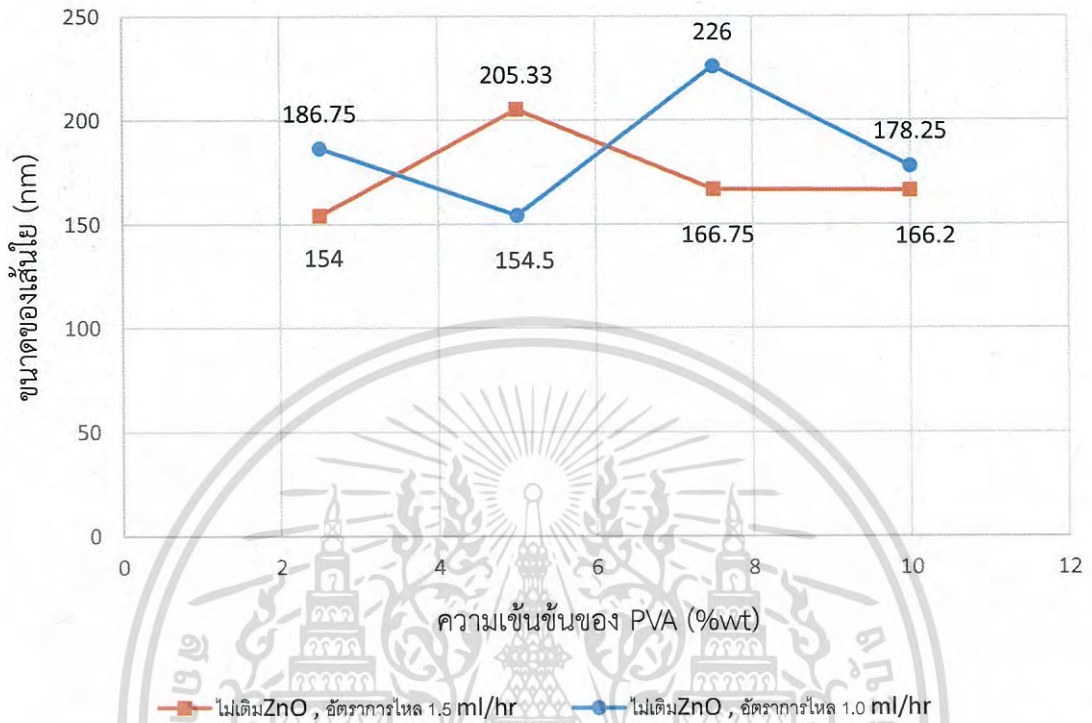
A) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 1000 เท่า

B) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 5000 เท่า

C) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 50000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางข้างต้นแสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะทำให้ทราบถึงขนาดของเส้นใยในเงื่อนไขต่างๆจากการทดลองซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามเงื่อนไขที่ปรับเปลี่ยน โดยจะรายงานถึงผลการทดลองในรูปที่ 4.10

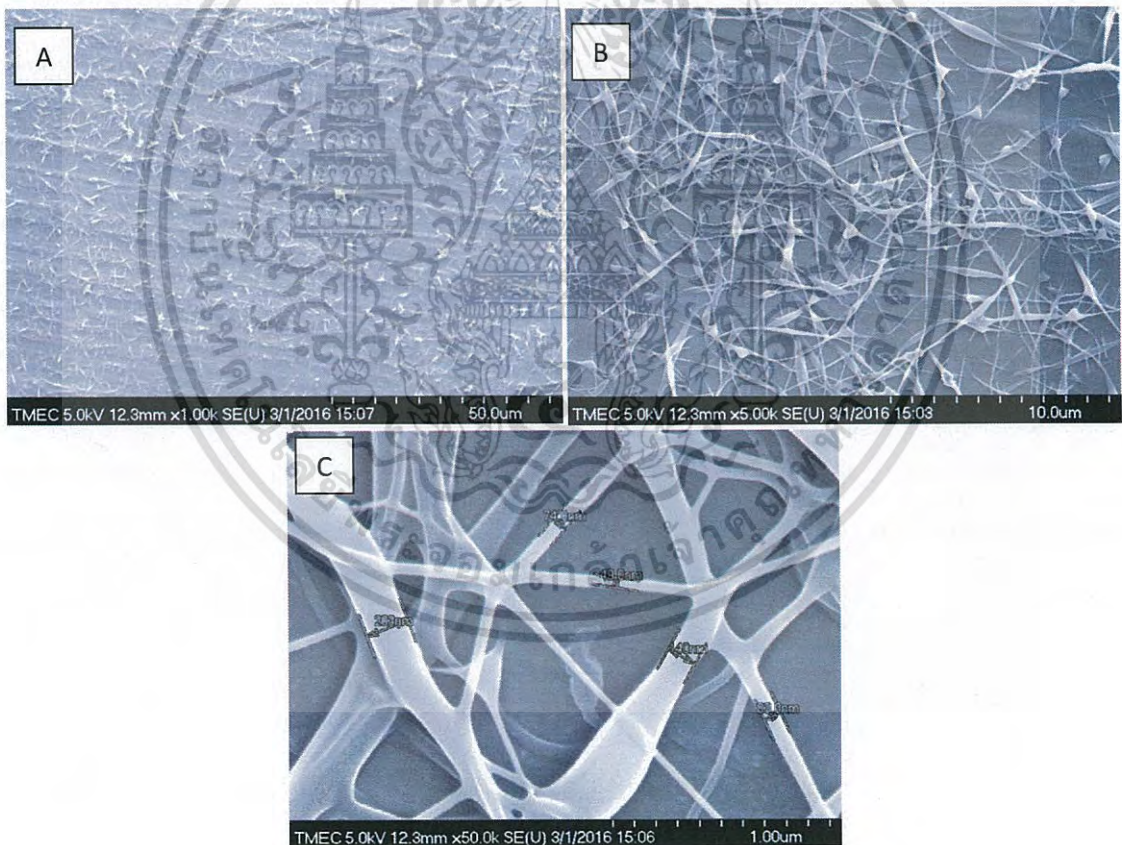


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย PVA กับความเข้มข้นของ PVA

จากรูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ยของเส้นใยกับความเข้มข้น โดยที่อัตราการไหลต่างๆกันข้างต้นนี้ โดยจำกัดการทดลองโดยการไม่เติมผง ZnO เข้าไปในสารละลาย ระยะระหว่างแผ่นอลูมิเนียม 15 เซนติเมตร ความต่างศักย์จากแหล่งกำเนิด 15 KV โดยเงื่อนไขที่มีการปรับเปลี่ยนคือ ค่าความเข้มข้นของ PVA ที่ 2.5 5 7.5 และ 10%wt และที่อัตราการไหล 1.0 และ 1.5 ml/hr ซึ่งผลที่สังเกตได้จากกราฟ จะเห็นได้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใยจะมีขนาดแตกต่างกันไม่มากนัก อยู่ในช่วง 150 – 200 nm ซึ่งแสดงลักษณะนี้ทุกเงื่อนไขที่มีการเปลี่ยนแปลง ทั้งความเข้มข้นและอัตราการไหล โดยจากการถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะเห็นว่าเส้นใยที่สังเคราะห์ได้จะมีลักษณะแบนเรียบ

ตารางที่ 4.9 การสังเคราะห์เส้นใย PVA/ZnO ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 2.5 %wt  
อัตราการไหล 1.0 ml/hr

ตัวแปรในการทดลอง	เงื่อนไข
ความเข้มข้น PVA	2.5 %wt
การเจือสาร	ZnO 1 %wt
ระยะเวลาการกวนสาร	2 ชั่วโมง
อุณหภูมิที่ใช้ในการกวนสาร	80 °C
ระยะระหว่างแผ่นสะสม	15 เซนติเมตร
ค่าความต่างศักย์	15 kV
อัตราการไหล	1.0 ml/hr
ชนิดแผ่นสะสม	อลูมิเนียมฟอยล์
ระยะเวลากระบวนการอิเล็กโทรสปิน	1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายเส้นใย PVA/ZnO ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 2.5 %wt อัตราการไหล 1.0 ml/hr จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

A) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 1000 เท่า

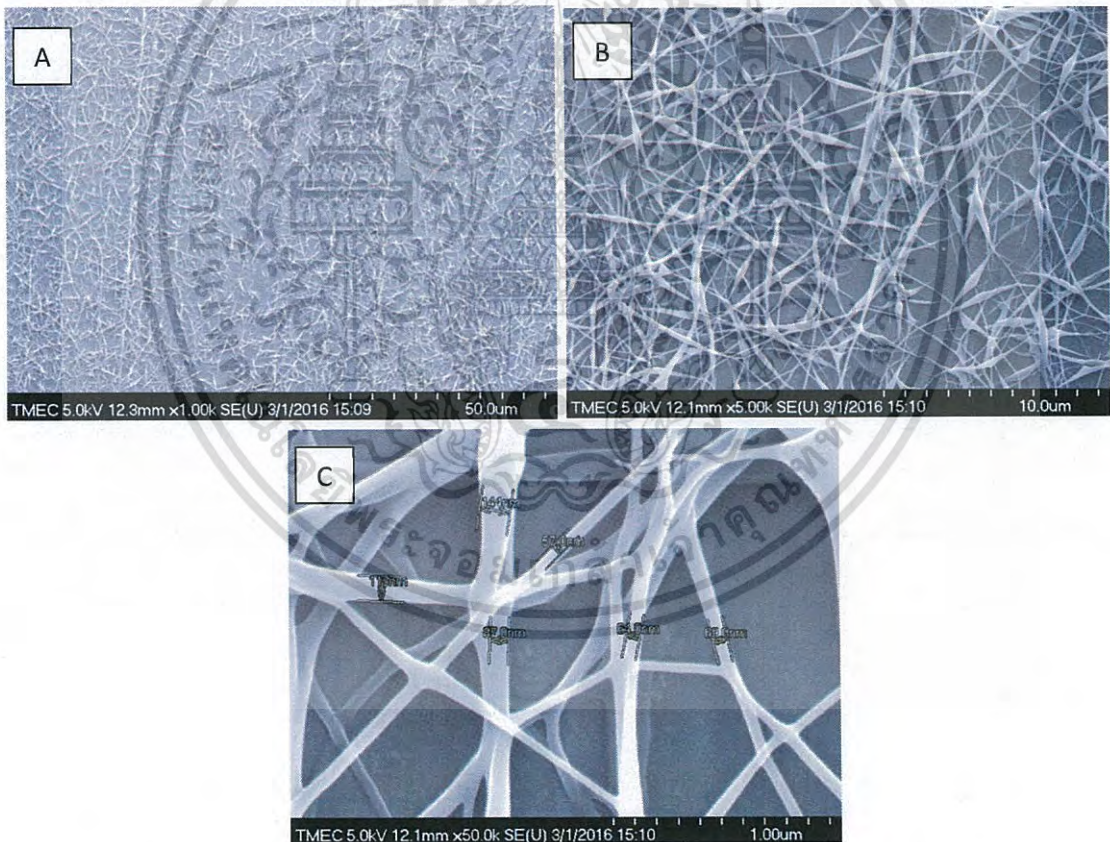
B) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 5000 เท่า

C) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 50000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 การสังเคราะห์เส้นใย PVA/ZnO ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 5 %wt  
อัตราการไหล 1.0 mL/hr

ตัวแปรในการทดลอง	เงื่อนไข
ความเข้มข้น PVA	5 %wt
การเจือสาร	ZnO 1 %wt
ระยะเวลาการกวนสาร	2 ชั่วโมง
อุณหภูมิที่ใช้ในการกวนสาร	80 °C
ระยะระหว่างแผ่นสะสม	15 เซนติเมตร
ค่าความต่างศักย์	15 kV
อัตราการไหล	1.0 mL/hr
ชนิดแผ่นสะสม	อลูมิเนียมฟอยล์
ระยะเวลากระบวนการอิเล็กโทรสปิน	1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายเส้นใย PVA/ZnO ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 5 %wt อัตราการไหล 1.0 mL/hr จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

A) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 1000 เท่า

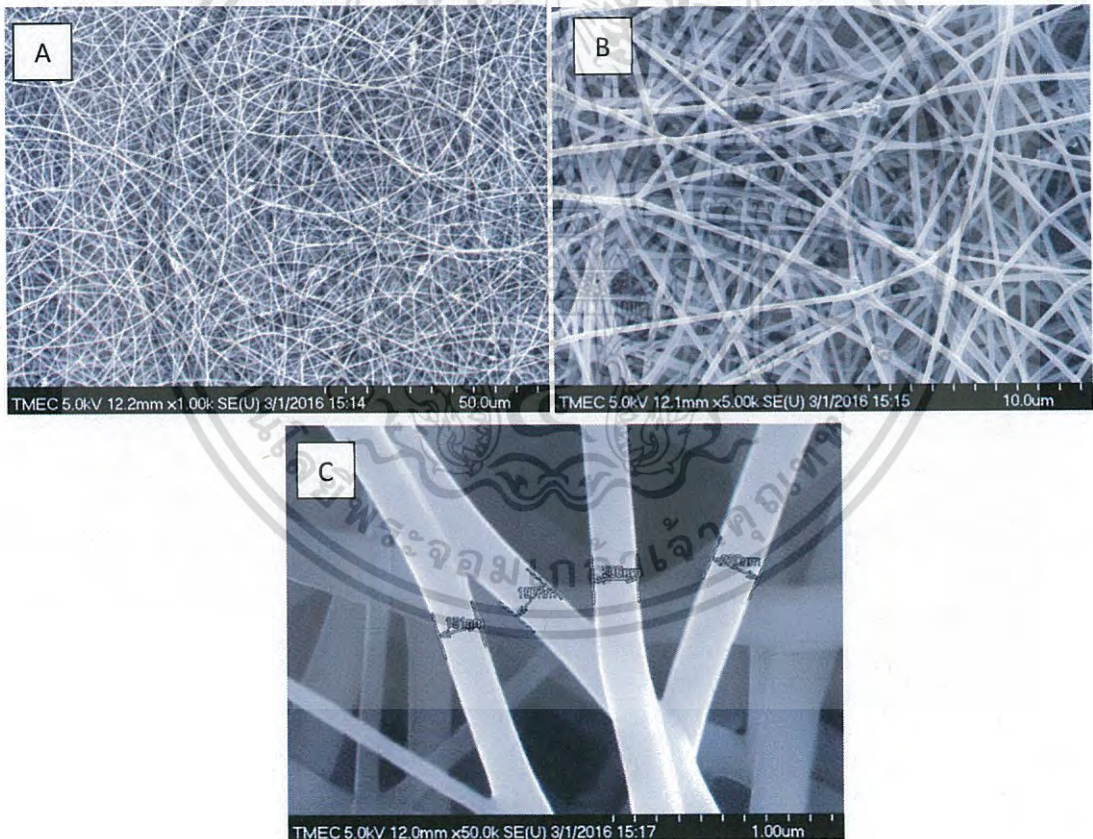
B) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 5000 เท่า

C) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 50000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 การสังเคราะห์เส้นใย PVA/ZnO ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 7.5 %wt อัตราการไหล 1.0 mL/hr

ตัวแปรในการทดลอง	เงื่อนไข
ความเข้มข้น PVA	7.5 %wt
การเจือสาร	ZnO 1 %wt
ระยะเวลาการกวนสาร	2 ชั่วโมง
อุณหภูมิที่ใช้ในการกวนสาร	80 °C
ระยะระหว่างแผ่นสะสม	15 เซนติเมตร
ค่าความต่างศักย์	15 kV
อัตราการไหล	1.0 mL/hr
ชนิดแผ่นสะสม	อลูมิเนียมฟอยล์
ระยะเวลากระบวนการอิเล็กโทรสปิน	1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายเส้นใย PVA/ZnO ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 7.5 %wt อัตราการไหล 1.0 mL/hr จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

A) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 1000 เท่า

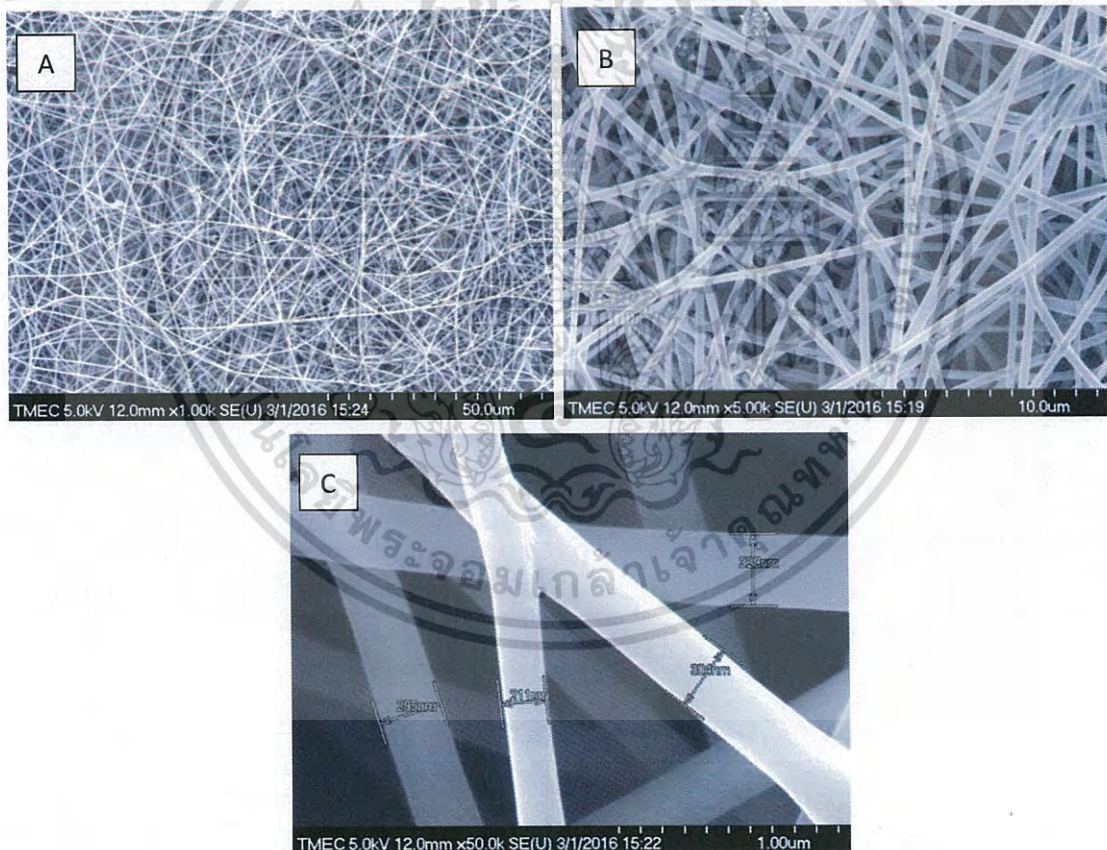
B) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 5000 เท่า

C) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 50000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 การสังเคราะห์เส้นใย PVA/ZnO ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 10 %wt  
อัตราการไหล 1.0 ml/hr

ตัวแปรในการทดลอง	เงื่อนไข
ความเข้มข้น PVA	10 %wt
การเจือสาร	ZnO 1 %wt
ระยะเวลาการกวนสาร	2 ชั่วโมง
อุณหภูมิที่ใช้ในการกวนสาร	80 °C
ระยะระหว่างแผ่นสะสม	15 เซนติเมตร
ค่าความต่างศักย์	15 kV
อัตราการไหล	1.0 ml/hr
ชนิดแผ่นสะสม	อลูมิเนียมฟอยล์
ระยะเวลากระบวนการอิเล็กโทรสปิน	1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายเส้นใย PVA/ZnO ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 10 %wt อัตราการไหล 1.0 ml/hr จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

A) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 1000 เท่า

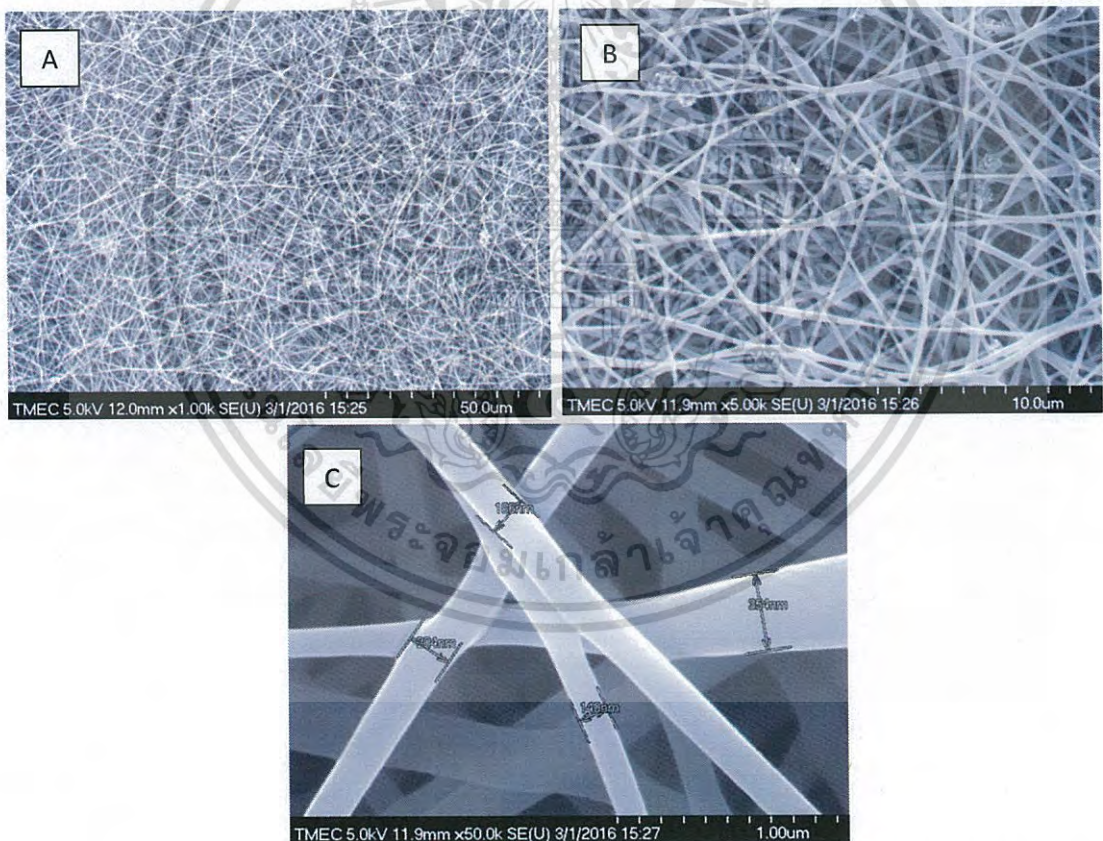
B) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 5000 เท่า

C) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 50000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 การสังเคราะห์เส้นใย PVA/ZnO ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 2.5 %wt  
อัตราการไหล 1.5 ml/hr

ตัวแปรในการทดลอง	เงื่อนไข
ความเข้มข้น PVA	2.5 %wt
การเจือสาร	ZnO 1 %wt
ระยะเวลาการกวนสาร	2 ชั่วโมง
อุณหภูมิที่ใช้ในการกวนสาร	80 °C
ระยะระหว่างแผ่นสะสม	15 เซนติเมตร
ค่าความต่างศักย์	15 kV
อัตราการไหล	1.5 ml/hr
ชนิดแผ่นสะสม	อลูมิเนียมฟอยล์
ระยะเวลากระบวนการอิเล็กโตรสปิน	1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายเส้นใย PVA/ZnO ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 2.5 %wt อัตราการไหล 1.5 ml/hr จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

A) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 1000 เท่า

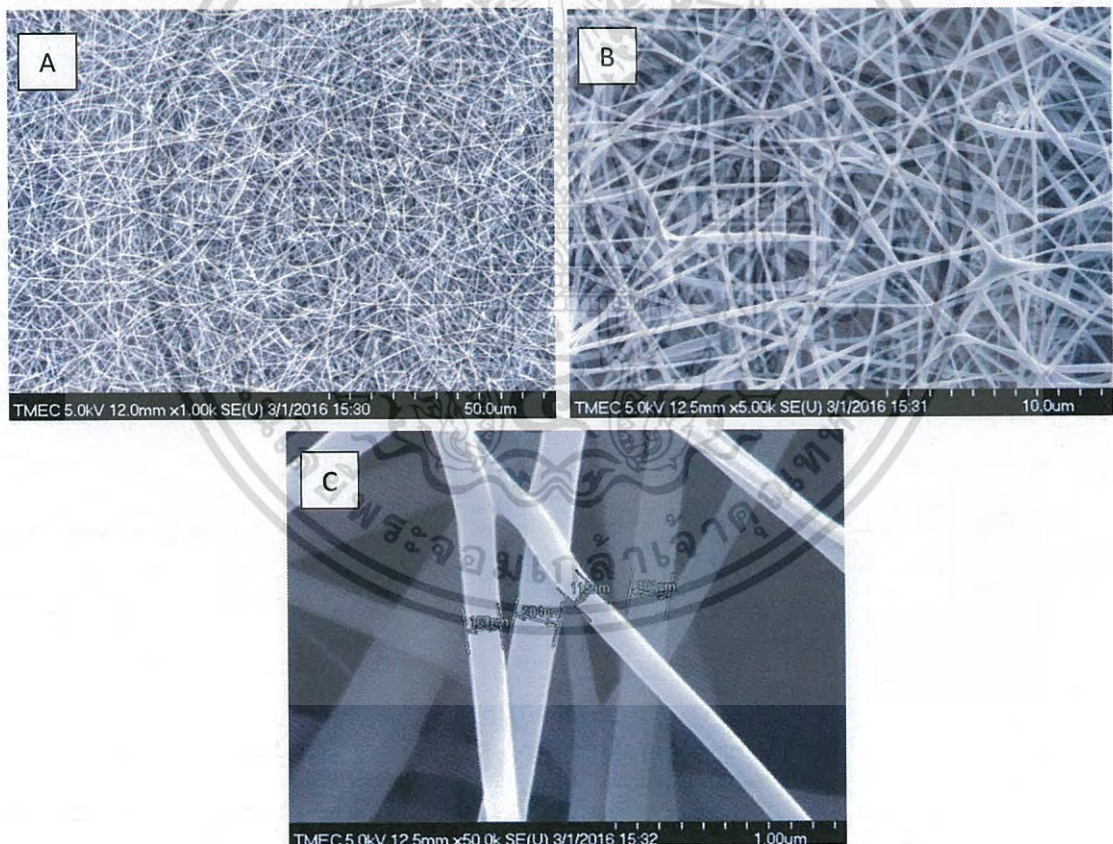
B) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 5000 เท่า

C) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 50000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 การสังเคราะห์เส้นใย PVA/ZnO ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 5 %wt  
อัตราการไหล 1.5 ml/hr

