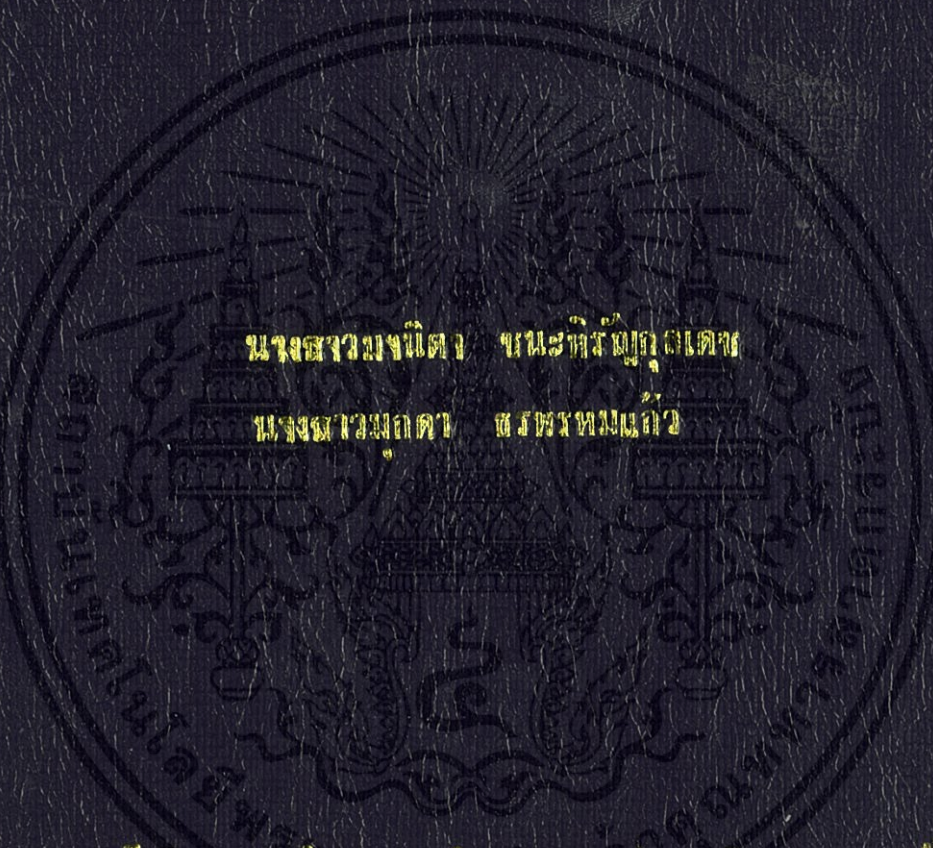


การพัฒนากระบวนการผลิตใยสังเคราะห์เส้นใยนาโน
DEVELOPMENT OF ELECTROSPINNING SYSTEM FOR
NANOFIBERS SYNTHESIS



นางสาวภวณิศา ขนระวีรัตน์กุลเดช
นางสาวณกศา สรพรหมแก้ว

โครงการพิเศษสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ วิทยาเขตศรีนครินทร์
สาขาวิชาศึกษาศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

การพัฒนาาระบบอิเล็กทรอนิกส์ป็นนึ่งเพื่การสังเคราะห์เส้นใยนาโน
DEVELOPMENT OF ELECTROSPINNING SYSTEM FOR
NANOFIBERS SYNTHESIS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยราชภัฏบรืรัม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๕๖

**DEVELOPMENT OF ELECTROSPINNING SYSTEM FOR
NANOFIBERS SYNTHESIS**

MISS MANITA CHANAHIRUNKULDET

MISS MUKDA TONPROMKAEW



**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN APPLIED PHYSICS**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ **FACULTY OF SCIENCE** อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ จะต้องได้รับอนุญาตจากอธิการบดีของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2013

หัวข้อโครงการพิเศษ	การพัฒนาระบบอิเล็กทรอนิกส์โทรสปินนิ่งเพื่อการสังเคราะห์เส้นใยนาโน
ชื่อนักศึกษา	นางสาวมานิตา ชนะหิรัญกุลเดช นางสาวมุกดา ธรพรหมแก้ว
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. วราวุฒิ เถาถัดดา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.ศ. ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษา และทดลองการผลิตเส้นใยนาโนด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์โทรสปินนิ่งด้วยสารพอลิสไตรีนผสมกับไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์ จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการฉีดสารละลายผ่านสนามไฟฟ้าสามารถทำให้สารละลายเกิดเป็นเส้นใยได้จริง โดยเส้นใยที่ได้ที่มีขนาดเล็กที่สุดและไม่เกิดบิดคั่นนั้น ได้จากการผสมสารพอลิสไตรีนกับไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์ในอัตราส่วน 1.5 : 10 โดยปริมาตร เข้มเบอร์ 24 (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.55 ซม.) ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 10 ซม. อัตราการไหลของสารละลาย 160 ไมโครลิตร / นาที เส้นใยทั้งหมดนี้ทำให้ได้เส้นใยเฉลี่ย 438.5 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำสำคัญ : เส้นใยนาโน, อิเล็กทรอนิกส์โทรสปินนิ่ง

Title DEVELOPMENT OF ELECTROSPINNING SYSTEM FOR
NANOFIBERS SYNTHESIS

Students Miss Manita Chanahirunkuldet
Miss Mukda Tonpromkaew

Degree Bachelor of Science

Major Program Physics

Academic Year 2013

Advisor Assoc.Prof.Dr.Warawoot Thowlada
Dr.S.Tippawan Klayboonme

ABSTRACT

This project study and Experiment production of nano-fibers by Electrospinning system of Polystyrene : PSmixed with Dimethylformamide. When the electric field can cause the solution injection into the fibers have actually occurred.By fibers that were smaller and the bit does not occur from Polystyrene : PSmixed with Dimethylformamide 1.5: 10 by volume, needle no.24 (diameter 0.55 cm), High voltage 15 kilovolt, distance from the needle tip to substrates 10 cm, flow rate of solution 160 microliter / minute. All conditions the average fiber 438.5 nanometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Key words : Nanafibers, Electrospinning

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากการสนับสนุนความอนุเคราะห์เป็นอย่างดียิ่งจาก รศ.ดร. วราวุฒิ เถาลัดดา อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษและดร.ศ. ทิพวรรณ คล้ายบุญญี อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ รวมถึงเทคนิคต่างๆ ตลอดจนช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นของโครงการพิเศษนี้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์ต่างๆ และตลอดจนทุนสนับสนุนในการทำโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณ คณะอาจารย์สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และชี้แนะปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างการทำโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ ทุกคนที่คอยให้คำปรึกษา ช่วยเหลือ และให้กำลังใจในการทำโครงการพิเศษมาโดยตลอด

ท้ายที่สุดขอกราบพระคุณบิดา มารดา รวมทั้งคนในครอบครัว ที่คอยสนับสนุนทางการศึกษามาโดยตลอด ทั้งการให้คำปรึกษา และเป็นกำลังสำคัญที่ช่วยผลักดันในการศึกษาและการทำโครงการพิเศษในครั้งนี้จนสำเร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงนางสาวมานิตา ชนะหิรัญกุลเดช

นางสาวมุกดา ธรพรหมแก้ว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.4ขั้นตอนในการวิจัยและวิธีดำเนินงาน	2
1.5ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เส้นใยนาโน	4
2.2 การผลิตเส้นใยระดับนาโน	4
2.3 หลักการเกิดเส้นใย	5
2.4 การทำงานElectrospinning	6
2.5 เส้นใยที่เกี่ยวข้อง	9
2.6 Electrospinning ชั้นสูง	14
2.7 สเตปป์มอเตอร์ (Stepping Motor)	18
2.8 สเตปป์มอเตอร์ 5 เฟส (Stepping Motor 5 phase)	22
2.9 Taguchi methods: orthogonal arrays	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	27
3.1 ขั้นตอนการผลิตเส้นใยนาโน	27
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	29
3.3 ขั้นตอนการวิจัย	36
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	37
4.1 ผลการทดลอง	37
4.2 อภิปรายผลการทดลอง	83
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	84
5.1 สรุปผลการทดลอง	84
5.2 ข้อเสนอแนะ	84
เอกสารอ้างอิง	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ระยะเวลาที่ใช้ดำเนินงาน	2
2.1 แบบฟูลสเตป1 เฟส	21
2.2 แบบฟูลสเตป2เฟส	21
2.3 แบบฮาลฟสเตป 2 เฟส	22
2.4 ขั้บสเตปปี้งมอเตอร์ 5 เฟส แบบ Full Step	22



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบและหลักการของวิธีElectrospinning	7
2.2 แผนภาพการจัดระบบหัวฉีดสำหรับอิเล็กโตรสปินนิงแบบร่วมแกน	14
2.3 เส้นใย polypropylene	15
2.4 แผนภาพแสดงเทคนิคElectrospinning แบบสนามไกล	16
2.5 เส้นใย polyethylene oxide, PEOประดิษฐ์ด้วยเทคนิคElectrospinning แบบสนามไกล	17
2.6 ผลของสนามแม่เหล็กต่อระบบElectrospinning	18
2.7 สเตปป์มอเตอร์	19
2.8 แผนภาพวงจร Pentagon driver	23
2.9 การไหลของกระแส สเตปป์ที่ 0	23
2.10 การไหลของกระแส สเตปป์ที่ 1	24
2.11 การไหลของกระแส สเตปป์ที่ 2	24
2.12 ตัวอย่าง orthogonal arraysL9	25
2.13 การคำนวณหาค่าอิทธิพลสูงสุด	26
2.14 ตารางสรุปผลตัวแปรที่มีอิทธิพลสูงสุด	26
3.1 เส้นใยนาโนของ polycrylonitrileละลายใน dimethylformamide	28
3.2 ขนาดของเส้นใยที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ ของสารละลายพอลิเมอร์ PAN/DMF	28
3.3 High Voltage Power Supply	29
3.4 DC Power Supply	29
3.5 Step Motor 5 Phase	30
3.6 Microcontroller	31
3.7 Keypad	31
3.8 LCD 16x4	32
3.9 Dimethylformamide	32
3.10 Polystyrene	33
3.11 Magnetic Stirrer	33
3.12 Magnetic Bar	34
3.13 กระดาษฟอยล์	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 Syringe	35
3.15 หัวเข็มเหล็ก	35
3.16 ปีกเกอร์	36



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันทุกประเทศทั่วโลกให้ความสำคัญกับการพัฒนาทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพิ่มขึ้นมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการแก้ปัญหาวิกฤติความต้องการทางด้านสุขภาพ พลังงานและสิ่งแวดล้อม ซึ่งมีผลกระทบเป็นอย่างมากต่อเศรษฐกิจและการแข่งขันของประเทศ นาโนเทคโนโลยี (nanotechnology) เป็นเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการผลิตและการประยุกต์ใช้สารที่มีขนาดเล็ก เป็นหนึ่งในพื้นฐานของเมตร (10^{-9} เมตร) ซึ่งเริ่มมีบทบาทสำคัญต่อมนุษย์ทั้งทางตรงและทางอ้อมในปัจจุบันและจะมากยิ่งขึ้นในอนาคต

ในชีวิตประจำวันมนุษย์ได้ใช้ประโยชน์จากเส้นใยในการทำเป็นเสื้อผ้า เครื่องนุ่งห่ม เชือกค้าย ฯลฯ เส้นใยเหล่านี้มีขนาดเล็กแต่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เช่น เส้นใยจากรังไหมมีขนาดใกล้เคียงกับเส้นผม ประมาณ 100 ไมโครเมตร (micrometer, μm หรือหนึ่งในล้านเมตร) แต่ถ้าหากมีกระบวนการซึ่งทำให้เส้นใยขนาดเล็กลงมากจนกระทั่งมองไม่เห็นด้วยตาเปล่าในระดับนาโนเมตร (nanometer, nm) จะทำให้เกิดประโยชน์ต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์มากเพียงใด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการการทำงานของ Electrospinning
- 1.2.2 เพื่อศึกษาหลักการการทำงานโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมระบบ
- 1.2.3 เพื่อสร้างเส้นใยนาโนด้วยระบบ Electrospinning

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ในการวิจัยนี้จะทำการสร้างเส้นใยระดับนาโน โดยควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยมีขอบเขตวิจัยดังนี้

- 1.3.1 สร้างเส้นใยระดับนาโนจากเครื่อง Electrospinning

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนแผนดำเนินงานสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนได้ ดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและหลักการทำงานของเครื่อง Electrospinning
- ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาการควบคุมการฉีดสารที่ใช้ในการสร้างเส้นใยระดับนาโนโดยการใช้สเตปป์ิงมอเตอร์
- ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาการทำงานของสเตปป์ิงมอเตอร์
- ขั้นตอนที่ 4 สร้างเส้นใยระดับนาโน
- ขั้นตอนที่ 5 นำเส้นใยที่ถูกสร้างขึ้นไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)
- ขั้นตอนที่ 6 สรุปโครงการพิเศษ

1.1 ระยะเวลาที่ใช้ดำเนินงาน

เดือนที่	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
ขั้นตอนที่ 1	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
ขั้นตอนที่ 2	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
ขั้นตอนที่ 3	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
ขั้นตอนที่ 4	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
ขั้นตอนที่ 5	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
ขั้นตอนที่ 6	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทำให้ทราบถึงหลักการทำงานของ Electrospinning
- 1.5.2 ทำให้ทราบถึงการทำงานของ Electrospinning โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมระบบ
- 1.5.3 ได้เส้นใยระดับนาโนจาก Electrospinning
- 1.5.4 สามารถนำเส้นใยระดับนาโนไปใช้ต่อได้ในชีวิตประจำวัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เส้นใยนาโน

เส้นใยนาโนคือ เส้นใยที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร ถึงระดับ 100 นาโนเมตร ทำให้มีข้อดี คือ มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (surface-to-volume ratio) สูง เช่น เส้นใยนาโนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 นาโนเมตร จะมีขนาดเล็กกว่าและมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวตามความยาวของเส้นใยต่อปริมาตร เป็น 1,000 เท่าของเส้นผมที่มีนอจากนี้ เส้นใยนาโนจะมีขนาดของรูพรุน ที่เล็กด้วยส่งผลทำให้มีสมบัติพิเศษต่างๆ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้า หรือสมบัติทางชีวภาพ ที่ดี เหมาะเหมาะสำหรับงานเฉพาะด้านซึ่งต้องการความได้เปรียบของขนาดที่เล็ก มากๆ ทั้งนี้ขึ้นกับวิธีและสารที่นำมาใช้ประดิษฐ์ ปัจจุบันเริ่มมีการประยุกต์ใช้เส้นใยนาโนทางด้านต่างๆ อย่างกว้างขวาง ดังเช่น การประยุกต์ใช้งานของเส้นใยนาโนพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ ไม่เป็นพิษและมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ สำหรับงานทางด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ ผ้าปิดแผล ระบบนำส่งยา ระบบการกรองอย่างละเอียด เป็นต้น

2.2 การผลิตเส้นใยระดับนาโน

เทคนิคที่นำมาใช้ในการเตรียมเส้นใยนาโนมีหลายวิธีซึ่งแต่ละวิธีการมีข้อ ดีข้อเสียที่แตกต่างกันไป เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง (Electrospinning) หรือ การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นทางเลือกใหม่ที่สามารถใช้เตรียมเส้นใยนาโน ของวัสดุพอลิเมอร์และสารอนินทรีย์ออกไซด์ หลากหลายชนิดสำหรับประยุกต์ใช้ใน ทางการแพทย์ เกษตรกรรม วิศวกรรม การทหาร และอื่นๆ

วิธีการผลิตเส้นใยขนาดเล็กอีกวิธีหนึ่งคือการผลิตเส้นใยด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าสถิต หรือที่เรียกกันว่า Electrospinning process ซึ่งย่อมาจาก Electrostatic spinning process กระบวนการนี้ถูกพัฒนาขึ้นมากกว่า 60 ปีแล้วโดย Formalas แต่ยังไม่เป็นที่แพร่หลายเนื่องจาก ข้อจำกัดทางด้านเทคโนโลยีในอดีตในปัจจุบันเทคนิคนี้กำลัง ได้รับความสนใจอย่างสูง เนื่องจากข้อดีหลายประการ ดังจะได้อีกกล่าวต่อไป

การผลิตเส้นใยโดยกระบวนการไฟฟ้าสถิตต่างจากวิธีผลิตเส้นใยอื่นคือกระบวนการนี้จะใช้แรงทางไฟฟ้าแทนแรงทางกล โดยพอลิเมอร์เหลวซึ่งอาจจะอยู่ในรูปสารละลาย หรือสารหลอมเหลวที่อยู่ในรูขนาดเล็ก จะถูกทำให้เกิดประจุไฟฟ้าที่ผิวหน้าโดยสนามไฟฟ้าความแรงสูง เนื่องจากประจุที่เกิดขึ้นมีขั้วเหมือนกันจึงมีแรงผลักระหว่างประจุเกิดขึ้น แรงผลักนี้เรียกว่า Repulsive Coulombic Force เมื่อมีมาก พอถึงขั้นหนึ่งก็จะไปเอาชนะแรงดึงดูดของพอลิ

เมอร์เหลวได้ เส้นพอลิเมอร์เหลวก็จะถูกฉีดออกมาและจะเปลี่ยนเป็นเส้นใย โดยการระเหยออกของตัวทำละลาย หรือโดยการถ่ายเทความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม

Electrospinning เป็นวิธีประดิษฐ์เส้นใยนาโนที่ได้รับความนิยมและใช้กัน อย่างแพร่หลาย ในปัจจุบัน สามารถประดิษฐ์เส้นใยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 10 นาโนเมตร ถึงมากกว่า 1 ไมโครเมตร โดยอาศัยแรงทางไฟฟ้าที่เกิดจากศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง สำหรับระบบพื้นฐานมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญเพียง 3 ส่วนคือ แหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง (high voltage power supply) หลอดบรรจุสารละลายที่ติดเข็มโลหะ (syringe with needle) และวัสดุรองรับที่เป็นโลหะ (metal collector) จัดเป็นระบบที่ไม่มี ความซับซ้อน มีค่าใช้จ่ายน้อย และใช้งานได้สะดวก ทั้งนี้ในระบบที่พัฒนาให้ดีขึ้น สามารถเพิ่มอุปกรณ์สำหรับควบคุมการไหลของสารละลาย (syringe pump) และทำให้การประดิษฐ์เส้นใยมีประสิทธิภาพสูงขึ้น กล่าวคือ สามารถควบคุมขนาดและปริมาณการเกิดเส้นใยได้ต่อเนื่องมากยิ่งขึ้น

กระบวนการผลิตเส้นใยแบบไฟฟ้าสถิตย์มีข้อดีหลายประการดังนี้

1. เส้นใยที่ได้มีขนาดเล็กมาก โดยทั่วไปจะมีขนาดตั้งแต่หลายสิบนานาโนเมตรจนถึงประมาณหนึ่งถึงสอง ไมโครเมตร จึงมักจะถูกเรียกว่าเส้นใยขนาดนาโนหรืออิเล็กทรอนิกส์นาโนไฟเบอร์
2. เนื่องจากเส้นใยมีขนาดเล็กจึงมีพื้นที่ผิวมากเป็นพิเศษในขณะที่มีน้ำหนักเบา
3. ผ้าที่ได้จากเส้นใยนี้จะมีรูพรุนขนาดเล็กอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้มีการส่งผ่านของของเหลวหรือแก๊สได้ดี ข้อดีต่าง ๆ ดังกล่าวทำให้ให้นักวิทยาศาสตร์ทั่วโลกแข่งขันกันพัฒนาการ นำเส้นใยนาโนนี้ไปใช้ในงานต่างๆ เช่น การกรองโมเลกุล การประดิษฐ์ชุดป้องกันอาวุธเคมี และอาวุธชีวภาพของทหาร การสร้างนาโนคอมโพสิต เป็นวัสดุโครงสร้างในวิศวกรรมเนื้อเยื่อ เป็นวัสดุยึดติดสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น

2.3 หลักการเกิดเส้นใย

เริ่มจากการให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงแก่สารละลายพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนทำให้หยดของพอลิเมอร์ที่บริเวณปลายช่องเปิดของหลอดบรรจุซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกลมเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นลักษณะทรงกรวย ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากการผลัดกันของประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้น และเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าขึ้นไปอีกส่วนยอด โคนจะมีการสะสมของประจุเพิ่มมากขึ้นทำให้แรงผลัดกันของประจุที่เพิ่มขึ้นนี้มากกว่าแรงตึงผิวของสารละลาย

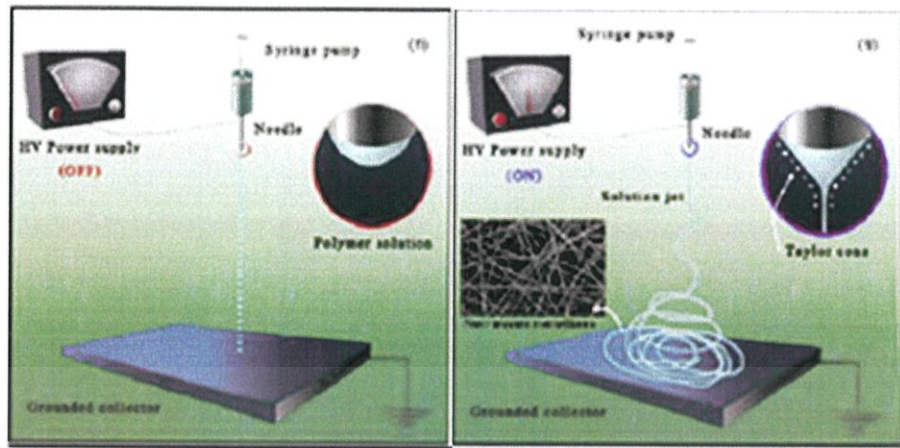
พอลิเมอร์ทำให้เกิดกระแสพอลิเมอร์พุ่งออกมาและจะพุ่งไปยังอุปกรณ์รองรับ โดยแนวทางเคลื่อนที่ของกระแสพอลิเมอร์นี้จะเป็นเส้นตรงในช่วงแรก โดยระยะเป็นเส้นตรงนี้จะขึ้นกับค่าอัตราส่วนระหว่างศักย์ไฟฟ้าต่อระยะทางจากปลายช่องเปิดถึงอุปกรณ์รองรับหลักการเกิดเส้นใย โดยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตนี้แบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนด้วยกัน ได้แก่

1. ขั้นตอนการเกิดกระแสโพลิเมอร์
2. ขั้นตอนการยึดตัวของกระแสโพลิเมอร์ในระหว่างที่เคลื่อนตัวจากปลายช่องเปิดไปยังจากรีป
3. ขั้นตอนการแข็งตัวของกระแสโพลิเมอร์

2.4 การทำงานElectrospinning

การทำงานของระบบElectrospinning แสดงในรูปที่ 2.1 เมื่อยังไม่ให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงแก่ระบบสารละลายจำนวนหนึ่งจะรวมตัวกันเป็นหยดรูปร่างครึ่งทรงกลมที่บริเวณปลายเข็มโลหะอันเป็นผลเนื่องมาจากแรงตึงผิว (surface tension) แต่เมื่อให้ความต่างศักย์กำลังสูงจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าครอบคลุมส่วนปลายของเข็มโลหะและมีประจุเกิดขึ้นที่ผิวของสารละลาย จึงเกิดแรงผลักทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic repulsion) ขึ้นในทิศตรงกันข้ามกับแรงตึงผิวดังนั้น ถ้าสนามไฟฟ้ามีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดแรงผลักมากกว่าแรงตึงผิวจะส่งผลให้รูปร่างครึ่งทรงกลมของสารละลายที่อยู่ปลายเข็มยืดออกเป็นรูปร่างทรงกรวยที่เรียกว่า “กรวยของเทเลอร์” (Taylor's cone) และเมื่อสนามไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบมีค่ามากขึ้นจนกระทั่งถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่งจะเกิดแรงขับเคลื่อนให้สารละลายพุ่งออกมาเป็นลำ (solution jet) ต่อมาลำของสารละลายนี้จะยืดออกจนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงถึงระดับนาโนเมตร แล้วตกลงบนวัสดุรองรับในลักษณะที่ไม่เกิดการถักทอ (non-woven nanofiber) ความไม่เสถียรของการบิดโค้งของเส้นใยอธิบายได้จากรูปขยายในรูปที่ 2.1 (ข) บริเวณที่ลำของสารละลายได้ยืดออกมาห่างจากจุดเริ่มต้นระยะหนึ่ง พบว่าสารละลายถูกเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ผิวของสารละลายและด้วยสนามไฟฟ้าภายนอกที่เกิดจากความต่างศักย์ระหว่างปลายเข็มถึงวัสดุรองรับที่เป็นตัวนำ จึงส่งผลให้เกิดลำของประจุขึ้นด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้ จึงเกิดแรงที่ไม่สมดุล ทำให้ลำสารละลายยืดออกในเส้นทางที่ซับซ้อนอันนำมาซึ่งเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลงอย่างมากและยิ่งรอบของการบิดโค้งมีจำนวนมากขึ้นจะทำให้สารละลายยืดออกเป็นเส้นที่เล็ก ประกอบกับการระเหยออกของตัวทำละลาย ในที่สุดเกิดเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กในระดับนาโนเมตรได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบและหลักการของวิธี Electrospinning

