

การสร้างระบบการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบขั้วไฟฟ้าอิสระสำหรับเส้นใย
พอลิไวนิลลิดีนไดฟลูออไรด์และการประยุกต์ใช้งาน

FABRICATION OF FREE SURFACE ELECTROSPINNING FOR
POLYVINYLIDENE DIFLUORIDE FIBER AND THEIR APPLICATIONS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FABRICATION OF FREE SURFACE ELECTROSPINNING FOR
POLYVINYLIDENE DIFLUORIDE FIBER AND THEIR APPLICSTIONS



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING
IN NANOMATERIAL ENGINEERING
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาภาวโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การสร้างระบบการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบขั้วไฟฟ้าอิสระสำหรับเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์และการประยุกต์ใช้งาน

Special Project Title Fabrication of free surface electrospinning for Polyvinylidene difluoride fiber and their Applications

นักศึกษา อาทิตยา ไหมทอง

รหัสประจำตัว 58110069

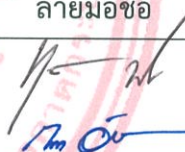
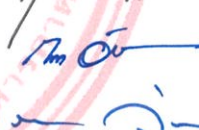

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน

ปีการศึกษา 2561

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ทศยาภรณ์ ทิวาวงศ์

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. ทศยาภรณ์ ทิวาวงศ์	
ผศ.ดร. กรกช อ่อนละออ	
รศ.ดร.วรรณวิไล วิทยาการ	

ภาควิชาภาวโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRBANG

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดารินี พรหมโยธิน)
หัวหน้าภาควิชาภาวโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วันที่ 20 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การสร้างระบบการป้อนเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบขั้วไฟฟ้าอิสระ สำหรับเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์และการประยุกต์ใช้งาน
นักศึกษา	นางสาวอาทิตย์ยา ไหมทอง
รหัสประจำตัว	58110069
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ทุติยาภรณ์ ทิววงศ์

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาการป้อนเส้นใยพอลิเมอร์จากกระบวนการทางไฟฟ้าสถิตแบบไม่ใช้เข็มเพื่อการสร้างระบบสำหรับการป้อนเส้นใยบนขั้วไฟฟ้า จะส่งผลให้ได้เส้นใยที่มีพื้นที่มากขึ้น โดยการออกแบบระบบการป้อนเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบขั้วไฟฟ้าอิสระและเตรียมสารละลายพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ และหลังจากการป้อนเส้นใยโดยระบบที่ได้มีการออกแบบไว้ จึงหาผลกระทบจากปัจจัยที่มีผลต่อการป้อนเส้นใยโดยความเร็วรอบที่เหมาะสม ระยะห่างที่เหมาะสม เวลาที่เหมาะสม และความร้อนที่เหมาะสมกับการเปลี่ยนเฟสของพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ และการตรวจสอบคุณสมบัติเพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุด โดยความเร็วรอบที่เหมาะสมที่สุดในการป้อนเส้นใยของระบบนี้อยู่ในช่วง 15-20 รอบต่อนาที ระยะห่างที่เหมาะสมที่สุดของระบบนี้คือ 6 เซนติเมตร เวลาที่ใช้ในการป้อนเส้นใยที่เหมาะสมกับระบบนี้ที่สุดคือ 10 นาที

จากนั้นนำเงื่อนไขเหล่านี้มาใช้ในการขึ้นรูปเส้นใยนาโนบนขั้วไฟฟ้ากระดาษ และนำมาตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อประยุกต์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของอุปกรณ์ดังกล่าวต่อไป

คำสำคัญ: การป้อนเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบขั้วไฟฟ้าอิสระ, พอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์

Special project	Fabrication of free surface electrospinning for Polyvinylidene difluoride fiber and their Applications
Student	Miss Athittaya Maithong
Student ID	58110069
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nano Material Engineering
Year	2018
Advisor	Asst.Prof.Dr. Thutiyaporn Thiwawong

ABSTRACT

This Special project examined and developed needleless static electrospinning for polymeric fiber to create an electrode-based fiber spinning system that yields more fiber production area. After the static and non-polarized-electrode electrospinning setup was designed, and polyvinylidene fluoride was prepared, and the fiber was subsequently spun using the designed system. Influencing factors were observed and analyzed to determine the appropriate spinning speed, distance, time, and heat against the phase change of polyvinylidene fluoride. The findings revealed that the best spinning production conditions were at a 15-20 RPM spinning speed at a 6-centimeter distance for a 10-minute duration. These conditions were implemented to produce nanofiber on paper electrodes, and the electrical properties were examined for further applications to create the final model of the electronic device.

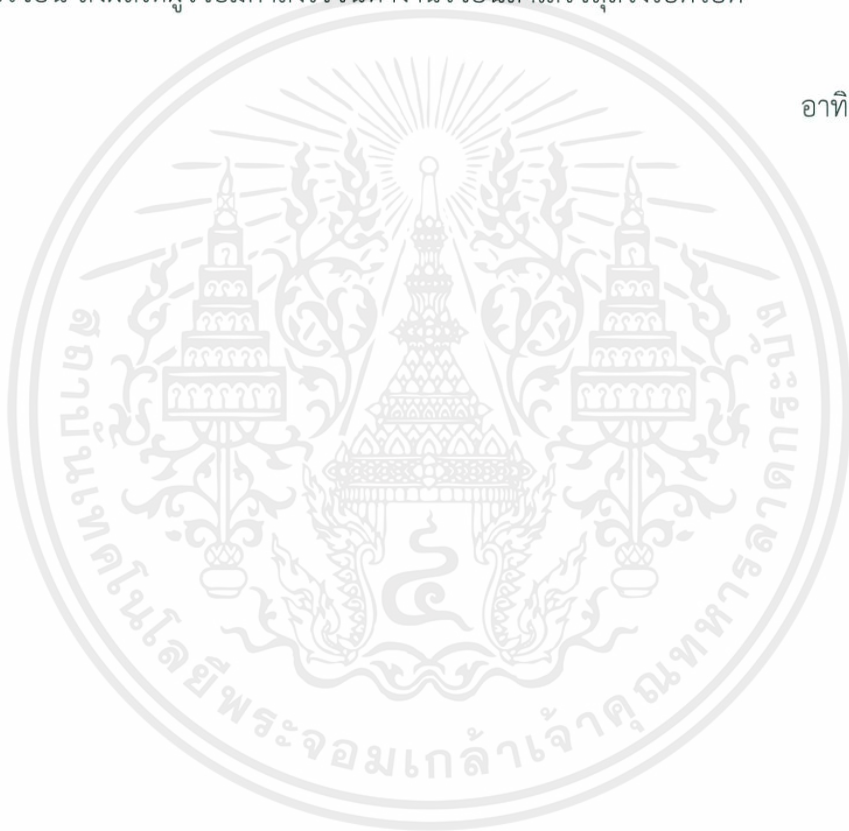
Keywords: free surface electrospinning, Polyvinylidene difluoride

กิตติกรรมประกาศ

ในงานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ทุติยาภรณ์ ทิววงศ์ ที่ได้ ค่อยแนะนำให้ความรู้และการแก้ไขปัญหาต่างที่เกิดขึ้นด้วยความเอาใจใส่ ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบคุณ เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้และขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.เบญจพล ตันธู และ ผศ.ดร.กรกช อ่อนละอ ออาจารย์ผู้ที่คอยช่วยเหลือและให้คำปรึกษา ขอขอบคุณ นายโพธิญาณ สองแก้ว ที่คอยสอนการใช้ เครื่องมือต่างๆในการทำงานวิจัยนี้และคอยให้คำปรึกษาเมื่อเกิดปัญหาจึงทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จได้

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา พี่น้อง และเพื่อนทุกคน ที่คอยเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยในระหว่าง การทำงานวิจัยนี้ ส่งผลให้ผู้วิจัยมีกำลังใจจนทำงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

อาทิตยา ไหมทอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	3
2.1 สารละลายพอลิเมอร์.....	3
2.1.1 ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์.....	3
2.2 พอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ (Polyvinylidene difluoride).....	4
2.2.1 กระบวนการขึ้นรูปใช้งานพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์.....	5
2.2.2 การเปลี่ยนเฟสของพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ด้วยความร้อน.....	6
2.3 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก.....	10
2.4 ระบบการขึ้นรูปเส้นใยนาโนด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	12
2.4.1 เทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	12
2.4.2 การเกิดเส้นใยนาโนด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	12
2.4.3 ศักย์ไฟฟ้า.....	13
2.4.4 แรงดันไฟฟ้า.....	13
2.4.5 การพัฒนากระบวนการขึ้นรูปเส้นใยโดยวิธีปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	14
2.4.6 การผลิตเส้นใยนาโนโดยใช้พื้นที่กว้าง.....	16
2.5 เทคนิคการตรวจวิเคราะห์.....	19
2.5.1 การตรวจวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	19
2.5.2 การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี.....	22
2.5.3 การตรวจวัดวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้า.....	23

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	25
3.1 การออกแบบระบบป้อนเส้นใยโดยเทคนิคปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบขั้วไฟฟ้าอิสระ	26
3.1.1 การร่างแบบระบบป้อนเส้นใยโดยเทคนิคปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบขั้วไฟฟ้าอิสระ ..	26
3.1.2 การสร้างชิ้นงานต้นแบบของระบบพ่นเคลือบเส้นใยเทคนิคปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ขั้วไฟฟ้า อิสระ.....	26
3.2 องค์ประกอบของระบบเครื่องปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบไม่ใช้เข็ม	27
3.2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูง	27
3.2.2 แกนหมุน Spinner.....	27
3.2.3 Stepper motor	28
3.2.4 Arduino board	28
3.2.5 Rotating collector.....	29
3.2.6 DC motor.....	29
3.3 การเตรียมฐานรองรับ	30
3.3.1 การเตรียมฐานรองรับแบบกระดาษ	30
3.3.2 การเตรียมฐานรองรับแบบขั้วไฟฟ้า	30
3.4 การเตรียมเส้นใยโดยระบบป้อนเส้นใยเทคนิคปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตขั้วไฟฟ้าอิสระ	31
3.4.1 เงื่อนไขความเร็วในการหมุนขั้วไฟฟ้าในการปั่นเส้นใย.....	31
3.4.2 เงื่อนไขระยะห่างในการปั่นเส้นใย.....	31
3.4.3 เงื่อนไขระยะเวลาในการปั่นเส้นใย	32
3.5 การตรวจสอบสมบัติฟิล์ม	33
3.5.1 การตรวจสอบองค์ประกอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปคโตรสโคปี.....	33
บทที่ 4 วิเคราะห์และอภิปรายผล.....	35
4.1 แบบร่างชิ้นงานต้นแบบและต้นแบบระบบขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์โดยการปั่นเส้นด้วย ไฟฟ้าสถิตแบบขั้วไฟฟ้าอิสระ	35
4.2 ผลการตรวจวิเคราะห์ชิ้นงานทดสอบการขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์โดยการปั่นเส้นด้วยไฟฟ้า สถิต แบบขั้วไฟฟ้าอิสระ.....	37
4.2.1 เงื่อนไขความเร็วในการหมุน.....	37

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2.2 เจ็อนไจระยะเวลาในการปั่นเส้นใย.....	42
4.2.3 เจ็อนไจสนามไฟฟ้าโดยการปรับระยะห่างระหว่างฐานรองรับกับขั้วไฟฟ้า.....	46
4.2.4 ผลการตรวจสอบทางไฟฟ้า.....	49
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	53
บรรณานุกรม.....	55
ประวัติผู้เขียน.....	58



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงการพบเฟสหมู่ฟังก์ชันของพอลิไวนิลิตินฟลูออไรด์.....	8
2.2 แสดงการพบเฟสต่างๆของพอลิไวนิลิตินฟลูออไรด์.....	9
2.3 แสดงการเปรียบเทียบการปั่นเส้นใยนาโนด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบใช้หัวฉีดและไม่ใช้หัวฉีด	18
3.1 แสดงการทดลองภายใต้เงื่อนไขความเร็ว	31
3.2 แสดงการทดลองภายใต้เงื่อนไขระยะห่าง	32
3.3 แสดงการทดลองภายใต้เงื่อนไขระยะเวลา	32
4.1 ตารางแสดงข้อมูลของระบบต้นแบบ	37
4.2 ภาพถ่ายพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยพอลิไวนิลิตินฟลูออไรด์ภายใต้เงื่อนไขความเร็วรอบในการหมุนของ spinner.....	38
4.3 แสดงผลการทดลองจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยพอลิไวนิลิตินได-ฟลูออไรด์ภายใต้เงื่อนไขระยะเวลาในการหมุน	42
4.4 แสดงผลการทดลองจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยพอลิไวนิลิตินไดฟลูออไรด์ภายใต้เงื่อนไขระยะระหว่างฐานรองรับกับขั้วไฟฟ้า.....	46
4.5 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงาน	51

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ภาพเส้นใยจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์โซลูพลัส.....	4
2.2 สายโซ่ของ PVDF หลังการดึง	5
2.3 connectivity ของวัสดุประกอบ	6
2.4 กราฟจากการตรวจวัดด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปีด้วยการปั่นเคลือบที่ความเข้มข้น 16 wt% ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที.....	7
2.5 แสดงการเกิด Direct Piezo Effect และ Indirect Piezo Effect.....	10
2.6 โครงสร้างอะตอมของ perovskite structure.....	10
2.7 โครงสร้าง Cubic (ก) เมื่อได้รับแรงกระทำในแนวแกน Z จะยืดหดตัว ทำให้โครงสร้าง เปลี่ยนเป็น tetragonal (ข) เมื่อได้รับแรงในแนวแกน X หรือ Y จะบิดตัว โครงสร้าง เปลี่ยนเป็น Rhombohedral (ค) หรือ Monoclinic (ง).....	11
2.8 ระบบการขึ้นรูปเส้นใยนาโนด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต	12
2.9 Formation of Taylor cone	13
2.10 ระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน.....	15
2.11 ระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบหลอมละลาย.....	15
2.12 หัวฉีดแบบหลายหัว	16
2.13 การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตโดยไม่ใช้หัวเข็ม.....	17
2.14 spinneret.....	17
2.15 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	20
2.16 รูปแสดงหลักการทำงานของเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี.....	23
2.17 รูปแสดงรูปแสดงผังการทำงานของมัลติมิเตอร์	24
3.1 แผนผังงานการดำเนินงาน	25
3.2 ระบบเครื่องพิมพ์ 3 มิติ	26
3.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูง.....	27
3.4 แกนหมุน Spinner	27
3.5 Stepper motor	28
3.6 Arduino board.....	28
3.7 Rotating collector.....	29
3.8 DC motor	29

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9 ขนาดของแผ่นฐานรองรับ	30
3.10 ขั้วไฟฟ้ากระดาศ	30
3.11 ระบบอินฟราเรดสเปคโตรสโคปีแบบฟูเรียร์.....	33
3.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด	34
3.13 อุปกรณ์ในการตรวจวัด.....	34
4.1 แบบร่างการขึ้นรูปส่วนของขั้วไฟฟ้า.....	35
4.2 แบบร่างส่วนของห้องขึ้นรูปเส้นใย.....	36
4.3 แบบร่างภายนอกของระบบขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์โดยการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ขั้วไฟฟ้าอิสระ.....	36
4.4 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์บน กระดาศจากการปั่นเคลือบด้วยความเร็วรอบ 15 รอบต่อนาที และให้ความร้อนที่ (ก)อุณหภูมิห้อง (ข)80 องศาเซลเซียส (ค)100 องศาเซลเซียส และ(ง)120 องศาเซลเซียส	39
4.5 การทะลุผ่านของรังสีอินฟราเรดของวัสดุประกอบเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไดฟลูออไรด์ที่อุณหภูมิ ต่างกันภายใต้เงื่อนไขความเร็วการหมุน 15 รอบต่อนาที.....	40
4.6 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์บน กระดาศจากการปั่นเคลือบด้วยระยะเวลา 10 นาที และให้ความร้อนที่ (ก) อุณหภูมิห้อง (ข) 80 องศาเซลเซียส (ค) 100 องศาเซลเซียส และ (ง) 120 องศาเซลเซียส.....	43
4.7 การทะลุผ่านของรังสีอินฟราเรดของวัสดุประกอบเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไดฟลูออไรด์ที่อุณหภูมิ ต่างกันภายใต้เงื่อนไขระยะเวลาในการปั่นเส้นใย 10 นาที.....	44
4.8 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์บน กระดาศจากการปั่นเคลือบด้วยระยะห่างระหว่างฐานรองรับกับขั้วไฟฟ้า เป็น 6 เซนติเมตร และให้ความร้อนที่ (ก) อุณหภูมิห้อง(ข) 80 องศาเซลเซียส (ค) 100 องศา เซลเซียส และ (ง) 120 องศาเซลเซียส.....	47
4.9 การทะลุผ่านของรังสีอินฟราเรดของวัสดุประกอบเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไดฟลูออไรด์ที่ อุณหภูมิ ต่างกันภายใต้เงื่อนไขระยะระหว่างฐานรองรับกับขั้วไฟฟ้าที่ 6 cm.....	48
4.10 ผลการตรวจสอบทางไฟฟ้าจากระยะห่างที่ 4 เซนติเมตรที่อุณหภูมิต่างกัน	49
4.11 ผลการตรวจสอบทางไฟฟ้าจากระยะห่างที่ 6 เซนติเมตรที่อุณหภูมิต่างกัน	50

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (electrospinning) เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมสูงอย่างมากและเป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลายโดยกระบวนการนี้ได้มีการพัฒนาขึ้นมากกว่า 60 ปีโดย Formalas [1] และในปัจจุบันมีการพัฒนาเทคนิคนี้ให้สามารถผลิตเส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กตั้งแต่ ระดับไมโครเมตรถึงระดับนาโนเมตรได้ ด้วยการใช้แรงทางไฟฟ้าที่เกิดจากศักย์ไฟฟ้าสูง ทำให้สารละลายพอลิเมอร์เกิดประจุขึ้นที่ผิวหน้าและยืดออกเป็น “กรวยของเทเลอร์” ซึ่งจะมีรูปร่างเป็นทรงกรวย และเมื่อสนามไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นถึงค่าหนึ่ง ซึ่งมีความมากกว่าแรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์จะเกิดแรงขับเคลื่อนให้สารละลายพอลิเมอร์ที่มีประจุเคลื่อนที่ไปยังแผ่นรองรับซึ่งมีประจุตรงข้ามกัน และระหว่างการเคลื่อนที่สู่แผ่นรองรับจะเกิดไอละเหยของสารละลายทำให้ได้เส้นใยที่มีขนาดเล็ก ซึ่งมีคุณสมบัติเด่นคือ

1. เส้นใยที่ได้จะมีขนาดที่เล็กมาก โดยทั่วไปจะมีขนาดตั้งแต่ 1-2 ไมโครเมตร จึงเรียกว่า เส้นใยนาโนหรือ เส้นใยนาโนอิเล็กทรอนิกส์
2. พื้นผิว เนื่องจากเส้นใยมีขนาดเล็กจึงมีพื้นที่ผิวมากในขณะที่น้ำหนักเบา
3. เส้นใยนาโนที่ได้จะมีโครงสร้างที่มีความเป็นรูพรุนอยู่มาก ทำให้มีการส่งผ่านของเหลวและแก๊สได้ดียิ่งขึ้น

เทคนิคดังกล่าวนี้ต่างจากการผลิตเส้นใยในระดับอุตสาหกรรมเนื่องจากการพัฒนาเส้นใยแบบเส้นต่อเส้น กำลังในการผลิตน้อย เป็นปัญหาในงานวิจัยที่ต้องปรับปรุงระบบเพื่อง่ายและเอื้อต่อการผลิตในเชิงอุตสาหกรรม

สำหรับเส้นใยพอลิเมอร์ในปัจจุบันนั้นเป็นที่สนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีการสังเคราะห์เส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กในระดับนาโนเมตร เรียกว่า เส้นใยนาโน และจากงานวิจัยพบว่าเส้นใยนาโนสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น ในด้านการแพทย์มีการนำเส้นใยนาโนมาใช้ทำอุปกรณ์รักษาแผลที่เกิดรอยไหม้ โดยการฉีตเส้นใยนาโนลงบนผิวหนังที่ได้รับบาดเจ็บ เส้นใยนาโนมีคุณสมบัติในการดูดซับของเหลวและแก๊สที่ดี จึงทำให้ช่วยป้องกันแบคทีเรียและแผลหายได้ไวขึ้น และมีการนำเส้นใยนาโนมาใช้เป็นโครงสร้างของเครื่องกรองอีกด้วย

สำหรับการประยุกต์ใช้งานเส้นใยนาโนด้านอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากเส้นใยนาโนมีคุณสมบัติในการดูดซับที่ดีจึงได้มีการนำไปประยุกต์ใช้งานในหลายๆด้าน และสำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านอิเล็กทรอนิกส์นั้นนิยมนำเส้นใยนาโนมาขึ้นรูปบนขั้วไฟฟ้า เพื่อนำไปใช้ด้านอิเล็กทรอนิกส์ จึงทำให้เห็นความสำคัญของการพัฒนาระบบการปั่นเส้นใยขึ้น เพื่อให้ได้อุปกรณ์ที่มีคุณภาพ [2]

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อสร้างระบบปั่นเส้นใยโดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบไมใช้เข็มเพื่อรองรับการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อลักษณะของเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ที่ปั่นด้วยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบขั้วไฟฟ้าอิสระ
- 1.2.3 เพื่อนำเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ไปประยุกต์ใช้งานด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

1.3 ขอบเขตของโครงการ

การดำเนินงานวิจัยเริ่มจากการหาข้อมูลเกี่ยวกับเทคนิคการขึ้นรูปเส้นใยโดยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต จากนั้นศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการฐานรองรับระหว่างแบบราบกับแบบทรงกลมหมุน ต่อมาทำการออกแบบระบบการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตโดยใช้ฐานรองรับแบบทรงกลมหมุน จากนั้นสร้างเครื่องต้นแบบเพื่อใช้ในการปั่นเส้นใยนาโนบนขั้วไฟฟ้า จากนั้นเตรียมสารละลายพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ที่ใช้และหาผลกระทบจากปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อคุณสมบัติของเส้นใยและการตรวจสอบคุณสมบัติเพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุด และนำเงื่อนไขนั้นมาใช้ในการปั่นเส้นใยนาโนบนขั้วไฟฟ้ากระดาษเพื่อประยุกต์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จากนั้นนำมาตรวจสอบสมบัติของอุปกรณ์ดังกล่าวต่อ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ความรู้ที่ได้รับจากการปฏิบัติงานทางเทคนิคของการสร้างระบบปั่นเส้นใยโดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบไมใช้เข็ม
- 1.4.2 เรียนรู้วิธีการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นขณะสร้างระบบปั่นเส้นใยโดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบไมใช้เข็ม
- 1.4.3 ได้พัฒนาระบบการปั่นเส้นใยโดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตให้มีความหลากหลายมากขึ้น เพื่อให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งาน

1.5 รายละเอียดงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้สร้างระบบขึ้นรูปเส้นใยโดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบไมใช้เข็ม โดยได้มีการกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของวิจัยและกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่ผู้วิจัยนำมาใช้ จากนั้นกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงานตั้งแต่การออกแบบระบบขึ้นรูปเส้นใยโดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบไมใช้เข็มจนกระทั่งการทดสอบการขึ้นรูปเส้นใย จากนั้นทำการทดสอบและศึกษาสมบัติของเส้นใยพอลิเมอร์เพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์ในการนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับวัสดุกลุ่มเพียโซอิเล็กทริก โดยเฉพาะพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการนำพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์มาประยุกต์ใช้งานกับการพันเคลือบเส้นใยโดยใช้เทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวอิสระ ทฤษฎีเกี่ยวกับการเปลี่ยนเฟสของพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ และสุดท้ายคือหลักการตรวจวิเคราะห์ทางพื้นผิวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด หลักการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบของพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี และการตรวจวิเคราะห์ทางไฟฟ้า

