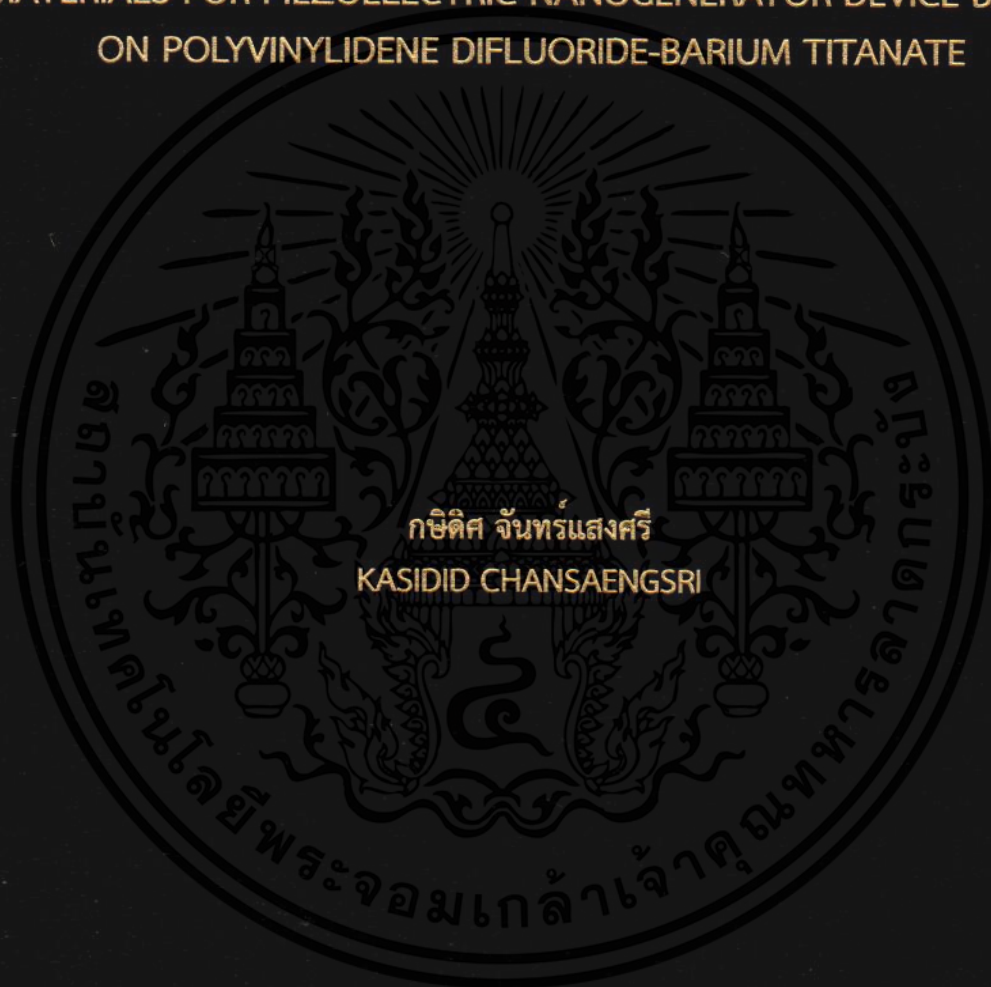


กระบวนการปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิตแบบผิวไฟฟ้าอิสระจาก
วัสดุพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์-แบเรียมไททาเนทสำหรับการประดิษฐ์เป็น
อุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก

FREE SURFACE ELECTROSPINNING PROCESS OF NANOFIBER
MATERIALS FOR PIEZOELECTRIC NANOGENERATOR DEVICE BASED
ON POLYVINYLIDENE DIFLUORIDE-BARIUM TITANATE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2018-NT-M-001-002

กระบวนการปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิตแบบหัวไฟฟ้าอิสระจาก
วัสดุพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์-แบเรียมไททาเนตสำหรับการประดิษฐ์เป็น
อุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก

FREE SURFACE ELECTROSPINNING PROCESS OF NANOFIBER
MATERIALS FOR PIEZOELECTRIC NANOGENERATOR DEVICE BASED
ON POLYVINYLIDENE DIFLUORIDE-BARIUM TITANATE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
พ.ศ. 2561

KMITL-2018-NT-M-001-002

FREE SURFACE ELECTROSPINNING PROCESS OF NANOFIBER
MATERIALS FOR PIEZOELECTRIC NANOGENERATOR DEVICE BASED
ON POLYVINYLIDENE DIFLUORIDE-BARIUM TITANATE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN NANOSCIENCE AND NANOTECHNOLOGY
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG อนุญาตให้ใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และตั้ง 2018 ถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2018-NT-M-001-002



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
COPYRIGHT 2018
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	กระบวนการปั่นเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิตแบบขั้วไฟฟ้า อิสระจากวัสดุพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์-แบเรียมไท ทาเนทสำหรับการประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์กำเนิดพลังงาน ไฟฟ้าขนาดเล็ก
นักศึกษา	นายกษิตศ จันท์แสงศรี
รหัสประจำตัว	58607011
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา	นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. ทูติยาภรณ์ ทิวาวงศ์

บทคัดย่อ

ภายใต้เนื้อหางานวิจัยการขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์ระดับไมโครและนาโนโดยระบบผลิตเส้นใย
ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าสถิตจากขั้วไฟฟ้าผิวเปิด เพื่อประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้า
ขนาดเล็กนี้ ได้ศึกษาเกี่ยวกับ การขึ้นรูปวัสดุเส้นใยพอลิเมอร์จากกระบวนการทางไฟฟ้าสถิตหรือที่
เรียกว่า อิเล็กโทรสปิน จากผิวขั้วที่มีลักษณะเปิดและสารเกาะอยู่บนผิวขั้วอย่างอิสระ และนำไป
ประยุกต์เพื่อใช้ในการปลูกสร้างอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก ในงานวิจัยนี้ใช้พอลิไวนิลิดีน
ฟลูออไรด์ในการขึ้นรูปเส้นใยระดับนาโน ภายใต้เงื่อนไขการทดลองแตกต่างกันไป เช่น วัสดุ
ฐานรองรับต่างกัน ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ตั้งต้นต่างกัน ปริมาณสนามไฟฟ้า ขนาดของ
ขั้วไฟฟ้าบวก และความเร็วในการหมุนเปลี่ยนขั้วไฟฟ้า วัสดุเส้นใยที่ได้ขึ้นรูปแล้วนั้น ได้ถูกนำมาใน
การประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก จากนั้นได้ทำการตรวจสอบคุณสมบัติ ทาง
โครงสร้างผลึก โครงสร้างทางเคมี และสัณฐานวิทยา ของวัสดุโดย การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนตามลำดับ เมื่อทำการทดสอบทางด้าน
วัสดุแล้ว จึงทำการทดสอบลักษณะสัญญาณทางไฟฟ้าเมื่อถูกกระตุ้นจากแรงภายนอก ระบบการปลูก
สร้างเส้นใยพอลิเมอร์โดยใช้กระบวนการทางไฟฟ้าสถิตจากขั้วไฟฟ้าผิวเปิดนั้นสามารถขึ้นรูปเส้นใย
ระดับไมโครและนาโนได้เป็นอย่างดี และสามารถปลูกสร้างเป็นอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก
ที่ใช้วัสดุพอลิเมอร์พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ได้

คำสำคัญ : การปลูกสร้างเส้นใยพอลิเมอร์โดยใช้กระบวนการทางไฟฟ้าสถิตจากขั้วไฟฟ้าผิวเปิด, พอลิ
ไวนิลิดีนฟลูออไรด์, อุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Free Surface Electrospinning Process of Nanofiber Materials for Piezoelectric Nanogenerator Device Based on Polyvinylidene Difluoride-Barium Titanate
Student	Mr. Kasidid Chansaengsri
Student ID	58607011
Degree	Master of Science
Program	Nanoscience and Nanotechnology
Year	2018
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Thutiyaporn Thiwawong

ABSTRACT

In this research, production of micro and nano fibrous materials using free surface electrospinning for nanogenerator device fabrication is about a study of polymer nanofiber forming by electrostatic process for manufacturing nanogenerator. Polyvinylidene difluoride (PVDF) were used as standard polymer in this research. PVDF nanofiber were prepared in various condition thus types of substrate, concentration of PVDF solution, electrostatic field, size of electrode and speed of changing electrode side. Then, nanogenerators from the process were prepared for electronic testing. The crystal structures, phases, chemical structures and surface morphology of nano fibrous have been investigated by X-Ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and scanning electron microscope (SEM). Finally, electrical characteristic was identified during apply external force type bending. Free surface electrospinning system can produce polymer nanofiber and it can apply to fabricate nanogenerator devices from piezoelectric polymer micro/nano fibrous such as PVDF.

Keywords: Free surface electrospinning, Polyvinylidene difluoride, Nanogenerator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ทศติยาภรณ์ ทิวาวงศ์ ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทั้งทางด้านทฤษฎี และทางปฏิบัติ พร้อมทั้งให้คำแนะนำในการแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในงานวิจัยข้าพเจ้าจึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้และ ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.เบญจพล ต้นฐู ที่คอยช่วยเหลือในทุกๆ เรื่อง และคอยให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำที่ดีที่สุดแก่ข้าพเจ้า ในการทำงานวิจัยและทุกสถานการณ์ที่เกิดขึ้น ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา และ ขอขอบคุณ พี่น้อง เพื่อน ในวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังทุกท่านที่มีสุข ทุกข์ ร่วมเสพกันตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

สุดท้ายขอขอบพระคุณ ศ.ดร.จิติ หนูแก้ว อาจารย์ที่มีส่วนร่วมทุกท่าน และเพื่อนสมาชิกค่ายจิตอาสาทุกคน ที่ได้วางรากฐานกิจกรรมดีๆ ในการตอบสนองสังคมไทย ที่ซึ่งยังมีผู้ยากไร้ และด้อยโอกาสอยู่ ข้าพเจ้าก็ขอเป็นกำลังใจให้ทุกท่าน รวมทั้งตัวข้าพเจ้าเอง ให้สู้บทอดกิจกรรมที่ดีเหล่านี้ ควบคู่ไปกับการงานวิจัย และควบคู่ไปกับชีวิตจิตอาสาทุกท่านตลอดไป

กชิติศ จันท์แสงศรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.4 สมมติฐานงานวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	4
2.1 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก.....	4
2.1.1 ประวัติการค้นพบปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก.....	4
2.1.2 ทฤษฎีเพียโซอิเล็กทริกพื้นฐาน.....	5
2.1.3 การแบ่งกลุ่มผลึกตามระบบสมมาตร.....	6
2.1.4 โพลาริเซชันในวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก.....	8
2.1.5 สมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก.....	10
2.1.6 พารามิเตอร์ที่สำคัญในทฤษฎีเพียโซอิเล็กทริก.....	13
2.1.7 ตัวอย่างวัสดุเพียโซอิเล็กทริก.....	17
2.2 พอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ (Polyvinylidene difluoride)	21
2.2.1 สมบัติของพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์.....	21
2.2.2 กระบวนการขึ้นรูปใช้งานพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์.....	23
2.3 ระบบการขึ้นรูปเส้นใยนาโนโดยใช้เทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	24
2.3.1 เส้นใยนาโนและวิธีการขึ้นรูปทั่วไป.....	24
2.3.2 หลักการของเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	25
2.3.3 ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเกิดเส้นใยในการขึ้นรูป.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเนื้อหาไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.3.3.1 ความเข้มข้นของโพลิเมอร์.....	28
2.3.3.2 แรงดันไฟฟ้า.....	30
2.3.3.3 อัตราการไหลของสารละลาย และระยะห่างระหว่างปลายหัวฉีด กับแผ่นเก็บเส้นใย.....	31
2.3.3.4 ปัจจัยอื่นๆ	31
2.3.4 การพัฒนากระบวนการขึ้นรูปเส้นใยโดยวิธีปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	31
2.3.4.1 ระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน (Coaxial - electrospinning).....	32
2.3.4.2 ระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบหลอมละลาย (Melt- electrospinning).....	32
2.3.4.3 ระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตสนามใกล้ (Near-filed electrospinning)	33
2.4 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้นาโนเจนเนอเรเตอร์เพียโซอิเล็กทริก.....	34
2.4.1 ตัวรับสัญญาณของเครื่องอัลตราซาวด์.....	35
2.4.2 หน้าจอสัมผัสแบบรับคลื่นเสียงที่ผิวของหน้าจอ.....	35
2.4.3 มิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบเพียโซอิเล็กทริก.....	36
2.5 เทคนิคการตรวจวิเคราะห์.....	37
2.5.1 การตรวจวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	37
2.5.2 การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	39
2.5.3 การตรวจวิเคราะห์ห้องค์ประกอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	42
3.1 การออกแบบระบบขึ้นรูปเส้นใยโดยเทคนิคปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระ.....	43
3.1.1 ขั้นตอนการออกแบบระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระ.....	43
3.1.1.1 การร่างแบบระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระ.....	43
3.1.1.2 การจำลองระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระและงานต้น แบบ.....	43
3.1.1.3 อุปกรณ์ที่สำคัญของระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระ.....	44
3.2 การเตรียมแผ่นฐานรองรับ.....	45

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.2.1	ฐานรองรับประเภทกระจกและแผ่นอลูมิเนียม.....	45
3.2.2	ฐานรองรับประเภทแผ่นพลาสติกโพลีไวนิลคลอไรด์.....	45
3.2.3	ฐานรองรับประเภทแผ่นกระดาษ.....	45
3.3	การเตรียมเส้นใยโดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากฝิวลวดอิสระ.....	46
3.3.1	เงื่อนไขความเข้มข้นของสารละลายพอลิไวนิลลิทีนไดฟลูออไรด์.....	46
3.3.2	เงื่อนไขสนามไฟฟ้าโดยการปรับระยะระหว่างฐานรองรับกับขั้วไฟฟ้า.....	46
3.3.3	เงื่อนไขความเร็วในการหมุนขั้วไฟฟ้าในการใช้ขึ้นรูปเส้นใย.....	46
3.3.4	เงื่อนไขระยะเวลาในการขึ้นรูป.....	47
3.3.5	เงื่อนไขฐานรองรับหลากหลายชนิด.....	47
3.3.6	เงื่อนไขขนาดของเส้นลวดบนขั้วที่ใช้ปลูก.....	47
3.4	การเตรียมอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจาก ฝิวลวดอิสระ.....	47
3.4.1	อุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กพอลิไวนิลลิทีนไดฟลูออไรด์.....	48
3.4.2	อุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก จากวัสดุประกอบพอลิไวนิล ลิทีนไดฟลูออไรด์/อนุภาคนาโนแบเรียมไททานเต.....	49
3.5	การตรวจสอบสมบัติของฟิล์ม.....	49
3.5.1	การตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์.....	49
3.5.2	การตรวจสอบองค์ประกอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี.....	49
3.5.3	การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อน กราด.....	50
3.5.4	การตรวจสอบทางไฟฟ้า ของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก.....	51
บทที่ 4	ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	52
4.1	ผลการวิเคราะห์ค่าที่สำคัญในการประกอบระบบขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์โดยการปั่น ด้วยไฟฟ้าสถิตจากฝิวลวดอิสระ.....	52
4.1.1	ผลการวิเคราะห์ลักษณะศักย์ไฟฟ้าระหว่างฝิวลวดโลหะกับฐานรองรับ.....	52
4.1.2	ผลการวิเคราะห์ปริมาณศักย์ไฟฟ้าระหว่างฝิวลวดโลหะกับฐานรองรับ.....	53
4.1.3	ผลการวิเคราะห์ปริมาณศักย์ไฟฟ้าระหว่างฝิวลวดโลหะกับฐานรองรับ ขณะหมุนขั้วไฟฟ้าบวก.....	54

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.2 แบบร่างขึ้นงานต้นแบบและต้นแบบระบบขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์โดยการปั่นด้วยไฟฟ้า สถิติจากผิวลวดอิสระ.....	55
4.3 ผลการตรวจวิเคราะห์ขึ้นงานทดสอบการขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์โดยการปั่นด้วยไฟฟ้า สถิติจากผิวลวดอิสระ.....	57
4.3.1 เงื่อนไขความเข้มข้นของสารละลายพอลิไวนิลลิตินไดฟลูออไรด์.....	57
4.3.2 เงื่อนไขสนามไฟฟ้าโดยการปรับระยะระหว่างฐานรองรับกับหัวไฟฟ้า.....	58
4.3.3 เงื่อนไขความเร็วในการหมุนหัวไฟฟ้าในการใช้ขึ้นรูปเส้นใย.....	61
4.3.4 เงื่อนไขระยะเวลาในการขึ้นรูป.....	62
4.3.5 เงื่อนไขฐานรองรับหลากหลายชนิด.....	66
4.3.6 เงื่อนไขขนาดของเส้นลวดบนหัวที่ใช้ปลูก.....	67
4.4 ผลการวัดทางไฟฟ้าของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก.....	69
4.4.1 อุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก พอลิไวนิลลิตินฟลูออไรด์จากเงื่อนไข สนามไฟฟ้าโดยการปรับระยะระหว่างฐานรองรับกับหัวไฟฟ้า.....	69
4.4.2 อุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก จากวัสดุประกอบพอลิไวนิลลิติน ฟลูออไรด์/อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต.....	79
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	89
เอกสารอ้างอิง.....	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ตารางแสดงข้อมูลของต้นแบบระบบขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์.....	57
4.2 ตารางแสดงข้อมูลของเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ที่ขึ้นรูปจากสารละลายที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน.....	58
4.3 ตารางแสดงข้อมูลของเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ที่ขึ้นรูปจากการปรับระยะห่างจากหัวไฟฟ้าลบบแตกต่างกัน.....	60
4.4 ตารางแสดงข้อมูลของเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ที่ขึ้นรูปจากการปรับความเร็วในการหมุนหัวไฟฟ้าลบบแตกต่างกัน.....	62
4.5 ตารางแสดงข้อมูลของเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ที่ขึ้นรูปด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน.....	65
4.6 ตารางแสดงข้อมูลของเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ที่ขึ้นรูปจากวัสดุแตกต่างกัน.....	67
4.7 ตารางแสดงข้อมูลของเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ที่ขึ้นรูปจากหัวขนาดต่างกัน.....	68
4.8 ตารางแสดงข้อมูลของเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์บนอุปกรณ์กำเนิด สัญญาณไฟฟ้าขนาดเล็กในเงื่อนไขระยะห่างจากหัวไฟฟ้าถึงฐานรองรับต่างกัน.....	70
4.9 ค่าทางไฟฟ้าที่สำคัญของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กพอลิไวนิลิดีน ไดฟลูออไรด์จากเงื่อนไขสนามไฟฟ้าโดยการปรับระยะระหว่างฐานรองรับกับหัวไฟฟ้า.....	78
4.10 ตารางแสดงข้อมูลของเส้นใยวัสดุประกอบพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์/อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตบนอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณไฟฟ้าขนาดเล็กในเงื่อนไขสัดส่วนโดยมวลต่างกัน.....	80
4.11 ค่าทางไฟฟ้าที่สำคัญของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กของวัสดุประกอบเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์/อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต.....	87
5.1 สรุปค่าทางไฟฟ้าที่สำคัญในอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก.....	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ปรัชญาการเพียโซอิเล็กทริก.....	4
2.2 การเปลี่ยนรูปเชิงกลในวัสดุเพียโซอิเล็กทริก.....	5
2.3 การจัดกลุ่มผลึกตามระบบสมมาตร.....	7
2.4 การเกิดขั้วประจุไฟฟ้า.....	8
2.5 การเกิดโพลาริเซชัน.....	9
2.6 การเหนี่ยวนำขั้วในวัสดุเพียโซอิเล็กทริก.....	10
2.7 สนามไฟฟ้า electric dipole ในวัสดุเพียโซอิเล็กทริก.....	11
2.8 thickness effect ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก.....	11
2.9 การกระทำที่มีผลต่อแรงทางไฟฟ้าภายในวัสดุด้วยการกด.....	12
2.10 การกระทำที่มีผลต่อแรงทางไฟฟ้าภายในวัสดุด้วยการดึง.....	12
2.11 ฮีสเทอรีซิสของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก.....	13
2.12 ระบายและแกนโพลาริเซชันในวัสดุเพียโซอิเล็กทริก.....	14
2.13 ความเครียดเฉือนในวัสดุเพียโซอิเล็กทริก.....	15
2.14 โครงสร้างแบบ perovskite ของ $BaTiO_3$	17
2.15 โครงสร้างของ $PbTiO_3$ และ $PbZrO_3$	18
2.16 แผนผังวัฏภาคของ $Pb(Ti_{1-x}Zr_x)O_3$	19
2.17 โครงสร้างของ $K_{5.7}W_{10}O_{30}$	20
2.18 โพลีไวนิลลิธินไดฟลูออไรด์ และรูปแบบที่ใช้ในอุตสาหกรรม.....	21
2.19 โครงสร้างของโพลีไวนิลลิธินไดฟลูออไรด์.....	22
2.20 connectivity ของวัสดุประกอบ.....	23
2.21 รูปร่างของกรวยเทลเลอร์.....	26
2.22 ระบบการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต.....	26
2.23 ลักษณะของการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต.....	27
2.24 หลักการเกิด Polymer jet.....	28
2.25 กราฟการหาความเข้มข้นของสารละลาย.....	29
2.26 ระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบรวมแกน.....	32
2.27 ระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบหลอมละลาย.....	33
2.28 ระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตสนามใกล้.....	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามมิให้ผู้ใดทำซ้ำหรือดัดแปลงโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.29 รายละเอียดตัวรับสัญญาณของเครื่องอัลตราซาวด์.....	35
2.30 การทำงานของหน้าจอสัมผัสแบบปรับคลื่นเสียงที่ผิวของหน้าจอ.....	36
2.31 ระบบวัดอัตราเร่งแบบเพียโซอิเล็กทริก.....	36
2.32 ระบบตรวจวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	38
2.33 หลักการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	39
2.34 ระบบอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์.....	41
3.1 แผนผังการทดลองในงานวิจัยนี้.....	42
3.2 โปรแกรม SolidWorks 2013.....	43
3.3 โปรแกรม Ansoft MAXWELL 3D.....	44
3.4 ระบบพิมพ์ 3 มิติ และโปรแกรมการส่งพิมพ์ชิ้นงาน.....	44
3.5 โครงสร้างอุปกรณ์ให้กำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก.....	47
3.6 ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์ให้กำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก.....	48
3.7 เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ Rikgaku รุ่น SmartLab.....	49
3.8 ระบบอินฟราเรดสเปกโทรสโคปีแบบฟูเรียร์ PerkinElmer รุ่น UATR Two.....	50
3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเรื้อนกราด Zeiss รุ่น EVO.....	50
3.10 ระบบวัดสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก.....	51
3.11 Data acquisition NI6003 และตัวอย่างอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก.....	51
4.1 ผลการคำนวณผิวดัชนีไฟฟ้าบริเวณห้องขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์.....	52
4.2 ผลการคำนวณดัชนีไฟฟ้าขณะเลื่อนตำแหน่งหัวไฟฟ้าบวก.....	53
4.3 ผลการคำนวณความสัมพันธ์ของค่าดัชนีไฟฟ้ากับมุมการหมุนของหัวไฟฟ้าบวก.....	54
4.4 แบบร่างองค์ประกอบสำคัญระบบขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์โดยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต จากผิวลวดอิสระ.....	55
4.5 แบบร่างภายในระบบขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์โดยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระ.....	56
4.6 รูปถ่ายภายนอกของระบบขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์โดยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระ...	56
4.7 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยพอลิไวไนลิตินไคฟลูออไรด์ ที่ขึ้นรูปจากสารละลายที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน.....	57
4.8 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยพอลิไวไนลิตินไคฟลูออไรด์ ที่ถูกรับขึ้นรูปห่างจากหัวไฟฟ้าลบแตกต่างกัน.....	59

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ลักษณะเส้นใยขณะถูกฉีกจากกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	60
4.10 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยพอลิไวนิลลิดีน ไดฟลูออไรด์ที่ถูกขึ้นรูปด้วยความเร็วการหมุนของหัวไฟฟ้าแตกต่างกัน.....	61
4.11 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยพอลิไวนิลลิดีน ไดฟลูออไรด์ที่ถูกขึ้นรูป เป็นระยะเวลาแตกต่างกัน.....	63
4.12 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยพอลิไวนิลลิดีน ไดฟลูออไรด์ที่ถูกขึ้นรูปเป็นระยะเวลาแตกต่างกัน.....	64
4.13 ได้ผลการคำนวณหาอัตราการจัดรูปจากความหนาและเวลาในการขึ้นรูป.....	65
4.14 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยพอลิไวนิลลิดีน ไดฟลูออไรด์บนวัสดุแตกต่างกัน.....	66
4.15 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยพอลิไวนิลลิดีน ไดฟลูออไรด์บนกระดาษจากลวดขนาดแตกต่างกัน.....	68
4.16 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไดฟลูออไรด์ บนอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กในเงื่อนไขระยะห่างจากหัวไฟฟ้า ถึงฐานรองรับ 7-10 เซนติเมตร.....	69
4.17 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไดฟลูออไรด์บนอุปกรณ์กำเนิด พลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กในเงื่อนไขระยะห่างจากหัวไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 7-10 เซนติเมตร.....	70
4.18 การทะลุผ่านของรังสีอินฟราเรดของเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไดฟลูออไรด์บนอุปกรณ์ กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กในเงื่อนไขระยะห่างจากหัวไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 7-10 เซนติเมตร.....	71
4.19 ความสัมพันธ์ค่าความต่างศักย์กับเวลา บนความถี่ต่างๆในเงื่อนไขระยะห่างจากหัวไฟฟ้า ถึงฐานรองรับ 7-10 เซนติเมตร.....	72-74
4.20 ความสัมพันธ์ค่าความต่างศักย์บนความถี่ต่างๆ ในเงื่อนไขระยะห่างจากหัวไฟฟ้าถึงฐาน รองรับต่างๆกัน.....	74
4.21 ความสัมพันธ์ค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลา บนความถี่ต่างๆในเงื่อนไขระยะห่างจากหัวไฟฟ้า ถึงฐานรองรับ 7-10 เซนติเมตร.....	75-76
4.22 ความสัมพันธ์ค่ากระแสไฟฟ้าบนความถี่ต่างๆ ในเงื่อนไขระยะห่างจากหัวไฟฟ้าถึงฐาน รองรับต่างๆกัน.....	77

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 ความสัมพันธ์ค่าความต่างศักย์ขณะลัดวงจรกับเวลาในเงื่อนไขระยะห่างจากขั้วไฟฟ้า ถึงฐานรองรับ 7-10 เซนติเมตร.....	77
4.24 ความสัมพันธ์ค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในเงื่อนไขระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 7-10 เซนติเมตร.....	78
4.25 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของวัสดุประกอบเส้นใยพอลิ ไวนิลลิทีนไคฟลูออไรด์/อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตบนอุปกรณ์กำเนิดพลังงาน ไฟฟ้าขนาดเล็กในเงื่อนไขสัดส่วนโดยมวลแตกต่างกัน.....	79
4.26 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากวัสดุประกอบเส้นใยพอลิไวนิลลิทีนไคฟลูออไรด์/ อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตบนอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กใน เงื่อนไขสัดส่วนโดยมวลต่างๆ เปรียบเทียบกับวัสดุเมทริกซ์.....	80
4.27 การทะลุผ่านของรังสีอินฟราเรดของวัสดุประกอบเส้นใยโพลีไวนิลลิทีนไคฟลูออไรด์/ อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตบนอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กในเงื่อนไข สัดส่วนโดยมวลต่างๆ เปรียบเทียบกับวัสดุเมทริกซ์.....	81
4.28 ความสัมพันธ์ค่าความต่างศักย์ขณะลัดวงจรกับเวลา บนความถี่ต่างๆ ในเงื่อนไข สัดส่วนโดยมวลแตกต่างกัน.....	82-83
4.29 ความสัมพันธ์ค่าความต่างศักย์บนความถี่ต่างๆ ในเงื่อนไขสัดส่วนโดยมวล ต่างๆกัน.....	84
4.30 ความสัมพันธ์ค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลา บนความถี่ต่างๆ ในเงื่อนไขสัดส่วนโดยมวล แตกต่างกัน.....	84-85
4.31 ความสัมพันธ์ค่ากระแสไฟฟ้าบนความถี่ต่างๆ ในเงื่อนไขสัดส่วนโดยมวล ต่างๆกัน.....	86
4.26 ความสัมพันธ์ค่าความต่างศักย์ขณะลัดวงจรกับเวลาในเงื่อนไขสัดส่วนโดยมวลของ วัสดุประกอบเส้นใยพอลิไวนิลลิทีนไคฟลูออไรด์/อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต.....	86
4.27 ความสัมพันธ์ค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในเงื่อนไขสัดส่วนโดยมวลของวัสดุประกอบ เส้นใยพอลิไวนิลลิทีนไคฟลูออไรด์/อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต.....	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันวัสดุเพียโซอิเล็กทริกถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางโดยผู้ใช้อาจไม่ทราบว่าอุปกรณ์เหล่านั้น มีวัสดุเพียโซอิเล็กทริกอยู่ เช่น หัวฉีดน้ำมันในรถยนต์ รถจักรยานยนต์ ระบบการควบคุมถุงลมนิรภัย (air bag) ระบบเบรค ระบบป้องกันขโมย หัวฉีดหมึกพิมพ์ กล้องดิจิตอล การใช้ประโยชน์จากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในการทำความสะอาด เช่น อุปกรณ์ล้างเครื่องมือแพทย์ ล้างผัก เครื่องล้างอัญมณี[1] เนื่องจากเมื่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกได้รับกระแสไฟฟ้าสลับที่มีความถี่สูง เช่น 60 KHz จะเกิดการยืดหดตัวของวัสดุตามความถี่ที่ได้รับและส่งผ่านคลื่นความถี่ไปยังน้ำ ทำให้สิ่งสกปรกหลุดออกจากเครื่องมือ ผัก หรืออัญมณีโดยไม่ทำให้อุปกรณ์เสียหาย หลักการเดียวกันนี้ยังถูกนำไปใช้ในเครื่องนวด ทำให้กล้ามเนื้อถูกกระตุ้นด้วยคลื่นไฟฟ้าระดับอัลตราซาวด์ เมื่อกล้ามเนื้อ ถูกกระตุ้นเป็นจังหวะทำให้ระบบเลือดไหลเวียนได้ดีขึ้น[2]

ด้านพลังงาน วัสดุเพียโซอิเล็กทริกยังถูกนำไปวิจัยเพื่อการเก็บกักพลังงาน คล้ายการทำงานของแบตเตอรี่ นักวิจัยจากมหาวิทยาลัย Massachusetts Institute of Technology (MIT) ประเทศสหรัฐอเมริกา นำเสนอแนวคิดการใส่วัสดุเพียโซอิเล็กทริกลงในสนรองเท้า เนื่องจากวันหนึ่งๆคนเราใช้เวลาทำกิจกรรมการเดินมาก ทำให้เสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์ การนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกใส่ลงในรองเท้า ทุกๆครั้งที่เราก้าวเดิน เหมือนหนึ่งเราใส่พลังงานกลงในวัสดุแล้วเก็บพลังงานไว้แปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ สามารถนำไปใช้กับเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์บางชนิดที่ไม่ต้องการกำลังไฟมากนัก เช่น เพจเจอร์ เครื่องวัดสัญญาณทางการแพทย์แบบติดตามตัว (Health Monitor) เครื่องเล่นเพลง (MP3) หรือแม้กระทั่งโทรศัพท์มือถือ[1,2]

เทคโนโลยีวัสดุเพียโซอิเล็กทริกยังคงพัฒนาต่อไป โดยเฉพาะการสังเคราะห์วัสดุที่ไม่มีตะกั่วเจือปนไปจนถึงการนำองค์ความรู้ไปประยุกต์ใช้กับเครื่องมือต่างๆในทางการแพทย์และการอนุรักษ์พลังงาน เช่น การผ่าตัด การนำอินซูลินเข้ากระแสเลือดเพื่อรักษาผู้ป่วยเบาหวาน การเจาะไขเพื่อการผสมเทียม การวัดอัตราการไหลของเลือด การผ่าตัดสมอง การเก็บกักพลังงานในอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์[3]

เทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต (electrospinning) เป็นเทคนิคหนึ่งที่มีความสนใจอย่างยิ่งในการผลิตเส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กตั้งแต่ ระดับไมโครเมตรถึงนาโน โดยหลักการ เทคนิคนี้อาศัยแรงทางไฟฟ้าที่เกิดจากศักย์ไฟฟ้าสูง ส่งผลให้สารละลายพอลิเมอร์ที่ปลายเข็มยืดออกเป็นรูปร่างทรงกรวยที่ เรียกว่า “กรวยของเทเลอร์” (Taylor’s cone) เมื่อสนามไฟฟ้าที่ให้มีค่ามากถึงค่า

วิกฤตค่าหนึ่ง ซึ่งมี ค่ามากกว่าแรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์ จะ เกิดแรงขับเคลื่อนให้สารละลายพอลิเมอร์ที่มีประจุนี้ พุ่งออกมาเป็นสาย ตกลงสู่แผ่นรองรับที่มีประจุตรงกันข้าม และ ในระหว่างการเคลื่อนที่ลงสู่แผ่น รองรับ เกิดการระเหยของตัวทำละลาย ทำให้ได้ เป็นเส้นใยขนาดเล็ก จากกลไกดังกล่าว สำหรับเส้นใยที่ผลิตด้วยเทคนิคเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต มีสมบัติที่เด่นชัดคือ

1) เส้นใยที่ได้มีขนาดเล็กมาก โดยทั่วไปมีขนาดตั้งแต่หลายสิบนานโนเมตรจนถึง ประมาณ 1-2 ไมโครเมตร จึงมักจะถูกเรียกว่า เส้นใยนาโน (nanofibers) หรือ เส้นใยนาโนอิเล็กโตรสปิน (Electrospun nanofibers)

2) โครงร่าง จากเส้นใยที่ได้มีอัตราส่วนระหว่างพื้นผิวต่อ ปริมาตรสูงมากกว่า 1,000 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยในระดับไมโครเมตร

3) โครงสร้างเส้นใยนาโนที่ได้ มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ทำให้มีการส่งผ่านของเหลวและแก๊สได้ดี จากสมบัติดังกล่าว ทำให้เส้นใยที่ขึ้นรูปด้วยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ได้รับความสนใจและถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

แม้ว่าการผลิตเส้นใยนาโนอิเล็กโตรสปินจะมี กระบวนการที่ไม่ยุ่งยากและซับซ้อนนัก เนื่องจากเครื่องปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตมีราคาสูง กำลังการผลิตไม่สูง ระบบหลายหัวเข็มทำให้บำรุงรักษายาก จึงเป็นข้อจำกัดที่ทำให้ระบบนี้ ไม่เป็นที่แพร่หลายในอุตสาหกรรม เป็นปัญหาในงานวิจัยนี้ที่ต้องปรับปรุงระบบเพื่อง่ายและเอื้อต่อการผลิตในเชิงอุตสาหกรรม[4]

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อสร้างระบบขึ้นรูปเส้นใยโดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบไม่ใช้เข็มเพื่อรองรับการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง มีกำลังผลิตที่สูงขึ้น ใช้งานง่าย มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำ และบำรุงรักษาง่าย เพื่อรองรับการใช้งานในเชิงอุตสาหกรรม

1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อลักษณะของเส้นใยพอลิเมอร์ที่ถูกขึ้นรูปโดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบขั้วไฟฟ้าผิวอิสระ และวิเคราะห์ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลในการควบคุมขนาดของเส้นใย

1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติทางโครงสร้าง เส้นใยพอลิไวนิลลิทินไดฟลูออไรด์ที่ถูกขึ้นรูปโดยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตนี้ในปัจจัยต่างๆ

1.2.4 เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้เส้นใยพอลิไวนิลลิทินไดฟลูออไรด์ที่ถูกขึ้นรูปโดยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตนี้เป็นอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 แผนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยเริ่มจากการค้นคว้าข้อมูลเบื้องต้นของทฤษฎีการขึ้นรูปเส้นใยโดยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ต่อมาได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตในแบบใช้เข็มและไม่ใช้เข็ม จากนั้นทำการออกแบบระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบผิวลวดอิสระขึ้น แล้วจัดทำชิ้นงานต้นแบบเพื่อใช้ในการทดลองขึ้นรูปเส้นใย ต่อมาเริ่มทำการเตรียมสารตั้งต้นที่ใช้ พร้อมกับศึกษาผลกระทบจากปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการขึ้นรูปเส้นใยนั้น เพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการขึ้นรูปเส้นใย จากนั้นนำเงื่อนไขดังกล่าวมาขึ้นรูปเส้นใยบนหัวไฟฟ้ากระตาศ เพื่อประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก และศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ต่อผลทางไฟฟ้า รวมถึงการนำสารอื่นมาขึ้นรูปพร้อมเป็นวัสดุประกอบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก

1.4 สมมติฐานงานวิจัย

เนื่องจากการศึกษาสมบัติของพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ และกระบวนการขึ้นรูปเส้นใยโดยใช้เทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตนั้น มีความเป็นไปได้ที่สามารถประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์กำเนิดพลังงานขนาดเล็กได้ เนื่องจากพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกซึ่งเป็นสมบัติที่สามารถใช้เปลี่ยนการเปลี่ยนรูปเชิงกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ประกอบกับการขึ้นรูปเส้นใยโดยใช้เทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความต่อเนื่องและมีความเป็นเส้นใยที่สมบูรณ์ได้

1.5 ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและออกแบบขึ้นรูปเส้นใยโดยใช้เทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระ จากนั้นทำการทดสอบขึ้นรูปเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ และปรับเปลี่ยนเงื่อนไขเชิงอุปกรณ์เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์ เพื่อปรับแก้ไขข้อผิดพลาดในการสร้างระบบ รวมถึงการศึกษาสมบัติทางพื้นผิว ของเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ ที่ใช้เทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระ และสมบัติอื่นๆที่เกี่ยวข้องในการพัฒนาไปเป็นอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กต่อไป

การศึกษาในงานวิจัยนี้ไม่รวมถึงการวิเคราะห์สมบัติเชิงเคมี และสมบัติเชิงลึกของพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ และไม่ได้เปรียบเทียบกับวิธีการขึ้นรูปเส้นใยโดยใช้เทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตในแบบอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

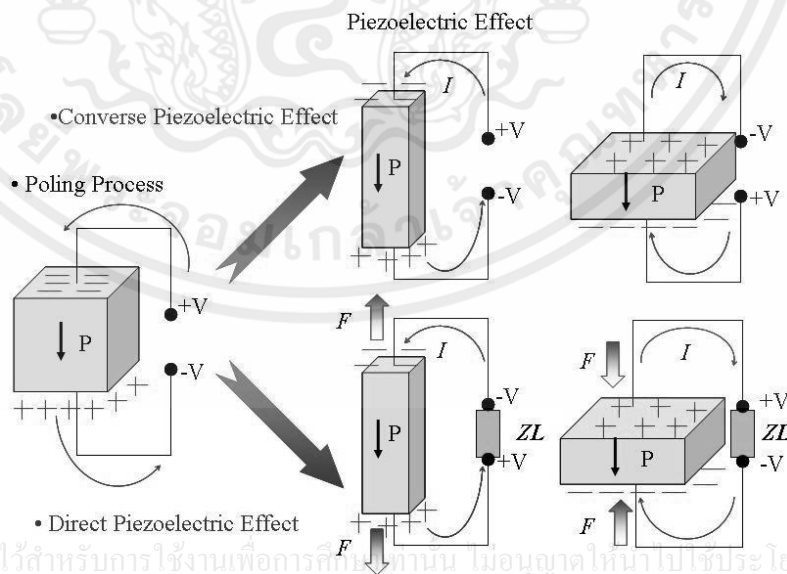
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับวัสดุกลุ่มเพียโซอิเล็กทริก ตัวอย่างวัสดุที่มีสมบัติดังกล่าว สมบัติเฉพาะของพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ ทฤษฎีการขึ้นรูปเส้นใยบนผิวอย่างอิสระของสารละลายที่มีความหนืด หลักการของระบบการขึ้นรูปเส้นใยนาโนโดยใช้เทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตในแบบต่างๆ รวมถึงทฤษฎีการขึ้นรูปเส้นใยนาโนโดยใช้เทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวอิสระ การประยุกต์ใช้วัสดุที่มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกในงานต่างๆ โดยกล่าวถึงการใช้งานเพื่อเป็นอุปกรณ์ให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้า สุดท้ายนี้ได้กล่าวถึงการตรวจวิเคราะห์พื้นผิวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และเทคนิคการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วยอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี เป็นลำดับดังนี้

2.1 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก

2.1.1 ประวัติการค้นพบปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกของวัสดุถูกค้นพบในปี 1880 โดย Jacques และ Pierre Curie โดยการศึกษาอิทธิพลของแรงกดต่อประจุไฟฟ้าของผลึก เช่น ควอทซ์ (Quartz) ซิงค์เบลนด์ (Zinc blende) และ ทัวร์มาไลน์ (Tourmaline) เป็นต้น โดยชื่อ “piezo” มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก หมายถึง การกด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
รูปที่ 2.1 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก[5] สารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์ที่วัสดุสามารถเกิดชั่วไฟฟ้า (Electrical polarization) ขึ้นเนื่องจากความเครียด (Strain) ในวัสดุ เมื่อได้รับความเค้น (Stress) เข้าไป โดยเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยตรง (Direct piezoelectric effect) และในทางกลับกันเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าแก่วัสดุเพียโซอิเล็กทริกแล้วสามารถเกิดความเครียดซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไปได้นั้น จะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยอ้อม (Converse piezoelectric effect)[5]

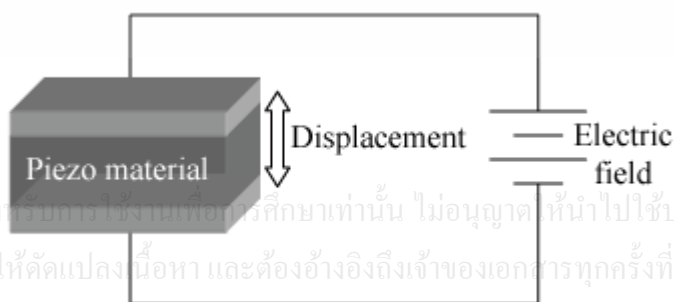
นับตั้งแต่การค้นพบปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก ใน 20 ปีต่อมาเป็นช่วงของการศึกษาค้นคว้าเพื่อวางรากฐานทางด้านเพียโซอิเล็กทริก มีนักวิจัยหลายกลุ่มที่มีส่วนในการศึกษาค้นคว้า นักวิจัยที่มีชื่อเสียง เช่น ลอร์ด เคลวิน (Lord Kelvin) โวลต์มาร์ วอยท์ (Woldemar Voigt) ร่วมกันวางกฎเกณฑ์และทฤษฎีเพื่ออธิบายปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกอย่างเป็นระบบ มีการจัดกลุ่มผลึกโดยละเอียดตามระบบสมมาตร (Symmetry)[6]

การประยุกต์การใช้งานผลึกที่มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกเริ่มประสบความสำเร็จในปี 1917 โดย พอล แลงจิวิน (Paul Langevin) วิศวกรชาวฝรั่งเศส ได้พัฒนาตัวส่งและตัวรับคลื่นเสียงในน้ำ (Transmitter and receiver) จากผลึกควอตซ์ ต่อมาได้ถูกพัฒนาเป็นโซนาร์ (Sonar) ในปัจจุบัน

ภายหลังปี 1965 การวิจัยเพื่อประยุกต์ใช้วัสดุจำพวกเพียโซเซรามิก (Piezo ceramic) มีความแพร่หลายและก้าวหน้าเป็นอย่างมาก มีการผลิตอุปกรณ์จากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกใหม่ๆ เช่น ไมโครโฟนขนาดจิ๋วความไวสูง (High sensitivity microphone) ตัวจุดประกายไฟ (Ignitor) ไฮโดรโฟน (Hydrophone) ทรานสดิวเซอร์ (Transducer) อุปกรณ์จัดตำแหน่งระดับจุลภาค (Micro positioner) เป็นต้น[7]

2.1.2 ทฤษฎีเพียโซอิเล็กทริกพื้นฐาน

เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) คือ การที่วัสดุสามารถเปลี่ยนแรงเชิงกล (mechanical force) ที่ apply บนตัววัตถุให้เป็นกระแสไฟฟ้าออกมา ซึ่งการแปลงพลังงานดังกล่าวเรียกว่า direct effect ในทางตรงกันข้ามเมื่อได้รับพลังงานไฟฟ้าวัตถุก็สามารถเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (mechanical deformation) ได้ เรียกการเปลี่ยนแปลงแบบนี้ว่า indirect effect [7,8]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนรูปเชิงกลในวัสดุเพียโซอิเล็กทริก[8]

สมการพื้นฐานที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกทั้ง 2 ปรากฏการณ์ โดยพิจารณาจากสมบัติทางไฟฟ้าและการยืดหยุ่นของวัสดุเมื่อ

$$D = dE + \varepsilon^T E \quad (\text{Generator}) \quad (2.1)$$

$$S = s^E T + dE \quad (\text{Motor}) \quad (2.2)$$

เมื่อ

D คือ ค่าการแทนที่ทางไฟฟ้า (Dielectric displacement)

T คือ ความเค้น (Stress)

E คือ สนามไฟฟ้า (Electric field)

S คือ ความเครียด (Strain)

d คือ สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric coefficient)

s คือ ความหยุ่นของวัสดุ (ส่วนกลับของมอดุลัสของสภาพยืดหยุ่น)

ε คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity)

โดยตัวในสมการทั้งสองนี้แสดงถึงปริมาณที่เป็นค่าคงที่ ซึ่ง ในสมการที่ 2.1 บ่งบอกว่าความเค้นเป็นค่าคงที่ ส่วน s^E ในสมการที่ 2.2 นั้นมีสนามไฟฟ้าเป็นค่าคงที่ จากรูปแบบของสมการทั้งสองนี้จะแสดงถึงความแตกต่างของการจัดเรียงตัวในวัสดุซึ่งจะสัมพันธ์กับสมบัติของวัสดุนั้นๆ นอกจากนี้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกยังมีสมบัติที่ขึ้นกับทิศทาง จึงต้องมีการระบุเป็นตัวห้อยไว้เพื่อแสดงถึงเงื่อนไขของสถานะที่กำหนด เช่น d_{31} เป็นสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกที่แสดงถึงความสัมพันธ์ในการเกิดโพลาริเซชัน (ปรากฏการณ์โดยตรง) ในแนวตั้งฉากกับขั้วไฟฟ้าในทิศทาง 3 หรือในแนวตั้งของวัสดุ เมื่อมีการให้ความเค้นในทิศทาง 1 หรือด้านข้างของวัสดุและค่า d_{33} ที่แสดงการเกิดโพลาริเซชันในทิศทาง 3 เมื่อมีการให้ความเค้นในทิศทาง 3 เป็นต้น