(ก) ในช่วงก่อนการให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง

(ข) ให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงที่มีค่ามากพอแก่ระบบจนกระทั่งเกิด
เส้นใยนาโนขึ้น

ถึงแม้ว่า Electrospinning จะเป็นวิธีสำหรับสังเคราะห์เส้นใยนาโนที่ง่ายและสะดวกมากแต่อย่างไรก็ตามในระหว่างที่เส้นใยนาโนเกิดขึ้น มีปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนเกี่ยวข้องหลายอย่าง โดยเฉพาะการบิดโค้งที่ไม่มีเสถียรภาพ (bending instability) ซึ่งส่งผลให้เส้นใยมีขนาดเล็กลงถึงระดับนาโนเมตรได้ โดยสรุปให้เห็นถึงขั้นตอนสำคัญที่เกิดขึ้นในกระบวนการ Electrospinning

2.4.1 การเกิดลำสารละลาย (jet initiation) ขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นเป็นอันดับแรก ภายหลังจากการให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงแก่ระบบ ผิวของสารละลายจะถูกดึงเนื่องจากแรงทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ส่งผลให้สารละลายที่ปลายเข็มโลหะเปลี่ยนรูปร่างจากครึ่งวงกลมเป็นรูปกรวย ซึ่งเรียกรูปร่างนี้ว่า “Taylor cone” และเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าให้มีค่าเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งแรงทางไฟฟ้ามีค่ามากกว่าแรงดึงผิว จะทำให้สารละลายพุ่งออกมาเป็นลำ (jet) จากปลายเข็ม ณ จุดนี้ถือได้ว่าเป็นการเริ่มต้นขึ้นของกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่ง

2.4.2 บริเวณพื้น (base region) บริเวณพื้นภายหลังการเกิดขึ้นของลำสารละลาย จะเกิดแรงทางไฟฟ้าเนื่องมาจากประจุ ส่งผลให้สารละลายมีการยืดออก โดยจะมีรูปร่างและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขึ้นกับลักษณะการไหล เช่น การไหลตามยาว (elongational flow) รวมทั้งขึ้นกับระยะเวลาซึ่งจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นกับสมบัติด้านความยืดหยุ่น (elasticity) ของสารละลาย

2.4.3 การบิดโค้งที่ไม่มีเสถียรภาพ (bending instability) ปรากฏการณ์นี้ จะเกิดภายหลังจากที่ลำของสารละลายได้ยืดออกมาห่างจากจุดเริ่มต้นระยะหนึ่งแล้ว ซึ่งรูปขยายในภาพที่ 2.1 จะพบว่าสารละลายถูกเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ผิวของสารละลาย และด้วยสนามไฟฟ้าภายนอกที่เกิด

เนื่องจากความต่างศักรีระหว่างปลายเข็มถึงวัสดุรองรับที่เป็นตัวนำทั้งสอง จึงส่งผลให้เกิดลำประจุขึ้น จากเหตุผลดังกล่าวนี้จึงเกิดแรงที่ไม่สมดุล (balanced force) ทำให้ลำสารละลายยืดออกในเส้นทางที่ซับซ้อน อันนำมาซึ่งเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลงอย่างมาก และยังรอบของการบิดโค้งมีจำนวนมากขึ้นจะทำให้สารละลายยืดออกเป็นเส้นที่เล็ก ประกอบกับการระเหยออกของตัวทำละลาย ในที่สุดจะเกิดเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กในระดับนาโนเมตรได้

2.4.4 บริเวณวัสดุรองรับ(collection region) ในบริเวณนี้ลำของสารละลายจะไม่มีกรยืดออกเส้นใยที่เกิดจะติดอยู่บนวัสดุรองรับ โดยเส้นใยอาจจะถูกรองรับด้วยโลหะ หรือถูกม้วนเก็บอย่างระเบียบหรืออาจถูกรองรับด้วยน้ำหรือของเหลวอื่น แต่โดยทั่วไปจะนิยมใช้วัสดุที่เป็นตัวนำทางไฟฟ้า ทั้งนี้ระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงวัสดุที่รองรับเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในทางทฤษฎีได้มีผู้ศึกษาพื้นฐานและสิ่งที่เกิดขึ้นในกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โครสปีนนิ่ง เพื่อให้เกิดความเข้าใจ อีกทั้งสามารถอธิบายปรากฏการณ์รวมถึงทำนายผลที่เกิดขึ้น โดยอาศัยการสร้างแบบจำลอง (modeling) และการจำลองแบบ (simulate) จากปรากฏการณ์ที่สารละลายเปลี่ยนรูปร่างจากครึ่งทรงกลมเป็นกรวยนั้น Taylor เป็นคนแรกที่ได้ทำการศึกษาทางทฤษฎีเกี่ยวกับรูปทรงกรวยดังกล่าวได้ทำนายว่าครึ่งหนึ่งของมุมแนวระดับ(semi-vertical angle) ของทรงกรวยมีค่าเท่ากับ 49.3 องศา ซึ่งเป็นจุดที่แรงทางไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ แรงตึงผิว ต่อมาจึงเรียกลักษณะทรงกรวย (cone) ของสารละลายนี้ว่า กรวยเทย์เลอร์(Taylor's cone) ซึ่งจากการทดลองกับพอลิเมอร์หลอมเหลวพบว่ามุมกรวยของเทย์เลอร์มีค่าประมาณ 50 องศา แต่ต่อมามีผู้ศึกษากับสารละลายพอลิเมอร์ และใช้การประมาณค่าแบบไฮเพอร์โบลอยด์ (hyperboloidal approximation) พบว่าค่ามุมกรวยของเทย์เลอร์ควรเป็น 33.5 มากกว่า 49.3 องศา นอกจากนี้ Taylor ยังได้ศึกษาค่าศักย์ไฟฟ้าวิกฤติ (critical voltage, V_c) ว่ามีความสัมพันธ์ ดังนี้

$$V_c^2 = 4 \frac{H^2}{L^2} \left(\ln \frac{2L}{R} - 1.5 \right) (0.117\pi R\gamma)$$

V_c คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าวิกฤติ (หน่วย kilovolts, kV)

H คือ ระยะห่างระหว่างปลายเข็มชิดกับวัสดุรองรับ (หน่วย cm.)

L คือ ความยาวของเข็มฉีดยา (หน่วย cm.)

R คือ รัศมีของเข็มฉีดยา (หน่วย cm.)

γ คือ แรงตึงผิว(surface tension) ของสารละลาย(หน่วย dyn/cm.)

ต่อมา Hendricks et al. ได้คำนวณค่าความต่างศักรีน้อยที่สุด (minimum spraying potential) ที่ทำให้สารละลายที่มีสมบัตินำไฟฟ้าพุ่งออกมาเป็นเส้นใยขนาดเล็กในอากาศ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่ามีลักษณะคล้ายการพุ่งออกมาเป็นละอองซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$V = 300\sqrt{20\pi r y}$$

โดย r เป็นขนาดรัศมีของลำสารละลาย(หน่วย cm.)

สำหรับการศึกษาเพื่ออธิบายว่าลำของสารละลายที่มีขนาดระดับไมโครเมตรสามารถลดขนาดจนกระทั่งอยู่ในระดับนาโนเมตรได้อย่างไรนั้น เดิมมีความเข้าใจว่าเมื่อลำของสารละลายถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จะมีแรงผลักกระทำต่อประจุที่อยู่ในสารละลาย ทำให้ลำสารละลายเริ่มต้น (primary jet) เกิดการแยกออกเป็นลำย่อยๆ หลายลำ (multiple sub-jets) ที่มีขนาดเล็กลงเรียกกระบวนการที่สารละลายแยกออกเป็นลำย่อยๆ นี้ว่า “splaying” ดังนั้นขนาดสุดท้ายของ เส้นใยอาจคำนวณจากจำนวนของลำย่อยๆ ที่แยกออกมา ในปัจจุบันได้เกิดความเข้าใจในกระบวนการดังกล่าวมากยิ่งขึ้น จากการศึกษาของ Reneker et al. (2000); Yarin et al. (2001b); Feng(2002) ซึ่งได้อธิบายว่าการบิดโค้งที่ไม่มีเสถียรภาพทำให้ลำของสารละลายสั่นและยืดออกด้วยความถี่สูงมากจนกระทั่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กลงถึงระดับนาโนเมตรได้และผลของการศึกษาของ Yarin et al. (2001b) ยังได้อธิบายการลดลงของมวลและปริมาตรของลำสารละลายว่า ถ้าพิจารณาว่าลำของสารละลายไม่มีการแยกออกจากลำสารละลายเริ่มต้น โดยสารละลายมีความเข้มข้น 6% จะสามารถคำนวณหาขนาดรัศมีของเส้นใยที่แห้งลง เนื่องจากการระเหย (evaporation) และกระบวนการแข็งตัว (solidification) ได้ค่ารัศมีเป็น 1.31×10^{-3} เท่าของสารละลายเริ่มต้น แต่ทั้งนี้อัตราการแข็งตัวจะสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย และยังมีผู้ศึกษาพบว่าอัตราการแข็งตัวจะสัมพันธ์กับตัวแปรอื่น เช่น ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยาถึงวัสดุรองรับ ขนาดของความต่างศักย์ เป็นต้น

2.5 เงื่อนไขที่เกี่ยวข้อง

เส้นใยที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง มีลักษณะได้หลายรูปแบบและมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ตลอดจนความต่อเนื่องของเส้นใยแตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ Ramakrishna et al. (2005) ได้แบ่งตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อลักษณะเส้นใยออกเป็น 3 กลุ่มคือ

2.5.1 ตัวแปรด้านสารละลาย สมบัติของสารละลายเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์เส้นใยนาโนด้วยวิธีอิเล็กโตรสปินนิงเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งขนาดและรูปร่างของเส้นใย ยกตัวอย่างเช่น ความตึงผิวของสารละลายส่งผลต่อการเกิดบีคส์ (beads) ซึ่งมีลักษณะเป็นก้อนทรงกลมหรือรีคล้ายลูกปัดอยู่บนเส้นใย ความหนืดของสารละลายและสมบัติการนำไฟฟ้าส่งผลต่อความสามารถในการยืดออกเป็นเส้น ซึ่งผลจากตัวแปรย่อยแต่ละตัวจะกำหนดขนาดและลักษณะของเส้นใยดังนี้

2.5.1.1 มวลโมเลกุลและความหนืดของสารละลาย (molecular weight and solution viscosity) โดยทั่วไปพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลมากเมื่อละลายในตัวทำละลายจะได้สารละลายที่มีความหนืดสูงกว่าพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลน้อย ดังนั้นในกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงพอลิเมอร์ที่ใช้ต้องมีมวลโมเลกุลสูงพอ และสารละลายต้องมีความหนืดมากพอด้วย ในระหว่างที่สารละลายพอลิเมอร์มีการยืดออก ความยุ่ง (entanglement) ของโซ่โมเลกุล (molecule chain) จะขัดขวางไม่ให้ลำของสารละลายกระจัดกระจายออกไป ซึ่งทำให้เกิดเป็นเส้นใยที่มีความต่อเนื่อง ดังนั้นในกรณีของสารละลายพอลิเมอร์สายเดี่ยว (monomeric polymer) จะไม่มีเส้นใยเกิดขึ้น จากเหตุผลข้างต้นพบว่าถ้ามวลโมเลกุลสูงค่าความยุ่งของโซ่พอลิเมอร์จะมากด้วยและทำให้ลำของสารละลายมีความต่อเนื่อง ในขณะที่ความหนืดของสารละลายจะมากขึ้นด้วย โดยสรุปจึงกล่าวได้ว่าหากต้องการให้ได้ซึ่งเส้นใยที่ดีไม่มีบิดส์หรือหยดขนาดเล็ก สารละลายพอลิเมอร์ต้องมีความหนืดสูงพอ ทั้งนี้อาจเลือกใช้พอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลมากหรือเตรียมสารละลายให้มีความเข้มข้นมากพอ แต่อย่างไรก็ตามสารละลายที่มีความหนืดมากเกินไปจะควบคุมการไหลได้ยาก และเกิดปัญหาการแห้งตัวอย่างรวดเร็วที่ปลายเข็มโลหะ นอกจากนี้ถ้าความเข้มข้นของสารละลายมีค่ามากจะไปลดปรากฏการณ์การบิดโค้งที่ไม่มีเสถียรภาพ ส่งผลต่อเส้นทางการเคลื่อนที่ของลำสารละลายลดลง ทำให้เส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้นและพื้นที่การกระจายตัวของเส้นใยบนวัสดุรองรับลดลงอีกด้วย

2.5.1.2 ความตึงผิว (surface tension) ในขณะที่สารละลายยืดออกเป็นเส้นใยอาจพบบิดส์เกิดขึ้นเนื่องจากผลของแรงตึงผิวได้ ในกรณีที่สารละลายมีความหนืดน้อย โมเลกุลของตัวทำละลายที่ไม่ได้จับกับโมเลกุลของพอลิเมอร์จะมีความหนาแน่นมาก ส่งผลให้จับตัวกันเป็นก้อนทรงกลมเนื่องจากแรงตึงผิวแต่กรณีที่สารละลายมีความหนืดมากจะเกิดอัตรากิริยาระหว่างโมเลกุลของตัวทำละลายกับโมเลกุลของพอลิเมอร์มากขึ้น ส่งผลให้สารละลายยืดออกได้ดีขึ้นและลดการเกิดบิดส์ลงได้ ตัวทำละลายบางตัว เช่น เอทานอล มีค่าความตึงผิวน้อยดังนั้นหากเติมลงในสารละลายจะช่วยทำให้เส้นใยมีรูปร่างเรียบมากขึ้น และอาจลดความตึงผิวลงได้โดยการเติมสารลดความตึงผิว (surfactant) ซึ่งส่งผลให้เส้นใยมีรูปร่างคงที่ยิ่งขึ้น

2.5.1.3 สภาพการนำไฟฟ้า (conductivity) เนื่องจากการยืดออกเป็นเส้นของสารละลายส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากแรงผลักของประจุที่ผิวสารละลาย ดังนั้นถ้าสารละลายมีสภาพนำไฟฟ้าที่ดีจะส่งผลให้มีประจุเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้การเพิ่มสภาพนำไฟฟ้าอาจทำได้โดยการเติมไอออน (ion) ดังนั้นหากเติมเกลือหรืออิเล็กโตรไลต์ลงในสารละลายจะมีส่วนทำให้สารละลายยืดออกได้ดีขึ้น ซึ่งสามารถลดการเกิดบิดส์ในเส้นใยลงได้ รวมทั้งขนาดของเส้นใยลดลงด้วยแต่เพียงแค่ว่าระดับหนึ่งเท่านั้น นอกจากนี้การที่ไอออนไปเพิ่มสภาพนำไฟฟ้าทำให้ความต่างศักย์ที่ใช้ให้สารละลายเริ่มยืดออกลดลงด้วย ตลอดจนส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของการบิดโค้งที่ไม่มีเสถียรภาพ ทำให้พื้นที่การเกิดเส้นใยบนวัสดุรองรับเพิ่มขึ้น และขนาดของเส้นใยเล็กลงเนื่องจากเส้นทางการยืดออกของลำสารละลาย

มากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาระหว่างสารที่เติมลงไปกับสารละลายอาจไปเพิ่มความหนืดของสารละลาย ดังนั้นแม้ว่าสภาพนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นแต่ไม่สามารถลดขนาดของเส้นใยได้

2.5.1.4 ค่าไดอิเล็กตริก(dielectric constant) ค่าไดอิเล็กตริกของตัวทำละลายมีนัยสำคัญต่อกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง ในแง่ที่ว่าหากสารละลายมีสมบัติทางไดอิเล็กตริกสูงจะช่วยลดการเกิดบีดส์และขนาดของเส้นใยลงได้ ดังนั้นอาจเติมตัวทำละลายที่มีค่าไดอิเล็กตริกสูง เช่น ไดเมทิลฟอมาไมด์(N,N-Dimethylformamide) ลงในสารละลายเพื่อเพิ่มสมบัติทางไดอิเล็กตริก นอกจากนี้ยังพบว่าถ้าไดอิเล็กตริกมีค่าสูงจะส่งผลให้การบิดโค้งที่ไม่มีเสถียรภาพเกิดเพิ่มมากขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มพื้นที่การเกิดเส้นใยบนวัสดุรองรับ และมีส่วนทำให้ขนาดของเส้นใยเล็กลง เนื่องจากค่าของสารละลายมีเส้นทางยึดออกมามากยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเติมตัวทำละลายที่มีค่าไดอิเล็กตริกสูงในสารละลายต้องพิจารณาความเข้ากันได้หรือสมบัติการละลายด้วย

2.5.2 ตัวแปรในระบบ ปัจจัยที่สำคัญมากอีกกลุ่มหนึ่งในกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง คือ ตัวแปรของระบบที่ใช้สังเคราะห์เส้นใยซึ่งประกอบด้วย ความต่างศักย์ไฟฟ้า อัตราการไหลของสารละลาย อุณหภูมิของสารละลาย ชนิดของวัสดุรองรับ ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับ และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของปลายเข็มโลหะ โดยตัวแปรเหล่านี้ล้วนมีผลต่อลักษณะของเส้นใยหากแต่ส่งผลน้อยกว่าตัวแปรในกลุ่มด้านสารละลาย

2.5.2.1 ความต่างศักย์ไฟฟ้า (voltage) โดยส่วนใหญ่หากศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบมีค่ามากส่งผลให้ขนาดของเส้นใยลดลง รวมทั้งมีส่วนทำให้ตัวทำละลายระเหยได้เร็วขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าให้มีค่าเพิ่มขึ้นมีผลต่อการเกิดขึ้นของบีดส์ โดยบีดส์เปลี่ยนรูปร่างจากทรงคล้ายลูกกรับ (spindle-like) เป็นรูปทรงกลมและมีจำนวนมากขึ้น แต่ในบางกรณีพบว่าเมื่อศักย์ไฟฟ้ามากขึ้นจำนวนบีดส์กลับมีจำนวนลดลง ผลจากความต่างศักย์ไม่เพียงแต่ทำให้ขนาดเปลี่ยนแปลงแต่ยังพบว่ามีผลต่อความเป็นผลึกของเส้นใยพอลิเมอร์(crystallinity of the polymer fiber) เนื่องจากสนามไฟฟ้าสถิตส่งผลต่อการจัดตัวของโมเลกุลพอลิเมอร์

เป็นที่ทราบกันแล้วว่าสนามไฟฟ้าภายนอกที่ให้แก่ระบบมีผลต่อการเคลื่อนที่ของลำสารละลาย จึงที่ความพยายามปรับเปลี่ยนลักษณะของสนามไฟฟ้าเพื่อควบคุมทิศทางการเกิดของเส้นใยให้เป็นระเบียบ ทั้งนี้อาจใช้การปรับทิศทางหรือรูปร่างของวัสดุรองรับ ดังกล่าวรายละเอียดในหัวข้อระบบอิเล็กโตรสปินนิง ส่วนใหญ่วิธีอิเล็กโตรสปินนิงเลือกใช้แหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้าแบบกระแสตรง(DC voltage supply) แต่สามารถใช้แบบกระแสสลับ(AC voltage supply)ได้ เนื่องจากกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงเป็นผลจากประจุในสารละลาย ซึ่งการเหนี่ยวนำประจุนี้เกิดขึ้นเร็วมากและลำของสารละลายก็เกิดก่อนที่ศักย์ไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนขั้ว ดังนั้นการบิดโค้งที่ไม่มีเสถียรภาพที่เป็นผลมาจากแรงคูลอมบ์จึงลดลงเมื่อมีการเปลี่ยนจากศักย์ไฟฟ้าบวกเป็นลบ ด้วยเหตุดังกล่าวเส้นใยจึงมีขนาดใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้าแบบกระแสตรงที่มีค่าเดียว อย่างไรก็ตามการใช้ศักย์ไฟฟ้าแบบกระแสสลับมีข้อดี คือ ไม่ก่อให้เกิดประจุเสมือน(like-charge) บนผิวของเส้น

ใยซึ่งตกทับกันบนวัสดุรองรับ ดังนั้นจึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้กับระบบที่ต้องการแผ่นเส้นใยที่มีความหนาแน่น และโดยเฉพาะกับกรณีที่ใช้ฉนวนไฟฟ้าเป็นวัสดุรองรับ

2.5.2.2 อัตราการไหลของสารละลาย(feedrate) ปริมาณของสารละลายที่จะทำให้เกิดเส้นใยในกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิ่งขึ้นกับอัตราการไหลของสารละลาย ถ้าอัตราการไหลมีค่ามากจะทำให้เส้นใยและบิดส์มีขนาดใหญ่มากขึ้น เนื่องจากปริมาณสารละลายจะออกมามากเกินไป ส่งผลให้ตัวทำละลายระเหยออกไม่ทัน ดังนั้นเส้นใยจะหลอมรวมกันเป็นแผ่น

2.5.2.3 อุณหภูมิของสารละลาย(temperature) ถ้าอุณหภูมิของสารละลายสูงจะเพิ่มอัตราการระเหยให้สูงขึ้น แต่จะลดความหนืดให้น้อยลง ยกตัวอย่างเช่นการสังเคราะห์เส้นใยของพอลิยูรีเทน(polyurethane) ที่อุณหภูมิสูงพบว่าเส้นใยมีขนาดสม่ำเสมอทั้งนี้อาจเนื่องจากสารละลายมีความหนืดน้อยลงและพอลิเมอร์ละลายในตัวทำละลายได้ดีขึ้น ส่งผลให้สารละลายยืดออกได้ง่าย นอกจากนี้เมื่อสารละลายมีความหนืดน้อยผลของแรงคูลอมบ์มากขึ้น ทำให้อายุของเส้นใยเล็กลงอีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามหากเป็นการสังเคราะห์เส้นใยทางชีวภาพ เช่น เอนไซม์ โปรตีน อุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจทำให้โครงสร้างและสมบัติบางประการสูญเสียไปได้

2.5.2.4 วัสดุรองรับ(collector) เนื่องจากกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิ่งต้องอาศัยสนามไฟฟ้าระหว่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับ ดังนั้นโหนดส่วนใหญ่วัสดุรองรับควรมีสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า เช่น แผ่นอลูมิเนียมบาง(aluminum foil) โดยเชื่อมต่อกับวัสดุรองรับกับกราวด์หรือขั้วลบของแหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง ซึ่งทำให้ความต่างศักย์ระหว่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับมีค่าคงที่ ดังนั้นหากวัสดุรองรับมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า ประจุบนลำของสารละลายจะสะสมบนวัสดุรองรับ ทำให้เส้นใยเกิดบนตัวรองรับน้อยลง อีกทั้งพบว่าเส้นใยมีการจับตัวกันหนาแน่นน้อยลงอีกด้วย ทั้งนี้เนื่องจากมีแรงผลักระหว่างประจุบนตัวรองรับที่ไม่นำไฟฟ้า และในบางครั้งแรงผลักระหว่างเส้นใยมีการก่อตัวขึ้นมาเป็นรูปร่างแบบ3มิติ แต่หากเลือกใช้ตัวรองรับที่นำไฟฟ้าเส้นใยจะจับตัวกันหนาแน่นมากกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อเส้นใยเกิดบนตัวรองรับที่นำไฟฟ้าหนาเกินไปจะมีประจุสะสมบนแผ่นเส้นใยมากขึ้นด้วย ดังนั้นถ้าเส้นใยไม่นำไฟฟ้าพบว่าแผ่นของเส้นใยจะมีลักษณะเป็นหลุม(dimple) กระจายอยู่