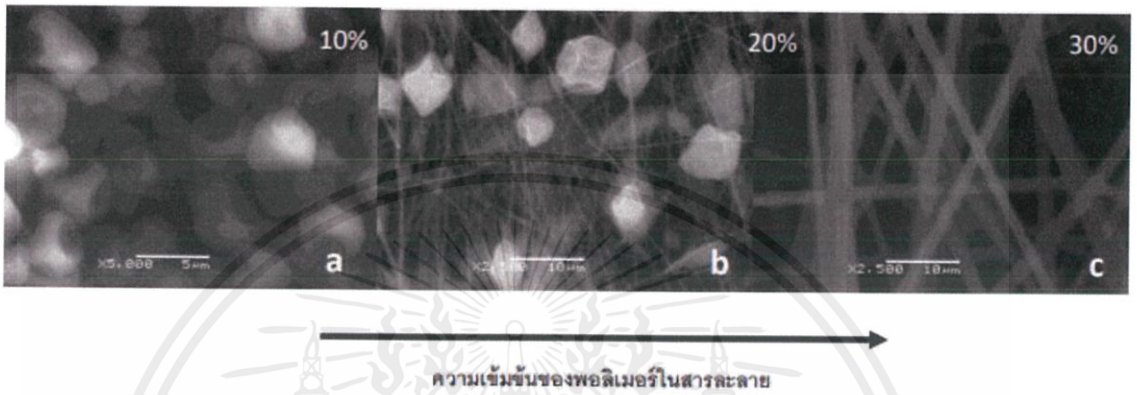
2.1 สารละลายพอลิเมอร์

สำหรับกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตสารละลายพอลิเมอร์ที่ใช้ในกระบวนการปั่นเส้นใยไฟฟ้าสถิตได้จากการละลายพอลิเมอร์ในตัวทำละลายที่เหมาะสม ปัจจัยของสารละลายที่ส่งผลต่อกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตได้แก่ ความเข้มข้นของพอลิเมอร์ น้ำหนักโมลโมเลกุลของพอลิเมอร์ ความสามารถในการระเหยของตัวทำละลายการนำไฟฟ้า และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารละลาย โดยทั่วไปแล้วสารละลายพอลิเมอร์ที่ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์มีการนำไฟฟ้าที่เพียงพอในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตลำดับความสำคัญของปัจจัยเหล่านี้เมื่อคำนึงจากผลกระทบโดยตรงต่อรูปร่างของเส้นใยสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้คือ ความเข้มข้นของพอลิเมอร์ โมลโมเลกุลของพอลิเมอร์และความสามารถในการระเหยของตัวทำละลาย [4]

2.1.1 ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์

ในกรณีที่กำหนดอัตราการไหลของสารละลายระยะทางจากเข็มถึงตัวเก็บเส้นใย และศักย์ไฟฟ้าไว้คงที่ ความเข้มข้นของสารละลายเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงผลของความเข้มข้นของพอลิเมอร์ที่มีต่อรูปร่างของเส้นใย ในกรณีที่ใช้สารละลายพอลิเมอร์ที่เจือจางมากจะทำให้มีปริมาณพอลิเมอร์ไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการเกี่ยวพันกันเป็นโครงร่างเส้นใย สารละลายที่พุ่งออกจากโคนเทเลอร์จะแตกออกเป็นหยดเล็กๆ แทนที่จะได้เป็นเส้นใย (รูปที่ 2.3a) ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะทำให้เกิดกระบวนการที่เรียกว่าอิเล็กโทรสเปรย์ ซึ่งเทคโนโลยีนี้มีการนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตอนุภาคที่มีขนาดไมครอนและนาโนเมตรได้ ในกรณีที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ที่เหมาะสมสายโซ่ของพอลิเมอร์จะเกิดการเกี่ยวพันกันที่เหมาะสมทำให้เกิดเป็นโครงสร้างเส้นใยพอลิเมอร์ซึ่งแข็งแรงพอที่จะต้านแรงของการหดตัวเนื่องจากแรงตึงผิวของสารละลาย (รูปที่ 2.3c)

การหดตัวนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการรักษาพื้นที่ผิวให้น้อยที่สุดของสารละลายพอลิเมอร์ไม่เช่นนั้น การหดตัวจากแรงตึงผิวจะทำให้เกิดลักษณะเป็นปุ่มปม (beading) บนเส้นใยดังแสดงในรูปที่ 2.3b ที่ใช้ความเข้มข้นของพอลิเมอร์ที่น้อยไป ในทางตรงกันข้ามเมื่อความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์สูงขึ้น จะทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นในกรณีที่มีความเข้มข้นของสารละลายสูงเกินไปจะทำให้ความหนืดของสารละลายสูงมากไปจนส่งผลต่อการไหลออกของสารละลายผ่านเข็มฉีดยา ทำให้การไหลไม่สม่ำเสมอและมีผลต่อขนาดเส้นใย [7]

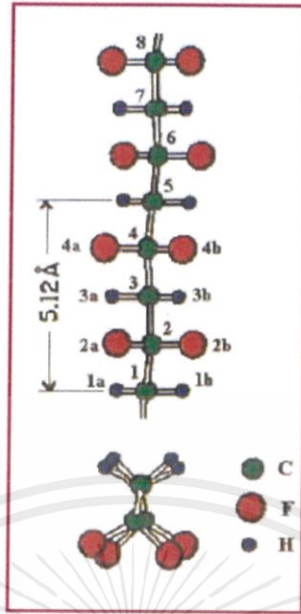


รูปที่ 2.1 ภาพเส้นใยจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์โพลีอิมิด [7]

2.2 พอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ (Polyvinylidene difluoride)

พอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์หรือเรียกว่า PVDF นั้นเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่คุณสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก และเป็นพอลิเมอร์ที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในหลายๆด้านเนื่องจากมีคุณสมบัติที่หลากหลาย และทนต่อสภาพความเป็นกรด-เบสได้ดีในปีค.ศ.1969 นักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่นชื่อ คา วาอิ (H. Kawai) พบว่า PVDF มีสมบัติไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric) กล่าวคือวัสดุเหล่านี้จะมีไดโพลถาวรทางไฟฟ้า (permanent electric dipole) อยู่ในตัวของมันเองถ้ามีสนามไฟฟ้าผ่านฟิล์ม PVDF แผ่นฟิล์มนี้จะยึดหรือหดตัวได้ตามสนามไฟฟ้าเป็นสนามสลับ แผ่นฟลอมจะยึดหดด้วยความถี่ของสนามนั้นซึ่งจะทำให้เกิดสัญญาณเสียงส่งออกมาโดยรอบที่ความถี่สูงสัญญาณเป็นแบบอัลตราโซนิคพบว่าแผ่นฟลอมพอลิเมอร์แบบนี้สามารถตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าความถี่สูงมากถึงในย่านไมโครเวฟ (10 GHz) และส่งสัญญาณคลื่นความถี่ขนาดนี้ออกมาซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการวิจัยในทางกลับกัน ถ้าเรายึดหรือบีบฟลอมพอลิเมอร์นี้จะทำให้ไดโพลถาวรของมันเปลี่ยนแปลงทำให้เกิดประจุไฟฟ้าอิสระขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าโลหะที่ฉาบไวบนแผ่นฟลอมทั้งสองด้านสมบัติของหลังนี้ทำให้เราสามารถใช่ PVDF เป็นเครื่องรับสัญญาณความถี่ในย่านที่กว้างมากได้ ดังนั้นจึงมีการนำ PVDF ที่เป็นพอลิเมอร์ที่จะสามารถยึดหดตัวได้ในสนามไฟฟ้าทำให้นำไปใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง เช่นใช้เป็นเครื่องวัดอุณหภูมิ ลำโพงกระจายเสียง [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 สายโซ่ของ PVDF หลังการดึง [8]

2.2.1 กระบวนการขึ้นรูปใช้งานพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์

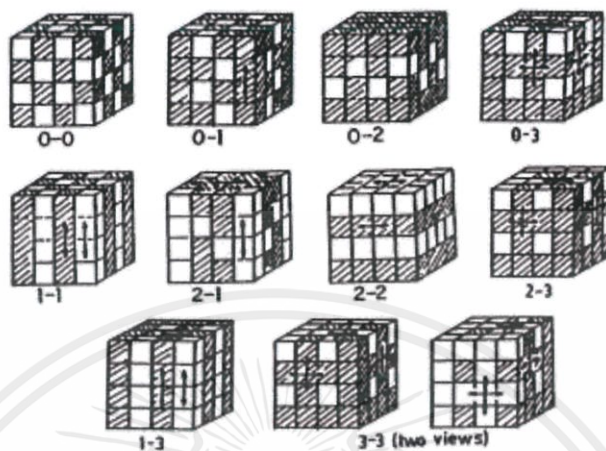
การขึ้นรูปนั้นทำได้โดยการนำพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) ไปละลายด้วยความร้อนหรือนำไปละลายในตัวทำละลายและจึงนำมาขึ้นรูปด้วยวิธีต่างๆได้ เช่น การหล่อแบบการเคลือบหมุน เป็นต้น ในการขึ้นรูปด้วยสารละลาย PVDF นั้นส่วนมากนิยมใช้ตัวทำละลายในตระกูลบิวทาโนน (Butanone) และไดเมทิลฟอมาไมด์ (Dimethylformamide; DMF) ส่วนกรด Perfluorononanoic จะเป็นสารละลายที่ช่วยให้ฟิล์มเออร์ชชนิดนี้แข็งตัว หากนำพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่มีส่วนประกอบของฟลูออรีนนั้น PVDF นั้นเป็นพอลิเมอร์ที่มีกระบวนการละลายที่ไม่ยุ่งยาก และมีจุดหลอมเหลวที่ประมาณ 177 องศาเซลเซียส

การจัดเรียงตัวของ PVDF นั้นส่งผลต่อคุณสมบัติของฟิล์มที่ได้มา โดยในการจัดเรียงตัวแบบแอลฟา (α -phase) นั้นจะพบสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกได้น้อย แต่หาก PVDF นั้นมีการจัดเรียงตัวแบบเบตา (β -phase) จะทำให้พบสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกได้มาก โดยการทำให้ PVDF เปลี่ยนเฟสจากแอลฟาเป็นเบตา นั้นมีหลายวิธีเช่น นำฟิล์มที่ได้นั้นมาทำการให้ความร้อนเพื่อให้ PVDF เปลี่ยนการจัดเรียงเป็นแบบเบตา หรือถ้าฟิล์มที่ได้นั้นมีความหนาอยู่ในช่วงไมครอนจะใช้วิธีการอีกวิธีหนึ่ง โดยจะเรียกว่า การโพลิ่ง (Poling) จะนำฟิล์มไปผ่านสนามไฟฟ้าแรงดันสูง มากกว่า 30 MV/m และหากฟิล์มนั้นมีความหนาเกิน 100 ไมครอน จะตั้งใช้ความร้อนเข้ามาช่วยโดยการให้ความร้อนที่ประมาณ 70-100 องศาเซลเซียสขณะทำการโพลิ่ง

PVDF นั้นหากนำไปใช้รูปคอมโพสิตกับเซรามิกนั้นจะทำให้วัสดุมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น โดยคอมโพสิตที่นิยมนั้นจะมีอยู่สองแบบคือ แบบ 0-3 คอมโพสิต โดยจะเป็นคอมโพสิตที่มีเซรามิกเป็น active

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

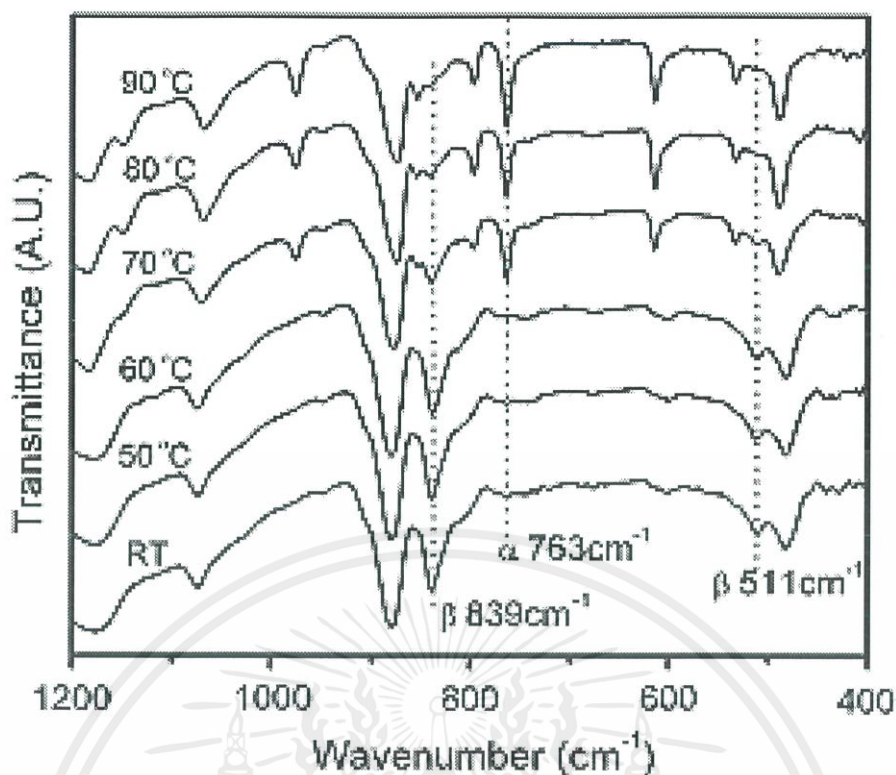
phase มี connectivity 0 ทิศทางของพอลิเมอร์เป็น passive phase มี connectivity 3 ทิศทาง ส่วนแบบที่สองนั้นคือ แบบ 1-3 คอมโพสิตชนิด โดยจะเป็นคอมโพสิตที่มีเซรามิกเป็น active phase มี connectivity 1 ทิศทางของพอลิเมอร์เป็น passive phase มี connectivity 3 ทิศทาง [10]



รูปที่ 2.3 connectivity ของวัสดุประกอบ [11]

2.2.2 การเปลี่ยนเฟสของพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ด้วยความร้อน

เนื่องการพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์นั้นมีการจัดเรียงตัวได้หลายโครงสร้าง แต่โครงสร้างที่แสดงสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกอย่างชัดเจนนั้นคือโครงสร้างแบบเบตา (β -phase) โดยการที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดโครงสร้างแบบเบตา (β -phase) นั้นมีหลายวิธี แต่วิธีที่ได้รับความนิยมและสามารถทำได้ง่ายคือการให้ความร้อนที่น้อยกว่า 100 องศาเซลเซียส เนื่องจากพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์สามารถเปลี่ยนเฟสได้หลายกระบวนการทำให้ BHOOPESH MAHALE [20] และคณะ ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการเปลี่ยนเฟสของฟิล์มพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ที่ได้จากการปั่นเคลือบด้วยเทคนิค spin coating มาทดสอบการเปลี่ยนเฟสของพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ด้วยกระบวนการต่างๆ และหนึ่งในกระบวนการทั้งหมดคือการให้ความร้อนกับฟิล์มพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์โดยการให้ความร้อนในช่วง 50-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชม. ซึ่งได้ผลการทดลองออกมาและนำไปวิเคราะห์ด้วยอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี



รูปที่ 2.4 กราฟจากการตรวจวัดด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปีด้วยการปั่นเคลือบที่ความเข้มข้น 16 wt% ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที [20]

ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าพีคที่ 511 และ 839 cm^{-1} นั้นมาจากโครงสร้างของเบตา (β -phase) ที่มาจาก TTTT (all trans) ของโพลีโมเลกุล ส่วนพีคที่ 615, 763, 795, 855 and 975 cm^{-1} เป็นโครงสร้างที่ได้มาจาก TGTG (T = trans, G = gauche) ของโพลีโมเลกุลที่มาจากแอลฟา (α -phase) ซึ่งจากการทดลองที่ให้อุณหภูมิที่แตกต่างกันตั้งแต่ 50-90 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียสนั้นจะเกิดเบตา (β -phase) มากกว่า แอลฟา (α -phase) แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 70 องศาเซลเซียสนั้นจะนำไปสู่การเกิดแอลฟา (α -phase) ได้มากกว่า (β -phase) [20]

ตารางที่ 2.1 แสดงการพบเฟสหมู่ฟังก์ชันของพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์[21]

Experimental				
Wavenumber cm ⁻¹	Group	Vibration	Comments	Ref.
3016	CH ₂	Symmetric stretching		31, 32
2978	CH ₂	Asymmetric stretching		31, 32
1453	CH ₂	In-plane bending or scissoring		32, 33
1335	CH ₂	Out-of-plane bending (wagging or twisting)		33
840	CH ₂ , CF ₂	CH ₂ rocking and CF ₂ asymmetric stretching	β-Phase (out-of-phase combination)	34, 35, 36
763		In-plane bending or rocking	α-Phase	31
745		In-plane bending or rocking	β-Phase	35
677			Presence of head-to-head and tail-to-tail configuration	37
615	CF ₂ , CCC	CF ₂ bending and CCC skeletal vibration	α-Phase (out of phase)	31, 36
600			β-Phase	35
510	CF ₂	Bending	β-Phase	34, 35, 36
490	CF ₂	Bending and wagging	α-Phase (in-phase combination)	36, 37
445			β-Phase	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

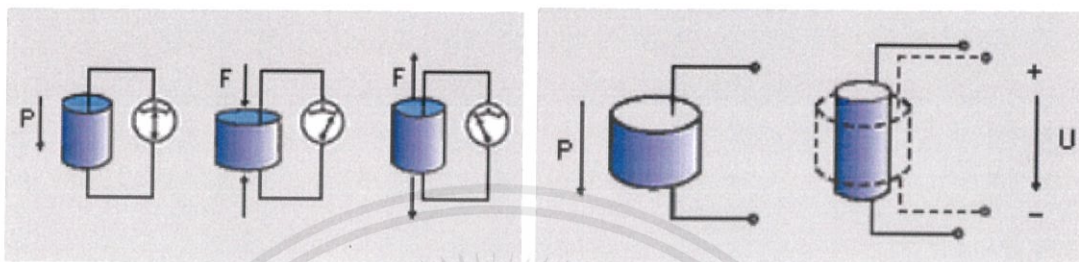
ตารางที่ 2.2 แสดงการพบเฟสต่างๆของพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์[21]

Wave number (cm ⁻¹)	Crystalline phase
431	β
	γ
	β + γ
482	β
	γ
	α
510	β
	γ
	β + γ
480	α
	β
	γ
	β + γ
	β
881	γ
	β + γ
	α + β
	α + β + γ
	α
1071	β
	β + γ
	α + β + γ
	α
1176	β
	γ
	β + γ
1234	B
	β + γ
1275	β
	γ
1401	β

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก

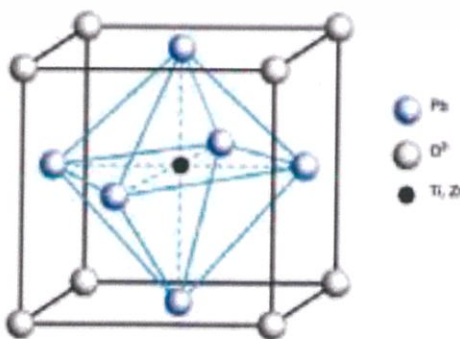
Piezoelectric (เพียโซอิเล็กทริก) คือ อุปกรณ์ตรวจวัดแรงกลต่างๆ เช่น แรงดัน ความเร่ง การสั่น แรงเครียด หรือแรงกระทำอื่นๆ โดยเปลี่ยนพลังงานกลต่างๆเหล่านี้ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ในทางกลับกันเมื่อให้พลังงาน ไฟฟ้าแก่วัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นเพียโซอิเล็กทริก วัสดุนั้นก็จะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลได้เช่นกัน เรียกว่า Converse Effect [22]



รูปที่ 2.5 แสดงการเกิด Direct Piezo Effect และ Indirect Piezo Effect [22]

วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric material) เป็นเซรามิกประเภทหนึ่งที่มีสมบัติพิเศษ กล่าวคือเมื่อได้รับแรงกล (mechanical force) จะให้แรงดันไฟฟ้า (voltage) ที่เรียกว่า ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric effect) ในทางกลับกันเมื่อวัสดุได้รับแรงดันไฟฟ้าจะทำให้มีการเปลี่ยนรูปร่าง (deformation) เกิด แรงกลซึ่งเรียกว่า ปรากฏการณ์อินเวอร์สเพียโซอิเล็กทริก (inverse piezoelectric effect) การเปลี่ยนไปมา ระหว่างพลังงานกล และพลังงานไฟฟ้า สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ สมบัติเพียโซอิเล็กทริก จะเกิดขึ้นในวัสดุที่มีสภาพเป็นฉนวนไฟฟ้าเท่านั้น วัสดุเพียโซอิเล็กทริก มีทั้งที่พบ ในธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ เช่น คริสตอล (gallium phosphate, quartz, tourmaline) เซรามิค โพลีเมอร์ เป็นต้น

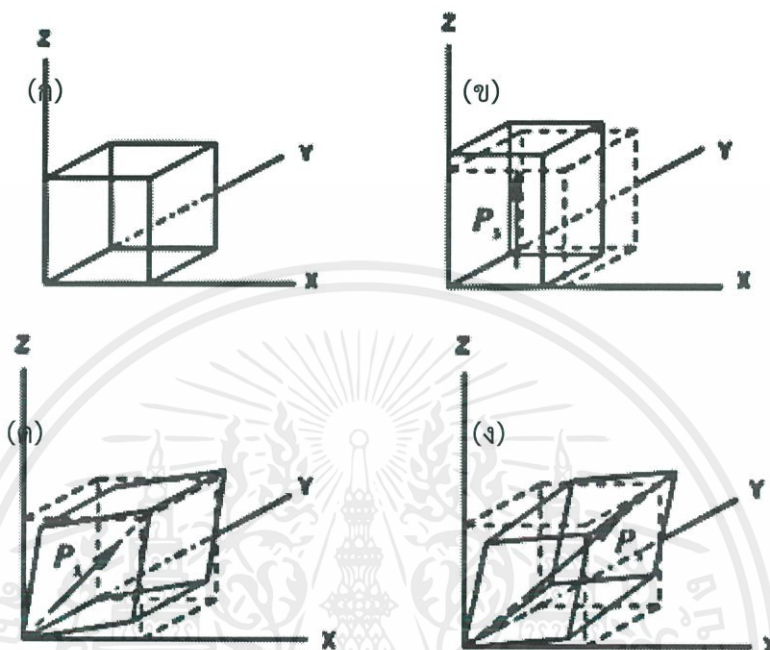
สารประกอบที่มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริก เช่น Barium Titanate, Lead Titanate, Lead Zirconate Titanate, Sodium/Potassium Niobate มีโครงสร้างอยู่ในรูปของ perovskite structure ABO_3 โดยมี อะตอมของ Zr^{4+} หรือ Ti^{4+} อยู่กึ่งกลาง