โดยตัวอย่างสมการที่แสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกนี้ คือ

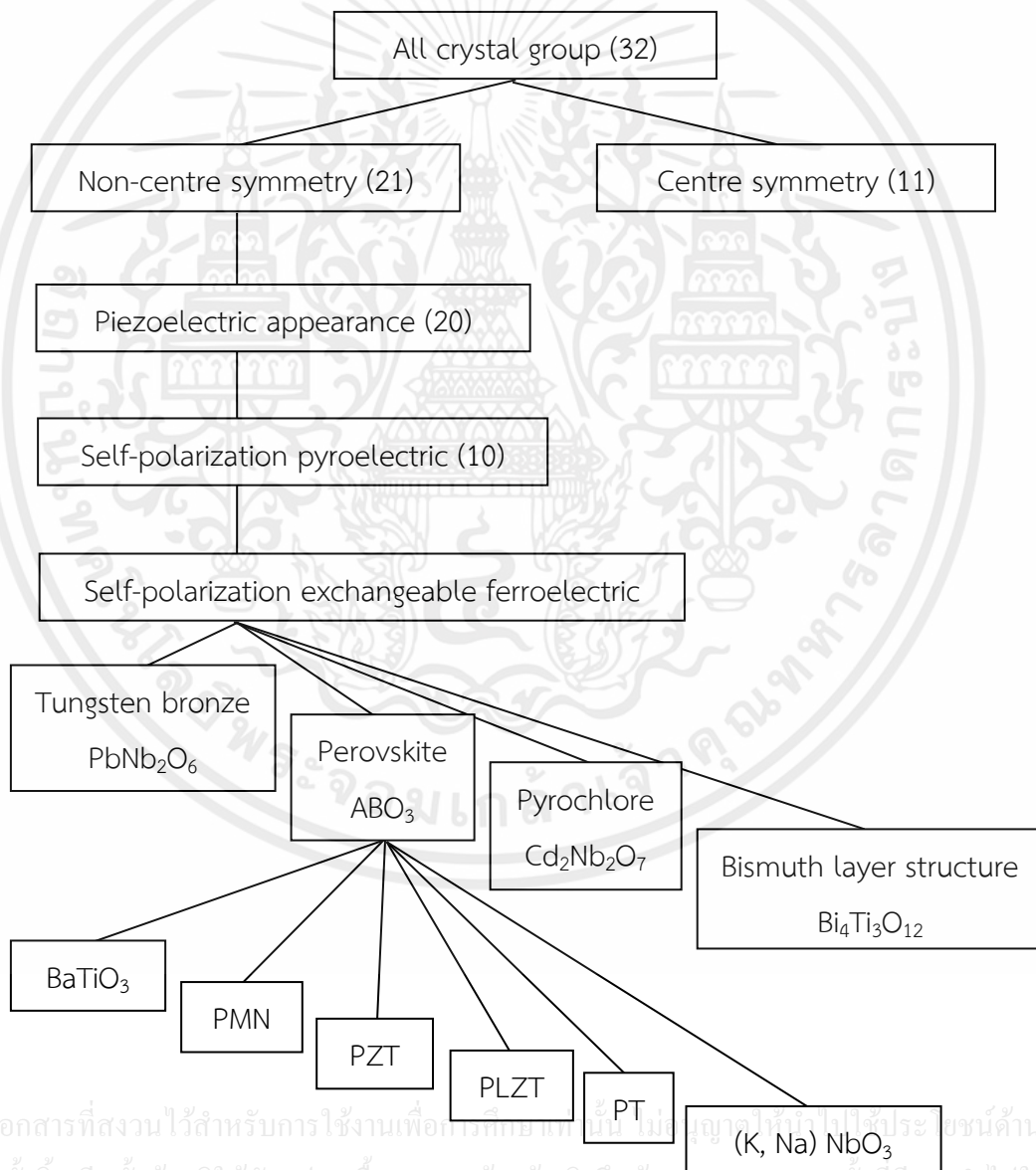
$$D = d_{33} T_3 \quad (\text{Direct}) \quad (2.3)$$

$$S = d_{33} E_3 \quad (\text{Indirect}) \quad (2.4)$$

สำหรับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนั้นต้องการสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกและค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ที่มีค่าสูง เพื่อนำไปใช้ในอุปกรณ์ที่มีการสั่นและการเคลื่อนไหว เช่น เครื่องสัญญาณสะท้อน (sonar) และเครื่องสำหรับรับฟัง (sounder) [6,8]

เอกสารนี้เป็นเอกสาร
2.1.3 การแบ่งกลุ่มผลึกตามระบบสมมาตร
 นั้นนั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น โดยทั่วไปผลึก (Crystal) นั้นสามารถแบ่งกลุ่มตามสมมาตรได้ 32 กลุ่ม โดย 11 กลุ่มนั้นมี
 ลักษณะสมมาตรผ่านจุดศูนย์กลาง (Centrosymmetry) ส่วนที่เหลืออีก 21 กลุ่มนั้นมีลักษณะ

สมมาตรไม่ผ่านจุดศูนย์กลาง (Non-centrosymmetry) ซึ่งผลึกในกลุ่มนี้จะแสดงสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก 20 กลุ่ม ส่วนอีก 1 กลุ่มไม่แสดงสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก เนื่องจากผลึกจะเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างที่มีสมมาตรผ่านจุดศูนย์กลางเมื่อได้รับแรงกระทำ โดยผลึกเพียโซอิเล็กทริกทั้ง 20กลุ่มนี้มีเพียง 10 กลุ่มที่สามารถเกิดโพลาริเซชันตัวเอง (Spontaneous polarization) และหากการเกิดโพลาริเซชันนี้สามารถสลับขั้ว (switching) ไปในทิศทางของสนามไฟฟ้าภายนอกที่ให้เข้าไปได้ จะเรียกผลึกกลุ่มนี้ว่า เฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric) ซึ่งผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกนี้สามารถแบ่งย่อยตามโครงสร้างได้ดังนี้ กลุ่มโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ (Perovskite structure) กลุ่มโครงสร้างทังสเตนบรอนซ์ (Tungsten-bronze structure) และกลุ่มโครงสร้างชั้นของบิสมัท (Bismuth-layer structure)[7] ดังแสดงในรูปที่ 2.3

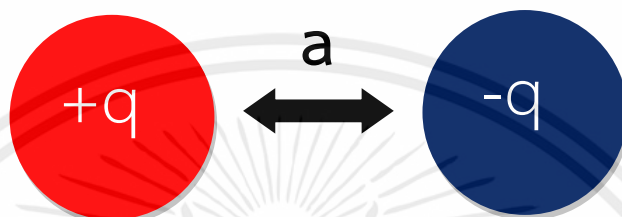


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.3 การจัดกลุ่มผลึกตามระบบสมมาตร[7]

2.1.4 โพลาริเซชันในวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก

การที่ผลึกสามารถแสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกได้นั้นเกิดจากผลึกมีการเปลี่ยนแปลงค่าโพลาริเซชันเนื่องจากแรงเค้นเชิงภายนอกมากกว่าก่อนที่จะกล่าวถึงการเกิดโพลาริเซชัน จำเป็นต้องมีความเข้าใจการเกิดไดโพลโมเมนต์ซึ่งไดโพลโมเมนต์เป็นค่าเวกเตอร์ที่บอกถึงขนาดของขั้วทางไฟฟ้า (Polarity) เกิดขึ้นจากคู่ของประจุบวก (ขนาด q) และลบ (ขนาด q) ที่ถูกแยกออกจากกัน [8] ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การเกิดขั้วประจุไฟฟ้า

ค่าไดโพลโมเมนต์ของคู่ประจุบวก ($+q$) และลบ ($-q$) ที่มีระยะห่างเท่ากับ a สามารถหาได้จากสมการที่ 2.5

$$P = qa \quad (2.5)$$

โดยที่

P คือค่าเวกเตอร์ของไดโพลโมเมนต์ (D)

q คือขนาดของประจุ (C)

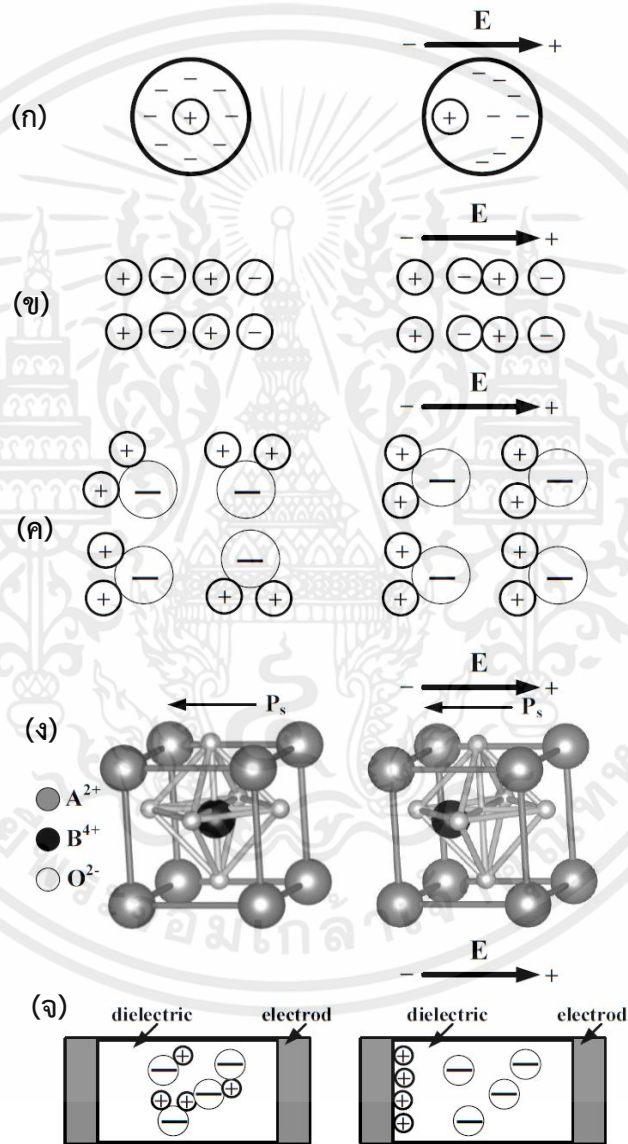
a คือระยะห่างระหว่างประจุ (m)

การเกิดโพลาริเซชันโดยพื้นฐานมีอยู่ 5 แบบดังแสดงในรูปที่ 2.5 ได้แก่

1. อิเล็กทรอนิกส์โพลาริเซชัน (Electronic polarization)
2. อะตอมมิก หรือ ไอออนิกโพลาริเซชัน (Atomic or ionic polarization)
3. ไดโพล หรือ ออเรียนเทชันนอลโพลาริเซชัน (Dipolar or orientational polarization)
4. โพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเอง (Spontaneous polarization)
5. อินเตอร์เฟซ หรือ โพลาริเซชันจากประจุค้ำ (Interface or space charge polarization)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... โดยธรรมชาติแล้วอะตอมใดๆ จะมีค่าไดโพลโมเมนต์เป็นศูนย์ เนื่องจากจุดศูนย์กลางของประจุบวกและลบอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน จึงหักล้างกันหมดทำให้ค่าเป็นศูนย์ แต่ถ้าอะตอมตัวนี้ไปวางไว้ในสนามไฟฟ้าจะทำให้จุดศูนย์กลางของประจุบวกและลบแยกออกจากกันส่งผลให้เกิดไดโพล

โมเมนต์ลักษณะของการเกิดไดโพลโมเมนต์ในอะตอมเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอกเรียกว่า อิเล็กทรอนิกส์โพลาริเซชันดังแสดงในรูปที่ 2.5(ก) โพลาริเซชัน ชนิดนี้เกิดขึ้นกับทุกสสารเนื่องจาก เป็นการเกิดโพลาริเซชันระดับอะตอมและเกิดขึ้นเมื่อป้อนสนามไฟฟ้ากับสสาร เท่านั้นค่าโพลาริเซชันดังกล่าวมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าโพลาริเซชันชนิดอื่นๆ โพลาริเซชัน ชนิดต่อมาคืออะตอมมิก หรือไอออนิกโพลาริเซชันดังแสดงในรูปที่ 2.5(ข) เกิดขึ้นเฉพาะสสารที่มีพันธะไอออนิกเช่น NaCl KCl และ LiBr เป็นต้น และเกิดขึ้นเมื่อจุดศูนย์กลางของประจุบวกกับประจุลบแยกจากกันเมื่อป้อน สนามไฟฟ้า ไอออนิกโพลาริเซชันจะหมดไปเมื่อสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้ลดลงเป็นศูนย์ [6]



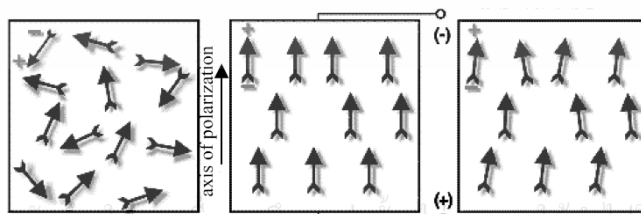
รูปที่ 2.5 การเกิดโพลาริเซชัน[8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ส่วนการเกิดไดโพล หรือออร์เรียนเทชันนอลโพลาริเซชันเป็นโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นในโมเลกุลของสารที่มีโครงสร้างโมเลกุลไม่สมมาตร เช่น H_2O และ HCl ดังแสดงในรูป 2.5(ค) ซึ่งแสดงตัวอย่าง

ของโมเลกุลของน้ำที่เวกเตอร์รวมของโพลาริเซชันจาก H^+ (2 อะตอม) และ O^{2-} (1 อะตอม) มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ถึงแม้ว่าไม่มีสนามไฟฟ้าเวกเตอร์รวมของโพลาริเซชันเหล่านี้ยังมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ดังนั้น ออเรียนเทชันนอลโพลาริเซชันจึงเป็นโพลาริเซชันชนิดถาวรแต่อย่างไรก็ตาม เมื่อโมเลกุลเหล่านี้มารวมตัวกันเป็นสสารเช่น น้ำ (H_2O) ออเรียนเทชันนอลโพลาริเซชันของแต่ละโมเลกุลจะเรียงตัวกันอย่างสุ่ม (Random orientation) ดังนั้นจึงไม่มีค่าโพลาริเซชันรวมแต่ เมื่อใดก็ตามที่สสารเหล่านี้ถูกวางไว้ในสนามไฟฟ้าจะทำให้มีการเรียงตัวของโพลาริเซชันของแต่ละโมเลกุลให้มีทิศทางในแนวเดียวกับสนามไฟฟ้าซึ่งทำให้เกิดโพลาริเซชันรวม โพลาริเซชันตัวต่อมามีความสำคัญมากต่อวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก คือ โพลาริเซชัน ที่เกิดขึ้นเอง แสดงในรูปที่ 2.5(ง) โพลาริเซชันดังกล่าวนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของเฟสของผลึกเมื่ออุณหภูมิลดลงผ่านอุณหภูมิคูรี โพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเองนี้จะมีเฉพาะในผลึกที่มีสมมาตรบางประเภทเท่านั้นดังที่กล่าวไว้แล้วก่อนหน้านี้โพลาริเซชันดังกล่าวนี้มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุเป็นอย่างมาก เช่น ทำให้มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูงมากในผลึกของแข็งโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเองจะเกิดขึ้นในแต่ละเซลล์ และเมื่อเซลล์รวมกันเป็นผลึกโพลาริเซชันเหล่านี้จะมีทิศทางแบบสุ่ม จึงทำให้โพลาริเซชัน หักล้างกัน เป็นศูนย์แต่เมื่อใดที่มีการป้อนสนามไฟฟ้าให้แก่ผลึกเหล่านี้ส่งผลให้เกิดการเรียงตัวของ โพลาริเซชันของแต่ละเซลล์ใหม่ มีทิศทางไปในแนวเดียวกับสนามไฟฟ้า ซึ่งทำให้เกิดโพลาริเซชันรวมมีค่าไม่เป็นศูนย์สิ่งที่น่าสนใจของโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเองคือเมื่อป้อนสนามไฟฟ้าให้สูงถึงค่าหนึ่งแล้วลดสนามไฟฟ้าที่ป้อนเป็นศูนย์ โพลาริเซชันรวมจะไม่ลดลงจนเป็นศูนย์เนื่องจากมี โพลาริเซชันคงค้าง (Remanent polarization) ซึ่งจะกล่าวถึงโดยละเอียดต่อไป สมบัตินี้ทำให้วัสดุเซรามิกเพียโซอิเล็กทริก วัสดุเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก(ทั้งที่เป็นผลึกเชิงเดี่ยวและพหุผลึก) สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้ โพลาริเซชันชนิดสุดท้ายคือ อินเตอร์เฟส หรือ โพลาริเซชันจากประจุค้าง แสดงในรูปที่ 2.5(จ) โพลาริเซชันชนิดนี้มีค่าค่อนข้างน้อยเกิดจากประจุบวกและประจุลบที่สะสมกันที่ตำแหน่งบริเวณรอยต่อของสารต่างชนิดในวัสดุหรือเกิดขึ้นบริเวณขอบเกรน[6]

2.1.5 สมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก

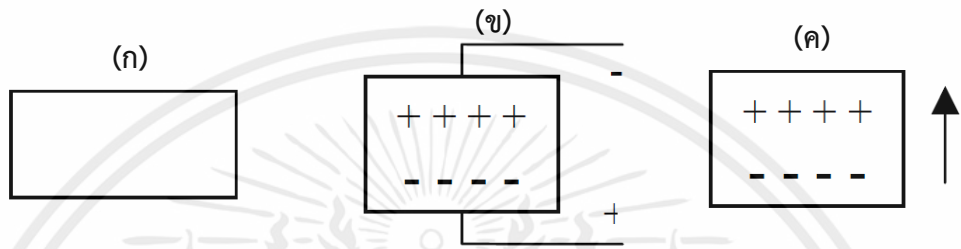
การจะทำให้วัสดุมีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกต้องมีการเหนี่ยวนำขั้วไฟฟ้า (pole) ของวัสดุก่อนนำไปใช้งาน โดยการ ให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงใส่วัสดุเพียโซอิเล็กทริกดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การเหนี่ยวนำขั้วในวัสดุเพียโซอิเล็กทริก[8]

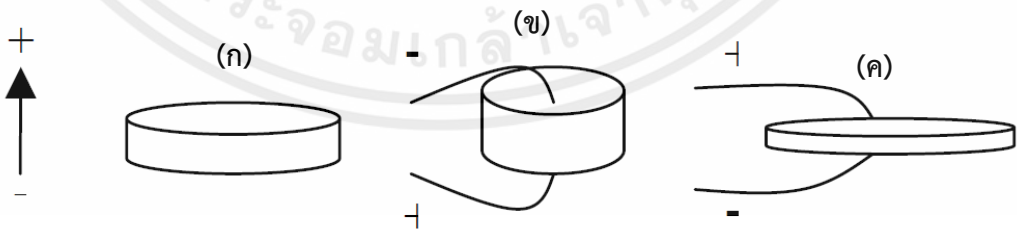
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับธุรกิจเชิงพาณิชย์ การนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบลงเนื้อที่ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.7(ก) จะเห็นว่าก่อนให้สนามไฟฟ้า electric dipole เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ ทำให้ผลรวมของโพลาริเซชันมีค่าเป็นศูนย์ แต่เมื่อ ให้สนามไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงใส่วัสดุจึงทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของ electric dipole ดังรูปที่ 2.7(ข) และเมื่อนำสนามไฟฟ้าออกทำให้ทิศทางของ electric dipole นั้นเรียงตัวเอียงจากทิศทางขณะ apply สนามไฟฟ้าเล็กน้อยเรียกโพลาริเซชันที่เหลือว่า remanent polarization ดังรูปที่ 2.7(ค) อนึ่งการเหนี่ยวนำขั้วไฟฟ้าจะทำให้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกขยายขนาดขึ้นในทิศทางกับสนามไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำและหดตัวในทิศที่เหลืออย่างถาวร[8]



รูปที่ 2.7 สนามไฟฟ้า electric dipole ในวัสดุเพียโซอิเล็กทริก[8]

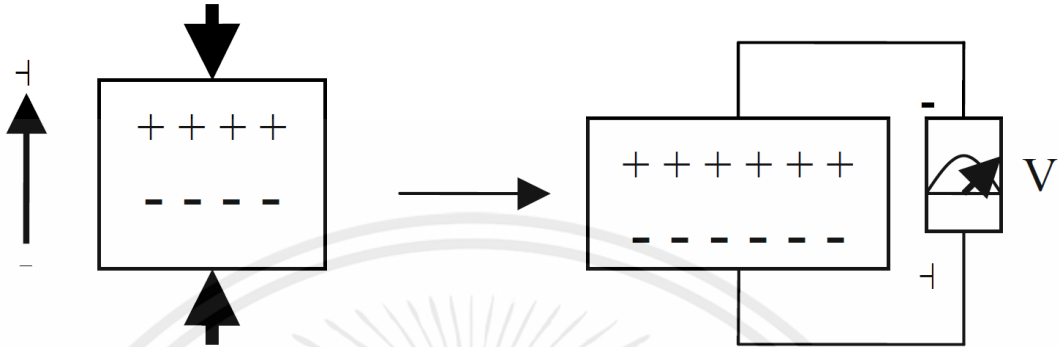
เมื่อนำชิ้นเพียโซอิเล็กทริกที่ทำขั้วไฟฟ้าแล้วไปใช้งานหาก ให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขนาดกลาง ๆ ในทิศทางเดียวกับทิศทางที่เหนี่ยวนำให้เกิดขั้วไฟฟ้าในวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชิ้นวัสดุจะขยายตัวอย่างชั่วคราวในทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้าที่ให้ และหดตัวในทิศที่เหลือดังรูปที่ 2.8(ข) แต่ถ้า ให้สนามไฟฟ้าขนาดกลาง ๆ ในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางที่เหนี่ยวนำให้เกิดขั้วไฟฟ้าในชิ้นงาน ชิ้นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะหดตัวในทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำและขยายตัวในทิศที่เหลือ ดังรูปที่ 2.8(ค) เมื่อหยุดเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าข้างต้นชิ้นวัสดุจะมีขนาดกลับเท่าเดิมดังรูปที่ 2.8(ก) เรียกการเปลี่ยนแปลงของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้าว่า thickness effect ส่วนการเปลี่ยนแปลงในทิศตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าเรียกว่า transverse effect[8]



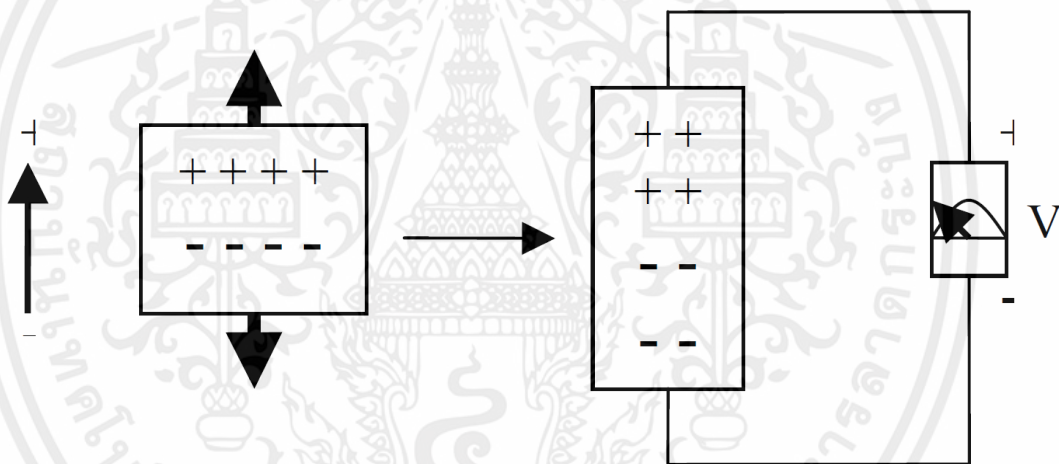
รูปที่ 2.8 thickness effect ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก[8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น ต่อมาหากออกแรงกด (compressive) ลงบนชิ้นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในทิศทางขนานกับทิศทางที่เหนี่ยวนำขั้วไฟฟ้า ชิ้นวัสดุจะปลดปล่อยกระแสไฟฟ้าในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำให้

เกิดชั่วไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.9 สังเกตว่ารูปที่ 2.9 เป็น reversible process ของรูปที่ 2.7 ในทางตรงกันข้ามหากออกแรงดึงในทิศขนานกับทิศสนามไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำ ขึ้นวัสดุจะปลดปล่อยไฟฟ้าในทิศตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำ[8] ดังรูปที่ 2.10



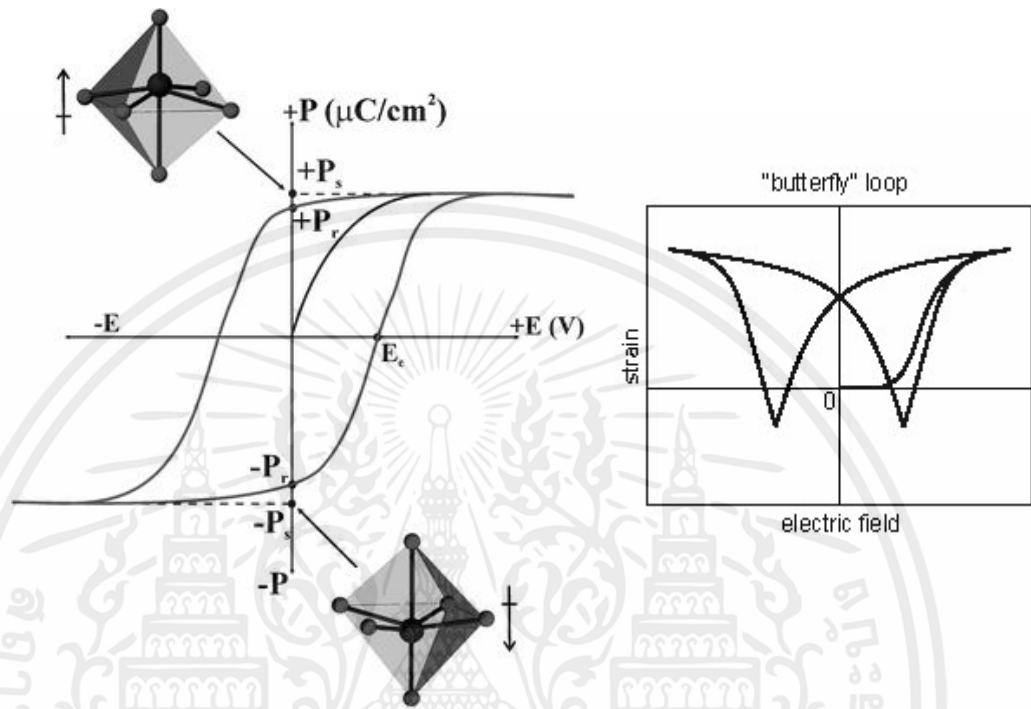
รูปที่ 2.9 การกระทำที่มีผลต่อแรงทางไฟฟ้าภายในวัสดุด้วยการกด[8]



รูปที่ 2.10 การกระทำที่มีผลต่อแรงทางไฟฟ้าภายในวัสดุด้วยการดึง[8]

การ apply สนามไฟฟ้ากระแสสลับความต่างศักย์สูง ๆ ใ่วัสดุจะทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันและขนาด (dimension) กลับไปกลับมา หากนำการเปลี่ยนแปลงไปเขียนกราฟจะได้กราฟ hysteresis loops ดังรูปที่ 2.11 จากกราฟ hysteresis ที่เกิดจากการ apply สนามไฟฟ้าด้านบวกใ่วัสดุจะมีโพลาไรเซชันสูงสุดในด้านบวก เมื่อค่อย ๆ ลดสนามไฟฟ้าจนกระทั่งเป็นศูนย์วัสดุจะเหลือโพลาไรเซชันค่าหนึ่งเรียกว่า remanent polarization เมื่อ apply สนามไฟฟ้าชั่วลบทำให้โพลาไรเซชันจะมีค่ามากขึ้นเรื่อย ๆ แต่ในทิศทางที่เป็นลบจนกระทั่งอิมพัลส์ และเมื่อลดสนามไฟฟ้าในด้านลบลงจนเป็นศูนย์จะได้ remanent polarization ที่เป็นลบ หาก apply ค่าไม่ว่ากรณีใดสนามไฟฟ้าที่เป็นบวกโพลาไรเซชันจึงจะมีค่าเป็นบวกเหมือนเดิม ดังแสดงทิศทางการเกิด polarization ตามลูกศรในรูปที่ 2.11 และในขณะเดียวกันการ apply ไฟฟ้ากระแสสลับที่มี

ศักย์ไฟฟ้าสูงพอจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในทิศเดียวกับการโพลาไรเซชันซึ่งจะแปรผันตรงกับสนามไฟฟ้า[6,8] ดังรูปที่ 2.11

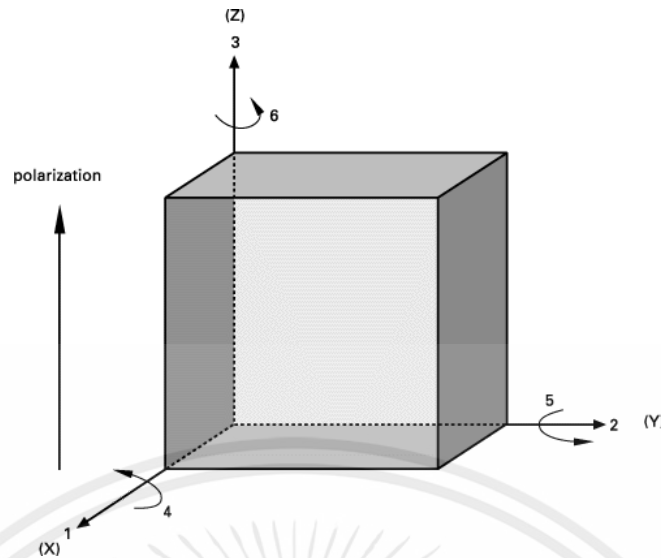


รูปที่ 2.11 ฮีสเทอริซิสของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก[8]

2.1.6 พารามิเตอร์ที่สำคัญในทฤษฎีเพียโซอิเล็กทริก

เครื่องหมายแสดงสมบัติของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมักจะมีตัวเลข 2 ตัวห้อยข้างหลัง ตัวเลขที่ห้อยตัวหน้าบอกทิศทางของสนามไฟฟ้าภายนอกที่ apply เข้าไปในวัสดุหรือที่วัสดุจ่ายออกมาเมื่อถูกแรงทางกลกระทำ ส่วนตัวเลขห้อยตัวหลังแสดงทิศทางที่วัสดุเพียโซอิเล็กทริกยืดหรือหดเมื่อถูกสนามไฟฟ้าภายนอกกระทำหรือทิศทางที่ apply แรงทางกลกระทำต่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริก หมายเลขถูกกำหนดโดยอ้างอิงกับทิศทาง polarization ดังแสดงในรูปที่ 2.14 จากรูปจะเห็นว่าทิศทางหมายเลข 3 เป็นแกน z ของผลึกซึ่งขนานกับทิศที่เหนี่ยวนำ (pole) ให้เกิดขั้วไฟฟ้าในวัสดุ แกนของผลึกที่เหลือคือ x และแกน y แทนด้วยทิศหมายเลข 1 และ 2 ตามลำดับดังรูปที่ 2.14 ส่วนหมายเลข 4 5 และ 6 หมายถึงแรงเฉือนรอบ ๆ แกน x y และ z ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ระบายและแกนโพลาริไซในวัสดุเพียโซอิเล็กทริก[6]

Electromechanical coupling factor (k)

เป็นสมบัติของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่เป็นตัวชี้บอก (indicator) ความสามารถในการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล คำจำกัดความของ k ในรูปสมการคือ

$$k^2 = \frac{M.E.}{\text{Input } M.E.} \quad (2.6)$$

หรือ

$$k^2 = \frac{E.E.}{\text{Input } E.E.} \quad (2.7)$$

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกต่างชนิดกันมี k^2 ต่างกัน วัสดุที่มี k มากจะมีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานจากรูปหนึ่งเป็นอีกรูปหนึ่งได้มาก แต่ค่าของ k ไม่ใช่ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงานเพราะสมการคำนวณ k ไม่ได้คำนึงถึงพลังงานที่สูญเสียเมื่อเปลี่ยนพลังงานรูปหนึ่งเป็นอีกรูปหนึ่ง[6,7] ถ้าจะหาประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานต้องหาจากสมการต่อไปนี้

$$\eta = \frac{k^2}{(k^2 + D)} \quad (2.8)$$

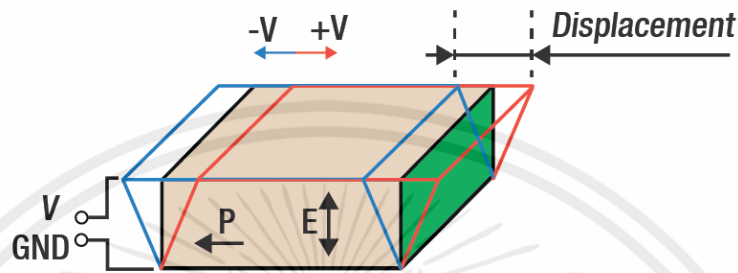
เมื่อ

η คือ ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงาน

D คือ dissipation factor ด้าน input

ค่า k ของวัสดุใดๆ ไม่ได้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัสดุนั้น ๆ เพียงอย่างเดียวแต่ยังขึ้นอยู่กับ การเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วไฟฟ้า (poling) และทิศทางของแรงเชิงกลหรือกระแสไฟฟ้าด้วย ดังนั้นนักเซรามิกจึงแสดง k ในรูปแบบต่างๆ เช่น k_{15} k_{33} k_{31}

สำหรับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีรูปทรงแบนเหมือนเหรียญที่ถูก pole ตามความหนา (ขนานกับแกน z) และเมื่อนำไปจ่ายกระแสไฟฟ้าขนานกับแกน z แล้วเกิดการยืดหรือหดตัวตามแนวรัศมีในแกน x และแกน y ดังรูปที่ 2.13 นิยมแสดง k ในรูปของ planar electromechanical coupling factor หรือบางที่เรียกย่อ ๆ ว่า planar coupling factor (k_p) ซึ่ง Institute of Radio Engineer (IRE) ได้กำหนดวิธีหาค่า k_p



รูปที่ 2.13 ความเครียดเฉือนในวัสดุเพียโซอิเล็กทริก[8]

Electric quality factor (Q_e)

ค่า Electric quality factor Q_e หาได้จากสมการที่ 2.9

$$Q_e = \frac{1}{\tan \delta} \quad (2.9)$$

เมื่อ

$\tan \delta$ คือ dielectric dissipation factor หรือ dielectric loss (D)

คู่ของ Q_e คือ mechanical quality factor Q_m ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.10

$$Q_e = \frac{f_n^2}{(2\pi f_m C_0 Z_m)(f_n^2 - f_m^2)} \quad (2.10)$$

Q_m มีความสัมพันธ์กับ mechanical loss ในลักษณะคล้าย ๆ กับความสัมพันธ์ระหว่าง Q_e กับ dielectric loss ดังสมการที่ 2.11

$$Q_m = \frac{1}{\tan \delta_m} \quad (2.11)$$

เมื่อ

$\tan \delta_m$ คือ mechanical loss

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มี Q_m สูงจะเหมาะในการนำไปใช้งานที่ต้องการ displacement สูงๆ และ generate heat ออกมาน้อย เช่น ใช้ทำเพียโซอิเล็กทริกมอเตอร์[8,9]

Dielectric constant

Relative dielectric constant (K') สัดส่วนระหว่างประจุที่เก็บกักไว้บนผิวของวัสดุที่ความต่างศักย์ 1 V ต่อประจุที่เก็บกักไว้บนผิวของ electrode ในสุญญากาศที่ความต่างศักย์ 1 V ซึ่งสามารถหา K' ของวัสดุใด ๆ จากสมการที่ 2.12

$$K' = \frac{\epsilon'}{\epsilon_0} \quad (2.12)$$

เมื่อ

ϵ' คือ permittivity ของวัสดุ

ϵ_0 คือ permittivity ของสุญญากาศ (8.85×10^{-12}) F/m

Young's modulus

หากให้ความเค้น (stress) ในเส้นของแข็งทั่วไปจะเกิดความเครียด (strain) เพียงอย่างเดียว ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (stress T) กับความเครียด (strain S) คือ

$$T = YS \quad (2.13)$$

เมื่อ Y คือ Young's modulus มีหน่วยเหมือน stress แต่ถ้า applied stress ลงบนของแข็งที่เป็นวัสดุเปราะหรือวัสดุเหนียวจะเกิดทั้ง strain และประจุไฟฟ้า[10]

Piezoelectric Charge Constant

ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นต่อพื้นที่หน้าตัดของวัสดุมีความสัมพันธ์กับ stress ที่ apply ดังสมการที่ 2.14

$$D = \frac{Q}{A} = dT \quad (2.14)$$

เมื่อ

Q คือ ประจุไฟฟ้าที่สะสม

A คือ พื้นที่หน้าตัด (m^2)

T คือ stress (N/m^2)

d คือ piezoelectric strain constants (C/N)

D คือ dielectric displacement (C/ m^2)

ในทางตรงกันข้าม ถ้าให้สนามไฟฟ้าใส่บนวัสดุจะเกิด strain ทำให้วัสดุเกิดการขยายและหดตัวมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าซึ่ง strain ที่เกิดจะแปรตามขนาดของสนามไฟฟ้างตามความสัมพันธ์ 2.15

$$S = dE \quad (2.15)$$

เมื่อ

S คือ strain

E คือ Electric field strength (V/m)

d คือ Piezoelectric strain constant (meters/volt)

ดังนั้น d มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.16

$$d = \frac{D}{T} = \frac{S}{E} \quad (2.16)$$

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ทำเครื่องมือที่ต้องสั่นตัวมากหรือขยับตัวมาก เช่น sonar ultrasonic cleaner และหม้อแปลงจะต้องมีค่า d มาก ๆ นอกจากนี้ยังมี piezoelectric constant อีกตัวหนึ่ง คือ piezoelectric voltage constant (g) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ d [7,8] ดังสมการที่ 2.17

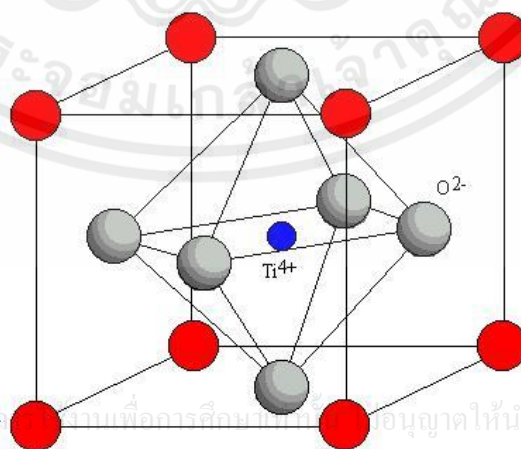
$$g = \frac{d}{\epsilon'} = \frac{d}{K'\epsilon_0} \quad (2.17)$$

โดยที่ g มีหน่วยเป็น (Vm/N)

2.1.7 ตัวอย่างวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

แบเรียมไททาเนต (Barium Titanate)

มีสูตรทางเคมีว่า BaTiO_3 เป็นเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกตัวแรกที่ทำออกมาขายและใช้กันอย่างแพร่หลาย BaTiO_3 มีโครงสร้างแบบ perovskite ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งพบในสารประกอบหลาย ๆ ชนิดที่มีสูตรเคมีเป็น ABO_3 [5,11]

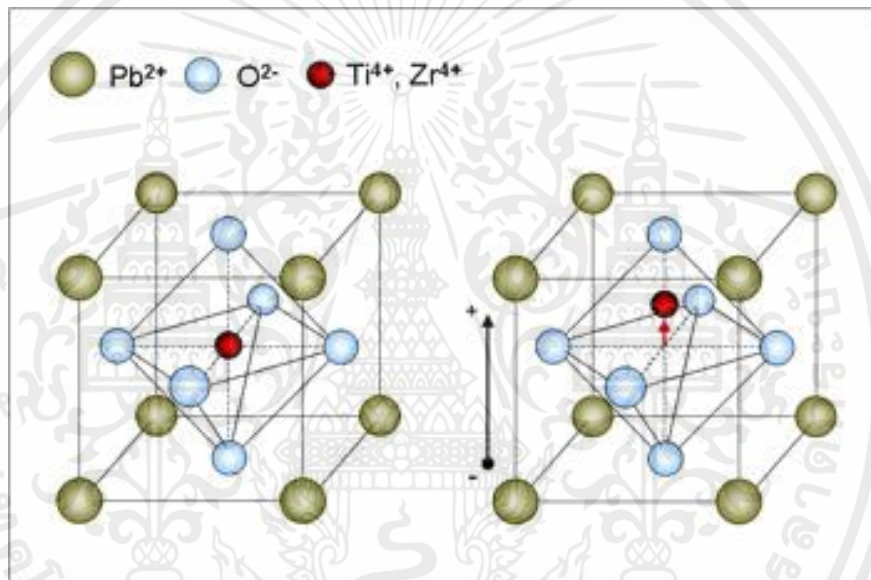


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ Ba²⁺ Ti⁴⁺ O²⁻ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.14 โครงสร้างแบบ perovskite ของ BaTiO_3 [5]

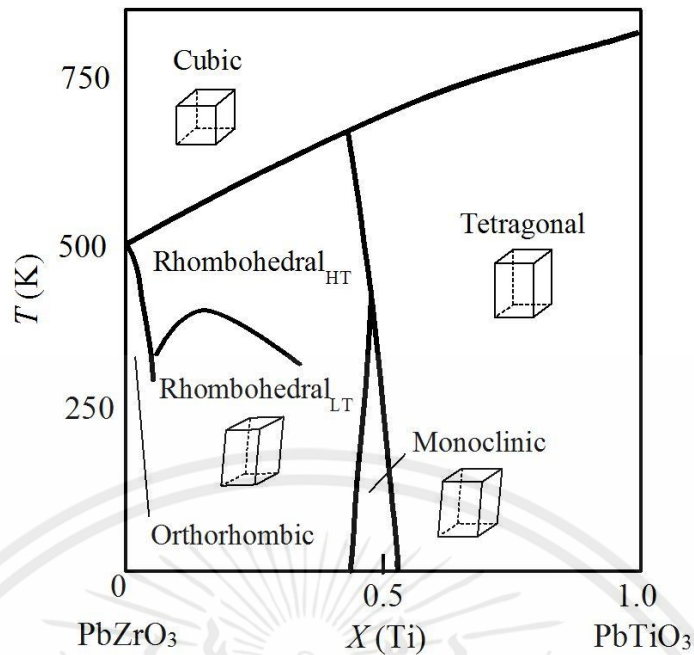
เลตเซอร์โคเนตไททานเนต (Lead zirconate titanate ; PZT)

เกิดจากการนำ PbTiO_3 ($T_c = 475^\circ\text{C}$) กับ PbZrO_3 ($T_c = 234^\circ\text{C}$) มาผสมกัน เมื่อ PbTiO_3 เย็นตัวผ่าน T_c แล้ว PbTiO_3 จะเปลี่ยนโครงสร้างจาก cubic ไปเป็น tetragonal ที่มีความยาว ด้านแกน z ยาวกว่าแกน x และ y ถึง 6% การแตกต่างดังกล่าวส่งผลให้มี internal stress ในชิ้นงานสูงมาก ชิ้น PbTiO_3 บริสุทธิ์ที่เย็นตัวผ่าน T_c ลงมากมักจะแตกร้าวแต่เมื่อ PbZrO_3 เย็นตัวผ่าน T_c จะทำให้ PbZrO_3 เปลี่ยนโครงสร้างจาก cubic ไปเป็น orthorhombic ที่มีสมบัติแบบ anti-ferroelectric เพราะโพลาไรเซชันที่เกิดจากการหนีศูนย์กลางของ Zr^{2+} จะหักล้างกันจนหักล้างกันไปหมด เมื่อนำ PbTiO_3 กับ PbZrO_3 มารวมกันในสัดส่วนต่าง ๆ จะได้ $\text{Pb}(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_3$ ที่มีวัฏภาคดังแสดงในรูปที่ 2.15 [7]



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของ PbTiO_3 และ PbZrO_3 [7]

ตรงกลางๆ ของรูปบริเวณ x มีค่าประมาณ 0.52 เป็นบริเวณที่มีความพิเศษเพราะเป็นบริเวณที่ $\text{Pb}(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_3$ จะเปลี่ยนจาก tetragonal เป็น orthorhombic โดยที่ขอบเขตของวัฏภาค (phase boundary) บริเวณนี้เกือบจะเป็นเส้นตรงที่ตั้งฉากกับแกน x แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคข้างต้น นี้เกิดขึ้น ได้ทุกช่วงอุณหภูมิ เรียกช่วงบริเวณ นี้ว่า morphotropic phase boundary (MPB) เป็นช่วงที่ PZT เปลี่ยนแปลงโครงสร้างโดยไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ ที่ช่วงบริเวณนี้ PZT จะมีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 2.16 [6,7] นักวิจัยเชื่อว่าสาเหตุที่ PZT มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกสูงสุดในช่วง MPB เพราะว่าช่วงนี้ PZT เกิดอยู่ในรูป 2 วัฏภาค คือ tetragonal กับ rhombohedral ซึ่งมีโพลาไรเซชัน 6 และ 8 ทิศทางตามลำดับ ดังนั้นเมื่อนำไป pole จึงจัดเรียงค่า โดเมนตามทิศที่ pole ได้มากจึงแสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกได้มากขึ้น PZT ที่ใช้ในอุตสาหกรรม มักจะมีส่วนประกอบทางเคมีที่ MPB คือ $\text{Pb}(\text{Ti}_{0.48}\text{Zr}_{0.52})\text{O}_3$ เขียนแทนด้วย PZT [12]



รูปที่ 2.16 แผนผังวัฏภาคของ $\text{Pb}(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_3$ [7]

***วัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT ที่นิยมใช้ในเชิงการค้าและอุตสาหกรรม**

1. PZT-4 มีชื่อเรียกอีกอย่างว่า hard PZT เป็น PZT ที่ทำขึ้นโดยการ dope PZT ด้วย Sr มีสูตรเคมีว่า $(\text{Pb}_{0.94}\text{Sr}_{0.06})(\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47})\text{O}_3$ PZT ชนิดนี้มี dielectric loss ต่ำและทนทานต่อการ depole ได้สูงถึงแม้จะถูกกระทำด้วยแรงทางกลสูงก็ไม่ depole ดังนั้นจึงมักจะนำ PZT ชนิดนี้ไปใช้ทำ acoustic แทรนส์ดิวเซอร์สำหรับเรือดำน้ำที่อยู่ใต้น้ำลึก ๆ และใช้ทำเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าเช่น ที่จุดเตาแก๊ส [6]

2. PZT-5A มีสูตรทางเคมี $(\text{Pb}_{0.988}(\text{Ti}_{0.48}\text{Zr}_{0.52})_{0.976}\text{Nb}_{0.024})\text{O}_3$ มีคุณสมบัติที่ดี คือ

- High sensitivity คือ สภาพไวสูง
- High time stability คือ คุณสมบัติไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงตามเวลา (aging ต่ำ)
- Electrical resistivity คือ มีสภาพต้านทานไฟฟ้า ดังนั้นจึงมักถูกใช้ทำ hydrophone [6]

3. PZT-5H มี sensitivity และ dielectric constant สูงกว่า PZT-5A มี Tc ต่ำจึงถูกใช้งานที่อุณหภูมิไม่สูงและไม่ค่อยทนอุณหภูมิสูง [6]

4. PZT-8 มีคุณสมบัติคล้าย ๆ PZT-4 แต่มี dielectric loss ต่ำกว่ามากและทนทานต่อการ depolarization มากกว่านอกจากนี้ PZT-8 ยังมี dielectric constant (K') และ coupling factor (k) ที่ต่ำกว่า PZT-4 [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

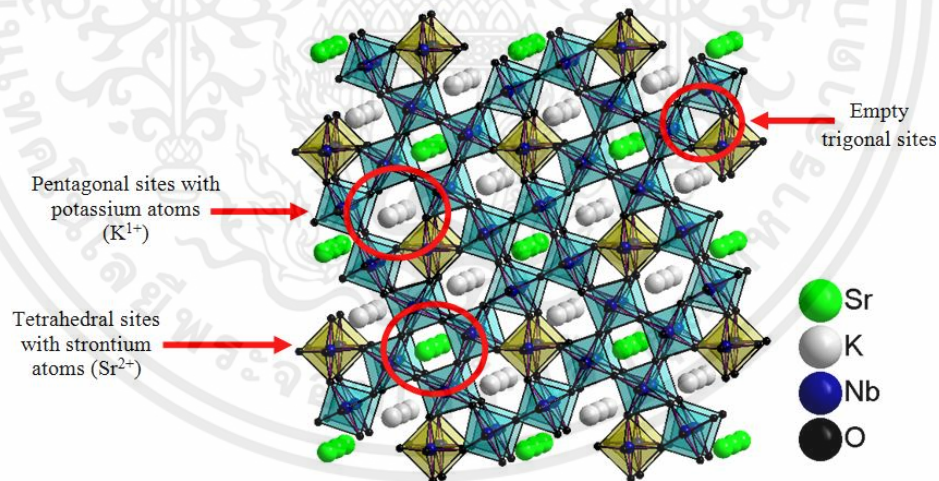
รีแลกเซอร์ (Relaxor ; PbTiO_3 system)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คิดเป็นสงวนเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ เป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีองค์ประกอบทางเคมีใกล้ ๆ MPB ที่ถูก dope ด้วย ไอออนชนิดต่าง ๆ ถูกนำไปใช้เป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกหลายปีจนกระทั่งประมาณ 10 ที่ผ่านมา

นักวิทยาศาสตร์ พบว่าวัสดุผสมระหว่าง electrostrictive หรือ relaxor กับ PbTiO_3 (PT) มีสมบัติหลายอย่างที่เหนือกว่า PZT วัสดุ relaxor ในที่นี้ได้แก่พวก $\text{Pb}(\text{B}_1\text{B}_2)\text{O}_3$ เมื่อ B_1 คือ Zn^{2+} Mg^{2+} Sc^{3+} ฯลฯ และ B_2 คือ Nb^{3+} Ta^{5+} ฯลฯ เช่น PMN หรือ $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ PZN หรือ $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ PST หรือ $\text{Pb}(\text{Sc}_{1/2}\text{Ta}_{1/2})\text{O}_3$ เป็นต้น [8]

Tungsten Bronze Structure Compound [13]

เป็นสารประกอบที่มีสูตร $[(\text{A}1)_2(\text{A}2)_4\text{A}3][(\text{B}1)_2(\text{B}2)_8]\text{O}_{30}$ เมื่อ A เป็นธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนต่ำ เช่น Pb^{2+} ส่วน B เป็นธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนสูง เช่น W^{4+} Ta^{4+} Nb^{5+} Ti^{4+} ตัวอย่างสารประกอบพวกนี้ เช่น PbNb_2O_6 โดยทั่วไปสารประกอบพวกนี้มีโครงสร้างผลึกแบบ Tungsten Bronze Structure ซึ่งเป็นโครงสร้างของสารประกอบระหว่างโลหะแอลคาไลน์ (alkaline metal) กับ tungsten oxide เช่น $\text{K}_{5.7}\text{W}_{10}\text{O}_{30}$ ซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.17 จากรูปจะเห็นว่า B ไอออนจะจับกับออกซิเจนเป็น octahedron ซึ่งมี 2 ชนิด คือ octahedron ของ B_1 กับ octahedron ของ B_2 ต่อจากนั้น octahedron จะจับต่อกันเป็นโครงสร้างที่มีช่องว่างเป็นทางยาว (tunnels) 3 แบบ คือ แบบ A1 มี O^{2-} ไอออนล้อมรอบ 4 ตัว แบบ A2 เป็นช่องใหญ่สุดมี O^{2-} ล้อมรอบ 5 ตัว และแบบ A3 เป็นช่องเล็กที่สุดมี O^{2-} ล้อมรอบ 3 ตัว ปกติช่อง A3 ไม่มีไอออนไปอยู่ ยกเว้นแต่สารประกอบมีไอออนขนาดเล็กมาก ๆ เช่น Li^+ หรือ Mg^{2+} อยู่ด้วย อาจเขียนสูตรทั่วไปของสารประกอบพวกนี้ได้เป็น AB_2O_6



รูปที่ 2.17 โครงสร้างของ $\text{K}_{5.7}\text{W}_{10}\text{O}_{30}$ [13]

ข้อเสียของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดนี้ คือ สัณฐานทำให้มีความพรุนตัวน้อยกว่า 7% ได้ยาก

ส่วนข้อดีของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดนี้ มีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดูเป็นสงวนเนื้อหา และหาข้อสงสัยถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. มี Q_m สูง ทำให้ถูกนำไปใช้งานด้าน board-band
2. มี Tc สูง บางตัวยังมีโพลาริเซชันสูงทั้ง ๆ ที่ถูกให้ความร้อนขึ้นไปถึง 500°C
4. เตรียมได้ง่ายเพราะระหว่างเผาผนึก Pb มักไม่ค่อยระเหยออกไป

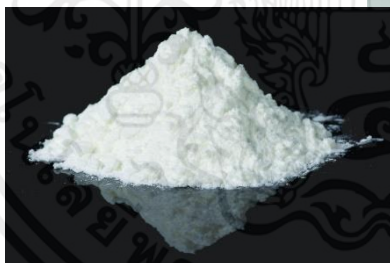
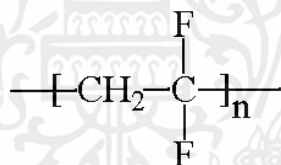
5. อาจแทนที่ Pb^{2+} บางส่วน ใน $PbNb_2O_6$ ด้วย Ba^{2+} ทำให้ได้ solid solution ของ $Pb_{1-x}Ba_xNb_2O_6$ ซึ่งมี MPB เหมือน ๆ PZT โดยที่ MPB อยู่ใกล้ ๆ กับจุด $Pb_{1/2}Ba_{1/2}Nb_2O_6$ ซึ่งมี $d_{33} \approx 220$ pC/N $Q_m \approx 300$ $T_c \approx 250^\circ C$

2.2 พอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ (Polyvinylidene difluoride)

2.2.1 สมบัติของพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์

พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (Polyvinylidene fluoride) หรือ พอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ (Polyvinylidene difluoride) เป็นเทอร์โมพลาสติก ซึ่งถูกสร้างจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของโมโนเมอร์ ไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ (Vinylidene difluoride) พอลิเมอร์ชนิดนี้ มีตัวย่อว่า PVDF [14]

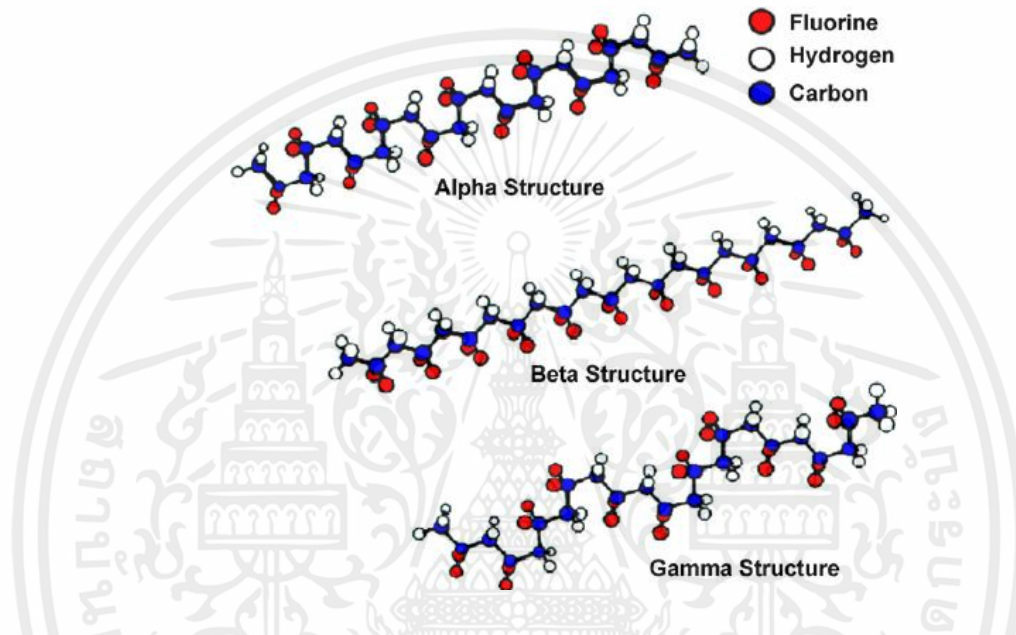
PVDF เป็นพลาสติกที่มีสมบัติพิเศษซึ่งถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่หลากหลาย PVDF ที่มีความบริสุทธิ์สูง มีความหนาแน่นต่ำ (1.78 g/cm^3) น้ำหนักเบา ได้รับความนิยมเนื่องจากสมบัติที่ต้านทานต่อตัวทำละลายหลายชนิด ทนสภาพกรด-เบส ได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ที่มีองค์ประกอบเป็นฟลูออรีนอื่นๆ เช่น พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene หรือ Teflon) เป็นต้น [14,15]



รูปที่ 2.18 พอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ และรูปแบบที่ใช้ในอุตสาหกรรม[14]

การขึ้นรูป PVDF มีความหลากหลาย สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุในงานต่อขนาดเล็ก ฟิล์ม แผ่น หรือแม้กระทั่งฉนวนบนสายไฟ พอลิเมอร์ชนิดนี้สามารถใช้วิธีการฉีดขึ้นรูป หล่อแบบ หรือ เชื่อมต่อได้ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางเคมี งานสารกึ่งตัวนำ งานสาธารณสุข และในเชิงอุตสาหกรรมได้ ในเชิงพลังงานสามารถใช้เป็นขั้วของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ในทางการแพทย์สามารถใช้เชื่อมต่อเซลล์ในลักษณะโพลีเมอร์พลาสติกได้ และยังสามารถใช้ในยานอวกาศและอากาศยานได้[14,15]

ในปี 1969 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกใน PVDF ได้ถูกค้นพบ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกของ PVDF มีค่าสูงถึง 6-7 pC/N ซึ่งมีค่ามากกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่นถึง 10 เท่า มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะอยู่ที่ $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งโดยปกติ พอลิเมอร์ชนิดนี้มีความเป็นผลึกอยู่ที่ 50-60% การที่จะแสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของพอลิเมอร์ชนิดนี้ออกมาได้จำเป็นต้องปรับโครงสร้างของพอลิเมอร์ชนิดนี้ เนื่องจาก PVDF เป็นพอลิเมอร์ที่มีหลายสัณฐานและหลายโครงสร้าง ซึ่งเป็นไปตามการจัดเรียงตัวของอะตอม H และ F ถูกแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะหลัก[15,16] คือ



รูปที่ 2.19 โครงสร้างของพอลิไวโนลิดีนไดฟลูออไรด์[15]

1. แบบแอลฟา ($\alpha - phase$) : มีการจัดเรียงตัวแบบ TGTG'TGTG'
2. แบบเบตา ($\beta - phase$) : มีการจัดเรียงตัวแบบ TTTTTTTT
3. แบบแกมมา ($\gamma - phase$) : มีการจัดเรียงตัวแบบ TTTGTTTG'

โดยที่ T หมายถึง การจัดเรียงแบบ Tran configuration และ G หมายถึง การจัดเรียงแบบ Gauche configuration[14]

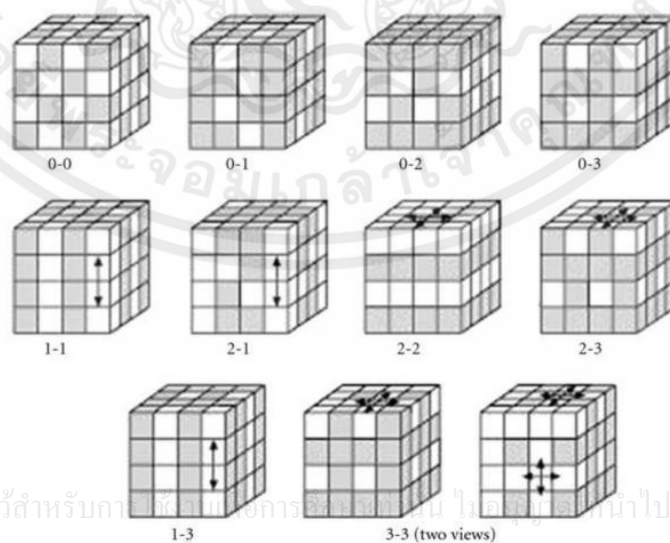
เมื่อข้อของ PVDF ได้รับการจัดเรียงจะสามารถแสดงสมบัติเพโรอิเล็กทริกเป็นแบบเพียโซอิเล็กทริกและไพโรอิเล็กทริกออกมาได้ แบบที่มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกอย่างชัดเจนคือการจัดเรียงแบบเบตา ($\beta - phase$) [16] ทำให้สามารถนำไปพัฒนาเป็นเซ็นเซอร์และแบริเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น ฟิล์มบาง PVDF ได้ถูกใช้เป็นตัวตรวจรู้ความร้อนในกล้องบางรุ่น สมบัติเพียโซอิเล็กทริกของ PVDF ไม่เหมือนกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ได้รับความนิยมอย่าง PZT เนื่องจากมี d_{33} ค่าต่ำกว่า PZT เป็นค่าลบ ซึ่งหมายความว่า เมื่อกด PVDF ด้วยทิศทางเดียวกันกับ PZT ใน PVDF จะเกิดสนามไฟฟ้าในทิศตรงกันข้ามกับใน PZT [15]

2.2.2 กระบวนการขึ้นรูปใช้งานพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์

PVDF เกิดจากการสังเคราะห์โพลีเมอร์ไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (VDF) ทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันบนอนุภาคลิโธส ส่วนกระบวนการขึ้นรูปใช้งานนั้นทำได้โดยการนำ PVDF ไปละลายด้วยความร้อน หรือในตัวทำละลาย ต่อมาจึงนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีต่างๆ เช่น การหล่อแบบ การหมุนเคลือบ เป็นต้น ในกรณีของกระบวนการขึ้นรูปด้วยสารละลาย PVDF ตัวทำละลายที่นิยมใช้คือ ไดเมทิลฟอมาไมด์ (Dimethylformamide; DMF) และตระกูลบิวทาโนน (Butanone) ส่วนสารละลายที่ทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้แข็งตัว นิยมใช้กรด Perfluorononanoic เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ที่มีฟลูออรีนชนิดอื่น PVDF มีกระบวนการละลายที่ง่ายกว่า มีจุดหลอมเหลวที่ประมาณ 177 °C

ในกระบวนการดังกล่าว จะให้ PVDF ที่มีการจัดเรียงในแบบแอลฟา (α - phase) ซึ่งไม่มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริก การจะทำให้ PVDF มีการจัดเรียงที่มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกนั้นต้องทำการเผาไหม้เพื่อให้ PVDF เปลี่ยนการจัดเรียงเป็นแบบเบตา (β - phase) फिल्म PVDF ที่มีความหนาในช่วงไมครอนมักนิยมใช้อีกวิธี เรียกว่าการโพลิ่ง (Poling) [18,19] เป็นการนำฟิล์มไปผ่านสนามไฟฟ้าแรงสูง มากกว่า 30 MV/m ในกระบวนการนี้ ฟิล์ม PVDF ไม่ควรมีความหนาเกิน 100 ไมครอน [20] ถ้ามีความหนามากกว่า ควรให้อุณหภูมิ 70-100 °C ขณะทำการโพลิ่ง [15,18]

PVDF อาจนำไปใช้ในรูปคอมโพสิตกับเซรามิก การนำไปทำคอมโพสิตจะทำให้วัสดุผสมมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นเพราะนำข้อดีของวัสดุมารวมกัน การทำคอมโพสิตที่นิยมจะมี 2 แบบคือ แบบ 0-3 และแบบ 1-3 คอมโพสิต สำหรับแบบ 0-3 คอมโพสิต [19] คือ คอมโพสิตที่มีเซรามิกเป็น active phase มี connectivity 0 ทิศทางและพอลิเมอร์เป็น passive phase มี connectivity 3 ทิศทาง ส่วนแบบ 1-3 คอมโพสิตเป็นคอมโพสิตที่เซรามิกเป็น active phase มี connectivity 1 ทิศทางและพอลิเมอร์ที่เป็น passive phase มี connectivity 3 ทิศทาง [20] ดังแสดงในรูปที่ 2.20



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่ขอเผยแพร่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.20 connectivity ของวัสดุประกอบ[8]

2.3 ระบบการขึ้นรูปเส้นใยนาโนโดยใช้เทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

2.3.1 เส้นใยนาโนและวิธีการขึ้นรูปทั่วไป

นาโนไฟเบอร์ที่มีการนำไปใช้ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของผืนเส้นใยที่ไม่ได้ทอ (Non-woven nanofiber) แต่ก็มีนาโนไฟเบอร์อีกหลายลักษณะ เช่น นาโนไฟเบอร์ที่มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยไปในทิศทางเดียวกัน (Aligned nanofiber) [21] หรืออยู่ในลักษณะของเส้นด้าย (Yarn nanofiber) เป็นต้นซึ่งรูปแบบต่างๆ[22] ของนาโนไฟเบอร์นั้นขึ้นกับกระบวนการผลิต

กระบวนการผลิตนาโนไฟเบอร์มีหลายวิธี[21-26] ได้แก่

1. Drawing
2. Template Synthesis
3. Phase Separation
4. Self-Assembly
5. Electrospinning

Drawing

เป็นกระบวนการผลิตนาโนไฟเบอร์ที่ค้นพบโดย Ondarcuhu and Joachim ในปี 1998 วิธีการคือ หยดสารละลายของ sodium citrate ใน chloroauric acid ในขนาดไมโครเมตรใช้ ไมโครปิเปต จุ่มลงในหยดของสารใกล้กับ contact line จากนั้นดึงไมโครปิเปตออกอย่างรวดเร็วโดยใช้ความเร็วประมาณ $1 \times 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$ เส้นใยนาโนจะถูกดึงออกมา พร้อมๆ กับการระเหยไปของตัวทำละลาย [21] เทคนิคนี้ จะต้องมีการทำซ้ำหลายครั้งจึงจะได้เส้นใยนาโนในปริมาณที่มากพอต่อการนำไปใช้ ระบบจึงไม่สามารถทำได้อย่างต่อเนื่อง ในกระบวนการ drawing จะต้องใช้วัสดุที่มี viscoelastic เพียงพอต่อการเปลี่ยนรูปร่างในระหว่างการดึง โดยเทคนิคนี้มักจะเรียกได้อีกชื่อว่า dry spinning at a molecular level

Template Synthesis

เป็นกระบวนการผลิตเส้นใยนาโนที่ใช้ แม่พิมพ์ที่ประกอบด้วยรูที่มีขนาดในระดับนาโนเมตร Feng และคณะ ปี 2002 ใช้ Polyacrylonitrile ละลายใน Dimethylformamide นำมาผ่านแม่พิมพ์เส้นผ่าศูนย์กลางระดับนาโนเมตร ภายใต้แรงดันน้ำ สารละลายพอลิเมอร์จะออกมาเป็นเส้นใยขนาดนาโนเมตร เข้าสู่ solidifying solution กระบวนการนี้ลักษณะเส้นใยที่ได้จะเป็นรูปท่อหรือหลอด ที่มีลักษณะไม่ต่อเนื่อง จึงเป็นวิธีที่ไม่ได้รับความนิยม[22]

Phase separation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สนใจสำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น ในกระบวนการนี้ มีหลักการคือพอลิเมอร์จะละลายในตัวทำละลายที่ละลายพอลิเมอร์ได้ก่อน และจึงเปลี่ยนตัวทำละลายที่พอลิเมอร์นั้นละลายได้ไม่ตีสองไปทำให้เกิดเป็นเส้นใยนาโนขึ้น[23]

Ma and Zhang ค.ศ.1999 ได้ทำการศึกษา แบ่งกระบวนการออกเป็น

1. Polymer dissolution ละลาย Poly (L-lactic) acid PLLA ใน THF (tetrahydrofuran) คนที่ 60 °C 2 ชั่วโมง
2. Gelation เท 2 ml ของสารละลาย 50 °C ใน Teflon vial ย้ายไปเก็บที่อุณหภูมิ -18 °C to 45 °C ทำให้เกิดการฟอร์มเจล
3. Solvent extraction นำ vial ที่มี เจลจุ่มลงในน้ำกลั่น ทำให้เกิดการแยกวัฏภาค เป็นเวลา 2 วัน
4. Freezing นำเจลออกจากน้ำ กดลงบนกระดาษกรองให้แห้ง นำไป ไว้ที่อุณหภูมิ -18 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
5. Freezing dry นำเจลไป freeze-dried ที่ -55 °C ใน vacuum

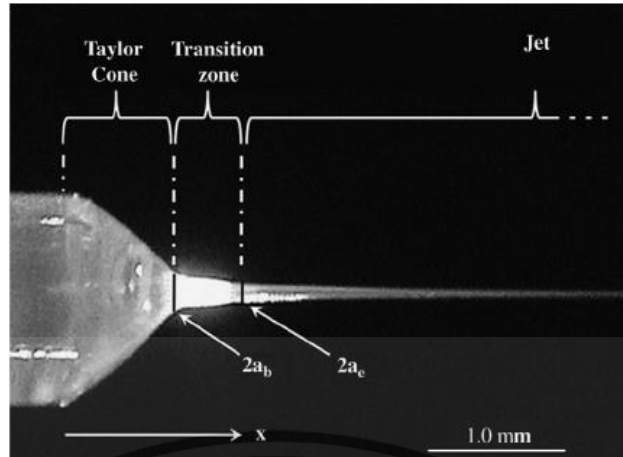
Self-Assembly

กระบวนการผลิตเส้นใยนาโนที่เกิดขึ้นได้เองจากสภาวะที่เหมาะสม โดยใช้โมเลกุลขนาดเล็กเป็นพื้นฐานในการสร้างเส้นใยนาโน เมื่อมีโมเลกุลมากขึ้นทำให้เกิดแรงระหว่างกันเกิดการจัดเรียงตัวดังรูปที่ 5 Zhang ซึ่งเป็นหนึ่งในที่วิจัยได้ศึกษาเกี่ยวกับประโยชน์ต่าง ๆ ของ สายเปปไทด์ที่สามารถประกอบตัวเองได้ (Peptide self-assembling) จนกระทั่งในปี 1991 ได้ค้นพบด้วยความบังเอิญว่าเมื่อสายเปปไทด์อยู่ในสารละลายน้ำเกลือ[24] จะเกิดการจับกันเป็นโครงร่าง โดยมีอัตราส่วนของโครงร่าง คือ เป็นน้ำ 99 % และ 1% เป็นสายเปปไทด์ สายเปปไทด์นี้ประกอบด้วยกรดอะมิโน 3 ชนิดคือ อาร์จินิน (Argenine) อะลานิน (Alanine) และ กรดกลูตามิก (Glutamic acid) 16 โมเลกุลเรียงเข้าไปมาและมีโครงร่างแบบเบตา

2.3.2 หลักการของเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นมามากกว่า 60 ปีแต่เพิ่งได้รับความ สนใจศึกษากันอย่างจริงจังเมื่อไม่กี่ 10 ปี ที่ผ่านมาในปีค.ศ. 1934 Formhals ได้จดสิทธิบัตร กระบวนการ และเครื่องมือที่ใช้แรงทางไฟฟ้าในการสังเคราะห์เส้นใย ในปีค.ศ. 1969 Taylor ได้พิมพ์ผลงานที่อธิบายถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในขณะที่สารละลายพอลิเมอร์พุ่งออกจากเข็มโลหะจากการให้ ศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง ทำให้รูปร่างของสารละลายจากทรงกลมมีลักษณะเป็น สามเหลี่ยมคล้ายโคน เมื่อแรงสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับแรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์ ซึ่งต่อมามี การเรียกลักษณะนี้ว่า Taylor cone การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็น Taylor cone จะขึ้นกับความหนืด ของสารละลายพอลิเมอร์ [25-27]

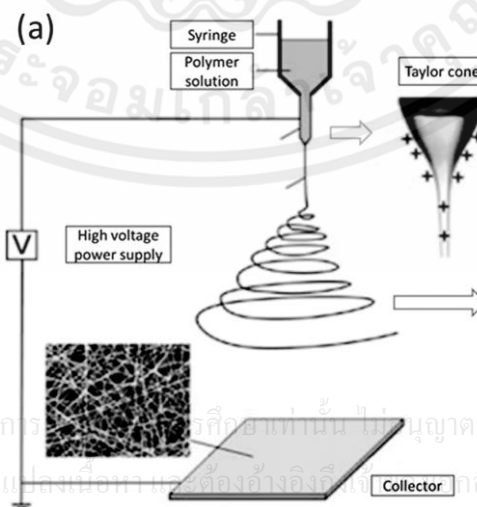
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 รูปร่างของกรวยเทเลอร์[27]

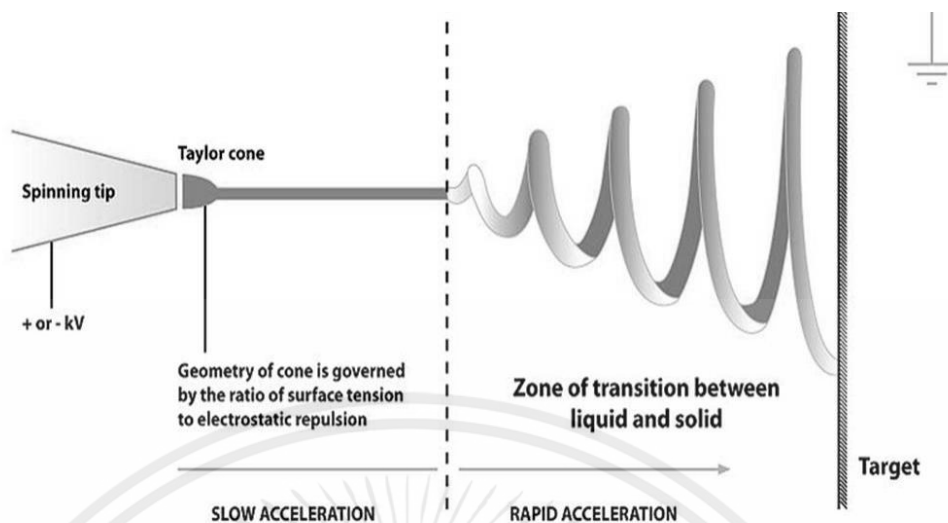
ในปีค.ศ. 1971 Baumgarten เริ่มศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงสารละลาย พอลิเมอร์และพารามิเตอร์ในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ทำให้รู้ว่าพารามิเตอร์ต่างๆ มีผลต่อสัญญาณวิทยาของเส้นใยที่ได้ในปี ค.ศ. 1995 Reneker ได้ศึกษาอย่างเป็นระบบมากขึ้น ทำให้การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตได้รับความสนใจจากนักวิจัยต่างๆ ทั่วโลก เห็นได้จากจำนวนผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติเรื่องต่างๆ[22] ที่เกี่ยวกับการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตมี แนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นทางเลือกใหม่ที่สามารถใช้เตรียมเส้นใยจากวัสดุพอลิเมอร์และสารอินทรีย์ออกไซด์หลากหลายชนิด สามารถประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์[23] เกสัชกรรม[27] และทางด้านอื่นๆ[28-30] อีกมากมาย ซึ่งเทคนิคนี้เป็นวิธีผลิตเส้นใยให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระดับนาโนเมตรไปจนถึงมากกว่าไมโครเมตร โดยอาศัยแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากความต่าง ศักย์ไฟฟ้า

สำหรับระบบพื้นฐานมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ 3 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง (High voltage power supply) หลอดบรรจุสารละลายที่ติดปลายเข็มโลหะ (Syringe with metal needle) และวัสดุรองรับที่เป็นโลหะ (Metal collector) หลักการการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต [22,23]



รูปที่ 2.22 ระบบการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต[23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกร... ซึ่งคือว่าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก... เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 ลักษณะของการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต[23]

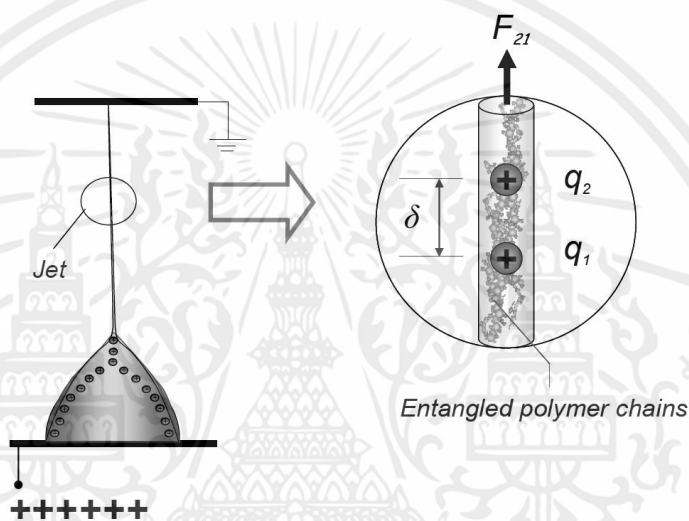
เริ่มจากการให้ศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูงแก่สารละลายพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ที่หลอมเหลวผ่านเข็มโลหะกลวงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก ทำให้เกิดแรงผลักทางไฟฟ้าในสารละลายพอลิเมอร์ เมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น หยดสารละลาย รูปทรงกลมบนปลายเข็มจะเริ่มเปลี่ยนรูปร่างเป็นรูปโคน (แรงผลักทางไฟฟ้ามีค่าเท่ากับแรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์)[29] และเมื่อแรงผลักทางไฟฟ้ามีค่ามากกว่าแรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์ สารละลายจะพุ่งออกจากปลายของโคนไปยังวัสดุรองรับ ซึ่งต่อเข้ากับศักย์ไฟฟ้า แรงดันต่ำ ทำให้เกิดเป็นสนามไฟฟ้าระหว่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับ สารละลายจะพุ่งเป็นแนวตรงในระยะหนึ่ง และจะผ่านเข้าไปในส่วนของการ whipping instability ซึ่งจะเกิดการระเหยของตัวทำละลายกลายเป็นเส้นใยขนาดเล็กตกซ้อนทับกันบนวัสดุรองรับในลักษณะไม่ได้ทอ (Non-woven)[31] ในส่วนของเข็มฉีดยาบรรจุสารละลายพอลิเมอร์ จะต้องมีการควบคุมให้มีอัตราการไหลที่สม่ำเสมอโดยวิธีต่างๆ เช่น แรงโน้มถ่วงของโลก (gravitational force) บั๊ม (syringe pump) แรงดันก๊าซ (pressure gas) เป็นต้น ในส่วนของวัสดุรองรับก็มีหลายชนิด เช่น เพลท (stationary plate) ทรัม (rotating drum) เป็นต้น จากการศึกษาของนักวิจัยได้มีการใช้พอลิเมอร์ชนิดต่างๆ มากกว่า 50 ชนิด มาทำการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต [25-35]

2.3.3 ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเกิดเส้นใยในการขึ้นรูป

แม้กระบวนการผลิตเส้นใยโดยเทคนิคการปั่น ด้วยไฟฟ้าสถิต จะใช้อุปกรณ์ง่ายๆ เพียงไม่กี่ชิ้นตามที่ได้ อธิบายไปแล้ว แต่กลไกการเกิดเส้นใยนั้นมีความซับซ้อน เพราะการสร้างเส้นใยให้มีลักษณะที่สมบูรณ์ตาม ต้องการต้องอาศัยความสมดุลระหว่างแรงทางไฟฟ้า[23] แรงตึงผิวและแรงต้านจากความหนืดของสารละลาย อัตราการระเหยของตัวทำละลาย ในส่วนย่อยนี้จะได้ อธิบายถึงปัจจัยหลักที่มีผลสำคัญต่อลักษณะของเส้นใยนาโนที่ผลิตโดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต[31]

2.3.3.1. ความเข้มข้นของพอลิเมอร์

เราสามารถกล่าวได้ว่า ความเข้มข้นของพอลิเมอร์ในสารละลายมีความสำคัญเป็นอันดับต้นๆ ต่อ ลักษณะเส้นใย ทั้งในเรื่องของขนาด และสัณฐานของ เส้นใย ความเข้มข้นของพอลิเมอร์ในสารละลายมีผล โดยตรงต่อความหนืดของสารละลาย และความหนืดนี้[32,33] เองที่จะเป็นปัจจัยหนึ่งส่งผลต่อลักษณะเส้นใย ตามที่ได้อธิบายแล้วว่า ในขณะที่ Polymer jet อยู่ในอากาศ จะมีแรงทางไฟฟ้าที่ยึดสาย Polymer jet ออกให้มี ขนาดเล็กลง หากสารละลายมีความหนืดที่ต่ำเกินไป แรงทางไฟฟ้าอาจจะทำให้สาย Polymer jet แยกออกจากกันกลายเป็นหยดเล็กๆ แทนที่จะเป็นสายต่อเนื่องกันก็เป็นได้[37]



รูปที่ 2.24 หลักการเกิด Polymer jet[37]

ในทางตรงกันข้าม หากความหนืด ของสารละลายมากเกินไป ความหนืดจะต้านไม่ให้ Polymer jet ถูกยืดออกได้ง่ายนัก ผลก็คืออาจได้เส้นใย ที่มีขนาดใหญ่เกินไป ดังนั้น การเตรียมสารละลายที่ ความหนืดที่เหมาะสมจะช่วยให้ได้เส้นใยที่มีลักษณะ ต่อเนื่องไม่ขาดและมีขนาดที่ต้องการ แต่คำถามที่สำคัญก็คือ แล้วจะเตรียมสารละลายให้มีความหนืดเท่าไรจึงจะเหมาะสม[36]

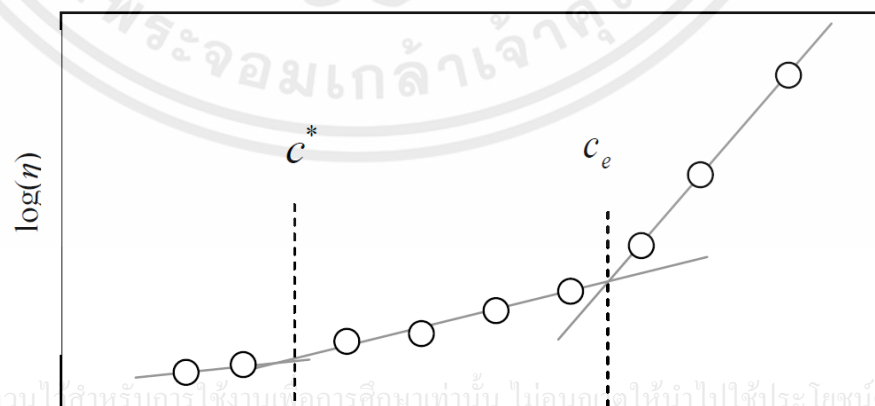
เพื่อตอบคำถามนี้ เราจำเป็นต้องเข้าใจถึง ความหมายของคำว่า Polymer chain entanglement (PCE) ซึ่งแปลตรงๆ ได้ว่าการเกี่ยวพันกันของสายพอลิเมอร์ ปรากฏการณ์ PCE เป็นปรากฏการณ์ที่สายพอลิเมอร์ในสารละลายมีการเกี่ยวพันกันทางกายภาพ ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความหนืดอย่างรวดเร็ว ซึ่ง PCE จะเกิดก็ต่อเมื่อความเข้มข้นของพอลิเมอร์ใน สารละลายมีค่าสูงเกินค่าๆ หนึ่งเท่านั้น ตัวอย่างที่ ผู้เขียนมักใช้เพื่ออธิบายให้เห็นถึงผลของ PCE อย่างง่ายๆ คือ ให้ลองนึกถึงแก้วที่มีน้ำเฉาก๊วยที่มีปริมาณเส้น เฉาก๊วยแตกต่างกัน ในตอนเริ่มต้นมีเส้นเฉาก๊วยอยู่ เล็กน้อยถ้าไม่ว่ากรณีใดๆ ประมาณ 3-4 เส้น หากเอ้าหลอดกาแฟ คนในจะพบว่าแทบจะไม่มีแรงต้านทานเลย สารละลาย ที่มีสภาพเช่นนี้เรียกว่าสารละลายเจือจาง (Dilute solution) เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นเข้าไป

เรื่อยๆ จะพบว่าคนหลอดได้ยากขึ้นเนื่องจากเส้นเชือกัวเริ่มต้านการ เคลื่อนที่มากขึ้น แต่ยังไม่พบว่า เส้นเชือกัวมีการ เกี่ยวพันกันเนื่องจากปริมาณเส้นน้อยเกินไป สารละลายที่มีสภาพเช่นนี้เรียกว่า สารละลายกึ่งเจือจางชนิดไม่เกี่ยวพัน (Semi-dilute entangled solution) หาก ยังเพิ่มเส้นเชือกัว ลงไปอีก จะเริ่มสังเกตเห็นว่าเส้น เชือกัวเกี่ยวพันกันจนคนได้ยากยิ่งขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์ นี้เปรียบเสมือนสารละลายที่มีพอลิเมอร์เข้มข้นมาก เพียงพอจนเกิด PCE ซึ่งสารละลายที่มีสภาพเช่นนี้ เรียกว่าสารละลายกึ่งเจือจางชนิดเกี่ยวพัน (Semi-dilute entangled solution) แต่หากยังคงเพิ่ม ปริมาณเส้นต่อไป เส้นเชือกัวจะเกี่ยวพันกันจน กลายเป็นก้อนใหญ่ ทำให้น้ำเชือกัวทั้งหมด (รวม เส้น ด้วย) มีความหนืดมากจนใช้หลอดคนได้ยากขึ้น ซึ่งในจุด นี้เปรียบเสมือนการเกิดก้อนเจลใน สารละลายที่มีความเข้มข้นมากเกินไปนั่นเอง[37] ภาพจำลองในรูปที่ 2.24 แสดงความสำคัญของ PCE ในกระบวนการการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ในการช่วยป้องกันไม่ให้สาย Polymer jet ขาด ออกจาก กันเนื่องจากแรงผลัทางไฟฟ้าระหว่างประจุ q_1 และ q_2 ซึ่งมีขั้วเหมือนกันและอยู่ห่างกันเป็น ระยะทางเท่ากับ δ

สำหรับหลักการสำหรับการพิจารณาว่า สารละลายอยู่ในสถานะใดนั้น สามารถทำได้โดยการ หาความหนืดของสารละลายที่ความเข้มข้นพอลิเมอร์ระดับ ต่างๆ[38] ตามตัวอย่างที่แสดงใน รูปที่ 2.25 โดยความหนืด (η) ของสารละลาย กับความเข้มข้นของพอลิเมอร์ (c) จะมีความสัมพันธ์การตาม สมการ 2.17

$$\eta \sim c^n \quad (2.17)$$

โดยดัชนี n หาได้จากความชันของกราฟในรูปที่ 2.25 และมีค่าประมาณ 1, 1.25 และ 4 สำหรับสารละลายเจือจาง (dilute solution) กึ่งเจือจางชนิดไม่เกี่ยวพัน (semi-dilute unentangled solution) และกึ่งเจือจางชนิดเกี่ยวพัน (semi-dilute entangled solution) ตามลำดับ[39]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่ควรเผยแพร่ให้ผู้อื่นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้าง $\log(c)$ เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.25 กราฟการหาความเข้มข้นของสารละลาย[39]

กรณีที่สารละลายที่มีความเข้มข้นพอลิเมอร์สูง ไปหรือสารละลายถูกเตรียมในตัวทาละลายที่ระเหยง่าย นั้น อาจทำให้เกิดปัญหาที่เรียกว่า Clogging ซึ่งหมายถึง การอุดตันของสารละลายที่ปลายหัวฉีดเมื่อทำการผลิต เส้นใยไประยะเวลาหนึ่ง ทำให้ไม่สามารถทำการผลิต ต่อไปได้จนกว่าจะทำความสะอาดบริเวณที่เกิดการอุดตันก่อน ปัญหานี้ อาจแก้ได้โดยการใช้เทคนิคที่เรียกว่า Solvent coating ซึ่งเป็นการจ่ายตัวทำละลาย เพิ่มเติมที่บริเวณปลายหัวฉีดเพื่อชดเชยกับปริมาณตัว ทำละลายที่สูญเสียจากการระเหยออกไปนั่นเอง หากปริมาณที่ชดเชยเข้ามามีความเหมาะสม จะทำให้การผลิตเป็นไปได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการอุดตัน[36]

2.3.3.2. แรงดันไฟฟ้า

โดยปกติ แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตเส้นใย นาโนจะมีค่าประมาณ 6-20 กิโลโวลต์ การเพิ่ม แรงดันไฟฟ้าจะทำให้ เกิดผลที่เป็นไปได้สองประการคือ

1. การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเป็นการเพิ่มความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าใน Polymer jet ซึ่งจะ ทำให้ เกิดแรงผลักกันของประจุไฟฟ้า) หรือแรงคูลอมบ์ (สูงขึ้น ทำให้ Polymer jet ถูกยืดออกมากขึ้น เป็นผลให้เส้นใย นาโนที่ผลิตได้จึงมักมีขนาดที่เล็กลง [34]

2. การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเป็นการเพิ่มความเข้ม สนามไฟฟ้าในบริเวณระหว่างปลายหัวฉีดกับแผ่นเก็บ เส้นใย ทำให้ Polymer jet พุ่งไปที่แผ่นเก็บเส้นใยด้วย ความเร็วที่สูงขึ้น ทำให้เวลาลอยตัว ในอากาศ (Flying time) สั้นลง จึงทำให้โอกาสในการยึดตัวของเส้นใยมี น้อยลง เส้นใยนาโนที่ผลิตได้ จึงอาจมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น [38]

เนื่องจากผลที่ตรงกันข้ามกันที่เกิดขึ้นในเวลา พร้อมๆ กันทั้งสองประการข้างต้น จึงเป็นการยากที่จะ สรุปว่า การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจะส่งผลให้ขนาดเส้นใยเล็ก หรือใหญ่ขึ้น หากผลของแรงดันไฟฟ้าต่อการยึดตัวของ เส้นใยมีมากกว่าผลต่อความเร็วในการพุ่งตัวของ Polymer jet เส้นใยก็จะมีขนาดเล็กลง หรือในทางกลับกัน หากเส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้นก็แสดงว่าผลของแรงดันไฟฟ้าต่อการลดเวลา Flying time มีมากกว่านั่นเอง [32]

ในกรณีที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงเกินไป อาจทำให้เกิดผลอย่างน้อย 4 ประการ คือ ประการแรก แรง คูลอมบ์อาจมีค่าสูงมากกว่าแรงหนีตของสารละลายที่พยายามยึด Polymer jet เอาไว้ ทำให้ Polymer jet เกิดการขาดแยกเป็นเส้นใยสั้นๆ หรือเป็นหยดเกิดที่แผ่นเก็บเส้นใย รวมทั้งอาจทำให้เส้นใยมีการกระจายขนาดที่กว้างขึ้นกว่าปกติ[23] ประการที่สองคือ แรงดันไฟฟ้าที่สูงไปอาจทำให้ อัตราการไหลของมวลของสารละลายที่พุ่งออกเป็น Polymer jet มีค่ามากกว่าอัตราการไหลของมวลสารละลายที่ปั๊มส่งมาที่ปลายหัวฉีด ซึ่งทำให้ Taylor cone ค่อยๆ เล็กลงจนแห้งไปทำให้การผลิตไม่เสถียร[31] ประการที่สามคือ แรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นอาจเร่งให้ตัวทำละลายระเหยเร็วขึ้นเนื่องจากผลของ Joule heating จนอาจเกิดการอุดตันที่ปลายหัวฉีดได้ในที่สุด[34] และประการสุดท้าย Polymer jet อาจถูกเร่งด้วยความเร็วสูงไปที่แผ่นเก็บเส้นใยทำให้ Flying time มีน้อยจนตัวทำละลายไม่สามารถระเหยออกจาก Polymer jet ได้ทันก่อนที่จะกระทบแผ่นเก็บเส้นใย ผลคือทำให้

เกิดลักษณะที่ไม่พึงประสงค์คือเส้นใยเปื่อยขึ้นเกาะกันเป็นจุดๆ แบบสุ่มซึ่งจะเห็นได้ชัดด้วยภาพที่ได้จากกล้อง SEM ทำให้ฟิล์มมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ พร้อมกับการลดลงของความพรุน และการเก็บฟิล์มทำได้ลำบากเพราะจุดที่ขึ้นจะเป็นเสมือนกาวยึดฟิล์มให้ติดแน่นกับแผ่นเก็บเส้นใย[38]