ตัวแปรในการทดลอง	เงื่อนไข
ความเข้มข้น PVA	5 %wt
การเจือสาร	ZnO 1 %wt
ระยะเวลาการกวนสาร	2 ชั่วโมง
อุณหภูมิที่ใช้ในการกวนสาร	80 °C
ระยะระหว่างแผ่นสะสม	15 เซนติเมตร
ค่าความต่างศักย์	15 kV
อัตราการไหล	1.5 ml/hr
ชนิดแผ่นสะสม	อลูมิเนียมฟอยล์
ระยะเวลากระบวนการอิเล็กโทรสปิน	1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายเส้นใย PVA/ZnO ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 5 %wt อัตราการไหล 1.5 ml/hr จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

A) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 1000 เท่า

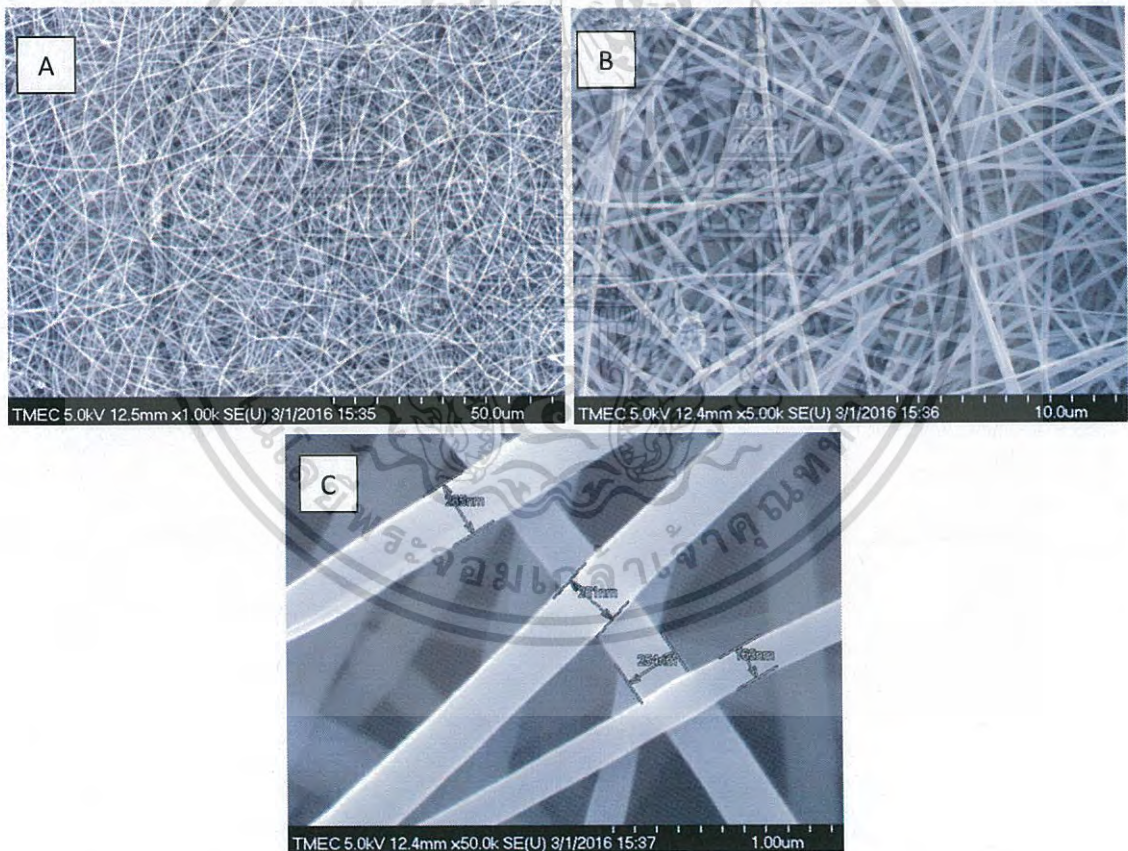
B) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 5000 เท่า

C) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 50000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 การสังเคราะห์เส้นใย PVA/ZnO ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 7.5 %wt  
อัตราการไหล 1.5 ml/hr

ตัวแปรในการทดลอง	เงื่อนไข
ความเข้มข้น PVA	7.5 %wt
การเจือสาร	ZnO 1 %wt
ระยะเวลาการกวนสาร	2 ชั่วโมง
อุณหภูมิที่ใช้ในการกวนสาร	80 °C
ระยะระหว่างแผ่นสะสม	15 เซนติเมตร
ค่าความต่างศักย์	15 kV
อัตราการไหล	1.5 ml/hr
ชนิดแผ่นสะสม	อลูมิเนียมฟอยล์
ระยะเวลากระบวนการอิเล็กโทรสปิน	1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายเส้นใย PVA/ZnO ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 7.5 %wt อัตราการไหล 1.5 ml/hr จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

A) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 1000 เท่า

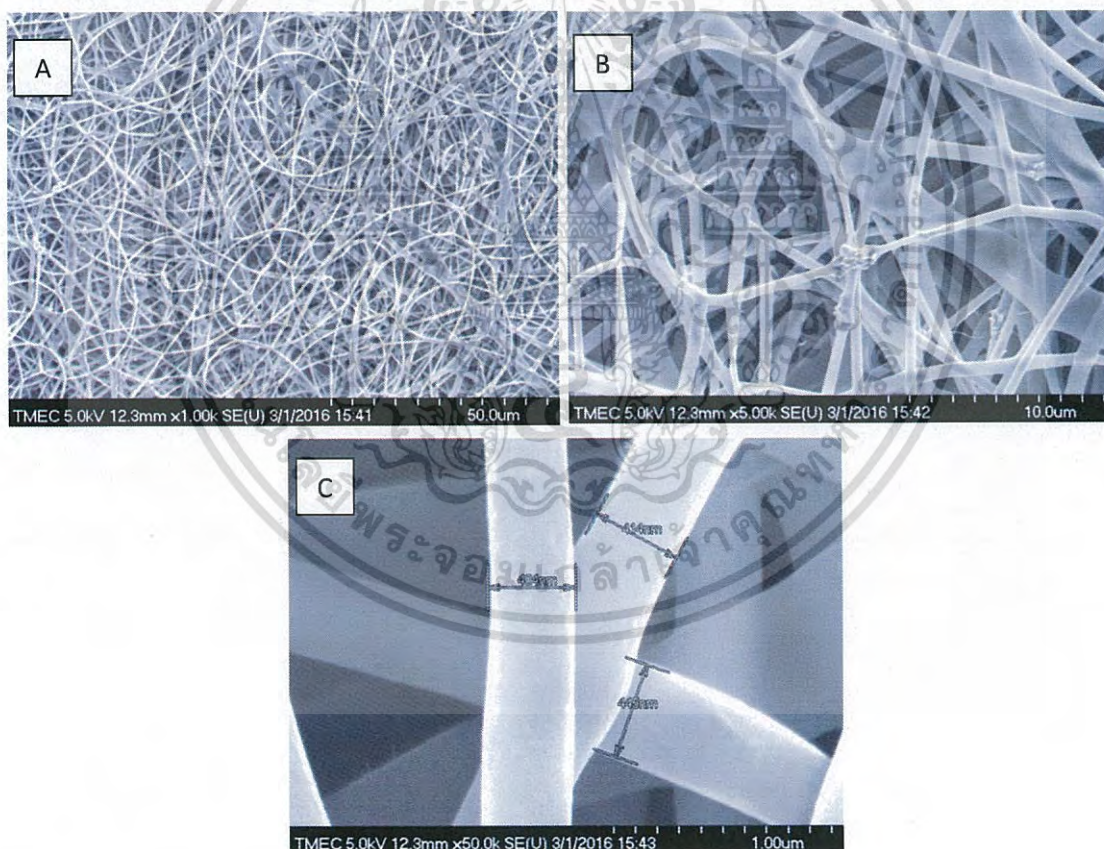
B) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 5000 เท่า

C) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 50000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 การสังเคราะห์เส้นใย PVA/ZnO ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 10 %wt  
อัตราการไหล 1.5 ml/hr

ตัวแปรในการทดลอง	เงื่อนไข
ความเข้มข้น PVA	10 %wt
การเจือสาร	ZnO 1 %wt
ระยะเวลาการกวนสาร	2 ชั่วโมง
อุณหภูมิที่ใช้ในการกวนสาร	80 °C
ระยะระหว่างแผ่นสะสม	15 เซนติเมตร
ค่าความต่างศักย์	15 kV
อัตราการไหล	1.5 ml/hr
ชนิดแผ่นสะสม	อลูมิเนียมฟอยล์
ระยะเวลากระบวนการอิเล็กโตรสปิน	1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายเส้นใย PVA/ZnO ที่เงื่อนไขความเข้มข้น 10 %wt อัตราการไหล 1.5 ml/hr  
จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

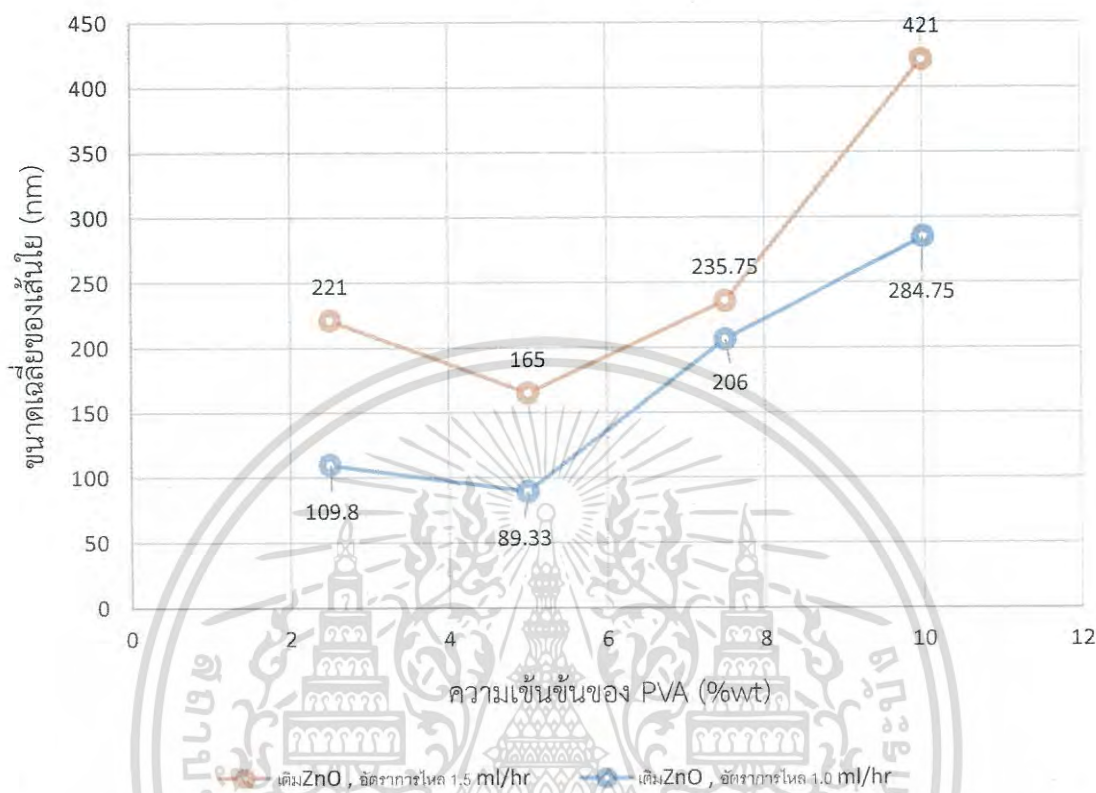
A) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 1000 เท่า

B) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 5000 เท่า

C) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 50000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางข้างต้นแสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) จะทำให้ทราบถึงขนาดของเส้นใยในเงื่อนไขต่างๆจากการทดลองซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามเงื่อนไขที่ปรับเปลี่ยน โดยจะรายงานถึงผลการทดลองในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย PVA/ZnO กับความเข้มข้นของ PVA

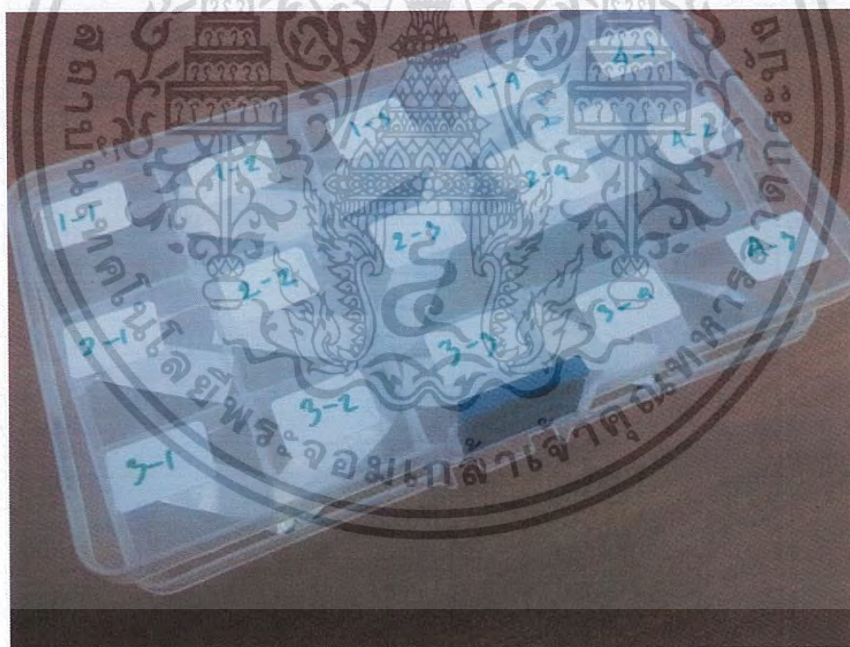
จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ยของเส้นใยกับความเข้มข้น โดยที่อัตราการไหลต่างๆกันข้างต้นนี้ โดยจำกัดการทดลองโดยการเติมผง ZnO เข้าไปในสารละลาย ระยะระหว่างแผ่นอลูมิเนียม 15 เซนติเมตร ความต่างศักย์จากแหล่งกำเนิด 15 kV โดยเงื่อนไขที่มีการปรับเปลี่ยนคือ ค่าความเข้มข้นของ PVA ที่ 2.5 5 7.5 และ 10%wt และที่อัตราการไหล 1.0 และ 1.5 ml/hr ซึ่งผลที่สังเกตได้จากกราฟที่แสดงจะเห็นได้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใยจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีแนวโน้มไปในลักษณะเดียวกัน ซึ่งจากกราฟที่แสดงข้างต้นการเปลี่ยนอัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และการเพิ่มความเข้มข้นของ PVA ในเงื่อนไขที่เติม ZnO ไปในสารละลาย ขนาดเส้นใยที่สังเคราะห์ได้จะมีแนวโน้มมากขึ้น ซึ่งแตกต่างจากกราฟในรูปที่ 4.10 ที่มีขนาดของเส้นใยไม่แตกต่างกันมากนัก