รูปที่ 2.6 โครงสร้างอะตอมของ perovskite structure [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้า โครงสร้าง cubic จะเกิดการบิดตัว (distort) หากได้รับกระแสไฟฟ้าในแนวแกน z สารจะเกิดการยืดหดตัวในแนวแกน z ทำให้โครงสร้างของ วัสดุเปลี่ยนเป็น Orthorhomic หรือ Tetragonal หากได้รับกระแสไฟฟ้าในแนวแกน x หรือ y จะเกิดการ เือนตัว ทำให้โครงสร้างเปลี่ยนเป็น Rhombohedral หรือ Monoclinic [23]



รูปที่ 2.7 โครงสร้าง Cubic (ก) เมื่อได้รับแรงกระทำในแนวแกน Z จะยืดหดตัว ทำให้โครงสร้าง เปลี่ยนเป็น tetragonal (ข) เมื่อได้รับแรงในแนวแกน X หรือ Y จะบิดตัว โครงสร้าง เปลี่ยนเป็น Rhombohedral (ค) หรือ Monoclinic (ง) [23]

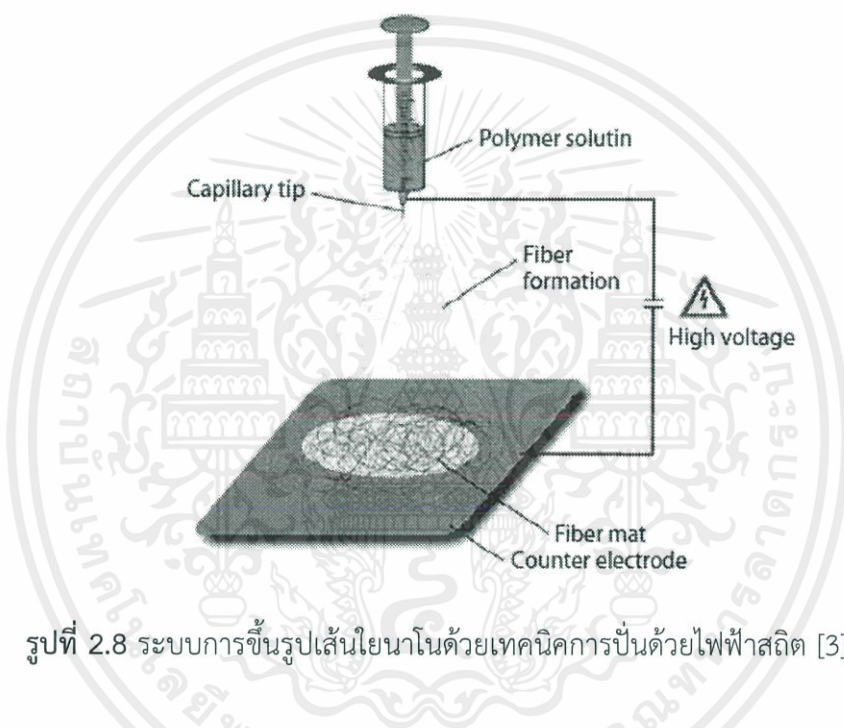
เซนเซอร์เพียโซสามารถนำไปใช้วัดการบิดตัว วัดการสัมผัส วัดแรงสั่นสะเทือน วัดแรงดัน และวัดแรง กระแทก เนื่องจาก มีความสามารถพิเศษคือสามารถเปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นพลังงาน ไฟฟ้าได้ และในทางกลับกัน ก็สามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกลได้ด้วยเช่นกัน เพราะฉะนั้น เซนเซอร์ตัวนี้เลยถูกนำไปใช้ในวงการ ต่างๆมากมาย เช่นในด้านวงการแพทย์ได้นำไปใช้ ผลิตเป็นเครื่องวัดความดันโลหิต (IOP) ด้วย Sensor Piezoelectric ใช้ในการตรวจวัดความดันโลหิต (IOP) ความดันโลหิตที่เปลี่ยนแปลงตามความดันเลือด (OPA) และ อัตราการเต้นของหัวใจ (H) โดย บอกคุณภาพการวัดเป็น Q1-Q5 ทำการวัดแบบไม่ต้องย้อมสี และสามารถวัดความ ดันโลหิตได้ทุก สภาพดวงตา โดยการสัมผัสในส่วนพื้นผิวของกระจกตาส่วนใดก็ได้ เซนเซอร์เพียโซที่ผลิตขึ้นมาใช้ ตะกั่วเป็นตัวประกอบซึ่งตะกั่ว นั้นเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างการนำเซนเซอร์เพียโซมาเชื่อมต่อกับ วงจร ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์กำลังศึกษาหาวิธีผลิตเพียโซอิเล็กทรอนิกส์ไร้สารตะกั่วขึ้น แม้จะทำสำเร็จได้ บ้างแล้ว แต่คุณภาพยังไม่สามารถเทียบเท่าเพียโซอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ตะกั่วได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ระบบการขึ้นรูปเส้นใยนาโนด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

2.4.1 เทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

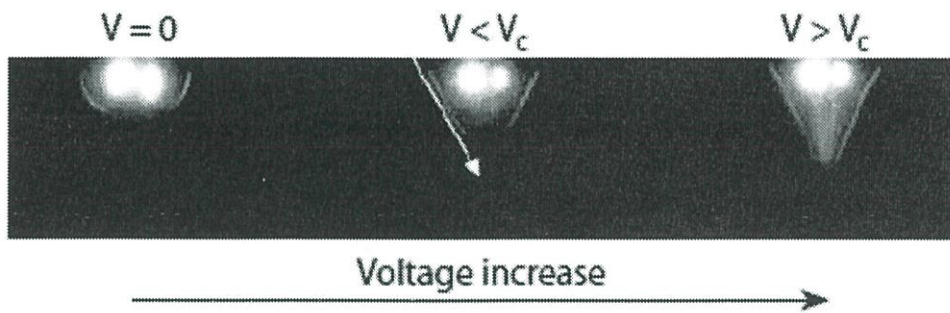
การขึ้นรูปเส้นใยนาโนด้วยเทคนิคการปั่นด้วยระบบไฟฟ้าสถิตนั้นเป็นวิธีการที่จะทำให้ได้เส้นใยจากสารละลายพอลิเมอร์ที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กในระดับไมโครเมตรถึงนาโนเมตร และเทคนิคนี้จะทำให้เส้นใยนั้นมีพื้นที่ผิวที่มากขึ้นอีกด้วย โดยระบบการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตนั้น จะมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญอยู่ 3 ส่วนโดยส่วนที่ 1 จะเป็นส่วนของแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงประมาณ 15-25 kV , Syringe pump ทำหน้าที่ฉีดสารละลายพอลิเมอร์ออกจากปลายเข็ม และ grounded collecting plate ทำหน้าที่เป็นฐานรองรับเส้นใยที่ฉีดออกมาส่วนมากจะทำจากโลหะ [3]



รูปที่ 2.8 ระบบการขึ้นรูปเส้นใยนาโนด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต [3]

2.4.2 การเกิดเส้นใยนาโนด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

เมื่อยังไม่ได้แรงทางไฟฟ้ากับสารละลายพอลิเมอร์แรงดึงดูดของสารละลายจะทำให้สารละลายนั้นมีลักษณะเป็นทรงกลม และเมื่อมีการให้แรงทางไฟฟ้ากับสารละลายพอลิเมอร์ที่ปลายเข็ม จะทำให้พอลิเมอร์มีการเปลี่ยนรูปไปกลายเป็นรูปกรวยหรือเรียกว่า Taylor cone เนื่องจากแรงผลัทางไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปให้กับสารละลายแต่แรงทางไฟฟ้านั้นยังน้อยกว่าแรงดึงดูดของสารละลายทำให้ยังไม่เกิดสายของสารละลายพอลิเมอร์พุ่งออกจากปลายเข็ม เมื่อเราให้แรงทางไฟฟ้ามากขึ้นจนถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่ง ที่มีค่ามากกว่าแรงดึงดูดของสารละลายจะทำให้สารละลายพอลิเมอร์เกิดการพุ่งออกเป็นสายจากปลายเข็มไปสู่ฐานรองรับหรือเรียกว่า Polymer jet[3]



รูปที่ 2.9 Formation of Taylor cone [3]

2.4.3 ศักย์ไฟฟ้า

ศักย์ไฟฟ้าสามารถควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจากระดับไมโครเมตรถึงระดับนาโนเมตรยกตัวอย่างเช่น เมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นความไม่เสถียรและการยืดของเส้นใยจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ได้เส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงอีกทั้งยังอาจส่งผลให้เกิดเป็นเม็ด (bead) ในเส้นใยได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกใช้ศักย์ไฟฟ้าให้มีค่าเหมาะสม [4]

2.4.4 แรงดันไฟฟ้า

แรงดันไฟฟ้าส่วนมากที่ใช้อยู่ที่ประมาณ 6-20 กิโลโวลต์ ในการผลิตเส้นใยนาโนและการเพิ่มแรงดันไฟฟ้านั้นจะส่งผลสองด้านคือ

1. การเพิ่มแรงดันทางไฟฟ้าเป็นการเพิ่มความหนาแน่นของประจุให้กับสารละลายพอลิเมอร์ ด้วยทำให้เกิดการผลึกกันของประจุไฟฟ้า ส่งผลให้สารละลายพอลิเมอร์ยืดออกมากขึ้น ทำให้ได้เส้นใยที่มีขนาดเล็กลง [5]

2. การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเป็นการเพิ่มความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ปลายหัวฉีดกับที่ฐานรองรับ ทำให้สารละลายพอลิเมอร์พุ่งออกไปเร็วขึ้น อยู่ในอากาศน้อยลงส่งผลให้พอลิเมอร์ยืดตัวน้อยลง อาจจะทำให้ได้เส้นใยที่มีขนาดใหญ่ขึ้น [6]

เนื่องจากการเพิ่มแรงดันไฟฟ้านั้น ส่งผลที่ต่างกันกันอย่างมากในเวลาพร้อมๆกัน จึงเป็นเรื่องที่ยากในการสรุปว่าการเพิ่มแรงดันทางไฟฟ้าจะส่งผลให้เส้นใยมีขนาดเล็กหรือใหญ่ขึ้น หากว่าผลของความเร็วในการพุ่งตัวของพอลิเมอร์มีน้อยกว่าผลของแรงดันไฟฟ้าต่อการยืดตัว ก็จะทำให้เส้นใยมีขนาดเล็กลงได้ แต่หากกลับกันถ้าผลของแรงดันไฟฟ้าต่อการยืดตัวส่งผลน้อยกว่าผลของความเร็วในการพุ่งตัวของพอลิเมอร์ ก็จะทำให้ได้เส้นใยที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

หากมีการให้แรงดันไฟฟ้าที่สูงเกินไป จะทำให้เกิดผลกระทบอย่าง 4 อย่าง คือ

1. จะส่งผลให้เกิดแรงคูลอมบ์ที่สูงกว่าแรงหนีตของสารละลายที่ใช้ในการยัดพอลิเมอร์ที่กำลังฉีดตัวออกไปจะทำให้สารละลายพอลิเมอร์นั้น เกิดเป็นเส้นสั้นๆมีการกระจายตัวมากกว่าปกติและอาจจะเกิดเป็นหยดบนฐานรองรับได้

2. จะส่งผลต่อการไหลของสารในขณะที่ทำการฉีดสารละลายพอลิเมอร์ โดยอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์จะมากกว่าอัตราการไหลของสารที่ส่งมาที่หัวปั๊ม ทำให้การเกิด Taylor cone ค่อยๆเล็กลงจนแห้งไปในที่สุดทำให้การฉีดสารนั้นไม่ต่อเนื่อง

3. อาจเกิดการอุดตันของปลายหัวฉีดเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นทำให้ตัวทำละลายนั้น ระเหยเร็วขึ้นและไปอุดตันในที่สุด [5]

4. การใช้แรงดันไฟฟ้าสูงอาจทำให้เวลาของการฉีดลดลงทำให้เส้นใยพอลิเมอร์ที่ฉีดออกมาอยู่นั้น อยู่ใช้เวลาอยู่ในอากาศน้อยลง ส่งผลให้ตัวทำละลายไม่สามารถระเหยออกไปได้หมดทำให้เส้นใยที่ถูกฉีดออกไปที่ฐานรองรับจะมีลักษณะที่มีความชื้นเส้นใยมีความเป็นรูพรุนลดลง จะได้ฟิล์มที่มีคุณภาพที่ แย่ลง [6]

2.4.5 การพัฒนากระบวนการขึ้นรูปเส้นใยโดยวิธีปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

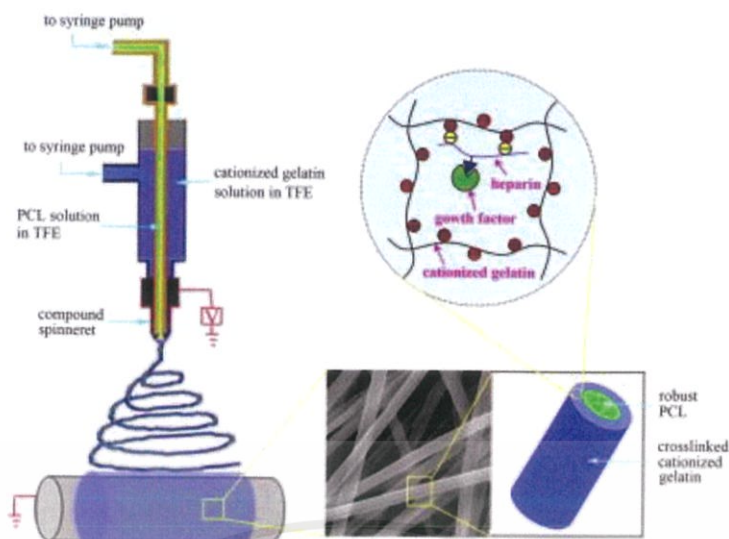
ในปัจจุบันกระบวนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปเส้นใยโดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตนั้น ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก จึงมีการพัฒนาระบบมาอย่างต่อเนื่องส่งผลให้เกิดกระบวนการขึ้นรูป ฟิล์มที่มีความซับซ้อนมากขึ้น เช่น ระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน (coaxial-electrospinning, Coax-ES) ระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบหลอมละลาย (melt-electrospinning, Melt-ES) ระบบปั่น ด้วยไฟฟ้าสถิตแบบสนามใกล้ (near-field electrospinning, NF-ES) และระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบ ใช้สนามแม่เหล็กร่วม (magneto-electrospinning, Magneto-ES)[12]

2.4.5.1 ระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน (coaxial-electrospinning, Coax-ES)

โดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกนนั้นมักจะใช้กับการขึ้นรูปที่มีความพิเศษ เช่น วิศวกรรมเนื้อเยื่อและเทคโนโลยีการนำส่งยา จะมีการนำสารหรือวัตถุดิบมาเป็นส่วนประกอบของเส้น ในนาโน ทำให้ต้องใช้ระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน เนื่องจากระบบสามารถแก้ปัญหาจาก ระบบทั่วไปโดยปัญหาคือ

1. การกักเก็บสารให้อยู่ในเส้นใยนาโน เช่น โมเลกุลชีวภาพ ได้แก่ โปรตีน ยา และไวรัส ใน สภาวะแวดล้อมของเหลว เพื่อให้สารนั้นยังคงคุณสมบัติไว้ได้

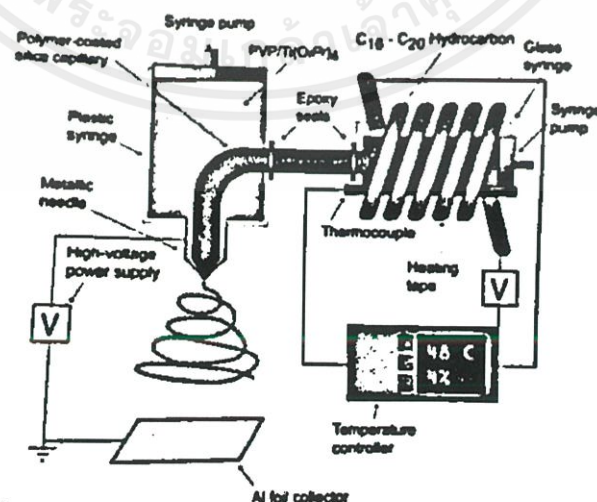
2. ปัญหาของน้ำหนักโมเลกุลของวัสดุที่ใช้เป็นส่วนแกนในของเส้นใย ซึ่งส่วนมากที่น้ำหนัก ของโมเลกุลที่ค่อนข้างจะต่ำมาก ทำให้ขึ้นรูปเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบทั่วไปนั้นยาก [13]



รูปที่ 2.10 ระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน [14]

2.4.5.2 ระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบหลอมละลาย (melt-electrospinning, Melt-ES)

ระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบหลอมละลายนั้นถูกออกแบบมาให้มีข้อดีที่โดดเด่นคือ การที่ไม่ต้องใช้ตัวทำละลายในการละลายพอลิเมอร์ ส่งผลให้ระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบหลอมละลายนั้นมีการเตรียมเส้นใยที่ง่าย กำลังการผลิตสูง มีต้นทุนต่ำ และลดอันตรายจากสารพิษของตัวทำละลายลงไปได้อีกด้วย เส้นใยที่เตรียมได้จากระบบนี้จึงมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยจากสารอันตรายเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้มีการนำเส้นใยที่ขึ้นจากระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบหลอมละลายไปประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ แต่ระบบนี้ก็ยังมีข้อเสียในเรื่องของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย โดยที่ระบบนี้จะไม่สามารถสร้างเส้นใยที่มีขนาดเล็กกว่า 400 นาโนเมตรได้ และมีการกระจายตัวที่แคบอีกด้วย [15]



รูปที่ 2.11 ระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบหลอมละลาย [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

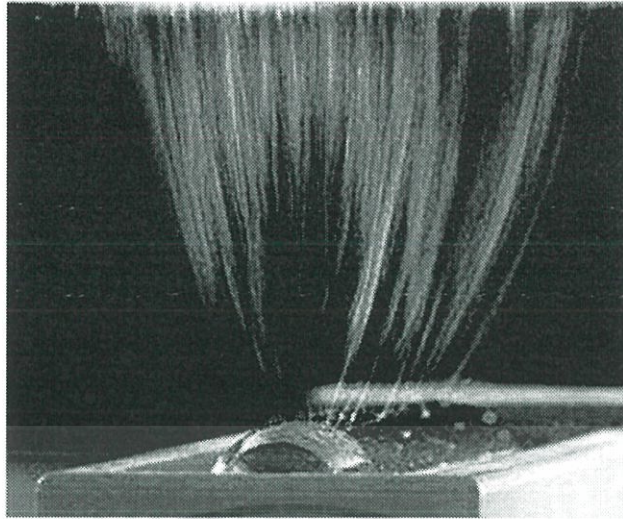
2.4.6 การผลิตเส้นใยนาโนโดยใช้พื้นที่กว้าง

การขึ้นรูปเส้นใยนาโนด้วยเทคนิคการปั่นด้วยข้อไฟฟ้าอิสระโดยมีพื้นที่ของฐานรองรับมาก จะทำให้เป็นที่น่าสนใจอย่างมากในการผลิตเชิงพาณิชย์ ซึ่งในกระบวนการการผลิตนั้นจะมีปัจจัยที่สำคัญอยู่ 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์, ปริมาตรของสารละลายพอลิเมอร์และ ความหนาแน่นของการฉีดสารละลาย ปัจจัยเหล่านี้จะมีความสำคัญอย่างมากต่อการขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์ เนื่องจากว่า หากปริมาตรของสารละลายนั้นมีจำนวนมากเกินไป จะทำให้สารละลายพอลิเมอร์เกินออกมาไม่ถูกนำไปขึ้นรูปเส้นใยด้วย และเมื่อไม่ได้นำไปขึ้นรูปเส้นใยด้วยแล้วนั้นก็ทำให้สายละลายพอลิเมอร์ส่วนนั้น เกิดการแข็งและรวมกันเป็นก้อนที่ปลายเข็มได้ จึงได้มีการพัฒนาระบบการขึ้นรูปเส้นใยให้มีความใหญ่ขึ้นโดยการเพิ่มเข็มในการฉีดเส้นใยพอลิเมอร์เข้าไปในระบบ ทำให้เส้นใยที่ฉีดออกไปนั้นมีความเป็นระเบียบกว่าแบบเดิม และสามารถควบคุมตำแหน่งการขึ้นรูปเส้นใยให้ขึ้นในพื้นที่ที่กำหนดได้



รูปที่ 2.12 หัวฉีดแบบหลายหัว [3]

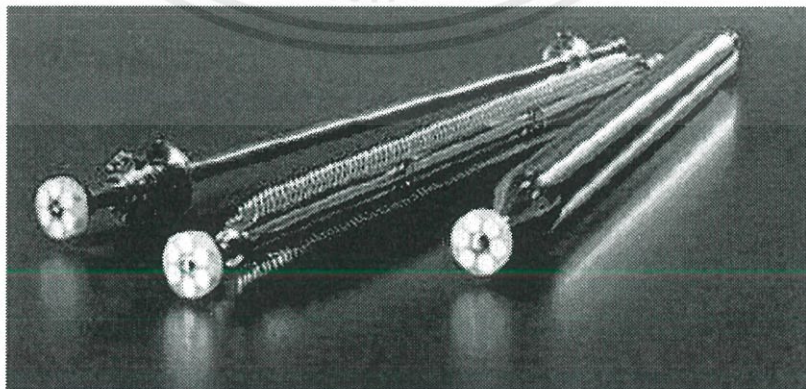
ต่อมาได้มีการพัฒนาจากระบบหัวฉีดแบบหลายหัว (Multi-nozzle construction) มาเป็นระบบการปั่นเส้นใยที่ไม่ใช้หัวฉีด (Nozzle-less technology) เพื่อที่จะได้มีการขึ้นรูปเส้นใยที่ได้พื้นที่กว้างขึ้นโดยการใช้พื้นที่ในการฉีดสารที่เล็ก การขึ้นรูปเส้นใยโดยไม่ใช้หัวฉีดนั้นมีจุดเด่นอยู่ที่จะทำให้แรงทางไฟฟ้าสถิตกับผิวของสารละลายพอลิเมอร์โดยตรง จะทำให้เกิดการฉีดสารออกมาเป็นจำนวนมากพร้อมๆกัน ในการขึ้นรูปแบบไม่ใช้หัวฉีดนั้นเส้นใยจะมีเกิดกระบวนการสร้างรูปร่างเองสูง (selforganized) และควบคุมการหมุนได้ยากกว่าการขึ้นรูปแบบมีหัวฉีด [3]



รูปที่ 2.13 การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตโดยไม่ใช้หัวเข็ม [3]

การใช้ระบบปั่นรูปเส้นใยแบบไม่ใช้หัวฉีดนั้นมีความแตกต่างจากแบบใช้หัวฉีดอยู่มาก โดยการปั่นรูปเส้นใยแบบไม่ใช้หัวฉีดนั้นจะเกิดการขึ้นเองโดยธรรมชาติไม่สามารถระบุตำแหน่งได้ เหมือนกับการปั่นรูปเส้นใยแบบใช้เข็ม โดยมีขั้นตอนการปั่นรูปเส้นใยอยู่ 4 ขั้นตอนคือ