2.3.3.3. อัตราการไหลของสารละลาย และระยะห่างระหว่างปลายหัวฉีดกับแผ่นเก็บเส้นใย

แม้ผลของอัตราการไหลของสารละลาย และระยะห่างระหว่างปลายหัวฉีดกับแผ่นเก็บเส้นใยต่อลักษณะเส้นใยที่มีผลจะไม่เด่นชัดเท่ากับผลของแรงดันไฟฟ้า อย่างไรก็ตามผู้ที่ทำการผลิตเส้นใยด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ก็ไม่ควรมองข้ามผลของปัจจัยทั้งสอง โดยการเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายมีผลให้ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าต่อปริมาตรต่อเวลาลดลง จึงทำให้แรงผลักทางไฟฟ้าของคูลอมบ์มีขนาดน้อยลง จึงมักทำให้เส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ส่วนการลดของระยะห่างระหว่างปลายหัวฉีดกับแผ่นเก็บเส้นใยก็ทำให้ความเข้มข้นสนามไฟฟ้ามากขึ้น ซึ่งจะให้ผลคล้ายกับการเพิ่มของแรงดันไฟฟ้านั้นเอง[37,39]

2.3.3.4. ปัจจัยอื่นๆ

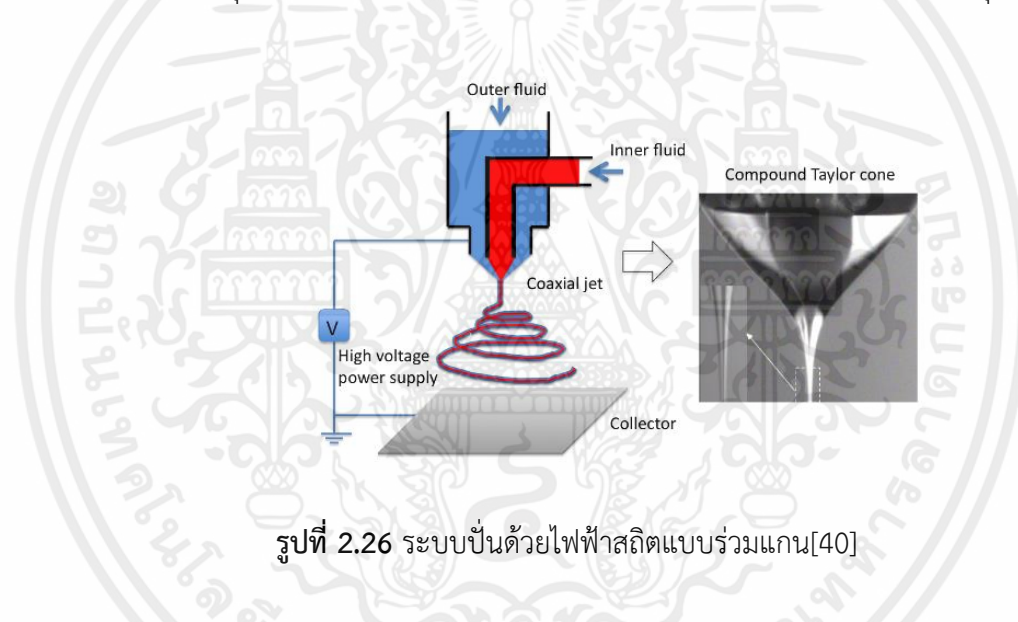
ยังมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อลักษณะเส้นใยนอกจากปัจจัยที่ได้กล่าวถึงแล้วในข้างต้น เช่น ชนิดของตัวทำละลาย วัสดุที่ใช้ทำแผ่นเก็บเส้นใย รวมไปถึงลักษณะและรูปร่างของแผ่นเก็บเส้นใย ความชื้นและอุณหภูมิของสภาพแวดล้อม เงื่อนไขและวิธีการที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย เป็นต้น ตัวอย่างที่น่าสนใจที่จะกล่าวในที่นี้คือ การใช้แผ่นเก็บเส้นใยที่มีรูปทรงกระบอกแบบหมุนได้ (Rotatable cylindrical collector) จะช่วยให้ชั้นของเส้นใยมีลักษณะการเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากขึ้นตามแนวการหมุน ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติทางกลของฟิล์มในแนวการหมุนด้วย หรืออีกเทคนิคหนึ่งที่นิยมใช้ในการผลิตเส้นใยจากสารละลายที่มีความหนืดสูงคือการติดแผ่นทำความร้อนไว้ที่กระบอกฉีดเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายเพื่อให้ความหนืดของสารละลายลดลงจนถึงค่าที่เหมาะสมต่อการผลิตเส้นใย[25]

2.3.4 การพัฒนาระบบการขึ้นรูปเส้นใยโดยวิธีปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

การพัฒนาระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตที่มีความซับซ้อนมากขึ้น มีความสำคัญและกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นหัวข้อวิจัยด้านการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตที่มีผลกระทบและมีคุณค่าทางวิชาการทั้งในปัจจุบันและในอนาคตอันใกล้ ระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตขั้นสูงนี้ เช่น ระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน (coaxial-electrospinning, Coax-ES) ระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบหลอมละลาย (melt-electrospinning, Melt-ES) ระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบสนามใกล้ (near-filled electrospinning, NF-ES) และระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบใช้สนามแม่เหล็กร่วม (magneto-electrospinning, Magneto-ES) จะกล่าวถึงรายละเอียดเป็นบางระบบ[25,40-43]

2.3.4.1. ระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน (Coaxial-electrospinning)

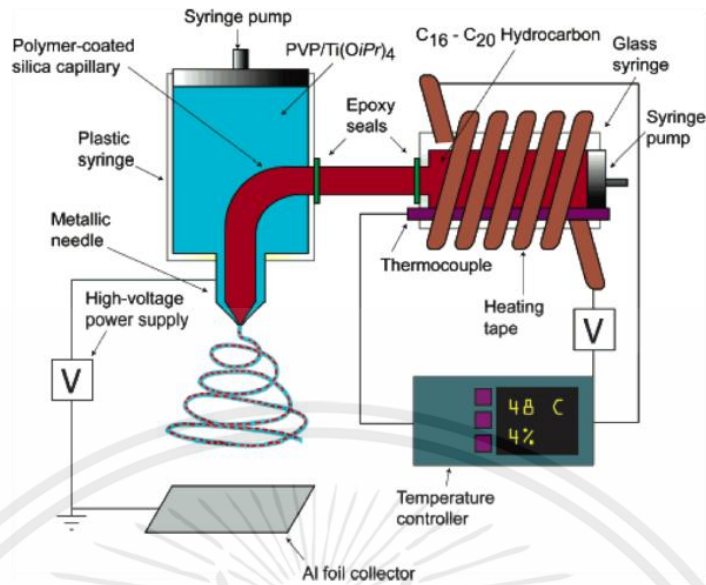
ในการทำให้เส้นใยนาโนมีหน้าที่หรือสมบัติพิเศษเฉพาะตัว (functionalization) โดยการรวมเอาโมเลกุล สารวัตถุหรือส่วนประกอบอื่น (โดยเฉพาะในด้านเทคโนโลยีเซนเซอร์ วิศวกรรมเนื้อเยื่อ การนำส่งยา และนาโนอิเล็กทรอนิกส์) เข้ากับเส้นใยนาโน ในหลายกรณีไม่สามารถทำได้โดยการใช้เทคนิคปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตอย่างง่าย ทั้งนี้เนื่องจากมีปัญหาที่สำคัญอยู่ 2 ประการ คือ หนึ่ง ปัญหาความต้องการในการเก็บสารที่อยู่ร่วมกับเส้นใยนาโน (เช่น โมเลกุลชีวภาพ ได้แก่ เอนไซม์ โปรตีน ยา ไวรัส และแบคทีเรีย) ในสภาวะแวดล้อมของเหลว เพื่อที่จะคงสภาพหน้าที่หรือสมบัติเดิมของมันนั้นทำได้ยาก สอง ปัญหาเรื่องน้ำหนักโมเลกุลของวัสดุที่จะใช้เป็นส่วนแกนในของเส้นใย (core fiber) ซึ่งส่วนมากจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำมาก ทำให้การทำเส้นใยโดยเทคนิคปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นไปได้ยาก อย่างไรก็ตามปัญหาทั้งสองข้อนี้สามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้เทคนิค “ปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน” ซึ่งในปัจจุบันได้เริ่มมีการศึกษาและรายงานการวิจัยทางด้านนี้แล้วจากหลายกลุ่มวิจัย[40]



รูปที่ 2.26 ระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน[40]

2.3.4.2. ระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบหลอมละลาย (Melt-electrospinning)

ปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบหลอมละลายเป็นการประดิษฐ์เส้นใยนาโนด้วยเทคนิคปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากพอลิเมอร์ที่หลอมละลายโดยไม่ใช้ตัวทำ ดังนั้น ข้อดีของการประดิษฐ์เส้นใยนาโนแบบนี้คือเป็นกระบวนการเตรียมเส้นใยที่ง่าย กำล้างการผลิตสูง ต้นทุนต่ำและช่วยลดความเสี่ยงจากการได้รับสารพิษจากตัวทำละลาย จึงเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างดี เหมาะที่จะใช้ในการเตรียมเส้นใยนาโนสำหรับประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ อย่างไรก็ตาม เทคนิคปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบหลอมละลายนี้มีข้อจำกัดตรงที่เส้นใยที่เตรียมมีขนาดใหญ่และยังไม่สามารถเตรียมเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 400 นาโนเมตรและมีการกระจายตัวที่แคบได้ มีการเทคนิคปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบหลอมละลายนี้ในการเตรียมเส้นใยพอลิเมอร์แล้ว[41] อย่างไรก็ตามถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

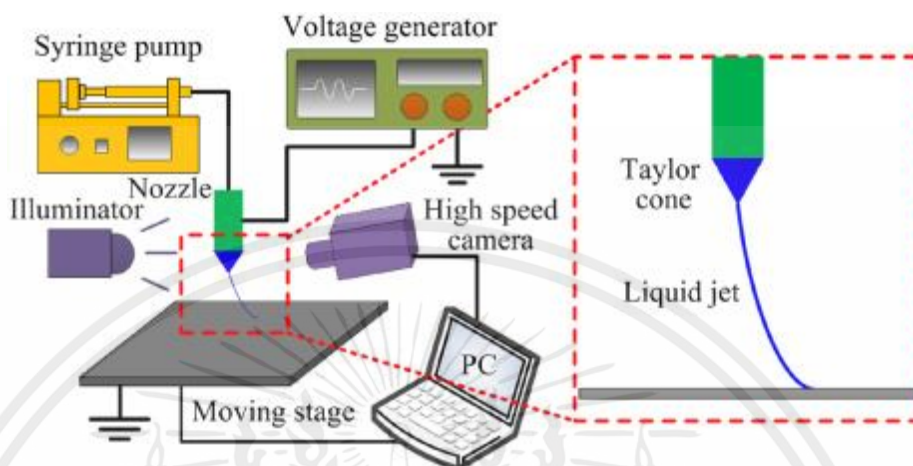


รูปที่ 2.27 ระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบหลอมละลาย[41]

2.3.4.3. ระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตสนามใกล้ (Near-field electrospinning)

เทคนิคปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบสนามใกล้ มีการรายงานขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Sun และคณะ แห่งมหาวิทยาลัย Xiamen ประเทศจีน งานวิจัยนี้เป็นการค้นพบนวัตกรรมใหม่ระดับ breakthrough ของการวิจัยทางด้านเทคนิคปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตเพื่อประดิษฐ์เส้นใยนาโนของแข็งในรูปแบบ ที่สามารถกระทำ/เขียนเป็นเส้นได้โดยตรง โดยที่เส้นใยมีความต่อเนื่อง และสามารถควบคุม การเกิด/จัดเรียงตัวของเส้นใยนาโนได้อย่างแม่นยำ เทคนิคนี้แตกต่างจากเทคนิคปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต แบบมาตรฐาน (ดั้งเดิม) ซึ่งเป็นกระบวนการที่เส้นใยนาโนเกิดขึ้นแบบสุ่มและไม่เป็นระเบียบ เทคนิค ปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบสนามใกล้แสดงเป็นแผนภาพดังในรูปที่ 2.28 ในกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต แบบสนามใกล้ ปลายของเข็มทั้งสองเสตนต้น (เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25 ไมโครเมตร) ถูกใช้เป็น อิเล็กโทรดและจุ่มลงไปในสารละลายพอลิเมอร์เพื่อให้เกิดหยดของสาร ละลายพอลิเมอร์ติดอยู่ที่ ปลายของทั้งสองเสตนซึ่งเชื่อมกับส่วนของแหล่งกำเนิด ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงที่ ปลายของทั้งสองเสตน ซึ่งมีหยดของสารละลายพอลิเมอร์ติดอยู่ พบว่า หากสนามไฟฟ้ามีความมากพอที่จะ ทำให้เกิดแรงผลักมากกว่าแรงตึงผิว จะส่งผลให้รูปร่างครึ่งทรงกลมของสารละลายที่อยู่ปลายทั้งสองเสตน ยึดออกเป็นรูป ร้างทรงกรวย เรียกว่า กรวยของเทเลอร์ และเมื่อสนามไฟฟ้าที่ให้กับระบบมีค่าเพิ่ม สูงขึ้นจนกระทั่งถึงค่าวิกฤตค่า หนึ่งจะเกิดแรงขับเคลื่อนให้สารละลายพอลิเมอร์พุ่งออกมาเป็นลำ ต่อมา ลำของสารละลายนี้จะยึดออกจนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กถึงระดับนาโน เมตร แล้วตกลงบน วัสดุรองรับที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็วซึ่งจะทำให้ได้ เส้นใยที่มีความต่อเนื่อง และสามารถ ควบคุมการเกิด/จัดเรียงตัวของเส้นใยนาโนได้อย่างแม่นยำ จะเห็นว่ากระบวนการที่เกิดขึ้นจะมีความ คล้ายกับเทคนิคปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบดั้งเดิมดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนแรก ต่างกันที่แผ่นรองรับจะ

อยู่ใกล้ปลายเข็มมากจึงสามารถใช้ศักย์ไฟฟ้ากำลังต่ำ ขนาดประมาณ 600 โวลต์ เท่านั้น ซึ่งต่างจากเทคนิคปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบดั้งเดิมที่ต้องใช้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง ขนาด 10-50 กิโลโวลต์ ในกระบวนการประดิษฐ์เส้นใย[42]



รูปที่ 2.28 ระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตสนามใกล้[42]

2.4 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้นาโนเจนเนอเรเตอร์เพียโซอิเล็กทริก

วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric material) เป็นเซรามิกประเภทหนึ่งที่มีสมบัติพิเศษ กล่าวคือ เมื่อได้รับแรงกล (mechanical force) จะให้แรงดันไฟฟ้า (voltage) ที่เรียกว่า ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric effect) ในทางกลับกันเมื่อวัสดุได้รับแรงดันไฟฟ้าจะทำให้มีการเปลี่ยนรูปร่าง (deformation) เกิดแรงกลซึ่งเรียกว่า ปรากฏการณ์อินเวอร์สเพียโซอิเล็กทริก (inverse piezoelectric effect) การเปลี่ยนไปมา ระหว่างพลังงานกล และพลังงานไฟฟ้า สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ[43]

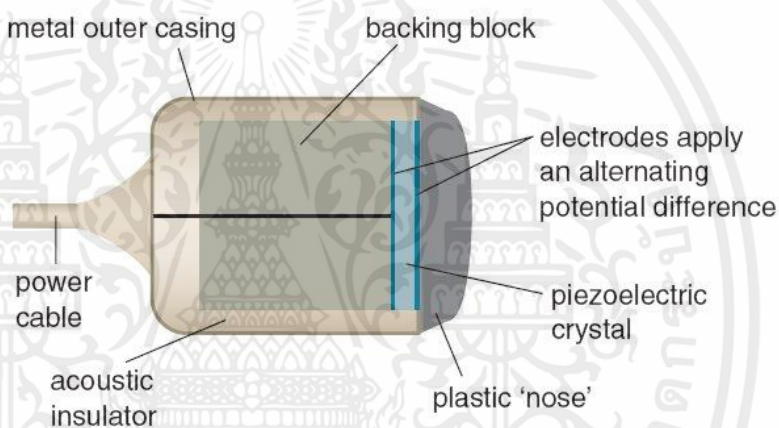
เซนเซอร์เพียโซสามารถนำไปใช้วัดการบิดตัว วัดการสัมผัส วัดแรงสั่นสะเทือน วันแรงดัน และวัดแรงกระแทก เนื่องจาก มีความสามารถพิเศษคือสามารถเปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ และในทางกลับกันก็สามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกลได้ด้วยเช่นกัน เพราะฉะนั้น เซนเซอร์ตัวนี้เลยถูกนำไปใช้ในวงการต่างๆมากมาย เช่น ในด้านวงการแพทย์ได้นำไปใช้ผลิตเป็นเครื่องวัดความดันโลหิต (IOP) ด้วย Sensor Piezoelectric ใช้ในการตรวจวัดความดันโลหิต (IOP) ความดันโลหิตที่เปลี่ยนแปลงตามความดันเลือด (OPA) และอัตราการเต้นของหัวใจ (H) โดยบอกคุณภาพการวัดเป็น Q1-Q5 หากการวัดแบบไม่ต้องย้อมสี และสามารถวัดความดันโลหิตได้ทุกสภาพดวงตา โดยการสัมผัสในส่วนพื้นผิวของกระจกตาส่วนใดก็ได้[43,44]

เซนเซอร์เพียโซ ที่ผลิตขึ้นมา ใช้ตะกั่วเป็นตัวประกอบ ซึ่งตะกั่วเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ไม่ว่าจะผลิตโดย... ตัวอย่างการนำเซนเซอร์เพียโซมาเชื่อมต่อกับวงจร ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์กำลังศึกษาหาวิธีผลิตเพีย

โซอิล็กทริกไร้สารตะกั่วขึ้น แม้จะทำได้บ้างแล้ว แต่คุณภาพยังไม่สามารถเทียบเท่าโซอิล็กทริกที่ใช้ตะกั่วได้[45]

2.4.1 ตัวรับสัญญาณของเครื่องอัลตราซาวด์

หลักการของอัลตราซาวด์ก็คือ เมื่อให้ประจุไฟฟ้าเป็นระยะๆ ติดๆกัน ไปยังผลึกที่มีคุณสมบัติ Piezoelectric effect ซึ่งบรรจุอยู่ในหัวตรวจ (Transducer or Probe) จะทำให้ได้อัลตราซาวด์ออกมาเป็นช่วงๆ(ultrasonic pulses) เข้าสู่ส่วนที่เรานำสัมผัส เมื่อพบรอยต่อของตัวกลาง (Interface) 2 ชนิด ทำให้เกิดการสะท้อน และการหักเห ตลอดแนวทางที่เสียงเดินทาง ในตัวกลางต่างชนิดกัน การเกิดการสะท้อนกลับเข้าสู่หัวตรวจ จะเกิดในเปอร์เซ็นต์และองศาที่แตกต่างกัน ฉะนั้นภาพที่ได้จึงปรากฏบนจอภาพให้เห็น ความแตกต่างของเนื้อเยื่อ ซึ่งเป็นตัวกลางที่เสียงเดินทาง จึงทำให้บอกความผิดปกติ เพื่อตรวจวินิจฉัยโรคได้[46]



รูปที่ 2.29 รายละเอียดตัวรับสัญญาณของเครื่องอัลตราซาวด์[46]

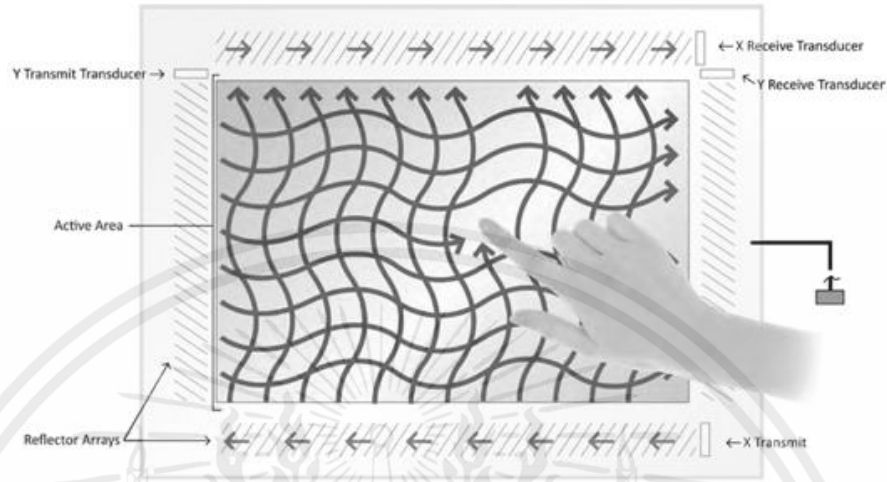
2.4.2 หน้าจอสัมผัสแบบรับคลื่นเสียงที่ผิวของหน้าจอ

ระบบคลื่นเสียง บนหน้าจอของระบบคลื่นเสียงที่ผิวหน้าจอก็จะมีตัวรับ และส่งสัญญาณอยู่ตลอดแนวตั้งและแนวนอน ของแผ่นกระจกของหน้าจอ และตัวตัวสะท้อน ซึ่งจะทำหน้าที่ ส่งสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่มาจากตัวส่งสัญญาณไปยังตัวอื่น ตัวรับสัญญาณจะเป็นตัวบอกถ้าคลื่นถูกรบกวนโดยการสัมผัสของผู้ใช้ และสามารถระบุตำแหน่งที่สัมผัสได้[47]

ระบบนี้มีพื้นฐานมาจากการตรวจจับการเคาะการทำงานโดยจะคอยตรวจการเคาะกระจกโดยใช้เพียโซอิเล็กทริกเซนเซอร์ (Piezo - Electric Sensor) 4 ตัวติดไว้ตรงขอบของกระจกทั้ง 4 ด้าน เพื่อคอยตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนและส่งข้อมูลแรงสั่นสะเทือนที่จับได้นี้ผ่านไปคำนวณตำแหน่งยังหน่วยประมวลผล[47]

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 หน้าจอแบบนี้มีความโดดเด่นในเรื่องความคมชัดสูงความแม่นยำ ทำให้มีการใช้งาน
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเทคโนโลยีที่ล้ำหน้าและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ที่ถูกต้องมาโดย
 เทคโนโลยี Acoustic wave แบบนี้ในงานที่ต้องการความไวสูง ระบบจะมีตัวส่งสัญญาณซึ่งยึดติดไว้ที่
 ขอบกระจกเพื่อส่งสัญญาณอุลตราโซนิคส์ไปทั้งสองระนาบ คลื่นเสียงนี้จะสะท้อนผ่านไปทั้งพื้นผิวของ

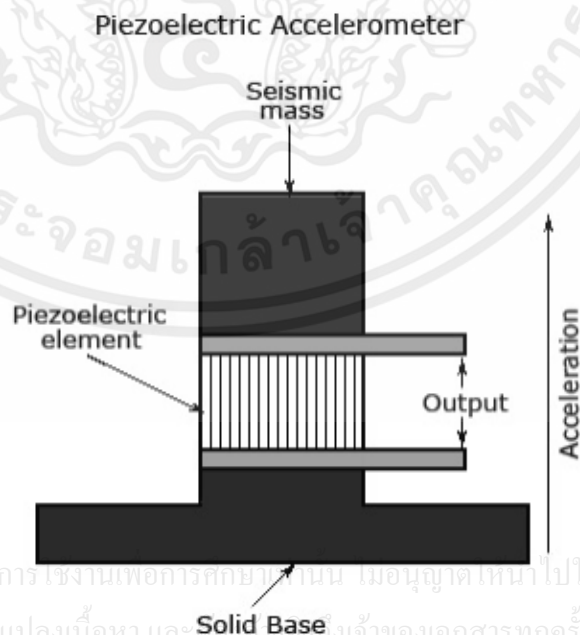
กระจกมายังเซ็นเซอร์อีกด้านหนึ่ง เมื่อมีการสัมผัสด้วยนิ้วหรือสไตลที่มีปลายอ่อน จะมีการดูดซับพลังงานจากคลื่นเสียง ทำให้แผงควบคุมสามารถวัดตำแหน่งการสัมผัสได้จากการเปลี่ยนแปลงขนาดของคลื่นเสียง[48]



รูปที่ 2.30 การทำงานของหน้าจอสัมผัสแบบรับคลื่นเสียงที่ผิวของหน้าจอ[48]

2.4.3 มิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบเพียโซอิเล็กทริก

โครงสร้างของมอเตอร์วัดอัตราเร่งแบบเพียโซอิเล็กทริกจะประกอบด้วย seismic mass ยึดติดกับ piezoelectric crystal และบรรจุอยู่ในตัวถังป้องกัน โดย piezoelectric crystal ที่นิยมนำมาใช้งาน ได้แก่ ผลึกควอตซ์ และผลึกโซเดียมโปตัสเซียมตาเตรต (sodium potassium tartrate) เพราะมีความทนทานต่อแรงกระทำ[49]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายานาน ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และเผยแพร่ต่อผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.31 ระบบวัดอัตราเร่งแบบเพียโซอิเล็กทริก[49]

เมื่อ seismic mass (m) ถูกทำให้เกิดอัตราเร่งขึ้น (ถูกกด) มันจะส่งผ่านแรงกดไปกระทำกับ piezoelectric crystal ที่ถูกยึดติดอยู่ด้วยกัน ด้วยคุณสมบัติพิเศษของมันจะทำให้ประจุไฟฟ้าถูกสร้างขึ้น และถูกสายนำสัญญาณออกไปยังเอาต์พุตของวงจร โดยที่ด้านเอาต์พุตจะต้องมีวงจรขยายประจุไฟฟ้า (charge amplifier) เพื่อขยายค่าประจุไฟฟ้าที่ได้ให้เป็นแรงดันเอาต์พุตตามสัดส่วนของอัตราเร่งที่เกิด จะได้สามารถแสดงผลได้ด้วยโวลต์มิเตอร์[49,50]

มิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบเพียโซอิเล็กทริกตอบสนองต่อทางด้านความถี่สูงได้ดี แต่ในทางกลับกันก็จะมีผลตอบสนองทางด้านความถี่ต่ำที่ไม่ดีนัก มีขนาดค่อนข้างเล็ก น้ำหนักเบา และสามารถใช้งานที่มีอัตราเร่งได้สูงถึง $250,000 \text{ m.s}^{-2}$ [51]

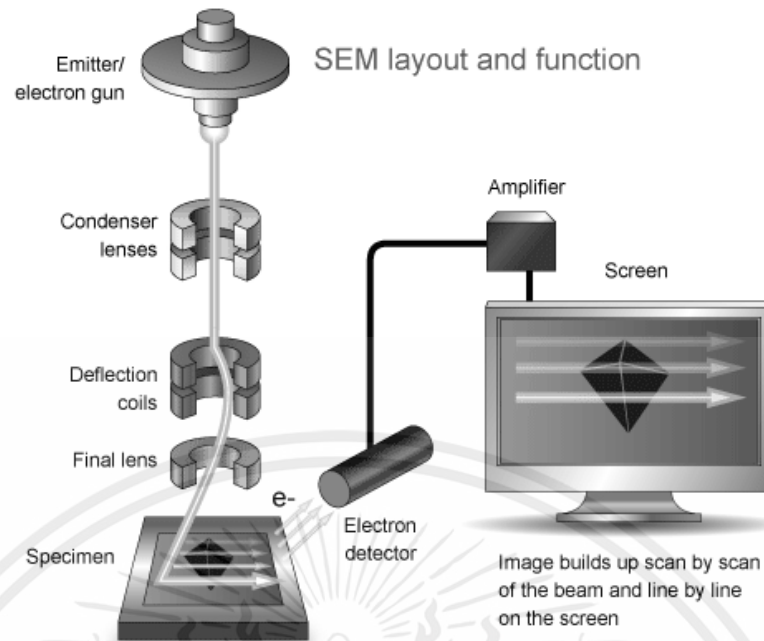
ส่วนการประยุกต์ใช้งานที่น่าสนใจและกำลังเป็นที่นิยมอยู่ในขณะนี้เห็นจะเป็นเทคโนโลยีทัชสกรีน (Touch Screen) ที่ใช้ accelerometer ตรวจจับการเคลื่อนไหวนิ้วมือของผู้ใช้ เวลาเราใช้นิ้วลากเร็วๆ มิเตอร์วัดความเร่งจะจับความเร่งที่นิ้วเราเคลื่อนไหวแล้วสั่งให้หน้าจอเลื่อนไปตามความเร่งนั้นถ้าเราเลื่อนนิ้วเร็วหน้าจอก็เลื่อนเร็ว แต่ถ้าเลื่อนนิ้วช้าหน้าจอก็จะค่อยๆเลื่อนไป ดังตัวอย่างเช่น เครื่องเล่นเกม Nintendo wii เป็นต้น[52,53]

มักจะใช้ Accelerometer ประกอบกับ Gyrosensors เช่น เซอร์จิมุม (หรือความเอียง) โดย Accelerometer ใช้วัดการเคลื่อนที่ขึ้น ลง ซ้าย ขวา ส่วน Gyrosensors ใช้วัดองศาความเอียงจิมุมทำให้เกิดการเคลื่อนไหวทุกทิศทาง

2.5 เทคนิคการตรวจวิเคราะห์

2.5.1 การตรวจวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับจุลภาค และเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในการวิจัย และการผลิตภาคอุตสาหกรรม SEM กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงถึงระดับ 500,000 เท่า ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับไมโครหรือนาโนได้ SEM ยังสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer ; EDS) ซึ่งช่วยในการศึกษาชนิด ปริมาณ และ การกระจายขององค์ประกอบธาตุของวัสดุที่ศึกษาได้ อีกทั้ง SEM ยังสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์หรือหัววัด อื่นๆเพื่อใช้ศึกษาวิเคราะห์ตามวัตถุประสงค์ที่ต่างกันออกไป เช่น เชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์การเรียงตัวของ ผลึกโดยใช้สัญญาณจากการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Electron Backscatter Diffraction; EBSD) นอกจากนี้ SEM ยังสามารถประยุกต์โดยเชื่อมต่อกับชุดอุปกรณ์ควบคุมลำอิเล็กตรอนเพื่อใช้เขียนลวดลาย ขนาดเล็กลงบนชิ้นงาน (Electron Beam Lithography) จะเห็นได้ว่า SEM เป็นเครื่องมือที่มีความจำเป็นต่อการศึกษาวิจัยด้วยกำลังขยายที่สูง และสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายและครอบคลุมการศึกษาวิจัยในระดับจุลภาค [54,55]



รูปที่ 2.32 ระบบตรวจวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด[55]

Scanning Electron Microscope (SEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบ Schottky type field-emission (T-FE) มีกำลังขยายแยกภาพสูงถึง 1.2 nm เหมาะสำหรับงานทางวิทยาศาสตร์กายภาพ สามารถปรับเปลี่ยนศักย์เร่งอิเล็กตรอนได้ในช่วง 0.5-30 kV ง่ายต่อการใช้งาน ในสมัยปัจจุบันสามารถควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ ระบบสุญญากาศในระบบลำอิเล็กตรอน ใช้ Ultra-high vacuum pump ส่วนห้องชิ้นงาน (sample chamber) ใช้ High vacuum pump หัววัดหลักสำหรับการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายของระบบประกอบด้วย 3 หัววัด คือ 1. Secondary Electron Detector 2. Backscattered Electron Detector และ 3. Scanning Transmission Electron Detector สัญญาณภาพที่ได้จาก SEM แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามลักษณะของภาพที่ได้ จากหัววัดที่ต่างกัน [54] ได้แก่

1. Secondary Electron Image (SEI) เป็นสัญญาณภาพที่ได้จาก Secondary Electron Detector (SED) ที่รับเอาพลังงานจาก secondary electron ที่หลุดออกมาจากพื้นผิวของชิ้นงาน เมื่อถูกลำอิเล็กตรอนชน มาประมวลผล ภาพที่ได้แสดงให้เห็นลักษณะของพื้นผิวของตัวอย่างที่สนใจบนชิ้นงาน (Morphology) ศักย์เร่ง อิเล็กตรอนปรับเปลี่ยนได้ในช่วง 0.5-30 kV ตามประเภทของชิ้นงาน ในปัจจุบันสามารถเพิ่มกำลังขยายได้สูงถึงประมาณ 500,000 เท่า ภายใต้สภาวะการใช้งานที่เหมาะสม โดยทั่วไปการใช้งานปกติมักจะได้กำลังขยายถึงประมาณ 300,000 เท่า และยังสามารถเลือกโหมดป้องกันการสะสมของประจุบนชิ้นงานโดยใส่ความต่างศักย์ไปยังชิ้นงาน เพื่อไล่

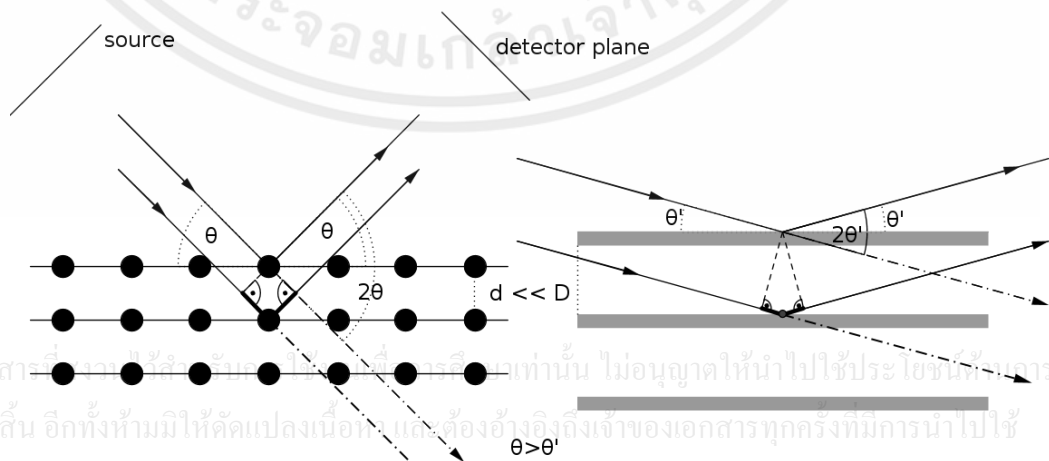
ไม่ว่ากรณีไป ประจุสะสม[54] ห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Backscattered Electron Image (BEI) เป็นสัญญาณภาพที่ได้จาก Backscattered Electron Detector (BED) ที่รับเอาพลังงานจาก Backscattered Electron ที่สะท้อนจากพื้นผิวของชิ้นงานมาประมวลผล โดยสัญญาณที่ได้ในแต่ละบริเวณจะแปรตามเลขอะตอม (atomic number, Z) ในเนื้อสารบริเวณนั้นๆ ภาพที่ได้ จึงมีความสว่างเข้มหรืออ่อนตามเลขอะตอมของธาตุที่เป็นส่วนประกอบของเนื้อสาร (atomic contrast) BEI จึง สามารถแสดงภาพที่แยกแยะความแตกต่างของแต่ละบริเวณที่มีธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันได้ หัววัด BED เป็นแบบ retractable สั่งการให้เลื่อนเข้าไปยังตำแหน่งเหนือชิ้นงานในระหว่างใช้งานและเลื่อนออกเมื่อไม่ได้ใช้งานได้เพื่อความปลอดภัยของหัววัด[54]

3. Transmission Electron Image (TEI) เป็นสัญญาณภาพที่ได้จาก Transmission Electron Detector (TED) อาศัยหลักการของ Transmission Electron Microscope (TEM) ประยุกต์มาติดตั้งในระบบของ FESEM โดย TED จะอยู่ในตำแหน่งใต้ชิ้นงานเพื่อรับพลังงานจาก transmission electron ที่ทะลุผ่านชิ้นงาน ศักย์เร่ง อิเล็กตรอนที่ตั้งไว้สำหรับระบบนี้เป็นค่าสูงสุดคือ 30 kV และชิ้นงานจะต้องเตรียมด้วยเครื่องมือเฉพาะเพื่อให้ ชิ้นงานมีขนาดบางเพื่อให้อิเล็กตรอนสามารถทะลุผ่านไปยัง TED ได้ ภาพที่ได้จะแสดงถึงรูปร่างโครงสร้าง ภายในของชิ้นงาน สามารถเพิ่มกำลังขยายได้ถึงประมาณ 300,000 เท่า[54]

2.5.2 การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer : XRD) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุขั้นพื้นฐาน ซึ่งเป็น การวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง (non-destructive analysis) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก การจัดเรียงตัว ของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่าง ๆ ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของ รังสีเอ็กซ์ และความรู้เกี่ยวกับวิชายระบบโครงสร้างผลึก เครื่องมือชนิดนี้มีความสำคัญมากในกระบวนการควบคุมคุณภาพ การผลิต ใช้สำหรับตรวจสอบสมบัติของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตตามขั้นตอนต่างๆ[56]



รูปที่ 2.33 หลักการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์[57]

ทฤษฎีพื้นฐานของ XRD อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของลำรังสีเอกซ์ เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิด การหักเหของลำรังสีที่สะท้อนทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบ ในปี ค.ศ. 1912 นาย W.L. Bragg ได้นำทฤษฎีดังกล่าวมาศึกษาในรูปแบบโครงสร้างผลึกของแร่ต่างๆ [57]

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda$$

เมื่อ

d_{hkl}	คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก
θ	คือ ครึ่งหนึ่งของมุมเลี้ยวเบน
λ	คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่สามารถแยกแยะประเภทและชนิดของวัสดุที่พบในธรรมชาติว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใดหรือจำแนกได้ว่าวัสดุที่พบเห็นนั้นเป็นธาตุชนิดใดโดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัด[57]

ต่อมาได้มีการประดิษฐ์คิดค้น เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ขึ้นในปี 1948 และมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งสามารถนำคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการควบคุม การทำงาน และวิเคราะห์ประมวลผล เพื่อให้เกิดความรวดเร็วแม่นยำยิ่งขึ้น[57]

XRD เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย ในกลุ่มนักวัสดุศาสตร์ ธรณีวิทยา โลหะวิทยา เพราะเป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่ ผลการวิเคราะห์จาก XRD ทำให้สามารถแยกแยะประเภทและชนิดของ วัสดุที่พบในธรรมชาติว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใด หรือจำแนกได้ว่าวัสดุที่พบเห็นนั้นเป็นแร่ชนิดใด โดยทำการวัดค่า ความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่าง ๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิด มีรูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน และระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอม ที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบก็แตกต่างกันไปด้วย โดยที่ขนาดและประจุของอะตอม ของสารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ (XRD pattern) เฉพาะตัวเปรียบได้กับลายนิ้วมือของคนที่แตกต่างกัน[57]

2.5.3 การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

ระบบอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์สามารถแบ่งเป็น 2 แบบ ได้แก่ แบบกระจาย (dispersive) และแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม (Fourier transform) เครื่องทั้งสองประเภทมีส่วนประกอบหลัก ดังนี้

1. แหล่งกำเนิดแสงทำหน้าที่ให้รังสีอินฟราเรด ได้แก่ ไยเนิร์นสสต์ (Nernst filament) โกลบาร์ (globalar) และลวดนิโครม แต่ที่นิยม คือ ไยเนิร์นสสต์ทำจากออกไซด์ของเซอร์โคเนียม (ZrO₂) ทอเรียม (ThO₂) และซีเรียม (CeO₂) ให้พลังงานสูงสุด 5,500 cm⁻¹ และโกลบาร์ลักษณะเป็นแท่ง

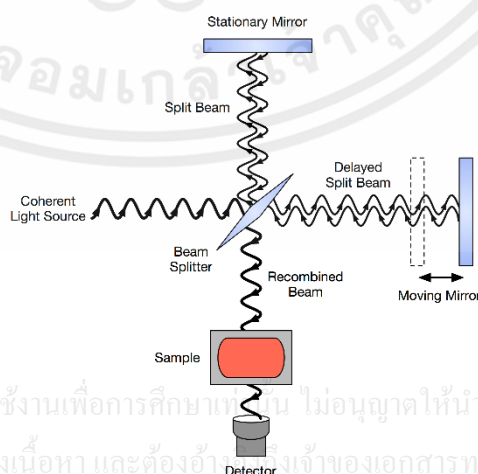
ซิลิคอนคาร์ไบด์ (silicon carbide) ให้พลังงานสูงสุด $7,100 \text{ cm}^{-1}$ สำหรับเครื่อง อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์แบบกระจาย (dispersive infrared spectrometer) ลำแสงจะแยกเป็นสองลำแสงผ่านไปยังเซลล์ตัวอย่างและเซลล์อ้างอิง[57,58]

2. เซลล์ตัวอย่าง สำหรับตัวอย่างบางชนิดต้องบรรจุในเซลล์ตัวอย่างก่อนวิเคราะห์ โดยส่วนใหญ่เซลล์ตัวอย่างทำมาจากเกลือของแฮไลด์ เช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ลิเทียม-ฟลูออไรด์ (LiF) และซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) เป็นต้น มีลักษณะโปร่งใสและไม่ดูดกลืนรังสีอินฟราเรดช่วงเดียวกับตัวอย่าง[57,58]

3. ตัวทำแสงเอกรงค์ เป็นส่วนประกอบเฉพาะเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์แบบกระจาย เท่านั้น ทำหน้าที่เลือกความยาวคลื่น นิยมใช้เกรตติงมากกว่าปริซึม เนื่องจากการแยกชัด (resolution) สูงกว่า[57]

4. เครื่องตรวจหา ทำหน้าที่เปลี่ยนความเข้มของรังสีที่ผ่านตัวอย่างเป็นสัญญาณไฟฟ้า ได้แก่ เครื่องตรวจหาเทอร์โมคัปเปิล (thermocouple detector) มีการตอบสนองสัญญาณช้าจึงเหมาะ สำหรับเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์แบบกระจาย เครื่องตรวจหาดีวเทอเรทเทรทไรโกลซีนซัลเฟต (deuterated triglycine sulfate detector) และเครื่องตรวจหาสภาพนำแสงทำจากโลหะผสมของปรอทและแคดเมียม (Hg/Cd) เทลลูไรต์ (Tellurite, Te) หรืออินเดียมแอนติโมนไซด์ (Indium antimonide, InSb) ส่วนเครื่องตรวจหาสภาพนำแสงนิยมกับเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์แบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม เรียกชื่อย่อว่า FTIR (Fourier transform infrared spectroscopy, FITR) ซึ่งมีการตอบสนองสัญญาณไวกว่าเครื่องตรวจหาเทอร์โมคัปเปิล[58]

5. เครื่องบันทึก ทำหน้าที่บันทึกสัญญาณที่ออกมาจากเครื่องตรวจหา ส่วนใหญ่การวิเคราะห์ หมู่ทำหน้าที่ของสารอินทรีย์ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์จะเป็นโหมด (mode) การดูดกลืน มากกว่าการสะท้อน ปัจจุบันสเปกตรัมแบบดูดกลืนนิยมพล็อต (plot) ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความส่องผ่าน (%T) และเลขคลื่น (ν , cm^{-1}) ตามกฎของ เบียร์-แลมเบิร์ต[58]



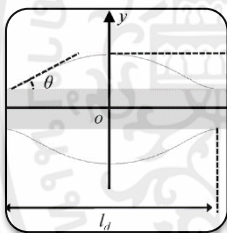
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.34 ระบบอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์[57]

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ภายหลังจากการศึกษาและค้นคว้าข้อมูลเบื้องต้นของระบบขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์โดยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต สมบัติของพอลิไวไนลิดีนไคฟลูออไรด์ และการประยุกต์ใช้เพียโซอิเล็กทริกแล้วนั้น ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย เริ่มจากการออกแบบระบบขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์โดยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระ การประกอบระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระ การเตรียมฐานรองรับการทดสอบขึ้นรูปเส้นใยพอลิไวไนลิดีนไคฟลูออไรด์ การเตรียมสารละลายตัวอย่างของพอลิไวไนลิดีนไคฟลูออไรด์ การทดสอบขึ้นรูปเส้นใยพอลิไวไนลิดีนไคฟลูออไรด์ การเตรียมเพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์เส้นใยพอลิไวไนลิดีนไคฟลูออไรด์ การวิเคราะห์พื้นผิวของตัวอย่างเส้นใยพอลิไวไนลิดีนไคฟลูออไรด์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และการวิเคราะห์ผลทางไฟฟ้าจากเตรียมเพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ในงานวิจัยนี้ โดยจะอธิบายเป็นตามลำดับขั้นตอนดังนี้



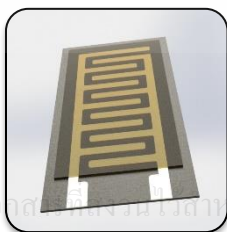
ขั้นตอนการศึกษาเชิงทฤษฎี

- ออกแบบระบบ
- จำลองแบบหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ
- ปรับปรุงค่าพารามิเตอร์



ระบบขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์ด้วยไฟฟ้าสถิต บนผิวอิสระ

- สร้างต้นแบบเครื่องขึ้นรูป
- หาเงื่อนไขที่ดีที่สุดสำหรับวัสดุ พอลิไวไนลิดีนไคฟลูออไรด์
- ระบุเงื่อนไขต่างๆในการขึ้นรูป และลักษณะเส้นใยที่ได้



อุปกรณ์กำเนิดสัญญาณไฟฟ้าขนาดเล็ก

- ออกแบบอุปกรณ์กำเนิดพลังงานบนฐานรองรับกระดาษ
- ทดสอบค่าทางวัสดุและค่าทางไฟฟ้า
- ปรับปรุงประสิทธิภาพของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก

รูปที่ 3.1 แผนผังการทดลองในงานวิจัยนี้

3.1 การออกแบบระบบขึ้นรูปเส้นใยโดยเทคนิคปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากฝิวลวดอิสระ

ในงานวิจัยนี้จะทำการสร้างระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากฝิวลวดอิสระ เพื่อประยุกต์ใช้งานในการขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์ สำหรับเตรียมเพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์จากเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ โดยใช้ทฤษฎีเดียวกับระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ทั้งนี้การออกแบบมีจุดประสงค์หลักคือ การเพิ่มจำนวนกรวยเทเลอร์จากระบบเดิมซึ่งมีเพียง 1 กรวยต่อการฉีด 1 ครั้ง เป็นการฉีดแบบหลายกรวยพร้อมกัน ในการออกแบบนี้จึงใช้ลวดในการนำสารละลายพอลิเมอร์ขึ้นมาทำการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตความต่างศักย์สูง และคำนึงถึงการใช้งานในระบบการผลิตที่ต่อเนื่องด้วย

3.1.1 ขั้นตอนการออกแบบระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากฝิวลวดอิสระ

การออกแบบระบบเริ่มจากการวาดแผนผังอุปกรณ์จากทฤษฎีระบบดังกล่าวอย่างง่าย จากนั้น เริ่มทำการร่างแบบระบบลงบนโปรแกรมออกแบบ 3 มิติ แล้วทำการเขียนรายละเอียดของระบบเพิ่มเข้าไปภายในโปรแกรมออกแบบ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม SolidWorks 2013 ในการร่างแบบ 3 มิติ จากนั้นทำการสร้างชิ้นงานต้นแบบตามแบบที่ได้ร่างไว้ในโปรแกรม และทดสอบการใช้งาน ตามลำดับ

3.1.1.1 การร่างแบบระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากฝิวลวดอิสระ

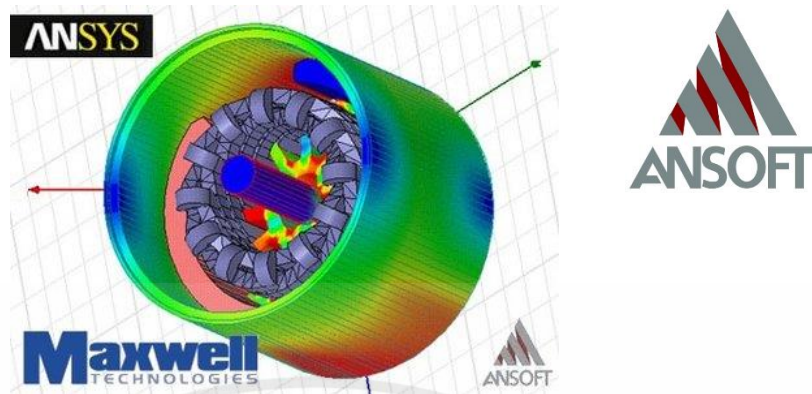
ในงานวิจัยนี้ ใช้โปรแกรม SolidWorks 2013 ในการร่างแบบ 3 มิติ ใช้คอมพิวเตอร์ในการใช้งานโปรแกรม เป็นเครื่องมือช่วยในการร่างแบบชิ้นส่วนสำคัญ และประกอบเป็นชิ้นงานเสมือนจริง



รูปที่ 3.2 โปรแกรม SolidWorks 2013 [60]

3.1.1.2 การจำลองระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากฝิวลวดอิสระและงานต้นแบบ

ภายหลังจากการออกแบบในโปรแกรมงาน 3 มิติ (CAD) แล้วนั้น ต่อมาได้ทำการจำลองแบบการทำงาน และหาค่าที่สำคัญต่างๆในการเปิดการใช้งานระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากฝิวลวดอิสระ ด้วยโปรแกรม SolidWorks Simulation 2013 และ Ansoft MAXWELL 3D เพื่อใช้ในการปรับปรุงค่าต่างๆในระบบ ก่อนนำไปสร้างชิ้นงานต้นแบบ



รูปที่ 3.3 โปรแกรม Ansoft MAXWELL 3D [61]

การสร้างชิ้นงานต้นแบบ ชิ้นส่วนในระบบส่วนใหญ่ใช้การสั่งผลิต และบางชิ้นใช้เทคนิคการพิมพ์พลาสติก 3 มิติ ด้วยวัสดุ PLA ในการขึ้นรูปชิ้นส่วนระบบ



รูปที่ 3.4 ระบบพิมพ์ 3 มิติ และโปรแกรมการสั่งพิมพ์ชิ้นงาน [62]

3.1.1.3 อุปกรณ์ที่สำคัญของระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระ

อุปกรณ์หลักๆ ถูกแบ่งเป็น 3 ส่วนหลักๆ ดังนี้

1. ระบบกำเนิดศักย์ไฟฟ้าแรงสูง (High voltage generator)

ใช้ระบบให้ศักย์สูงคงที่ ผ่านระบบสวิตชิง (Switching) โดยมีค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ 25 kV

ภายในระบบประกอบด้วย High voltage switching , วงจร Voltage regulator และ

หม้อแปลง 220 VAC / 12 VDC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

2. ระบบควบคุมการหมุนของขั้วไฟฟ้า (Electrode RPM control system) ประกอบด้วย วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO R3 และ วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ (Micro step motor driver)
3. ส่วนห้องการขึ้นรูป (Chamber) ทำจากวัสดุประเภทพลาสติก ปิดมิดชิด ทั้ง 6 ด้าน รวมถึง ฐานรองรับ (Collector) ทำจากแผ่นอลูมิเนียม

3.2 การเตรียมแผ่นฐานรองรับ

3.2.1 ฐานรองรับประเภทกระจกและแผ่นอลูมิเนียม

ในการเตรียมฟิล์มบางนั้นจะต้องมีฐานรองรับ (substrate) เพื่อให้วัสดุของสารเกาะยึดบนฐานรองรับดังกล่าว ซึ่งก่อนที่เราจะนำฐานรองรับมาใช้งานนั้นจะต้องมีกระบวนการในการทำความสะอาดฐานรองรับเพื่อขจัดคราบสิ่งสกปรกที่ติดค้างอยู่เสียก่อน โดยใช้กระบวนการล้างที่เรียกว่า Alcohol process ซึ่งการเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินจะมีขั้นตอนการทำความสะอาด ดังนี้

1. นำกระจกไปล้างด้วยน้ำยาล้างคราบไขมัน
2. ล้างกระจกด้วยน้ำไร้ประจุในเครื่องอัลตราโซนิค (ultrasonic cleaner) เป็นเวลา 10 นาที
3. ล้างกระจกด้วยอะซิโตน (Acetone; CH_3COCH_3) ในเครื่องอัลตราโซนิค เป็นเวลา 10 นาที
4. ล้างกระจกด้วยเมทานอล (Methanol; CH_3OH) ในเครื่องอัลตราโซนิคเป็นเวลา 10 นาที
5. ล้างกระจกด้วยไอโซโพรพานอล (Isopropanol; $(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$) ในเครื่องอัลตราโซนิคเป็นเวลา 10 นาที
6. อบที่อุณหภูมิ 120 องศา เป็นเวลา 10 นาที

3.2.2 ฐานรองรับประเภทแผ่นพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์

ฐานรองรับแผ่นฟิล์มพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) นั้นไม่สามารถล้างอะซิโตน (Acetone; CH_3COCH_3) ในเครื่องอัลตราโซนิคได้ เนื่องจากเกิดการละลาย และฉีกขาดได้ง่ายมาก ดังนั้นฐานรองรับประเภทนี้จึงใช้วิธีการเช็ดด้วยกระดาษไร้ฝุ่น และไอโซโพรพานอล (Isopropanol; $(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$) แล้วทิ้งไว้จนแห้งเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำไปหุ้มที่บริเวณแผ่นขั้วลบ

3.2.3 ฐานรองรับประเภทแผ่นกระดาษ

ฐานรองรับประเภทกระดาษนั้นได้ทำการเช็ดด้วยกระดาษไร้ฝุ่น และตัดให้ได้ขนาดกว้าง 1 เซนติเมตร ยาว 2 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของงานวิจัยที่จัดทำขึ้น โดยผู้วิจัยสงวนสิทธิ์ในการนำข้อมูลไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นทำเป็นสื่อเผยแพร่เพื่อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การเตรียมเส้นใยโดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระ

ในการทดลองเตรียมเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์โดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระ เกิดขึ้นภายหลังการประกอบระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระ เพื่อทำการหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดที่ใช้ในการขึ้นรูปเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ จึงได้สร้างเงื่อนไขควบคุม ชั้นแรกได้ทำการทดสอบกับสารละลายพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ที่มีความเข้มข้นต่างกันเพื่อหาความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุด จากนั้นทำการปรับเปลี่ยนสนามไฟฟ้าโดยการปรับระยะระหว่างฐานรองรับกับหัวไฟฟ้า ปรับความเร็วในการหมุนหัวไฟฟ้าในการใช้ขึ้นรูปเส้นใย และปลูกในระยะเวลาต่าง ๆ กัน เพื่อดูผลกระทบต่อเส้นใยพอลิเมอร์ ต่อมา ได้ทดสอบขึ้นรูปบนฐานรองรับหลากหลายชนิด เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ในส่วนการสร้างอุปกรณ์ให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก จากนั้นนำเงื่อนไขต่างๆ ไปปรับใช้ในการสร้างอุปกรณ์ให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก

3.3.1 เงื่อนไขความเข้มข้นของสารละลายพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์

เตรียมสารละลายพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ (PVDF : Sigma Aldrich $M_w = 534,000$) ละลายในไดเมทิลฟอมาไมด์ (DMF : RCI Labscan Analytical grade) ในความเข้มข้น 5 , 8 , 11 และ 14 wt% ตามลำดับ ต่อมานำไปละลายในเครื่องอัลตราโซนิก 30 นาที อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จากนั้นนำสารละลายพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ขึ้นรูปโดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระ กระจกสไลด์ ในเงื่อนไขความต่างศักย์ 25 kV ระยะห่างจากหัวไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 9 เซนติเมตร ด้วยความเร็วการหมุนของหัวไฟฟ้า 20 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลาสั้นๆ 1.30 นาที

3.3.2 เงื่อนไขสนามไฟฟ้าโดยการปรับระยะระหว่างฐานรองรับกับหัวไฟฟ้า

นำสารละลายพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 11 wt% มาขึ้นรูปโดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระบนกระจกสไลด์ เป็นระยะเวลา 1.30 นาที ในเงื่อนไขความต่างศักย์ 25 kV ระยะห่างจากหัวไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 6 , 7 , 8 , 9 และ 10 เซนติเมตร ด้วยความเร็วการหมุนของหัวไฟฟ้า 20 รอบต่อนาที

3.3.3 เงื่อนไขความเร็วในการหมุนหัวไฟฟ้าในการใช้ขึ้นรูปเส้นใย

นำสารละลายพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 11 wt% มาขึ้นรูปโดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระบนกระจกสไลด์ เป็นระยะเวลา 1.30 นาที ในเงื่อนไขความต่างศักย์ 25 kV ระยะห่างจากหัวไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 9 เซนติเมตร ด้วยความเร็วการหมุนของหัวไฟฟ้า 5 , 10 , 15 และ 20 รอบต่อนาที

3.3.4 เงื่อนไขระยะเวลาในการขึ้นรูป

นำสารละลายพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 11 wt% มาขึ้นรูปโดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระบนกระจกสไลด์ เป็นระยะเวลา 1.30 , 5 , 15 , 30 และ 60 นาที ใน

เงื่อนไขความต่างศักย์ 25 kV ระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 9 เซนติเมตร ด้วยความเร็วการหมุนของขั้วไฟฟ้า 15 รอบต่อนาที

3.3.5 เงื่อนไขฐานรองรับหลากหลายชนิด

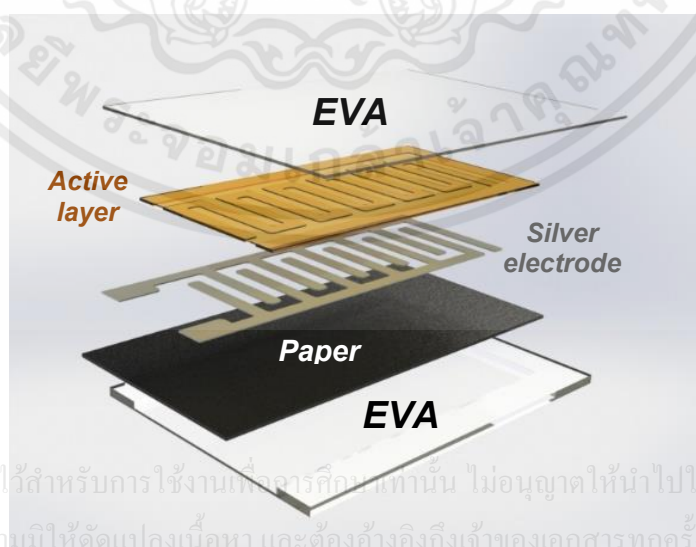
นำสารละลายพอลิไวนิลลิทีนไดฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 11 wt% มาขึ้นรูปโดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระบนกระจกสไลด์ แผ่นอลูมิเนียม แผ่นพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์ และบนกระดาษ 80 แกรม เป็นระยะเวลา 30 ในเงื่อนไขความต่างศักย์ 25 kV ระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 9 เซนติเมตร ด้วยความเร็วการหมุนของขั้วไฟฟ้า 15 รอบต่อนาที

3.3.6 เงื่อนไขขนาดของเส้นลวดบนขั้วที่ใช้ปลูก

นำสารละลายพอลิไวนิลลิทีนไดฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 11 wt% มาขึ้นรูปโดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระบนกระดาษ 80 แกรม เป็นระยะเวลา 30 ในเงื่อนไขความต่างศักย์ 25 kV ระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 9 เซนติเมตร ด้วยความเร็วการหมุนของขั้วไฟฟ้า 15 รอบต่อนาที โดยใช้ลวดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.02 , 0.05 , 0.1 และ 0.2 มิลลิเมตร

3.4 การเตรียมอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระ

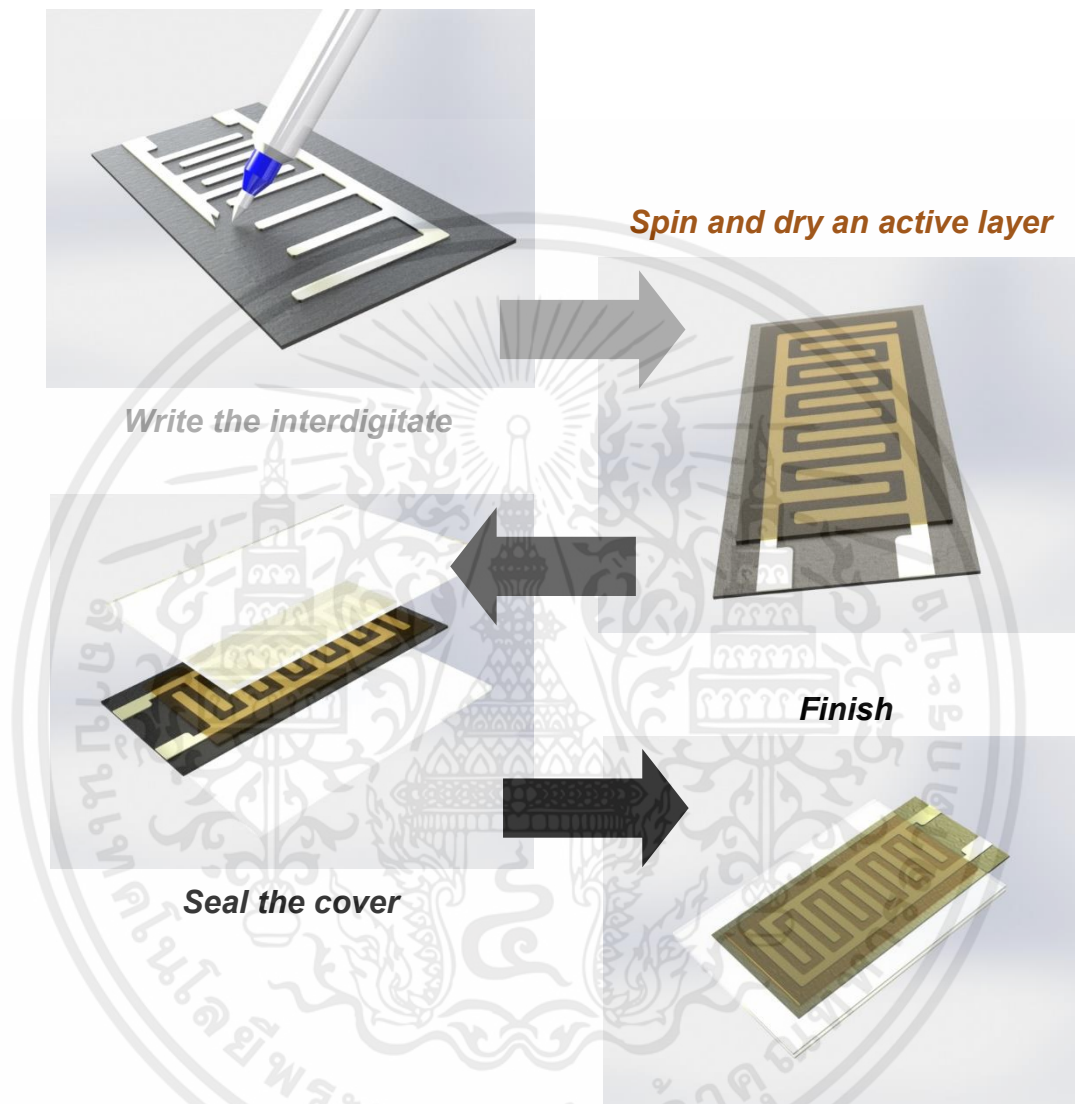
ในการทดลองเตรียมเส้นใยพอลิไวนิลลิทีนไดฟลูออไรด์โดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระข้างต้น ได้ทำการหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดที่ใช้ในการขึ้นรูปเส้นใยพอลิไวนิลลิทีนไดฟลูออไรด์ เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ในส่วนการสร้างอุปกรณ์ให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยใช้ขั้วไฟฟ้า (Interdigitate electrode) ขนาด 1 x 2 ตารางเซนติเมตร บนกระดาษ 80 แกรม ที่ถูกเขียนด้วยปากกาทึบเงิน 1 มิลลิเมตร ที่มีสภาพต้านทานเชิงเส้น 1 โอห์มต่อเซนติเมตร ให้เป็นตัวนำไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.5 โครงสร้างอุปกรณ์ให้กำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

จากนั้นนำไปขึ้นรูปเส้นใยด้วยวิธีข้างต้น แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ขั้นตอนสุดท้าย ทำการฉีกด้วยแผ่นพลาสติกเอทิลีนไวนิลอะซิเตต (Ethylene vinyl acetate: EVA) ทั้งด้านบนและด้านล่างเพื่อปกป้องชั้นฟิล์มไม่ให้ถูกทำลาย



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์ให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก

3.4.1 อุปกรณ์กำเนิดสัญญาณไฟฟ้าขนาดเล็กพอลิไวนิลลิทีนไคฟลูออไรด์

นำสารละลายพอลิไวนิลลิทีนไคฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 11 wt% มาขึ้นรูปโดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากฉนวนดิสระบนขั้วไฟฟ้า (Interdigitate electrode) ขนาด 1×2 ตารางเซนติเมตร บนกระดาษ 80 แกรม เป็นระยะเวลา 30 นาที ในเงื่อนไขความต่างศักย์ 25 kV ระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 7 , 8 , 9 และ 10 เซนติเมตร ด้วยความเร็วการหมุนของขั้วไฟฟ้า 15 รอบต่อนาที

3.4.2 อุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก จากวัสดุประกอบพอลิไวนิลลิดีน ฟลูออไรด์/อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต

นำสารละลายพอลิไวนิลลิดีนไดฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 11 wt% ผสมกับอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต ในอัตราส่วน 11:1 , 11:3 และ 11:5 โดยมวล มาขึ้นรูปโดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระบนขั้วไฟฟ้า (Interdigitate electrode) ขนาด 1 x 2 ตารางเซนติเมตร บนกระดาษ 80 แกรม เป็นระยะเวลา 30 นาที ในเงื่อนไขความต่างศักย์ 25 kV ระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 7 เซนติเมตร ด้วยความเร็วการหมุนของขั้วไฟฟ้า 15 รอบต่อนาที

3.5 การตรวจสอบสมบัติของฟิล์ม

3.5.1 การตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์อาศัยหลักการของการเลี้ยวเบนที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์ กราฟที่ได้จากการตรวจสอบจะเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์และมุมของการเลี้ยวเบนเรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน ซึ่งธาตุและสารประกอบแต่ละชนิดจะมีลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนเฉพาะตัว เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ Rikgaku รุ่น SmartLab



รูปที่ 3.7 เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ Rikgaku รุ่น SmartLab [63]

3.5.2 การตรวจสอบองค์ประกอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปีเป็นเทคนิคที่ใช้ระบุโครงสร้างและองค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์ที่มีพันธะโคเวเลนต์เป็นหลัก การวิเคราะห์ใช้รังสีในช่วงความยาวคลื่น 700 – 2,500 นาโนเมตร ผ่านเข้าไปในวัสดุ จากนั้นรังสีอินฟราเรดที่ผ่านวัสดุทดสอบจะกระทบตัวตรวจจับความเข้มแสงแล้วทำการบันทึกค่าการทะลุผ่านของแต่ละความยาวคลื่น หากเป็นระบบฟูเรียร์ แสงก่อนกระทบวัสดุตัวอย่างจะผ่านอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ ระบบอินฟราเรดสเปกโทรสโคปีแบบฟูเรียร์ ที่ใช้วิเคราะห์ PerkinElmer รุ่น UATR Two



รูปที่ 3.8 ระบบอินฟราเรดสเปกโทรสโคปีแบบฟูเรียร์ PerkinElmer รุ่น UATR Two

3.5.3 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด

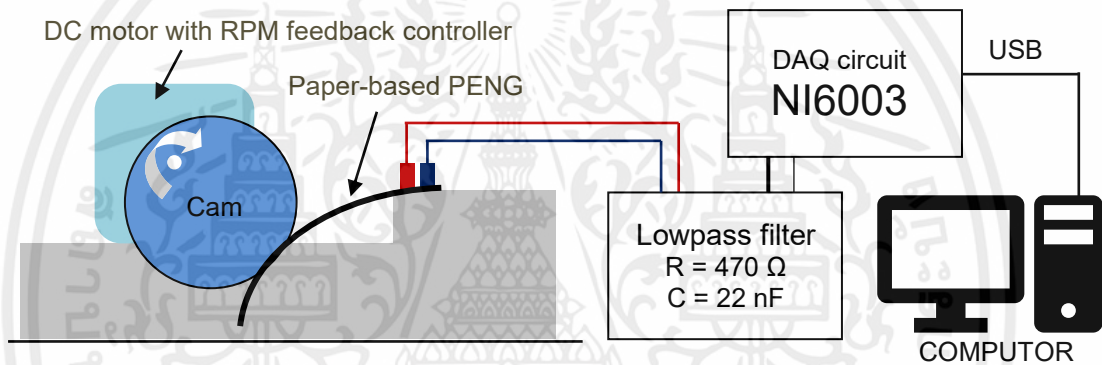
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด ใช้ในการส่องดูลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างโดยการบังคับลำอิเล็กตรอนให้กวาดไปบนพื้นผิวแล้วแสดงผลบนจอคอมพิวเตอร์ มีลักษณะภาพเป็นภาพขาวดำมีกำลังขยาย 10 - 500,000 เท่า ขึ้นกับชนิดของตัวอย่าง หลักการทำงาน คือ อันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับตัวอย่างทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และจับสัญญาณโดยตัวตรวจจับสัญญาณนำสัญญาณไปขยายและสร้างเป็นภาพออกมา แล้วนำสัญญาณที่ได้ไปขยายและสร้างเป็นภาพแสดงบนหน้าจอ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด Zeiss รุ่น EVO



รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด Zeiss รุ่น EVO [65]

3.5.4 การตรวจสอบทางไฟฟ้า ของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก

การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคการวัดค่าความต่างศักย์ขณะลัดวงจร และ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ออกมาจากอุปกรณ์ โดยผ่านตัวต้านทาน 470 โอห์ม และต่อขนานกับตัวเก็บประจุ 22 นาโนฟารัด การวัดค่าใช้อุปกรณ์ Data acquisition NI6003 ของบริษัท National Instrument มีความละเอียด 16 บิต และรองรับการวัดค่าที่ความเร็ว 10^6 ตัวอย่างต่อวินาที เชื่อมต่อกับโปรแกรม LabVIEW การวัดกระทำในขณะที่ไค้ังออุปกรณ์กำเนิดสัญญาณไฟฟ้าขนาดเล็ก 90 องศา เป็นจังหวะ ด้วยมอเตอร์กระแสตรง 12 โวลต์ แรงบิดสูง ที่ขับด้วยไดรฟ์เวอร์ควบคุมการทำงานพร้อมวงจรตอบสนองต่อรอบการทำงาน ที่สามารถหมุนลูกเบี้ยว ตามความถี่ที่กำหนด เพื่อไค้ังออุปกรณ์ที่ติดกับฐานยึด จากนั้นเก็บค่า ค่าความต่างศักย์ขณะลัดวงจร และ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ออกมาจากอุปกรณ์ มาเทียบกับเวลา



รูปที่ 3.10 ระบบวัดสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.11 Data acquisition NI6003 และตัวอย่างอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก [66]

บทที่ 4

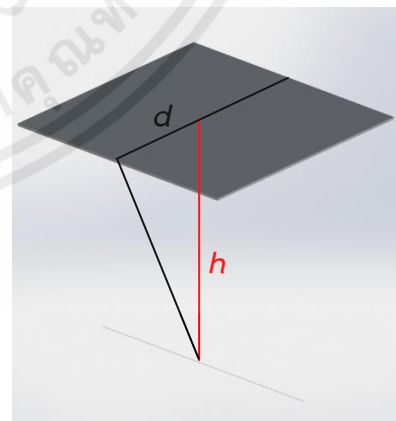
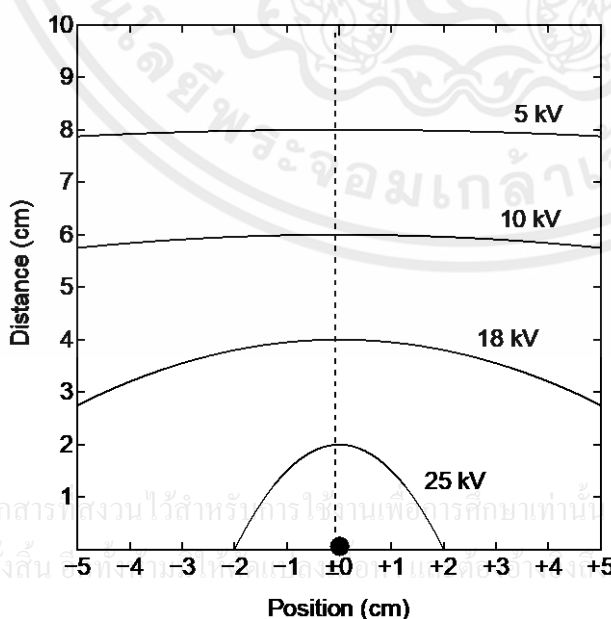
ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์ค่าที่สำคัญในการประกอบระบบขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์ โดยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระ แบบร่างชิ้นงานต้นแบบ ต้นแบบระบบขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์โดยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระ ผลการตรวจวิเคราะห์ชิ้นงานทดสอบการขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์โดยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระ ผลการตรวจวิเคราะห์พื้นผิวของเส้นใยพอลิโวนิลิลีนไดฟลูออไรด์ ผลทางไฟฟ้าของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก และอภิปรายผล จากผลกระทบในเงื่อนไขความเข้มข้นต่างกัน ผลกระทบจากการปรับเปลี่ยนสนามไฟฟ้าโดยการปรับระยะระหว่างฐานรองรับกับขั้วไฟฟ้า ผลกระทบจากปรับความเร็วในการหมุนขั้วไฟฟ้าในการใช้ขึ้นรูปเส้นใย ผลกระทบจากการปลูกในระยะเวลาและขนาดขั้วต่างๆกัน ผลกระทบจากฐานรองรับหลากหลายชนิด และสุดท้ายเป็นการวิเคราะห์ อภิปรายผลทางไฟฟ้าของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก

4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าที่สำคัญในการประกอบระบบขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์โดยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระ

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะศักย์ไฟฟ้าระหว่างผิวลวดโลหะกับฐานรองรับ

ผลการวิเคราะห์ลักษณะศักย์ไฟฟ้าด้วยโปรแกรม SolidWorks Simulation 2013 และ Ansoft MAXWELL 3D ระหว่างขั้วไฟฟ้าบวกคือผิวลวดทองแดง (Pure copper) กับ ขั้วไฟฟ้าลบแผ่นอลูมิเนียม (Aluminum A501 : Al 99.99%) ที่มีความกว้าง (d) 10 เซนติเมตร มีระยะห่างระหว่างทั้งสองขั้ว (h) 10 เซนติเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

รูปที่ 4.1 ผลการคำนวณผิวศักย์ไฟฟ้าบริเวณห้องขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์

การคำนวณใช้เงื่อนไขของศักย์ไฟฟ้ารูปทรงกระบอกเป็นเงื่อนไขหลักของผิวที่ปล่อยศักย์ ในที่นี้คือลวดทองแดง การประมาณค่าศักย์รูปทรงกระบอกนั้นใช้ กฎของพีค (Peek's law) ดังที่แสดงในสมการที่ 4.1 เป็นสมการที่ใช้ในการสร้างผิวศักย์ที่ให้กำเนิดสนามไฟฟ้ารอบลวดทองแดง[25]

$$E_c = A \left(1 + \frac{B}{\sqrt{r}} \right) \quad (\text{Peek's law}) \quad (4.1)$$

เมื่อ

E_c คือ สนามไฟฟ้า (Electric field) ที่เกิดบนผิวลวด

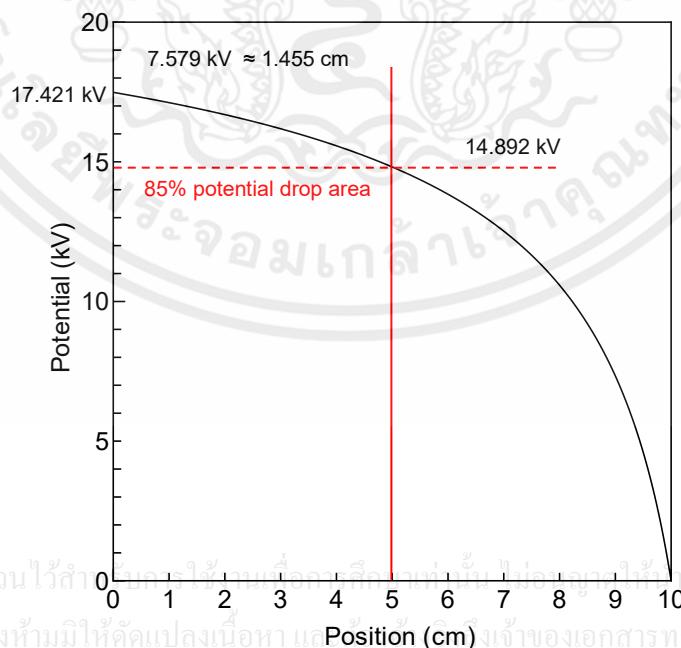
r คือ รัศมีของลวดตัวนำ

A และ B คือ ค่าคงที่ ที่ขึ้นกับชนิดตัวนำ และอุณหภูมิ

จากกราฟจะเห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า ซึ่งจุดสำคัญคือบริเวณที่ผิวลวดใกล้ฐานรองรับที่สุด จะมีค่าสนามไฟฟ้าสูงที่สุด แสดงให้เห็นถึงบริเวณที่ทำให้เส้นใยถูกฉีกออกจากผิวลวดอิสระ เมื่อระยะทางจากขั้วบวกมากขึ้นใกล้เรื่อยๆจนใกล้ขั้วลบ ลักษณะของผิวศักย์มีความเป็นระนาบมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสมมาตรของผิวศักย์ที่บริเวณใกล้ผิว

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณศักย์ไฟฟ้าระหว่างผิวลวดโลหะกับฐานรองรับ

ผลการวิเคราะห์ปริมาณศักย์ไฟฟ้า ด้วยโปรแกรม Ansoft MAXWELL 3D ระหว่างขั้วไฟฟ้าบวกคือผิวลวดทองแดง (Pure copper) กับ ขั้วไฟฟาลบแผ่นอลูมิเนียม (Aluminum A501 : Al 99.99%) ที่มีความกว้าง (d) 10 เซนติเมตร ทั้ง 2 ขั้วมีระยะห่างระหว่างกัน (h) 10 เซนติเมตร เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาศักย์ไฟฟ้าที่ตกลงเมื่อเคลื่อนตำแหน่งลวดไปทางซ้ายสุด และขวาสุด

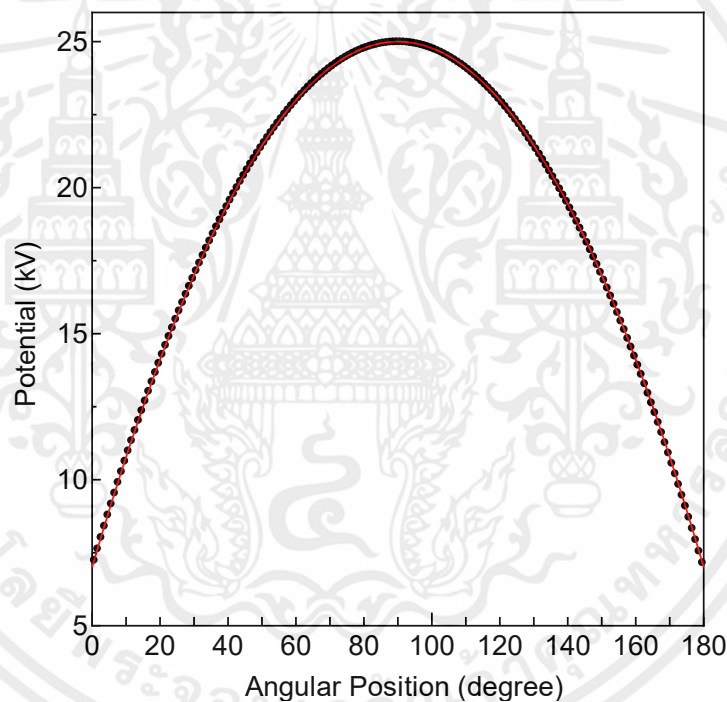


รูปที่ 4.2 ผลการคำนวณศักย์ไฟฟ้าขณะเลื่อนตำแหน่งขั้วไฟฟ้าบวก

พบว่าที่ตำแหน่ง 0 เซนติเมตร จากแนวขอบของแผ่นขั้วลบ มีความต่างศักย์ที่ 17.421 กิโลโวลต์ ซึ่งมาค่าตกลงมาจากศักย์เริ่มต้นถึง 7.579 กิโลโวลต์ ปริมาณนี้มีความต่างมากเมื่อเทียบกับความต่างศักย์ที่ใช้ในการสร้างเส้นใยโดยเทคนิคปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ทัวไป ค่าที่ได้ดังกล่าวนี้ นำไปใช้ในการหารัศมีการหมุนของขั้วไฟฟ้าบวกที่เหมาะสมต่อไป

4.1.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณศักย์ไฟฟ้าระหว่างผิวลวดโลหะกับฐานรองรับขณะหมุนขั้วไฟฟ้าบวก

ผลการวิเคราะห์ปริมาณศักย์ไฟฟ้าขณะหมุนขั้วไฟฟ้าบวก ด้วยโปรแกรม Ansoft MAXWELL 3D ระหว่างขั้วไฟฟ้าบวกคือผิวลวดทองแดง (Pure copper) กับ ขั้วไฟฟ้าลบแผ่นอลูมิเนียม (Aluminum A501 : Al 99.99%) ที่มีความกว้าง (d) 10 เซนติเมตร ทั้ง 2 ขั้วมีระยะห่างระหว่างกัน (h) 10 เซนติเมตร นำข้อมูลที่ได้จากการหาปริมาณศักย์ไฟฟ้ามาคำนวณรัศมีการหมุนที่เหมาะสม

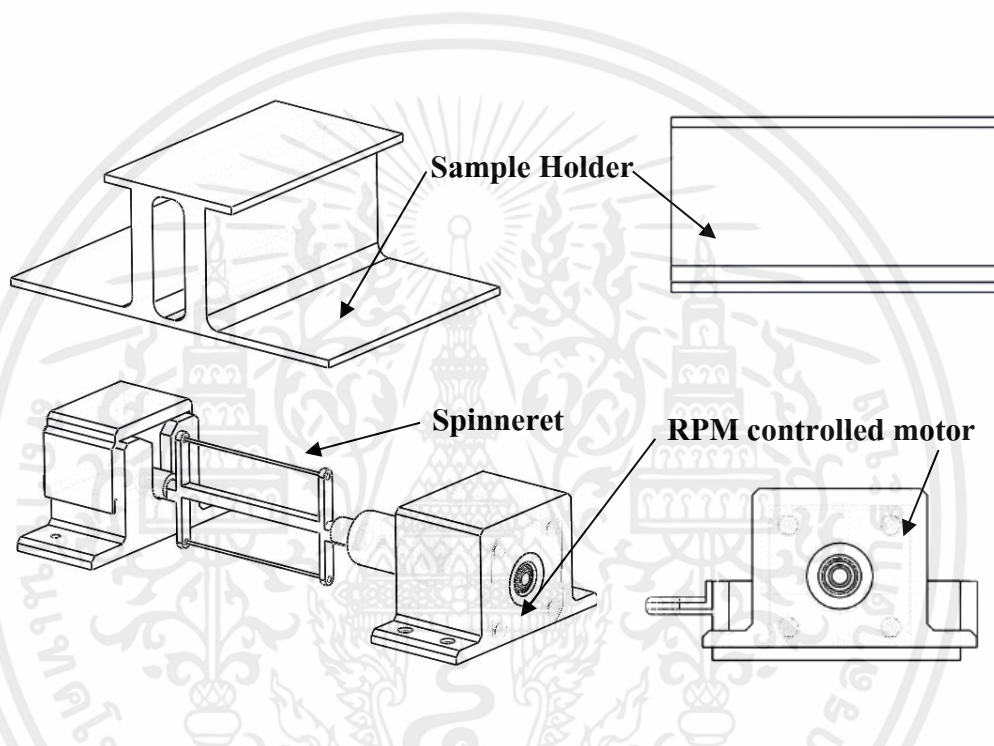


รูปที่ 4.3 ผลการคำนวณความสัมพันธ์ของค่าศักย์ไฟฟ้ากับมุมการหมุนของขั้วไฟฟ้าบวก

การหมุนด้วยรัศมีคงที่ 1.5 เซนติเมตรได้ถูกใช้ในการจำลองแบบครั้งนี้ ปริมาณศักย์ไฟฟ้าในการหมุนทำมุมแต่ละครั้งมีค่าต่างกันไปตามระยะห่างระหว่างลวดกับขั้วลบ ซึ่งจากผลการจำลองแบบในมุม 0 องศา มีค่าสนามไฟฟ้าจากการประมาณด้วยการ fitting ข้อมูล เท่ากับ 7.002 กิโลโวลต์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวลวดขณะทำการสร้างเส้นใยที่มุม 90 องศา มีค่าสูงสุด คือ 25 กิโลโวลต์ ตามค่าสูงสุดที่จำลองแบบไว้ มีผลต่างกันถึง 17.998 กิโลโวลต์ ดังนั้นในการขึ้นรูปเส้นใยจึงไม่ถูกรบกวนด้วยเส้นใยที่มาจาก การขึ้นรูปที่มุม 0 และ 180 องศา

4.2 แบบร่างชิ้นงานต้นแบบและต้นแบบระบบขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์โดยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระ

การร่างชิ้นงานต้นแบบในงานวิจัยนี้ ใช้โปรแกรม SolidWorks 2013 ในการร่างแบบ 3 มิติ ใช้คอมพิวเตอร์ในการใช้งานโปรแกรม เป็นเครื่องมือช่วยในการร่างแบบชิ้นส่วนสำคัญ และประกอบเป็นชิ้นงานเสมือนจริง ภายในคอมพิวเตอร์ และถูกปรับเปลี่ยนรูปร่างลักษณะก่อนนำมาผลิตชิ้นงานต้นแบบ ชิ้นส่วนในระบบส่วนใหญ่ใช้การสั่งผลิต และบางชิ้นใช้เทคนิคการพิมพ์พลาสติก 3 มิติ ด้วยวัสดุ PLA ในการขึ้นรูปชิ้นส่วนระบบ ซึ่งได้ถูกลงรายละเอียดไว้ในแบบร่างระบบ



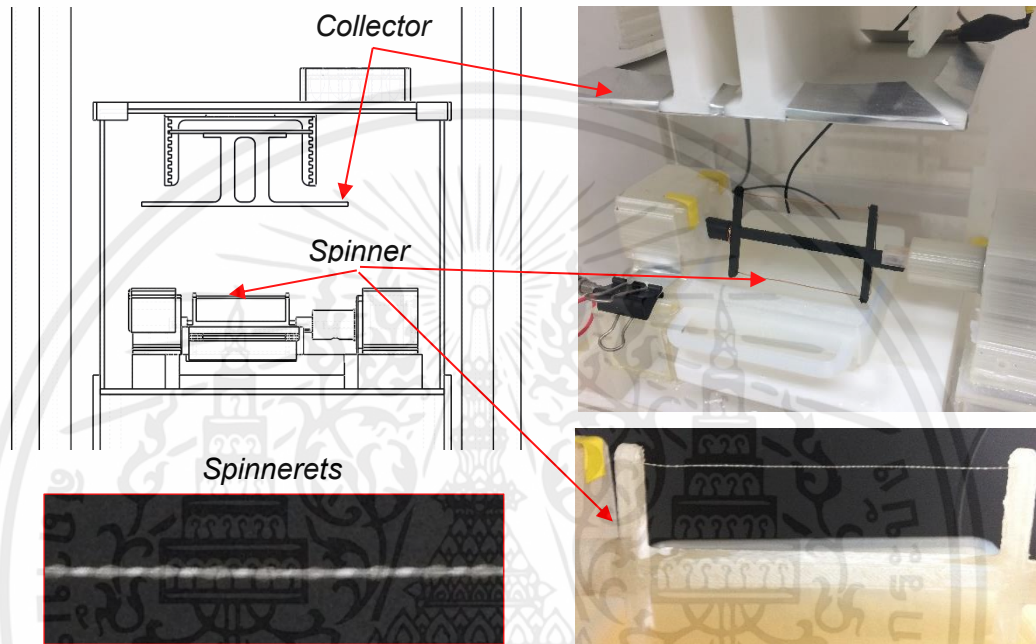
รูปที่ 4.4 แบบร่างองค์ประกอบสำคัญของระบบขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์โดยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระ

องค์ประกอบสำคัญของระบบคือการวางรูปแบบชั่วคราวเพื่อพาสารละลายพอลิเมอร์มาขึ้นรูปภายใต้สนามไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีหมุนชั่วคราวไฟฟ้าไปผ่านสารละลายพอลิเมอร์ที่ถูกบรรจุไว้ด้านล่างแนวการขึ้นรูปเส้นใยเลยเป็นการปั่นจากด้านล่างขึ้นไปยังแผ่นขั้วลบด้านบน

อุปกรณ์สำคัญภายในห้องขึ้นรูปพอลิเมอร์นั้น มีอยู่ 3 ส่วนหลักๆ

- ส่วนแรก กล่าวถึงขั้วไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้ใช้ลวดทองแดงเป็นขั้วบวก ต่อเข้ากับแกนหมุนพลาสติก PLA ที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิคพิมพ์ 3 มิติ โครงตั้งลวดไฟฟ้า มีความยาว 10 เซนติเมตร กว้าง 3 เซนติเมตร ในส่วนของขั้วไฟฟ้า ทำจากแผ่นอลูมิเนียม กว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร ติดอยู่ด้านบน

- ส่วนที่สอง กล่าวถึงห้องขึ้นรูปเส้นใย ทำจากพลาสติก PMMA เพื่อกันการรั่วของไฟฟ้าความต่างศักย์สูงภายในระบบ การออกแบบสามารถทำให้ปรับระยะจากหัวไฟฟ้าลบบไปหัวไฟฟ้าบวกได้ 6 ถึง 10 เซนติเมตร
- ส่วนสุดท้าย กล่าวถึงส่วนควบคุมความเร็วในการหมุนหัวไฟฟ้าบวก ใช้สเต็ปมอเตอร์ NEMA 17 สเต็ป 1.8 กระแส 3 แอมป์ มีความสามารถในการควบคุมความเร็วการหมุน ตั้งแต่ 1 ถึง 60 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.5 แบบร่างภายในระบบขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์โดยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.6 รูปร่างภายนอกของระบบขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์โดยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระ

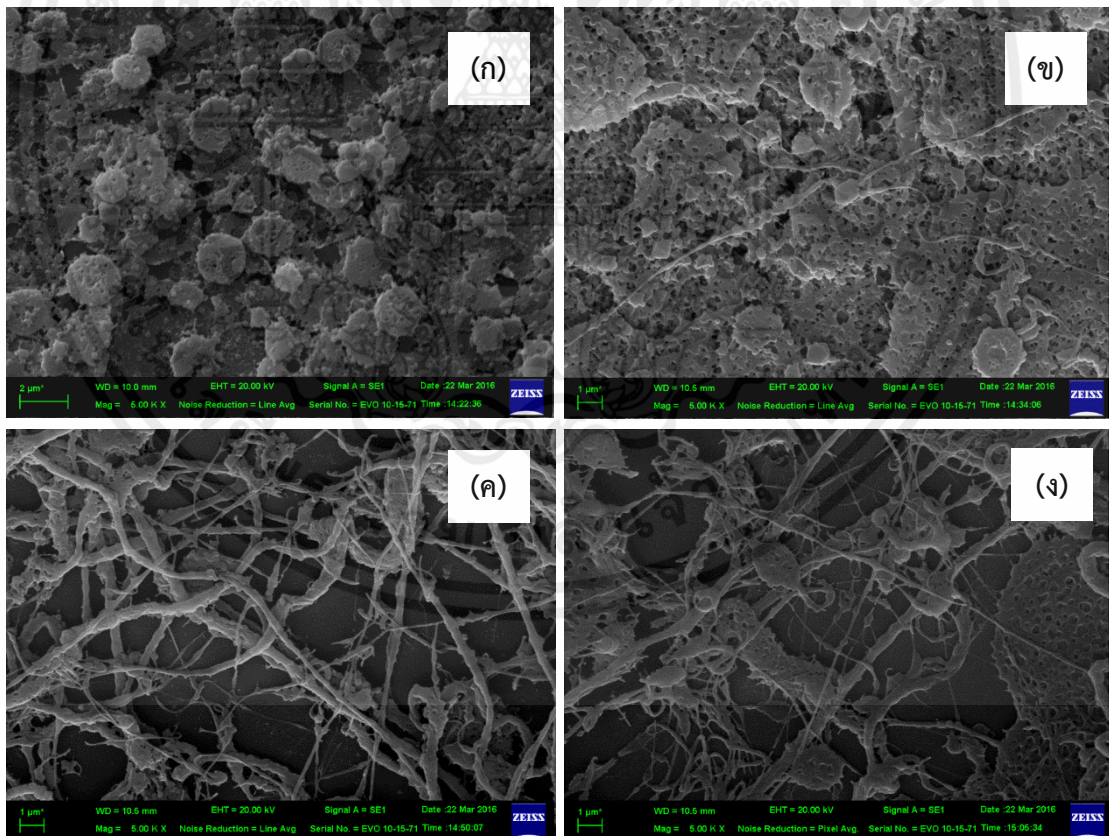
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงข้อมูลของต้นแบบระบบขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์