ลักษณะของวัสดุรองรับส่งผลต่อการระเหยของตัวทำละลายในเส้นใย วัสดุรองรับที่มีรูพรุนมากทำให้การระเหยของตัวทำละลายเกิดมากขึ้น ส่งผลให้แผ่นของเส้นใยจับตัวกันหนาแน่นน้อยกว่าการใช้ตัวรองรับที่มีผิวเรียบ นอกจากนี้หากตัวรองรับถูกทำให้เคลื่อนที่ได้สามารถทำให้เส้นใยมีการวางตัวอย่างเป็นระเบียบ และยังช่วยให้ตัวทำละลายระเหยได้ดีมากยิ่งขึ้น

2.5.2.5 ระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ(distance between tip and collector) เนื่องจากขนาดของเส้นใยขึ้นกับระยะเวลาการยืดออกของสารละลาย และแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้า ดังนั้นการปรับระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับจึงส่งผลต่อกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิ่ง ในกรณีที่ระยะห่างมีค่าน้อยเส้นใยจะปรากฏชัดหรือไม่ขึ้นอยู่กับสมบัติของสารละลายด้วย ใน

บางครั้งขนาดของเส้นใยไม่เปลี่ยนแปลงแม้ปรับระยะห่างแล้ว นอกจากนี้ยังพบบิดส์เกิดขึ้นในกรณี ที่ระยะห่างน้อย ซึ่งอาจเกิดเพราะผลของสนามไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นจากการที่วัสดุรองรับอยู่ใกล้ปลาย เข็ม ในกรณีที่ระยะห่างมีค่ามากขึ้นเส้นใยจะมีขนาดเล็กลงเพราะลำของสารละลายมีเวลาในการยึด ออกนานมากขึ้น แต่ในบางกรณีเมื่อเพิ่มระยะห่างแต่ขนาดของเส้นใยมีค่ามากขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมา จากสนามไฟฟ้ามีค่าน้อยลงทำให้แรงที่ทำให้สารละลายยึดออกนั้นน้อยลง และหากระยะห่างมาก เกินไปจะไม่เกิดเส้นใยขึ้นบนวัสดุรองรับ ดังนั้นการลดแรงจากสนามไฟฟ้า โดยการเพิ่มระยะห่าง เพื่อให้เส้นใยมีขนาดใหญ่มากขึ้น สามารถทำได้เพียงระดับหนึ่งเท่านั้น

2.5.2.6 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเข็มโลหะ(diameter of needle) ขนาดของเข็มที่ใช้ส่งผล ต่อกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงอยู่บ้าง โดยเข็มที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูภายในเล็กช่วยลด การอุดตันที่ปลายเข็ม เนื่องจากสารละลายสัมผัสกับอากาศน้อยกว่าเข็มที่มีรูขนาดใหญ่ อีกทั้งยังช่วย ให้ปริมาณบิดส์ต่อน้อยลงด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าถ้าขนาดของเข็มเล็กลงขนาดของเส้นใยจะเล็กลง ด้วย ทั้งนี้เนื่องจากความตึงผิวของหยดสารละลายมากขึ้นทำให้ระยะเวลาเส้นใยยึดออกก่อนตกลง บนวัสดุรองรับมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเข็มที่มีขนาดเล็กเกินไปอาจไม่สามารถทำให้สารละลาย ไหลออกมาได้

2.5.3 สภาพแวดล้อม มีผู้ศึกษาผลของปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมในระบบก่อนข้างน้อยโดยผลจาก สภาพแวดล้อมมีผลต่อสารละลาย และทำให้ลักษณะของเส้นใยเปลี่ยนไป เช่น ผลจากความชื้นใน ระบบ เป็นต้น

2.5.3.1 ความชื้น(humidity) ปริมาณความชื้นในอากาศอาจส่งผลต่อสารละลายพอลิเมอร์ได้ ในกรณีที่มีความชื้นสูงจะเกิดปรากฏการณ์คล้ายกับการควบแน่นเป็นหยดน้ำบนผิวของเส้นใย ทำให้ลักษณะของเส้นใยมีการเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะพอลิเมอร์ที่ละลายในตัวทำละลายที่ระเหยได้ ถ้าความชื้นในระบบมีค่าสูงจะทำให้เกิดรูพรุนบนเส้นใยในปริมาณที่มากขึ้น และเมื่อศึกษาเส้น ใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบอะตอมมิกฟอรัซ(atomic force microscope, AFM) พบว่ารู พรุนเล็กลงไปในเส้นใยมากขึ้นด้วย ในทางตรงกันข้ามหากระบบมีความชื้นต่ำจะส่งผลให้ตัวทำ ละลายระเหยเร็วขึ้น ในบางครั้งสารละลายอาจแข็งตัวอย่างรวดเร็วและอุดตันอยู่ภายในเข็มโลหะ ทำให้กระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงดำเนินต่อไปไม่ได้

2.5.3.2 ชนิดของบรรยากาศ (type of atmosphere) ส่วนประกอบของอากาศภายในระบบ ส่งผลต่อกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง โดยก๊าซต่างชนิดกันจะมีพฤติกรรมต่างกันออกไปภายใต้ สภาพที่มีสนามไฟฟ้าสูง ยกตัวอย่างเช่น กรณีของก๊าซซีเลียมจะแตกตัวภายใต้สภาพสนามไฟฟ้าสูง ส่งผลให้กระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงไม่เกิดขึ้น แต่หากใช้ก๊าซที่แตกตัวได้ยากขึ้น เช่น ฟรีออน 12 (Freon - 12) พบว่ากระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงเกิดได้ โดยเส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้น 2 เท่าเมื่อ เปรียบเทียบกับการสังเคราะห์ในสภาพอากาศปกติ

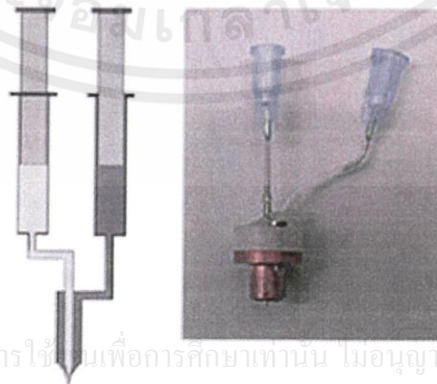
2.5.3.3 ความดัน (pressure) หากทำการสังเคราะห์เส้นใยนาโนภายในระบบปิด โดยปกติจะพบว่า ถ้าความดันภายในระบบลดลงไม่มีผลให้กระบวนการอิเล็กโตรสปินนิ่งดีขึ้น ในกรณีที่ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศส่งผลให้สารละลายไหลออกจากหลอดที่ใช้บรรจุมากขึ้น ทำให้ลำสารละลายที่พุ่งออกมาไม่เสถียร นอกจากนี้ที่บริเวณปลายเข็ม โลหะอาจพบว่าสารละลายพองแล้วแตก และหากความดันภายในระบบต่ำมากๆ พบว่ากระบวนการอิเล็กโตรสปินนิ่งไม่เกิดขึ้น เนื่องจากประจุไฟฟ้ามีการคายประจุโดยตรง (direct discharge) ภายในระบบ

2.6 Electrospinning ขั้นสูง

ระบบ Electrospinning ขั้นสูงนี้ได้แก่ Electrospinning แบบร่วมแกน (coaxial electrospinning, Coax-ES) Electrospinning แบบหลอมละลาย (melt-electrospinning, Melt-ES) อิเล็กโตรสปินนิ่งแบบสนามใกล้ (near-field electrospinning, NF-ES) และ Electrospinning แบบใช้สนามแม่เหล็กร่วม (magneto-electrospinning, Magneto-ES)

2.6.1 อิเล็กโตรสปินนิ่งแบบร่วมแกน (Coaxial-Electrospinning)

ในการทำให้เส้นใยนาโนมีหน้าที่หรือสมบัติพิเศษเฉพาะตัว (functionalization) โดยการรวมเอาโมเลกุล สาร วัสดุหรือส่วนประกอบอื่น (โดยเฉพาะในด้านเทคโนโลยีเช่น เซอร์วิสกรรมเนื้อเยื่อ การนำส่งยา และนาโนอิเล็กทรอนิกส์) เข้ากับเส้นใยนาโน ในหลายกรณีไม่สามารถทำได้โดยใช้เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิ่งอย่างง่าย ทั้งนี้เนื่องจากมีปัญหาที่สำคัญอยู่ 2 ประการ คือ หนึ่ง ปัญหาความต้องการในการเก็บสารที่อยู่ร่วมกับเส้นใยนาโน (เช่น โมเลกุลชีวภาพ ได้แก่ เอนไซม์ โปรตีน ยา ไวรัส และแบคทีเรีย) ในสภาวะแวดล้อมของเหลว เพื่อที่จะคงสภาพหน้าที่หรือสมบัติเดิมของมันนั้นทำได้ยาก สอง ปัญหาเรื่องน้ำหนักโมเลกุลของวัสดุที่จะใช้เป็นส่วนแกนในของเส้นใย (core fiber) ซึ่งส่วนมากจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำมาก ทำให้การทำเส้นใยโดยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิ่งเป็นไปได้ยาก อย่างไรก็ตามปัญหาทั้งสองข้อนี้สามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้เทคนิค “อิเล็กโตรสปินนิ่งแบบร่วมแกน” ซึ่งในปัจจุบันได้เริ่มมีการศึกษาและรายงานการวิจัยทางด้านนี้แล้วจากหลากหลายกลุ่มวิจัย

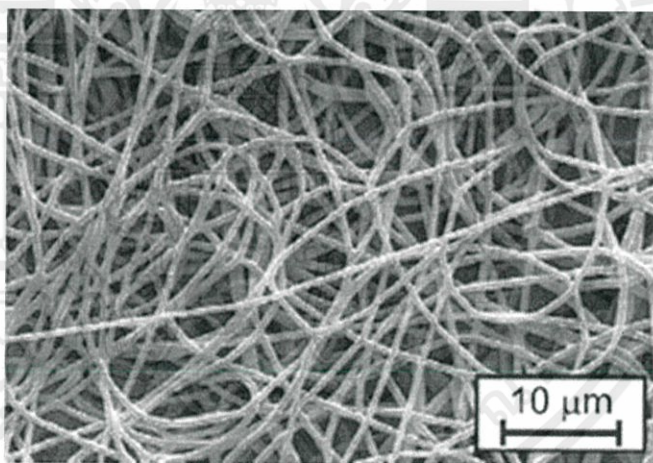


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ รูปที่ 2.2 (ซ้าย) แผนภาพการจัดระบบหัวฉีดสำหรับอิเล็กโตรสปินนิ่งแบบร่วมแกน(ขวา)

ระบบหัวฉีดสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ

2.6.2 Electrospinning แบบหลอมละลาย (Melt-Electrospinning)

Electrospinning แบบหลอมละลายเป็นการประดิษฐ์เส้นใยนาโนด้วยเทคนิค Electrospinning จากพอลิเมอร์ที่หลอมละลายโดยไม่ใช้ตัวทำต้งนั้น ข้อดีของการประดิษฐ์เส้นใยนาโนแบบนี้คือเป็นกระบวนการเตรียมเส้นใยที่ง่ายกำลังการผลิตสูงต้นทุนต่ำและช่วยลดความเสี่ยงจากการได้รับสารพิษจากตัวทำละลาย จึงเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างดี เหมาะที่จะใช้ในการเตรียมเส้นใยนาโนสำหรับประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ อย่างไรก็ตาม Electrospinning แบบหลอมละลายนี้มีข้อจำกัดตรงที่เส้นใยที่เตรียมมีขนาดใหญ่และยังไม่สามารถเตรียมเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 400 นาโนเมตรและมีการกระจายตัวที่แคบได้ มีการใช้ Electrospinning แบบหลอมละลายนี้ในการเตรียมเส้นใยพอลิเมอร์แล้วหลายชนิดได้แก่ polyethylene (PE), polypropylene (PP), polyamide 12 (PA12), poly(ethylene terephthalate) (PET), polycaprolactone (PCL), polyurethane (PU) และ poly(ethylene glycol)-block-poly(?-caprolactone) ตัวอย่างของเส้นใย polypropylene (melt flow index (MFI) = 15 cm³/10 min) ที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 13.5 - 1.7 ไมโครเมตร เตรียมโดย Electrospinning แบบหลอมละลาย โดยใช้เงื่อนไขที่อุณหภูมิ 270 °C อัตราการไหลของของเหลวที่ 0.05 มิลลิลิตร/ชั่วโมง และระยะห่างระหว่างตัวรองรับกับปลายเข็ม 4 เซนติเมตร (รูปที่ 2.2)

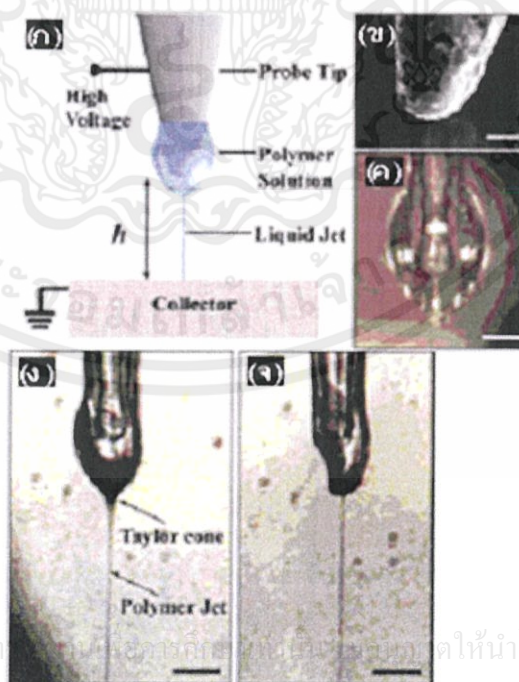


รูปที่ 2.3 เส้นใย polypropylene (melt flow index (MFI) = 15 cm³/10 min) ที่เตรียมโดย melt-Electrospinning โดยใช้เงื่อนไขที่อุณหภูมิ 270 °C อัตราการไหลของของเหลวที่ 0.05 มิลลิลิตร/ชั่วโมง และระยะห่างระหว่างตัวรองรับกับปลายเข็ม 4 เซนติเมตร

2.6.3 Electrospinning แบบสนามใกล้ (Near-Field Electrospinning)

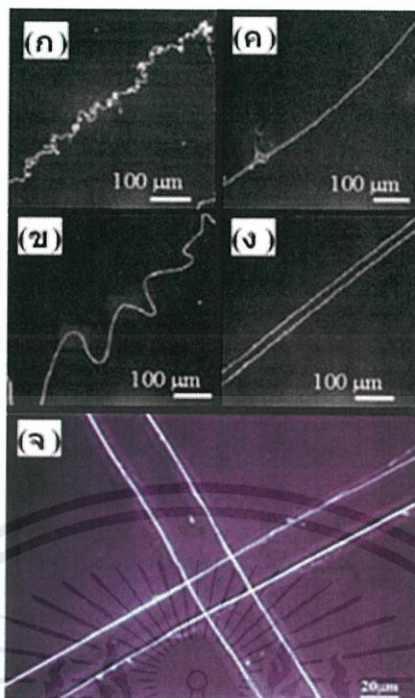
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเชิงพาณิชย์ การตีพิมพ์ซ้ำโดยไม่ขออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เทคนิค Electrospinning แบบสนามใกล้ มีการรายงานขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Sun และคณะแห่งมหาวิทยาลัย Xiamen ประเทศจีน งานวิจัยนี้เป็นการค้นพบนวัตกรรมใหม่ระดับ breakthrough ของการวิจัยทางด้าน Electrospinning เพื่อประดิษฐ์เส้นใยนาโนของแข็งในรูปแบบที่สามารถกระทำ/

เขียนเป็นเส้นได้โดยตรง โดยที่เส้นใยมีความต่อเนื่อง และสามารถควบคุมการเกิด/จัดเรียงตัวของเส้นใยนาโนได้อย่างแม่นยำ เทคนิคนี้แตกต่างจากเทคนิคElectrospinning แบบมาตรฐาน (ดั้งเดิม) ซึ่งเป็นกระบวนการที่เส้นใยนาโนเกิดขึ้นแบบสุ่มและไม่เป็นระเบียบ เทคนิคElectrospinning แบบสนามใกล้แสดงเป็นแผนภาพดังในรูปที่ 2.3 ในกระบวนการElectrospinning แบบสนามใกล้ ปลายของเข็มทั้งสองเสตนัน (เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ25ไมโครเมตร)ถูกใช้เป็นอิเล็กโตรดและจุ่มลงไป ในสารละลายพอลิเมอร์เพื่อให้เกิดหยดของสารละลายพอลิเมอร์ติดอยู่ที่ปลายของทั้งสองซึ่งเชื่อมกับส่วนของแหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง พบว่า หากสนามไฟฟ้ามีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดแรงผลักมากกว่าแรงตึงผิว จะส่งผลให้รูปร่างครึ่งทรงกลมของสารละลายที่อยู่ปลายทั้งสองเสตนันยืดออกเป็นรูปร่างทรงกรวย เรียกว่ากรวยของเทเลอร์และเมื่อสนามไฟฟ้าที่ให้กับระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่งจะเกิดแรงขับเคลื่อนให้สารละลายพอลิเมอร์พุ่งออกมาเป็นลำ ต่อมาลำของสารละลายนี้จะยืดออกจนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงถึงระดับนาโนเมตร แล้วตกลงบนวัสดุรองรับที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็วซึ่งจะทำให้ได้เส้นใยที่มีความต่อเนื่อง และสามารถควบคุมการเกิดและจัดเรียงตัวของเส้นใยนาโนได้อย่างแม่นยำ จะเห็นว่ากระบวนการที่เกิดขึ้นจะมีความคล้ายกับเทคนิคElectrospinning แบบดั้งเดิมดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนแรก ต่างกันที่แผ่นรองรับจะอยู่ใกล้ปลายเข็มมากจึงสามารถใช้ศักย์ไฟฟ้ากำลังต่ำขนาดประมาณ 600 โวลต์เท่านั้นซึ่งต่างจากเทคนิคElectrospinning แบบดั้งเดิมที่ต้องใช้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงขนาด 10-50 กิโลโวลต์ ในกระบวนการประดิษฐ์เส้นใย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกสิ่งเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงเทคนิคElectrospinning แบบสนามใกล้



รูปที่ 2.5 เส้นใย polyethylene oxide, PEO (เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 300 นาโนเมตร) ประดิษฐ์ด้วยเทคนิค Electrospinning แบบสนามไกล โดยเส้นใยรองรับบนแผ่นซิลิกอนและระบบรองรับเส้นใยเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วแตกต่างกัน:

- (ก) 5 เซนติเมตร/วินาที
- (ข) 10 เซนติเมตร/วินาที
- (ค) 15 เซนติเมตร/วินาที
- (ง) 20 เซนติเมตร/วินาที
- (จ) 25 เซนติเมตร/วินาที

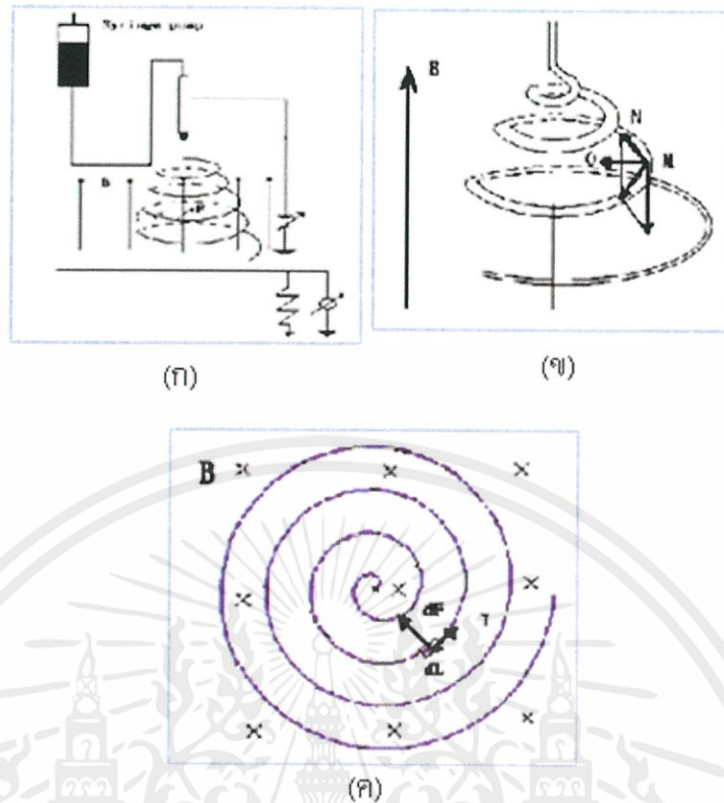
โดยใช้ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดกับแผ่นรองรับเท่ากับ 1 มิลลิเมตร ศักย์ไฟฟ้ากำลังต่ำขนาด 1000 V และสารละลาย PEO ความเข้มข้น 5 wt %

2.6.4 Electrospinning แบบใช้สนามแม่เหล็กร่วม (Magneto-Electrospinning)

พิจารณา ระบบ Electrospinning แบบใช้สนามแม่เหล็กร่วมดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยที่ในรูปที่ 2.6 (ก) แสดงผลของสนามแม่เหล็กต่อระบบ Electrospinning จากรูปกระแสไฟฟ้า ในลำพอลิเมอร์ เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ (magnetic field induction) จะเกิดแรงแอมแปร์ (Ampere force) ที่กระทำบนการกระจัด ของเส้นใย ตามสมการ

$$dF = Id L \times B$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ผลของสนามแม่เหล็กต่อระบบ Electrospinning

- (ก) ระบบ Electrospinning เมื่อมีสนามแม่เหล็ก
- (ข) การวิเคราะห์แรงต่างๆที่เกิดขึ้นในระบบ Electrospinning เมื่อมีสนามแม่เหล็ก
- (ค) แรงแอมแปร์ ในระบบ Electrospinning ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก

2.7 สเตปป์มอเตอร์ (Stepping Motor)

สเตปป์มอเตอร์เป็นอุปกรณ์แอต์พุตอย่างหนึ่ง ซึ่งสามารถนำไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์มาทำการควบคุมได้สะดวก และเป็นมอเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในงานควบคุมการหมุนที่ต้องการตำแหน่ง และทิศทางที่แน่นอน การทำงานของ สเตปป์มอเตอร์จะขับเคลื่อนทีละขั้นๆ ละ (Step) 0.9, 1.8, 5, 7.5, 15 หรือ 50 องศา ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติแต่ละชนิดของสเตปป์มอเตอร์ตัวนั้นๆ สเตปป์มอเตอร์จะแตกต่างจากมอเตอร์กระแสตรงทั่วไป (DC MOTOR) โดยการทำงาน

ของมอเตอร์กระแสตรงจะหมุนไปแบบต่อเนื่อง ไม่สามารถหมุนเป็นแบบสเตปๆ ได้ ดังนั้นในการนำไปกำหนดตำแหน่งจึงควบคุมได้ยากกว่า แต่ในส่วนใหญ่เราจะใช้สเตปป์มอเตอร์มาทำการการ

ควบคุมโดยใช้วิธีในระบบดิจิทัล เช่น พรินเตอร์ (Printer) พล็อตเตอร์ (X-Y Plotter) ดิสก์ไดรฟ์ (Disk drive) ฯลฯ

2.7.1 ข้อดีของสเตปป์มอเตอร์เมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์กระแสตรง (DC MOTOR)

2.7.1.1 การควบคุมไม่ต้องอาศัยตัวตรวจจับการหมุน

2.7.1.2 ไม่ต้องใช้แปรงถ่าน ดังนั้นจึงทำให้ไม่มีส่วนที่จะต้องสึกหรอ และปัญหาของการสปาร์ก(ที่เกิดจากหน้าสัมผัสของแปรงถ่านแหวนตัวนำในโรเตอร์) ที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวน

2.7.1.3. การควบคุมโดยทางวงจรดิจิทัลหรือไม่โครโพรเซสเซอร์ทำได้ง่าย และสะดวก



รูปที่ 2.7 สเตปป์มอเตอร์

2.7.2 สเตปมอเตอร์ที่พบในปัจจุบันมี 3 ลักษณะดังนี้

2.7.2.1 แบบแม่เหล็กถาวร (PERMANENT MAGNET-PM)