1. ที่ spinneret จะเกิดชั้นบางๆของสารละลายพอลิเมอร์ขึ้นเคลือบอยู่ที่พื้นผิว เนื่องจากที่ผิวของ spinneret จะมีการสัมผัสกับสารละลายพอลิเมอร์
2. การปั่นรูปเส้นใยแบบไม่ใช้เข็มนั้นจะต้องทำให้แกนของ spinneret หมุนอยู่ตลอดเวลา ทำงานปั่นรูปเส้นใย จะทำให้สารละลายพอลิเมอร์เริ่มก่อตัวเป็นทรงกลมอยู่บนพื้นผิวของ spinneret
3. เมื่อให้แรงดันทางไฟฟ้าเข้าไปกับสารละลายพอลิเมอร์ สารละลายพอลิเมอร์จะเริ่มทำงานสร้าง "กรวยเทย์เลอร์" ขึ้นมา
4. เมื่อสารละลายที่พื้นผิวมีลักษณะเป็น "กรวยเทย์เลอร์" ก็จะเริ่มการฉีดขึ้นไปพื้นฐานรองรับ



รูปที่ 2.14 spinneret [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดเด่นของการขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์แบบไม่ใช้หัวฉีดคือการที่ให้เส้นใยพอลิเมอร์ขึ้นรูปเองได้ตามธรรมชาติเพื่อที่จะได้โครงสร้างที่เหมาะสมที่สุด ทำให้เกิดชั้นฟิล์มที่มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นและได้ฟิล์มที่มีพื้นที่ที่มากขึ้นอีกด้วย

ตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบการปั่นเส้นใยนาโนด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบใช้หัวฉีดและไม่ใช้หัวฉีด [3]

Process	Nozzle electrospinning	Nozzle-less electrospinning
Advantages	<ul style="list-style-type: none"> -Spinning solution with a wide range of viscosity -Spinning at relatively low voltage -Collector can be placed in any direction relative to the nozzle -Fabrication of fibers with various configuration (e.g. core shell, multicomponent, hollow fibre) -Easy to translate experimental data from spinning with a single needle nozzle 	<ul style="list-style-type: none"> -Easy maintenance -Easy to provide sufficient solution
Disadvantages	<ul style="list-style-type: none"> -Electrical field interference between nozzles -Difficult to maintain (cleaning of nozzle) -Difficult to maintain a uniform feed rate through each orifice 	<ul style="list-style-type: none"> -Very high voltage required -Difficult to maintain consistent solution viscosity owing to solvent evaporation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 เทคนิคการตรวจวิเคราะห์

2.5.1 การตรวจวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นเครื่องมือวิทยาศาสตร์ช่วยขยายตาประเภทกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอน ฉายหรือส่องกราดไปบนผิวของตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบให้ได้ข้อมูลของลักษณะพื้นผิวปรากฏเป็นภาพขยายมีกำลังขยาย 6 -1,000,000 เท่า ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับนาโนเมตรถึงไมโครเมตร สามารถถ่ายภาพตัวอย่างได้หลากหลายโดยไม่มีความจำเป็นต้องเคลือบผิวด้วยสารตัวนำไฟฟ้าก่อนการถ่ายภาพ โดยเลือกระบบสุญญากาศในห้องใส่ตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างแต่ละประเภท ได้แก่

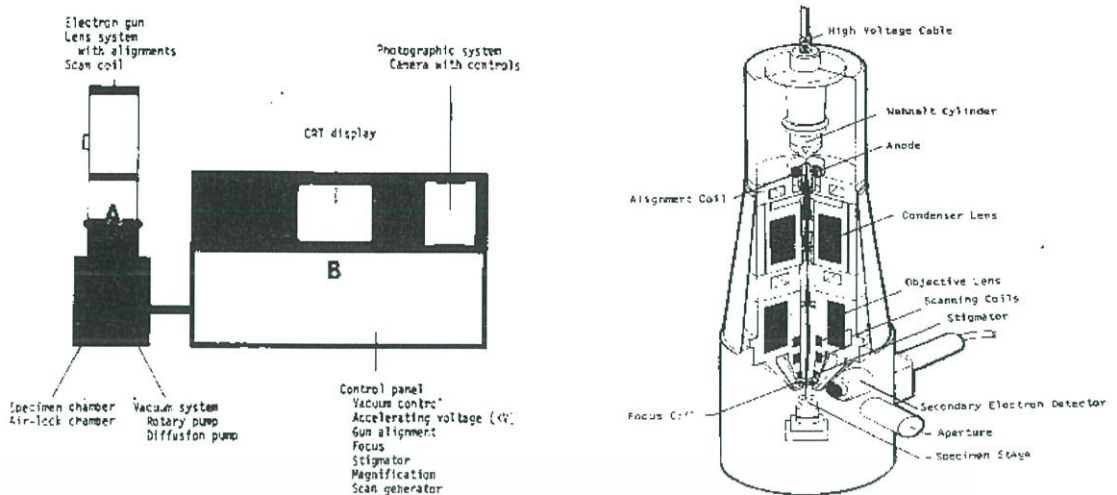
1.ระบบสุญญากาศระดับสูง (High Vacuum) สำหรับตัวอย่างประเภทเป็นของแข็ง แข็ง และนำไฟฟ้า เช่น โลหะ เป็นต้น

2.ระบบสุญญากาศระดับต่ำ (Low Vacuum) สำหรับตัวอย่างประเภทเป็นของแข็ง แข็ง และไม่นำไฟฟ้าเช่น พอลิเมอร์ ยาง เป็นต้น

3.ระบบสุญญากาศระดับสภาวะแวดล้อม (Environmental SEM) ที่สามารถทำงานที่ความดัน 10 ถึง 2600 Pa เหมาะกับตัวอย่างที่มีความชื้น มีน้ำเป็นองค์ประกอบ สามารถปรับระดับความชื้นในห้องใส่ตัวอย่างได้ตามความต้องการและสามารถวัดตัวอย่างที่มีอุณหภูมิต่ำได้ เช่น ไอศกรีม ตัวอย่างแข็ง ตัวอย่างทางชีวภาพ ทางการแพทย์ เป็นต้น [16]

ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

Scanning Electron Microscope (SEM) ทั่วไปประกอบด้วยโครงสร้างที่คล้ายคลึงกัน โครงสร้างง่าย ๆ ที่เห็นได้ชัดแบ่งได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ ส่วนที่มีลักษณะคล้ายปล่องภายในกลางเรียกว่า column และส่วนที่เป็นตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าทั้งหมดเรียกว่า console unit โดยทั้ง 2 ส่วนนี้เป็นส่วนที่มีความสำคัญอย่างมากเนื่องจาก column นั้นจะประกอบไปด้วยส่วนประกอบพื้นฐานที่ให้กำเนิดอิเล็กตรอนแล้วรวบรวมให้ส่องไปยังผิวของตัวอย่างที่วาง อยู่ในช่องตัวอย่างซึ่งอยู่บริเวณฐานของ column อุปกรณ์ซึ่งรับสัญญาณที่เกิดขึ้นภายหลังอิเล็กตรอนกระทบตัวอย่าง และถูกนำไปจัดวางไว้ที่ส่วนภายใน console unit ซึ่งแผงควบคุมระบบควบคุมไฟฟ้าระบบสุญญากาศ และระบบถ่ายภาพนั้นประกอบด้วยชิ้นส่วนของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่จัดไว้เป็นระบบเช่นการควบคุมลำแสงอิเล็กตรอนภายใน column จำเป็นต้องใช้ปุ่มบังคับที่อยู่บนแผงควบคุมของ console unit โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้ [17]



รูปที่ 2.15 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [17]

1. แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) อยู่ด้านปลายบนสุดของColumnซึ่งต่อกับสายไฟฟ้าแรงสูงที่ต่อจากถังแปลงไฟฟ้าแรงสูงซึ่งแปลงจาก 110volts หรือ 220 volts เป็นไฟฟ้าที่มีความดันไฟฟ้าสูงคือระหว่าง1-30Kilovoltsซึ่งเพียงพอสำหรับSEM แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนประกอบด้วยลวดโลหะTungstenที่บิดเป็นรูปตัววีเรียกว่าfilamentและล้อมด้วยโลหะรูปกรวย(Wehneltcylinder) มีรูอยู่ปลายกรวยเมื่อกระแสไฟฟ้าตั้งแต่1000voltsจะไปเข้ามาสู่filamentลวดตัววีดังกล่าวก็จะมีความร้อนสูงประจุอิเล็กตรอนก็จะกระจาย ออกมาในสภาวะสุญญากาศภายในcolumnประจุอิเล็กตรอนซึ่งเป็นประจุลบจะถูกดึงดูดด้วยแผ่นขั้วบวก (anodeplate) ที่อยู่ด้านล่างของ electrongun ประจุอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะถูกดึงผ่านรูของกรวยไปยังทิศทางที่กำหนดคือลงสู่สนามแม่เหล็กที่สามารถรวบรวมประจุ อิเล็กตรอนที่มีอยู่ให้เป็นลำแสงอิเล็กตรอนที่มีความหนาแน่นเพียงพอสำหรับฉายลงบนตัวอย่าง Electrongun ซึ่งมีfilament และ Wehnelt cylinder อยู่ภายในสามารถทำให้ขยับเขยื้อนได้ด้วยสกรูที่อยู่รอบๆด้านนอกelectrongun ทั้งนี้เพื่อปรับให้electrongun อยู่ในแนวตรงได้ ศูนย์กลางหรือตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กของเลนส์สนามแม่เหล็กภายในcolumnในSEMสมัยใหม่นอกจากจะมีปุ่มหรือสกรูที่ช่วยปรับ electrongun ให้ได้ศูนย์แล้วยังมีขดลวดที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณแผ่นanodeเพื่อจะช่วยปรับลำแสงอิเล็กตรอนให้อยู่ศูนย์กลางของ สนามแม่เหล็กในเลนส์ชุดแรกขดลวดดังกล่าวเรียกว่าalignmentcoil ซึ่งสามารถควบคุมและปรับได้ตามต้องการโดยหมุนและปรับปุ่ม (alignmentknobs) บนแผงของ consoleunit เหตุที่ต้องปรับelectrongun ก็เพื่อจะให้ลำแสงอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นมีความสมบูรณ์เป็นรูปทรง กระบอกที่ไม่บิดเบี้ยวหรือเขวออกไปจากศูนย์กลางหากมีการบิดของลำแสงอิเล็กตรอนออกนอกทิศทางอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primaryelectron) บางส่วนจะถูกกั้นออกไปซึ่งมีผลกระทบต่อปริมาณของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondaryelectron)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เลนส์ควบคุมลำแสงอิเล็กตรอนพร้อมขดลวดขับเคลื่อนลำแสงอิเล็กตรอน (electronmagniclens&scancoils) เป็นชุดอุปกรณ์ที่ทำงานร่วมกันทำหน้าที่รวบรวมอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้เป็นลำแสงรูปกรวยที่เล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นได้ลำแสงดังกล่าวไปตกกระทบ บนผิวตัวอย่าง และจะใช้สนามแม่เหล็กขับเคลื่อนให้ลำแสงอิเล็กตรอนปฐมภูมิเคลื่อนไปบนผิวตัวอย่างในแนวที่ต้องการเป็นบริเวณ รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเลนส์แต่ละชุดมีapertureซึ่งเป็นโลหะประเภททองขาวทองเหลืองมีรูขนาดต่างๆกัน(50um-400um)และสามารถ เปลี่ยนได้ตามขนาดที่ต้องการapertureดังกล่าวมักจะจัดไว้ในเลนส์แต่ละชุดภายในบริเวณที่ไร้สนามแม่เหล็กของเลนส์apertureเหล่านั้น ทำหน้าที่กำหนดให้ลำแสงอิเล็กตรอนที่ผ่านสนามแม่เหล็กของเลนส์แต่ละชุดให้มีรูปกรวยที่สมมาตร apertureของเลนส์ชุดสุดท้ายก่อน ที่ลำแสงอิเล็กตรอนจะมาสัมผัสกับตัวอย่างเป็นapertureพิเศษเรียกว่า objectiveaperture มีไว้เพื่อกันกรองลำแสงอิเล็กตรอนให้เป็นรูปกรวย ขนาดเล็กที่มีความสมมาตรที่สุดและกำหนดขนาดและปริมาณของอิเล็กตรอนให้กระทบจุดต่างๆบนผิวตัวอย่างเพื่อให้ภาพที่มีความลึก มากกว่าปกติขดลวดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ขับเคลื่อนลำแสงอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้กราดไปบนผิวของตัวอย่างชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ นี้เรียกว่า scancoils ซึ่งควบคุมโดยระบบไฟฟ้าและยังควบคุมการกราดของลำแสงที่เป็นเส้นในจอร์บภาพให้เคลื่อนที่ไปในทิศทาง และเวลาเดียวกันกับลำแสงอิเล็กตรอน

3. ช่องใส่ตัวอย่าง (specimenchamber) ของSEMเป็นช่องว่างใต้เลนส์สุดท้ายส่วนที่สำคัญของช่องใส่ตัวอย่างคือฐานวางตัวอย่างและปุ่มควบคุมโดยใช้เฟืองขนาดต่างๆเพื่อเลื่อนฐานนี้ให้เลื่อนไปมาภายในช่องตัวอย่างได้อย่างน้อย 6 ทิศทางฐานวางตัวอย่างที่ มีส่วนประกอบและคุณสมบัติเหล่านี้เรียกว่า goniometerstage

4. อุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ (collector&scintillator) เป็นแท่งแก้วใสมีปลายมลทำด้วยพลาสติกฉาบผิวด้วยอลูมิเนียมและส่วนปลายของแท่งนี้ล้อมด้วยตาข่ายโลหะที่ต่อกับวงจรไฟฟ้าประจุบวกขนาด 30-250 โวลท์ เพื่อดึงดูดประจุอิเล็กตรอนทุติยภูมิอันเกิดจากปฏิกิริยา ระหว่างประจุอิเล็กตรอนปฐมภูมิกระทบกับผิวของตัวอย่าง

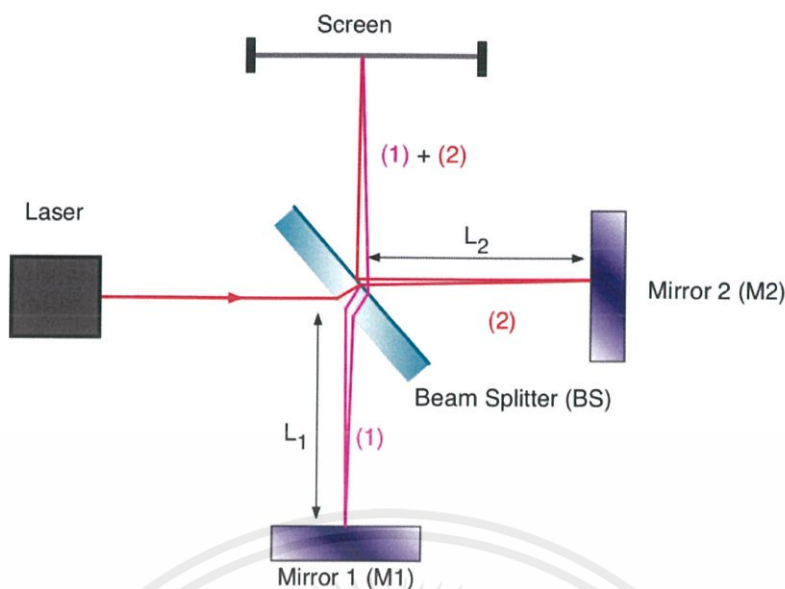
5. อุปกรณ์สร้างภาพและถ่ายภาพ (imaging&photographicdevices) ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงสัญญาณที่ได้รับเป็นภาพและภาพที่ปรากฏบนจอ CRT ก็พร้อมที่จะทำการบันทึก อุปกรณ์สร้างภาพประกอบด้วยท่อนำแสงและเครื่องขยายและเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอน ให้เป็นแสงไฟฟ้าการสร้างภาพเริ่มจากประจุอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งประจุอิเล็กตรอนชุดนี้จะถูกจับและรวบรวมไว้แล้วนำสู่แท่งแก้วใสประเภท ท่อนำแสงในลักษณะของแสงแสงที่ผ่านท่อแท่งแก้วนี้จะเคลื่อนไปสู่เครื่องขยายแสง(photomultiplier) ซึ่งจะเปลี่ยนแสงชนิดphotonsนี้ไป อิเล็กตรอนอีกครั้งหนึ่ง อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะผ่านเครื่องขยายให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าให้ปรากฏในจอภาพที่ติดตั้งไว้บน console unit [17]

2.5.2 การตรวจวิเคราะห์ห้องค์ประกอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

อินฟราเรดสเปกโทรสโคปี เป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุล โดยข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างทางโมเลกุลที่ได้ เป็นได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ นิยมใช้วิเคราะห์ทดสอบสารอินทรีย์ ใช้ได้ดีการสารตัวอย่างที่มีความบริสุทธิ์สูงทั้งที่อยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยเป็นเทคนิคการกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสง เมื่อแสงอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นต่างๆผ่านสู่สารอินทรีย์ พันธะเคมีในโมเลกุลของสารจะดูดกลืนพลังงานที่ค่าความยาวคลื่นหนึ่ง ข้อมูลนี้จะถูกประมวลโดยคอมพิวเตอร์โดยการใช้สมการเชิงอนุพันธ์ที่เรียกว่าฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม (Fourier Transform) ซึ่งจะคำนวณพลังงานของแต่ละความยาวคลื่นและแปรผลออกมาเป็นสเปกตรัมเนื่องจากสารแต่ละชนิดให้สเปกตรัมที่มีลักษณะเฉพาะ สามารถนำมาเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของสารที่มีอยู่ในฐานข้อมูลเพื่อใช้ในการพิสูจน์และบ่งชี้ชนิดของสารตัวอย่างได้ [24]

หลักการของอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

1. แหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดจะทำการผลิตรังสีอินฟราเรดในช่วงที่ความยาวคลื่นหรือเลขคลื่นที่จะใช้ในการวิเคราะห์
2. Beam Splitter ซึ่ง Beam Splitter จะปล่อยให้ทะลุผ่านไปที่ Fixed Mirror 50% และสะท้อนกลับมาที่ Mobile Mirror 50%
3. Fixed Mirror จะสะท้อนกลับมาที่ Beam Splitter
4. Mobile Mirror จะสะท้อนกลับมาที่ Beam Splitter
5. อินฟราเรดที่สะท้อนมาจาก ทั้ง Mobile Mirror และ Fixed Mirror จะมารวมกันแล้วเกิดการแทรกสอดกันขึ้น แต่จากการที่ Mobile Mirror สามารถเคลื่อนที่ได้โดยการควบคุมระยะการเคลื่อนที่โดย Laser เมื่อ Mobile Mirror เคลื่อนที่ก็จะทำให้ระยะการสะท้อนของรังสีอินฟราเรดจาก Mobile Mirror และ Fixed Mirror ไม่เท่ากันซึ่งก็จะส่งผล ให้รังสีอินฟราเรดที่ได้มีความยาวคลื่นเปลี่ยนไปซึ่งเกิดจากการแทรกสอดแบบเสริม หรือ การแทรกสอดแบบหักล้าง ซึ่งเรียกว่า “Interferogram”
6. อินฟราเรดที่ความยาวคลื่นต่างๆ จะสะท้อนไปที่ Sample Compartment ผ่าน Sample ซึ่งจะมีการดูดกลืนอินฟราเรดเอาไว้บางส่วนในแต่ละความยาวคลื่น ส่วนอินฟราเรดที่ไม่ถูกดูดกลืน ก็จะเข้าไปสู่ Detector หลังจากนั้นคอมพิวเตอร์จะทำการแปลงสัญญาณ Interferogram ด้วยสมการ Fourier Transform ผลที่ได้จะเป็นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของสารที่ความยาวคลื่นต่างๆ [30]



รูปที่ 2.16 รูปแสดงหลักการทำงานของเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี [25]

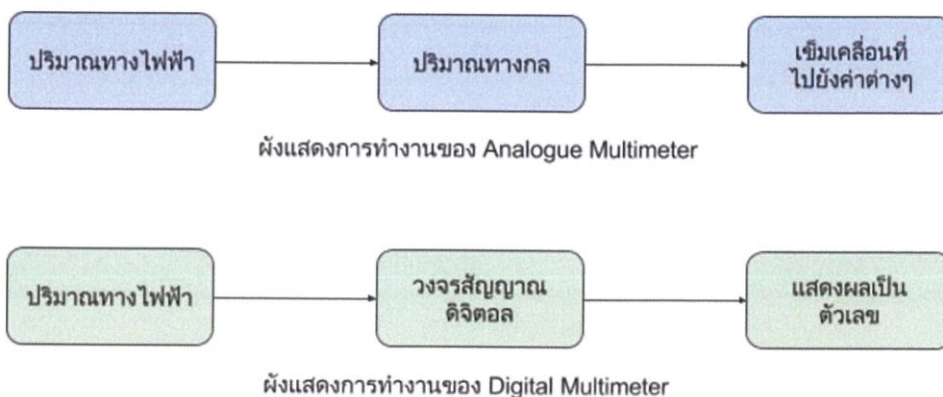
2.5.3 การตรวจวัดวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้า

มัลติมิเตอร์แบบดิจิทัล (Digital Multimeter) เป็นแบบที่พัฒนาต่อจากแบบอนาล็อกหรือแบบเข็ม โดยการการแสดงผลค่าต่างๆที่วัดได้จะออกมาในรูปแบบตัวเลขและตัวหนังสือ ข้อดีคือมีความแม่นยำในการวัดค่าสูง อ่านค่าง่าย สะดวกในการใช้งาน บางรุ่นมีการเชื่อมต่อข้อมูลเพื่อดูค่าต่างๆผ่านสาย USB และยังสามารถอ่านค่าและควบคุมมิเตอร์จากหน้าซอฟต์แวร์ได้

หลักการทำงานของมัลติมิเตอร์ (Multimeter)

หลักการทำงานของมัลติมิเตอร์ถูกพัฒนามาจาก กัลวานอมิเตอร์ (galvanometer) มีหลักการทำงานคือ เมื่อป้อนกระแสไฟเข้าไปจะทำให้ขดลวดเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งการเกิดอำนาจแม่เหล็กนี้จะส่งผลไปยังเข็มที่ยึดติดอยู่เกิดการเคลื่อนที่ ในปัจจุบันมีการพัฒนาจนกลายเป็นมัลติมิเตอร์ในรูปแบบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นมัลติมิเตอร์แบบเข็ม (Analog Multimeter) และมัลติมิเตอร์แบบตัวเลข (Digital Multimeter) เป็นต้น

ความแตกต่างของการทำงานมัลติมิเตอร์แบบเข็มและดิจิทัลมัลติมิเตอร์นั้นคือ เมื่อมีปริมาณไฟฟ้าที่ต้องการวัดไหลเข้าสู่ขดลวด ถ้าเป็นมัลติมิเตอร์แบบเข็มจะเปลี่ยนปริมาณไฟฟ้าที่วัดเป็นปริมาณทางกลและขับไปยังเข็มที่ยึดติดไว้ทำให้เข็มนั้นเคลื่อนที่ไปยังค่าที่วัดได้ ส่วนดิจิทัลมัลติมิเตอร์จะเปลี่ยนปริมาณทางไฟฟ้านั้นส่งผ่านไปยังวงจรสัญญาณดิจิทัลและส่งต่อไปยังหน้าจอเพื่อแสดงผลเป็นตัวเลข