ขนาดพื้นที่ตัวอย่าง	10 x 10 cm ²
ความยาวขั้วไฟฟ้าที่ใช้ขึ้นรูป	10 cm
ความต่างศักย์ไฟฟ้า	25 kV
ความเร็วรอบที่ปรับเปลี่ยนได้	0 – 25 rpm
ระยะฐานรองรับที่ปรับเปลี่ยนได้	5.5 – 11 cm
ปริมาตรภาคใสสารละลาย	110, 24 ml
ขนาดของระบบ	40 x 35 x 60 cm ³

4.3 ผลการตรวจวิเคราะห์ชิ้นงานทดสอบการขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์โดยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระ

4.3.1 เงื่อนไขความเข้มข้นของสารละลายพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์

ภายหลังจากนำสารละลายพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ในความเข้มข้น 5 , 8 , 11 และ 14 wt% ตามลำดับ มาขึ้นรูปโดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระ บนกระจกสไลด์



รูปที่ 4.7 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ที่

ขึ้นรูปจาก (ก) สารละลายที่มีความเข้มข้น 5 wt% (ข) สารละลายที่มีความเข้มข้น 8 wt%

(ค) สารละลายที่มีความเข้มข้น 11 wt% และ (ง) สารละลายที่มีความเข้มข้น 14 wt%

ในเงื่อนไขความต่างศักย์ 25 kV ระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 9 เซนติเมตร ด้วยความเร็วการหมุนของขั้วไฟฟ้า 20 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลาสั้นๆ 1.30 นาที จากนั้นนำเส้นใยที่ได้มาถ่ายภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเรอกราด Zeiss รุ่น EVO

จากรูปผลการถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ได้ข้อสังเกตว่า ผิวเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ในความเข้มข้น 5 และ 8 wt% ไม่เกิดเส้นใย เนื่องจากมีความหนืดน้อยเกินกว่าแรงทางไฟฟ้าสถิตมาก จึงทำให้ไม่เกิดการรวมของเทเลอร์ ขณะการขึ้นรูปเส้นใย ทำให้สารละลายพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ในความเข้มข้น 5 และ 8 wt% ถูกพ่นออกมาในลักษณะสเปรย์ ในส่วนของผิวเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ในความเข้มข้น 11 และ 14 wt% นั้นพบรูปแบบที่คล้ายเส้นใยค่อนข้างสมบูรณ์ เนื่องจาก มีความหนืดใกล้เคียงแรงทางไฟฟ้าสถิตมาก สารละลายพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ในความเข้มข้น 11 และ 14 wt% จึงถูกขึ้นรูปในลักษณะเส้น เปรียบเทียบความสมบูรณ์ของเส้นใยที่เกิดจากการขึ้นรูปสารละลายพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ในความเข้มข้น 11 กับ 14 wt% ในสารละลายพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ในความเข้มข้น 11 wt% นั้นมีความสมบูรณ์มากกว่าในสารละลายพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ในความเข้มข้น 14 wt% เนื่องจาก มีความหนืดที่ให้แรงตึงผิวใกล้เคียงกับแรงทางไฟฟ้าสถิตภายในระบบการขึ้นรูปมาก สารละลายพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ในความเข้มข้น 11 wt% จึงมีความเหมาะสมในการนำไปขึ้นรูปในระบบนี้

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงข้อมูลของเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ที่ขึ้นรูปจากสารละลายที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน

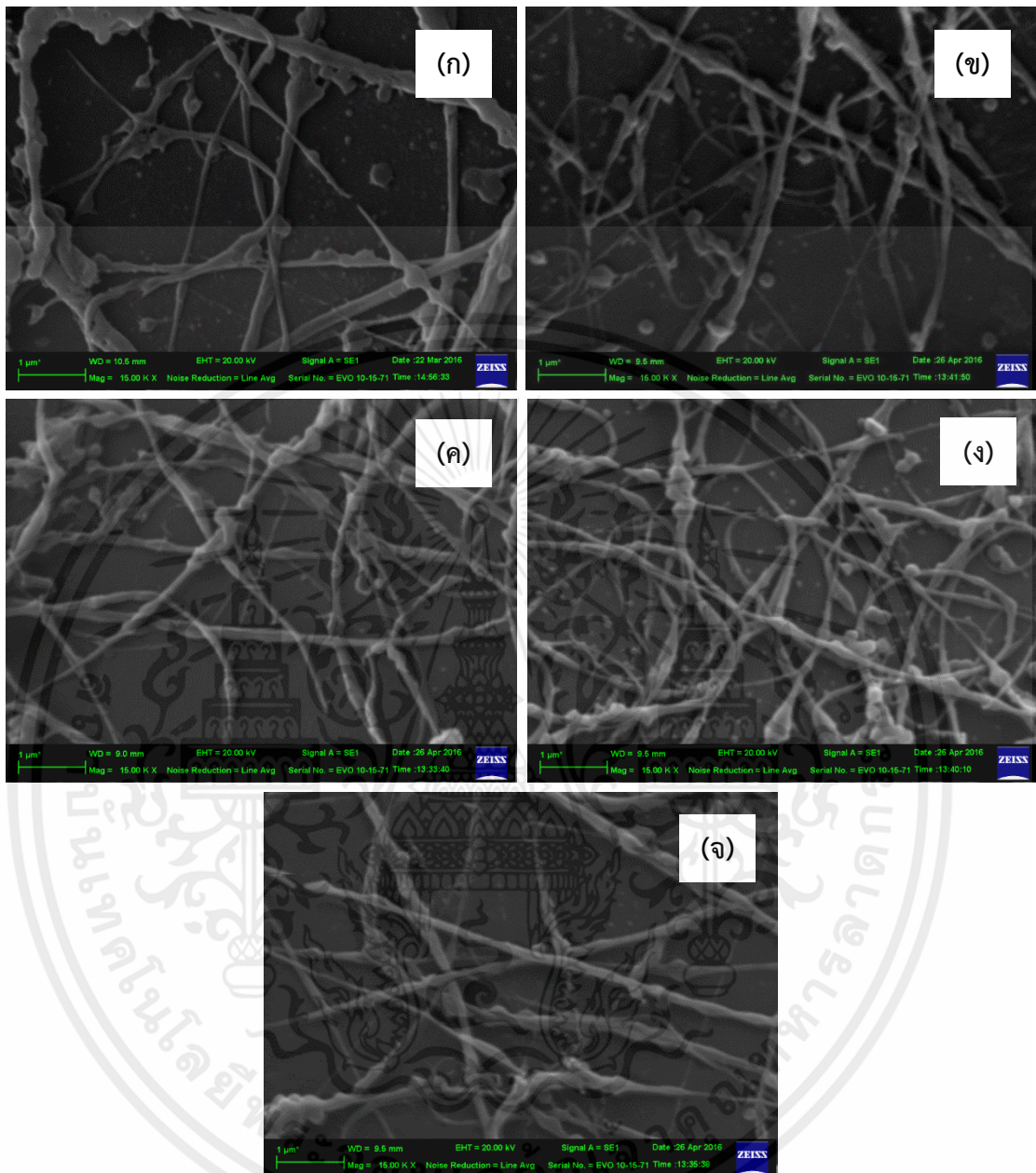
ตัวอย่างจากความเข้มข้น	ลักษณะพื้นผิว	ขนาดเส้นใยเฉลี่ย	ค่าการกระจายตัว
5 wt%	เกล็ด แผ่นไม่ต่อเนื่อง	-	-
8 wt%	เกล็ด แผ่นไม่ต่อเนื่อง	-	-
11 wt%	เส้นใยไม่สมบูรณ์	210 nm	±201 nm
14 wt%	เส้นใยไม่สมบูรณ์	511 nm	±321 nm

4.3.2 เงื่อนไขสนามไฟฟ้าโดยการปรับระยะระหว่างฐานรองรับกับขั้วไฟฟ้า

ภายหลังจากนำสารละลายพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 11 wt% มาขึ้นรูปโดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระบนกระจกสไลด์ เป็นระยะเวลา 1.30 นาที ในเงื่อนไขความต่างศักย์ 25 kV ระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 6 , 7 , 8 , 9 และ 10 เซนติเมตร ด้วยความเร็วการหมุนของขั้วไฟฟ้า 20 รอบต่อนาที จากนั้นนำเส้นใยที่ได้มาถ่ายภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์

อิเล็กตรอนแบบเรอกราด Zeiss รุ่น EVO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

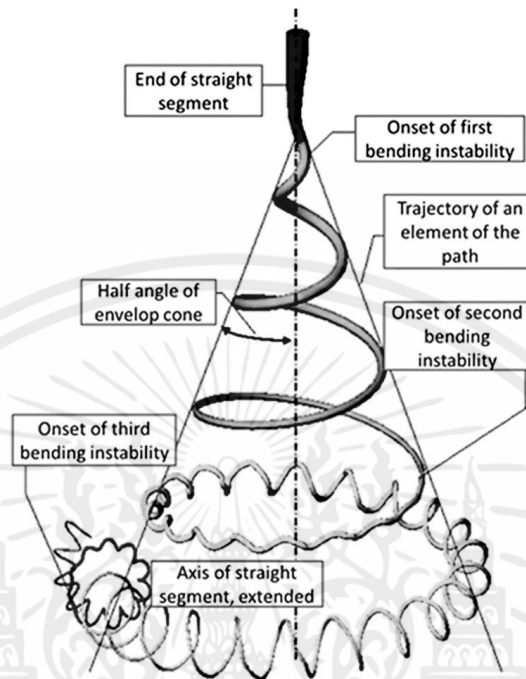


รูปที่ 4.8 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใย
พอลิไวนิลลิดีนไدفลูออไรด์ที่ถูกขึ้นรูปห่างจากขั้วไฟฟ้าลบ

(ก) 6 เซนติเมตร (ข) 7 เซนติเมตร (ค) 8 เซนติเมตร (ง) 9 เซนติเมตร และ (จ) 10 เซนติเมตร

จากรูปผลการถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ได้ข้อสังเกตว่า ผิวเส้น
เอกสารนี้เป็นใยพอลิไวนิลลิดีนไدفลูออไรด์ในเงื่อนไขความต่างศักย์ 25 kV ระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับ
ไม่ว่ากรณีใด 6, 7, 8, 9 และ 10 เซนติเมตร พบลักษณะเส้นใยของพอลิไวนิลลิดีนไدفลูออไรด์ ในทุกเงื่อนไข
เมื่อพิจารณาถึงความสมบูรณ์ของเส้นใย เส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไدفลูออไรด์ในเงื่อนไขความต่างศักย์

25 kV ระยะห่างจากหัวไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 6 และ 7 เซนติเมตร มีความไม่สมบูรณ์อยู่มาพอสมควร เนื่องจาก แรงทางไฟฟ้ามีผลมากเกินไป ประกอบกับระยะทางที่เส้นใยถูกขึ้นรูปนั้นมีค่าน้อยกว่า ระยะการโค้งตัวของโพลีเมอร์ที่ถูกฉีด ทำให้เส้นใยมีความตรงแต่ไม่ต่อเนื่อง



รูปที่ 4.9 ลักษณะเส้นใยขณะถูกฉีดจากกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต[69]

ในส่วนของ เส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ในเงื่อนไขความต่างศักย์ 25 kV ระยะห่างจากหัวไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 8 , 9 และ 10 เซนติเมตร มีความเป็นเส้นใยที่สมบูรณ์กว่า เนื่องจาก แรงทางไฟฟ้ามีค่าประมาณแรงตึงผิวพอดี[67,68] ประกอบกับระยะทางที่เส้นใยถูกขึ้นรูปนั้นมีค่ามากกว่า ระยะการโค้งตัวของโพลีเมอร์ที่ถูกฉีด ทำให้เส้นใยมีความต่อเนื่อง และ เมื่อพิจารณาความสมบูรณ์ของเส้นใยนั้น เส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ในเงื่อนไขความต่างศักย์ 25 kV ระยะห่างจากหัวไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 9 เซนติเมตร มีความสมบูรณ์ที่สุด เนื่องจากเหตุผลข้างต้นที่กล่าวไป

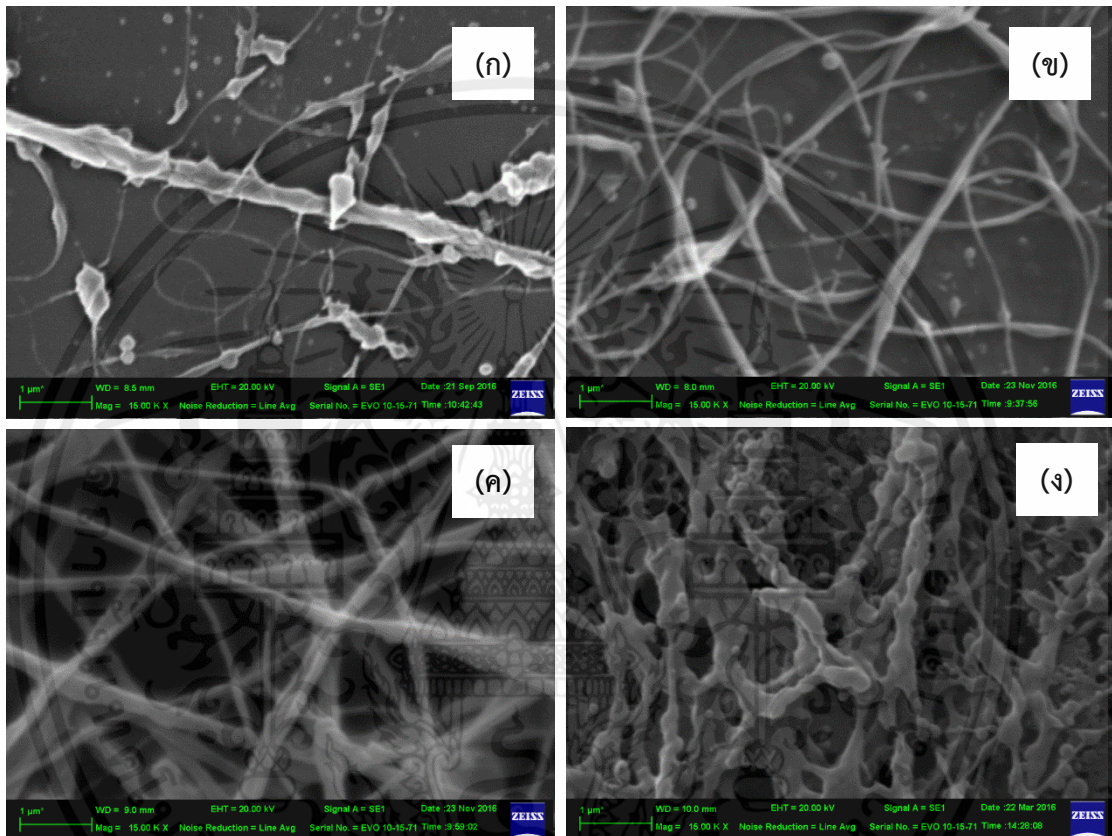
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงข้อมูลของเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ที่ขึ้นรูปจากการปรับระยะห่างจากหัวไฟฟ้าลบบแตกต่างกัน

ตัวอย่างที่ห่างจากหัวลบบ	ลักษณะพื้นผิว	ขนาดเส้นใยเฉลี่ย	ค่าการกระจายตัว
6 เซนติเมตร	เส้นใยไม่สมบูรณ์	398 nm	± 305 nm
7 เซนติเมตร	เส้นใยไม่สมบูรณ์	347 nm	± 221 nm
8 เซนติเมตร	เส้นใยไม่สมบูรณ์	305 nm	± 226 nm
9 เซนติเมตร	เส้นใยไม่สมบูรณ์	210 nm	± 201 nm
10 เซนติเมตร	เส้นใยไม่สมบูรณ์	193 nm	± 179 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นสำหรับการใช้ในห้องเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ หรือใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหาไปใช้ได้อย่างอิสระของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณไปใช้

4.3.3 เงื่อนไขความเร็วในการหมุนขั้วไฟฟ้าในการใช้ชั้นรูปเส้นใย

ภายหลังจากนำสารละลายพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 11 wt% มาขึ้นรูปโดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระบนกระจกสไลด์ เป็นระยะเวลา 15 นาที ในเงื่อนไขความต่างศักย์ 25 kV ระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 9 เซนติเมตร ด้วยความเร็วการหมุนของขั้วไฟฟ้า 5 , 10 , 15 และ 20 รอบต่อนาทีจากนั้นนำเส้นใยที่ได้มาถ่ายภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเรอกราด Zeiss รุ่น EVO



รูปที่ 4.10 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ที่ถูกขึ้นรูปด้วยความเร็วการหมุนของขั้วไฟฟ้า (ก) 5 รอบต่อนาที (ข) 10 รอบต่อนาที (ค) 15 รอบต่อนาที และ (ง) 20 รอบต่อนาที

จากรูปผลการถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ได้ข้อสังเกตว่า ผิวเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ ที่ขึ้นรูปเส้นใยด้วยความเร็วการหมุนของขั้วไฟฟ้า 5 , 10 และ 15 รอบต่อนาที พบลักษณะเส้นใยของพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ เนื่องจากมีความเร็วที่เหมาะสมกับอัตราการขึ้นรูปเส้นใย ผิวเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ ที่ขึ้นรูปเส้นใยด้วยความเร็วการหมุนของขั้วไฟฟ้า 5 รอบต่อนาที นั้นมีความสมบูรณ์ของเส้นใยต่ำ เนื่องจาก อัตราการพาสารละลายพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ นั้นต่ำกว่าอัตราการขึ้นรูปโดยสนามไฟฟ้า ในส่วนของผิวเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ ที่ขึ้นรูปเส้นใยด้วยความเร็วการหมุนของขั้วไฟฟ้า 10 และ 15 รอบต่อนาที มีความสมบูรณ์

ของเส้นใยมาก แต่มีข้อแตกต่างให้เห็นคือ ความตรงของเส้นใยนั้นต่างกัน ผิวเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ ที่ขึ้นรูปเส้นใยด้วยความเร็วการหมุนของขั้วไฟฟ้า 10 รอบต่อนาที มีความโค้งของเส้นใยมากกว่า เนื่องจากมีความเร็วในการขึ้นรูปต่ำกว่าเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ ที่ขึ้นรูปเส้นใยด้วยความเร็วการหมุนของขั้วไฟฟ้า 15 รอบต่อนาที จึงมีระยะเวลาอยู่ในภาวะศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่า 25 kV อยู่มาก ทำให้เส้นใยไม่ตรง ในส่วนของ ผิวเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ ที่ขึ้นรูปเส้นใยด้วยความเร็วการหมุนของขั้วไฟฟ้า 20 รอบต่อนาที ไม่พบลักษณะเส้นใยมากนัก เนื่องจากมีความเร็วในการจ่ายสารละลายมากเกินไป จึงทำให้เส้นใยที่ยังไม่แห้งด้านบนไปติดกับเส้นใยใหม่ จึงเกิดกลุ่มของพอลิเมอร์ในแบบข้างต้น

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงข้อมูลของเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ที่ขึ้นรูปจากการปรับความเร็วในการหมุนขั้วไฟฟ้าลบบแตกต่างกัน

ความเร็วการหมุนของขั้ว	ลักษณะพื้นผิว	ขนาดเส้นใยเฉลี่ย	ค่าการกระจายตัว
5 รอบต่อนาที	เส้นใยไม่สมบูรณ์	264 nm	±211 nm
10 รอบต่อนาที	เส้นใยไม่สมบูรณ์	244 nm	±128 nm
15 รอบต่อนาที	เส้นใยสมบูรณ์ แบบส้อม	214 nm	±91 nm
20 รอบต่อนาที	กลุ่มของพอลิเมอร์	-	-

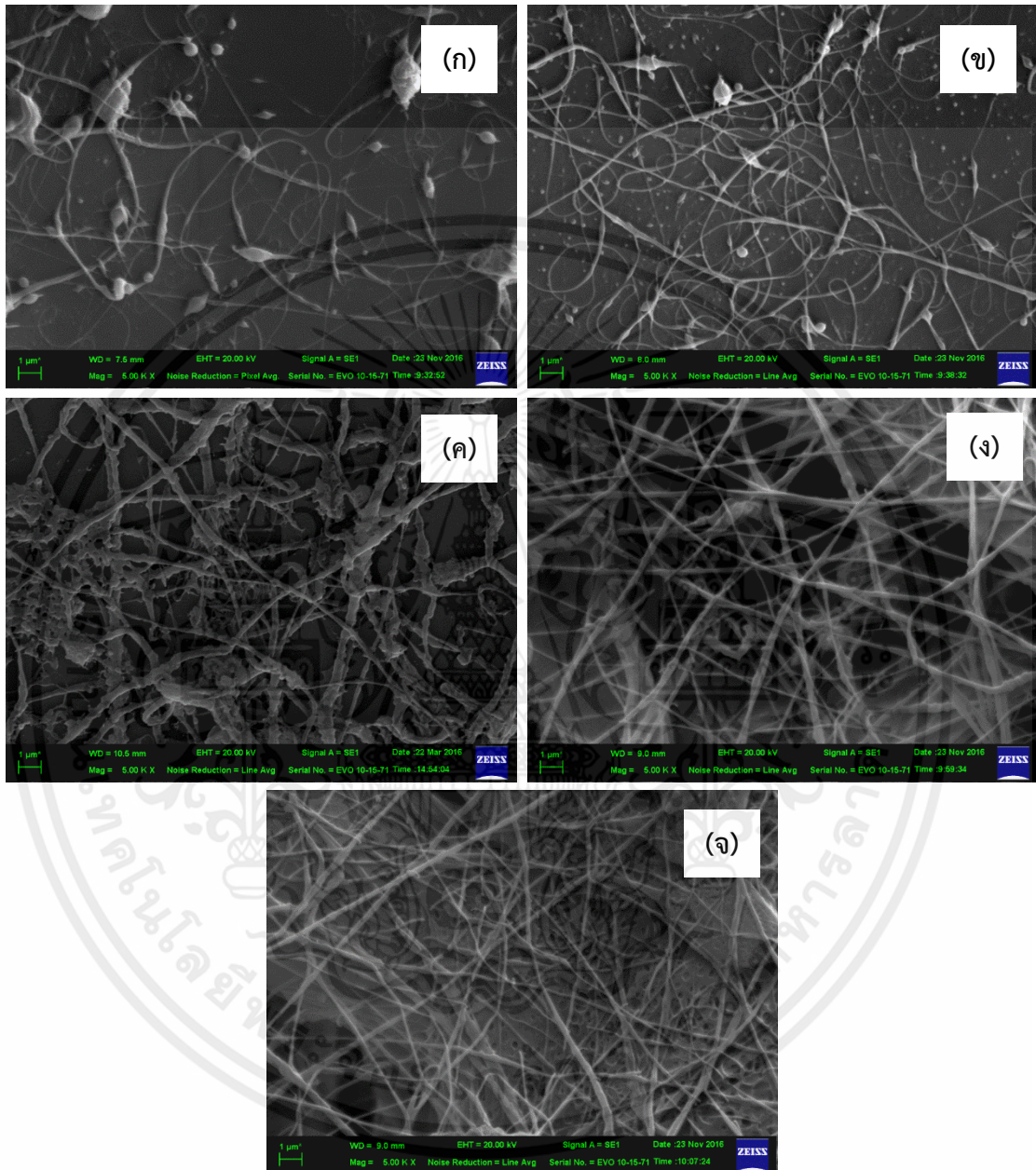
4.3.4 เจื่อนไชระยะเวลาในการขึ้นรูป

ภายหลังจากนำสารละลายพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 11 wt% มาขึ้นรูปโดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระบนกระจกสไลด์ เป็นระยะเวลา 1.30 , 5 , 15 , 30 และ 60 นาที ในเงื่อนไขความต่างศักย์ 25 kV ระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 9 เซนติเมตร ด้วยความเร็วการหมุนของขั้วไฟฟ้า 15 รอบต่อนาทีจากนั้นนำเส้นใยที่ได้มาถ่ายภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเรอกราด Zeiss รุ่น EVO

จากรูปผลการถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ได้ข้อสังเกตว่า ผิวเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ ที่ขึ้นรูปโดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระ เป็นระยะเวลา 1.30 , 5 , 15 , 30 และ 60 นาทีนั้น พบลักษณะเส้นใยของพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ ซึ่งมีความหนาแน่นของเส้นใยแตกต่างกันไป โดยความหนาแน่นของเส้นใยสูงสุด คือเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ ที่ขึ้นรูปโดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระ เป็นระยะเวลา 60 นาที เนื่องจากมีปริมาณพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ที่ถูกขึ้นรูปมากที่สุด เนื่องจากปลูกเป็นระยะเวลานาน

ถึงแม้ว่าเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ ที่ขึ้นรูปโดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระ เป็นระยะเวลา 60 นาที จะมีปริมาณพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์มาก แต่เส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ ที่ขึ้นรูปโดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระ เป็นระยะเวลา 60 นาที มีความเป็นเส้นใยทั้งฟิล์มต่ำกว่า เส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ ที่ขึ้นรูปโดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจาก

ผิวลวดอิสระ เป็นระยะเวลา 30 นาที เนื่องจากการปลูกเป็นระยะเวลานานทำให้เส้นใยชั้นล่างรวมตัวกันเป็นกลุ่ม ทำให้บริเวณด้านล่างไม่มีสมบัติของเส้นใย



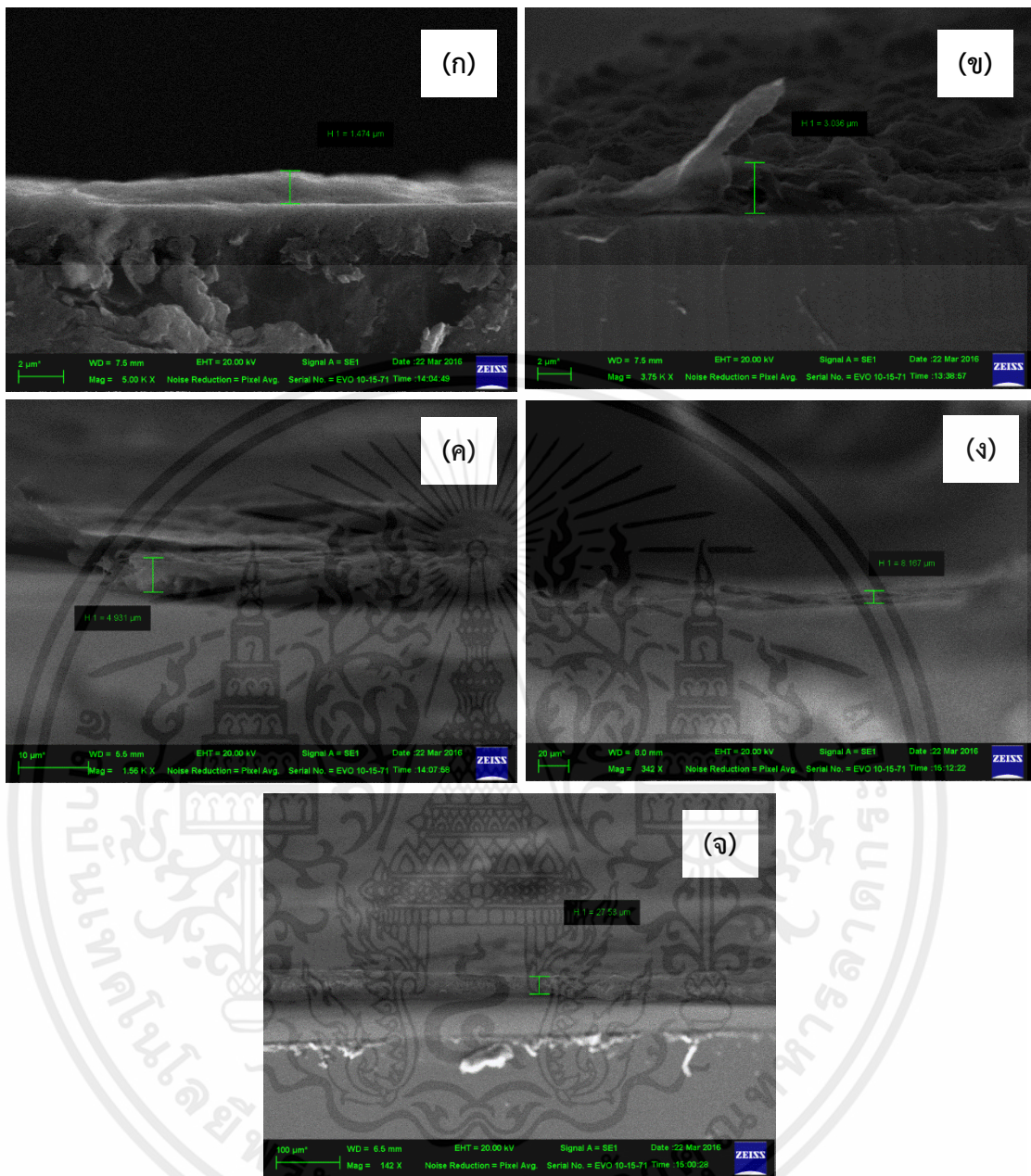
รูปที่ 4.11 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใย

พอลิไวนิลลิดีนไดฟลูออไรด์ที่ถูกขึ้นรูป (ก) เป็นระยะเวลา 1.30 นาที

(ข) เป็นระยะเวลา 5 นาที (ค) เป็นระยะเวลา 15 นาที

(ง) เป็นระยะเวลา 30 นาที และ (จ) เป็นระยะเวลา 60 นาที

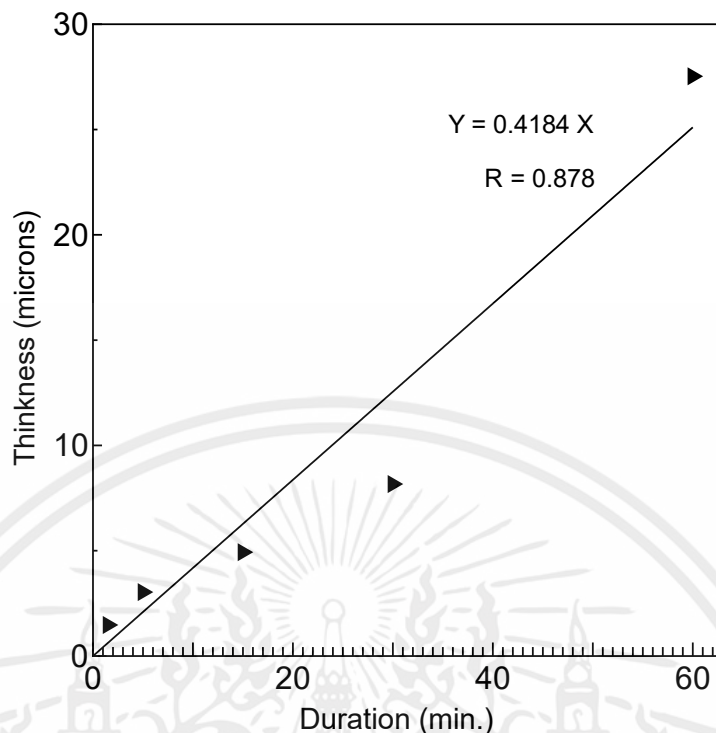
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใย
พอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ที่ถูกขึ้นรูป

(ก) เป็นระยะเวลา 1.30 นาที (ข) เป็นระยะเวลา 5 นาที (ค) เป็นระยะเวลา 15 นาที
(ง) เป็นระยะเวลา 30 นาที และ (จ) เป็นระยะเวลา 60 นาที

การวิเคราะห์ความหนาจากรูปผลการถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
ได้ข้อสังเกตว่า เส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ ที่ขึ้นรูปโดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวด
อิสระ เป็นระยะเวลา 1.30 , 5 , 15 , 30 และ 60 นาทีนั้น แบบภาพตัดขวางนั้น ทำให้ทราบถึงความ
หนาของการขึ้นรูปโดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระ ในระยะเวลาต่างๆ



รูปที่ 4.13 ได้ผลการคำนวณหาอัตราการขึ้นรูปจากความหนาและเวลาในการขึ้นรูป

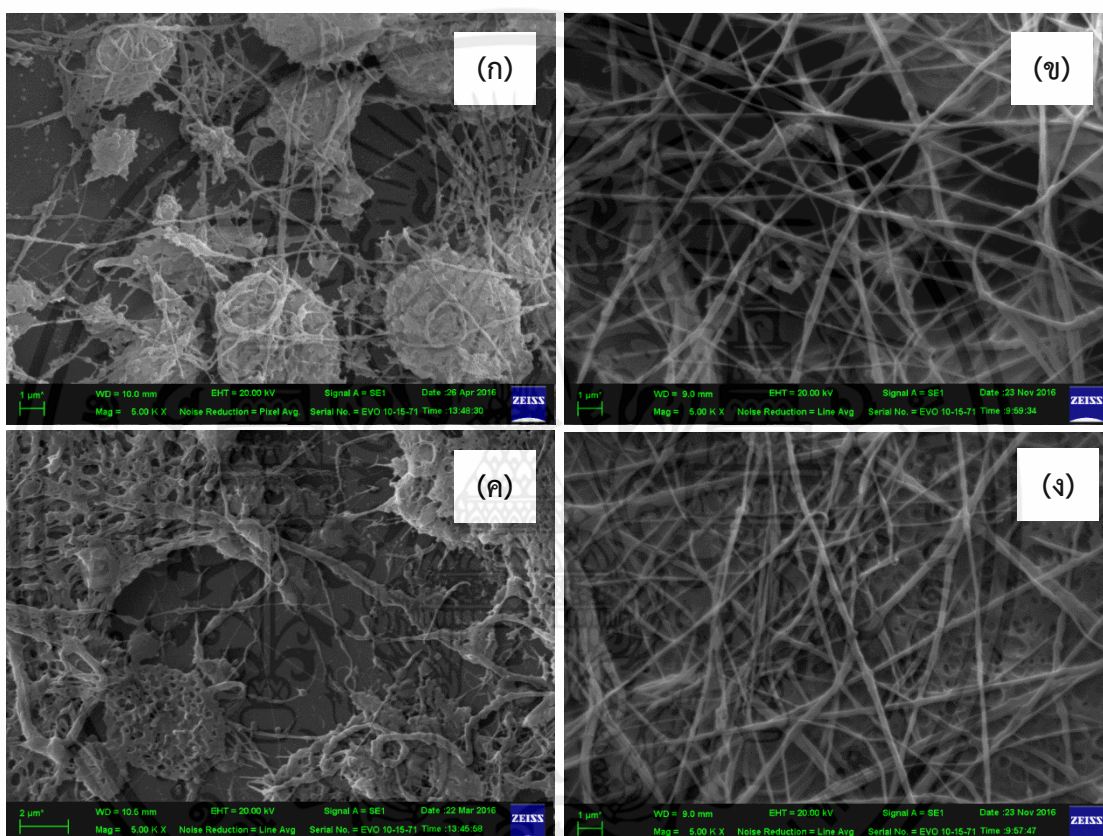
ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงข้อมูลของเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ที่ขึ้นรูปด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน

ระยะเวลาในการปลูก	ความหนาเฉลี่ย	ขนาดเส้นใยเฉลี่ย	ค่าการกระจายตัว
1.30 นาที	1.51 μm	186 nm	± 158 nm
5 นาที	3.16 μm	202 nm	± 109 nm
15 นาที	5.33 μm	214 nm	± 91 nm
30 นาที	8.22 μm	227 nm	± 90 nm
60 นาที	26.98 μm	220 nm	± 96 nm

ทำให้สามารถควบคุมความหนาจากระยะเวลาการขึ้นรูปได้โดย สร้างความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาในการขึ้นรูป โดยนำข้อมูลความหนา 1.51 , 3.16 , 5.33 , 8.22 และ 26.98 ไมโครเมตร ในแต่ละระยะเวลา 1.30 , 5 , 15 , 30 และ 60 นาที ทำการกำหนดความสัมพันธ์ของกราฟแบบเส้นตรง โดยใช้ Least Square Linear Regression ได้ผลการคำนวณหาอัตราการขึ้นรูปเท่ากับ 0.4184 ไมโครเมตรต่อวินาที

4.3.5 เจื่อนโซฐานรอรบหลกหลยชนิด

นำสารละลายพอลิไวนิลิดินไดฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 11 wt% มาขึ้นรูปโดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระบนกระจกสไลด์ แผ่นอลูมิเนียม แผ่นพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์ และบนกระดาษ เป็นระยะเวลา 30 นาที ในเจื่อนโซความต้งศักย์ 25 kV ระยะห้งจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรอรบ 9 เซนติเมตร ด้วยความเร็วการหมุนของขั้วไฟฟ้า 15 รอบต่อนาทีจากนั้นนำเส้นใยที่ได้มาถ่ายภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Zeiss รุ่น EVO และ เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ Rikgaku รุ่น SmartLab



รูปที่ 4.14 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยพอลิไวนิลิดินไดฟลูออไรด์บน

(ก) อลูมิเนียม (ข) กระจก (ค) พอลิไวนิลคลอไรด์ (ง) กระดาษ

จากรูปผลการถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ได้ข้อสังเกตว่า ผิวเส้นใยพอลิไวนิลิดินไดฟลูออไรด์ ที่ขึ้นรูปโดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระบนกระจกสไลด์ แผ่นอลูมิเนียม แผ่นพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์ และบนกระดาษ พบลักษณะเส้นใยของพอลิไวนิลิดินไดฟลูออไรด์ ถึงแม้ว่า ความสมบูรณ์ของเส้นใยจะแตกต่างกันไปในแต่ละฐานรอรบ จากภาพผิวเส้นใย จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า ผิวเส้นใยพอลิไวนิลิดินไดฟลูออไรด์ ที่ขึ้นรูปโดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระบนกระดาษ มีความสมบูรณ์ของเส้นใยมากที่สุด

รองลงมา คือผิวเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ ที่ขึ้นรูปโดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระบนกระจกสไลด์ ตัวอย่างที่มีความสมบูรณ์ของเส้นใยน้อยที่สุด คือผิวเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ ที่ขึ้นรูปโดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระบนพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์ การที่เส้นใยมีลักษณะต่างกัน เนื่องจาก ผลกระทบ 2 ข้อหลัก[69] คือ

1. ความเป็นรูพรุนของวัสดุฐานรองรับ เพราะ ขณะทำการขึ้นรูป จะมีส่วนของสารละลายโพลีเมอร์ส่วนเกินที่ไม่ได้อยู่ในรูปเส้นใย เนื่องจากมีบางส่วนได้รับสนามไฟฟ้ามากจนเกิดการสเปรย์ทำให้พอลิเมอร์ที่ถูกขึ้นรูปมีลักษณะเป็นมัดของเส้นใยและละลายติดกัน อีกผลหนึ่งจากผลของความเป็นรูพรุน เมื่อสารละลายแห้งกลายเป็นเส้นใย ตัวทำละลายสามารถซึมเข้าสู่ฐานรองรับได้ ทำให้เส้นใยพอลิเมอร์แห้งเร็ว และกลายเป็นเส้นใยที่ตรง
2. ค่าไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) ของฐานรองรับ ซึ่งต้องมีค่าเหมาะสมกับสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการขึ้นรูป เนื่องจากการติดฐานรองรับกับแผ่นขั้วลบ ทำให้เกิดช่องว่างและมีโครงสร้างเสมือนตัวเก็บประจุ ค่าไดอิเล็กทริก มีผลต่อการรวมกลุ่มกันของประจุบนฐานรองรับ ค่าไดอิเล็กทริกของฐานรองรับที่เหมาะสม ควรมีค่าไม่มากเกินไป จนต้านทานการรวมกันของประจุ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ เส้นใยของพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ที่ขึ้นรูปบนฐานรองรับกระจก กับ เส้นใยของพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ที่ขึ้นรูปบนฐานรองรับกระดาศ มีความต่างกันของลักษณะเส้นใย เนื่องจากค่าไดอิเล็กทริกของกระจก มีค่า 7.6-8 ในขณะที่ ค่าไดอิเล็กทริกของกระดาศมีค่า 3 เท่านั้น

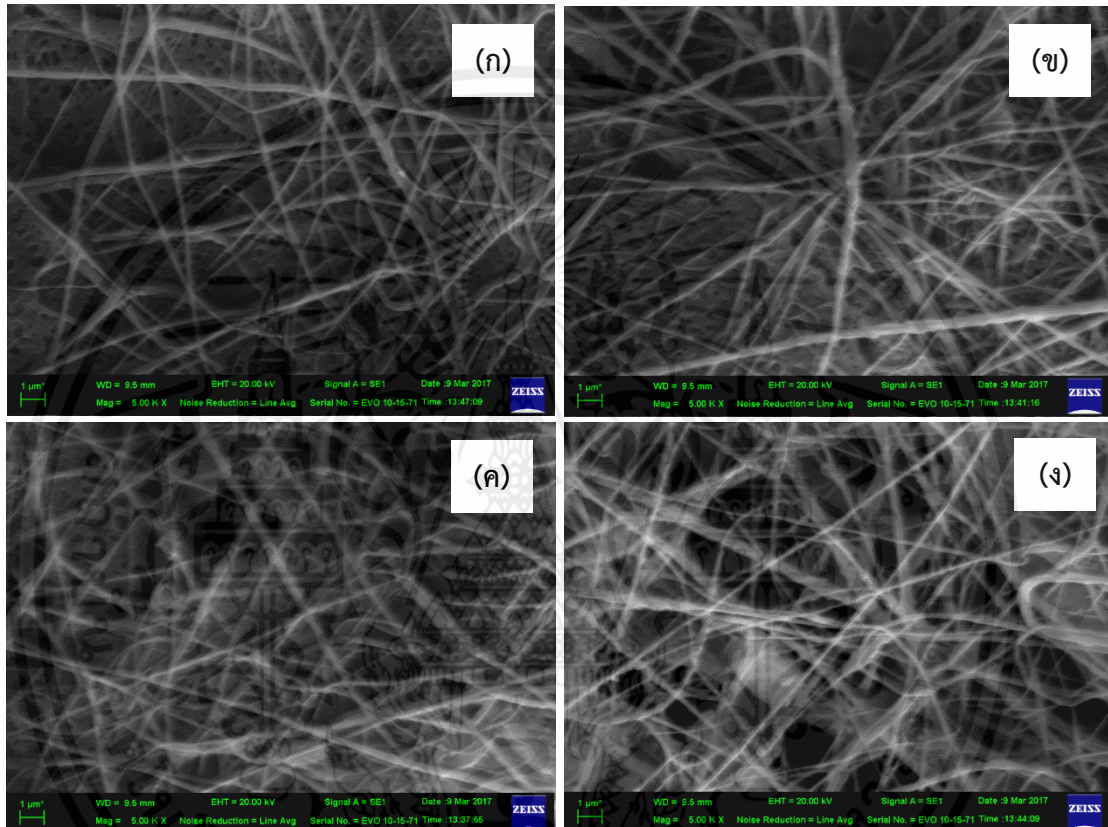
ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงข้อมูลของเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ที่ขึ้นรูปจากวัสดุแตกต่างกัน

วัสดุฐานรองรับ	ลักษณะพื้นผิว	ขนาดเส้นใยเฉลี่ย	ค่าการกระจายตัว
อลูมิเนียม	เกล็ด แผ่นไม่ต่อเนื่อง	-	-
กระจก	เส้นใยสมบูรณ์ แบบสุ่ม	227 nm	±90 nm
พอลิไวนิลคลอไรด์	เกล็ด แผ่นไม่ต่อเนื่อง	-	-
กระดาศ	เส้นใยสมบูรณ์ แบบสุ่ม	255 nm	±76 nm

4.3.6 เงื่อนไขขนาดของเส้นลวดบนขั้วที่ใช้ปลูก

นำสารละลายพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 11 wt% มาขึ้นรูปโดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระบนกระดาศ เป็นระยะเวลา 15 นาที ในเงื่อนไขความต่างศักย์ 25 kV ระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 9 เซนติเมตร ด้วยความเร็วการหมุนของขั้วไฟฟ้า 15 รอบต่อ นาที โดยใช้ขนาดของลวดในการปลูกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.02 , 0.05 , 0.1 และ 0.2 มิลลิเมตร จากนั้นนำเส้นใยที่ได้มาถ่ายภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด Zeiss รุ่น EVO

จากรูปผลการถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ได้ข้อสังเกตว่า ใยเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ ที่ขึ้นรูปโดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระบนกระดาด มีลักษณะเส้นใยของพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ ที่มีความสมบูรณ์ในทุกขนาดลวด โดยที่ขนาดลวด 0.02 มิลลิเมตร ให้ขนาดเส้นใยเฉลี่ย 267 นาโนเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กที่สุดเมื่อเทียบกับทั้งหมด ในขณะที่ขนาดลวด 0.2 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นช่วงที่มีความหนาแน่นสูงสุด ให้ขนาดเส้นใยอยู่ที่ 461 นาโนเมตร ขนาดของเส้นใยมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับขนาดของเส้นลวดที่ใช้ปลูกเส้นใย



รูปที่ 4.15 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใย

พอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์บนกระดาดจากลวดขนาด

(ก) 0.02 มิลลิเมตร (ข) 0.05 มิลลิเมตร (ค) 0.1 มิลลิเมตร และ (ง) 0.2 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงข้อมูลของเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ที่ขึ้นรูปจากช่วงขนาดต่างกัน