สเตปมอเตอร์แบบ PM จะมีสเตเตอร์ (STATOR) ที่พันขดลวดไว้หลายๆ โพล โดยมีโรเตอร์ (ROTOR) เป็นรูปทรง กระบอกฟันเลื่อย และโรเตอร์ทำด้วยแม่เหล็กถาวร เพื่อป้อนไฟกระแสตรงให้กับขดสเตเตอร์ จะทำให้เกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้าผลักต่อโรเตอร์ ทำให้มอเตอร์หมุนมอเตอร์แบบ PM จะเกิดแรงดูดยึดให้โรเตอร์หยุดอยู่กับที่ แม่จะไม่ได้อ้อนไฟเข้าขดลวด

2.7.2.2 แบบแปรค่ารีลักแตนซ์ (VARIABLE RELUCTANCE- VR)

สเตปมอเตอร์แบบ VR จะมีการหมุนโรเตอร์ได้อย่างอิสระแม้จะไม่ได้จ่ายไฟให้โรเตอร์ทำจากสารเฟอร์โรแมกเนติกกำลังอ่อน มีลักษณะเป็นฟันเลื่อยรูปทรงกระบอกโดยจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับจำนวนโพลในสเตเตอร์ แรงบิดที่เกิดขึ้นจะไปหมุนโรเตอร์ ไปในเส้นทางของอำนาจแม่เหล็กที่มีค่ารีลักแตนซ์ต่ำที่สุด ตำแหน่งที่จะเกิดแน่นอนและมีเสถียรภาพแต่จะเกิดขึ้นได้หลายๆ จุด ดังนั้นเมื่อป้อนไฟเข้าขดลวดต่างๆ ในมอเตอร์แตกต่างกันไป ก็ทำให้มอเตอร์ หมุนไปตำแหน่งต่างๆ กัน โรเตอร์ของ VR จะมีความถี่ของโรเตอร์น้อยจึงมีความเร็วรอบสูงกว่ามอเตอร์แบบ PM

2.7.2.3 แบบผสม (HYBRID-H)

สเตปมอเตอร์แบบ H จะเป็นลูกผสมของ VR กับ PM โดยจะมีสเตเตอร์คล้ายกับที่ใช้ใน VR โรเตอร์มีหมวกหุ้ม ปลายซึ่งมีลักษณะของสารแม่เหล็กที่มีกำลังสูง โดยการควบคุมขนาดรูปร่างของหมวกแม่เหล็กอย่างดีทำให้ได้มุม การหมุนและครั้งน้อยและแม่นยำ ข้อดีก็คือ ให้แรงบิดสูงและมีขนาดกะทัดรัด และให้แรงจูงยึดโรเตอร์นิ่งกับที่ตอนไม่จ่ายไฟ

2.7.3 การพันขดลวดบนสเตเตอร์ของสเตปมอเตอร์

2.7.3.1 แบบ Bipolar

จะมีการพันขดลวดหนึ่งขด(จะกี่รอบก็แล้วแต่ สเปกใช้งานนะครับ)ในแต่ละขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ โดยขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ที่สเตเตอร์จะถูกกำหนดโดยทิศทางของการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งสามารถทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กในทิศทางตรงกันข้ามได้เพียง การกลับทิศทางของการไหลในกระแสไฟฟ้า โดยมาจากการควบคุมของวงจรสวิตซ์ซึ่งให้กลับขั้วไฟฟ้า

2.7.3.2 แบบ Unipolar

แบบนี้มี 2 ขด บนแต่ละขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ ทำให้แต่ละขดลวดเกิดขั้วแม่เหล็กในทิศทางตรงกันข้าม เช่นกันรับการกลับทิศทางขั้วแม่เหล็กทำได้โดยใช้วงจรสวิตซ์ซึ่งให้สลับหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่งแทนกันแต่ละครั้ง

2.7.4 วิธีการขับสเตปมอเตอร์ให้หมุนโดยการกระตุ้นเฟส

ในการควบคุมสเตปมอเตอร์เพื่อที่จะให้ทำการหมุน มีวิธีการควบคุมกระแสไฟที่จ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์ (Stator) ในแต่ละเฟสของสเตปมอเตอร์ อย่างเป็นลำดับที่แน่นอน โดยถ้าหากเราต้องการให้กระแสไหลในเฟสใดๆ ก็จะทำให้สถานะของเฟสนั้นๆ เป็นสถานะลอจิก "1" และในการกระตุ้นเฟสของสเตปมออยู่วัยกัน 2 แบบคือ

2.7.4.1 การกระตุ้นเฟส แบบฟูลสเตปมอเตอร์ (Full Step Motor) ยังสามารถแบ่งการกระตุ้นเฟสออกได้เป็นอีก 2 วิธีด้วยกันคือ

1) การกระตุ้นเฟสแบบฟูลสเตป1 เฟส (Single-Phase Driver) หรือแบบเวฟ แสดงดังตารางรูป 2.8 จะเป็นการป้อนกระแสไฟให้กับขดลวด ของสเตปมอเตอร์ทีละขด โดยจะป้อนกระแสเรียงตามลำดับกันไป ดังนั้นกระแส ที่ไหลในขดลวด จะทำการไหลในทิศทางเดียวกันทุกขด ลักษณะเช่นนี้จึงทำให้แรงขับของสเตปมอเตอร์มีน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แบบฟูลสเตป1 เฟส

สเตปที่	เฟสที่ 1	เฟสที่ 2	เฟสที่ 3	เฟสที่ 4	เฟสที่ 5
1	1	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0
3	0	0	1	0	0
4	0	0	0	1	0
5	0	0	0	0	1

2) การกระตุ้นเฟสแบบฟูลสเตป2 เฟส (Two-Phase Driver) แสดงดังตารางรูป 2.9 เป็นการป้อนกระแสให้กับขดลวด 2 ขด ของสเตปปี้งมอเตอร์พร้อมๆกันไป และจะกระตุ้นเรียงถัดกันไป เช่นเดียวกับแบบหนึ่งเฟส ดังนั้นการกระตุ้นแบบนี้จึงต้องใช้กำลังไฟมากขึ้น และจะทำให้มีแรงบิดของมอเตอร์มากกว่าการกระตุ้นแบบ 1 เฟส

ตารางที่ 2.2 แบบฟูลสเตป2เฟส

สเตปที่	เฟสที่ 1	เฟสที่ 2	เฟสที่ 3	เฟสที่ 4	เฟสที่ 5
1	1	1	0	0	0
2	0	1	1	0	0
3	0	0	1	1	0
4	0	0	0	1	1
5	1	0	0	0	1

2.7.4.2 การกระตุ้นเฟส แบบฮาล์ฟสเตป (Half Step Motor) หรือ one-two phase Driver คือ การกระตุ้นเฟสแบบ ฟูลสเตป1 เฟส และ 2 เฟส เรียงลำดับกันไป แรงบิดที่ได้จากการกระตุ้นเฟสแบบนี้จะมีเพิ่มมากขึ้น เพราะช่วงของสเตปมีระยะสั้นลง ในการกระตุ้นแบบนี้ เราจะต้องมีการกระตุ้นที่เฟสถึง 2 ครั้ง จึงจะได้ระยะของ สเตปเท่ากับการกระตุ้นเพียงครั้งเดียว ของแบบฟูลสเตป2 แบบแรก ความละเอียดของการหมุนตำแหน่งองศาต่อสเตป ก็เป็นสองเท่าของแบบแรก ความถูกต้องของตำแหน่งที่กำหนดจึงมีมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 แบบฮาล์ฟสเตป 2 เฟส

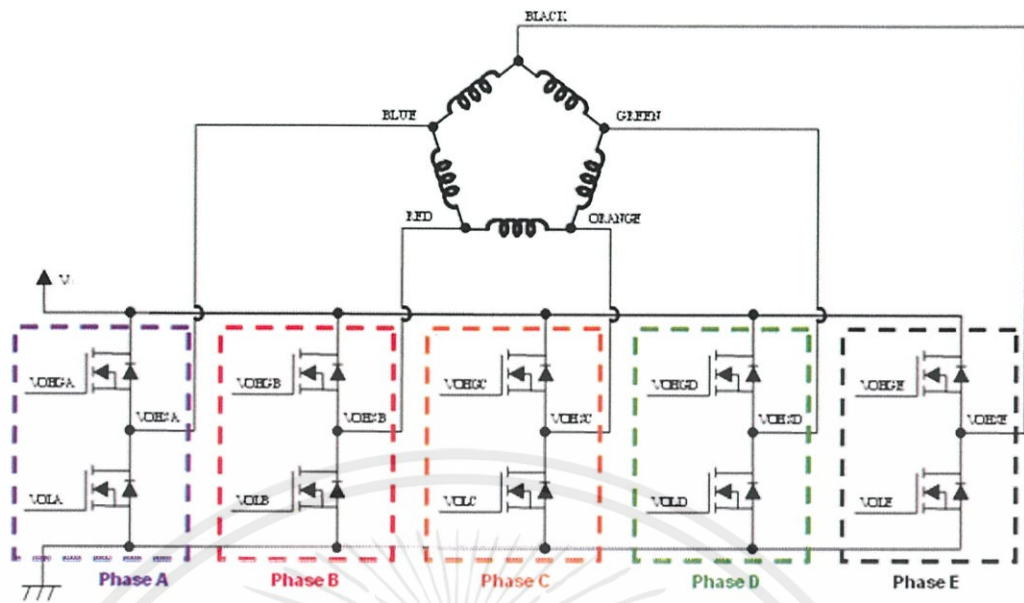
สเตปที่	เฟสที่ 1	เฟสที่ 2	เฟสที่ 3	เฟสที่ 4	เฟสที่ 5
1	1	0	0	0	0
2	1	1	0	0	0
3	0	1	0	0	0
4	0	1	1	0	0
5	0	0	1	0	0
6	0	0	1	1	0
7	0	0	0	1	0
8	0	0	0	1	1
9	0	0	0	0	1
10	1	0	0	0	1

2.8 สเตปปีงมอเตอร์ 5 เฟส (Stepping Motor 5 phase)

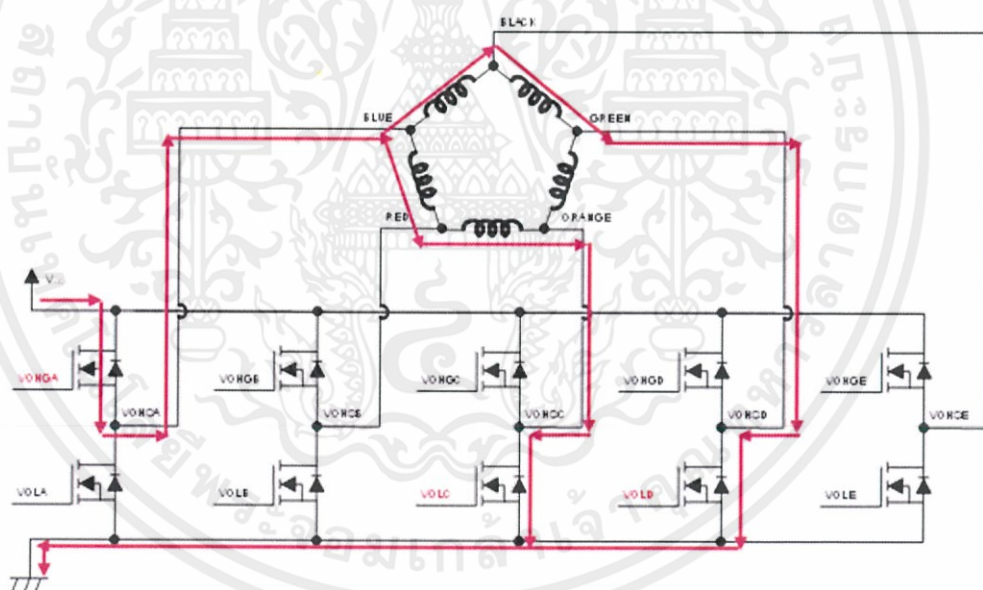
ตารางที่ 2.4 ขั้วสเตปปีงมอเตอร์ 5 เฟส แบบ Full Step

step	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
VOHGA	H	H	L	L	L	L	L	L	L	H
VOHGB	L	H	H	H	L	L	L	L	L	L
VOHGC	L	L	L	H	H	H	L	L	L	L
VOHGD	L	L	L	L	L	H	H	H	L	L
VOHGE	L	L	L	L	L	L	L	H	H	H
VOLA	L	L	L	L	H	H	H	L	L	L
VOLB	L	L	L	L	L	L	H	H	H	L
VOLC	H	L	L	L	L	L	L	L	H	H
VOLD	H	H	H	L	L	L	L	L	L	L
VOLE	L	L	H	H	H	L	L	L	L	L
CW	→									
CCW	←									

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

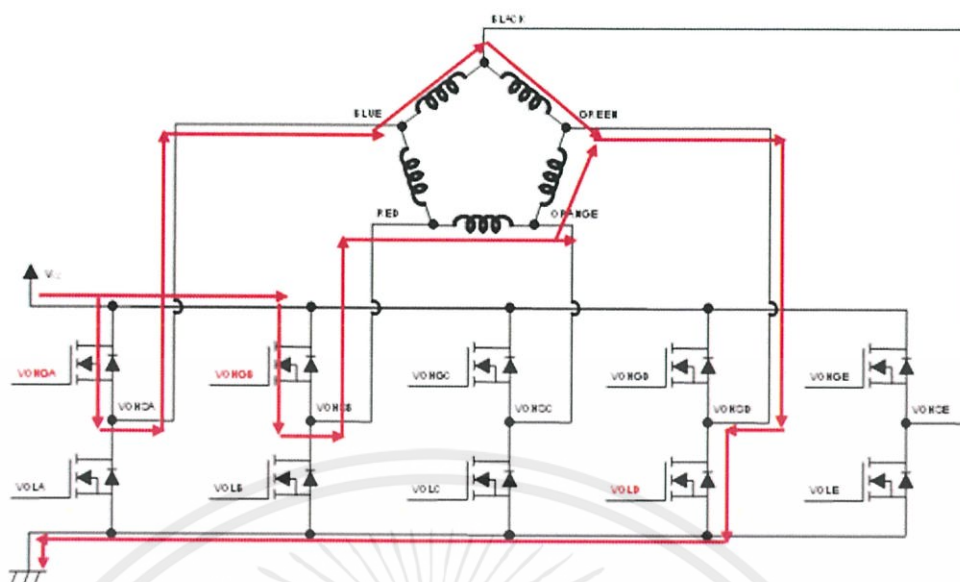


รูปที่ 2.8 แผนภาพวงจร Pentagon driver

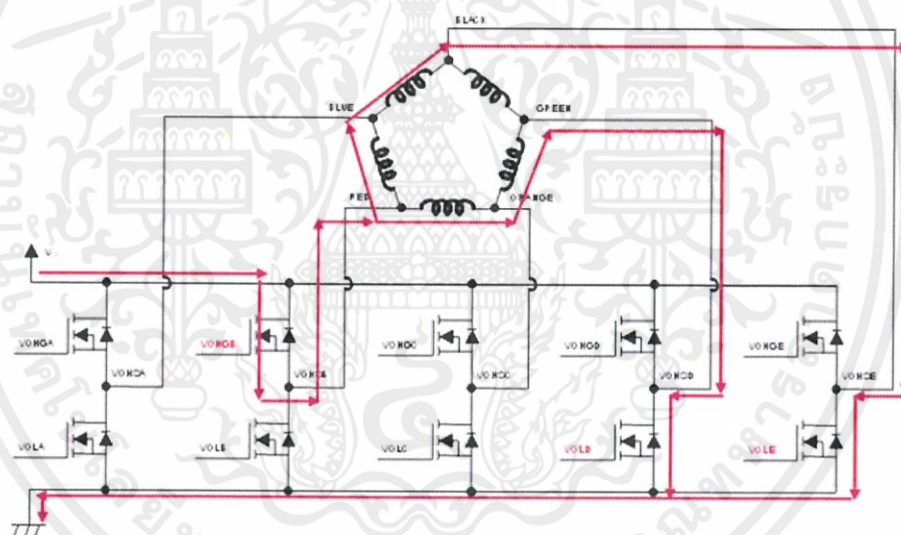


รูปที่ 2.9 การไหลของกระแส สเต็ปที่ 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 การไหลของกระแส สเตปที่ 1



รูปที่ 2.11 การไหลของกระแส สเตปที่ 2

2.9 Taguchi methods: orthogonal arrays

วิธีการ Taguchi คือ วิธีการลดจำนวนครั้งของการทดลองโดยจะทำการกำหนด orthogonal arrays จากตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อผลการทดลอง เช่น ขนาดหัวเข็มความตักยัดอัตราเร็ว และรัศมีไม่ว่ากรณีใดก็ตาม หลังจากนั้นก็กำหนดระดับของตัวแปรที่มีอิทธิพลตามที่ต้องการ ซึ่งตัวแปรเหล่านั้นสามารถจะเปลี่ยนแปลงภายในระดับ และสามารถควบคุมได้ง่าย ซึ่งการเพิ่มจำนวนของระดับตัว

แปรนั้นจะทำให้จำนวนครั้งของการทดลองเพิ่มขึ้น เพื่อใช้ในการทำนายผลการทดลองทั้งหมดที่สามารถเป็นไปได้ในทุกๆกรณี หลังจากนั้นจะสามารถเลือกผลที่ดีที่สุดจากการทำนายในตอนสุดท้ายได้

ซึ่งการเลือก orthogonal arrays นั้นจะเลือกจากจำนวนตัวแปร และจำนวนระดับของตัวแปร ตามรูปที่ 2.12 ทำการดำเนินการทดลองตาม orthogonal arrays เพื่อที่จะรวบรวมข้อมูลที่สามารถส่งผลกระทบต่อผลการทดลอง จากนั้นนำข้อมูลมาคำนวณเพื่อหาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ โดยการคำนวณ SN (the signal-to-noise ratio) จากผลที่ได้ซึ่ง

$$SN_i = 10 \log \frac{\bar{y}_i^2}{s_i^2}$$

โดยที่ \bar{y}_i คือ ค่าเฉลี่ยของแต่ละการทดลอง

S_i คือ ค่าความแปรปรวน

I คือ ลำดับการทดลอง

จากนั้นนำ SN ที่ได้ไปคำนวณตามสมการ ตามรูปที่ 2.13 แล้วจึงนำผลที่ได้ไปใส่ในรูปที่ 2.14 แล้วจึงนำ SN แต่ละตัวแปรที่มีค่ามากที่สุดลบด้วย SN ที่มีค่าน้อยที่สุด ผลต่างของตัวแปรไหนมากที่สุดจะมีอิทธิพลสูงสุด

Experiment	P1	P2	P3	P4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

รูปที่ 2.12 ตัวอย่าง orthogonal arrays L9

$$SN_{P3,1} = \frac{(S_{N1} + S_{N6} + S_{N8})}{3}$$

$$SN_{P3,2} = \frac{(S_{N2} + S_{N4} + S_{N9})}{3}$$

$$SN_{P3,3} = \frac{(S_{N3} + S_{N5} + S_{N7})}{3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และข้อมูลอื่นใดในเอกสารฉบับนี้ไปเผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

Experiment Number	P1	P2	P3	P4	Sn
1	1	1	1	1	SN1
2	1	2	2	2	SN2
3	1	3	3	3	SN3
4	2	1	2	3	SN4
5	2	2	3	1	SN5
6	2	3	1	2	SN6
7	3	1	3	2	SN7
8	3	2	1	3	SN8
9	3	3	2	1	SN9

รูปที่ 2.13 การคำนวณหาค่าอิทธิพลสูงสุด

Level	P1	P2	P3	P4
1	SNP1,1	SNP2,1	SNP3,1	SNP4,1
2	SNP1,2	SNP2,2	SNP3,2	SNP4,2
3	SNP1,3	SNP2,3	SNP3,3	SNP4,3
Δ	RP1	RP2	RP3	RP4
Rank

รูปที่ 2.14 ตารางสรุปผลตัวแปรที่มีอิทธิพลสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ขั้นตอนการผลิตเส้นใยนาโน

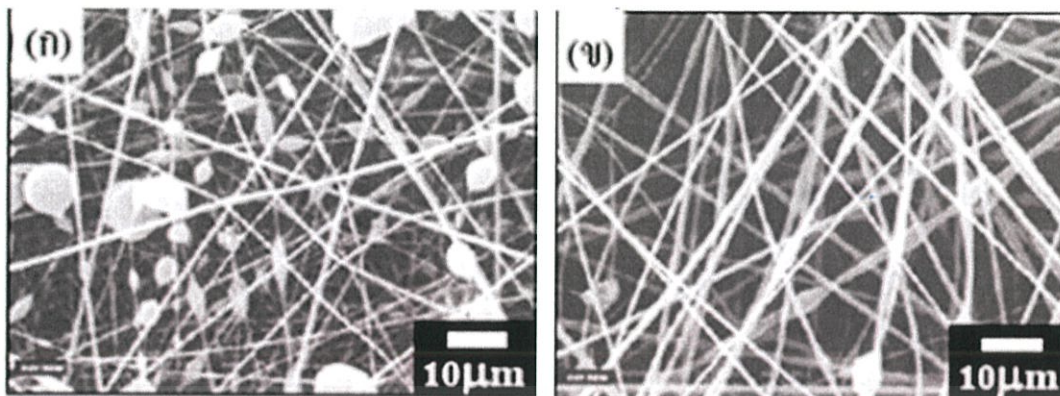
เส้นใยที่ประดิษฐ์ได้มีหลายลักษณะ หลายรูปแบบ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตลอดจนความต่อเนื่องของเส้นใยแตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อลักษณะเส้นใยได้เป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

3.1.1 ตัวแปรด้านสารละลาย สมบัติของสารละลายเป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อการประดิษฐ์เส้นใยนาโนอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งขนาดและรูปร่างของเส้นใย เช่น ความมั่งคั่งผิวของสารละลายจะส่งผลกระทบต่อการเปิดรูค้ำยูกักปิด (beads) ซึ่งมีลักษณะเป็นก้อนทรงกลมหรือรีอยู่บนเส้นใย หากความเข้มข้นของสารละลายมีค่าสูงจะมีผลทำให้ปริมาณรูค้ำยูกักปิดลดลง ดังตัวอย่างการประดิษฐ์เส้นใยนาโนจากสารละลาย PAN/DMF สำหรับนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมเส้นใยนาโนคาร์บอน (carbon nanofiber) และระบบกรองอย่างละเอียด ในรูปที่ 1

3.1.2 ตัวแปรในระบบ เป็นปัจจัยที่สำคัญมากอีกกลุ่มหนึ่งประกอบด้วย ความต่างศักย์ไฟฟ้า อัตราการไหลของสารละลาย อุณหภูมิของสารละลาย ชนิดของวัสดุรองรับ ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มโลหะ ตัวแปรเหล่านี้ล้วนมีผลต่อลักษณะของเส้นใย โดยเฉพาะความต่างศักย์ไฟฟ้าซึ่งส่วนใหญ่หากความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบมีค่ามากจะส่งผลให้ขนาดของเส้นใยเล็กลง ดังรูปที่ 2 จะเห็นว่าที่ความเข้มข้นเดียวกันขนาดของเส้นใยจากสารละลาย PAN/DMF จะลดลงเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น

3.1.3 สภาพแวดล้อม สภาพแวดล้อมมีผลต่อสารละลายและทำให้ลักษณะของเส้นใยเปลี่ยนไป เช่น ในกรณีที่มีความชื้นในระบบสูงจะเกิดปรากฏการณ์คล้ายกับมีการควบแน่นเป็นหยดน้ำบนผิวของเส้นใย ทำให้เกิดรูพรุนบนเส้นใยในปริมาณมากขึ้น