โดยผู้วิจัยได้ให้ข้อสังเกตที่เงื่อนไข PVA/ZnO 2.5 %wt อัตราการไหล 1.0 ml/hr และ PVA/ZnO 5 %wt อัตราการไหล 1.0 ml/hr ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะแสดงให้เห็นว่าทั้ง 2 เงื่อนไขนี้ เส้นใยที่ได้จะมีลักษณะแตกต่างจากเงื่อนไขอื่นๆอย่างชัดเจน และมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

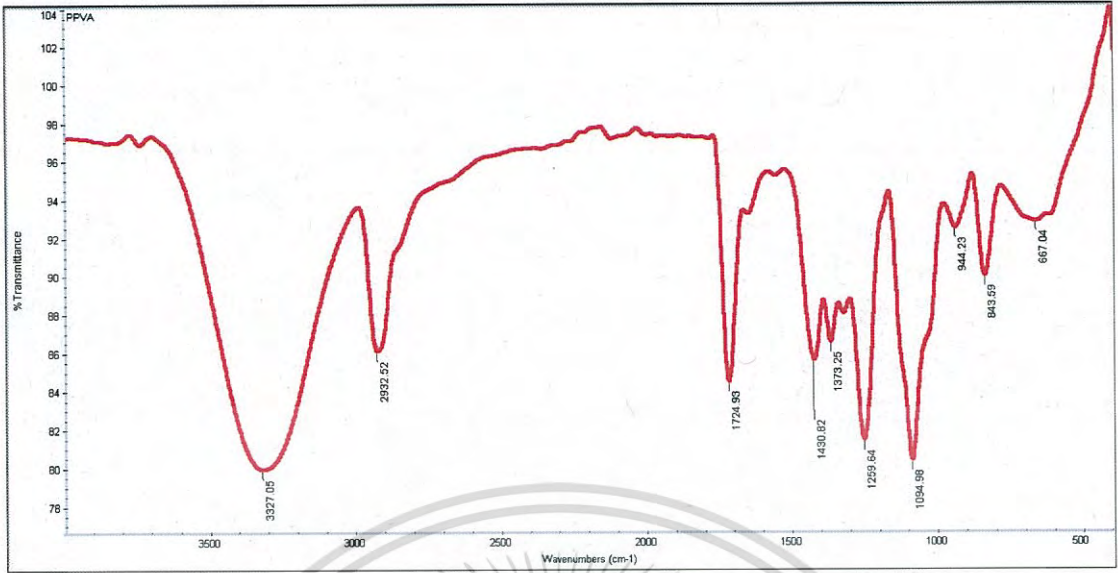
ลักษณะจับกันเป็นลูกบิด ซึ่งในเงื่อนไขอื่น ๆ จะสามารถสังเคราะห์เป็นเส้นใยในลักษณะแบนเรียบ ซึ่งคาดว่าเกิดจากการที่เมื่อเติม ZnO เข้าไปทำให้มวลมากขึ้น จำเป็นต้องอัตราการไหลที่สูงขึ้นเพื่อดันสารละลายออกจากปลายเข็ม ซึ่งในเงื่อนไขนี้ อัตราการไหลของสารไม่เพียงพอที่จะผลักสารละลายในเข็มฉีดยาออกไป

#### 4.2 การวิเคราะห์สมบัติต่างๆของเส้นใย PVA และ PVA/ZnO ที่เตรียมได้จากการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปิน

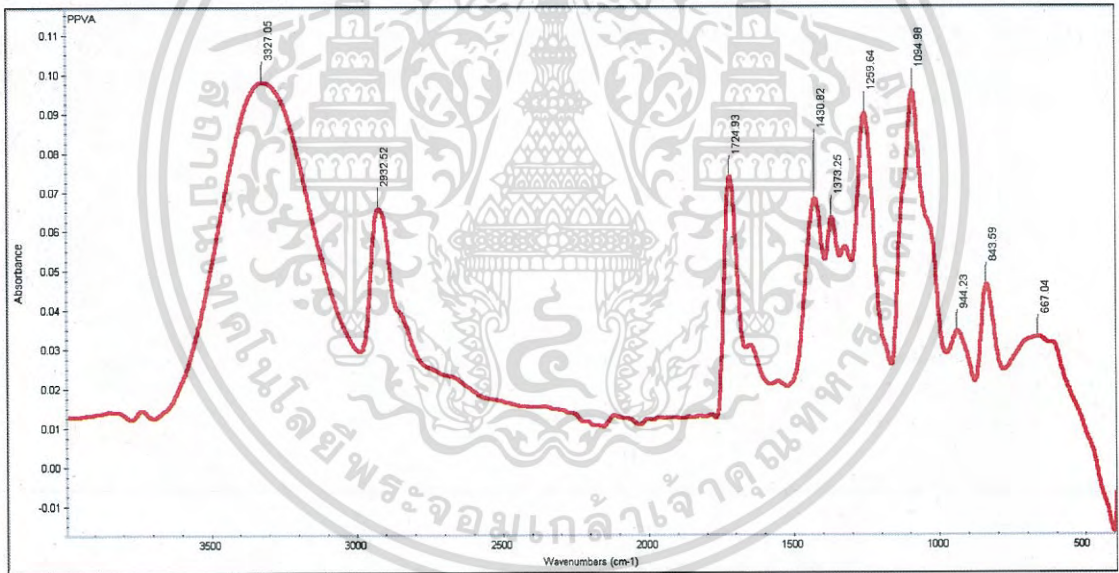
จากการทดลองสังเคราะห์เส้นใยนาโน PVA และ PVA/ZnO ในหัวข้อที่ 4.1 ผู้วิจัยได้นำแผ่นเส้นใยที่สังเคราะห์ได้มาทดสอบคุณสมบัติของเส้นใย โดยการตัดชิ้นงานที่ได้ให้เป็นขนาดเล็ก ดังรูปที่ 4.20 โดยผู้วิจัยนำชิ้นงานที่ตัดแล้วไปทดสอบคุณสมบัติ ซึ่งประกอบไปด้วยการทดสอบลักษณะการดูดกลืนแสง การส่องผ่านแสง และพันธะเคมี ด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด ซึ่งจะแสดงเป็นค่าเลขคลื่นที่มีปฏิริยากับวัสดุที่นำมาวิเคราะห์ และทดสอบผิวสัมผัสของเส้นใยที่สังเคราะห์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์มุมสัมผัส เพื่อทดสอบเอกลักษณ์สำคัญที่เป็นจุดเด่นของเส้นใยนาโนคือ มีพื้นผิวสัมผัสที่สูง



รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายชิ้นงานที่ถูกตัดเป็นขนาดเล็กเพื่อเตรียมนำไปทดสอบคุณสมบัติ

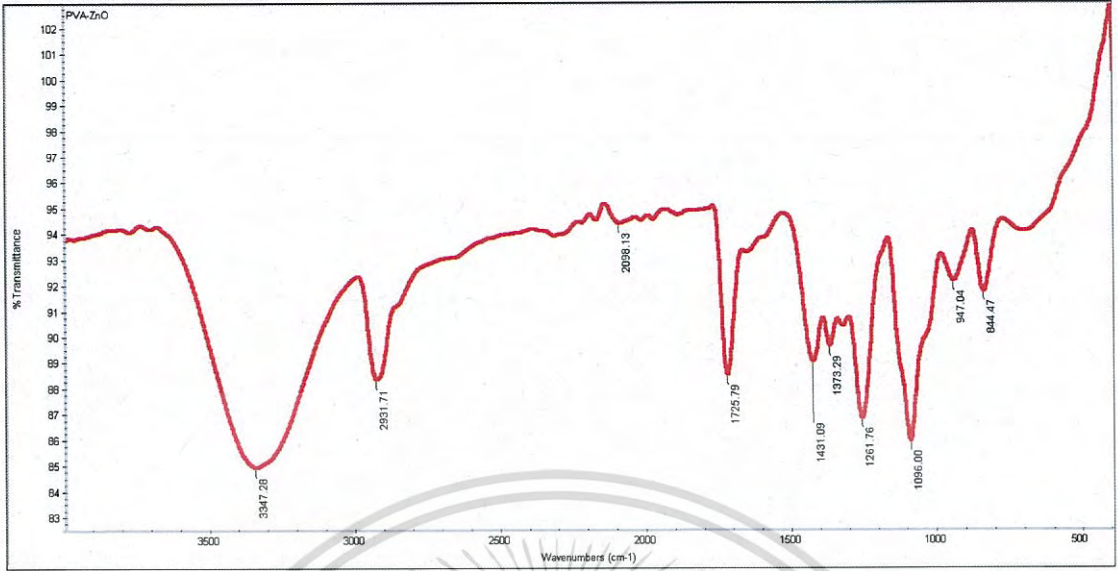


รูปที่ 4.21 สเปกตรัมการส่องผ่านแสงของเส้นใย PVA

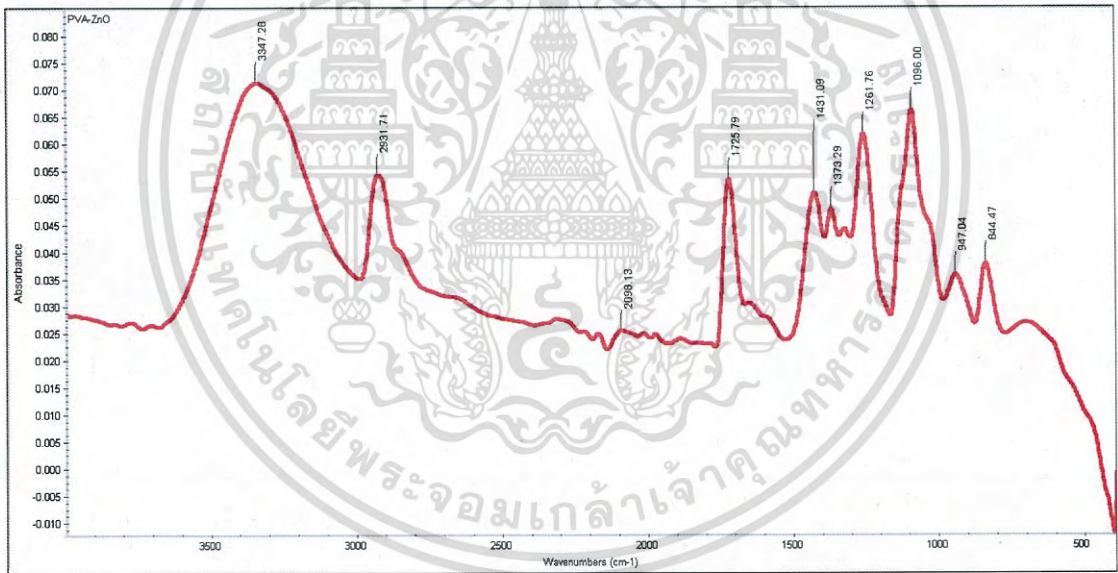


รูปที่ 4.22 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเส้นใย PVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