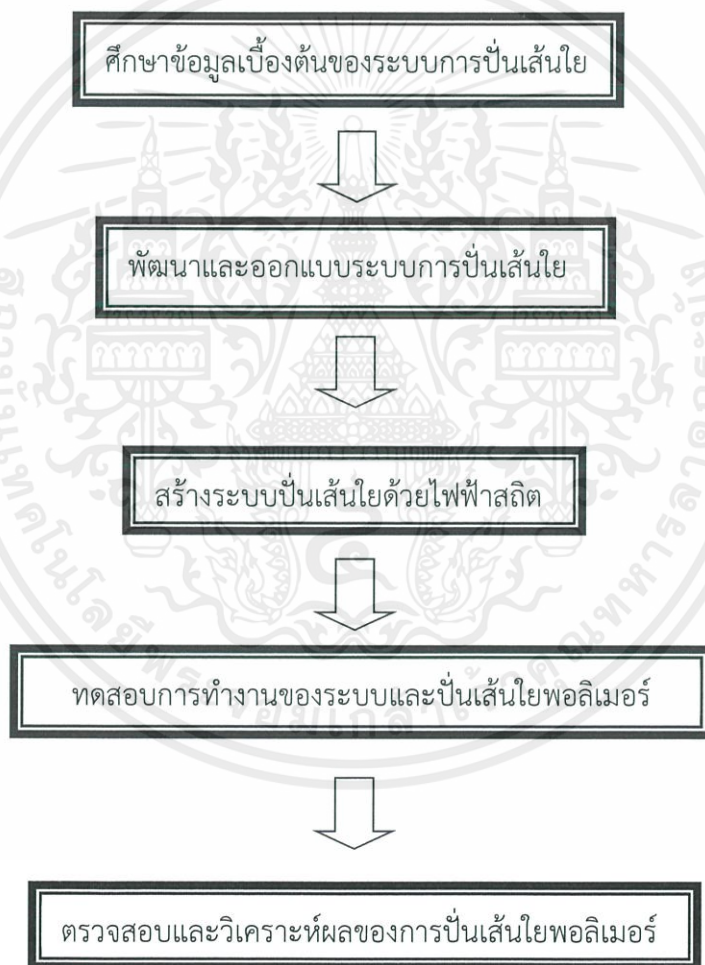
รูปที่ 2.17 รูปแสดงรูปแสดงผังการทำงานของมัลติมิเตอร์ [39]

ซึ่งสัญญาณเป็น Sine wave นั้นอาจมีความถี่อื่นปะปนอยู่ ซึ่งเราเรียกความถี่นั้นว่า Harmonic หากเรานำมัลติมิเตอร์แบบที่ไม่สามารถวัดค่าความถี่อื่นปะปนนี้ได้ (มัลติมิเตอร์แบบ MEAN) ไปวัดค่าอาจทำให้ค่าที่ได้ไม่แม่นยำนัก ดังนั้นเราควรใช้มัลติมิเตอร์แบบ TRUE RMS ดีกว่า เพราะมัลติมิเตอร์แบบ TRUE RMS สามารถวัดค่าสัญญาณที่มีฮาร์โมนิกปะปนอยู่ได้ ทำให้ค่าที่ออกมานั้นมีความแม่นยำกว่ามัลติมิเตอร์แบบ MEAN ซึ่งมัลติมิเตอร์ประเภทนี้จึงเหมาะสำหรับวัดอุปกรณ์ประเภท Inverter Control เพราะอุปกรณ์ประเภทนี้จะมี Thyristor, Inverter และอุปกรณ์ประหยัดพลังงานต่างๆ ซึ่งส่งผลให้เกิด Harmonic ปะปนในสัญญาณ [39]

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในส่วนของการดำเนินงานวิจัยนี้หลังจากผู้วิจัยได้ศึกษาและค้นคว้าข้อมูลเบื้องต้นของระบบขึ้นรูปเส้นใยโดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบไม่ใช้เข็ม จึงเริ่มทำการออกแบบระบบขึ้นรูปเส้นใยและการเตรียมฐานรองรับเพื่อเตรียมการขึ้นรูปเส้นใย จากนั้นนำไปวิเคราะห์พื้นผิวของเส้นใยโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ตรวจสอบองค์ประกอบของเส้นใยด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี และการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า ตามแผนผังการดำเนินงานดังนี้



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 การออกแบบระบบปั้นเส้นใยโดยเทคนิคปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบข้าวไฟฟ้าอิสระ

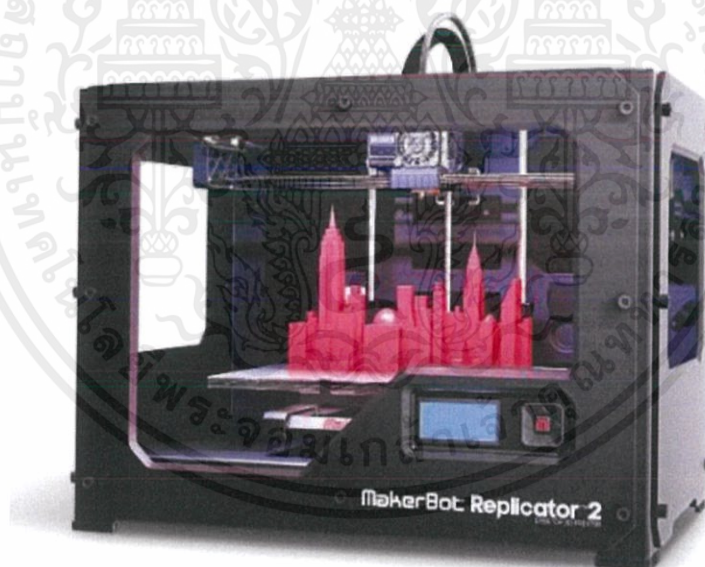
เริ่มจากการออกแบบโครงสร้างของระบบปั้นเส้นใยโดยการปรับเปลี่ยนจากระบบปั้นเส้นใยต้นแบบ และทำการออกแบบส่วนประกอบที่ใช้กับระบบควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ จากนั้นเริ่มจากการออกแบบโครงสร้างภายในของระบบปั้นเส้นใยด้วยโปรแกรมวาดภาพสามมิติ ในการออกแบบชิ้นงานต่างๆ และใช้ระบบพิมพ์ 3 มิติ ในการสร้างชิ้นงานที่ต้องใช้ในระบบการปั้นเส้นใย

3.1.1 การร่างแบบระบบปั้นเส้นใยโดยเทคนิคปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบข้าวไฟฟ้าอิสระ

โดยได้มีการออกแบบส่วนประกอบต่างๆของชิ้นงานจาก ให้อยู่ในรูปแบบ 3 มิติ ทำให้เห็นภาพได้เสมือนจริงมากขึ้น

3.1.2 การสร้างชิ้นงานต้นแบบของระบบพันเคลือบเส้นใยเทคนิคปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตข้าวไฟฟ้าอิสระ

การสร้างชิ้นส่วนต่างๆของงานนั้น ส่วนใหญ่จะทำการสั่งพิมพ์โดยเป็นการพิมพ์ โดยใช้เทคนิคการพิมพ์พลาสติก 3 มิติ ในการขึ้นรูปชิ้นส่วนต่างๆของระบบ



รูปที่ 3.2 ระบบเครื่องพิมพ์ 3 มิติ [27]

3.2 องค์ประกอบของระบบเครื่องปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบไม่ใช้เข็ม

3.2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูง

ส่วนที่ช่วยทำให้สารตัวอย่างเกิดประจุบวกและเคลื่อนที่ไปยัง Rotating collector โดยจะทำการติดขั้วไฟฟ้าเข้าที่ส่วน Spinner เป็นขั้วไฟฟ้าประจุบวกเพื่อให้สารตัวอย่างเกิดความเป็นประจุบวกขึ้นจากนั้นนำขั้วไฟฟ้าประจุลบติดเข้ากับ Rotating collector จะทำให้สารตัวอย่างเคลื่อนที่ไปยัง Rotating collector โดยที่งานวิจัยนี้ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าศักย์ที่ 20 KV



รูปที่ 3.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูง

3.2.2 แกนหมุน Spinner

Spinner เป็นส่วนที่สำคัญของการออกแบบระบบ เนื่องจากเป็นส่วนที่ปรับเปลี่ยนจากการพันเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตแบบใช้เข็มมาใช้เส้นลวดแทน โดยเส้นลวดนั้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 0.4 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.4 แกนหมุน Spinner

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 Stepper motor

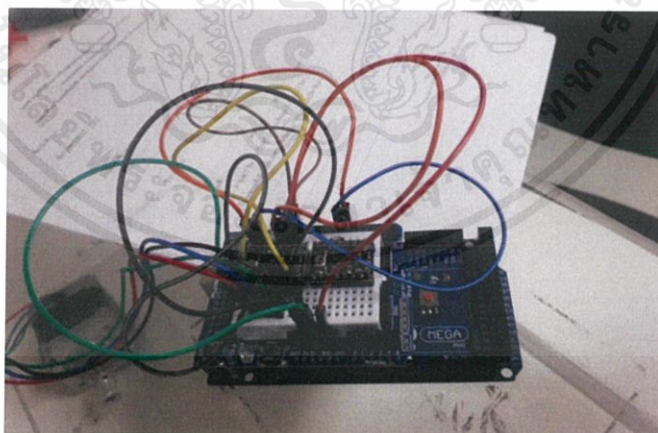
Stepper motor เป็นส่วนที่ใช้ในการหมุนแกน Spinner โดยที่สามารถเขียนคำสั่งการเพิ่มหรือลดความเร็วรอบของการหมุนได้โดยใช้สายพานต่อระหว่าง Stepper motor กับแกนหมุน เพื่อป้องกัน ไฟฟ้าคัลย์สูงรบกวนการทำงานของ Stepper motor และยังสามารถเขียนคำสั่งการควบคุมทิศทางการหมุนได้อีกด้วย



รูปที่ 3.5 Stepper motor

3.2.4 Arduino board

เป็นการเขียนคำสั่งโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อใช้สำหรับการควบคุมการหมุนของ Stepper motor ที่ต่อกับแกนหมุนในการพันเคลือบเส้นใย

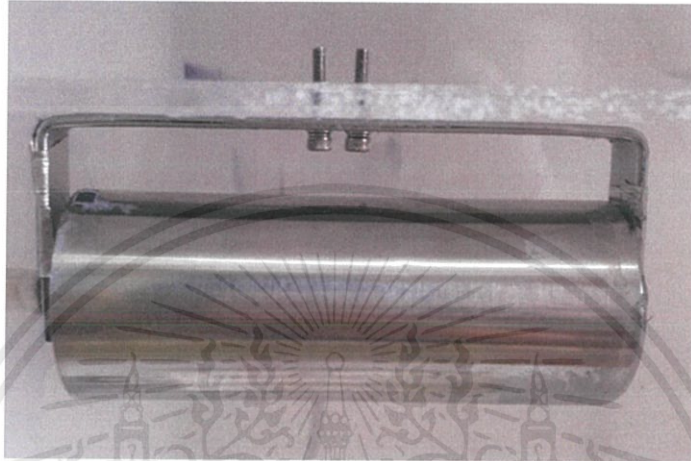


รูปที่ 3.6 Arduino board

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 Rotating collector

เป็นส่วนที่ออกแบบมาเพื่อให้เป็น collector ถูกออกแบบมาให้เป็นทรงกระบอกเพื่อที่จะสามารถเพิ่มพื้นที่ของแผ่นฟิล์มให้มากขึ้นได้ โดย Rotating collector นั้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 4.5 เซนติเมตร และมีความยาวเป็น 11.5 เซนติเมตร โดยที่ทำการพันเคลือบเส้นใยนั้น Rotating collector จะทำการหมุนอยู่ตลอดเวลา



รูปที่ 3.7 Rotating collector

3.2.6 DC motor

DC motor คือส่วนที่ทำให้ Rotating collector นั้นสามารถหมุนได้ในขณะที่ทำการพันเคลือบเส้นใย โดยใช้แกนที่ออกแบบ ต่อเข้ากับ Rotating collector



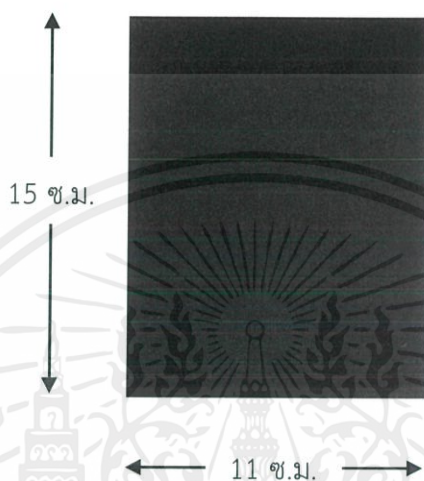
รูปที่ 3.8 DC motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การเตรียมฐานรองรับ

3.3.1 การเตรียมฐานรองรับแบบกระดาษ

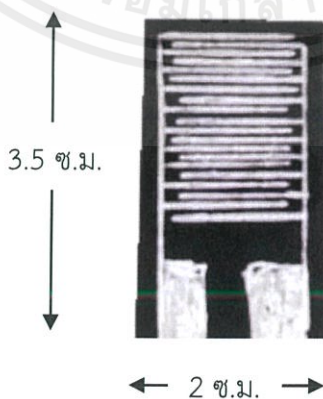
การเตรียมฟิล์มบางนั้นจะต้องมีฐานรองรับเพื่อให้วัสดุนั้นสามารถยึดเกาะบนฐานรองรับได้ โดยฐานรองรับที่ใช้นั้นจะเป็นฐานรองรับประเภทกระดาษ โดยการนำมาทำความสะอาดโดยกระดาษไรฝุ่น และตัดให้มีขนาดความกว้าง 11 เซนติเมตร และ ความยาวเป็น 15 เซนติเมตร เพื่อให้พอดีกับพื้นที่ของแกนหมุน



รูปที่ 3.9 ขนาดของแผ่นฐานรองรับ

3.3.2 การเตรียมฐานรองรับแบบขั้วไฟฟ้า

การนำฟิล์มบางไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เซนเซอร์นั้นจะต้องมีจะต้องพันเคลือบฟิล์มบนขั้วไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ใช้ขั้วไฟฟ้ากระดาษเพื่อให้วัสดุนั้นสามารถยึดเกาะบนฐานรองรับได้ โดยการนำมาทำความสะอาดโดยกระดาษไรฝุ่น โดยขั้วไฟฟ้ามีขนาดความกว้าง 11 เซนติเมตร และ ความยาวเป็น 15 เซนติเมตร เพื่อให้พอดีกับพื้นที่ของแกนหมุน และนำการวาดขั้วไฟฟ้าด้วยปากกานำไฟฟ้า



รูปที่ 3.10 ขั้วไฟฟ้ากระดาษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การเตรียมเส้นใยโดยระบบปั่นเส้นใยเทคนิคปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตขั้วไฟฟ้าอิสระ

ในการเตรียมทดลองเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์โดยระบบปั่นรูปเส้นใยเทคนิคปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตขั้วไฟฟ้าอิสระ เพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการปั่นรูปเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ จึงได้สร้างเงื่อนไขต่างๆขึ้นมาทดสอบการทดลอง โดยเริ่มจากการหาความเร็วในการหมุนที่เหมาะสมกับระบบปั่นรูปเส้นใยเทคนิคปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตขั้วไฟฟ้าอิสระ จากนั้นปรับเวลาที่ใช้ในการปั่นรูปเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ที่เหมาะสมที่สุด และทำการปรับระยะเพื่อหาระยะที่ดีที่สุดให้กับระบบปั่นรูปเส้นใยเทคนิคปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตขั้วไฟฟ้าอิสระ

3.4.1 เงื่อนไขความเร็วในการหมุนขั้วไฟฟ้าในการปั่นเส้นใย

ใช้สารละลายพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ ที่ความเข้มข้น 11 wt% มาปั่นรูปด้วยระบบปั่นรูปเส้นใยเทคนิคปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตขั้วไฟฟ้าอิสระโดยใช้เวลา 15 นาที และความต่างศักย์เป็น 20 KV ระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 6 เซนติเมตร โดยมีความเร็วในการหมุนเป็น 5,10,15 และ 20 รอบต่อนาที

ตารางที่ 3.1 แสดงการทดลองภายใต้เงื่อนไขความเร็ว

พารามิเตอร์ในการเตรียม	เงื่อนไขในการเตรียม
ศักย์ไฟฟ้า	20 กิโลโวลต์
ความเข้มข้น	11 wt%
เวลาในการหมุน	15 นาที
ระยะห่าง	6 เซนติเมตร
ความเร็วในการหมุน	5,10,15 และ 20 รอบต่อนาที
อุณหภูมิ	RT,80,100 และ 120 องศาเซลเซียส

3.4.2 เงื่อนไขระยะห่างในการปั่นเส้นใย

ใช้สารละลายพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ ที่ความเข้มข้น 11 wt% มาปั่นรูปด้วยระบบปั่นรูปเส้นใยเทคนิคปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตขั้วไฟฟ้าอิสระโดยใช้ความเร็วในการหมุนเป็น 15 รอบต่อนาที และความต่างศักย์เป็น 20 KV ระยะเวลาในการปั่นเส้นใยเป็น 10 นาที โดยมีระยะห่างในการปั่นเส้นใยเป็น 4,6,8 และ 10 เซนติเมตร

ตารางที่ 3.2 แสดงการทดลองภายใต้เงื่อนไขระยะห่าง

พารามิเตอร์ในการเตรียม	เงื่อนไขในการเตรียม
ศักย์ไฟฟ้า	20 กิโลโวลต์
ความเข้มข้น	11 wt%
เวลา	10 นาที
ความเร็วในการหมุน	15 รอบต่อนาที
ระยะห่าง	4,6,8 และ 10 เซนติเมตร
อุณหภูมิ	RT,80,100 และ 120 องศาเซลเซียส

3.4.3 เงื่อนไขระยะเวลาในการปั่นเส้นใย

ใช้สารละลายพอลิไวนิลลิตินไดฟลูออไรด์ ที่ความเข้มข้น 11 wt% มาขึ้นรูปด้วยระบบขึ้นรูปเส้นใยเทคนิคปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตด้วยไฟฟ้าอิสระโดยใช้ความเร็วในการหมุนเป็น 15 รอบต่อนาที และความต่างศักย์เป็น 20 KV ระยะห่างในการปั่นเส้นใย 6 เซนติเมตร โดยมีระยะเวลาในการปั่นเส้นใยเป็น 5,10 และ 15 นาที

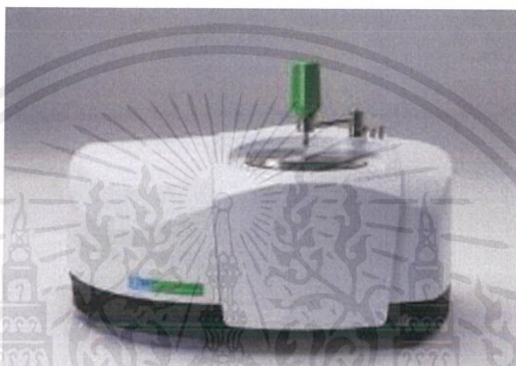
ตารางที่ 3.3 แสดงการทดลองภายใต้เงื่อนไขระยะเวลา

พารามิเตอร์ในการเตรียม	เงื่อนไขในการเตรียม
ศักย์ไฟฟ้า	20 กิโลโวลต์
ความเข้มข้น	11 wt%
เวลา	10 นาที
ความเร็วในการหมุน	15 รอบต่อนาที
ระยะห่าง	4,6,8 และ 10 เซนติเมตร

3.5 การตรวจสอบสมบัติฟิล์ม

3.5.1 การตรวจสอบองค์ประกอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี

เทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีเป็นเทคนิคที่ใช้ระบุโครงสร้างและองค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์ที่มีพันธะโคเวเลนต์เป็นหลัก การวิเคราะห์ที่ใช้รังสีในช่วงความยาวคลื่น 700-2,500 นาโนเมตร ผ่านเข้าไปในวัสดุ จากนั้นรังสีอินฟราเรดที่ผ่านวัสดุทดสอบจะกระทบตัวตรวจจับความเข้มแสงแล้วทำการบันทึกค่าการทะลุผ่านของแต่ละความยาวคลื่น หากเป็นระบบฟูเรียร์ แสงก่อนตกกระทบวัสดุตัวอย่างจะผ่านอินเตอร์เฟอเดอริเตอร์ ระบบอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีแบบฟูเรียร์ที่ใช้วิเคราะห์ PerkinElmer รุ่น UATR Two [28]



รูปที่ 3.11 ระบบอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีแบบฟูเรียร์[28]

3.5.2 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด ใช้ในการส่องดูลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างโดยการบังคับลำอิเล็กตรอนให้กวาดไปบนพื้นผิวแล้วแสดงผลบนจอคอมพิวเตอร์ มีลักษณะภาพเป็นภาพขาวดำมีกำลังขยาย 10-500,000 เท่า ขึ้นกับชนิดของตัวอย่าง หลักการทำงานคือ อันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับตัวอย่างทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และจับสัญญาณโดยตัวตรวจจับสัญญาณนำสัญญาณไปขยายและสร้างเป็นภาพออกมา แล้วนำสัญญาณที่ได้ไปขยายและสร้างเป็นภาพแสดงบนหน้าจอหลัก กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด Zeiss รุ่น EVO [29]



รูปที่ 3.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด [29]

3.5.2 การตรวจการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า

การตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยการเครื่องกำเนิดและเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้า (Source meter, KEITHLEY-2410) เป็นอุปกรณ์ในการตรวจวัด โดยนำมอเตอร์และใบพัดขนาดเล็กมาต่อเข้าด้วยกัน เพื่อใช้เป็นส่วนของการทดสอบเมื่อมีแรงมากระทำต่อชิ้นงาน และวัดค่ากระแสไฟฟ้าจากเครื่องมัลติมิเตอร์



รูปที่ 3.13 อุปกรณ์ในการตรวจวัด [38]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

วิเคราะห์และอภิปรายผล

ในบทนี้จะจะเป็นการนำผลจากการขึ้นรูปเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ด้วยระบบการปั่นเส้นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบข้าวไฟฟ้าอิสระ โดยวิเคราะห์ผลการตรวจสอบจากผลการตรวจสอบพื้นผิวของเส้นและการตรวจสอบการระบุโครงสร้างและองค์ประกอบของพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ จากนั้นอภิปรายผลจากผลกระทบในแง่ของความเร็วในการหมุน ผลจากผลกระทบในแง่ของเวลาที่ใช้ในการหมุน และผลจากผลกระทบในแง่ของระยะเวลาในการปลูกฟิล์ม

4.1 แบบร่างชิ้นงานต้นแบบและต้นแบบระบบขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์โดยการปั่นเส้นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบข้าวไฟฟ้าอิสระ

เริ่มจากการออกแบบโครงสร้างของระบบปั่นเส้นใยโดยการปรับเปลี่ยนจากระบบปั่นเส้นใยต้นแบบ และทำการออกแบบส่วนประกอบที่ใช้กับระบบควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ จากนั้นเริ่มจากการออกแบบโครงสร้างภายในของระบบปั่นเส้นใยด้วยโปรแกรม Solidworks2013 ในการออกแบบชิ้นงานต่างๆ และใช้ระบบพิมพ์ 3 มิติ ในการสร้างชิ้นงานที่ต้องใช้ในระบบการปั่นเส้นใย