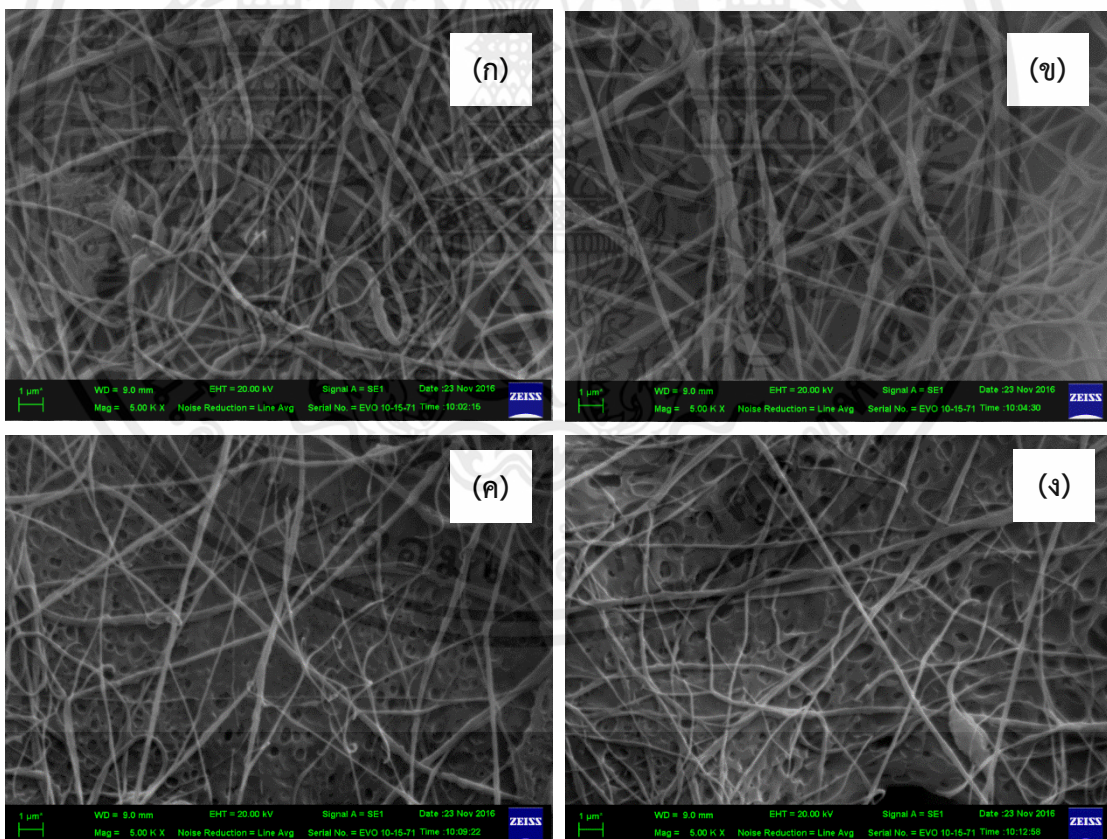
ขนาดลวดบนขั้ว	ลักษณะพื้นผิว	ขนาดเส้นใยเฉลี่ย	ค่าการกระจายตัว
0.02 mm	เส้นใยสมบูรณ์ แบบสุ่ม	154 nm	±74 nm
0.05 mm	เส้นใยสมบูรณ์ แบบสุ่ม	172 nm	±83 nm
0.1 mm	เส้นใยสมบูรณ์ แบบสุ่ม	227 nm	±79 nm
0.2 mm	เส้นใยสมบูรณ์ แบบสุ่ม	255 nm	±76 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารทศงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกสิ่งนี้ออกไป และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการวัดทางไฟฟ้าของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก

4.4.1 อุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก พอลิไวโนลิตินไดฟลูออไรด์จากเงื่อนไขสนามไฟฟ้าโดยการปรับระยะระหว่างฐานรองรับกับขั้วไฟฟ้า

ภายหลังจากนำสารละลายพอลิไวโนลิตินไดฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 11 wt% มาขึ้นรูปโดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากฉนวนอลูมิเนียมที่เขียนด้วยหมึกนำไฟฟ้า ที่มีสภาพต้านทาน 1 โอห์ม ต่อเซนติเมตร บนกระดาษ เป็นระยะเวลา 30 นาที ในเงื่อนไขความต่างศักย์ 25 kV ระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 7 , 8 , 9 และ 10 เซนติเมตร ด้วยความเร็วการหมุนของขั้วไฟฟ้า 15 รอบต่อ นาทีแล้วทำการให้ความร้อน 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 10 นาที เพื่อให้พอลิไวโนลิตินไดฟลูออไรด์เปลี่ยนโครงสร้างเป็นโครงสร้างเบตาอย่างสมบูรณ์ จากนั้นตัดบางส่วนไปทำการถ่ายภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Zeiss รุ่น EVO ต่อมาทำการวิเคราะห์การโครงสร้าง ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ Rikgaku รุ่น SmartLab จากนั้นทำการวิเคราะห์หองค์ประกอบ ด้วยเครื่องมือ Fourier- transform infrared spectrometer PerkinElmer รุ่น UATR Two และนำอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กมาทำการวัดค่าความต่างศักย์ขณะลัดวงจร และ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ออกมาจากอุปกรณ์ มาเทียบกับเวลา



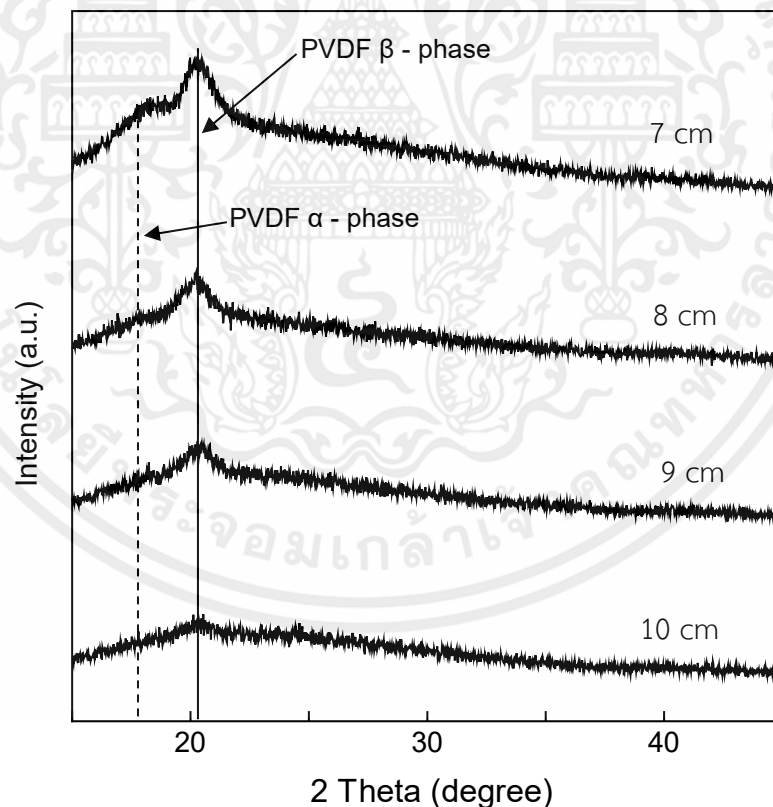
รูปที่ 4.16 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยพอลิไวโนลิตินไดฟลูออไรด์บนอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กในเงื่อนไขระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับ

(ก) 7 เซนติเมตร (ข) 8 เซนติเมตร (ค) 9 เซนติเมตร และ (ง) 10 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงข้อมูลของเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์บนอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณไฟฟ้าขนาดเล็กในเงื่อนไขระยะห่างจากหัวไฟฟ้าถึงฐานรองรับต่างกัน

ระยะห่างจากหัว	ลักษณะพื้นผิว	ขนาดเส้นใยเฉลี่ย	ค่าการกระจายตัว
7 cm	เส้นใยสมบูรณ์ แบบสุ่ม	297 nm	±62 nm
8 cm	เส้นใยสมบูรณ์ แบบสุ่ม	288 nm	±66 nm
9 cm	เส้นใยสมบูรณ์ แบบสุ่ม	257 nm	±65 nm
10 cm	เส้นใยสมบูรณ์ แบบสุ่ม	198 nm	±64 nm

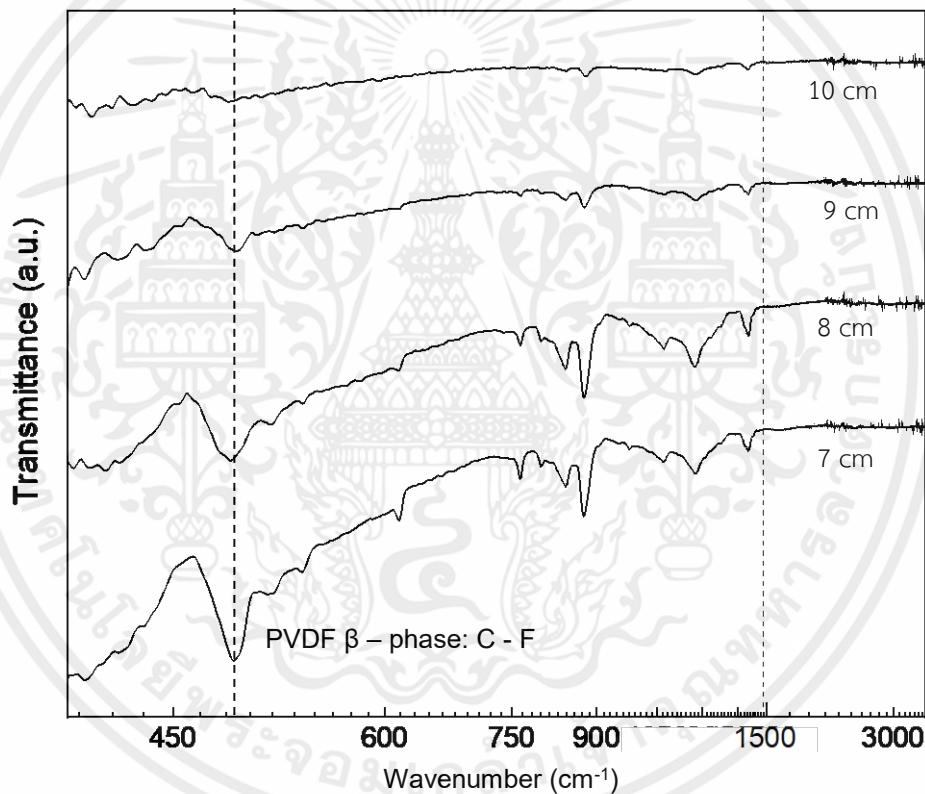
จากผลการถ่ายภาพภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด ทำให้ทราบถึงความหนาแน่นของเส้นใยที่เงื่อนไขความต่างศักย์ 25 kV ระยะห่างจากหัวไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 7 , 8 , 9 และ 10 เซนติเมตร พบว่า เส้นใยที่ปลูกด้วยระยะห่างจากหัวไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 7 เซนติเมตร มีความหนาแน่นของเส้นใยสูง และมีขนาดเส้นใยใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วง 50 – 300 นาโนเมตร ซึ่งขนาดของเส้นใยมีค่าไม่ต่างกับเส้นใยที่ปลูกด้วยระยะห่างจากหัวไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 8 , 9 และ 10 เซนติเมตร



รูปที่ 4.17 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์

บนอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กในเงื่อนไขระยะห่างจากหัวไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 7-10 เซนติเมตร

จากกราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์บนอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กในเงื่อนไขระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 7-10 เซนติเมตร นั้นพบพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ก่อตัวแบบพหุผลึก มีความเป็นผลึกสูงสุดอยู่ที่ เงื่อนไขระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 7 เซนติเมตร เนื่องจากมีความหนาแน่นของเส้นใยที่สูง (ดูจากผลจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์บนอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก) ขนาดผลึกจึงมีขนาดใหญ่ตาม และพบปริมาณผลึกมากที่สุดเนื่องจากมีความหนาแน่นมากที่สุดเมื่อปลูกในระยะเวลาเท่ากัน จากเหตุดังกล่าวทำให้ความเป็นผลึก[68] และปริมาณผลึกมีค่าลดลงตามเงื่อนไขระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับจาก 7 ถึง 10 เซนติเมตร



รูปที่ 4.18 การทะลุผ่านของรังสีอินฟราเรดของเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์บนอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กในเงื่อนไขระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 7-10 เซนติเมตร

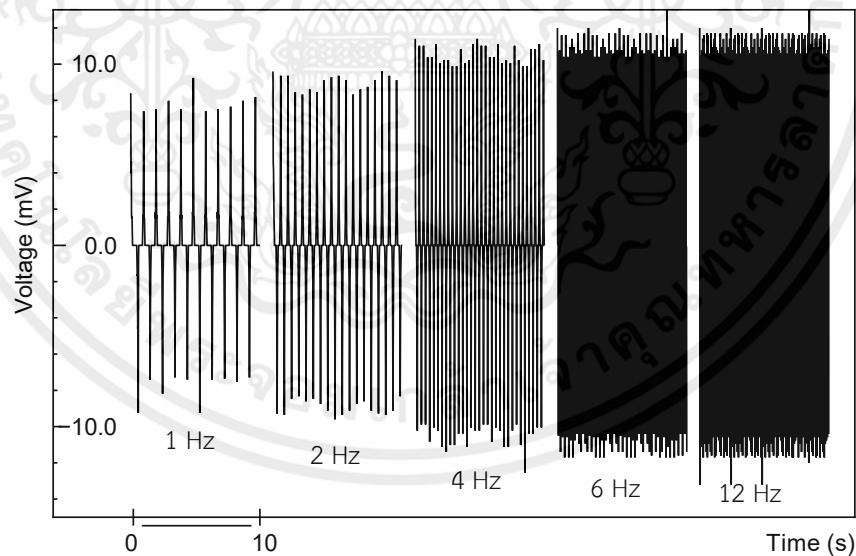
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้รับแปลงข้อมูลหรือข้อมูลอื่นจากเอกสารดังกล่าวไปใช้

โครงสร้างของเส้นใยพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ที่พบมี 2 โครงสร้างคือโครงสร้างแอลฟา (alpha-phase) ณ ตำแหน่ง 17.7° และโครงสร้างเบตา (beta-phase) ณ ตำแหน่ง 20.6° (JCPDS

card No. : 38 – 1638) อย่างไรก็ตามอัตราการสร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าตามการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างนั้นขึ้นกับปริมาณโครงสร้างเบตาเป็นหลัก เนื่องจากโครงสร้างนี้มีความเป็นเพียโซอิเล็กทริกที่สูง [70,71] ผลของการวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าจึงเป็นไปตามแนวโน้มที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

จากผลการวิเคราะห์การทะลุผ่านของรังสีอินฟราเรดของเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์บนอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กในเงื่อนไขระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 7-10 เซนติเมตร ให้ผลเป็นแนวโน้มเดียวกันกับผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์บนอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก พบเลขคลื่นที่ถูกดูดกลืนที่บ่งบอกว่ามี การยึดหดของพันธะ C – F ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของโครงสร้างเบตา [72] และปริมาณพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ จากการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด มีค่าลดลงตามเงื่อนไขระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับจาก 7 ถึง 10 เซนติเมตร มีผลกระทบจากความหนา ซึ่งที่เงื่อนไขระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับจาก 7 เซนติเมตร มีความหนามากที่สุด เมื่อปลูกในระยะเวลาเท่ากัน

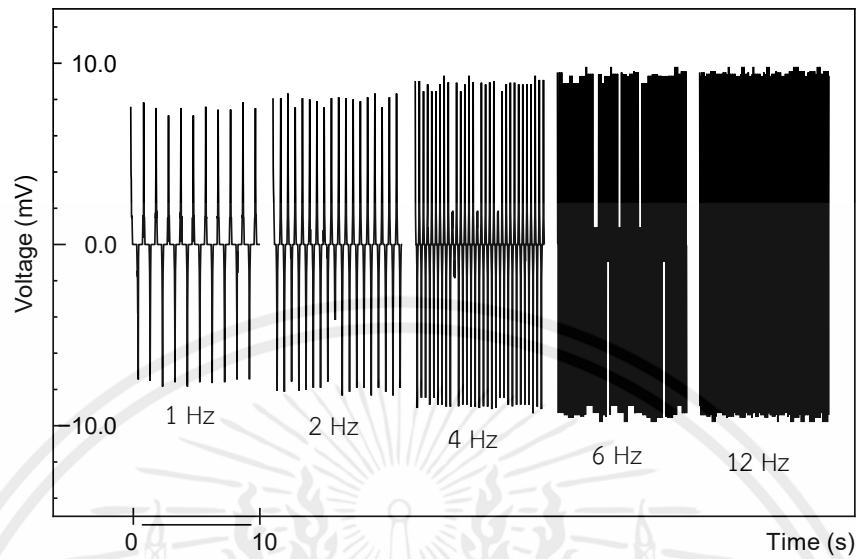
นำอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กในเงื่อนไขระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 7-10 เซนติเมตร มาวัดค่าทางไฟฟ้ากับความถี่ 1 , 2 , 4 , 6 และ 12 เฮิรตซ์ พบว่า



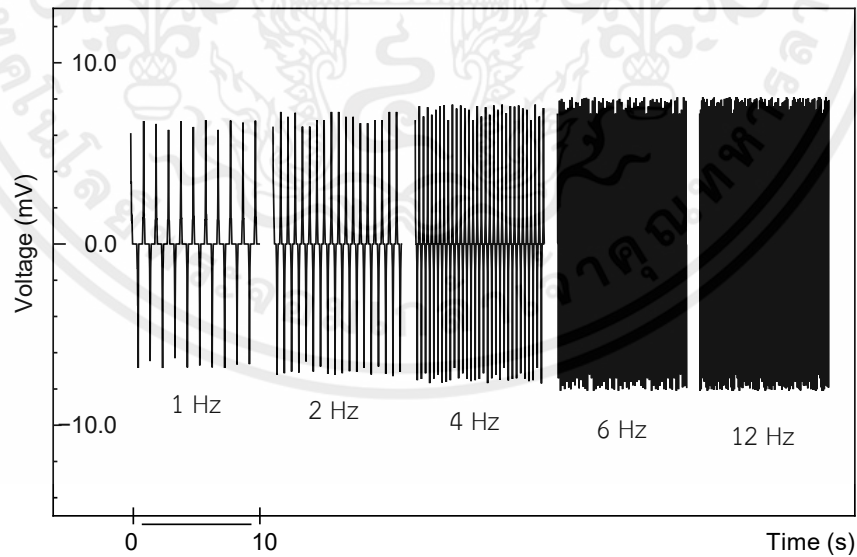
รูปที่ 4.19(ก) ความสัมพันธ์ค่าความต่างศักย์กับเวลา บนความถี่ต่างๆ

ในเงื่อนไขระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 7 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

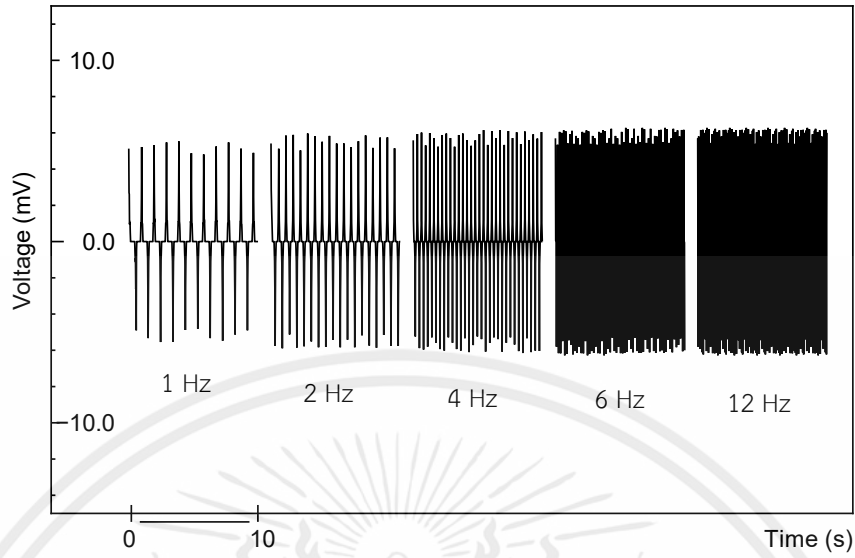


รูปที่ 4.19(ข) ความสัมพันธ์ค่าความต่างศักย์กับเวลา บนความถี่ต่างๆ
ในเงื่อนไขระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 8 เซนติเมตร

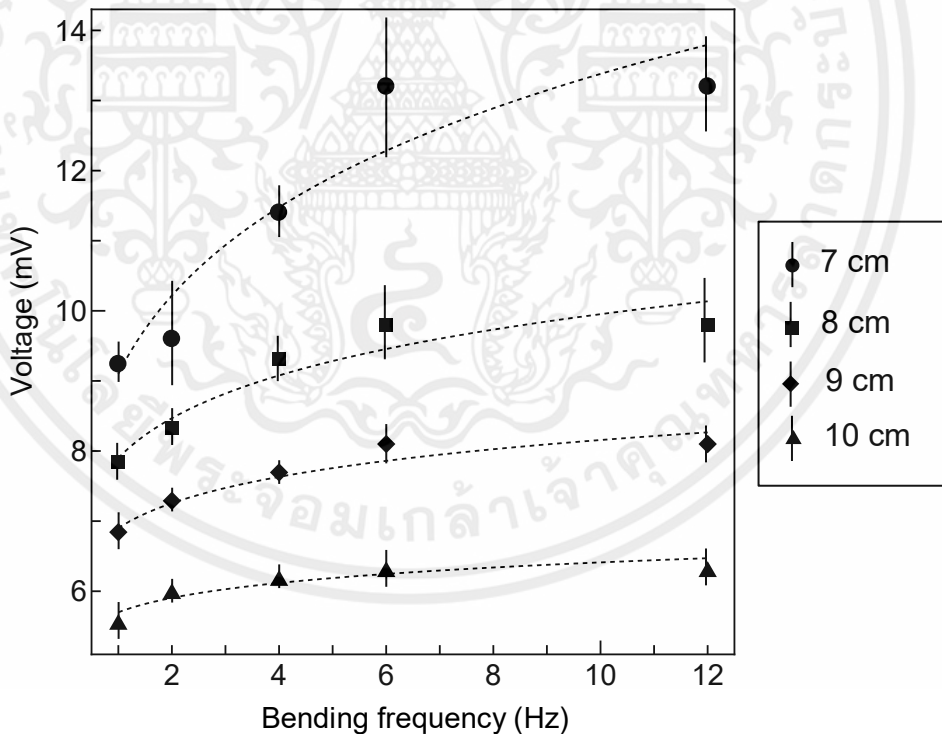


รูปที่ 4.19(ค) ความสัมพันธ์ค่าความต่างศักย์กับเวลา บนความถี่ต่างๆ
ในเงื่อนไขระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 9 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเอาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



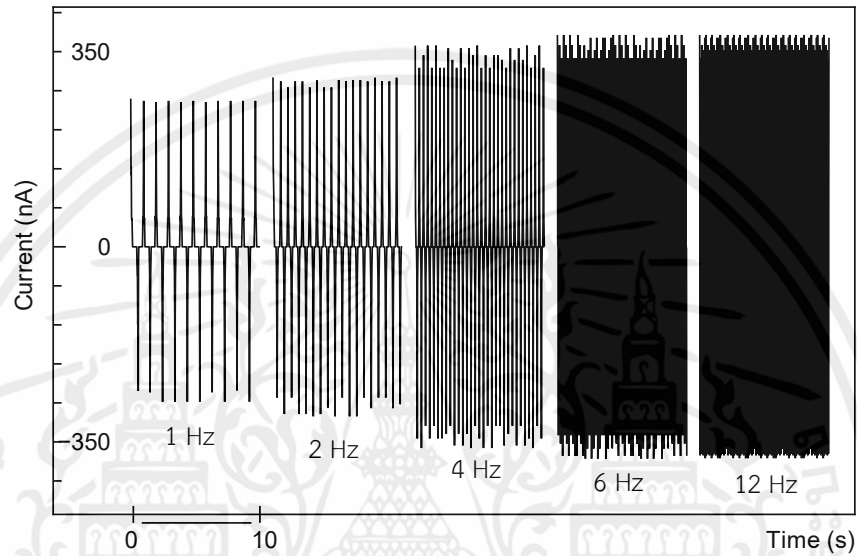
รูปที่ 4.19(ง) ความสัมพันธ์ค่าความต่างศักย์กับเวลา บนความถี่ต่างๆ ในเงื่อนไขระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 10 เซนติเมตร



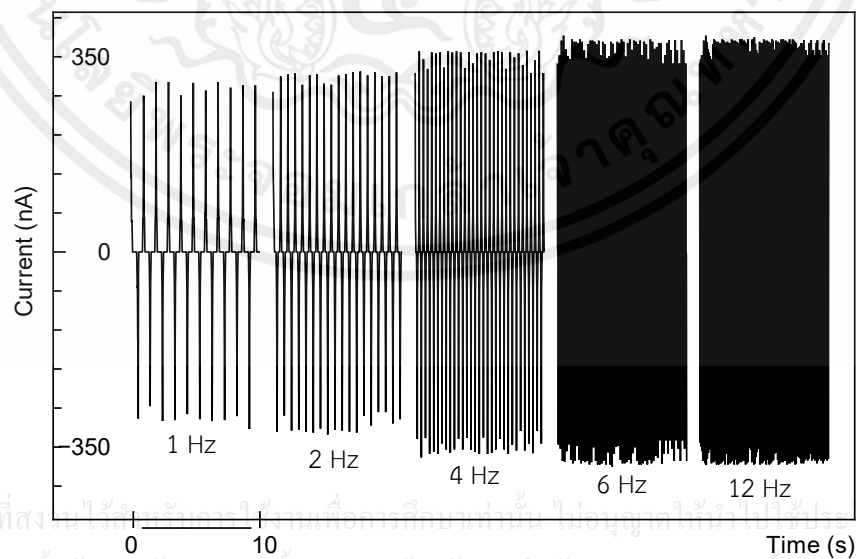
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ค่าความต่างศักย์บนความถี่ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ในเงื่อนไขระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับต่างๆกัน ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

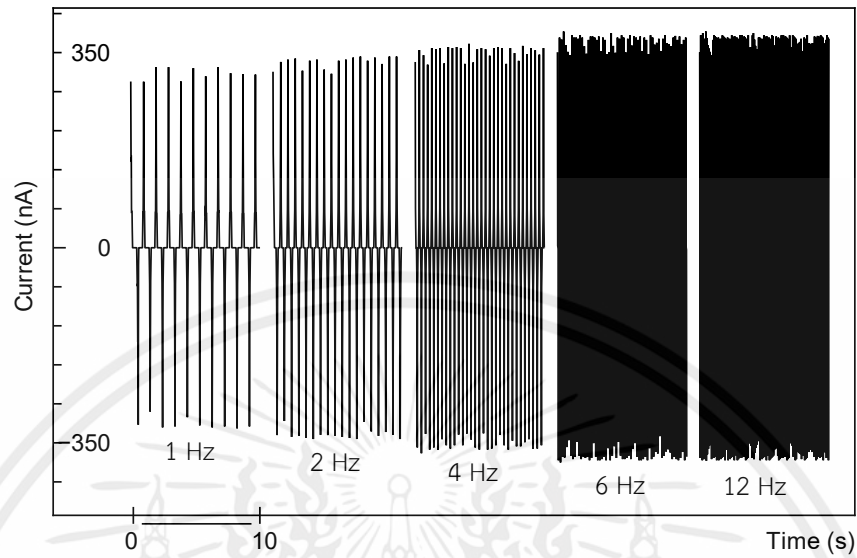
ในแต่ละความถี่ให้ค่าความต่างศักย์สูงสุดในตัวอย่างเงื่อนไขระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 7 เซนติเมตร ด้วยเหตุผลดังกล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งความถี่ที่ให้ค่าสัญญาณทางไฟฟ้าสูงสุดของทุกเงื่อนไขระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 7-10 เซนติเมตร คือ 12 เฮิรท์ซ์ และเริ่มคงที่ (96% ของค่าสัญญาณทางไฟฟ้าสูงสุดของตัวอย่างที่ความถี่ 12 เฮิรท์ซ์) ตั้งแต่ความถี่ 4 เฮิรท์ซ์ ในความถี่ที่มากกว่า 12 เฮิรท์ซ์



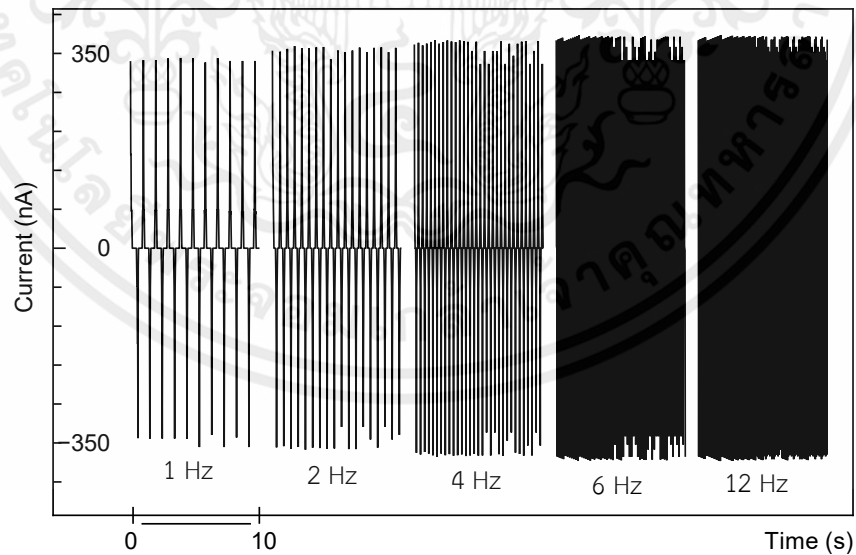
รูปที่ 4.21(ก) ความสัมพันธ์ค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลา บนความถี่ต่างๆ ในเงื่อนไขระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 7 เซนติเมตร



รูปที่ 4.21(ข) ความสัมพันธ์ค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลา บนความถี่ต่างๆ ในเงื่อนไขระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 8 เซนติเมตร

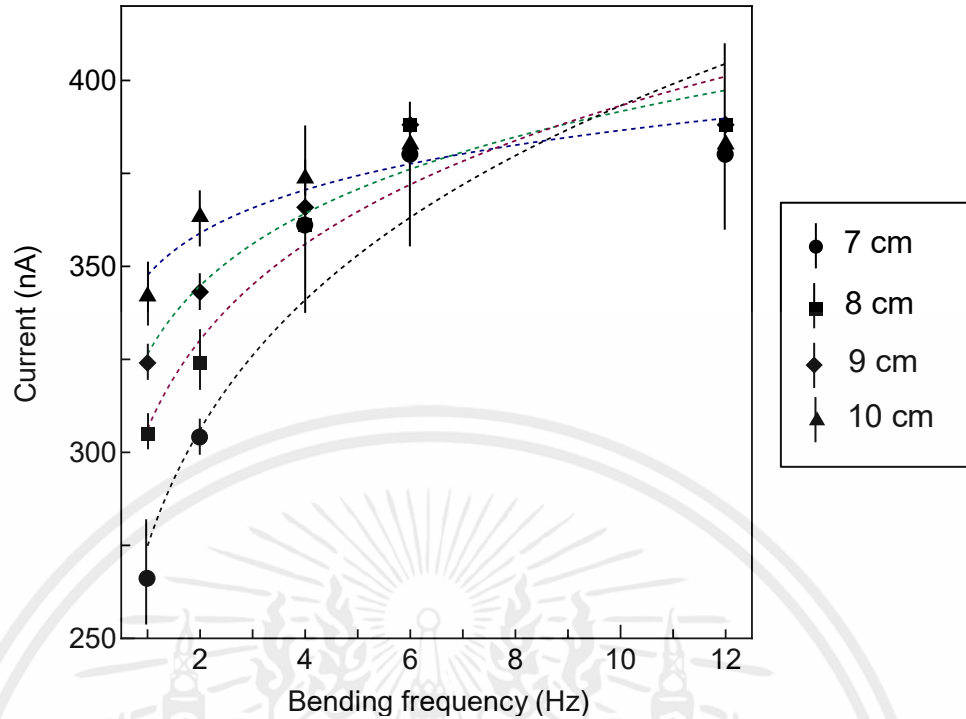


รูปที่ 4.21(ค) ความสัมพันธ์ค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลา บนความถี่ต่างๆ
ในเงื่อนไขระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 9 เซนติเมตร



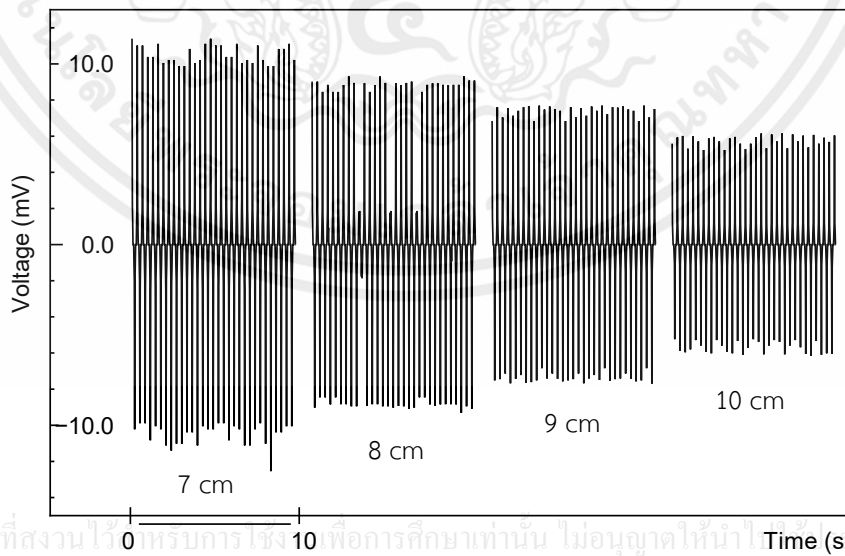
รูปที่ 4.21(ง) ความสัมพันธ์ค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลา บนความถี่ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ค่ากระแสไฟฟ้าบนความถี่ต่างๆ
ในเงื่อนไขระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับต่างๆกัน

ค่าสัญญาณทางไฟฟ้าไม่สามารถตรวจสอบได้เนื่องจากสัญญาณทางไฟฟ้ายังไม่ลงมาถึงค่าต่ำสุดก่อนการกดครั้งต่อไป เป็นข้อจำกัดจากการคืนตัวของโครงสร้างอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก และวัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ไม่สามารถคืนรูปได้อย่างรวดเร็ว

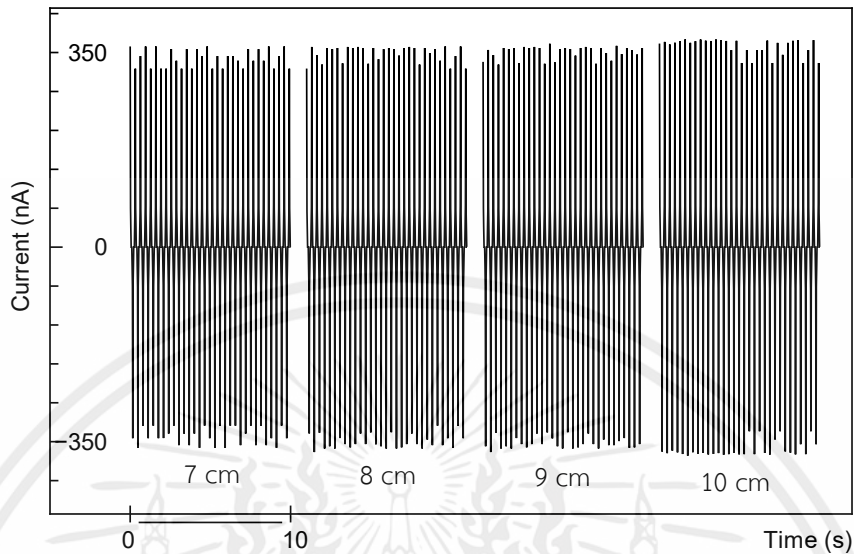


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ 0 หรือบริการ ซึ่ง 10 เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไป Time (s) โยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งทำรูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ค่าความต่างศักย์ขณะลัดวงจรกับเวลาที่มีการนำไปใช้

ในเงื่อนไขระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 7-10 เซนติเมตร

จากการวัดค่าความต่างศักย์ขณะลัดวงจร และค่ากระแสไฟฟ้าที่ออกมาจากอุปกรณ์ พร้อมๆกับการโค้งงออุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กด้วย ความถี่ 4 เฮิรท์ พบว่า



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลา
ในเงื่อนไขระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 7-10 เซนติเมตร

อุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กขึ้นรูปโดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระ เป็นระยะเวลา 30 นาที ในเงื่อนไขความต่างศักย์ 25 kV ระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 7 เซนติเมตร มีค่าความต่างศักย์ขณะลัดวงจรมากที่สุด 11.4 mV และต่ำที่สุด -12.5 mV เนื่องจากมีความหนาแน่นของเส้นใยมากทำให้มีการตอบสนองที่สูง และค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดอยู่ที่ ± 361 nA สำหรับตัวอย่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 7-10 เซนติเมตร มีค่ากระแสไฟฟ้าที่ให้จากตัวอย่างใกล้เคียงกัน เนื่องจากมีค่าความนำไฟฟ้าและค่าไดอิเล็กทริกใกล้เคียงกัน

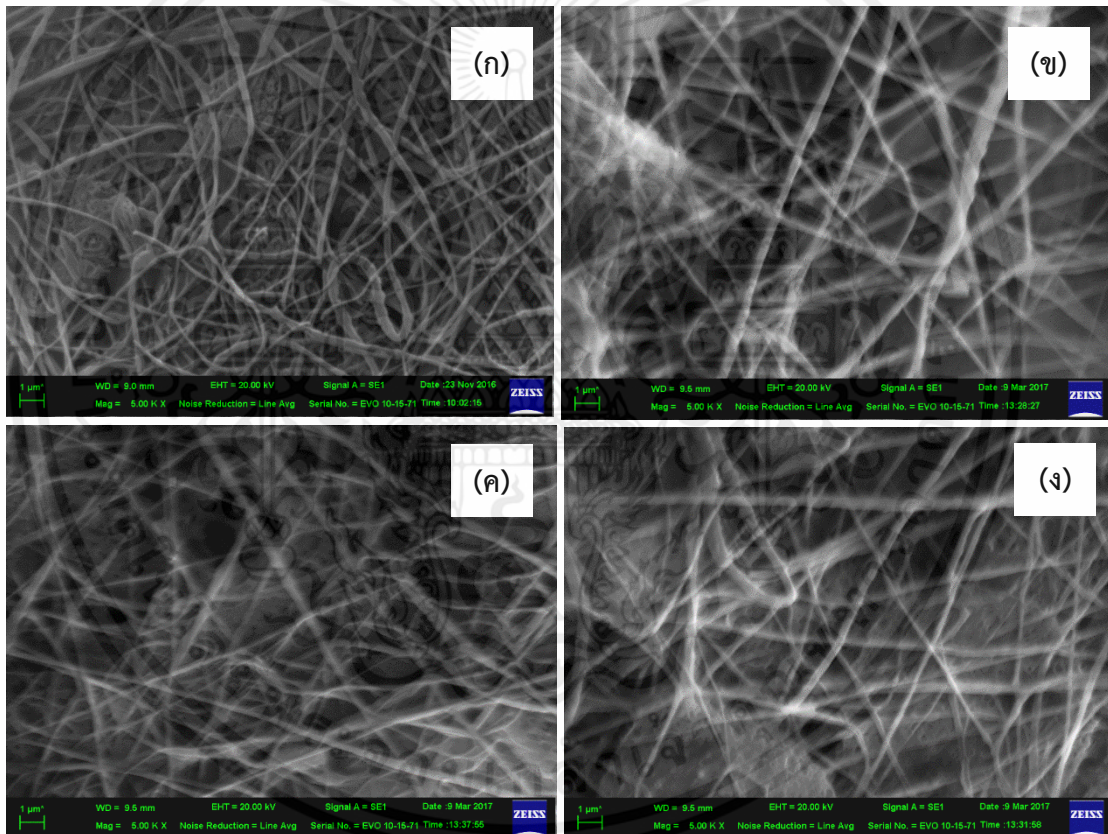
ตารางที่ 4.9 ค่าทางไฟฟ้าที่สำคัญของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กพอลิไวนิลลิตินไดฟลูออไรด์จากเงื่อนไขสนามไฟฟ้าโดยการปรับระยะระหว่างฐานรองรับกับขั้วไฟฟ้า

At 4 Hz	V_{\min} (mV)	V_{\max} (mV)	I_{\min} (nA)	I_{\max} (nA)	P_{\max} (nW)	P_{avg} (nW)
7 cm	-12.5	11.4	-361	361	4.52	4.32
8 cm	-9.3	9.3	-369	360	3.43	3.40
9 cm	-7.7	7.6	-368	365	2.83	2.82
10 cm	-6.2	6.1	-375	373	2.31	2.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อรับการอ้างอิงเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่สามารถให้ข้อมูลใดๆแก่บุคคลอื่นได้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 อุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก จากวัสดุประกอบพอลิไวนิลลิดีนไดฟลูออไรด์/อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต

ภายหลังจากนำสารละลายพอลิไวนิลลิดีนไดฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 11 wt% ผสมกับอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต ในอัตราส่วน 11:1 , 11:3 และ 11:5 โดยมวล มาขึ้นรูปโดยระบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากผิวลวดอิสระบนขั้วที่เขียนด้วยหมึกนำไฟฟ้า ที่มีสภาพต้านทาน 1 โอห์มต่อเซนติเมตร บนกระดาษ เป็นระยะเวลา 30 นาที ในเงื่อนไขความต่างศักย์ 25 kV ระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าถึงฐานรองรับ 7 เซนติเมตร ด้วยความเร็วการหมุนของขั้วไฟฟ้า 15 รอบต่อนาทีแล้วทำการให้ความร้อน 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 10 นาที เพื่อให้พอลิไวนิลลิดีนไดฟลูออไรด์เปลี่ยนโครงสร้างเป็นโครงสร้างเบตาอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 4.25 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของวัสดุอุปกรณ์

กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก (ก) เส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไดฟลูออไรด์

(ข) วัสดุประกอบเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไดฟลูออไรด์/อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต

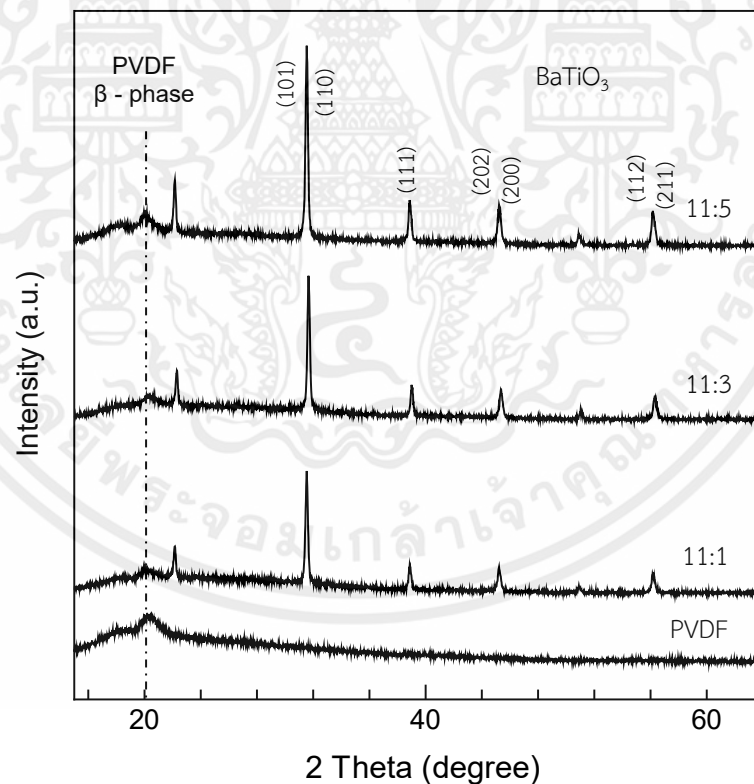
(ค) สัดส่วนโดยมวล 11:1 (ค) สัดส่วนโดยมวล 11:3 และ (ง) สัดส่วนโดยมวล 11:5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ตารางแสดงข้อมูลของเส้นใยวัสดุประกอบพอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์/อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตบนอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณไฟฟ้าขนาดเล็กในเงื่อนไขสัดส่วนโดยมวลต่างกัน

สัดส่วนโดยมวล	ลักษณะพื้นผิว	ขนาดเส้นใยเฉลี่ย	ค่าการกระจายตัว
PVDF	เส้นใยสมบูรณ แบบสุ่ม	297 nm	±62 nm
11:1	เส้นใยสมบูรณ แบบสุ่ม	295 nm	±72 nm
11:3	เส้นใยสมบูรณ แบบสุ่ม	305 nm	±66 nm
11:5	เส้นใยสมบูรณ แบบสุ่ม	314 nm	±63 nm

จากนั้นตัดบางส่วนไปทำการถ่ายภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด Zeiss รุ่น EVO ต่อมาทำการวิเคราะห์การโครงสร้าง ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ Rikgaku รุ่น SmartLab จากนั้นทำการวิเคราะห์หองศ์ประกอบ ด้วยเครื่องมือ Fourier-transform infrared spectrometer PerkinElmer รุ่น UATR Two และนำอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กมาทำการวัดค่าความต่างศักย์ขณะลัดวงจร และ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ออกมาจากอุปกรณ์ มาเทียบกับเวลา



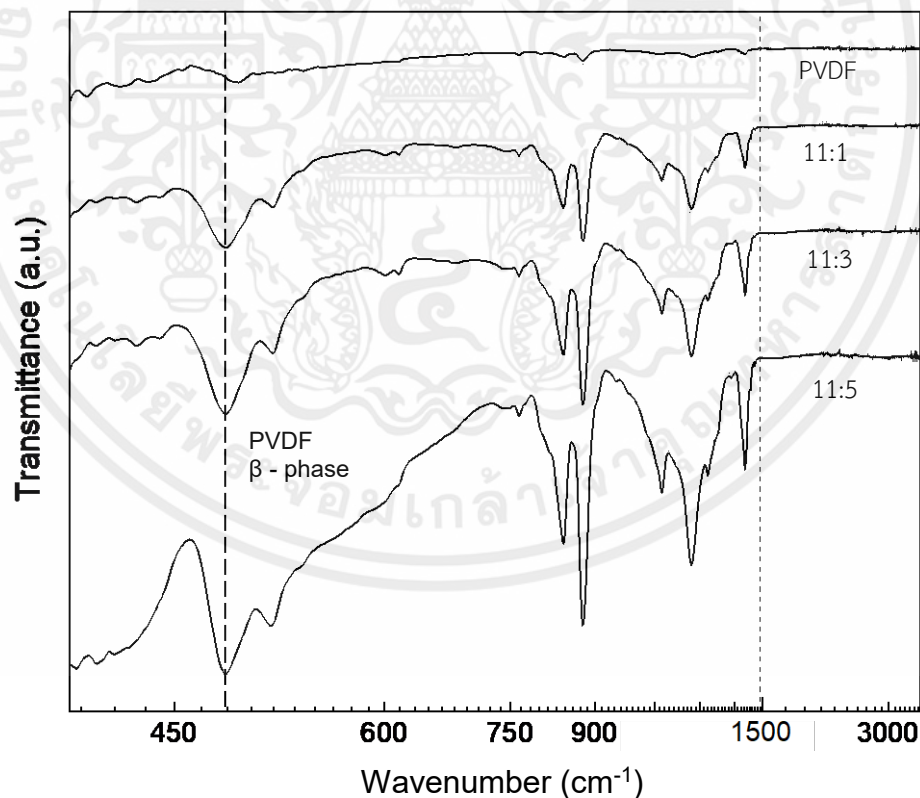
รูปที่ 4.26 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากวัสดุประกอบเส้นใย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

พอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์/อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตบนอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กในเงื่อนไขสัดส่วนโดยมวลต่างๆ เปรียบเทียบกับวัสดุเมทริกซ์

จากผลการถ่ายภาพภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด พบว่า เส้นใยที่ปลูกในแต่ละสัปดาห์โดยมวลนั้น มีขนาดเส้นใยใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วง 50 – 500 นาโนเมตร ซึ่งขนาดของเส้นใยมีค่าไม่ต่างกับเส้นใยที่ปลูกจากวัสดุเมทริกซ์มากนัก มีเพียงค่าการกระจายตัวของขนาดเส้นใยซึ่งมีสาเหตุมาจากความหนืดของสารขึ้นรูปมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยจึงทำให้ขอบเขตของขนาดเส้นใยที่ได้มีช่วงกว้างขึ้นเป็น 50 – 500 นาโนเมตร ในส่วนของลักษณะเส้นใยนั้นมีความเป็นเส้นใยที่สมบูรณ์ ไม่ต่างกับเส้นใยที่ปลูกจากวัสดุเมทริกซ์เพียงอย่างเดียว

จากข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุประกอบเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์/อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตบนอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กในเงื่อนไขสัปดาห์โดยมวล 11:1, 11:3 และ 11:5 นั้นพบการเลี้ยวเบนของทั้งสององค์ประกอบ คือพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์ที่ก่อตัวเป็นพหุผลึกในโครงสร้างเบตา ณ ตำแหน่ง 20.6° (JCPDS card No. : 38 – 1638) [70,73] และ อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่เป็นผลึกอยู่ในเส้นใย พบการเลี้ยวเบน ณ ตำแหน่งหลัก 31.5° (JCPDS card No.: 075-0462) และพบเป็นปริมาณมากขึ้นตามสัดส่วนของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่มากขึ้น [74] ขนาดของผลึกของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตไม่มีความต่าง เนื่องจากความกว้างของแถบการเลี้ยวเบนหลักที่ความสูงครึ่งหนึ่งนั้น มีความกว้างใกล้เคียงกัน [74]

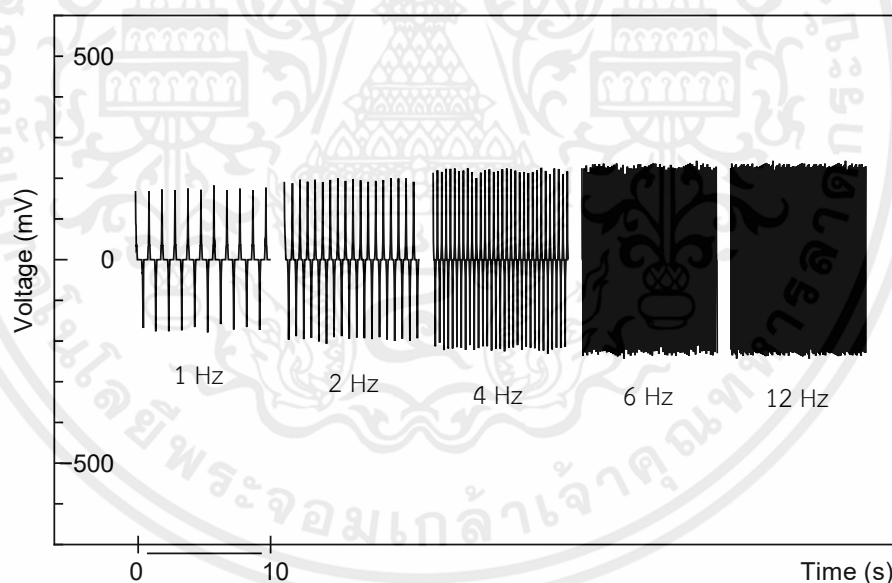


รูปที่ 4.27 การทะลุผ่านของรังสีอินฟราเรดของวัสดุประกอบเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์/อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตบนอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้า

ขนาดเล็กในเงื่อนไขสัปดาห์โดยมวลต่างๆ เปรียบเทียบกับวัสดุเมทริกซ์

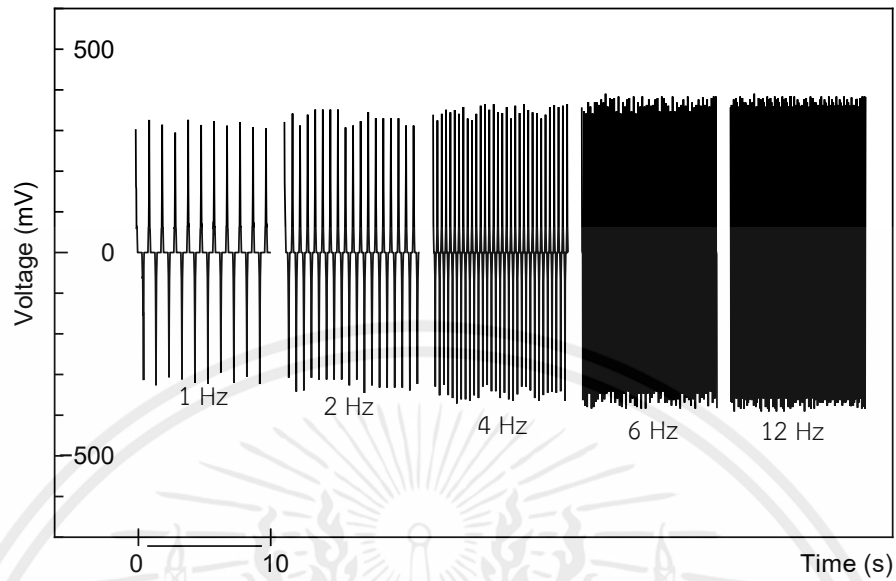
จากผลการวิเคราะห์การทะลุผ่านของรังสีอินฟราเรดของวัสดุประกอบเส้นใยพอลิไวนิลลิดีน ไดฟลูออไรด์/อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตบนอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณไฟฟ้าขนาดเล็กในเงื่อนไขเงื่อนไขสัดส่วนโดยมวล 11:1, 11:3 และ 11:5 ให้ผลเป็นแนวโน้ม เนื่องจากพบการดูดกลืนมากเมื่อมีปริมาณแบเรียมไททาเนตมาก อย่างไรก็ตามสารประกอบแบเรียมไททาเนตนั้นไม่มีช่วงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเฉพาะในช่วงใดๆแต่ส่งผลกับปริมาณการทะลุผ่านของรังสีอินฟราเรดเมื่อแชนลอยอยู่ในวัสดุต่างๆ ในส่วนของเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไดฟลูออไรด์ยังพบโครงสร้างเบตา เช่นเดียวกับในการปลูกเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไดฟลูออไรด์ในอุปกรณ์เดิม การเพิ่มอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต นั้นไม่ทำให้ปริมาณโครงสร้างเบตาเสียหาย

เมื่อนำอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กของวัสดุประกอบเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไดฟลูออไรด์/อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต ในสัดส่วนโดยมวลต่างๆกัน มาวัดค่าทางไฟฟ้ากับความถี่ 1 , 2 , 4 , 6 และ 12 เฮิรตซ์ เช่นเดียวกับอุปกรณ์จากเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไดฟลูออไรด์ ได้ผลดังนี้

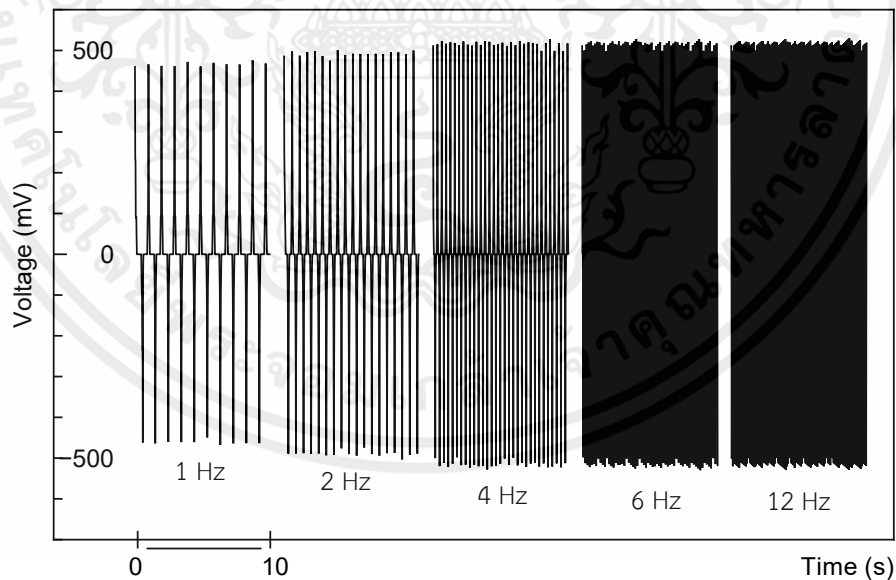


รูปที่ 4.28(ก) ความสัมพันธ์ค่าความต่างศักย์ขณะลัดวงจรกับเวลา บนความถี่ต่างๆ ในเงื่อนไขสัดส่วนโดยมวล 11:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

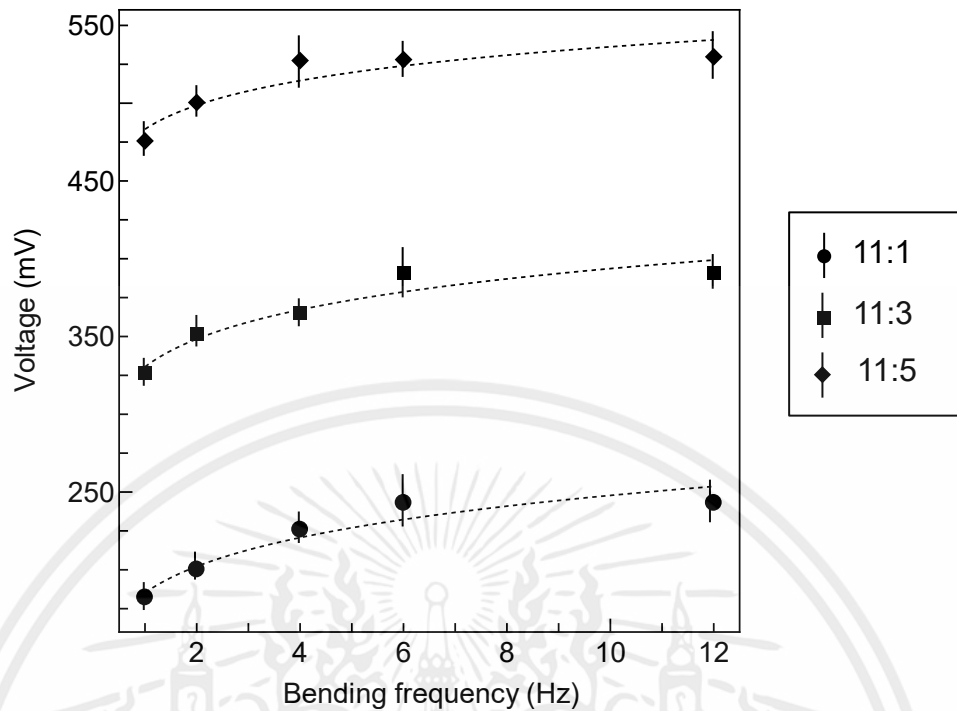


รูปที่ 4.28(ข) ความสัมพันธ์ค่าความต่างศักย์ขณะลัดวงจรกับเวลา
บนความถี่ต่างๆ ในเงื่อนไขลัดส่วนโดยมวล 11:3

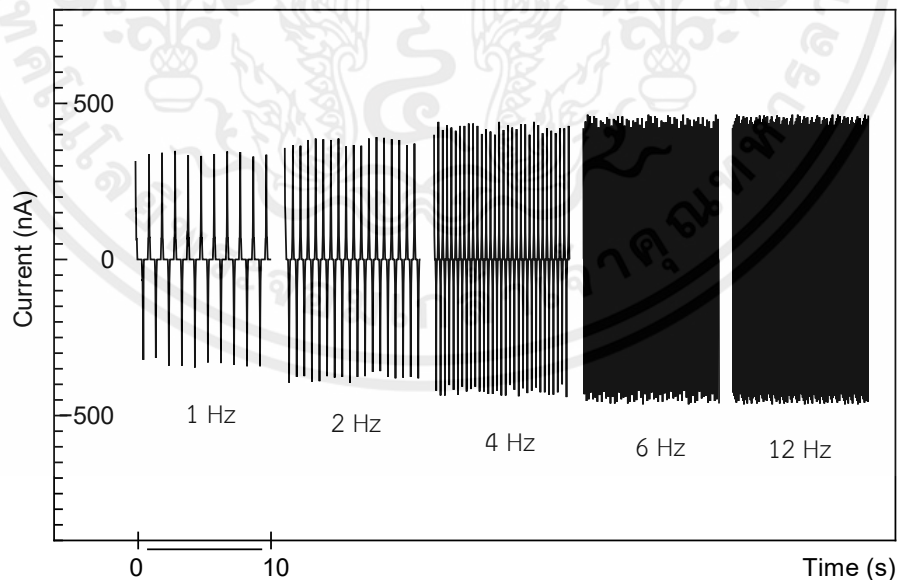


รูปที่ 4.28(ค) ความสัมพันธ์ค่าความต่างศักย์ขณะลัดวงจรกับเวลา
บนความถี่ต่างๆ ในเงื่อนไขลัดส่วนโดยมวล 11:5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

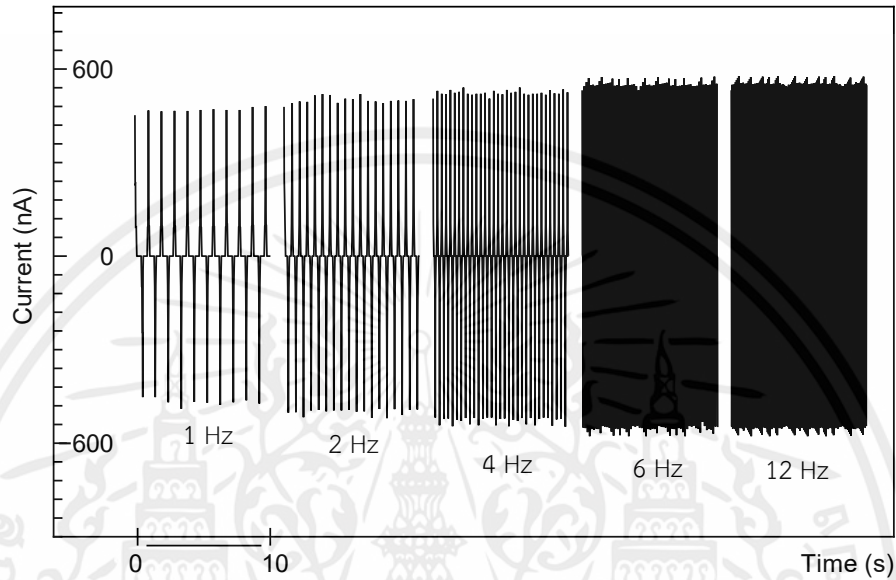


รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ค่าความต่างศักย์บนความถี่ต่างๆ ในเงื่อนไขสัดส่วนโดยมวล ต่างๆกัน ในแต่ละความถี่ให้ค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าสูงสุดในตัวอย่างจากวัสดุประกอบ สัดส่วน 11:5 เนื่องจากเหตุผลดังที่กล่าวไว้ข้างต้น

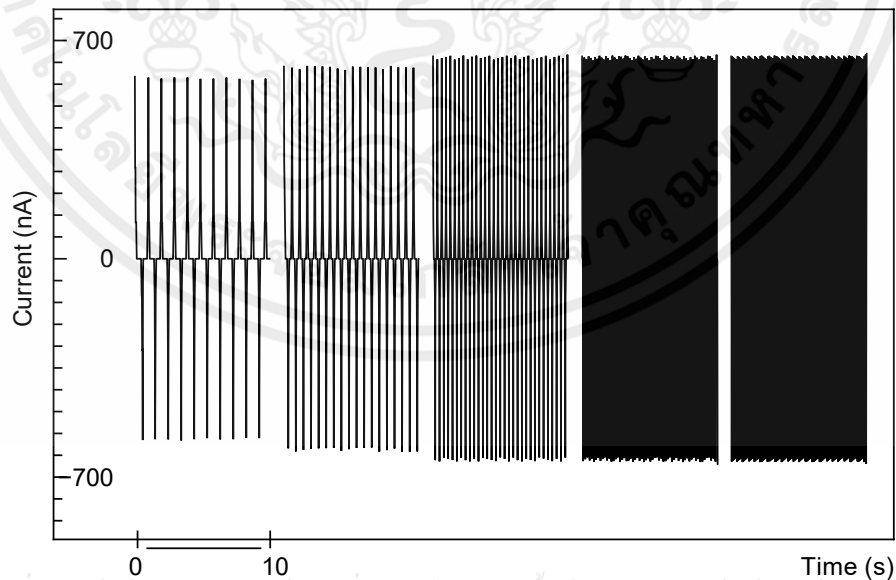


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 4.30(ก) ความสัมพันธ์ค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลา ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ค้นคว้าข้อมูลต่างๆ ในเงื่อนไขสัดส่วนโดยมวล 11:1 ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งความถี่ที่ให้ค่าสัญญาณทางไฟฟ้าสูงสุดของทุกเงื่อนไขสัดส่วนโดยมวลของวัสดุประกอบเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไดฟลูออไรด์/อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต คือ 12 เฮิรท์ซ และเริ่มคงที่ (96% ของค่าสัญญาณทางไฟฟ้าสูงสุดของตัวอย่างที่ความถี่ 12 เฮิรท์ซ) ตั้งแต่ความถี่ 4 เฮิรท์ซ ในความถี่ที่มากกว่า 12 เฮิรท์ซ

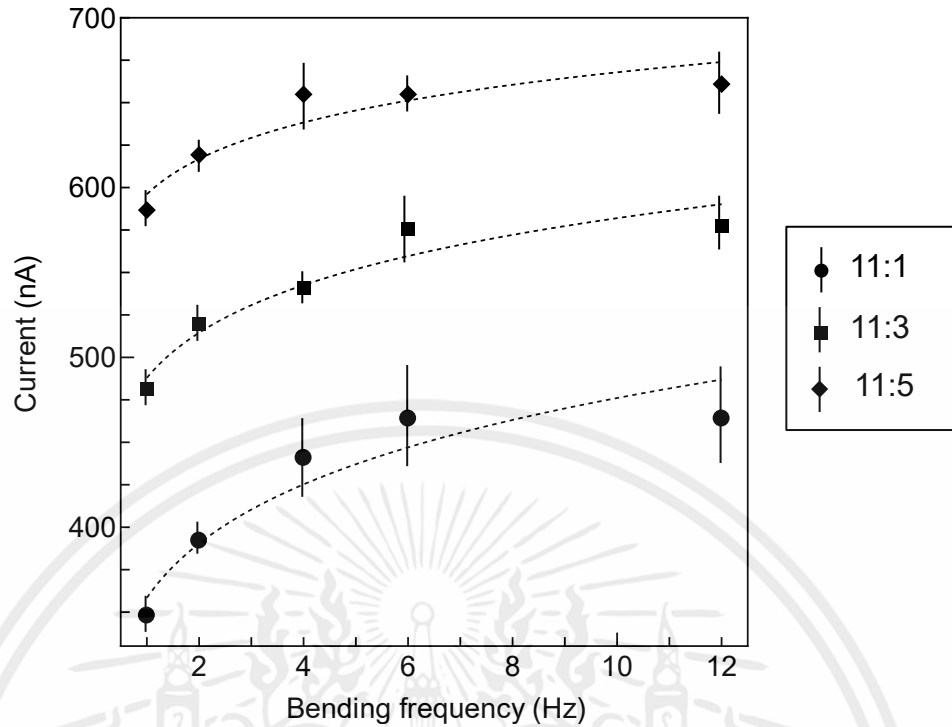


รูปที่ 4.30(ข) ความสัมพันธ์ค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาบนความถี่ต่างๆ ในเงื่อนไขสัดส่วนโดยมวล 11:3



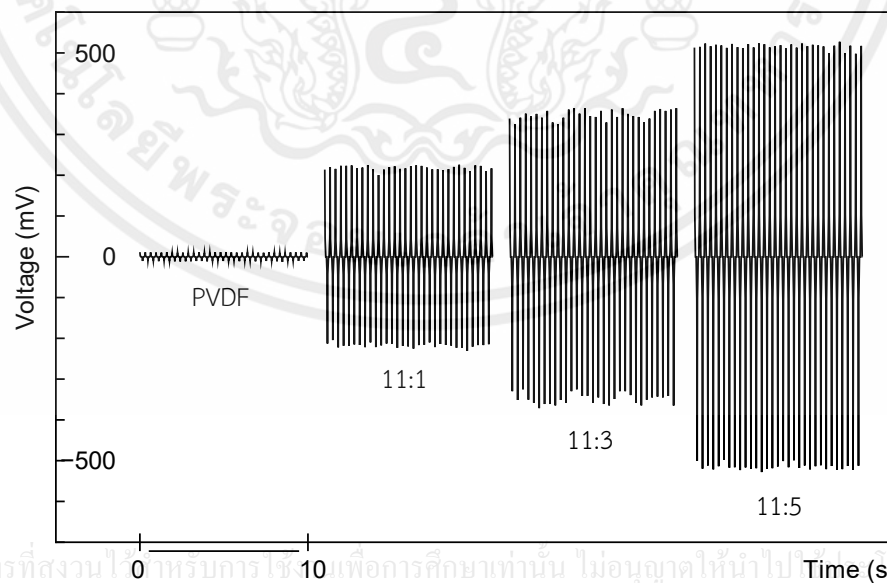
รูปที่ 4.30(ค) ความสัมพันธ์ค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาบนความถี่ต่างๆ ในเงื่อนไขสัดส่วนโดยมวล 11:5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูอาจารย์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และข้อความข้างต้นลงในเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ค่ากระแสไฟฟ้าบนความถี่ต่างๆ ในเงื่อนไขสัดส่วนโดยมวล ต่างกัน

เช่นเดียวกับตัวอย่างก่อนหน้านี้ ค่าสัญญาณทางไฟฟ้าไม่สามารถตรวจสอบได้เนื่องจากสัญญาณทางไฟฟ้ายังไม่ลงมาถึงค่าต่ำสุดก่อนการกดครั้งต่อไป เป็นข้อจำกัดจากการคืนตัวของโครงสร้างอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณไฟฟ้าขนาดเล็ก และวัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ไม่สามารถคืนรูปได้อย่างรวดเร็ว

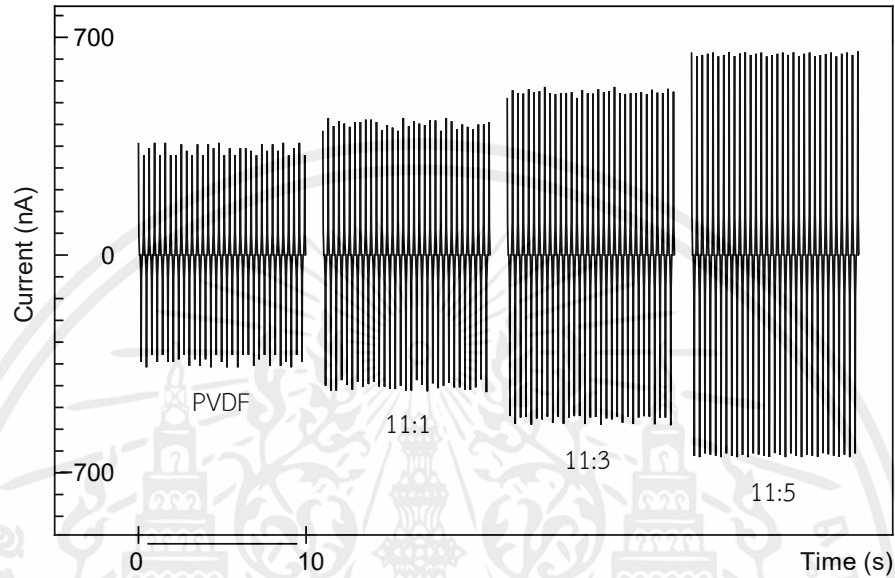


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ค่าความต่างศักย์ขณะลัดวงจรกับเวลาในเงื่อนไขสัดส่วนโดยมวล ใช้

ของวัสดุประกอบเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์/อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต

ต่อมาทำการวัดค่าความต่างศักย์ขณะลัดวงจร และค่ากระแสไฟฟ้าที่ออกมาจากอุปกรณ์ พร้อมๆกับการโค้งงออุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยความถี่ 4 เฮิรตซ์ กับอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กของวัสดุประกอบเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์/อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในเงื่อนไขสัดส่วนโดยมวลของวัสดุประกอบเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์/อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต

ตารางที่ 4.11 ค่าทางไฟฟ้าที่สำคัญของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กของวัสดุประกอบเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไคฟลูออไรด์/อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต

Ratio	V_{\min}	V_{\max}	I_{\min}	I_{\max}	P_{\max}	P_{avg}
PVDF/BaTiO ₃	(mV)	(mV)	(nA)	(nA)	(nW)	(nW)
PVDF	-12.5	11.4	-361	361	4.52	4.32
11:1	-230.8	225.8	-441	440	101.76	100.65
11:3	-371.1	364.8	-547	541	203.04	200.18
11:5	-528.0	527.4	-650	655	345.40	344.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับใช้ภายในงานวิจัยเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการวัดค่าทางไฟฟ้าอุปกรณ์จากสัดส่วน 11:5 มีค่าความต่างศักย์ขณะลัดวงจรมากที่สุด 527.4 mV และต่ำที่สุด -528.0 mV เนื่องจากมีปริมาณอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต ซึ่งเป็นสารที่มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่สูงมากอยู่ในมากที่สุด ดังนั้นจึงเป็นสัดส่วนที่ให้ค่าประสิทธิภาพทั้งในด้านการจ่ายแรงดันและกระแสไฟฟ้าสูงที่สุด และค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่อุปกรณ์ให้ได้นั้น อยู่ที่ 655 nA และต่ำสุดอยู่ที่ -650 nA สำหรับตัวอย่างจากวัสดุประกอบเส้นใยพอลิไวนิลิลิดีนไดฟลูออไรด์/อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตในทุกเงื่อนไขนั้นมีประสิทธิภาพสูงกว่าอุปกรณ์จากเส้นใยพอลิไวนิลิลิดีนไดฟลูออไรด์อย่างมาก และสูงขึ้นตามสัดส่วนของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่สามารถเติมเข้าไปได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากผลการจำลองแบบเพื่อวิเคราะห์ค่าพื้นฐานในการประดิษฐ์ พบว่าผลของสนามไฟฟ้าภายใต้รูปแบบจำลองนั้น เหมาะสมในการใช้ปั่นขึ้นรูป เนื่องจากมีระยะนาบที่ให้ศักย์ไฟฟ้าในการปั่นขึ้นรูปสูงสุดแบบสมมาตร โดยปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างผิวลวดจนถึงผิวฐานรองรับจากการคำนวณลดลงเป็นปริมาณ 7.579 กิโลโวลต์ ซึ่งเพียงพอสำหรับการป้องกันการลัดวงจรระหว่างขั้วไฟฟ้าบนล่างในระหว่างการขึ้นรูป ผลการจำลองค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่าง 2 ขั้วขณะหมุนขั้วไฟฟ้าพบว่ามีค่าความต่างของศักย์ไฟฟ้ามากกว่า 10 กิโลโวลต์ ระหว่างตำแหน่งพักและตำแหน่งทำงาน ผลดังกล่าวได้ถูกคำนวณกลับเป็นระยะระหว่างขั้วของ Spinneret ได้ระยะ 3 เซนติเมตร จากนั้นนำข้อมูลทั้งหมดมาเป็นเงื่อนไขขอบเขตในการสร้างต้นแบบระบบขึ้นรูปเส้นใยโดยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

ภายหลังสร้างระบบได้ทำการทดสอบกับพอลิเมอร์เพื่อประยุกต์ใช้สร้างอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กแบบเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Nanogenerator: PENG) ที่มีโครงสร้างแบบชั้นเดียว ในขั้นแรก ได้ทำการทดสอบเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปเส้นใยพอลิไวนิลลิดีน ไดฟลูออไรด์ เงื่อนไขความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ในการขึ้นรูป ที่ความเข้มข้น 11 wt% เหมาะสมในการใช้เป็นความเข้มข้นตั้งต้นในการทดสอบต่อไป ผลกระทบของสนามไฟฟ้ามีผลต่อลักษณะเส้นใยไม่มากนัก เมื่อระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีค่ามากกว่า 7 เซนติเมตร ให้ค่าการกระจายตัวของขนาดเส้นใยใกล้เคียงกัน อัตราเร็วการหมุนขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด อยู่ที่ 15 รอบต่อนาที อัตราการปลูกของระบบนี้ อยู่ที่ 0.4184 ไมโครเมตรต่อวินาที จากการคำนวณในเงื่อนไขเวลาในการปลูกต่างๆ ในลวดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 มิลลิเมตร และสามารถปลูกได้ดีในกระดาด ซึ่งเป็นผลดีในการทำอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กแบบเพียโซอิเล็กทริกต่อไป

ผลการทดลองสร้างอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กแบบเพียโซอิเล็กทริกเริ่มจากตัวอย่างจากเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนไดฟลูออไรด์ พบเส้นใยในขนาด 50-300 นาโนเมตร ให้การตอบสนองครั้งที่ (96%) เริ่มต้นที่ 4 เฮิรท์ซ์ อุปกรณ์ที่มีชั้นทำงานหนาที่สุดให้ค่าทางไฟฟ้าสูงสุด คือ ความต่างศักย์ -12.5 – 11.4 มิลลิโวลต์ และกระแสไฟฟ้า ± 361 นาโนแอมป์ ให้กำลังเฉลี่ย 4.31 นาโนวัตต์ ภายหลังจากทดสอบกับตัวอย่างที่ใช้วัสดุประกอบเส้นใยแทนในชั้นทำงาน พบเส้นใยในขนาด 50-300 นาโนเมตร เท่าเดิม ให้การตอบสนองครั้งที่ (96%) เริ่มต้นที่ 4 เฮิรท์ซ์ เช่นเดียวกับอุปกรณ์เดิม อุปกรณ์ที่มีปริมาณของตัวเติมมากที่สุดให้ค่าทางไฟฟ้าสูงสุด คือ ความต่างศักย์ -529.2 – 529.8 มิลลิโวลต์ และกระแสไฟฟ้า -657.9 – 660.9 นาโนแอมป์ ให้กำลังเฉลี่ย 349.10 นาโนวัตต์ ที่ความถี่ 12 เฮิรท์ซ์

สามารถให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้าได้ดีในความถี่ต่ำกว่า 12 เฮิรตซ์ เนื่องจากผลกระทบของโครงสร้างอุปกรณ์ที่ให้ความยืดหยุ่นต่ำ มีความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้ในงานความถี่ต่ำ อาทิเช่น การให้พลังงานจากแผ่นรองต่างๆ พื้นถนนที่ได้รับแรงสั่นสะเทือนจากยางรถหรือการวิ่ง การโค้งจากการขยับร่างกาย เป็นต้น อีกทั้งสามารถใช้แทนเพียโซอิเล็กทริกเซนเซอร์ในหลายๆกรณีได้

ตารางที่ 5.1 สรุปค่าทางไฟฟ้าที่สำคัญในอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก

Active Layer	I(nA)	V(mV)	P_{max} (nW)	P_{Avg} (nW)
PVDF	±361	±12	4.52	4.32
PVDF/BaTiO ₃	±660	±529	350.11	349.10

ในอนาคตงานวิจัยภายในวิทยานิพนธ์นี้อาจเป็นประโยชน์กับภาคการผลิต ในระบบอุตสาหกรรมการประยุกต์ใช้และขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์ ระบบการผลิตเส้นใยไมโครและนาโนภายใต้ งานวิจัยภายในวิทยานิพนธ์เหมาะสำหรับการพัฒนาไปเป็นระบบการผลิตแบบต่อเนื่อง (Continuous process) หรือที่เรียกกันว่า roll-to-roll process สามารถผลิตบนผิววัสดุที่หลากหลาย งบประมาณ บำรุงรักษาต่ำกว่าระบบดั้งเดิมหรือแบบใช้เข็ม ในส่วนของวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอตัวอย่างการใช้ ระบบเพื่อประดิษฐ์อุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กแบบเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งสามารถสร้าง ชิ้นงานได้รวดเร็วกว่าแบบดั้งเดิมประมาณ 20 เท่า ในเชิงปริมาตร [35,37,45,47-49]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] [online], <https://www.azosensors.com/article.aspx?ArticleID=36>
- [2] [online], <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/applications.html>
- [3] [online], <https://www.americanpiezo.com/piezo-theory/piezo-sensor-applications.html>
- [4] Bin Ding, Moran Wang, Xianfeng Wang, Jianyong Yu and Gang Sun, “Electrospun nanomaterials for ultrasensitive sensors”, *Materialtoday*, vol. 13, pp. 16-27, 2010.
- [5] ยุทธพงษ์ ศรีธธา , “ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเพโรอิเล็กทริกของสารบิสมาทเพอร์ไรท์ -แบบเรียบไทเทเนต” , วิทยานิพนธ์ หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 2556 .
- [6] อัครวิน พิษทองกลาง , “ ผลกระทบของกระบวนการทางความร้อนต่อการเสื่อมอายุของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททาเนต ” , วิทยานิพนธ์ หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 2556 .
- [7] นิธิพนธ์ พุทธิงชัย, “ ผลของสมบัติวัสดุ PZTs ต่อการเก็บเกี่ยวพลังงาน”, วิทยานิพนธ์ หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 2552 .
- [8] [online], <https://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity>
- [9] N. Jaitanong, R.Yimnirun, H.R.Zeng, G.R.Li, Q.R.Yin and A.Chaipanich , “ Piezoelectric properties of cement based/PVDF/PZT composites ”, *Materials Letters*, vol. 130, pp. 146-149, 2014.
- [10] [online], <https://en.wikipedia.org/wiki/Dielectric>
- [11] [online], https://en.wikipedia.org/wiki/Barium_titanate
- [12] [online], https://en.wikipedia.org/wiki/Lead_zirconate_titanate
- [13] [online], https://en.wikipedia.org/wiki/Sodium_tungsten_bronze
- [14] [online], https://en.wikipedia.org/wiki/Polyvinylidene_fluoride
- [15] GuoDong Zhu, ZhiGang Zeng, Li Zhang and XueJian Yan, “Piezoelectricity in beta-phase PVDF crystals: A molecular simulation study”, *Computational Materials Science*, vol. 44, pp. 224-229, 2008.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีข้อคิดเห็นสงวนเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มาใช้

- [16] V.T. Rathod, D. Roy Mahapatra, Anjana Jain and A. Gayathri, “Characterization of a large-area PVDF thin film for electro-mechanical and ultrasonic sensing applications”, *Sensors and Actuators*, vol. 163, pp. 164-171, 2010.
- [17] Shansheng Yu, Weitao Zheng, Wenxue Yu, Yujie Zhang, Qing Jiang, and Zhudi Zhao, “Formation Mechanism of beta-Phase in PVDF/CNT Composite Prepared by the Sonication Method”, *Macromolecules*, vol. 42, pp. 8870-8874, 2009.
- [18] V. Sencadas, V. M. Moreira, S. Lanceros-Mendéz, A. S. Pouzada and R. Gregório Jr., “alpha - to - beta Transformation on PVDF Films Obtained by Uniaxial Stretch”, 2002.
- [19] Lucia Seminara, Marco Capurro, Paolo Cirillo, Giorgio Cannata and Maurizio Valle, “Electromechanical characterization of piezoelectric PVDF polymer films for tactile sensors in robotics applications”, *Sensors and Actuators*, vol. 169, pp. 49-58, 2011.
- [20] 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.
- [21] Shawn H. Lim and Hai-Quan Mao, “Electrospun scaffolds for stem cell engineering”, *Advanced Drug Delivery Reviews*, vol. 61, pp. 1084-1096, 2009.
- [22] กอบศักดิ์ กาญจนางค์กุล, “การผลิตเส้นใยนาโนจากวัสดุชีวภาพด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต”, *วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม*, ปีที่ 8 ฉบับที่ 1, หน้าที่ 1-11, 2556.
- [23] ธนโชติ ธรรมชาติ, “การเตรียมและการประเมินผลเส้นใยอิเล็กโทรสปินเนลเล็กที่บรรจุสารต้านจุลชีพ”, *วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการทางเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร*, 2553.
- [24] T. Kim, C.R. Park, “Preparation and Characterization of Core-Shell Type P3HT@PEO Composite Nanofibers Using Single Nozzle System”, *18TH International Conference on Composite Materials*
- [25] Keith M. Forward and Gregory C. Rutledge, “Free Surface Electrospinning from a Wire Electrode”, *Chemical Engineering Journal*, vol. 183, pp. 492-503, 2012.
- [26] วัฒนา กลิ่นสุคนธ์, “การเตรียมเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตตผสมถ่านกัมมันต์โดยการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต สำหรับการดูดซับสารอินทรีย์”, *วิทยานิพนธ์ หลักสูตรปริญญา*

วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ธัญบุรี, 2556.

- [27] Yang Guorui and Yan wei, “The Preparation of Core/Shell Nanofibers by Electrospinning: Applications in Tissue Engineering and Drug Delivery”, <http://www.paper.edu.cn>
- [28] Mariya Kancheva, Antoniya Toncheva, Nevena Manolova and Iliya Rashkov, “Advanced centrifugal electrospinning setup”, *Materials Letters*, vol. 136, pp. 150-152, 2014.
- [29] Attila Balogh, Richárd Cselkó, Balázs Démuth, Geert Verreck, Jürgen Mensch, György Marosi and Zsombor Kristóf Nagy, “Alternating current electrospinning for preparation of fibrous drug delivery systems”, *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 495, pp. 75-80, 2015.
- [30] Guojun Jiang and Xiaohong Qin, “An improved free surface electrospinning for high through put manufacturing of core-shell nano fibers”, *Materials Letters*, vol. 128, pp. 259-262, 2014.
- [31] Guojun Jiang, Sai Zhang, Yitao Wang and Xiaohong Qin, “An improved free surface electrospinning with micro-bubble solution system for massive production of nanofibers”, *Materials Letters*, vol. 144, pp. 22-25, 2015.
- [32] Kolos Molnar and Zsombor K. Nagy, “Corona-electrospinning: Needleless method for high-throughput continuous nanofiber production”, *European Polymer Journal*, vol. 74, pp. 279-286, 2016.
- [33] Ji-Huan He, Yue Wu and Wei-Wei Zuo, “Critical length of straight jet in electrospinning”, *Polymer*, vol. 46, pp. 12637-12640, 2005.
- [34] 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.
- [35] Yuan Liao, Rong Wang, Miao Tian, Changquan Qiu and Anthony G.Fane, “Fabrication of polyvinylidene fluoride (PVDF) nanofiber membranes by electro-spinning for direct contact membrane distillation”, *Journal of*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม [online], <https://en.wikipedia.org/wiki/Electrospinning> เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [37] พูนทรัพย์ ตรีภพนาถกุล, จันทรฉาย ทองปิ่น, ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์, ชนินทร์ กุลเศรษฐ์ชัยสิทธิ์ และ กรวิทย์ วิจิตโชติ, “การเตรียมและพิสูจน์เอกลักษณ์ของเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตดพอลิแลคติกแอซิด และ พอลิเอทิลีนไกลคอลสำหรับขนส่งยาโดยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน”, *รายงานการวิจัยสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยศิลปากร* 2555.
- [38] 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.
- [39] Hadi Hajiali, Shapour Shahgasempour, M Reza Naimi-Jamal and Habibullah Peirovi, “Electrospun PGA/gelatin nanofibrous scaffolds and their potential application in vascular tissue engineering”, *International Journal of Nanomedicine*, vol. 6, pp. 2133-2141, 2011.
- [40] 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.
- [41] Yasmin Srivastava, Ignacio Loscertales, Manuel Marquez and Todd Thorsen, “Electrospinning of hollow and core/sheath nanofibers using a microfluidic manifold”, *Microfluid Nanofluid*, 2007.
- [42] 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.
- [43] Bin Ding, Moran Wang, Jianyong Yu and Gang Sun, “Gas Sensors Based on Electrospun Nanofibers”, *Sensors*, vol. 9, pp. 1609-1624, 2009.
- [44] Xingzhao Wang, Bin Yang, Jingquan Liu, Yanbo Zhu, Chunsheng Yang and Qing He, “A flexible triboelectric-piezoelectric hybrid nanogenerator based on P(VDF-TrFE) nanofibers and PDMS/MWCNT for wearable devices”, *Scientific Reports*, pp. 1-10, 2016.
- [45] Shanshan Li, Andrea Crovetto, Zhuoteng Peng, Ai Zhang, Ole Hansen, Mingjiang Wang, Xinxin Li and Fei Wang, “Bi-resonant structure with piezoelectric PVDF films for energy harvesting from random vibration sources at low frequency”, *Sensors and Actuators*, vol. 247, pp. 547-554, 2016.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น... กรุณาไปใช้

- [46] Zhaoyang Pi, Jingwei Zhang, Chenyu Wen, Zhi-bin Zhang and Dongping Wu, “Flexible piezoelectric nano generator made of poly (vinylidene fluoride-co-trifluoroethylene) (PVDF-TrFE) thin film”, *Nano Energy*, vol. 7, pp. 33-41, 2014.
- [47] Young-Soo Kim, Yannan Xie, Xiaonan Wen, Sihong Wang, Sang Jae Kim, Hyun-Kon Song and Zhong Lin Wang, “Highly porous piezoelectric PVDF membrane as effective lithium ion transfer channels for enhanced self-charging power cell”, www.intechopen.com, pp. 77-86, 2015.
- [48] John Cuppoletti, “Metal, Ceramic and Polymeric Composites for Various Uses”, 2011.
- [49] Woo-Suk Jung, Min-Gyu Kang, Hi Gyu Moon, Seung-Hyub Baek, Seok-Jin Yoon, Zhong-Lin Wang, Sang-Woo Kim and Chong-Yun Kang, “High Output Piezo/Triboelectric Hybrid Generator”, *Scientific Reports*, vol. 5: 9303, 2015.
- [50] Dajing Chen, Tushar Sharma and John X.J. Zhang, “Mesoporous surface control of PVDF thin films for enhanced piezoelectric energy generation”, *Sensors and Actuators*, vol. 216, pp. 196-201, 2014.
- [51] Tushar Sharma, Sang-Soo Je, Brijesh Gill, John X.J. Zhang, “Patterning piezoelectric thin film PVDF-TrFE based pressure sensor for catheter application”, *Sensors and Actuators*, vol. 177, pp. 87-92, 2012.
- [52] Hong-Jie Tseng, Wei-Cheng Tian and Wen-Jong Wu, “P(VDF-TrFE) Polymer-Based Thin Films Deposited on Stainless Steel Substrates Treated Using Water Dissociation for Flexible Tactile Sensor Development”, *Sensors*, vol. 13, pp. 14777-14796, 2013.
- [53] B. Gusarov, E. Gusarova, B. Vial, L. Gimeno, S. Boisseau, O. Cugat, E. Vandelle and B. Louison, “Thermal energy harvesting by piezoelectric PVDF polymer coupled with shape memory alloy”, *Sensors and Actuators*, vol. 243, pp. 175-181, 2016.
- [54] [online], http://thep-center.org/src/machine_fe-sem.php
- [55] [online], https://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_electron_microscope
- [56] [online], <http://particle.dk/methods-analytical-laboratory/xrd-analysis/>
- [57] [online], https://en.wikipedia.org/wiki/X-ray_crystallography
- [58] อรุณรัตน์ สัจฉิตติกวินสกุล, “ผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ”, 2545

- [59] [online], https://en.wikipedia.org/wiki/Fourier-transform_infrared_spectroscopy
- [60] [online], <http://www.solidworks.com>
- [61] [online], <https://www.ansys.com>
- [62] [online], <https://www.makerbot.com>
- [63] [online], <https://www.rigaku.com/en/products/xrd/smartlab>
- [64] [online], <http://www.perkinelmer.com/product>
- [65] [online], <https://www.zeiss.com/microscopy/int/products/scanning-electron-microscopes.html>
- [66] [online], <http://www.ni.com/en-th/support/model.usb-6003.html>
- [67] S. Satapathy, P. K. Gupta, Santosh Pawar and K. B. R. Varma, “Crystallization of β -phase Poly (vinylidene fluoride) films using dimethyl sulfoxide (DMSO) solvent and at suitable annealing condition”, 2013.
- [68] Sunhee Lee, “Crystal Structure and Thermal Properties of Poly (vinylidene fluoride hexafluoro propylene) Films Prepared by Various Processing Conditions”, *Fibers and Polymers*, vol. 112, pp. 1030-1036, 2011.
- [69] Daniel M. Esterly, “Manufacturing of Poly (vinylidene fluoride) and Evaluation of its Mechanical Properties”, 2002.
- [70] Satapathy, Santosh Pawar, P.K. Gupta and K.B.R. Varma, “Effect of annealing on phase transition in poly (vinylidene fluoride) films prepared using polar solvent”, *Bull. Mater. Sci.*, vol. 34, pp. 727-733, 2011.
- [71] Chieh Chang, Yiin-Kuen Fuh, and Liwei Lin, “A direct-write piezoelectric pvdf nanogenerator”, 2007.
- [72] Abid Omar, “Processing, morphology and product parameters of PVDF filaments for biomedical applications”, 2008.
- [73] Jin Ho Yang, Taekhee Ryu, Yves Lansac, Yun Hee Jang and Byoung Hun Lee, “Shear stress-induced enhancement of the piezoelectric properties of PVDF-TrFE thin films”, *Organic Electronics*, vol. 28, pp. 67-72, 2016.
- [74] Yingli Zhao, Qingliang Liao, Guangjie Zhang, Zheng Zhang, Qijie Liang, Xinqin Liao, Yue Zhang, “High output piezo electric nanocomposite generators

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อี 727, 2015. วัตถุประสงค์เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นาย กษิตศ จันทร์แสงศรี เกิดวันที่ 2 เมษายน พ.ศ. 2536 ณ โรงพยาบาลภูมิพลอดุลยเดช เขตดอนเมือง กรุงเทพมหานคร จบการศึกษาระดับชั้นประถมศึกษาปีที่ 6 จาก โรงเรียนอัมพรไพศาล อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี ในปีการศึกษา 2547 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จาก โรงเรียนปิยะชาติพัฒนาในพระราชูปถัมภ์สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี ในปีการศึกษา 2553 ในปีการศึกษา 2558 ได้สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา วิศวกรรมวัสดุ นาโน ณ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และในปีการศึกษา 2558 ได้เข้ารับการศึกษาระดับปริญญาโท สาขา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี ณ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้