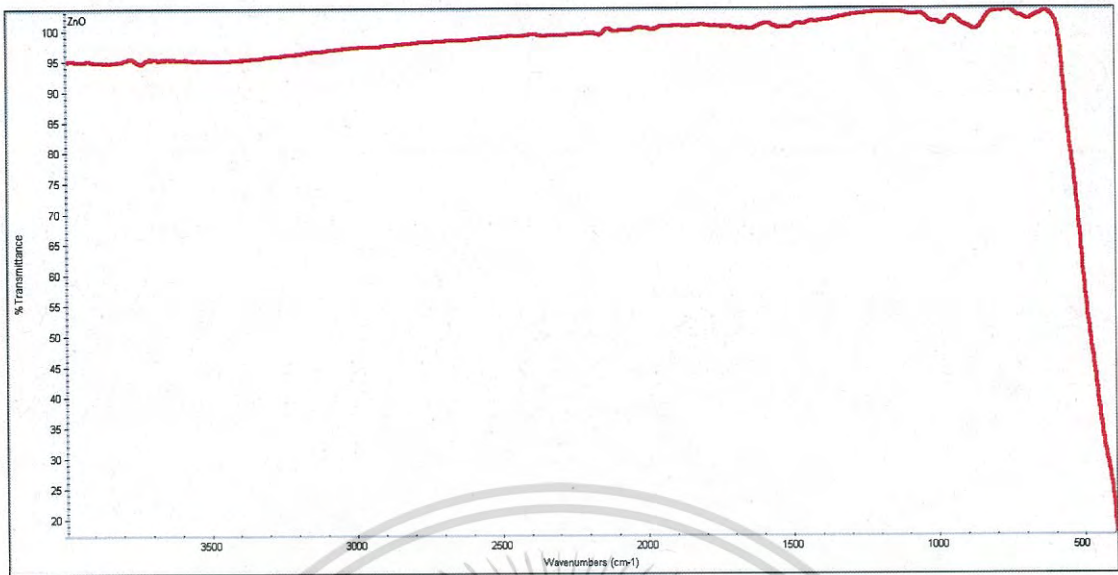


รูปที่ 4.23 สเปกตรัมการส่องผ่านของเส้นใย PVA/ZnO

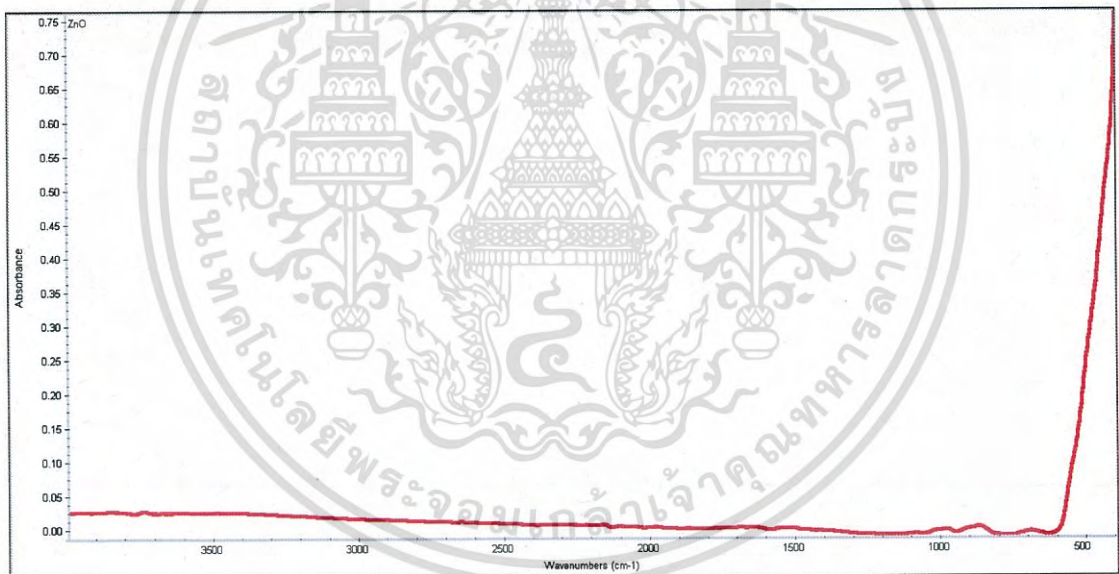


รูปที่ 4.24 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเส้นใย PVA/ZnO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



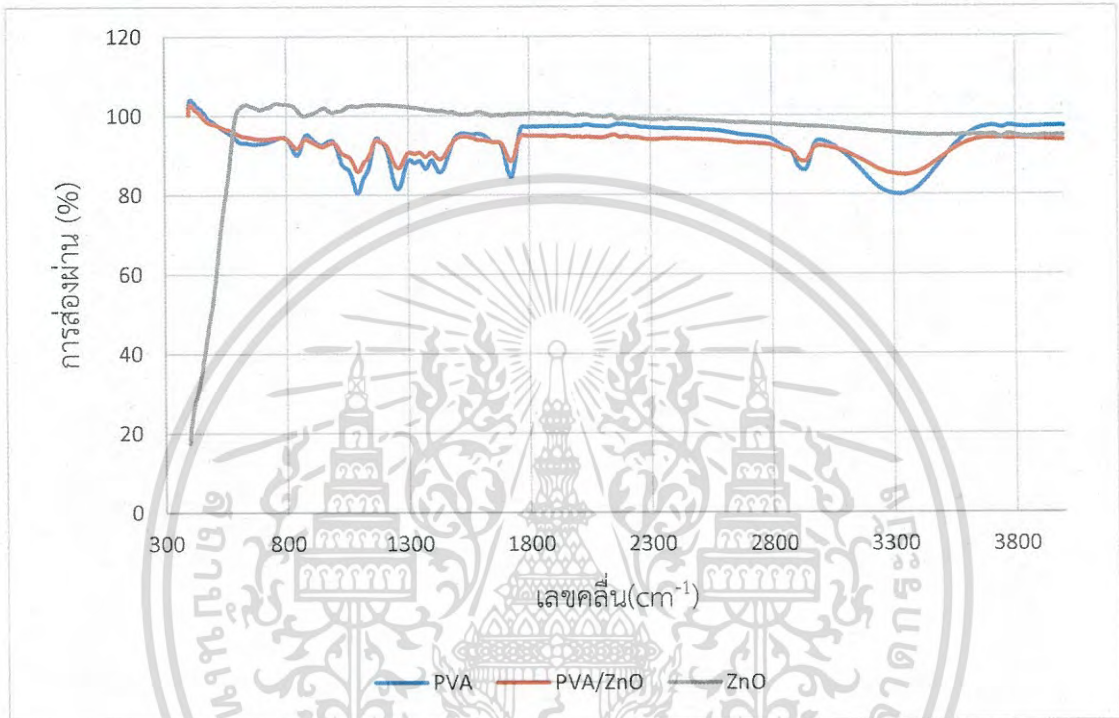
รูปที่ 4.25 สเปกตรัมการส่องผ่านของผง ZnO



รูปที่ 4.26 สเปกตรัมการดูดกลืนของผง ZnO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

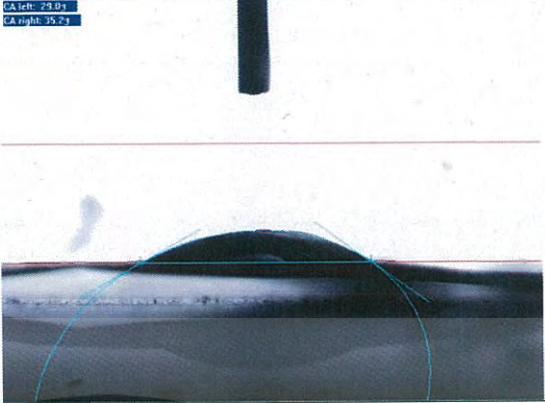
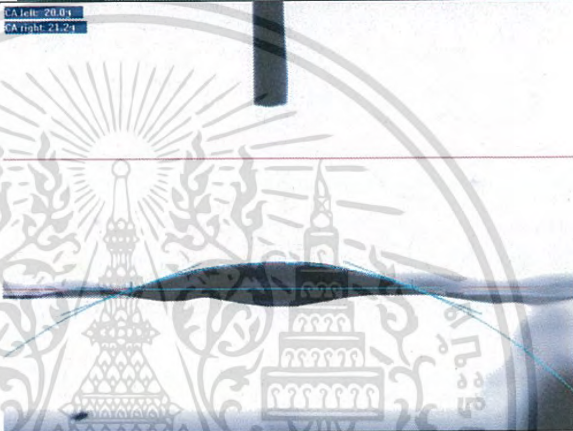
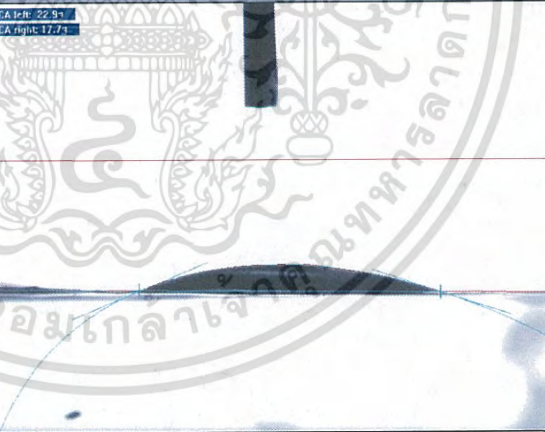
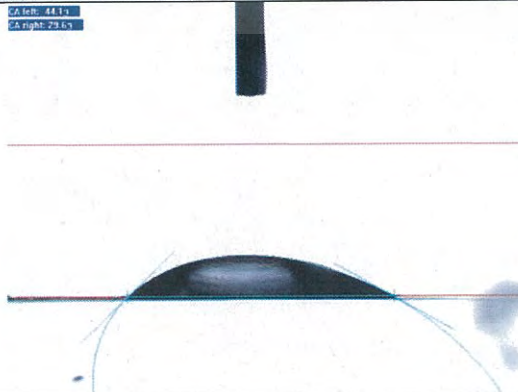
รูปที่ 4.21 ,4.22 ,4.23 ,4.24 ,4.25 และ 4.26 แสดงถึงลักษณะสเปกตรัมการส่องผ่านและการดูดกลืนของเส้นใย PVA เส้นใย PVA/ZnO และผง ZnO ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากเครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด ซึ่งลักษณะของการดูดกลืนและส่องผ่านจะเป็นส่วนกลับกัน โดยผู้วิจัยได้เลือกลักษณะการส่องผ่านมาเปรียบเทียบกันจากรูปที่ 4.27 ซึ่งจากภาพแสดงให้เห็นว่าเมื่อเติม ZnO เข้าไปใน PVA พันธะของ PVA ไม่มีการเปลี่ยนแปลง จะไม่เกิดพันธะใหม่ๆขึ้น หรือกล่าวได้ว่าไม่เกิดพันธะต่อกัน



รูปที่ 4.27 สเปกตรัมการส่องผ่านของ PVA,PVA/ZnO,ZnO

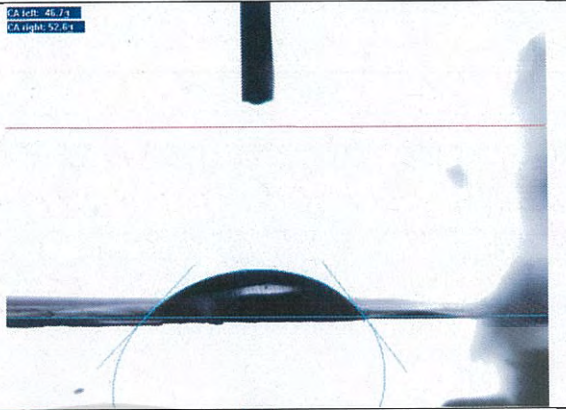


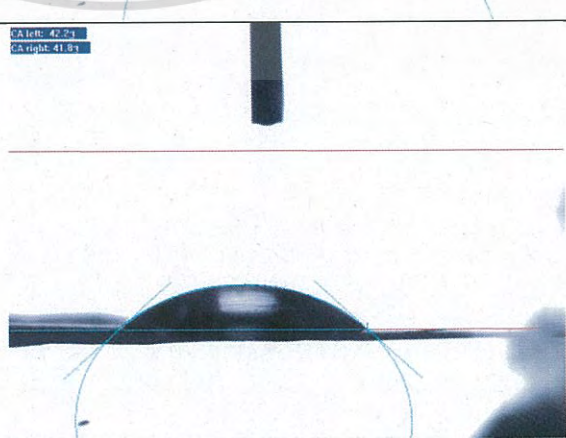
โดยจากผลการวัดสเปกตรัมนี้สามารถยืนยันได้ว่าเมื่อเราสามารถให้ความร้อนเพื่อหลอมเหลวพอลิเมอร์ จะไม่ทำลายพันธะ ZnO ซึ่งนำประโยชน์จากจุดนี้มาประยุกต์สร้างเซ็นเซอร์เส้นใยนาโน และต่อไปจะรายงานถึงคุณสมบัติความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำของเส้นใยที่สังเคราะห์ได้ โดยวิเคราะห์โดยใช้เครื่องวัดมุมสัมผัส

ตารางที่ 4.17 ภาพมุมสัมผัสของเส้นใย PVA ที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่อัตราการไหล 1.0 ml/hr

เงื่อนไขการสังเคราะห์	ภาพถ่ายมุมสัมผัส
PVA 2.5 %wt อัตราการไหล 1.0 ml/hr	
PVA 5 %wt อัตราการไหล 1.0 ml/hr	
PVA 7.5 %wt อัตราการไหล 1.0 ml/hr	
PVA 10 %wt อัตราการไหล 1.0 ml/hr	