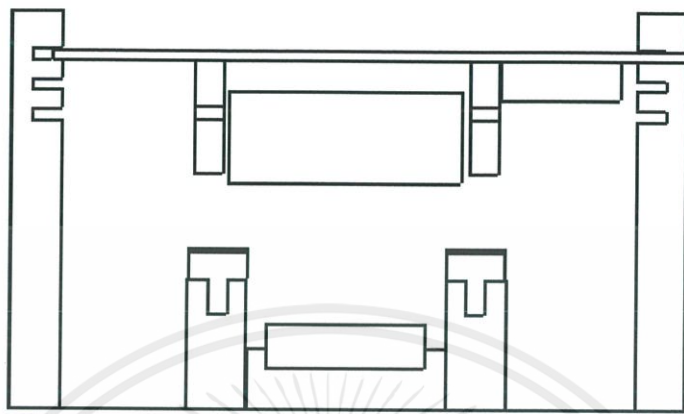
ซึ่งแบ่งเป็นส่วนหลักที่สำคัญได้ 3 ส่วน

-ส่วนแรก คือส่วนของข้าวไฟฟ้า เป็นส่วนที่สำคัญของการออกแบบระบบ เนื่องจากเป็นส่วนที่ปรับเปลี่ยนการขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์ โดยการออกแบบแกรนให้สามารถต่อเข้ากับแกนของ stepper motor ได้และสามารถขึงลวดกับแกนเพื่อเป็นตัวนำประจุไฟฟ้าบวกกับสารได้เคลื่อนที่ไปที่ฐานรองรับ และได้ออกแบบส่วนที่ครอบ stepper motor และ support base เพื่อเป็นส่วนที่รองรับการหมุนและการตีข้าวไฟฟ้า



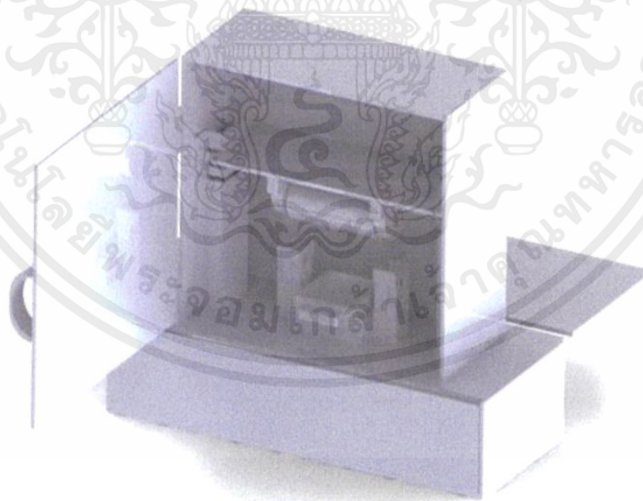
รูปที่ 4.1 แบบร่างการขึ้นรูปส่วนของข้าวไฟฟ้า

-ส่วนที่สอง ส่วนของห้องขึ้นรูปเส้นใย ทำจากพลาสติก PMMA เพื่อป้องกันความร้อนของไฟฟ้า ความต่างศักย์สูงภายในระบบ การออกแบบสามารถทำให้สามารถปรับระยะชั่วคราวไฟฟ้าลขั้วไฟฟ้า บวกได้ 4-10 เซนติเมตร



รูปที่ 4.2 แบบร่างส่วนของห้องขึ้นรูปเส้นใย

-ส่วนสุดท้าย ของฐานรองรับที่ออกแบบมาเพื่อให้เป็นทรงกระบอกและสามารถหมุนได้ โดยใช้ DC motor ต่อเข้ากับแกนหมุนที่เชื่อมอยู่กับฐานรองรับ และต่อติดขั้วไฟฟ้าเข้ากับฐานรองรับ



รูปที่ 4.3 แบบร่างภายนอกของระบบขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์โดยการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตขั้วไฟฟ้า
อิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

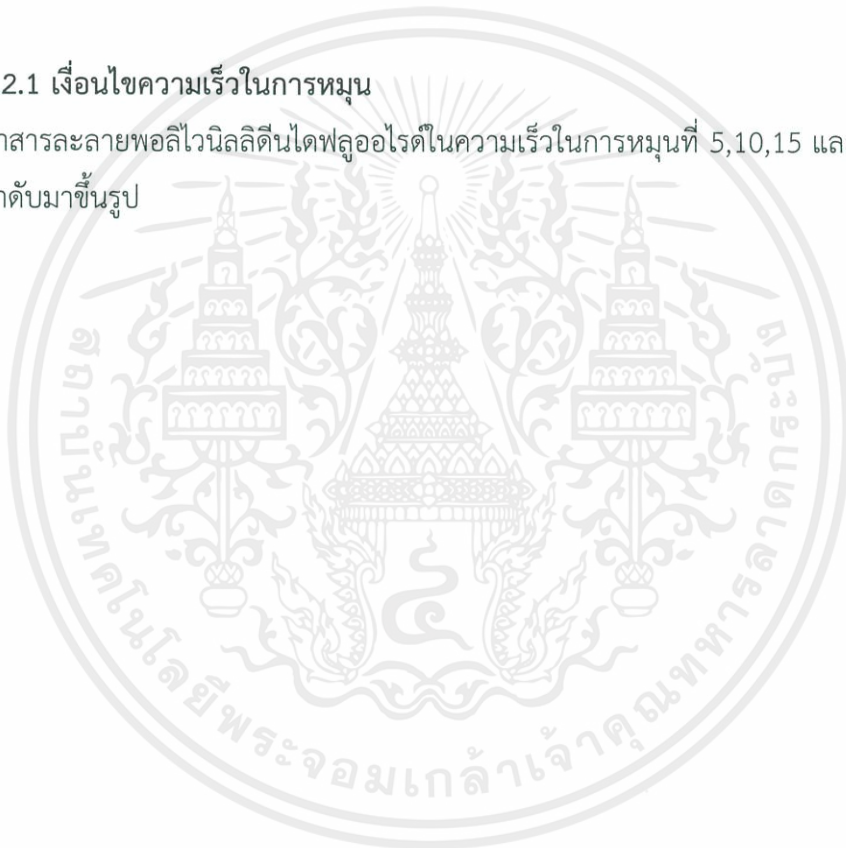
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงข้อมูลของระบบต้นแบบ

ข้อมูล	ระยะ
ขนาดของพื้นที่ตัวอย่าง	11×15 ตารางเซนติเมตร
ความยาวขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการขึ้นรูป	10 เซนติเมตร
ความต่างศักย์ไฟฟ้า	20 กิโลโวลต์
ระยะฐานรองรับที่สามารถปรับได้	4,6,8,10 เซนติเมตร

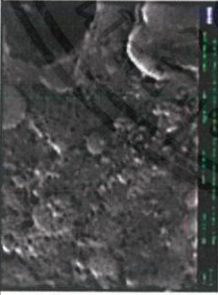
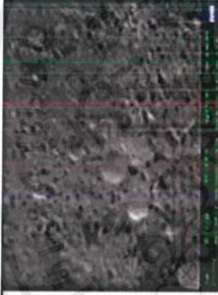
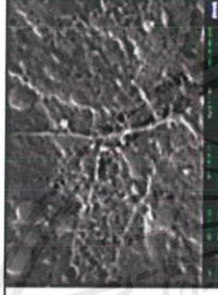
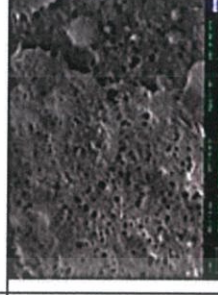
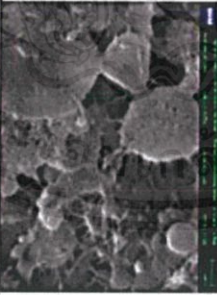
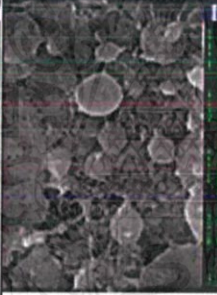
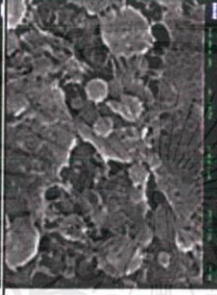
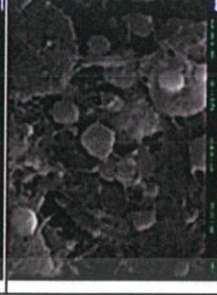
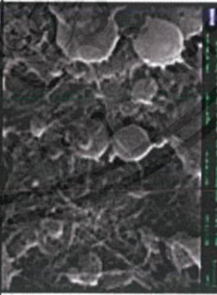
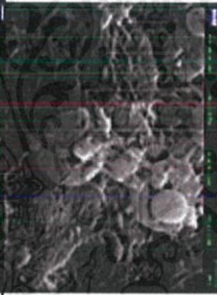
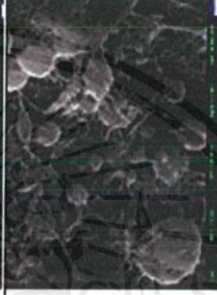
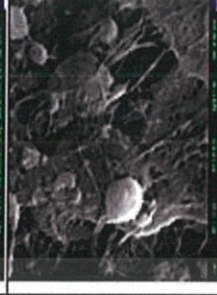
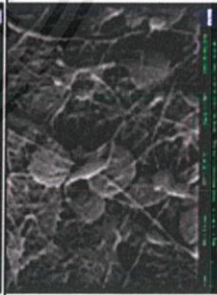
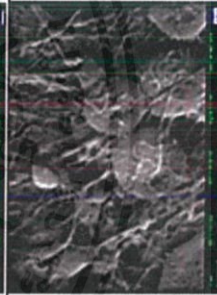
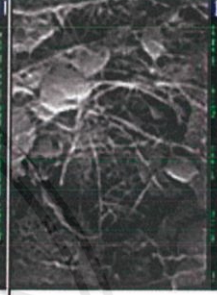
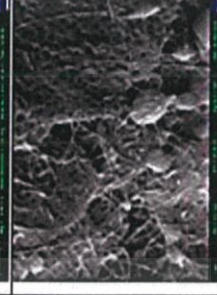
4.2 ผลการตรวจวิเคราะห์ชิ้นงานทดสอบการขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์โดยการปั่นเส้นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบขั้วไฟฟ้าอิสระ

4.2.1 เงื่อนไขความเร็วในการหมุน

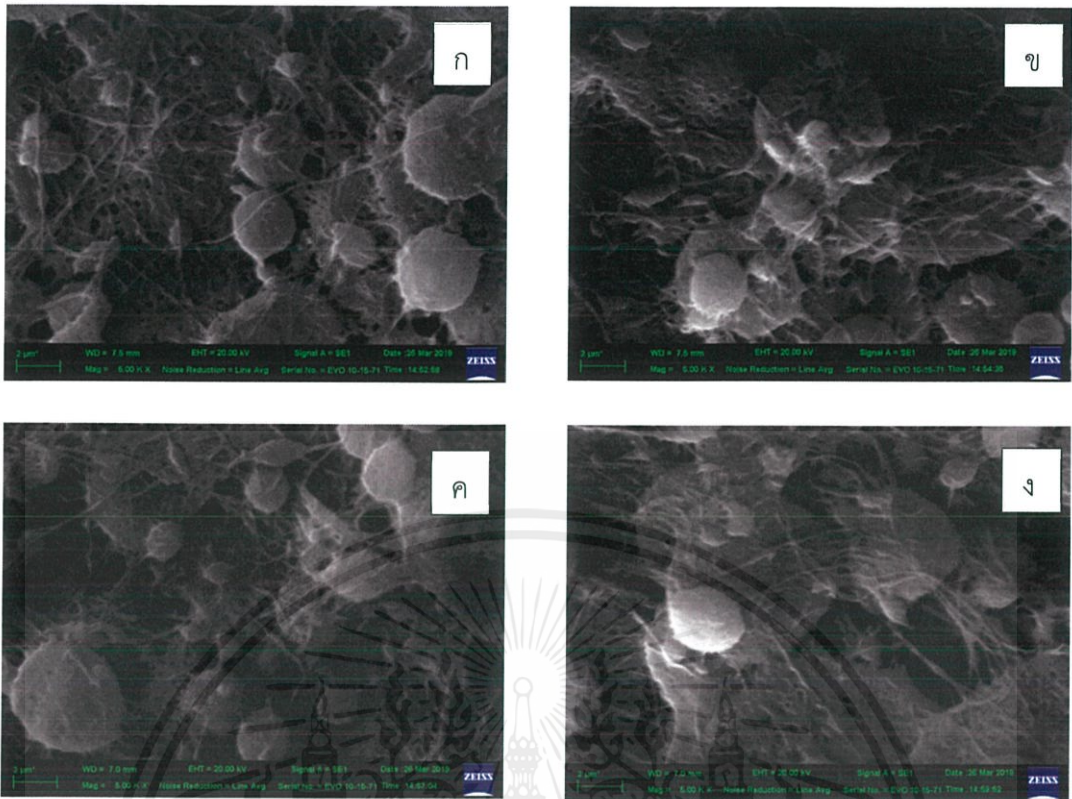
นำสารละลายพอลิไวนิลลิตินไคฟลูออไรด์ในความเร็วในการหมุนที่ 5,10,15 และ 20 รอบต่อนาทีตามลำดับมาขึ้นรูป



ตารางที่ 4.2 ภาพถ่ายพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยพอลิไวนิลิดีน ไดฟลูออไรด์ภายใต้เงื่อนไขความเร็วรอบในการหมุนของ spinner

ความเร็วรอบ (นาท)	อุณหภูมิ			
	RT °C	80 °C	100 °C	120 °C
5				
10				
15				
20				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

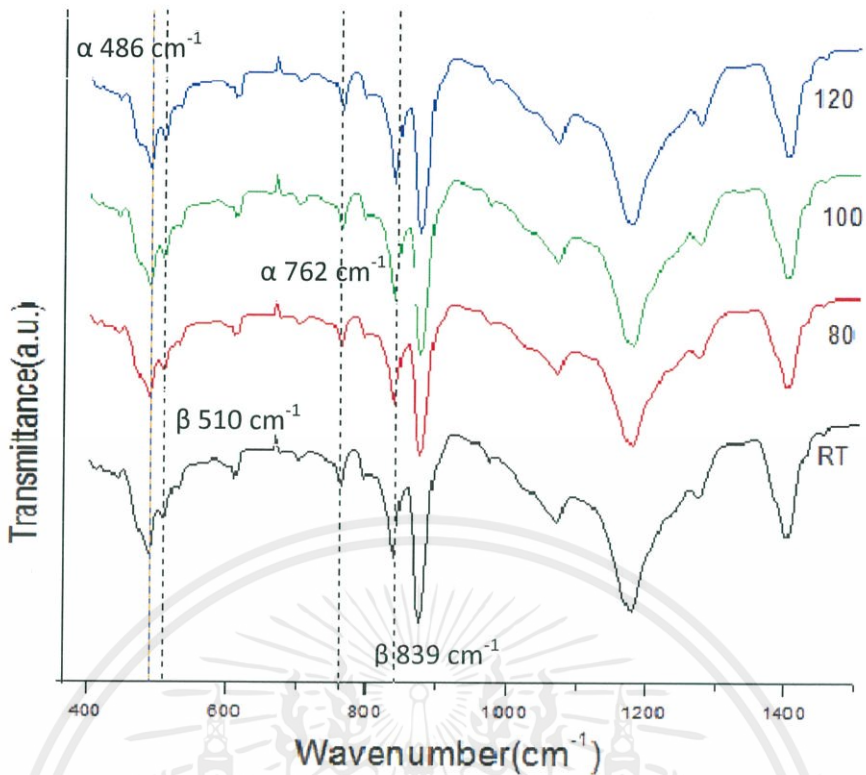


รูปที่ 4.4 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์บนกระดาษจากการปั่นเคลือบด้วยความเร็วรอบ 15 รอบต่อนาที และให้ความร้อนที่ (ก) อุณหภูมิห้อง (ข) 80 องศาเซลเซียส (ค) 100 องศาเซลเซียส และ (ง) 120 องศาเซลเซียส

ในเงื่อนไขความต่างศักย์ 20 KV ระยะห่างจากหัวไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 6 เซนติเมตร ด้วยความเข้มข้นของสารละลายพอลิไวนิลลิดีนไดฟลูออไรด์ที่ 11 wt% เป็นระยะเวลา 15 นาที หลังจากนั้นนำมาให้อุณหภูมิที่แตกต่างกันคือ RT, 80, 100 และ 120 องศาเซลเซียสจากนั้นนำเส้นใยที่ได้มาถ่ายภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด และนำไปวิเคราะห์การทะลุผ่านของรังสีอินฟราเรด

จากรูปถ่ายถ่ายภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด แสดงให้เห็นว่าเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไดฟลูออไรด์ที่ความเร็วการหมุน 5 และ 10 รอบต่อนาที จะไม่เกิดเส้นใย เนื่องจากมีความเร็วรอบที่น้อยเกินไป จึงทำให้ขณะหมุนนั้นไม่เกิดกรวยของเทเลอร์ แต่ถูกพ่นขึ้นไปในลักษณะของสปเรย์ ส่วนผิวของเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไดฟลูออไรด์ที่ความเร็วการหมุน 15 และ 20 รอบต่อนาทีนั้นจะพบรูปแบบของเส้นใย แต่จะต่างการในส่วนที่ความเร็วการหมุน 20 รอบต่อนาทีนั้น จะเกิดการจ่ายสารละลายที่มากเกินไป จึงทำให้เส้นใยที่ยังไม่แห้งด้านบนไปติดกับเส้นใยใหม่เป็นจำนวนมาก จึงเกิดกลุ่มของพอลิเมอร์ด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 การทะลุผ่านของรังสีอินฟราเรดของวัสดุประกอบเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ที่อุณหภูมิ ต่างกันภายใต้เงื่อนไขความเร็วการหมุน 15 รอบต่อนาที

จากกราฟการทะลุผ่านของรังสีอินฟราเรดของวัสดุประกอบเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์จะแสดงให้เห็นว่าเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ที่ทุกอุณหภูมินั้น มีความเป็น β -phase ซึ่งโครงสร้างของเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ที่พบมี 2 โครงสร้าง คือ โครงสร้างแอลฟา (alpha-phase) และ โครงสร้างเบตา (beta-phase) ซึ่งโครงสร้างที่มีความเป็นเพียโซอิเล็กทริกนั้นก็คือ โครงสร้างเบต้า ซึ่งจะมีผลต่อการสร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อนำไปประยุกต์ใช้งาน ซึ่งจากกราฟนี้จะเห็นได้ว่าพีคที่ 510 และ 839 cm^{-1} นั้นมาจากโครงสร้างของเบตาเฟส (β -phase) ของหมู่ฟังก์ชัน CF_2 ส่วนพีคที่ 486, 762 cm^{-1} เป็นโครงสร้างที่ได้มาจากแอลฟา (α -phase) ซึ่งจากการทดลองที่ให้อุณหภูมิต่างกัน ซึ่งจะเห็นการลดลงของแอลฟาเฟส (α -phase) ที่อุณหภูมิต่างกัน

โดยที่อุณหภูมิตั้งแต่ 80-120 องศาเซลเซียสนั้น จะมีพีคของ แอลฟาเฟส (α -phase) น้อยกว่าที่อุณหภูมิต้อง

จากการทดลองการพ่นเคลือบฟิล์มตามเงื่อนไขความเร็วในการหมุน โดยนำแผ่นฟิล์มที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งจะได้ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์บนกระดาษออกมา แสดงให้เห็นว่าความเร็วรอบที่เหมาะสมเหมาะสมกับระบบพ่นเคลือบนี้ นั่นคือ ความเร็วรอบในการหมุนที่ 15-20 รอบต่อนาที

เนื่องจากในภาพจะเห็นแผ่นฟิล์มที่มีความเป็นเส้นใยมากที่สุดจากความเร็รรอบทั้งหมดที่ได้ทำการทดลอง หลังจากนั้นนำแผ่นฟิล์มที่ได้จากการพันเคลือบไปตรวจวัดคุณสมบัติโดยการวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี ทำให้สามารถบอกได้ถึงการเปลี่ยนแปลงเฟสของเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ที่อุณหภูมิต่างกันคือ ที่อุณหภูมิห้อง , 80 องศาเซลเซียส, 100 องศาเซลเซียส และ 120 องศาเซลเซียส จะแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมกับกระบวนการการปั่นเส้นใยนี้คืออุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีความลดลงของพีคในช่วงที่เป็นแอลฟาเฟส และยังคงพีคช่วงเบตาเฟสไว้ได้

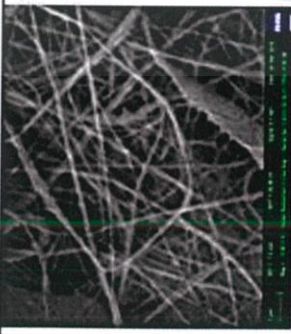
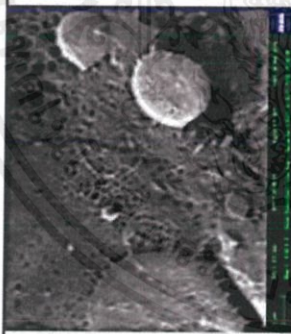
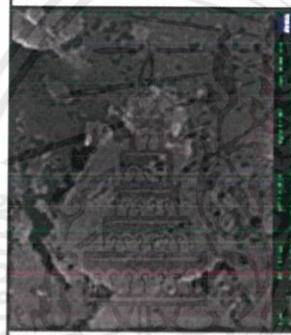
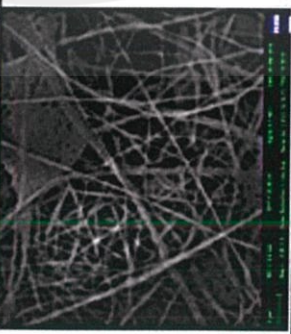


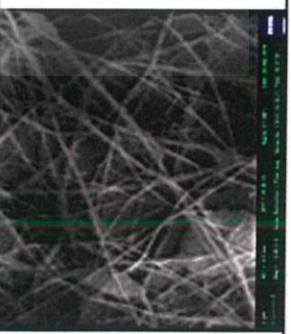
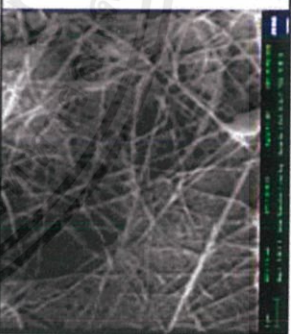
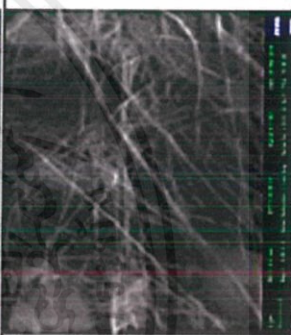


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

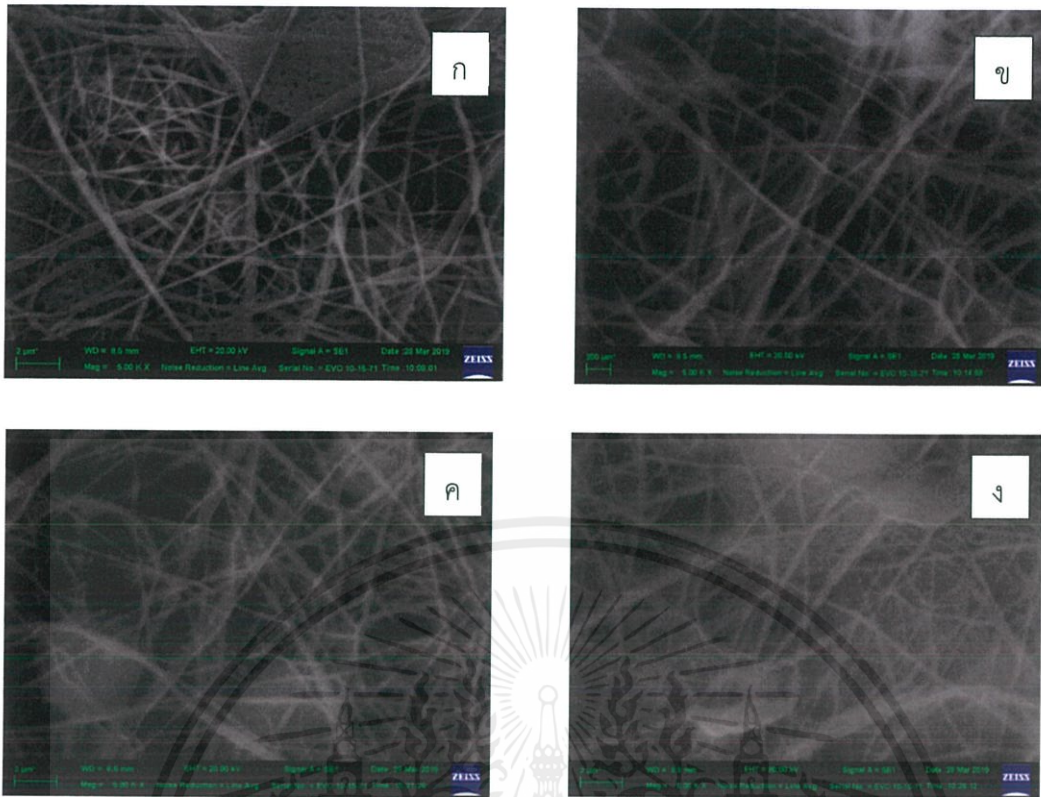
4.2.2 เจือปนไครยะเวลาในการปั่นเส้นใย

นำสารละลายพอลิไวนิลลิตินไดฟลูออไรด์มาปั่นโดยระยะเวลาในการปั่นรูปที่ 5, 10 และ 15 นาทีตามลำดับมาขึ้น