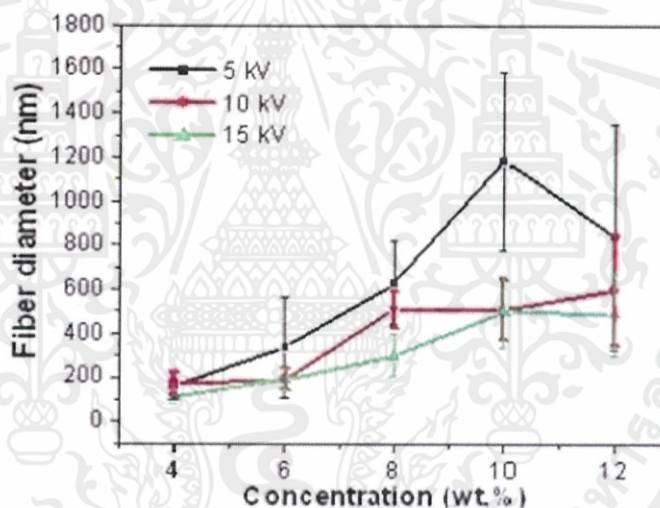
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 เส้นใยนาโนของ polycrylonitrile (PAN) ละลายใน dimethylformamide (DMF)

(ก) ความเข้มข้น 6%

(ข) 10% แสดงให้เห็นว่าปริมาณปุ่มคล้ายลูกปัดลดลงเมื่อสารละลาย มีความเข้มข้นสูงขึ้น



รูปที่ 3.2 ขนาดของเส้นใยที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ ของสารละลายพอลิเมอร์ PAN/DMF เมื่อใช้ความต่างศักย์ 5, 10 และ 15 kV

ดังนั้นการนำวิธีอิเล็กโตรสปินนิงมาใช้ประดิษฐ์เส้นใยนาโนต้องคำนึงถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด เพื่อให้ได้เส้นใยที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้ ซึ่งหากมีระบบที่ควบคุมปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ได้อย่างสะดวกและแม่นยำจะส่งผลให้การประดิษฐ์เส้นใยมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่

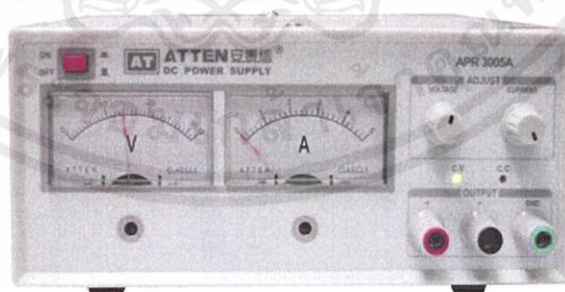
3.2.1 แหล่งจ่ายไฟ

3.2.1.1 High Voltage Power Supply ใช้ป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับสารละลายโดยเราใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงสัณยสูง



รูปที่ 3.3 High Voltage Power Supply

3.2.1.2 DC Power Supply ใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับ Step motor



รูปที่ 3.4 DC Power Supply

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ส่วนควบคุม

3.2.2.1 Step Motor 5 Phase ของบริษัท Vexta รุ่น PH544-NA 0.72°/Step DC 0.75 A พร้อมแท่นวางซึ่งทำด้วยพลาสติกเพื่อหลีกเลี่ยงการลัดวงจรของไฟฟ้าสัคย์สูง ใช้เป็นตัวควบคุมอัตราการฉีดสารละลายของ Syringe



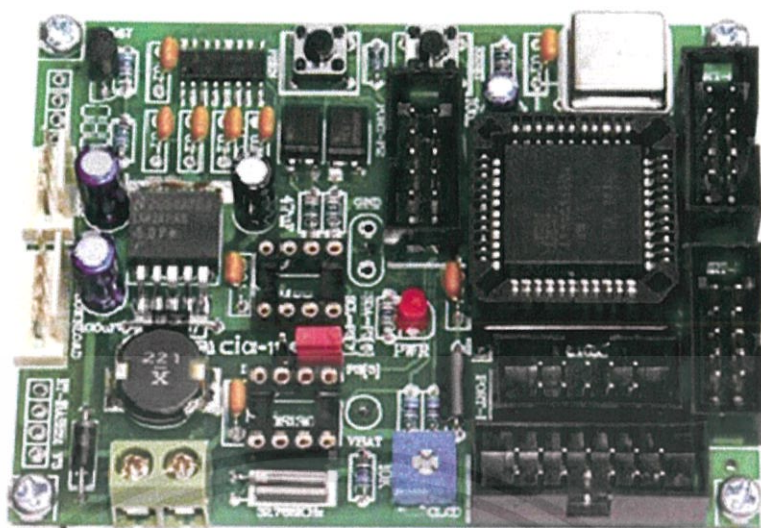
รูปที่ 3.5 Step Motor 5 Phase

3.2.2.2 Driver Step Motor 5 Phase ใช้เป็นตัวขับ Step Motor 5 Phase

3.2.2.3 Microcontroller ET.BASE51 V3.0 ใช้เป็นตัวควบคุม Step motor

เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล MCS51 ขนาด PLCC-44 Pin ซึ่งเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ AT89C51ED2 ของ ATMEL เป็น MCU ประจำบอร์ด โดย MCU รุ่นนี้จะบรรจุอยู่ในตัวถังแบบ PLCC-44 โดย MCU ตัวนี้มีจุดเด่น คือ เรื่องของความเร็วในการประมวลผลซึ่งสามารถทำงานได้ด้วยความเร็วสูงสุด 60 MHz ที่ 12 Clock / 1 Machine Cycle นอกจากนี้แล้วยังมีความยืดหยุ่นพร้อมด้วยอุปกรณ์พื้นฐานต่างๆที่จำเป็นต่อการใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นหน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลแบบ EEPROM ขนาด 2 Kbyte หรือหน่วยความจำใช้งานแบบ RAM ซึ่งมีมากถึง 1792 Byte ส่วนในด้านของอุปกรณ์ Peripheral นั้นก็นับว่าครบถ้วนเหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับการควบคุมและประมวลผลต่างๆได้เป็นอย่างดี โดยจะมีทั้ง SPI, UART, Watchdog, Timer/Counter, PWM ฯลฯ โดยการออกแบบโครงสร้างของบอร์ดนั้นจะเน้นเรื่องขนาดของบอร์ดให้มีขนาดเล็กเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน และสะดวกต่อการพัฒนาโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 Microcontroller

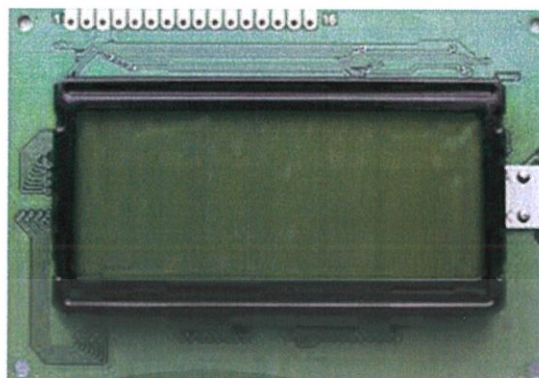
3.2.2.4 Keypad 4x4 ใช้เป็นตัวส่งงานในการควบคุมระบบ



รูปที่ 3.7 Keypad

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

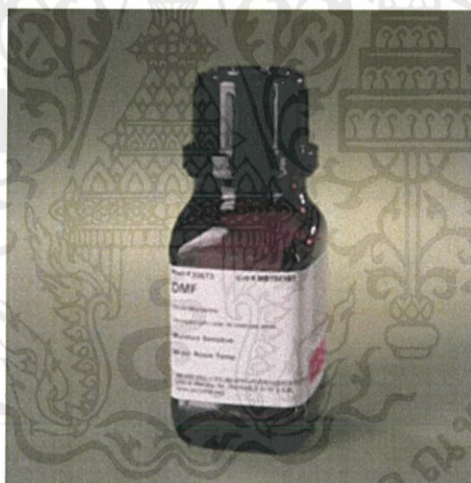
3.2.2.5 LCD 16x4 ใช้แสดงผลคำสั่ง



รูปที่ 3.8 LCD 16x4

3.2.3 ส่วนสารละลาย

3.2.3.1 Dimethylformamide เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีสูตรเคมี $(\text{CH}_3)_2\text{NC}(\text{O})\text{H}$ ที่ใช้อักษรย่อ “DMF”



รูปที่ 3.9 Dimethylformamide

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3.2 โพลีสไตรีน (Polystyrene : PS) เป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก คือ หลอมเป็นของเหลวได้ โดยที่อุณหภูมิห้องจะอยู่ในสถานะของแข็ง แต่จะหลอมละลายเมื่อทำให้ร้อนและแข็งตัวเมื่อเย็นลง พอลิสไตรีนแข็งที่บริสุทธิ์จะไม่มีสี ใส แต่สามารถทำเป็นสีต่างๆได้ และยืดหยุ่นได้จำกัด



รูปที่ 3.10 Polystyrene

3.2.4 อุปกรณ์อื่นๆ

3.2.4.1 Magnetic Stirrer ใช้คนสารและให้ความร้อน



รูปที่ 3.11 Magnetic Stirrer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4.2 Magnetic Bar ใช้สำหรับคนสาร



รูปที่ 3.12 Magnetic Bar

3.2.4.3 กระดาษฟอยล์ใช้เป็นตัวรับสารละลายที่ผ่านสนามไฟฟ้ามาเป็นเส้นใยระดับนาโน



รูปที่ 3.13 กระดาษฟอยล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4.4 Syringe ใช้เป็นตัวฉีดสารละลายเข้าสู่สนามไฟฟ้า



รูปที่ 3.14 Syringe

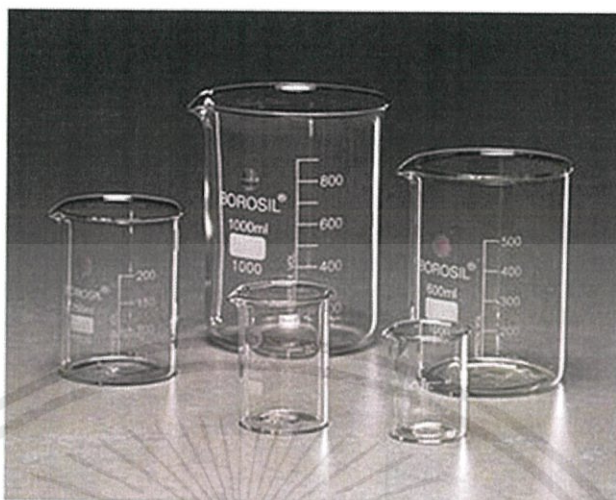
3.2.4.5 หัวเข็มเหล็ก ใช้หัวเข็มที่ไม่มีปลายแหลม



รูปที่ 3.15 หัวเข็มเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4.5 บีกเกอร์ ใช้ผสมสารเคมี



รูปที่ 3.16 บีกเกอร์

3.3 ขั้นตอนการวิจัย

3.3.1 ทำการเตรียมสาร โดยผสมตัวทำละลาย Dimethylformamide และ Polystyrene ในอัตราส่วน 10 : 3 ส่วน ลงในบีกเกอร์ด้วยฟอยล์

3.3.2 นำสารที่ผสมแล้วมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 50°C และคนตลอดเวลาด้วยเครื่อง Magnetic Stirrer ใช้เวลาประมาณ 4-5 ชั่วโมง จะได้สารละลายที่เป็นเนื้อเดียวกัน

3.3.3 คูดสารละลายขึ้นมาด้วย Syringe

3.3.4 เชื่อมต่อ Syringe กับ Step motor เข้าด้วยกัน

3.3.5 ต่อ High-voltage ด้านขั้ว + ติดไว้ที่ปลายเข็มและด้านขั้ว - ติดไว้ที่ฉากซึ่งมีกระดาษฟอยล์หุ้มอยู่

3.3.6 ทำการต่ออุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องทั้งหมด

3.3.7 ทดลองฉีดสารละลายผ่านสนามไฟฟ้าแรงดันสูงในอัตราต่างๆ

3.3.8.1 ทดลองฉีดสารละลายโดยปรับระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับที่ระยะห่าง 15cm, 10cm, 5cm แล้วสังเกตผลที่ได้

3.3.8.2 ทดลองฉีดสารละลายโดยเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของ High-voltage power supply โดยเปลี่ยนจาก 10 kV เป็น 15kV และ 20kV แล้วสังเกตผลที่ได้

3.3.8.3 ทดลองฉีดสารละลายโดยเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ ไปพร้อมๆกัน แล้วสังเกตผลที่ได้

3.3.9 นำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์

3.3.10 วิเคราะห์และอภิปรายผลการทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

จากการศึกษาวิธีการทดลองผลิตเส้นใยนาโน โดยใช้เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง โดยการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขต่างๆ ดังนี้

1. ขนาดหัวเข็มเหล็ก
2. ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ
3. ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของ High-voltage power supply
4. อัตราเร็วในการฉีด

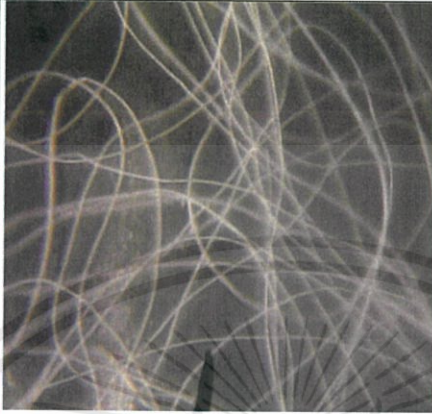
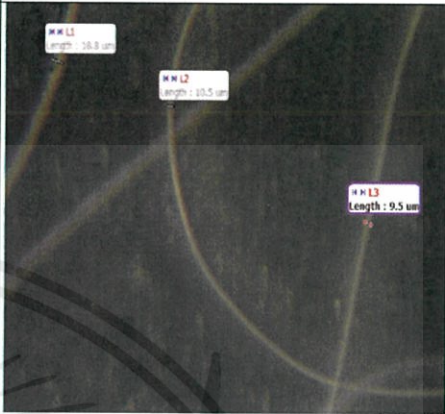
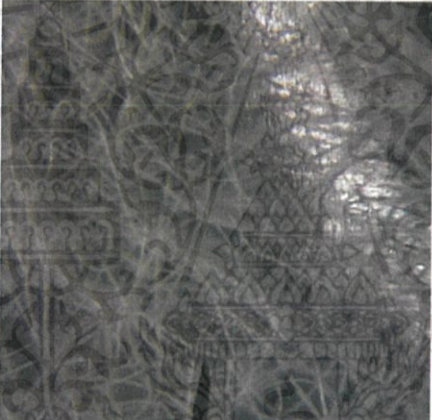
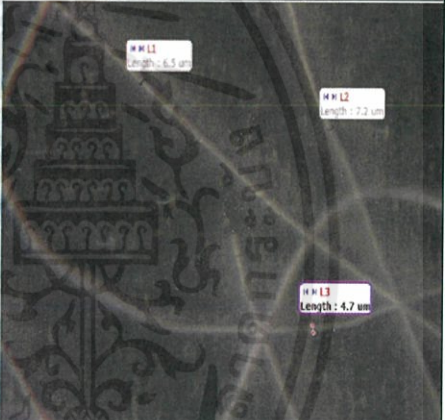

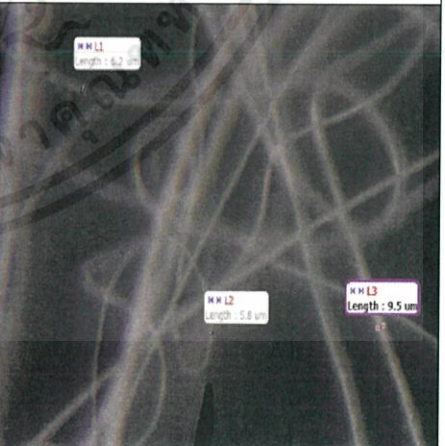
4.1 ผลการทดลอง

จากการดำเนินการทดลองได้ผลการทดลองดังตารางต่อไปนี้

4.1.1 สารละลายอัตราส่วน 3 : 10

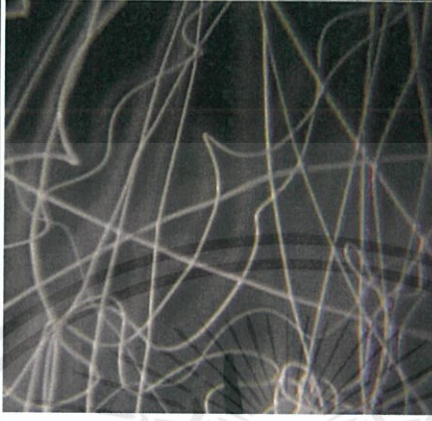
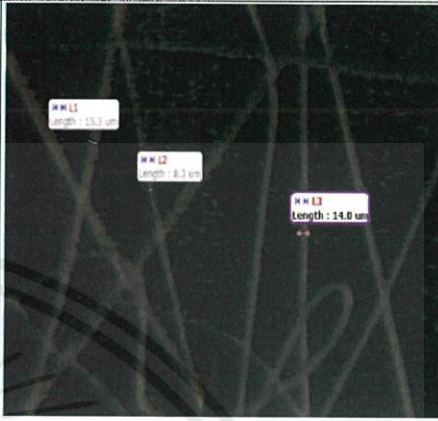
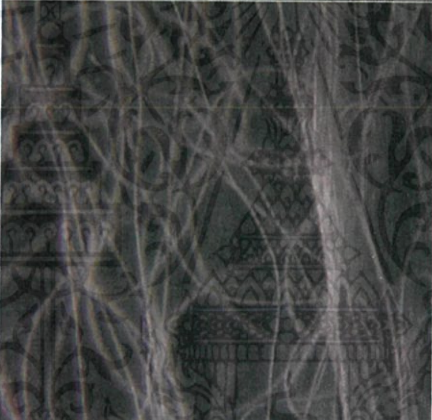
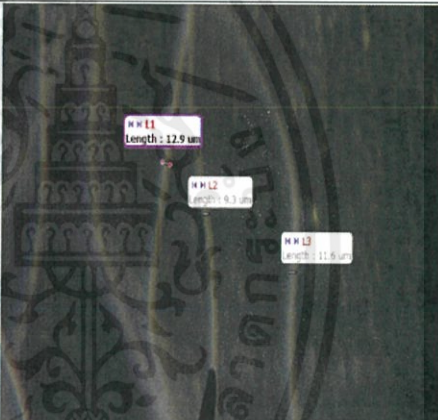
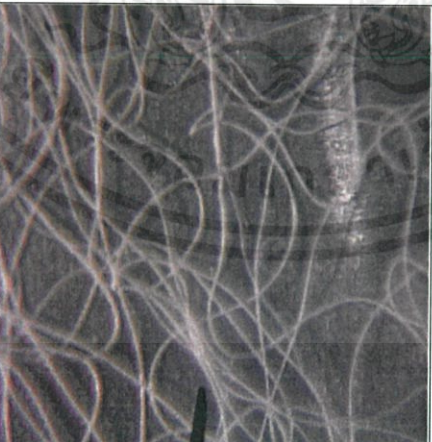
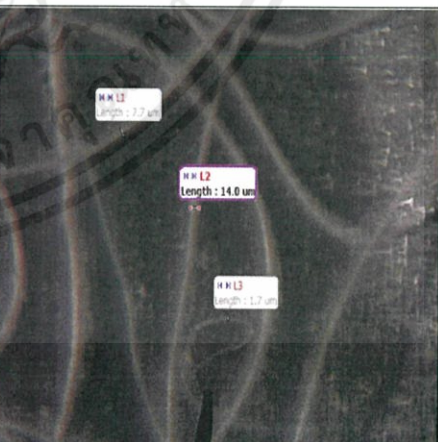
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวเข็มเบอร์ 22 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.70 mm. ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 10 cm.

อัตราเร็ว ($\mu\text{l}/\text{min}$)	V (kV)	รูปจากผลการทดลอง	
		4x	11x
800	15		
	20		
	25		

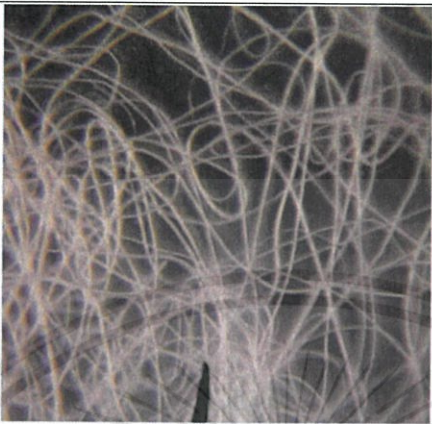
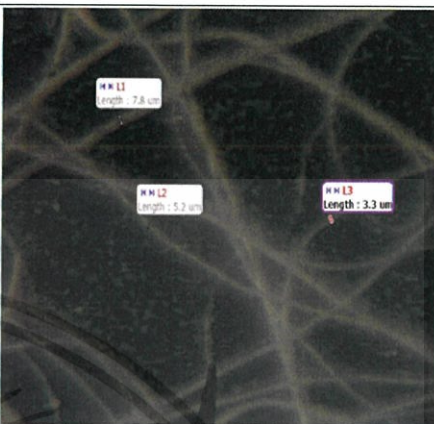

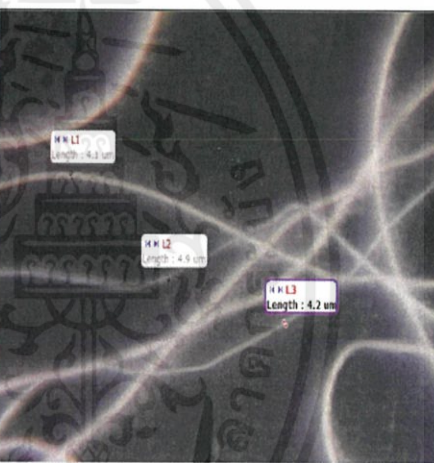
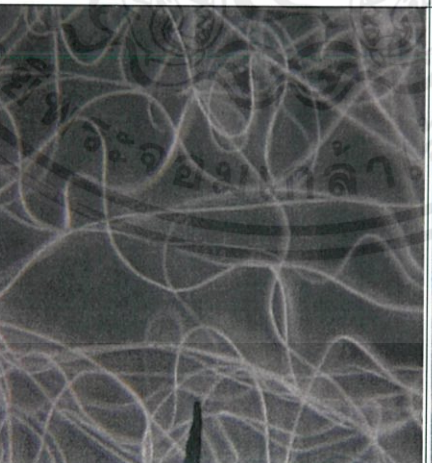
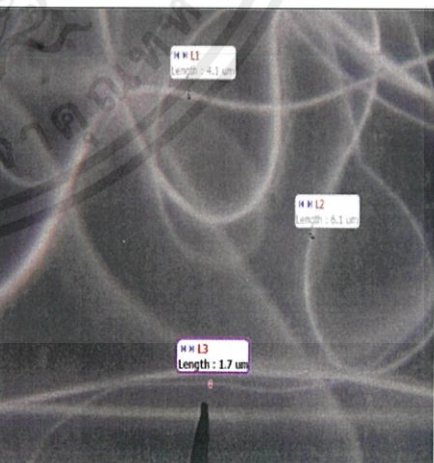
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวเข็มเบอร์ 22 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.70 mm. ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 10 cm.