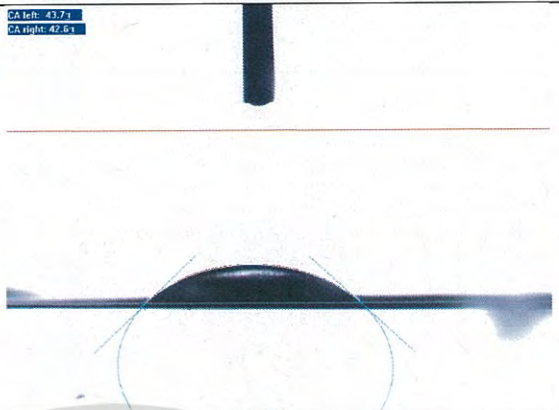
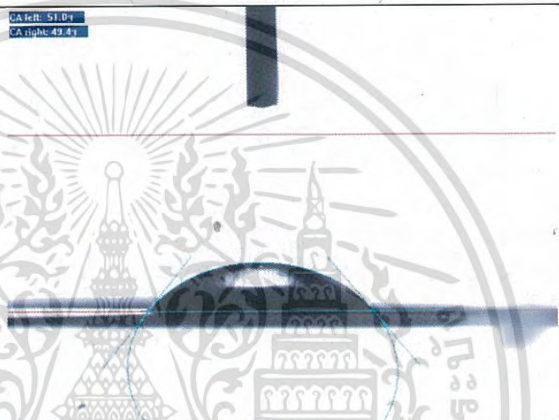
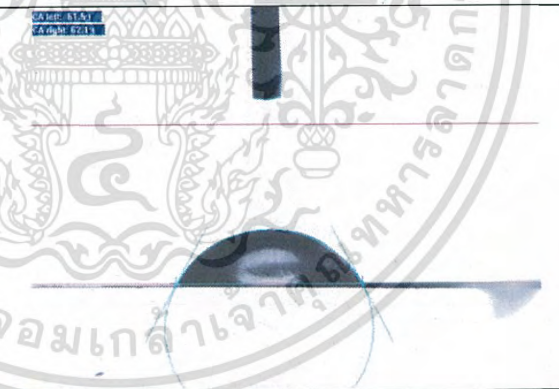
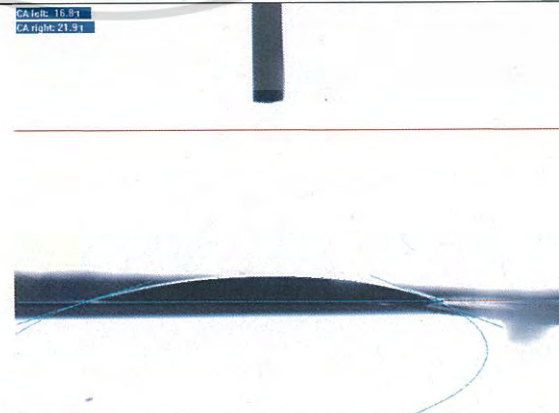
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.18 ภาพมุมสัมผัสของเส้นใย PVA ที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่อัตราการไหล 1.5 ml/hr

เงื่อนไขการสังเคราะห์	ภาพถ่ายมุมสัมผัส
PVA 2.5 %wt อัตราการไหล 1.5 ml/hr	
PVA 5 %wt อัตราการไหล 1.5 ml/hr	
PVA 7.5 %wt อัตราการไหล 1.5 ml/hr	
PVA 10 %wt อัตราการไหล 1.5 ml/hr	

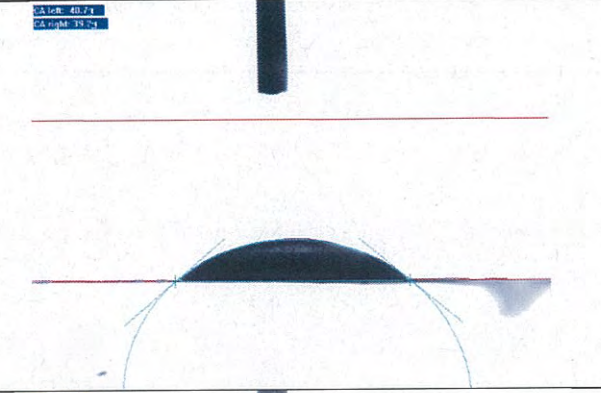


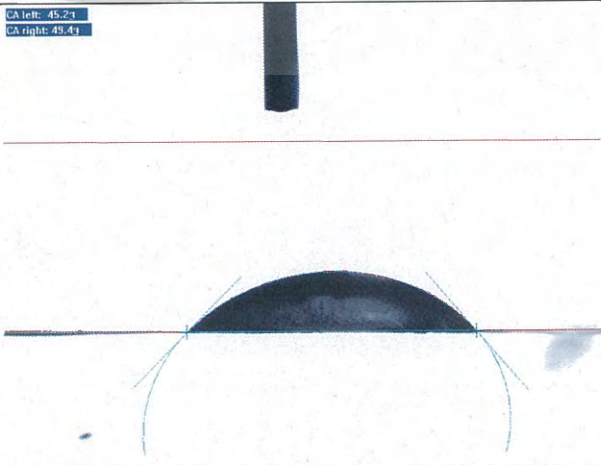
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.19 ภาพมัมสัมผัสของเส้นใย PVA ที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่อัตราการไหล 1.0 ml/hr

เงื่อนไขการสังเคราะห์	ภาพถ่ายมัมสัมผัส
PVA/ZnO 2.5 %wt อัตราการไหล 1.0 ml/hr	
PVA/ZnO 5 %wt อัตราการไหล 1.0 ml/hr	
PVA/ZnO 7.5 %wt อัตราการไหล 1.0 ml/hr	
PVA/ZnO 10 %wt อัตราการไหล 1.0 ml/hr	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.20 ภาพมุมสัมผัสของเส้นใย PVA ที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่อัตราการไหล 1.0 mL/hr

เงื่อนไขการสังเคราะห์	ภาพถ่ายมุมสัมผัส
PVA/ZnO 2.5 %wt อัตราการไหล 1.0 mL/hr	
PVA/ZnO 5 %wt อัตราการไหล 1.0 mL/hr	
PVA/ZnO 7.5 %wt อัตราการไหล 1.0 mL/hr	
PVA/ZnO 10 %wt อัตราการไหล 1.0 mL/hr	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในการวัดค่ามัมส์สามารถวัดค่ามัมส์ได้จากหลากหลายจุดบนชิ้นงาน โดยจะแสดงค่าการวัดมัมส์ในตารางที่ 4.21 และหาค่าเฉลี่ยจากจุดสัมผัสที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน

ตารางที่ 4.21 ค่ามัมส์ของเส้นใยที่สังเคราะห์ที่เงื่อนไขต่างๆ

เงื่อนไข	อัตราการไหล (ml/hr)	จุดที่ 1		จุดที่ 2		จุดที่ 3		จุดที่ 4		เฉลี่ย
		ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา	
PVA2.5%wt	1.00	37.8	47.8	29.0	35.2	33.0	37.1			36.65
PVA5%wt	1.00	25.7	20.6	21.8	21.5	20.0	21.2			21.80
PVA7.5%wt	1.00	21.6	19.5	22.9	17.7					20.43
PVA10%wt	1.00	27.9	27.9	40.0	31.6	44.1	29.6	30.8	35.7	33.45
PVA2.5%wt	1.50	46.7	52.6	52.4	52.4	31.5	31.5			44.52
PVA5%wt	1.50	51.5	48.6	50.4	52.3	24.9	29.2			42.82
PVA7.5%wt	1.50	40.3	47.6	39.3	39.3	44.0	39.0			41.58
PVA10%wt	1.50	42.2	41.8	46.5	46.5	34.8	35.0			41.13
PVA/ZnO2.5%wt	1.00	43.7	42.6	39.3	41.0	36.7	34.4			39.62
PVA/ZnO 5%wt	1.00	42.0	41.7	51.0	49.4	49.7	49.8			47.27
PVA/ZnO 7.5%wt	1.00	33.3	33.3	61.5	62.1	37.9	37.7			44.30
PVA/ZnO 10%wt	1.00	16.8	21.9	21.5	21.5					20.43
PVA/ZnO2.5%wt	1.50	32.0	30.8	40.7	39.2	62.8	63.7			44.87
PVA/ZnO 5%wt	1.50	39.5	38.1	45.2	35.4	36.0	39.0	44.8	38.8	39.60
PVA/ZnO 7.5%wt	1.50	38.1	41.5	70.6	77.5	62.6	62.1	75.2	81.6	63.65
PVA/ZnO 10%wt	1.50	41.8	43.2	45.2	49.4	46.0	39.0			44.10

จากตารางที่ 4.21 แสดงค่ามัมส์ที่ถ่ายภาพได้จากเครื่องวิเคราะห์มัมส์ ซึ่งในการวัดนี้เป็นตัวบ่งบอกว่าเส้นใยนาโน PVA และ PVA/ZnO ที่สังเคราะห์แสดงคุณสมบัติเด่นของเส้นใยได้มากน้อยอย่างไร ซึ่งโดยปกติเส้นใยนาโนจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่มาก ซึ่งเป็นจุดเด่นของเส้นใยนาโน โดยช่องว่างที่เห็นในตารางเกิดจากปัญหาในการวัดที่ไม่สามารถหยดน้ำลงบนชิ้นงานได้ เนื่องจากชิ้นงานไม่สามารถตั้งให้ตั้งได้ โดยผลที่ได้จากผลการทดลองคือถ้ามัมส์น้อย จะยิ่งแสดงจุดเด่นของเส้นใยนาโน โดยในตารางเงื่อนไขที่มีค่ามัมส์น้อยที่สุดคือ PVA/ZnO 10%wt และ PVA 7.5%wt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพ

จากการสังเคราะห์เส้นใยนาโนโดยเทคนิคอิเล็กโตรสปิน ด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกันในแต่ละชิ้นงาน โดยตัวแปรที่ปรับเปลี่ยนได้แก่ ความเข้มข้นของ PVA และอัตราการของสารละลาย ซึ่งผลที่ได้จากการนำเส้นใยที่สังเคราะห์ไปสังเกตด้วยกล้อง SEM โดยชิ้นงานที่สังเคราะห์ด้วย PVA ไม่มีการเติม ZnO ลงไป เส้นใยที่สังเคราะห์ได้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกันทุกๆเงื่อนไข มีขนาดในช่วง 150 - 200 nm มีลักษณะเป็นเส้นใยแบนเรียบ และที่เส้นใยที่สังเคราะห์ด้วย PVA และเติม ZnO เข้าไปในสารละลายโพลิเมอร์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่สังเกตได้จะมีค่าแนวโน้มไปในลักษณะเดียวกันคือ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ PVA จะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าสูงขึ้น และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารละลาย จะทำให้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าเพิ่มมากขึ้น มีเส้นใยเป็นลักษณะแบนเรียบ ยกเว้นเพียงแต่ที่เงื่อนไข PVA/ZnO 2.5 %wt อัตราการไหล 1.0 ml/hr และ PVA/ZnO 5 %wt ที่มีลักษณะเป็นลูกปัด ซึ่งคาดว่าเกิดจากการที่เมื่อเติม ZnO เข้าไปทำให้มวลมากขึ้น จำเป็นต้องอัตราการไหลที่สูงขึ้นเพื่อดันสารละลายออกจากปลายเข็ม ซึ่งในเงื่อนไขอัตราการไหลของสารไม่เพียงพอที่จะผลักสารละลายในเข็มฉีดยาออกไป

### 5.2 ผลการศึกษาสมบัติต่างๆของเส้นใย PVA และ PVA/ZnO

ในการทดสอบคุณสมบัติของเส้นใยที่สังเคราะห์ได้นั้น นำไปทดสอบกับเครื่อง FTIR ซึ่งเป็นการทดสอบพันธะเคมี การส่องผ่านแสง และการดูดกลืนของแสง โดยผลที่ได้ก็คือ ไม่เกิดพันธะเคมีใหม่ๆขึ้นในเส้นใยนาโน PVA/ZnO กล่าวคือ PVA และ ZnO ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกัน โดยสามารถนำคุณสมบัตินี้ไปใช้ประโยชน์ คือสามารถนำไปให้ความร้อน เพื่อระเหิด PVA ออกโดยไม่เป็นการทำลายพันธะของซิงค์ออกไซด์ เพื่อสังเคราะห์เป็นเส้นใย ZnO ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาเป็นก๊าซเซ็นเซอร์ต่อไป และผลที่สังเกตได้จากทดลองอีกประการคือ การเติม ZnO ทำให้การส่องผ่านของแสงลดลง คาดว่า ZnO จะลดการส่องผ่านของเส้นใยโพลิเมอร์

และการตรวจสอบคุณสมบัติพื้นฐานของเส้นใยนาโนคือทดสอบความชอบน้ำ และไม่ชอบน้ำ ผลที่ได้จากการทดสอบคือซึ่ง มีค่ามุมสัมผัสน้อยที่สุดคือ PVA/ZnO 10%wt และ PVA 7.5%wt ซึ่งสามารถแสดงจุดเด่นของเส้นใยนาโนได้มากที่สุด คือสามารถซึมซับได้ดีเนื่องจากเส้นใยจะมีพื้นที่ผิวที่สูง ซึ่งตรงจุดนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นผ้าปิดแผล กล่าวคือสามารถดูดซับของเสียจากบาดแผลได้ ซึ่งสามารถทดสอบโดยนำไปตรวจสอบการต้านเชื้อแบคทีเรียล ได้ในอนาคตต่อไป