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยพอลิไวนิลลิตินไดฟลูออไรด์ภายใต้เงื่อนไขระยะเวลาในการหมุน

เวลา(นาที)	อุณหภูมิ		
	RT ^o c	80 ^o c	100 ^o c
5			
10			
20			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

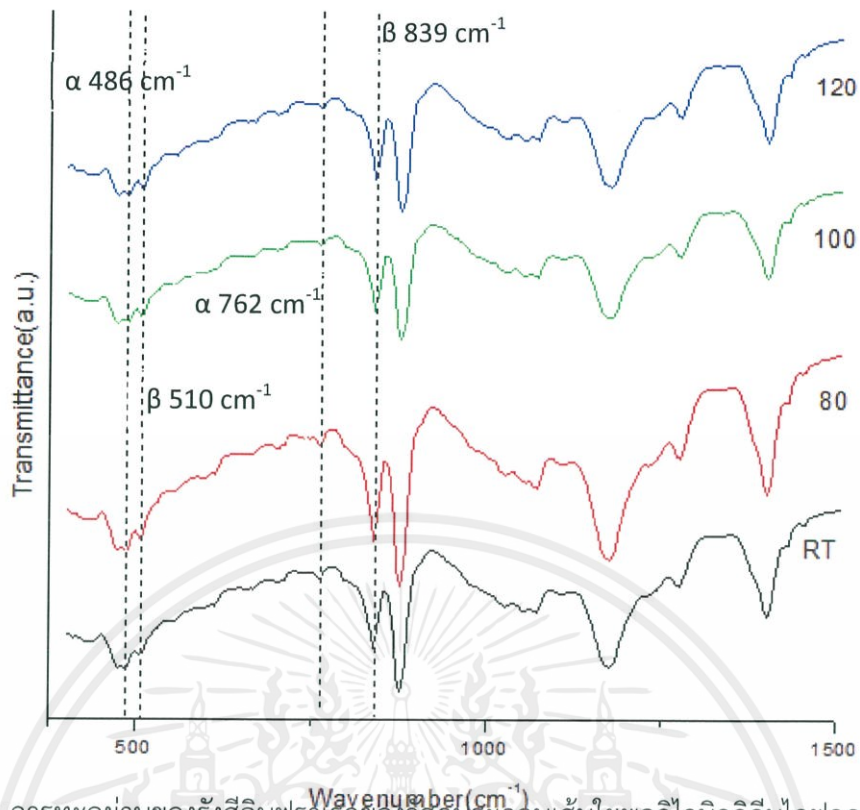


รูปที่ 4.6 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์บนกระดาษจากการพ่นเคลือบด้วยระยะเวลา 10 นาที และให้ความร้อนที่ (ก) อุณหภูมิห้อง (ข) 80 องศาเซลเซียส (ค) 100 องศาเซลเซียส และ (ง) 120 องศาเซลเซียส

ในเงื่อนไขความต่างศักย์ 20KV ระยะห่างจากหัวไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 6 เซนติเมตร ด้วยความเข้มข้นของสารละลายพอลิไวนิลลิดีนไดฟลูออไรด์ที่ 11 wt% และความเร็วการหมุนเป็น 15 รอบต่อนาที หลังจากนั้นนำมาให้อุณหภูมิที่แตกต่างกันคือ RT, 80, 100 และ 120 องศาเซลเซียส จากนั้นนำเส้นใยที่ได้มาถ่ายภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และนำไปวิเคราะห์การทะลุผ่านของรังสีอินฟราเรด

จากรูปถ่ายถ่ายภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงให้เห็นว่าเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไดฟลูออไรด์ที่ระยะเวลาการหมุน 5 นาที จะเกิดเส้นใยแต่เมื่อนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80, 100 และ 120 องศาเซลเซียสเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไดฟลูออไรด์นั้นรวมตัวกันไม่เป็นเส้นใย ส่วนผิวของเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไดฟลูออไรด์ที่ระยะเวลาการหมุน 15 นาทีนั้นจะพบรูปแบบของเส้นใยมาก แต่ในส่วนที่ความเร็วการหมุน 20 รอบต่อนาทีนั้น จะเกิดการจ่ายสารละลายที่มากเกินไป จึงทำให้เส้นใยที่ยังไม่แห้งด้านบนไปติดกับเส้นใยใหม่เป็นจำนวนมากจึงเกิดกลุ่มของพอลิเมอร์ด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 การทะลุผ่านของรังสีอินฟราเรดของวัสดุประกอบเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไدفลูออไรด์ที่อุณหภูมิต่างกันภายใต้เงื่อนไขระยะเวลาในการปั่นเส้นใย 10 นาที

จากกราฟการทะลุผ่านของรังสีอินฟราเรดของวัสดุประกอบเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไدفลูออไรด์จะแสดงให้เห็นว่าเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไدفลูออไรด์ที่ทุกอุณหภูมินั้น มีความเป็น β -phase ซึ่งโครงสร้างของเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไدفลูออไรด์ที่พบมี 2 โครงสร้าง คือ โครงสร้างแอลฟา (alpha-phase) และ โครงสร้างเบตา (beta-phase) ซึ่งโครงสร้างที่มีความเป็นเพียโซอิเล็กทริกนั้นก็คือ โครงสร้างเบต้า ซึ่งจะมีผลต่อการสร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อนำไปประยุกต์ใช้งาน ซึ่งจากกราฟนี้จะเห็นได้ว่าพีคที่ 510 และ 839 cm^{-1} นั้นมาจากโครงสร้างของเบตาเฟส (β -phase) ของหมู่ฟังก์ชัน CF_2 ส่วนพีคที่ 486, 762 cm^{-1} เป็นโครงสร้างที่ได้มาจากแอลฟา (α -phase) ซึ่งจากการทดลองที่ให้ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ซึ่งจะเห็นการลดลงของแอลฟาเฟส (α -phase) ที่อุณหภูมิต่างกัน โดยที่ อุณหภูมิที่ 80-120 องศาเซลเซียสนั้น จะมีพีคของเบตาเฟส (β -phase) เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดที่ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

จากการทดลองการพันเคลือบฟิล์มตามเงื่อนไขระยะเวลาที่ใช้ในการปั่นเส้นใย โดยนำ แผ่นฟิล์มที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งจะได้ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไدفลูออไรด์บนกระดาษออกมา แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาในการปั่นเส้นใยที่เหมาะสมกับระบบพันเคลือบนั้นนั่นคือ ระยะเวลา 10 นาที เนื่องจากในภาพจะเห็นแผ่นฟิล์มที่มีความเป็นเส้นใยมากที่สุดจากเงื่อนไขระยะเวลาทั้งหมดที่ได้ทำ

การทดลอง หลังจากนั้นนำแผ่นฟิล์มที่ได้จากการพันเคลือบไปตรวจวัดคุณสมบัติโดยการวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี ทำให้สามารถบอกได้ถึงการเปลี่ยนแปลงเฟสของเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ที่อุณหภูมิต่างกันคือ ที่อุณหภูมิห้อง , 80 องศาเซลเซียส , 100 องศาเซลเซียส และ 120 องศาเซลเซียส จะแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมกับกระบวนการการพันเคลือบนี้คืออุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีความลดลงของพีคในช่วงที่เป็นแอลฟาเฟส และยังคงพีคช่วงเบตาเฟสไว้ได้

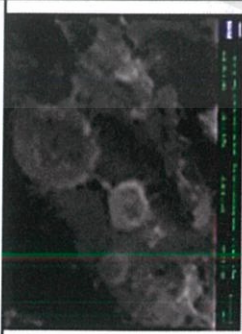
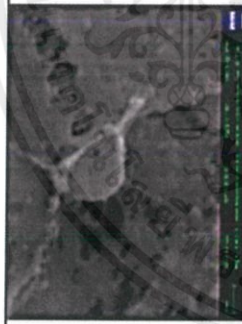
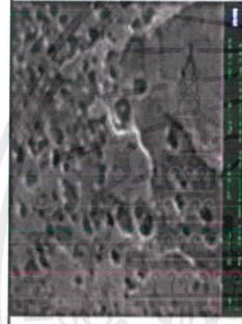
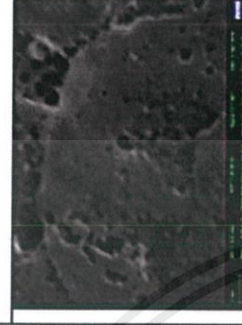
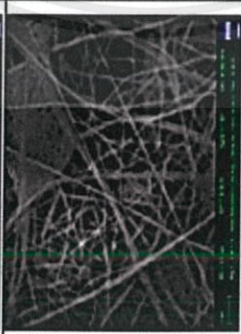
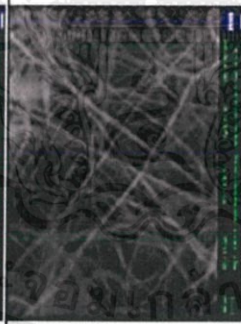
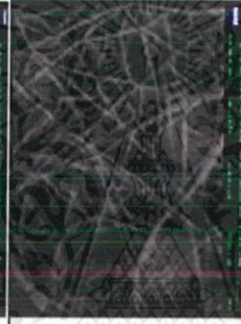
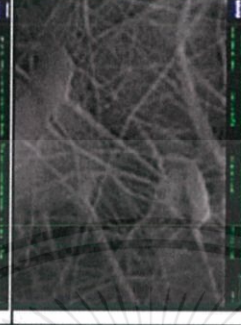
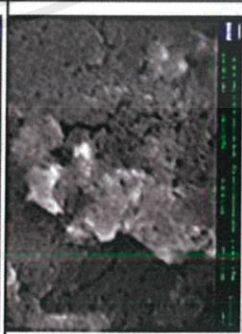
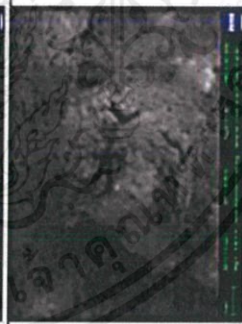
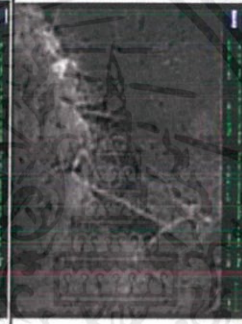
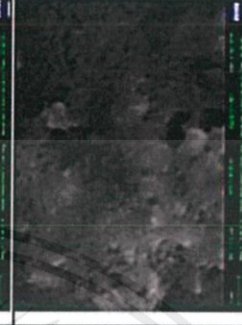
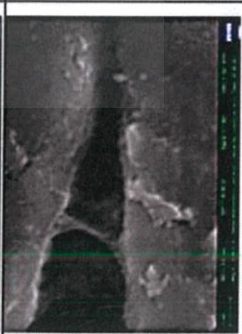
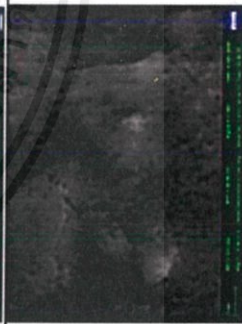
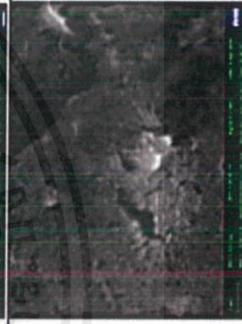
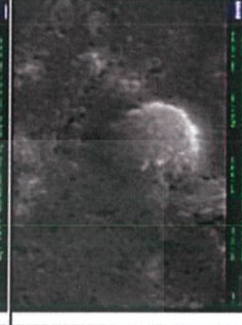


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

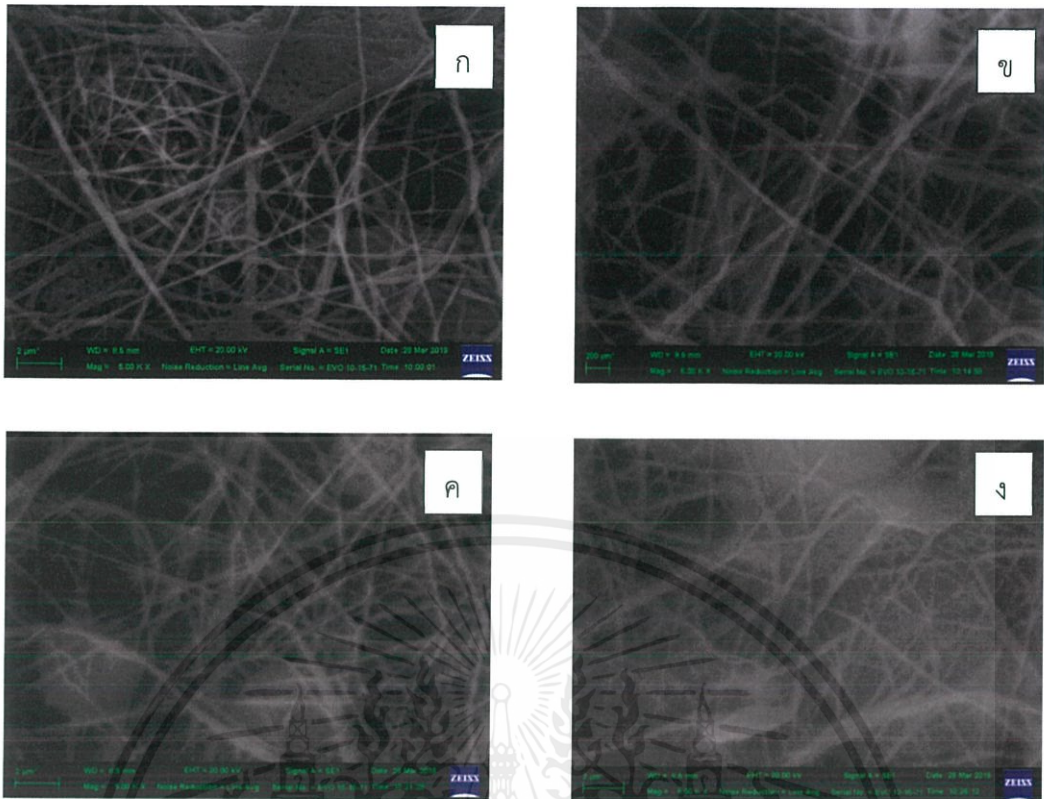
4.2.3 เจื่อนโซนามไฟฟ้าโดยการปรับระยะห่างระหว่างฐานรองรับกับขั้วไฟฟ้า

นำสารละลายพอลิไวนิลลิทีนไคฟลูออไรด์มาขึ้นรูปโดยระยะระหว่างฐานรองรับกับขั้วไฟฟ้าเป็น 4, 6, 8 และ 10 เซนติเมตร ตามลำดับมาขึ้นรูป

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดลองจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยพอลิไวนิลลิทีนไคฟลูออไรด์ภายใต้เงื่อนไขระยะระหว่างฐานรองรับกับขั้วไฟฟ้า

ระยะห่าง (cm)	อุณหภูมิ			
	RT ^o C	80 ^o C	100 ^o C	120 ^o C
4				
6				
8				
10				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

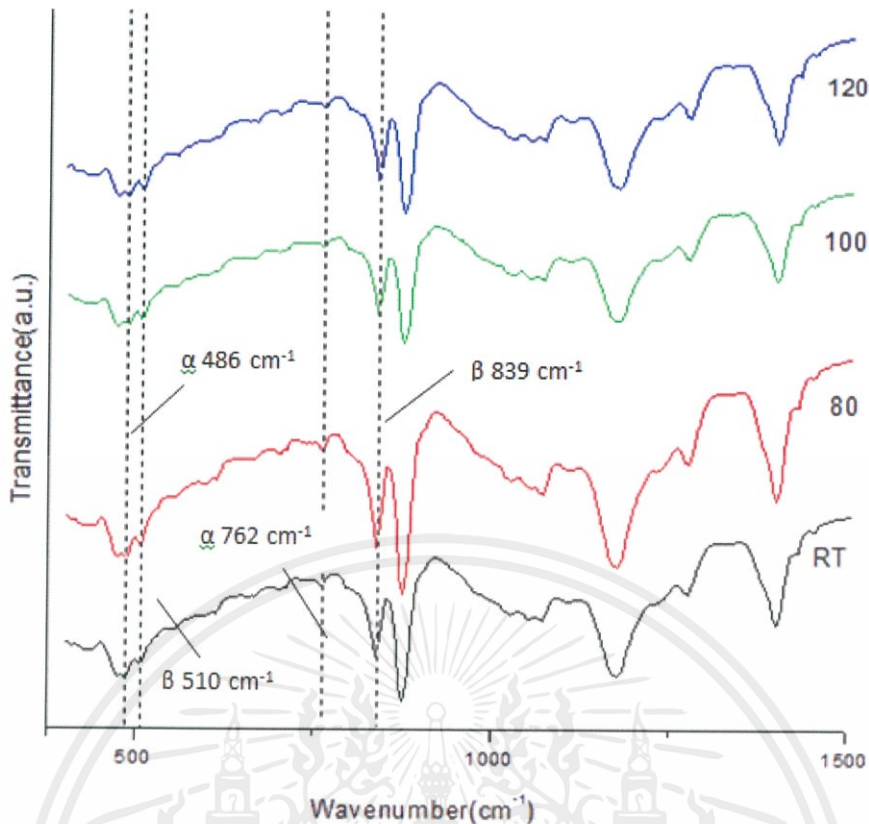


รูปที่ 4.8 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์บนกระดาษจากการพันเคลือบด้วยระยะห่างระหว่างฐานรองรับกับขั้วไฟฟ้า เป็น 6 เซนติเมตรและให้ความร้อนที่ (ก) อุณหภูมิห้อง(ข) 80 องศาเซลเซียส (ค) 100 องศา เซลเซียส และ (ง) 120 องศาเซลเซียส

ในเงื่อนไขความต่างศักย์ 20 KV ด้วยความเข้มข้นของสารละลายพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ที่ 11 wt% ความเร็วการหมุนเป็น 15 รอบต่อนาที และเวลาในการหมุนเป็น 10 นาที หลังจากนั้นนำมาให้อุณหภูมิที่แตกต่างกันคือ RT,80,100 และ 120 องศาเซลเซียส จากนั้นนำเส้นใยที่ได้มาถ่ายภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด และนำไปวิเคราะห์การทะลุผ่านของรังสีอินฟราเรด

จากรูปถ่ายถ่ายภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด แสดงให้เห็นว่าเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ที่ระยะระหว่างฐานรองรับกับขั้วไฟฟ้าที่ 4cmจะไม่เกิดเส้นใยเนื่องจากมีระยะห่างที่น้อยเกินไป จึงทำให้ขณะหมุนนั้นไม่เกิดกรวยของเทเลอร์ แต่ถูกพันขึ้นไปในลักษณะของสเปร์รี่ แต่ที่ระยะระหว่างฐานรองรับกับขั้วไฟฟ้าที่ 6 cm นั้นจะเกิดเส้นใยมาก ส่วนผิวของเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ที่ระยะห่าง 8 และ 10 cm นั้นจะไม่พบรูปแบบของเส้นใยเนื่องจากมีระยะที่ไกลเกินไปทำให้เส้นใยนั้นขึ้นไปพื้นฐานรองรับได้นั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 การทะลุผ่านของรังสีอินฟราเรดของวัสดุประกอบเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ที่อุณหภูมิต่างกันภายใต้เงื่อนไขระยะเวลาพื้นฐานรองรับกับข้อไฟฟ้าที่ 6 cm.