อัตราเร็ว ($\mu\text{l}/\text{min}$)	V (kV)	รูปจากผลการทดลอง	
		4x	11x
600	15		
	20		
	25		

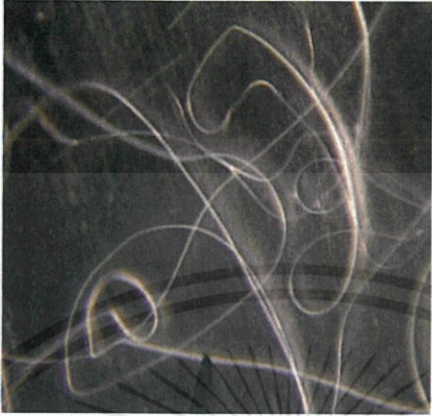
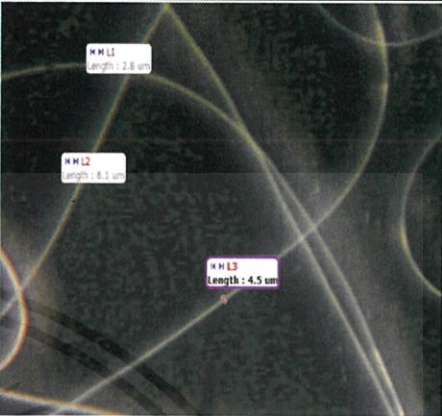

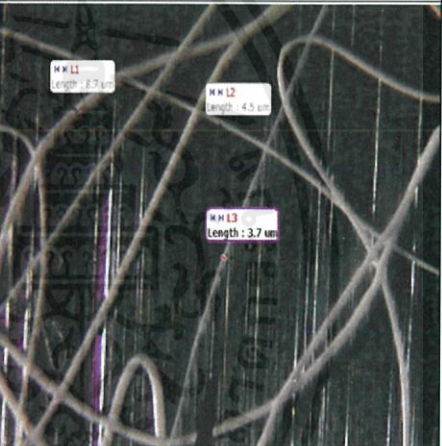
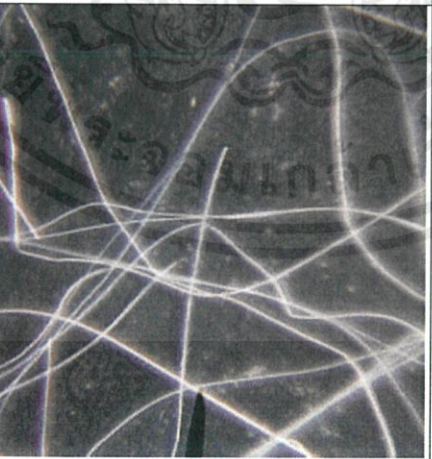
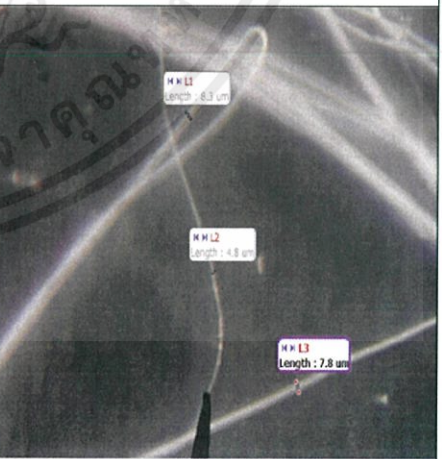
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวเข็มเบอร์ 22 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.70 mm. ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 10 cm.

อัตราเร็ว ($\mu\text{l}/\text{min}$)	V (kV)	รูปจากผลการทดลอง	
		4x	11x
	15		
400	20		
	25		

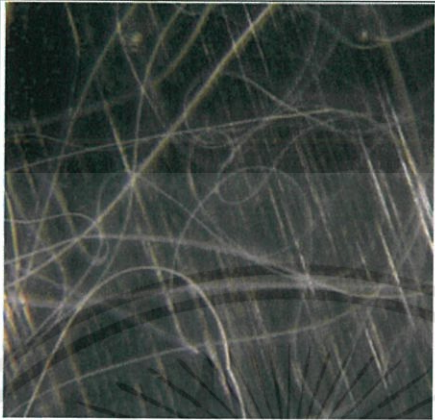
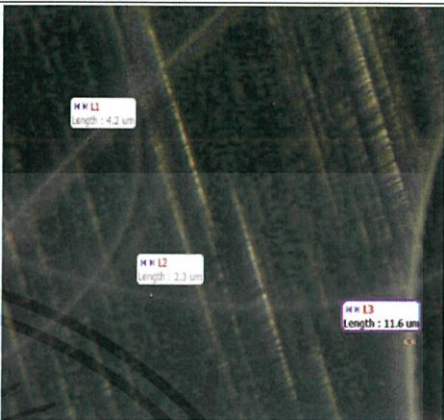

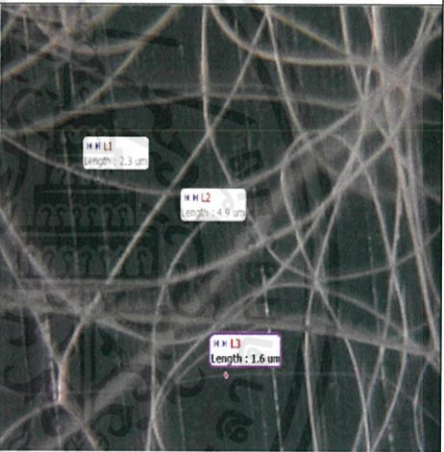

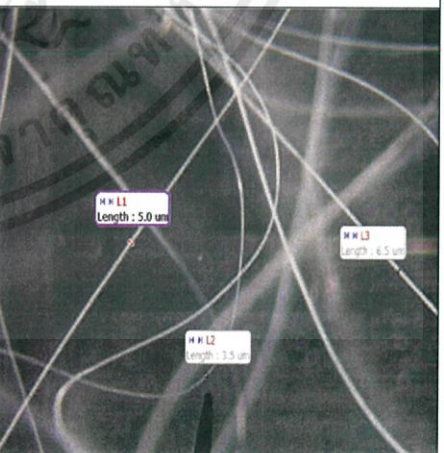
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวเข็มเบอร์ 22 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.70 mm. ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 15 cm.

อัตราเร็ว ($\mu\text{l}/\text{min}$)	V (kV)	รูปจากผลการทดลอง	
		4x	11x
	15		
800	20		
	25		

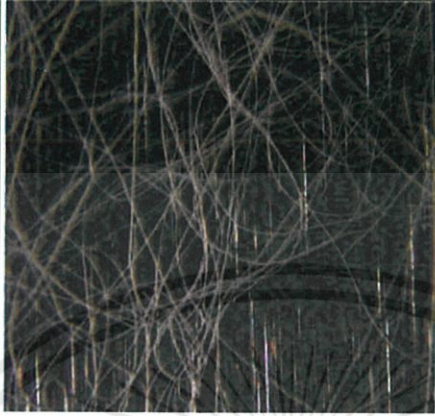
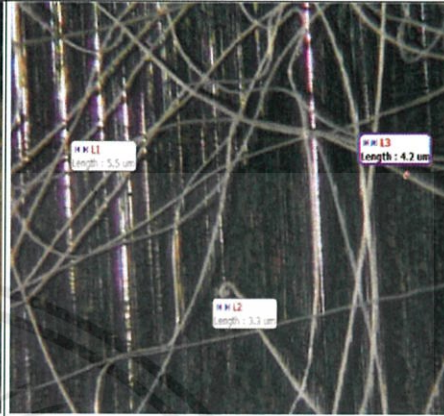

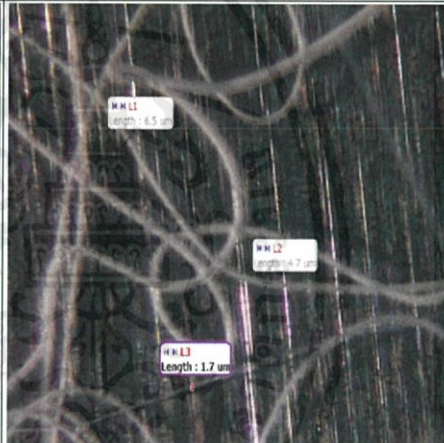

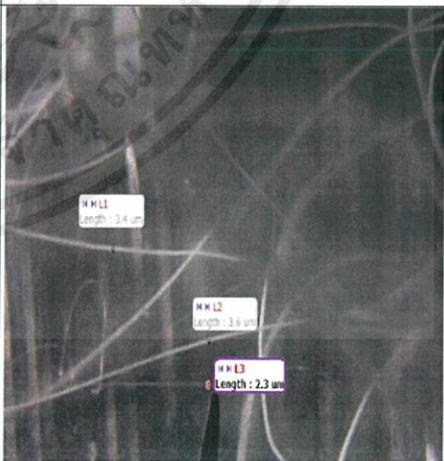
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวเข็มเบอร์ 22 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.70 mm. ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 15 cm.

อัตราเร็ว ($\mu\text{l}/\text{min}$)	V (kV)	รูปจากผลการทดลอง	
		4x	11x
600	15		
	20		
	25		

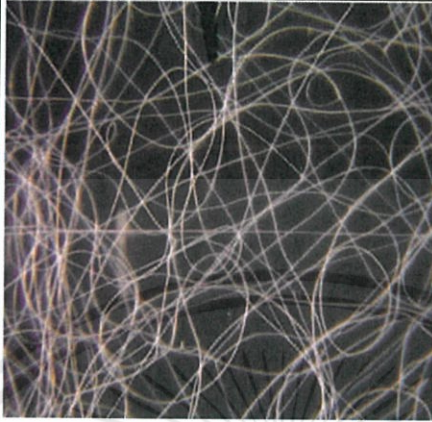
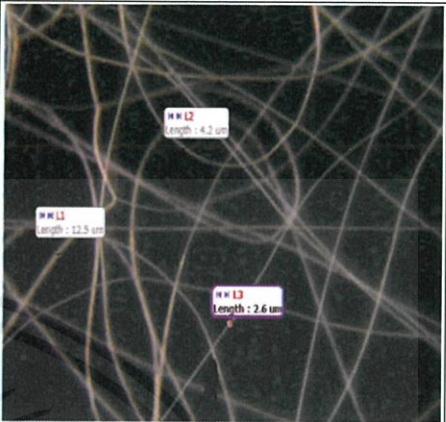

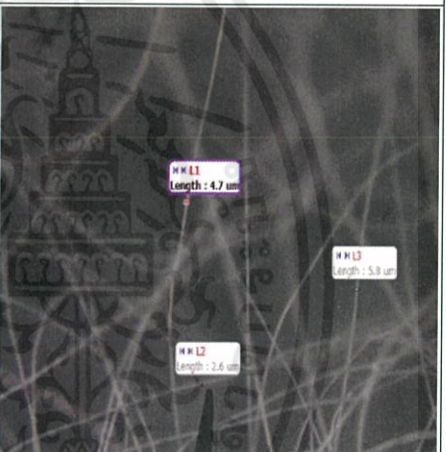
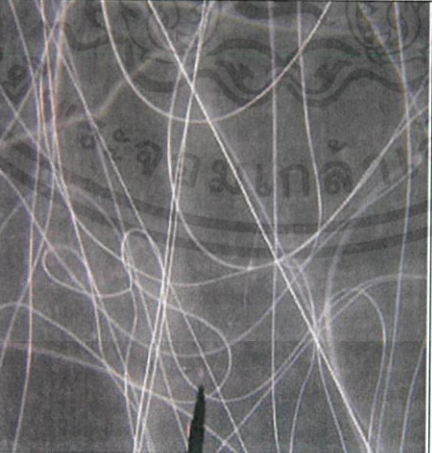
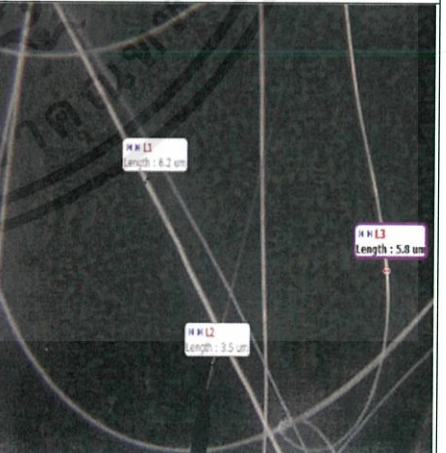
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวเข็มเบอร์ 22 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.70 mm. ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 15 cm.

อัตราเร็ว ($\mu\text{l}/\text{min}$)	V (kV)	รูปจากผลการทดลอง	
		4x	11x
400	15		
	20		
	25		

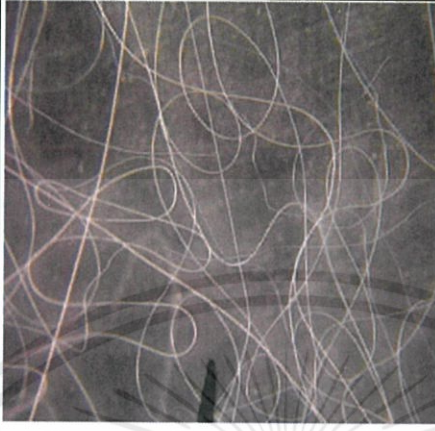
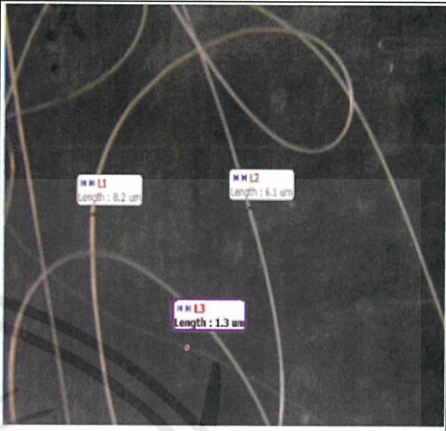

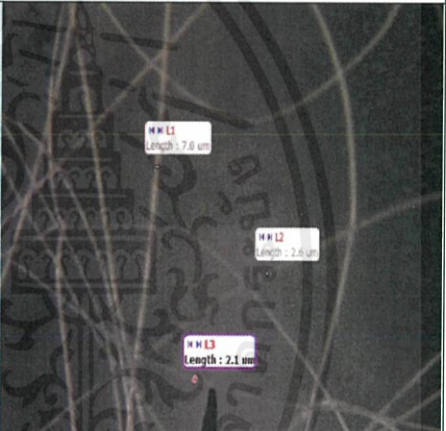
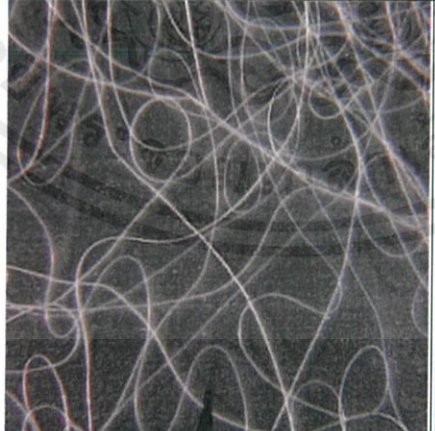
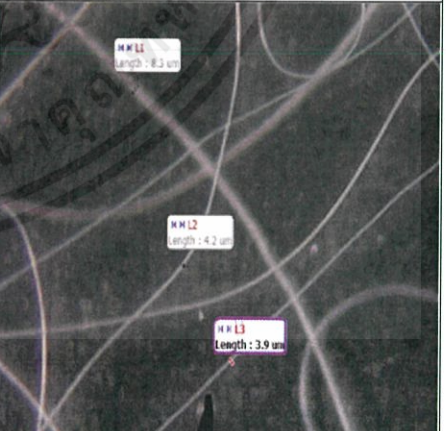
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรอ้างอิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวเข็มเบอร์ 23 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60 mm. ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 10 cm.

อัตราเร็ว ($\mu\text{l}/\text{min}$)	V (kV)	รูปจากผลการทดลอง	
		4x	11x
800	15		
	20		
	25		


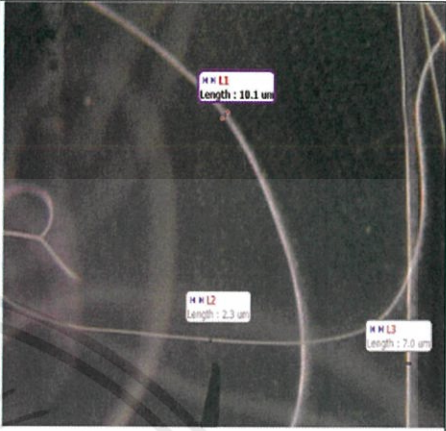

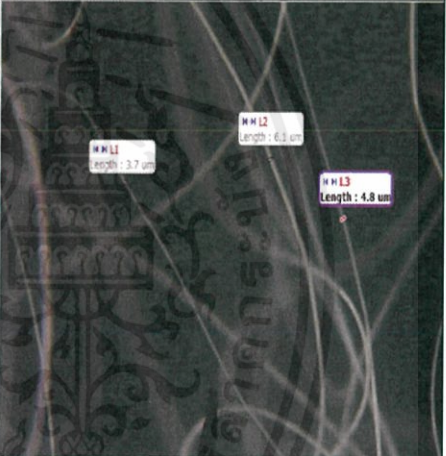
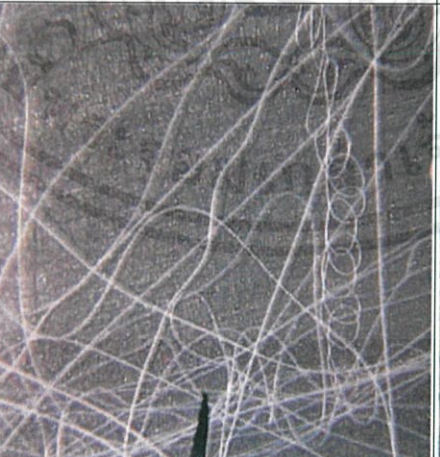
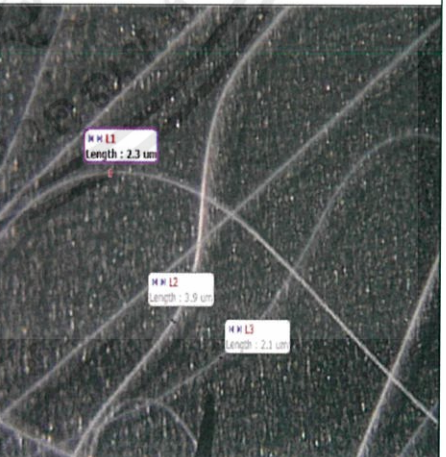
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวเข็มเบอร์ 23 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60 mm. ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 10 cm.

อัตราเร็ว ($\mu\text{l}/\text{min}$)	V (kV)	รูปจากผลการทดลอง	
		4x	11x
600	15		
	20		
	25		

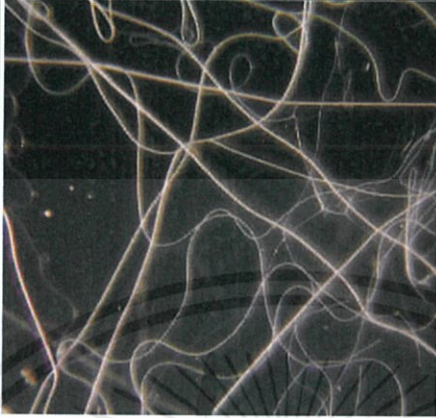
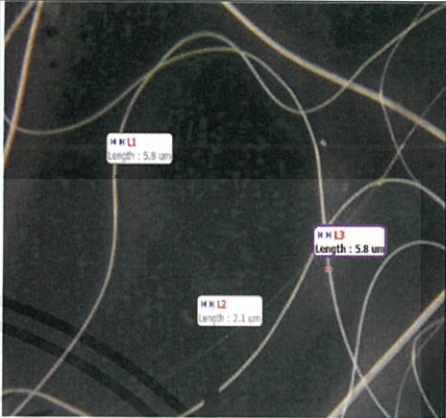

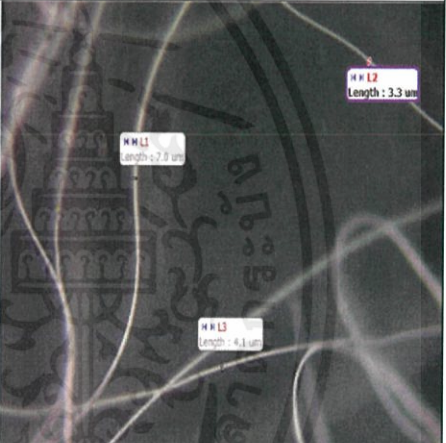
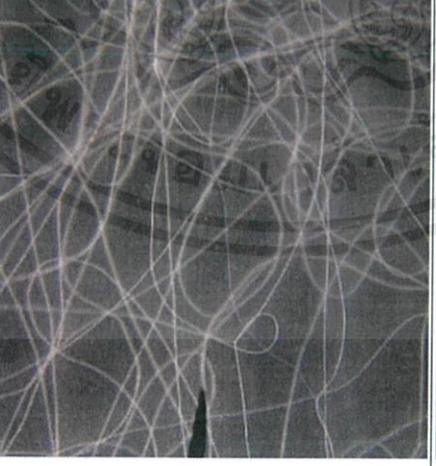
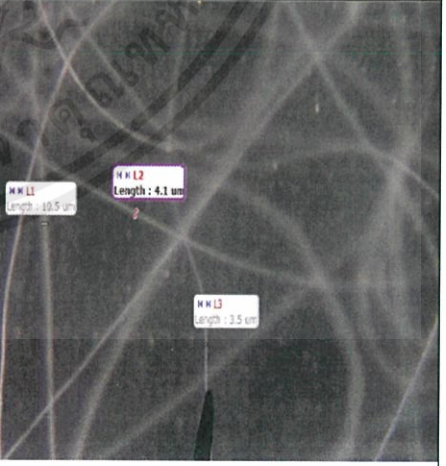
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวเข็มเบอร์ 23 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60 mm. ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 10 cm.

อัตราเร็ว ($\mu\text{l}/\text{min}$)	V (kV)	รูปจากผลการทดลอง	
		4x	11x
400	15		
	20		
	25		

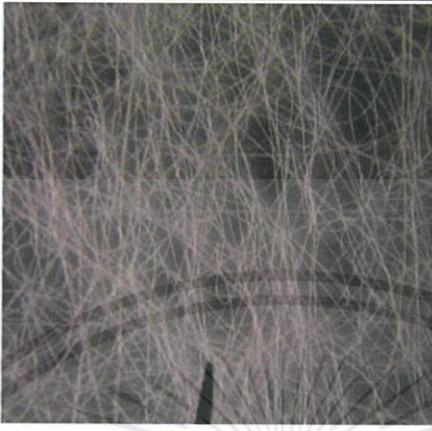
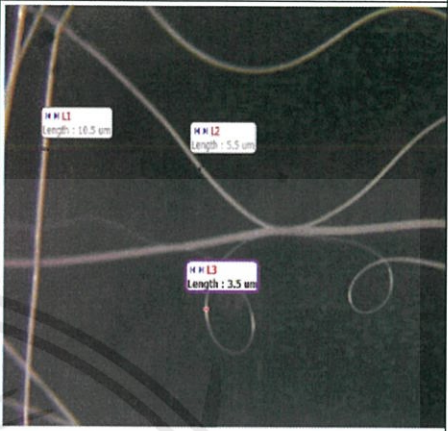
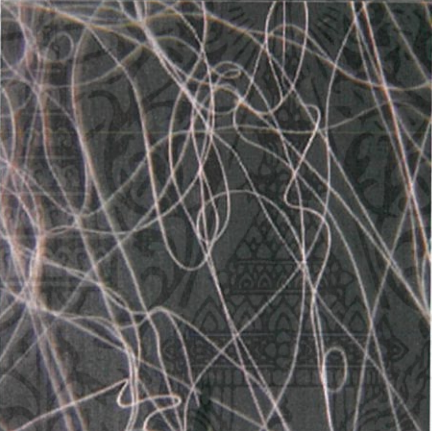


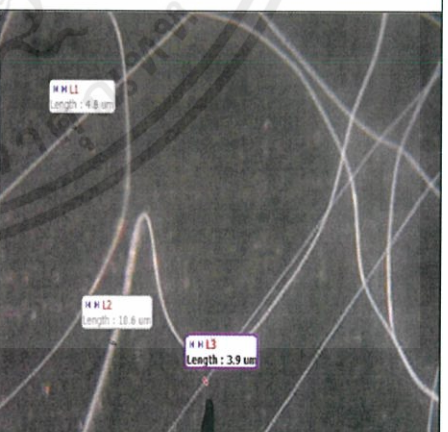
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวเข็มเบอร์ 23 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60 mm. ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 15 cm.