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

- 1.ควรศึกษาเพิ่มเติมโดยการเปลี่ยนหลายๆเงื่อนไขเช่น ค่าแรงดันไฟฟ้า ระยะแผ่นสะสม
- 2.ในการสังเคราะห์เพื่อประยุกต์เป็นเซ็นเซอร์ควรจะสังเคราะห์บนแผ่นอลูมิเนียมหรือโลหะชนิดอื่นๆ ที่สามารถทนความร้อนสูงได้ และนำไฟฟ้าได้ เพื่อสามารถจะระเหิดโพลิเมอร์ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ญัฐฐา ศักดิ์ศิลาพร และคณะ. 2553. “การผลิตเส้นใยนาโนทั้งสเดนออกไซด์ด้วยวิธีอิเล็กโตรสปินนิง.” หลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- [2] Jin-Ah Park, Jaehyun Moon, Su-Jae Lee, Sang-Chul Lim, Taehyoung Zyung. 2009. “Fabrication and characterization of ZnO nanofibers by electrospinning.” Current Applied Physics. 9 (2009) : S210–S212
- [3] Sati Maensiri, Wiwat Nuansing, Jutharatana Klinkaewnarong, Paveena Laokul, Jinda Khemprasit. “Nanofibers of barium strontium (BST) by sol-gel processing and electrospinning.” Journal of Colloid and Interface Science. 297 (2006): 578-583
- [4] ปรียาภรณ์ ตรีวานิชย์, จุฑารัตน์ แม่นมาตย์. 2556. “การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของเส้นใยนาโนของโพลีเมอร์ผสมระหว่างโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ และสารสกัดจากเปลือกเงาะ.” รายงานโครงการของนักศึกษาชั้นปีที่ 4 ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [5] บริษัท นาโน แมททีเรียลส์ เทคโนโลยี จำกัด. 2008. ZnO คืออะไร. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://www.nanomaterials.co.th/index2.asp?CType=3>
- [6] โครงการพัฒนาฐานข้อมูลความปลอดภัยของวัสดุนาโนสถานวิจัยเพื่อความเป็นเลิศทางวิชาการ ด้านวิจัยและนวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร. 2555. ลักษณะสมบัติเฉพาะซิงค์ออกไซด์. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : [http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/cei/nanodatabase/info2.php?cat\\_id=2&p\\_id=130](http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/cei/nanodatabase/info2.php?cat_id=2&p_id=130)
- [7] Basudam Adhikari, Sarmishtha Majumdar. “Polymers in sensor applications.” Prog. Polym. Sci. 29 (2004) : 699–766
- [8] นางสาวณชนันท์ จันทเพชร. 2557. “การเตรียมเส้นใยของพอลิแล็กติก-โค-ไกลโคลิกแอซิดที่มีสารปฏิชีวนะโดยการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต.” สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [9] Wee-Eong Teo, Seeram Ramakrishna. “Electrospun nanofibers as a platform for multifunctional, hierarchically organized nanocomposite.” Composites Science and Technology. 69 (2009) : 1804–1817
- [10] A.Thongphud, B. Paosawatyanong, P.Visalathaphand, P.Supaphol. “Improvement of Hydrophobic Properties of the Electrospun PVA fabrics by SF6 Plasma Treatment”. Advanced Materials Research. Vols. 55-57 (2008) : 625-628

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

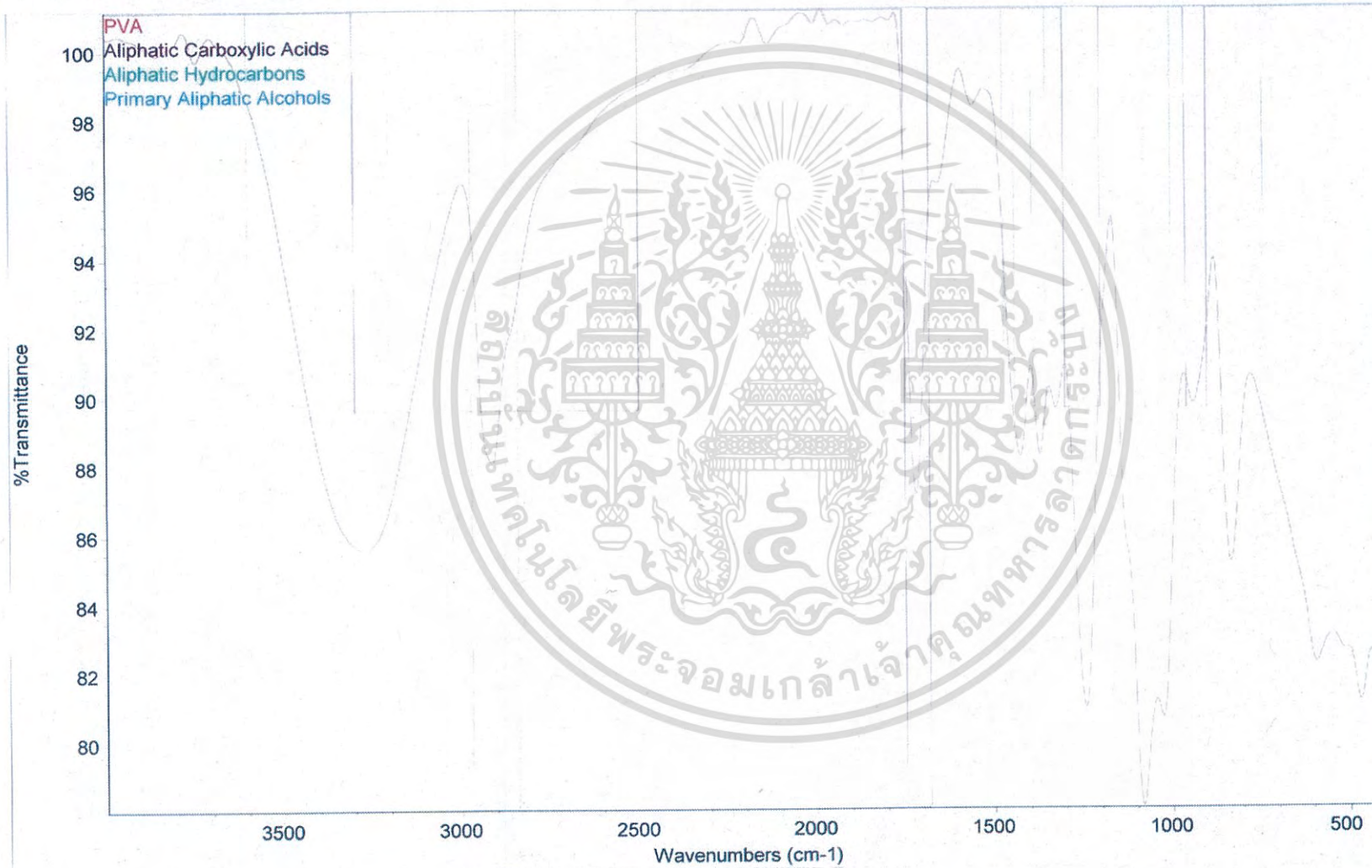
- [11] สุรศักดิ์ ไวทยวงศ์สกุล. ผลิตikel. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://www.material.chula.ac.th/RADIO45/April/radio4-3.htm>
- [12] วิกิพีเดียสารานุกรมเสรี. ภาวะการเป็ยก. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <https://th.wikipedia.org/wiki/ภาวะการเป็ยก>
- [13] นพวรรณ ชันญพานิช, ชลดา สุวรรณบุรณ์. 2557. “แผนเส้นใยนาโนจากพอลิคาโพรแลคโตน”. วารสารวิ ชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่24 ฉบับที่1 ม.ค. - เม.ย. 2557.
- [14] กิตติศักดิ์ อินทเวาส, ธิดาทิพย์ สีหาบุตร. 2557. “การผลิตเส้นใยนาโนจากโพลีไวนิลไพร์โรลิโดนผสมขม้น” หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- [15] M. Zaccaria. et al. 2015. “Effect of Silica and Tin Oxide Nanoparticles on Properties of Nanofibrous Electrospun Separators.” Journal of The Electrochemical Society, 162 (6) : A915-A920
- [16] Kyoungah Cho, Mihyun Kim, Jinyong Choi, Kwangeun Kim, Sangsig Kim. 2010. “Synthesis and characterization of electrospun polymer nanofibers incorporated with CdTe nanoparticles.” Synthetic Metals 160 : 888–891
- [17] Ritu Goyal. et al. 2015. “Nanoparticles and nanofibers for topical drug delivery.” Journal of Controlled
- [18] Saeed Dadvar, Hossein Tavanai, Mohammad Morshed. 2012. “Effect of embedding MgO and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles in the precursor on the pore characteristics of PAN based activated carbon nanofibers.” Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 98 : 98–105
- [19] Xiaofeng Lu. et al. 2006. “Large-scale synthesis of tungsten oxide nanofibers by electrospinning.” Journal of Colloid and Interface Science 298 : 996–999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



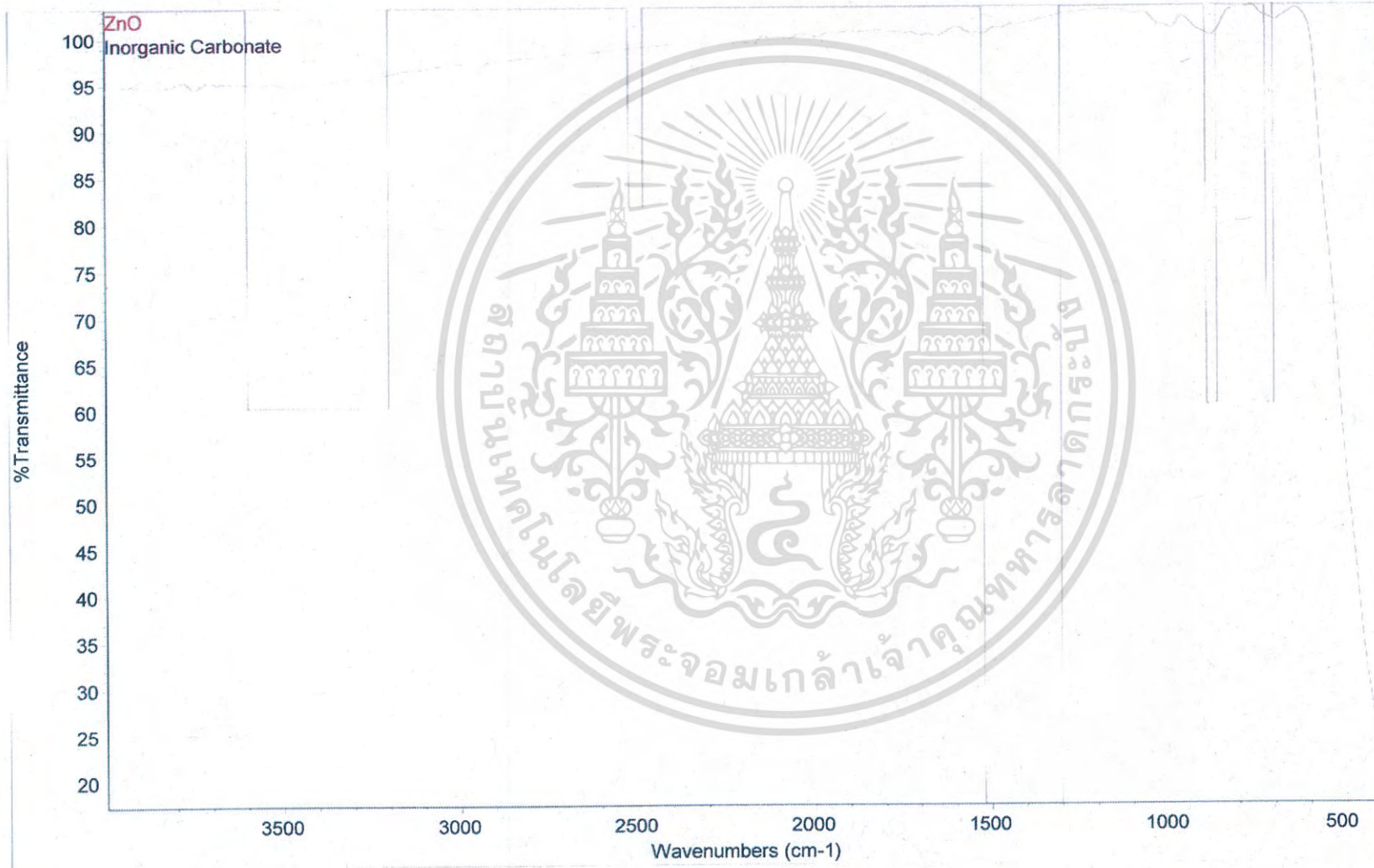
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IR Spectral Interpretation results for: PVA  
Date: Thu Feb 18 15:49:11 2016 (GMT-08:00)



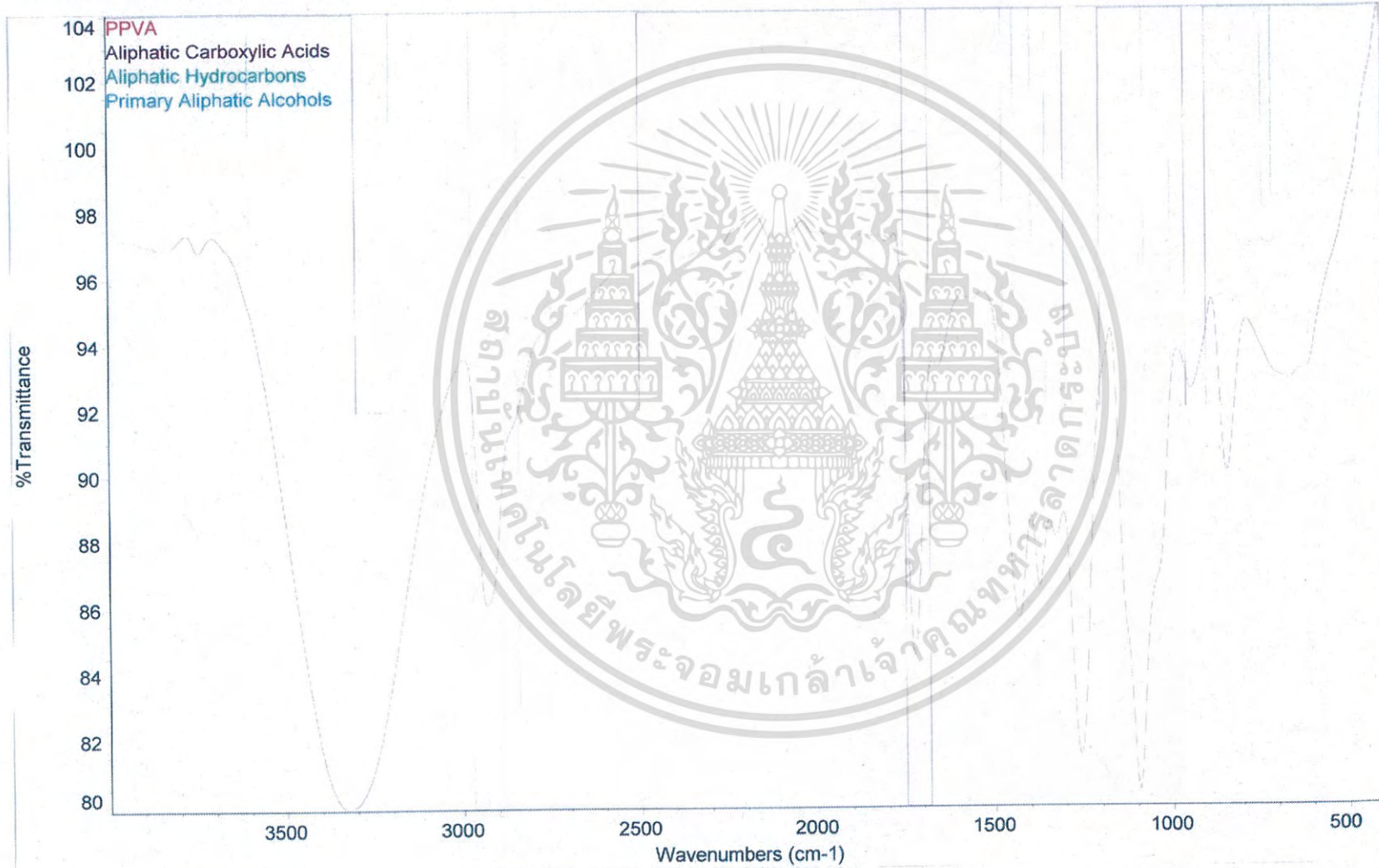
โพลีไวนิลแอลกอฮอล์

IR Spectral Interpretation results for: ZnO  
Date: Thu Feb 18 15:44:18 2016 (GMT-08:00)