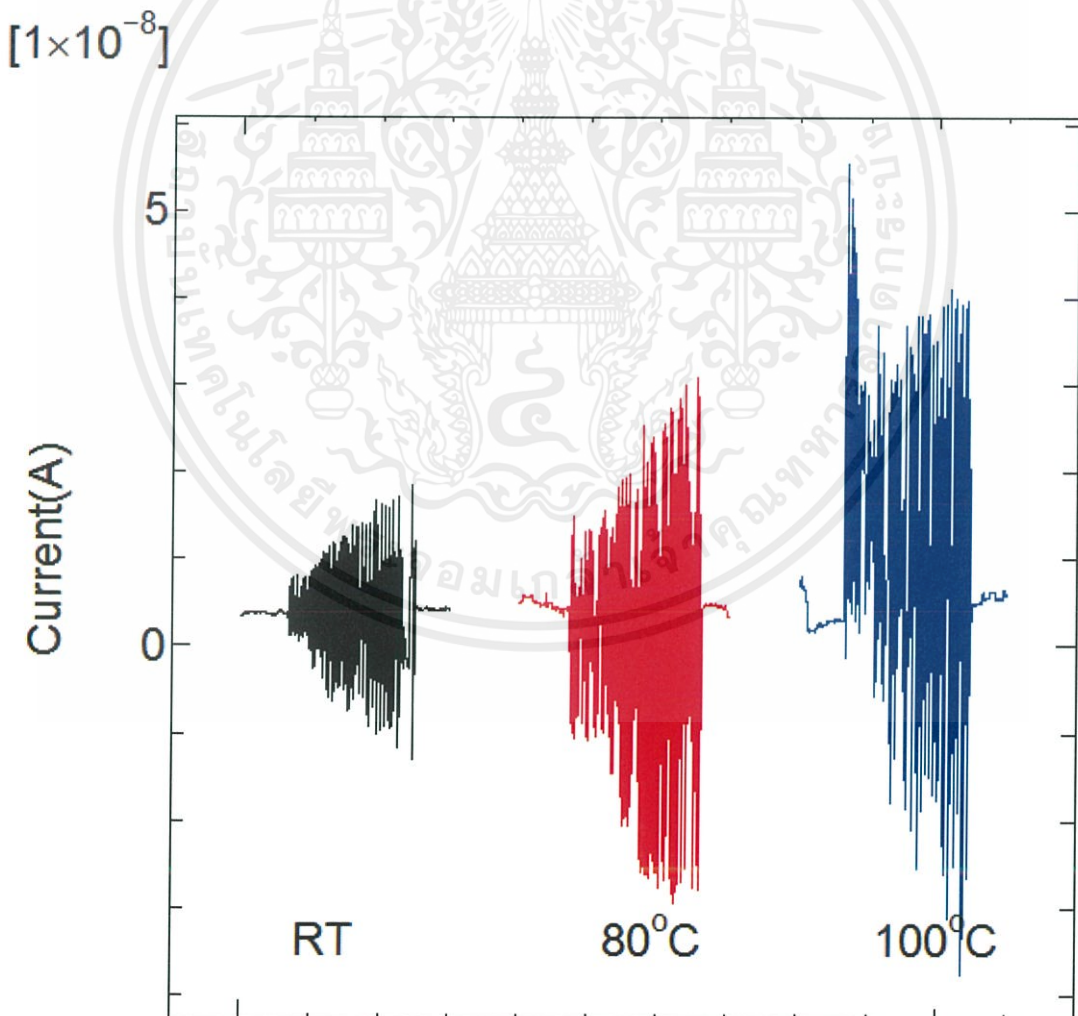
จากกราฟการทะลุผ่านของรังสีอินฟราเรดของวัสดุประกอบเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์จะแสดงให้เห็นว่าเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ที่ทุกอุณหภูมินั้น มีความเป็น β -phase ซึ่งโครงสร้างของเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ที่พบมี 2 โครงสร้าง คือ โครงสร้างแอลฟา (α -phase) และ โครงสร้างเบตา (β -phase) ซึ่งโครงสร้างที่มีความเป็นเพียโซอิเล็กทริกนั้นก็คือ โครงสร้างเบต้า ซึ่งจะมีผลต่อการสร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อนำไปประยุกต์ใช้งาน ซึ่งจากกราฟนี้จะเห็นได้ว่าพีคที่ 510 และ 839 cm^{-1} นั้นมาจากโครงสร้างของเบตาเฟส (β -phase) ของหมู่ฟังก์ชัน CF_2 ส่วนพีคที่ 486, 762 cm^{-1} เป็นโครงสร้างที่ได้มาจากแอลฟา (α -phase) ซึ่งจากการทดลองที่ให้ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ซึ่งจะเห็นการลดลงของแอลฟาเฟส (α -phase) ที่อุณหภูมิต่างกัน โดยที่ อุณหภูมิที่ 80-120 องศาเซลเซียสนั้น จะมีพีคของเบตาเฟส (β -phase) เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดที่ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

จากการทดลองการพันเคลือบฟิล์มตามเงื่อนไขระยะเวลาห่างระหว่างข้อไฟฟ้ากับฐานรองรับ โดย นำแผ่นฟิล์มที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งจะได้ภาพจากกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์บนกระดาษออกมา แสดงให้ เห็นว่าระยะเวลาห่างระหว่างฐานรองรับกับข้อไฟฟ้าที่เหมาะสมเหมาะสมกับระบบพันเคลือบนี้ นั่นคือ

ระยะห่างระหว่างฐานรองรับที่ 6 เซนติเมตร เนื่องจากในภาพจะเห็นแผ่นฟิล์มที่มีความเป็นเส้นใยมากที่สุดจากความเร็วรอบทั้งหมดที่ได้ทำการทดลอง หลังจากนั้นนำแผ่นฟิล์มที่ได้จากการปั่นเคลือบไปตรวจวัดคุณสมบัติโดยการวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี ทำให้สามารถบอกได้ถึงการเปลี่ยนแปลงเฟสของเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ที่อุณหภูมิต่างกันคือ ที่อุณหภูมิห้อง , 80 องศาเซลเซียส , 100 องศาเซลเซียส และ 120 องศาเซลเซียส จะแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมกับกระบวนการการปั่นเคลือบนี้คืออุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีความลดลงของพิกในช่วงที่เป็นแอลฟาเฟสและยังคงพิกช่วงเบตาเฟสไว้ได้

4.2.4 ผลการตรวจสอบทางไฟฟ้า

จากผลการวิเคราะห์การทะลุผ่านของรังสีอินฟราเรดของเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์บนขั้วไฟฟ้ากระดาศภายใต้ระยะห่าง 4 เซนติเมตร พบว่าเลขคลื่นที่ถูกดูดกลืนที่บ่งบอกว่าการยึดหดของพันธะ C-F ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของโครงสร้างเบตา[21]

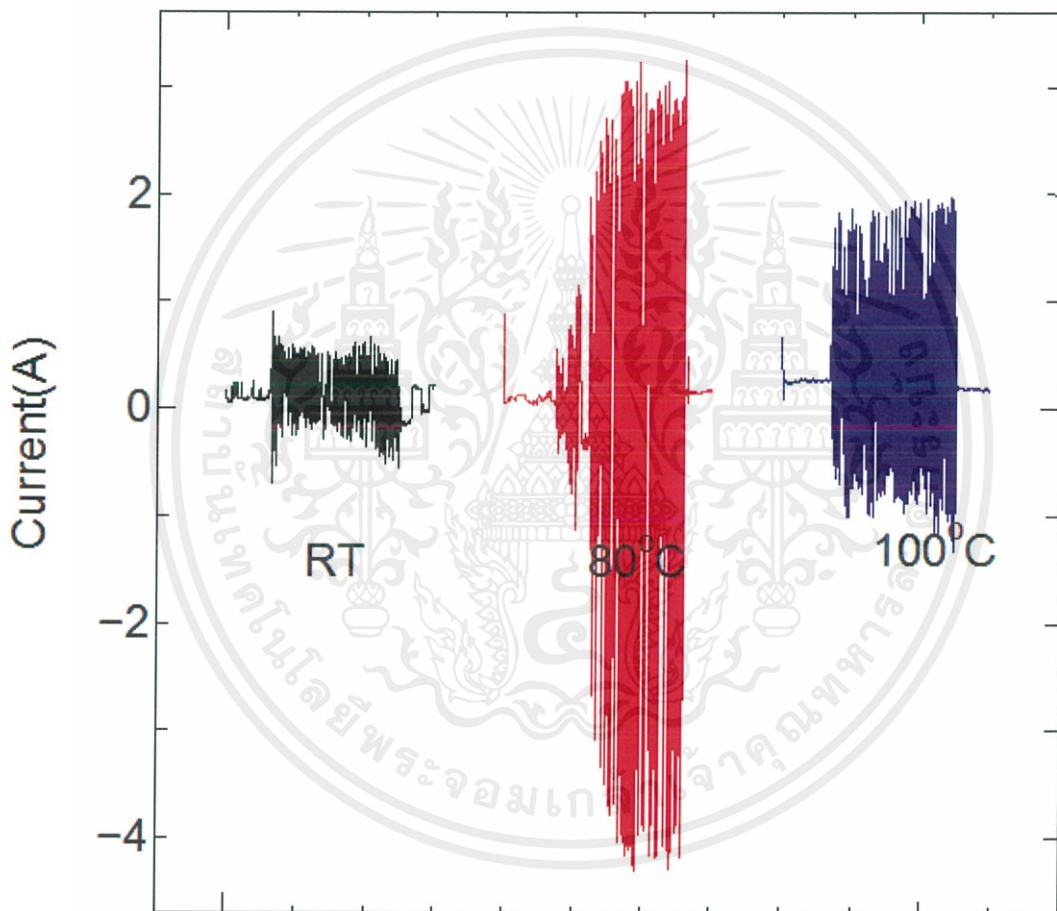


รูปที่ 4.10 ผลการตรวจสอบทางไฟฟ้าจากระยะห่างที่ 4 เซนติเมตรที่อุณหภูมิต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการตรวจสอบทางไฟฟ้าโดยการวัดค่ากระแสไฟฟ้าของเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์บนขั้วไฟฟ้ากระดาษภายใต้ระยะห่าง 4 เซนติเมตร แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นั้น มีค่ากระแสทางไฟฟ้าที่มากกว่าช่วงอุณหภูมิ RT และ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับผลของการทะลุผ่านของรังสีอินฟราเรดของวัสดุประกอบเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ เนื่องจากที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีความเป็นแอลฟาเฟสมากกว่าที่อุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียส

$[1 \times 10^{-8}]$



รูปที่ 4.11 ผลการตรวจสอบทางไฟฟ้าจากระยะห่างที่ 6 เซนติเมตรที่อุณหภูมิต่างกัน

จากผลการตรวจสอบทางไฟฟ้าโดยการวัดค่ากระแสไฟฟ้าของเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์บนขั้วไฟฟ้ากระดาษภายใต้ระยะห่าง 6 เซนติเมตร แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นั้น มีค่ากระแสทางไฟฟ้าที่มากกว่าช่วงอุณหภูมิ RT และ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับผลของการทะลุผ่านของรังสีอินฟราเรดของวัสดุประกอบเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากที่อุณหภูมิ 80°C มีความเป็นเบตาเฟสมากกว่าที่อุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งจะต่างจากที่ ระยะห่าง 4 เซนติเมตรเนื่องจากภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์นั้นต่างกันที่ระยะห่าง 4 เซนติเมตรนั้นจะมีความเป็นเส้นใยน้อยกว่าที่ระยะห่าง 6 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงาน

ระยะห่าง (เซนติเมตร)	อุณหภูมิ	กระแส(I)		
		I_{max}	I_{min}	$I_{\text{max}}-I_{\text{min}}$
4	RT	1.51×10^{-8}	-5.57×10^{-9}	2.08×10^{-8}
	80	2.23×10^{-8}	-2.33×10^{-8}	4.56×10^{-8}
	100	3.30×10^{-8}	-2.36×10^{-8}	5.66×10^{-8}
6	RT	5.84×10^{-9}	-2.60×10^{-9}	0.84×10^{-8}
	80	2.73×10^{-8}	3.84×10^{-8}	6.57×10^{-8}
	100	1.78×10^{-8}	-7.41×10^{-9}	2.52×10^{-8}
8	RT	N/A	N/A	N/A
	80	N/A	N/A	N/A
	100	N/A	N/A	N/A
10	RT	N/A	N/A	N/A
	80	N/A	N/A	N/A
	100	N/A	N/A	N/A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการตรวจสอบทางไฟฟ้าโดยการวัดค่ากระแสไฟฟ้าของเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์บนขั้วไฟฟ้ากระดาษ แสดงให้เห็นว่าการตรวจวัดสัญญาณทางไฟฟ้าสูงที่สุดในแต่ละเงื่อนไขสรุปได้ดังนี้

- ภายใต้ระยะห่าง 4 เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

สัญญาณทางไฟฟ้าเกิดขึ้นเนื่องจากการประพุดิตัวของพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ มีความเป็นเฟสผสมของทั้งแอลฟาและเบตาเฟส

- ภายใต้ระยะห่าง 6 เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

สัญญาณทางไฟฟ้าเกิดขึ้นเนื่องจากความเป็นเส้นใยของพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ ซึ่งสอดคล้องกับผลของการทะลุผ่านของรังสีอินฟราเรด ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีความเป็นเบตาเฟสสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิต่างๆ

และสำหรับที่ระยะห่าง 8 เซนติเมตร และ 10 เซนติเมตรไม่สามารถตรวจวัดสัญญาณทางไฟฟ้าได้ เนื่องจากที่เงื่อนไขระยะห่าง 8 เซนติเมตร และ 10 เซนติเมตร ฟิล์มที่ได้นั้นมีความหนาที่น้อยมาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากการสร้างระบบปั่นเส้นใยด้วยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบไม่ใช้เข็มเพื่อรองรับการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง โดยการเปลี่ยนจากระบบแบบใช้หัวเข็มมาเป็นระบบแบบไม่ใช้หัวเข็มซึ่งใช้เส้นลวดแกนหมุนแทนและใช้ฐานรองรับเป็นแบบทรงกระบอกแกนหมุนหลังจากได้มีการทดสอบการทำงานของระบบนี้ แสดงให้เห็นว่าสามารถปรับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ากับฐานรองรับในระยะ 4,6,8 และ 10 เซนติเมตร โดยใช้ศักย์ไฟฟ้าแรงสูงที่ 20 กิโลโวลต์ สามารถควบคุมความเร็วรอบในการหมุนของเส้นลวดแกนหมุนได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์(Arduino board) จึงทำให้ระบบปั่นเส้นใยด้วยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตนี้สามารถสร้างชิ้นงานที่มีพื้นที่มากขึ้นในเวลาที่ลดลงได้เมื่อเทียบกับระบบปั่นเส้นใยด้วยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบใช้หัวเข็ม

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อลักษณะของเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ที่ปั่นด้วยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบขั้วไฟฟ้าอิสระ จากเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและการวิเคราะห์ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงให้เห็นว่า ภายใต้เงื่อนไขความเร็วในการหมุนนั้น ความเร็วรอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการหมุนในระบบนี้อยู่ที่ 15-20 รอบต่อนาที เนื่องจากในภาพจะเห็นแผ่นฟิล์มที่มีความเป็นเส้นใยมากที่สุดจากความเร็วรอบทั้งหมดที่ได้ทำการทดลองและเมื่อนำชิ้นงานไปให้อุณหภูมิเห็นว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมกับกระบวนการการปั่นเส้นใยคืออุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีความลดลงของพิกในช่วงที่เป็นแอลฟาเฟสและยังคงพิกช่วงเบตาเฟสไว้ได้ ภายใต้เงื่อนไขความระยะเวลาในการปั่นเส้นใย ระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปั่นเส้นใยของระบบนี้อยู่ที่ 10 นาที เนื่องจากในภาพจะเห็นแผ่นฟิล์มที่มีความเป็นเส้นใยมากที่สุดจากความเร็วรอบทั้งหมดที่ได้ทำการทดลองและเมื่อนำชิ้นงานไปให้อุณหภูมิเห็นว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมกับกระบวนการการปั่นเส้นใยคืออุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีความลดลงของพิกในช่วงที่เป็นแอลฟาเฟสและยังคงพิกช่วงเบตาเฟสไว้ได้ ภายใต้เงื่อนไขความระยะห่างในการปั่นเส้นใย ระยะห่างที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปั่นเส้นใยของระบบนี้อยู่ที่ 6 เซนติเมตร เนื่องจากในภาพจะเห็นแผ่นฟิล์มที่มีความเป็นเส้นใยมากที่สุดจากความเร็วรอบทั้งหมดที่ได้ทำการทดลองและเมื่อนำชิ้นงานไปให้อุณหภูมิเห็นว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมกับกระบวนการการปั่นเส้นใยคืออุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีความลดลงของพิกในช่วงที่เป็นแอลฟาเฟสและยังคงพิกช่วงเบตาเฟสไว้ได้

จากการนำเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ไปประยุกต์ใช้งานด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ได้มีการนำมาทำเป็นอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าและได้มีการทดสอบวัดค่ากระแสไฟฟ้าจากอุปกรณ์ ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าตามเงื่อนไข

- ระยะห่างที่ 4 เซนติเมตร, ระยะเวลาที่ 10 นาที และ ความเร็วรอบเป็น 15 รอบต่อนาที

ค่ากระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นเนื่องจากการประพัตต์ตัวของพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ ที่มีความเป็นเฟสผสมของทั้งแอลฟาและเบตาเฟส ของพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์

- ระยะห่างที่ 6 เซนติเมตร, ระยะเวลาที่ 10 นาที และ ความเร็วรอบเป็น 15 รอบต่อนาที ค่ากระแสไฟฟ้าออกมาได้สอดคล้องกับผลของการทะลุผ่านของรังสีอินฟราเรด โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของเฟสเบตาสูงที่สุดจึงมีการตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้าได้ดีที่สุด เนื่องจากสมบัติความเป็นเส้นใยของพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ที่มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริก

ระยะห่าง 8 เซนติเมตร, ระยะเวลาที่ 10 นาที และ ความเร็วรอบเป็น 15 รอบต่อนาที

- ระยะห่างที่ 10 เซนติเมตร, ระยะเวลาที่ 10 นาที และ ความเร็วรอบเป็น 15 รอบต่อ

ไม่สามารถตรวจวัดสัญญาณทางไฟฟ้าได้ เนื่องจากที่เงื่อนไขระยะห่าง 8 เซนติเมตร และ 10 เซนติเมตร ฟิล์มที่ได้นั้นมีความหนาที่น้อยมาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] กษิตศ จันท์แสงศรี, กระบวนการปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิตแบบขั้วไฟฟ้าอิสระจากวัสดุพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์-แบเรียมไททาเนทสำหรับการประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก, วิทยานิพนธ์ หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2561.
- [2] Bin Ding, Moran Wang, Xianfeng Wang, Jianyong Yu and Gang Sun, Electrospun nanomaterials for ultrasensitive sensors, *Materialtoday*, vol. 13, pp. 16-17, 2010.
- [3] Kurečić M., Sfiligoj Smole M. (2013). Electrospinning: Nanofibre Production Method. *Tekstilec*, Vol. 56, No. 1, p.4–12.
- [4] อรรธรณ สุวรรณทอง, กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตสำหรับประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ *Electrospinning for Biomedical Applications*, วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ฉบับที่ 4, 2543.
- [5] H. T. Zhuo, J. L. Hu and S. J. Chen, Coaxial electrospun polyurethane core-shell Nanofibers for shape memory and antibacterial nanomaterials, *eXPRESS Polymer Letters*, vol. 5, pp. 182-187, 2011.
- [6] Behrouz Ghorani and Nick Tucker, Fundamentals of electrospinning as a novel delivery vehicle for bioactive compounds in food nanotechnology, *Food Hydrocolloids*, vol. 51, pp. 227-240, 2015.
- [7] พรชัญญา ทิพย์ดี วงตา, จักรพันธ์ ธีศิริธัญญ์ ญาณลักษณ์, ความรู้เบื้องต้นและการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตในด้านเภสัชกรรมและเครื่องสำอาง, วิทยานิพนธ์ หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2560
- [8] <https://www.researchgate.net> [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.researchgate.net/figure/Representation-of-PVDF>. 9 สิงหาคม 2561
- [9] V.Seminara, v. M. Moreira, S. Lanceros-Mende'z, A. S. Pouzada and R. Grego'rio Jr., al]ha - to - beta Transformation on PVDF Films Obtained by uniaxial Stretch, 2002.
- [10] Tim R. Dargaville, Mathias C.Celina, Julie M. Elliott, Pavel M. Chaplya, Gary D. Jones, Daniel M. Mowery, Roger A. Assink, Roger L. Clough and Jeffrey W. Martin, characterization, Performance and Optimization of PVDF as a Piezoelectric Film for Advanced Space Mirror Concepts, SANDIA REPORT, 2005

- [11] “ชนิดของวัสดุผสม” [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://slideplayer.in.th/slide/2966339/>
20 สิงหาคม 2561
- [12] Keith M. Forward and Gregory C. Rutledge, Free Surface Electrospinning from a Wire Electrode, *Chemical Engineering Journal*, vol. 183, pp. 492-503, 2012.
- [13] David Lukas, Arindam Sarkar and Pavel Pokorny, Self-organization of jets in electrospinning from free liquid surface: A generalized approach, *Journal of Applied Physics*, vol. 103, 2008.
- [14] Hongliang Jiang, Liqun Wang and Kangjie Zhu. Coaxial electrospinning for encapsulation and controlled release of fragile water-soluble bioactive agents, vol. 193, pp. 296-303, 2014.
- [15] Yasmin Srivastava, Ignacio Loscertales, Manuel Marquez and Todd Thorsen, Electrospinning of hollow and core/sheath nanofibers using a microfluidic manifold, *Microfluid Nanofluid*, 2007.
- [16] Keith M. Forward, Alexander Flores, Gregory C. Rutledge, Production of core/shell fibers by electrospinning from a free surface, *Chemical Engineering Science*, vol. 104, pp. 250-259, 2013.
- [17] “วิวัฒนาการของSEM” [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://elec.chandra.ac.th/courses/ELEC2101/termwork/sem//pong/3.html>. 20 สิงหาคม 2561
- [18] <https://www.dfrobot.com>. [ออนไลน์] <https://www.dfrobot.com/category-35.html>
- [19] “high voltage power supply” [ออนไลน์], แหล่งที่มา: http://www.analogtechnologies.com/high_voltage_power_supply. 30 กันยายน 2561
- [20] Bhoopesh Mahale, Dhananjay Bodas and S A GANGAL, Study of β -phase development in spin-coated PVDF thick films, *Bull. Mater. Sci.*, Vol. 40, pp. 569–575, 2017
- [21] Xiaomei Cai, Tingping Lei, Daoheng Sun and Liwei Lin, A critical analysis of the α , β and γ phases in poly(vinylidene fluoride) using FTIR, *RSC Advances*, pp. 14959 - 15624, 2017
- [22] “Piezoelectric Transducers” [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://navapadol.files.wordpress.com/2016/01/chapter-02-02.pdf>. 25 ตุลาคม 2561
- [23] “วัสดุเพียโซอิเล็กทริก” [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.dss.go.th/images/st-article/ct-10-2555-pieso.pdf> 23 ธันวาคม 2561
- [24] วราภรณ์ อนุชิตโอฬาร, *Materials characterization*, ตุลาคม-ธันวาคม, หน้า 67-70, 2546.

- [25] “Michelson Interferometer scheme” [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Michelson_Interferometer_scheme.png 11 กุมภาพันธ์ 2562
- [27] <https://www.beartai.com>. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.beartai.com/news/it-thai-news/84926> 23 ธันวาคม 2561
- [28] <http://www.perkinelmer.com>. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.perkinelmer.com/product/spectrum-two-ft-ir-sp10-software-l160000a> 15 เมษายน 2562
- [29] <https://www.selectscience.net>. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.selectscience.net/products/zeiss-evo-18-sem/?prodID=195418> 15 เมษายน 2562
- [30] วิทยาพันธ์ ไผจันทร์, การศึกษาและสร้างระบบการพ่นเคลือบฟิล์มบางด้วยไฟฟ้าสถิตสำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้านาโน, โครงการพิเศษ หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2560.
- [31] Betz N, Le Moel A, Balanzat E, Ramillon J.M., Lamotte J, Gallas, J.P, Jaskierowicz G, A FTIR Study of PVDF Irradiated by Means of Swift Heavy Ions, J. PolymSci, Part B: Polym. Phys, vol32, pp1493–1502, 1994
- [32] Nakagawa K, Ishida Y.J, Annealing Effects in Polyvinylidene Fluoride as Revealed by Specific Volume Measurements, Differential Scanning Calorimetry and Electron Microscopy, PolymSci, Polym. Phys. Ed, pp2153, 1973
- [33] Silverstein R.M., Webster F.X., Spectrometric Identification of Organic Compounds John Wiley and Sons, 1998.
- [34] Chi Chen G, Su J, FTIR-ATR Studies of Drawing and Poling in Polymer Bilaminate Films, SciPolym, vol32, pp2065–2075, 1994,
- [35] BhartiV, Kaura, T, Nath R, Ferroelectric Hysteresis in Simultaneously Stretched and Corona-Poled PVDF Films Dielectrics Elec, pp738–741, 1997
- [36] Mattsson B, Ericson H, Torell L.M, Sundholm F, Micro-Raman Investigations of PVDF-Based Proton-Conducting Membranes, PolymSci Part A: Polym Chem, vol 37, pp3317-3327, 1999
- [37] Hilczer B, Kulek J, The Effect of Dielectric Heterogeneity on Pyroelectric Response of PVDF, IEEE Trans Dielectrics Elec, pp 45–50, 1998
- [38] <http://asystechology.com>. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://asystechology.com/product.html#b>

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล นางสาวอาทิตยา ไหมทอง
วัน เดือน ปีเกิด อาทิตย์ที่ 1 กันยายน พ.ศ.2539
ที่อยู่ปัจจุบัน 35 หมู่ 8 ต.บ้านนา อ.บ้านนา จ.นครนายก 26110
ประวัติการศึกษา จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนนครนายกวิทยาคม
จบระดับอุดมศึกษาปริญญาตรีจากสถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้