อัตราเร็ว ($\mu\text{l}/\text{min}$)	V (kV)	รูปจากผลการทดลอง	
		4x	11x
	15		
800	20		
	25		

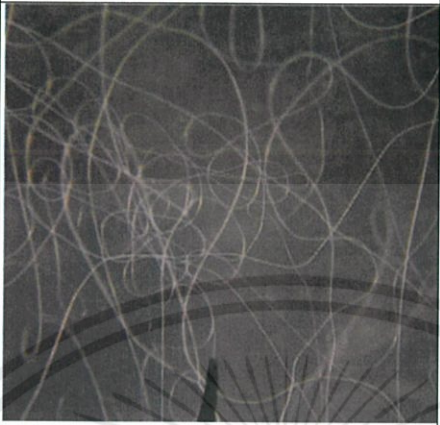
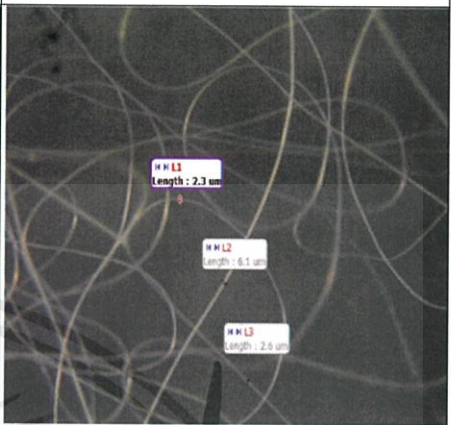

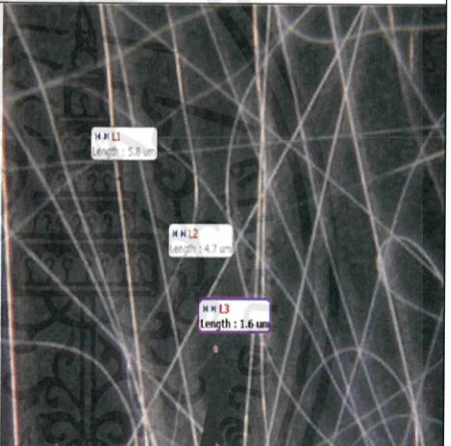
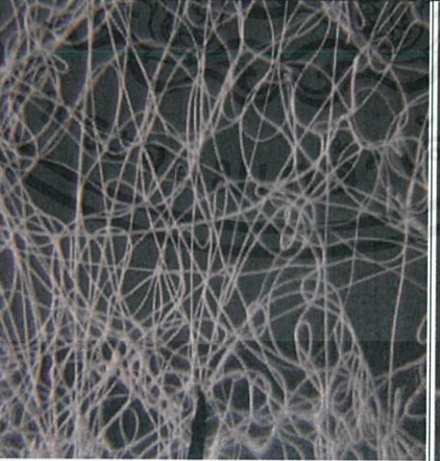
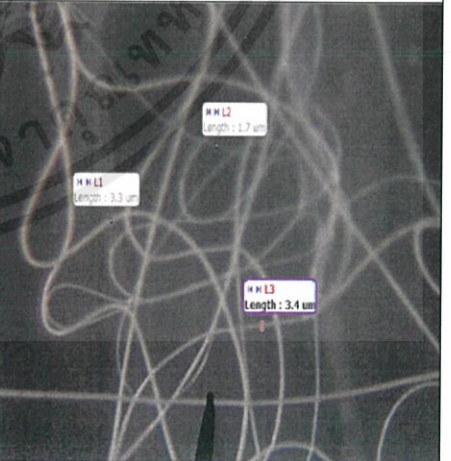
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวเข็มเบอร์ 23 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60 mm. ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 15 cm.

อัตราเร็ว ($\mu\text{l}/\text{min}$)	V (kV)	รูปจากผลการทดลอง	
		4x	11x
600	15		
	20		
	25		


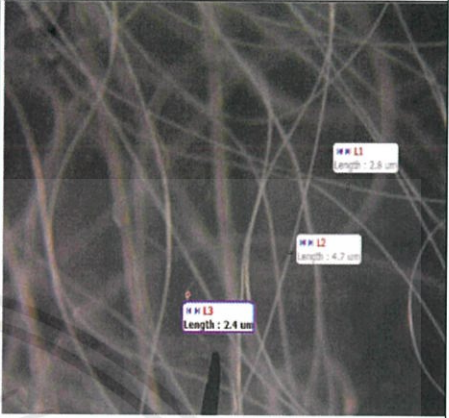

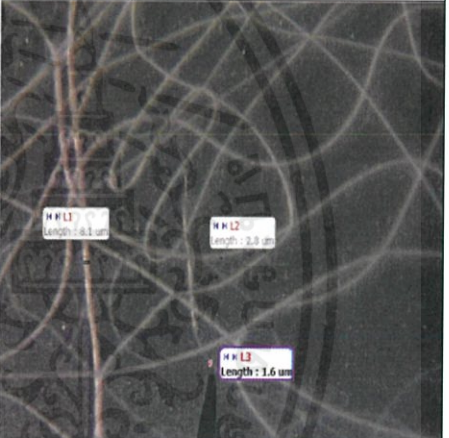

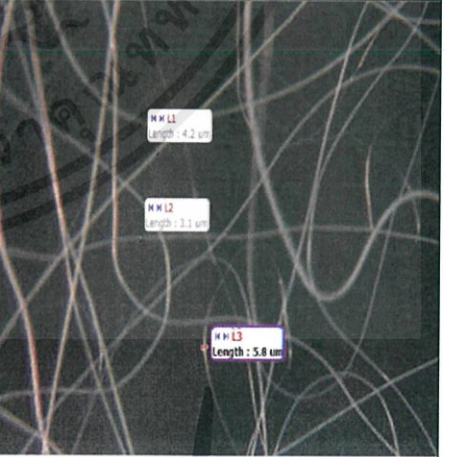
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวเข็มเบอร์ 23 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60 mm. ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 15 cm.

อัตราเร็ว ($\mu\text{l}/\text{min}$)	V (kV)	รูปจากผลการทดลอง	
		4x	11x
	15		
400	20		
	25		

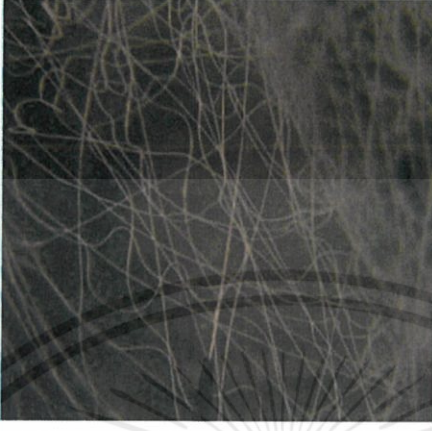
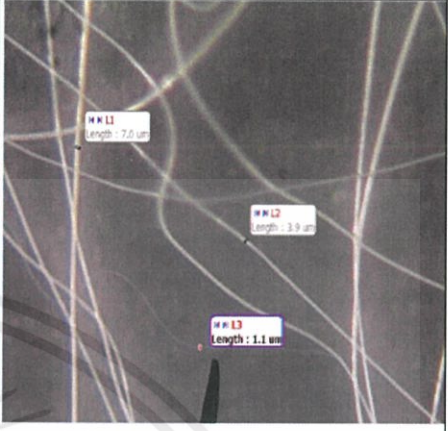
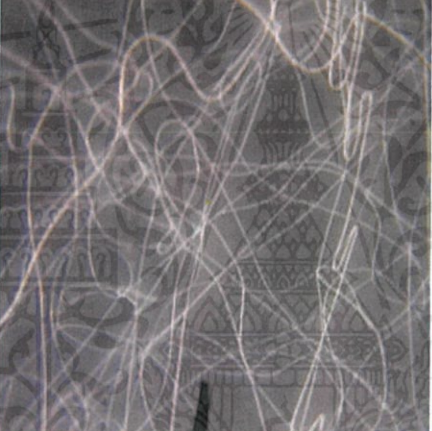


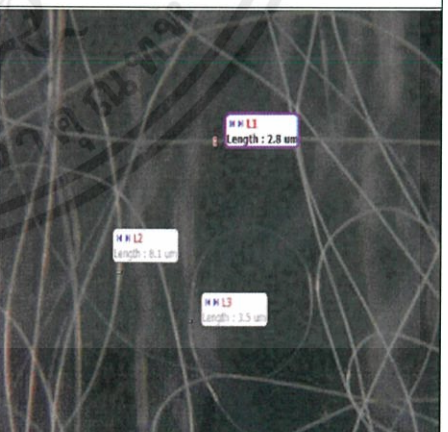
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวเข็มเบอร์ 24 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.55 mm. ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 10 cm.

อัตราเร็ว ($\mu\text{l}/\text{min}$)	V (kV)	รูปจากผลการทดลอง	
		4x	11x
800	15		
	20		
	25		

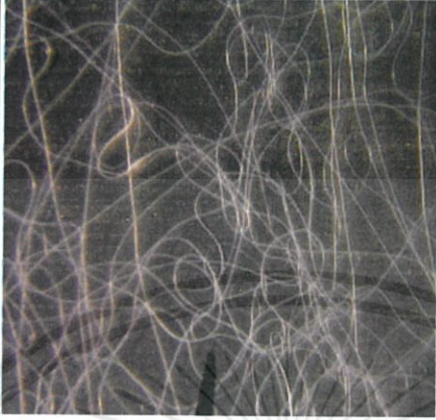
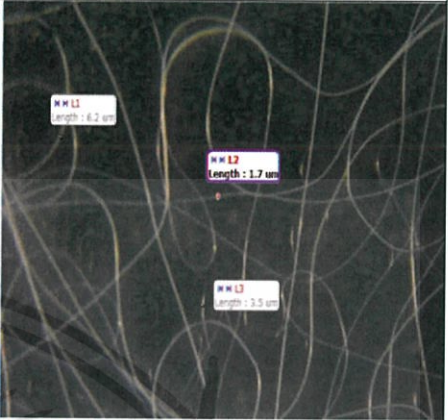
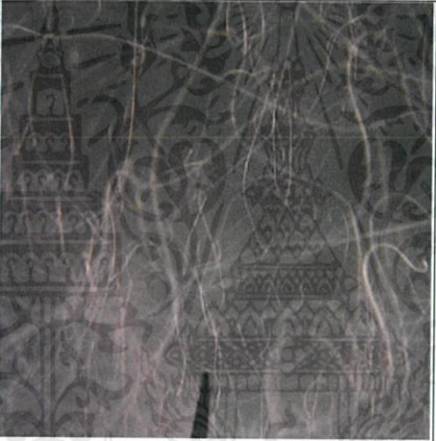
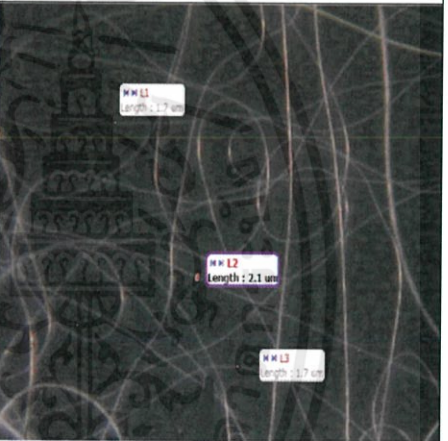

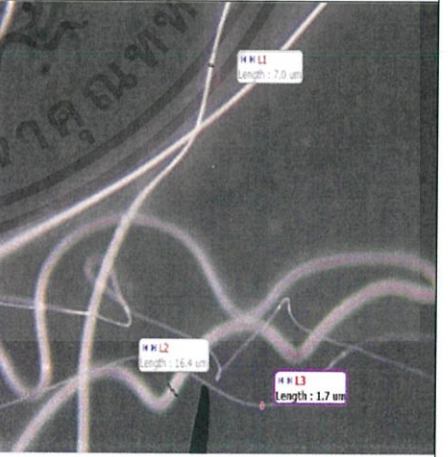
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวเข็มเบอร์ 24 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.55 mm. ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 10 cm.

อัตราเร็ว ($\mu\text{l}/\text{min}$)	V (kV)	รูปจากผลการทดลอง	
		4x	11x
600	15		
	20		
	25		

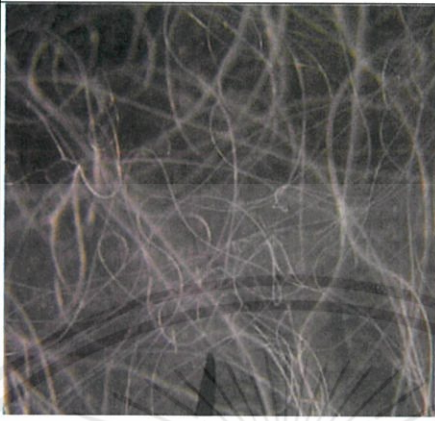
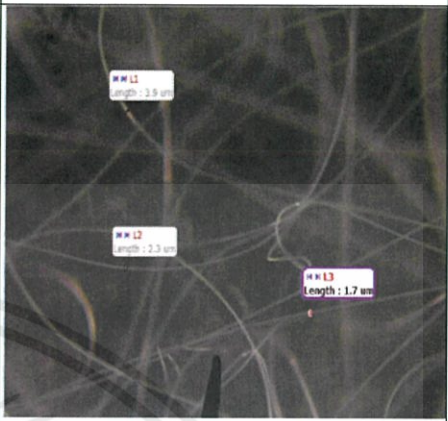

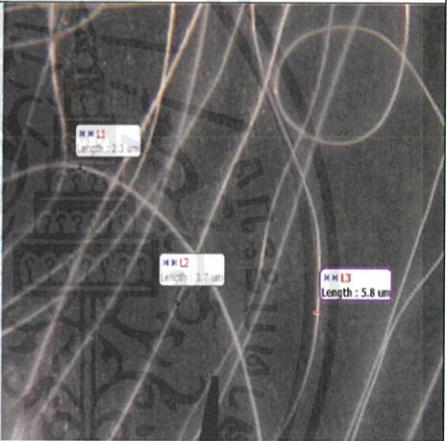
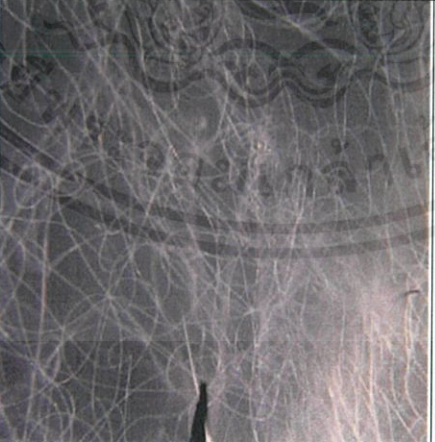
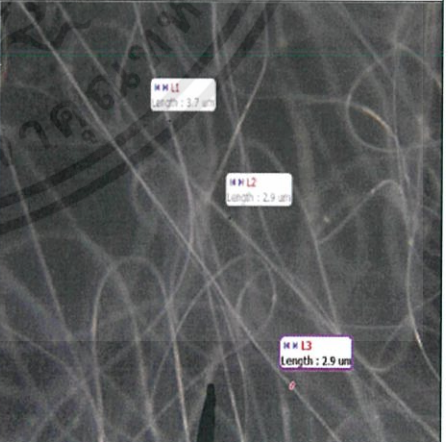
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวเข็มเบอร์ 24 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.55 mm. ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 10 cm.

อัตราเร็ว ($\mu\text{l}/\text{min}$)	V (kV)	รูปจากผลการทดลอง	
		4x	11x
	15		
400	20		
	25		

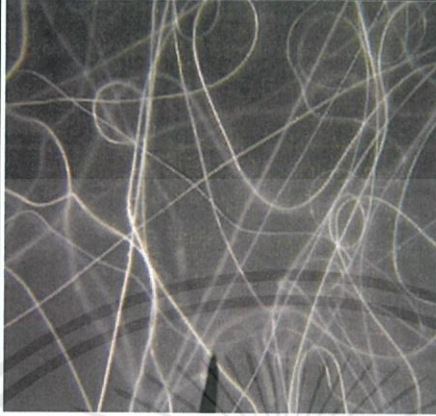
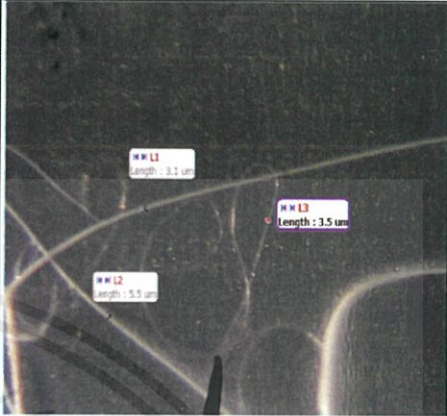
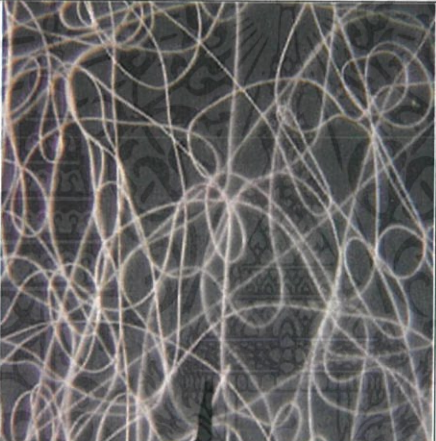
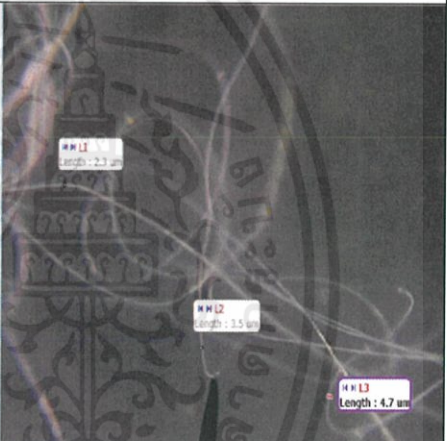
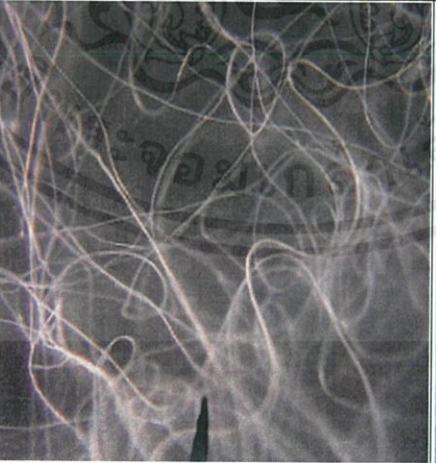
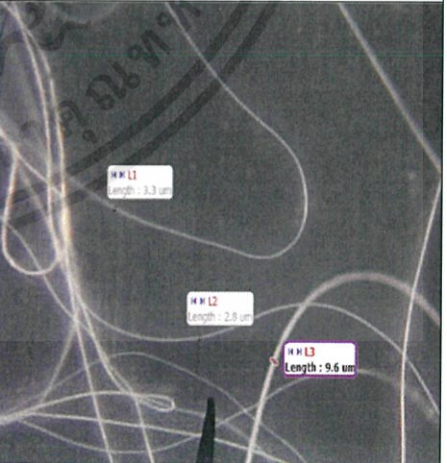
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ได้แก่การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวเข็มเบอร์ 24 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.55 mm. ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 15 cm.

อัตราเร็ว ($\mu\text{l}/\text{min}$)	V (kV)	รูปจากผลการทดลอง	
		4x	11x
800	15		
	20		
	25		

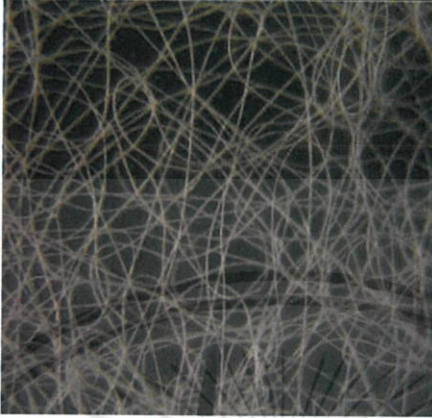
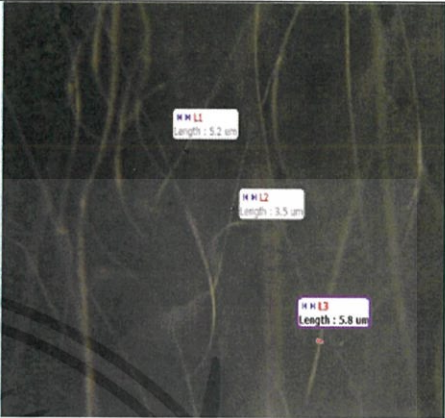

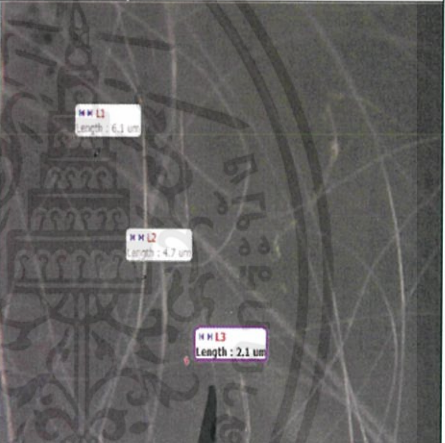
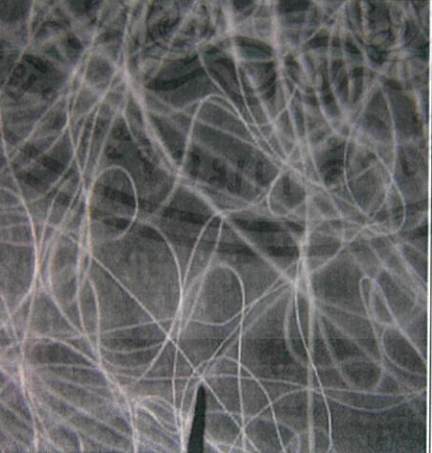
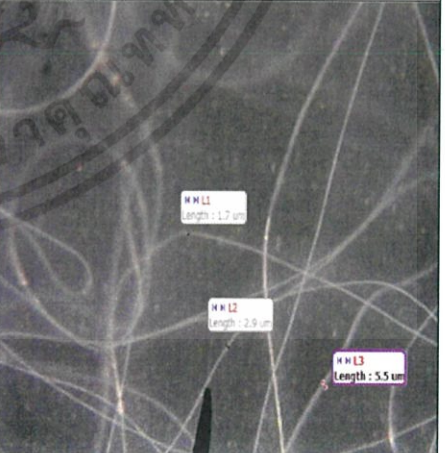
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวเข็มเบอร์ 24 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.55 mm. ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 15 cm.

อัตราเร็ว ($\mu\text{l/min}$)	V (kV)	รูปจากผลการทดลอง	
		4x	11x
	15		
600	20		
	25		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวเข็มเบอร์ 24 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.55 mm. ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 15 cm.

อัตราเร็ว ($\mu\text{l}/\text{min}$)	V (kV)	รูปจากผลการทดลอง	
		4x	11x
400	15		
	20		
	25		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัดระดับตัวแปรที่ส่งผลต่อการผลิตเส้นใยโดยโปรแกรม Taguchi Method

ตาราง 4.1 ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 10 cm.

Experiment Number	ขนาดหัวเข็ม(mm)	อัตราเร็ว (μl/min)	ความต่างศักย์(kV)	Trial 1 (μm)	Trial 2 (μm)	Trial 3 (μm)	Mean (μm)	SN
1	0.7	800	15	18.8	10.5	9.5	12.93	0.84
2	0.7	800	20	6.5	7.2	4.7	6.13	9.43
3	0.7	800	25	6.2	5.8	9.5	7.17	4.12
4	0.7	600	15	15.3	8.3	14	12.53	1.57
5	0.7	600	20	12.9	9.3	11.6	11.27	6.32
6	0.7	600	25	7.7	14	1.7	7.80	0.44
7	0.7	400	15	7.8	5.2	2.3	5.10	1.81
8	0.7	400	20	4.1	4.9	4.2	4.40	67.66
9	0.7	400	25	4.1	6.1	1.7	3.97	2.37
10	0.6	800	15	12.5	4.2	2.6	6.43	0.53
11	0.6	800	20	4.7	2.6	5.8	4.37	4.77
12	0.6	800	25	6.2	3.5	5.8	5.17	6.66
13	0.6	600	15	8.2	6.1	1.3	5.20	1.09
14	0.6	600	20	7	2.6	2.1	3.90	1.52
15	0.6	600	25	8.3	4.2	3.9	5.47	2.39
16	0.6	400	15	10.1	2.3	7	6.47	1.01
17	0.6	400	20	3.7	6.1	4.8	4.87	9.46
18	0.6	400	25	2.3	3.9	2.1	2.77	8.89
19	0.55	800	15	2.8	4.7	2.4	3.30	6.73
20	0.55	800	20	8.1	2.8	1.6	4.17	0.94
21	0.55	800	25	4.2	3.1	5.8	4.37	6.87
22	0.55	600	15	7	3.9	1.1	4.00	1.28
23	0.55	600	20	4.6	4.2	2.9	3.90	14.87
24	0.55	600	25	2.8	8.1	3.5	4.80	1.58
25	0.55	400	15	6.2	1.7	3.5	3.80	2.15
26	0.55	400	20	1.7	2.1	1.7	1.83	98.28
27	0.55	400	25	7	16.4	1.7	8.37	0.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองตาม orthogonal arrays

Level	ขนาดหัวเข็ม(mm)	อัตราเร็ว($\mu\text{l}/\text{min}$)	ความต่างศักย์(kV)
1	10.51	4.54	1.89
2	4.04	3.45	23.69
3	14.78	21.33	3.74
D	10.74	17.88	21.80
Rank	3	2	1

จากตารางตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อการผลิตเส้นใยมากที่สุด คือ ความต่างศักย์ อัตราเร็ว และขนาดหัวเข็ม ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.2 ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 15cm.