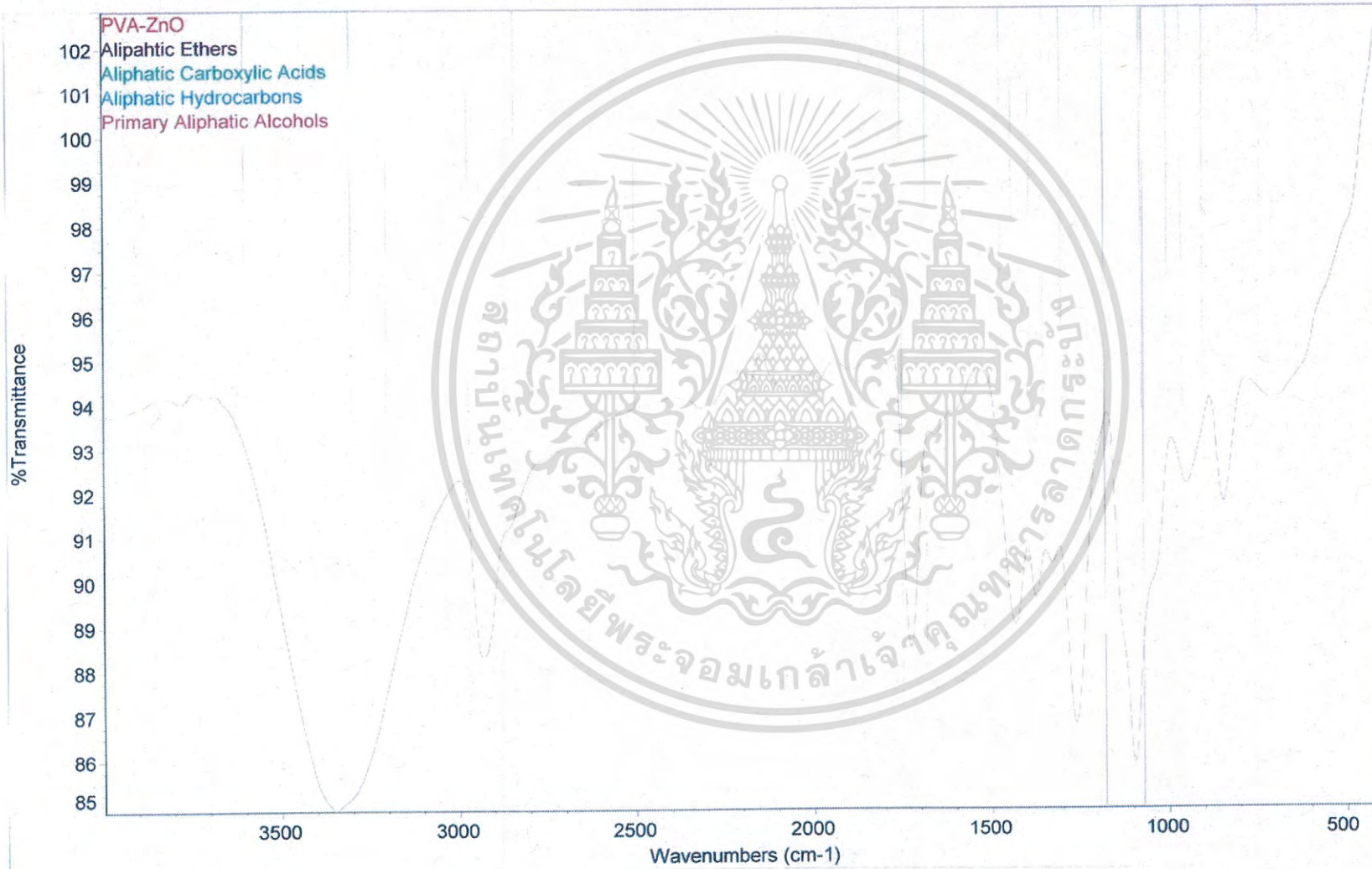
சிங்கீகரணம்

IR Spectral Interpretation results for: PPVA  
Date: Thu Feb 18 15:39:53 2016 (GMT-08:00)

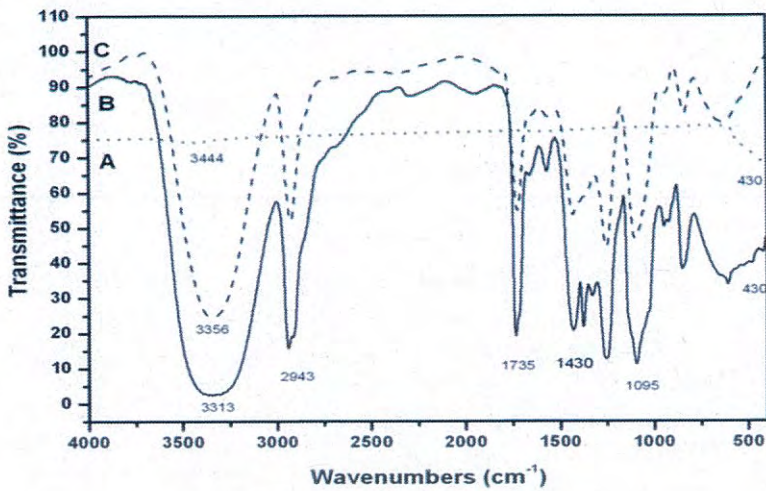


เส้นใยพอลิเอทิลีน

IR Spectral Interpretation results for: PVA-ZnO  
Date: Thu Feb 18 15:33:25 2016 (GMT-08:00)



เส้นในกราฟสีฟ้าแสดงการดูดกลืนของสาร/ซึ่งคือออกไซด์



เลขคลื่น 3444 cm<sup>-1</sup> แสดงถึงหมู่ -OH

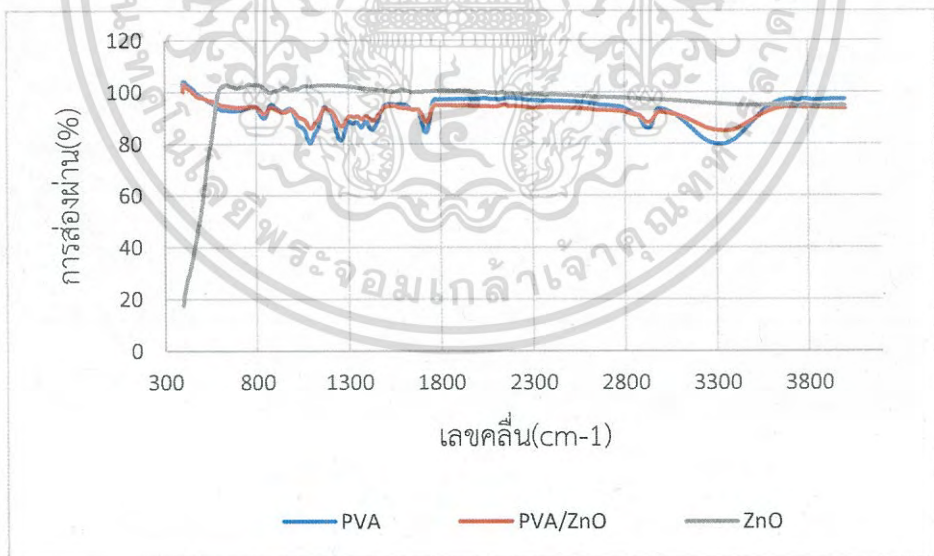
เลขคลื่น 430 cm<sup>-1</sup> แสดงถึงพันธะ Zn-O

เลขคลื่น 3356 cm<sup>-1</sup> การยืดเกาะของ O-H ซึ่งเกิดจากการที่ไฮโดรเจนเข้าจับพันธะ

เลขคลื่น 2943 และ 1430 cm<sup>-1</sup> การยืดของ C-H และ รูปแบบของกลุ่มอัลคิล -CH<sub>2</sub>-, ตามลำดับ

เลขคลื่น 1095 cm<sup>-1</sup> แสดงถึงการยืด C-O

เลขคลื่น 1735 cm<sup>-1</sup> แสดงถึงการปรากฏของกลุ่มอะซิเตทของ PVA



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้วิจัย



นายวีรศรุต แก่นไร่ เกิดวันที่ 2 ตุลาคม พ.ศ. 2536 ภูมิลำเนาที่จังหวัดชัยนาท สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมปลายที่โรงเรียนนครสวรรค์ จังหวัดนครสวรรค์ ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี ภาควิชาฟิสิกส์ เกรดเฉลี่ยในปัจจุบัน 3.05 กำลังจะศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์ ในปัจจุบันมีความสนใจอย่างมากในด้านวัสดุศาสตร์ระดับนาโน

### ประวัติการทำงาน

ผู้ช่วยสอนวิชา Intermediate Laboratory 1 (การตกแบบอสิระ, สนามแม่เหล็กโลก, แรงเคลื่อนไฟฟ้าจากความแตกต่างของอุณหภูมิ) (2557-2559)

ผู้ช่วยสอนวิชาซึ่ง Intermediate Laboratory 2 (เทอร์มิสเตอร์, เฮมโวลต์เซอร์โซแนน) (2557-2559)

ฝึกงานที่ห้องปฏิบัติการพลาสมาและวัสดุขั้นสูง โดยมี ผศ.ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ดัยรยง เป็นหัวหน้าห้องปฏิบัติการ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (1 มิ.ย. - 31 ก.ค. 2558)

ผู้ช่วยนักวิจัย โดยได้รับทุนสนับสนุนจาก AUN/SEED-Net JICA (รัฐบาลญี่ปุ่น) ในโครงการ Collaborative Research Program for Alumni Members (CRA) 2014 เรื่อง Preparation and characterization of iron disilicide and heterojunction combined with silicon for photodiode and photovoltaic applications (2557 -2559)

ผู้ช่วยนักวิจัย โดยได้รับทุนสนับสนุนจาก AUN/SEED-Net JICA (รัฐบาลญี่ปุ่น) ในโครงการ Collaborative Research Program for Alumni Members (CRA) 2016 เรื่อง Preparation of Iron Disilicide Thin Films by Sputtering and Their Physical Properties (2559 -2561)

### งานด้านสังคม

เข้าร่วมกิจกรรมค่ายวิทยาศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (พ.ศ. 2557) ที่โรงเรียนบางคล้าพิทยาคม จังหวัดฉะเชิงเทรา

เข้าร่วมกิจกรรมค่ายวิทยาศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (พ.ศ. 2558) ที่โรงเรียนสามัคคีราษฎร์บำรุง จังหวัดฉะเชิงเทรา

### ผลงานด้านวิชาการ

A. Kangwaikal, W. Keanrai, S. Kongnithichalerm , N. Promros and B. Paosawatyanong. The 40<sup>th</sup> Congress on Science and Technology of Thailand (STT40). Plasma Parameters of Direct-Current Glow Discharge obtained by Single Langmuir Probe Technique (Abstract & Poster)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

N. Promros, P. Sittimart, **W. Kaenrai**, R. Baba, H. Kishimoto, T. Hanada, A. Zkrai, M. Shaban, T. Yoshitake. ICSS MEETING International Conference on Small Science. Investigation of Electrical Transport Properties in Heterojunctions Comprising Silicon Substrate and Nanocrystalline Iron Disilicide (Abstract & Poster)

N. Promros, P. Sittimart, **W. Kaenrai**, R. Baba, H. Kishimoto, T. Hanada, A. Zkrai, M. Shaban, T. Yoshitake. Investigation of Electrical Transport Properties in Heterojunctions Comprising Silicon Substrate and Nanocrystalline Iron Disilicide. Journal of Nanoscience and Nanotechnology (JNN)

#### บุคคลอ้างอิง

ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผศ.ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้