Experiment Number	ขนาดหัวเข็ม(mm)	อัตราเร็ว ($\mu\text{l}/\text{min}$)	ความต่างศักย์(kV)	Trial 1 (μm)	Trial 2 (μm)	Trial 3 (μm)	Mean (μm)	SN
1	0.7	800	15	2.8	6.1	4.5	4.47	4.70
2	0.7	800	20	8.7	4.5	3.7	5.63	2.03
3	0.7	800	25	8.3	4.8	7.8	6.97	4.68
4	0.7	600	15	4.2	2.3	11.6	6.03	0.60
5	0.7	600	20	2.3	4.9	1.6	2.93	2.91
6	0.7	600	25	5	3.5	6.5	5.00	6.15
7	0.7	400	15	5.5	3.3	4.2	4.33	10.33
8	0.7	400	20	6.5	4.7	1.7	4.30	2.07
9	0.7	400	25	3.4	3.6	2.3	3.10	19.90
10	0.6	800	15	5.8	2.1	5.8	4.57	2.82
11	0.6	800	20	7	3.3	4.1	4.80	3.53
12	0.6	800	25	10.5	4.1	3.5	6.03	0.99
13	0.6	600	15	10.5	5.5	3.5	6.50	1.21
14	0.6	600	20	3.9	2.6	4.8	3.77	9.31
15	0.6	600	25	4.8	10.6	3.9	6.43	1.19
16	0.6	400	15	2.3	6.1	3.6	4.00	3.13
17	0.6	400	20	5.8	4.7	1.6	4.03	2.46
18	0.6	400	25	3.3	1.7	3.4	2.80	9.64
19	0.55	800	15	3.9	2.3	1.7	2.63	6.29
20	0.55	800	20	2.3	3.7	5.8	3.93	3.74
21	0.55	800	25	3.7	2.9	2.9	3.17	46.79
22	0.55	600	15	3.1	5.5	3.5	4.03	7.24
23	0.55	600	20	3.3	3.5	4.7	3.83	20.26
24	0.55	600	25	3.3	2.8	9.6	5.23	0.94
25	0.55	400	15	5.2	3.5	5.8	4.83	9.55
26	0.55	400	20	6.1	4.7	2.1	4.30	2.99
27	0.55	400	25	1.7	2.9	5.5	3.37	2.66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองตาม orthogonal arrays

Level	ขนาดหัวเข็ม(mm)	อัตราเร็ว($\mu\text{l}/\text{min}$)	ความต่างศักย์(kV)
1	5.93	8.40	5.10
2	3.81	5.54	5.48
3	11.16	6.97	10.33
Δ	7.35	2.86	5.23
Rank	1	3	2

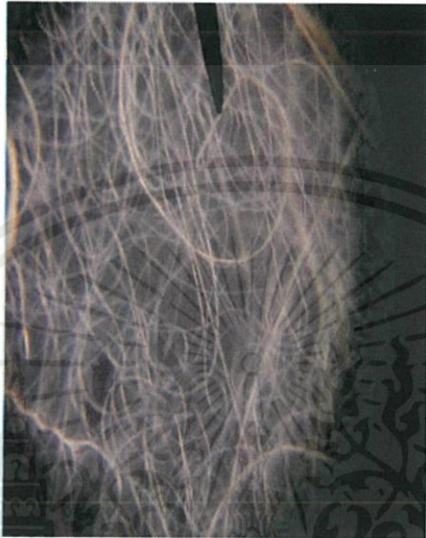
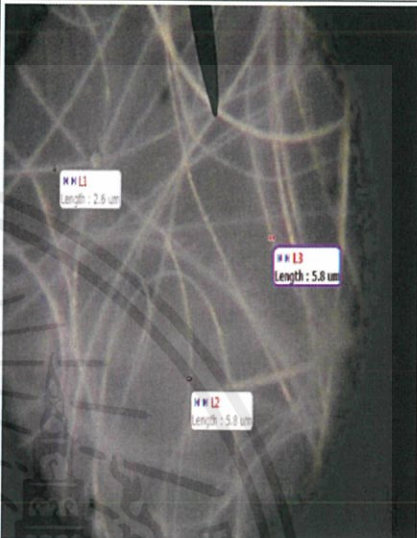

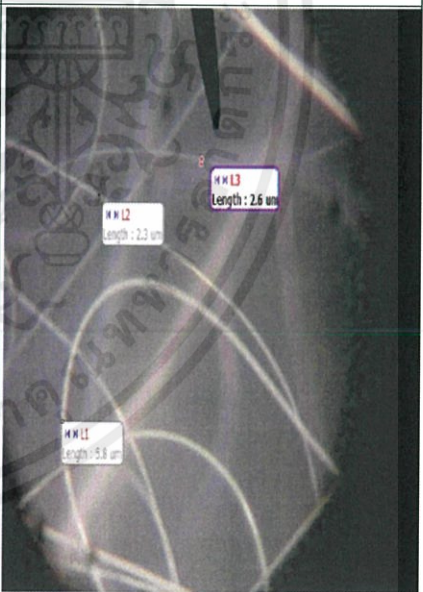
จากตารางตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อการผลิตเส้นใยมากที่สุด คือ ขนาดหัวเข็ม ความต่างศักย์ และอัตราเร็ว ตามลำดับ



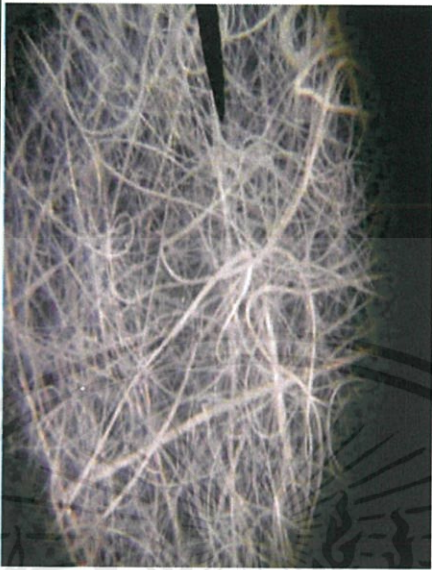
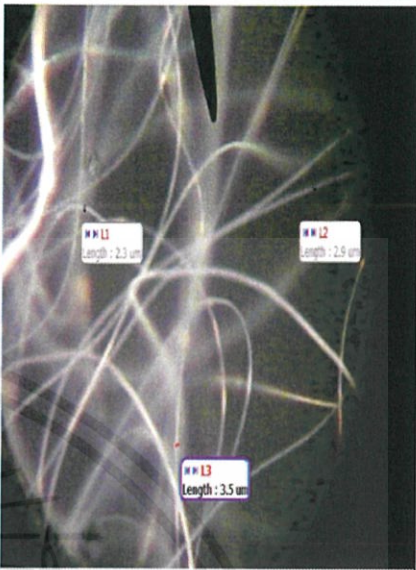
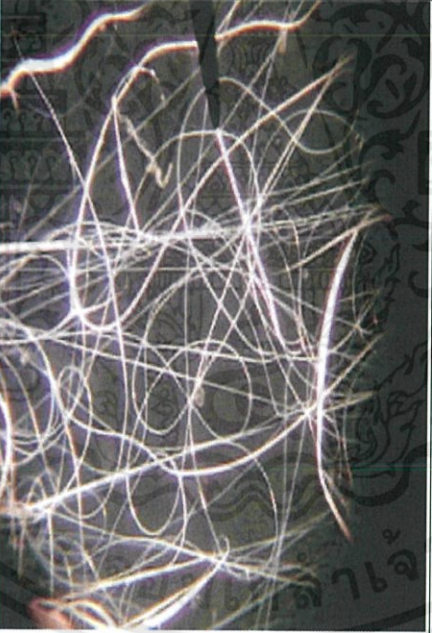
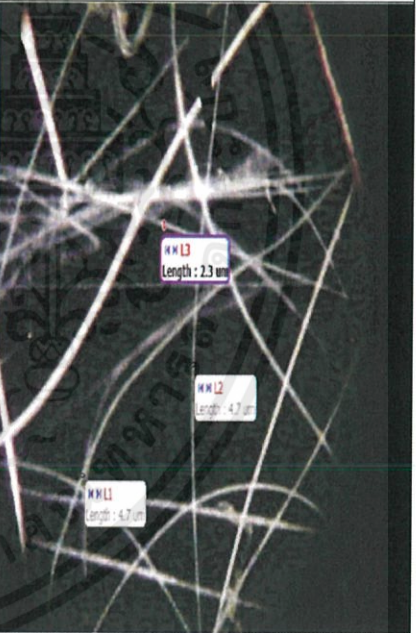
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 สารละลายอัตราส่วน 2.5 : 10

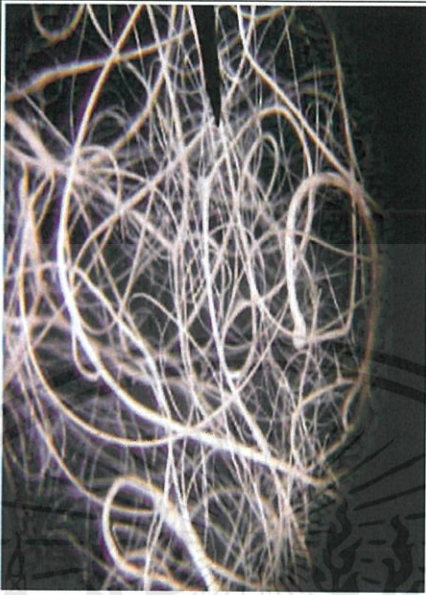
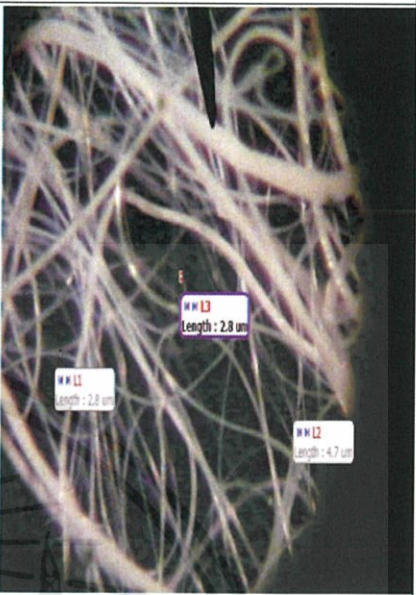

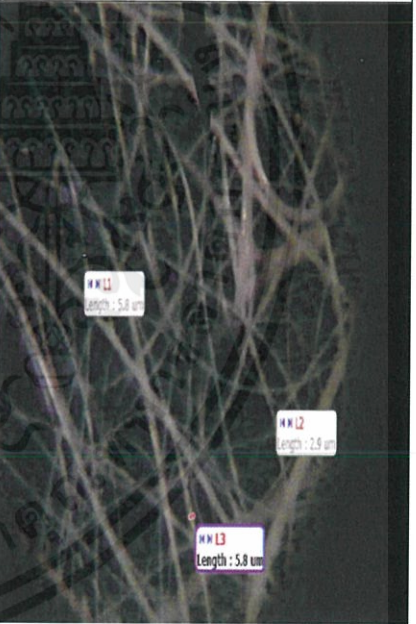
หัวเข็มเบอร์ 24 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.55 mm. ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า(v)15kV

อัตราเร็ว ($\mu\text{l}/\text{min}$)	ระยะห่าง (cm)	รูปจากผลการทดลอง	
		4x	11x
8	10		
	15		

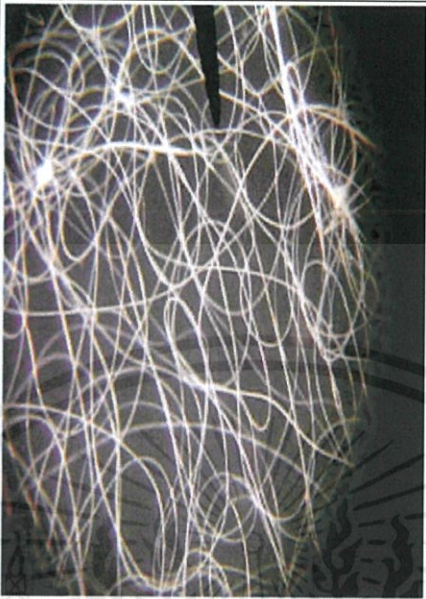
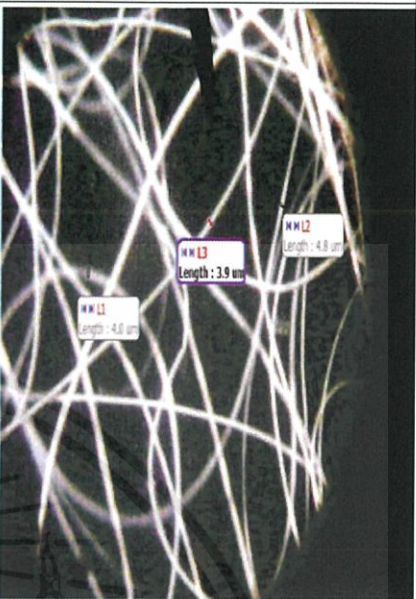
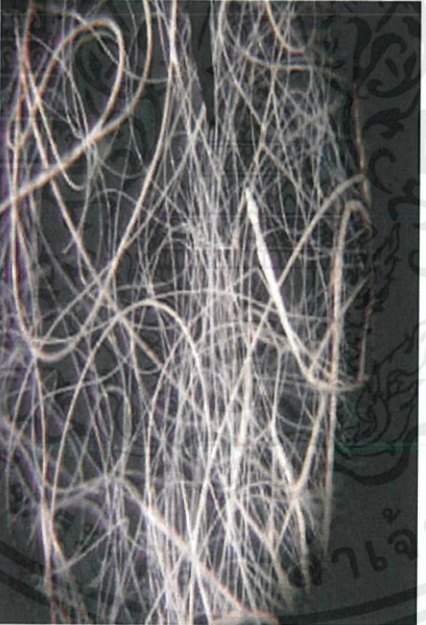
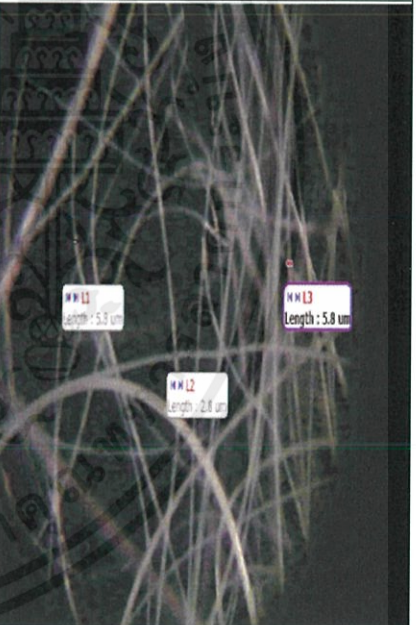
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราเร็ว ($\mu\text{l}/\text{min}$)	ระยะห่าง (cm)	รูปจากผลการทดลอง	
		4x	11x
10	10		
	15		

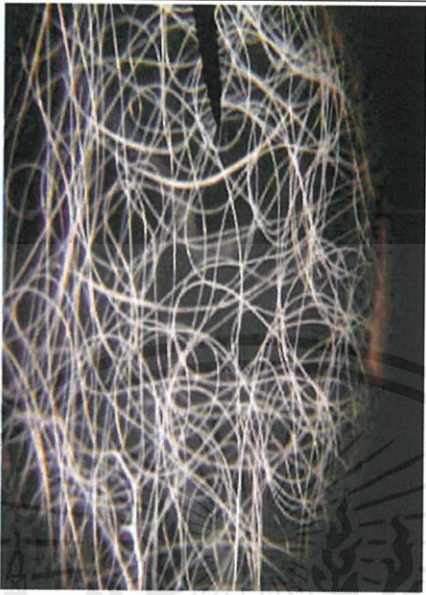


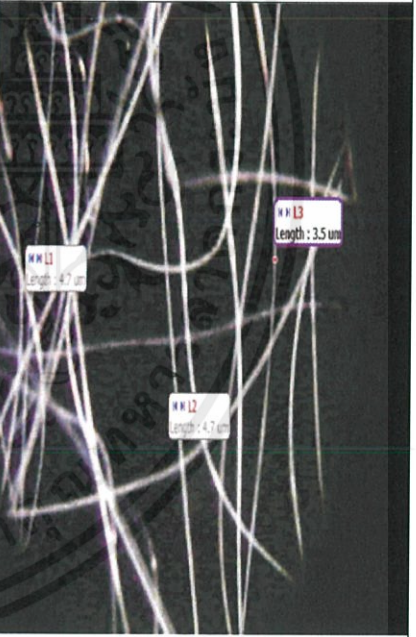
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราเร็ว ($\mu\text{l}/\text{min}$)	ระยะห่าง (cm)	รูปจากผลการทดลอง	
		4x	11x
20	10		
	15		

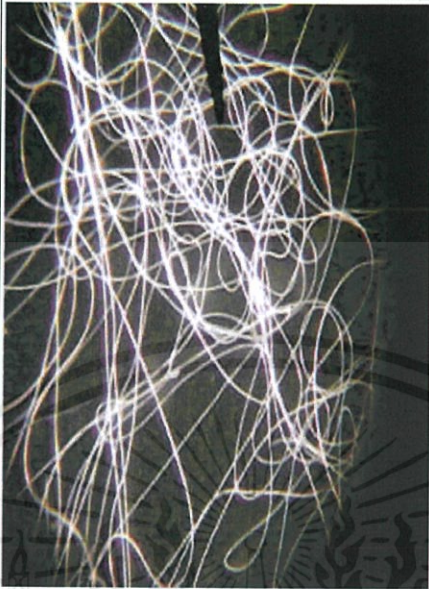
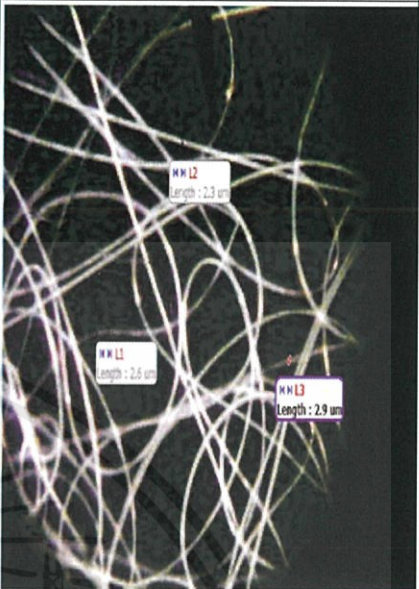

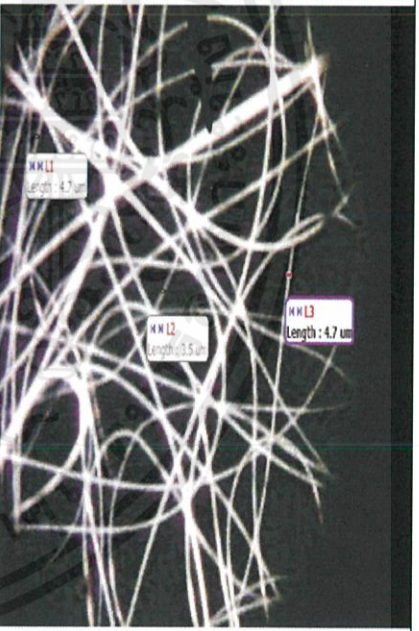
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราเร็ว ($\mu\text{l}/\text{min}$)	ระยะห่าง (cm)	รูปจากผลการทดลอง	
		4x	11x
40	10		
	15		

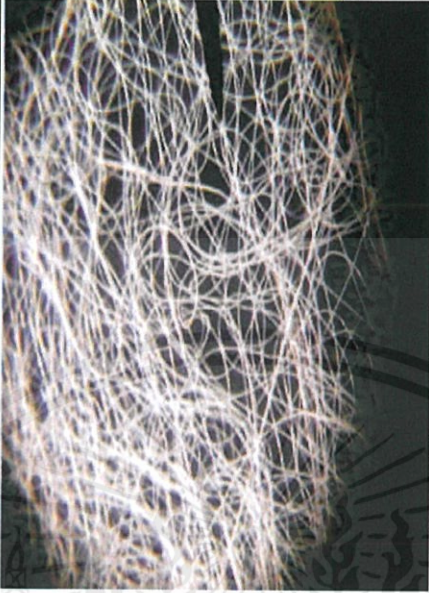
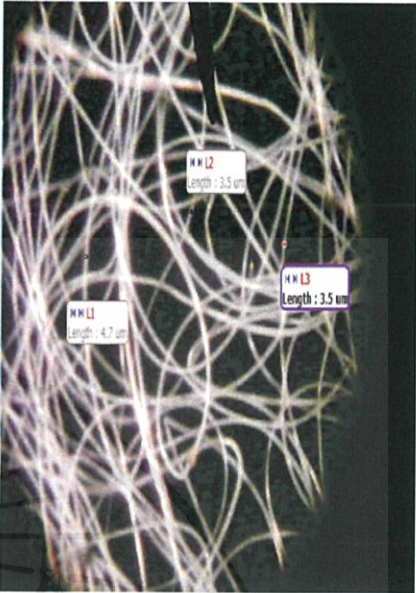

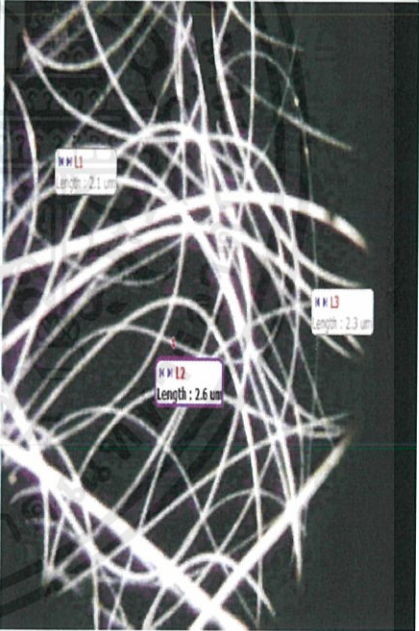
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราเร็ว ($\mu\text{l}/\text{min}$)	ระยะห่าง (cm)	รูปจากผลการทดลอง	
		4x	11x
60	10		
	15		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราเร็ว ($\mu\text{l}/\text{min}$)	ระยะห่าง (cm)	รูปจากผลการทดลอง	
		4x	11x
80	10		
	15		




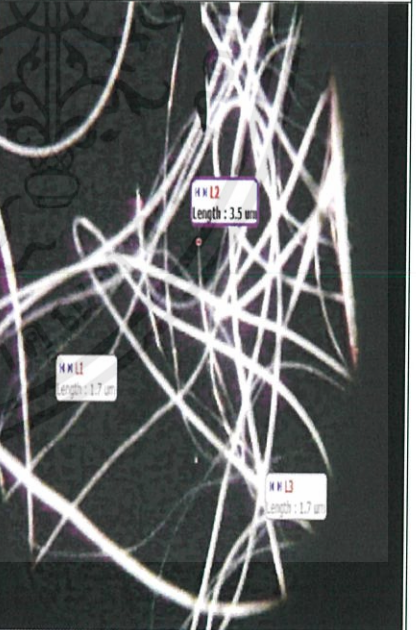
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราเร็ว ($\mu\text{l}/\text{min}$)	ระยะห่าง (cm)	รูปจากผลการทดลอง	
		4x	11x
100	10		
	15		

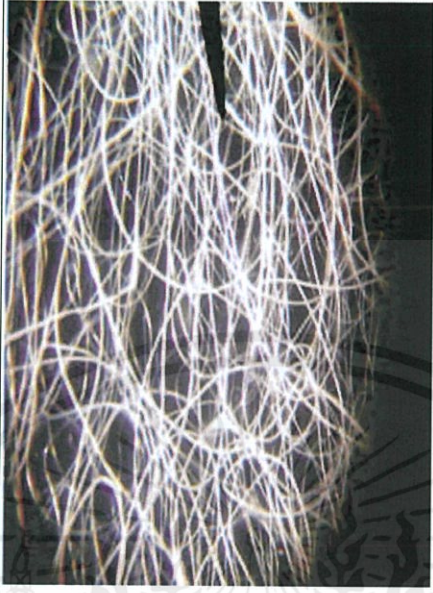



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 สารละลายอัตราส่วน 2.0 : 10

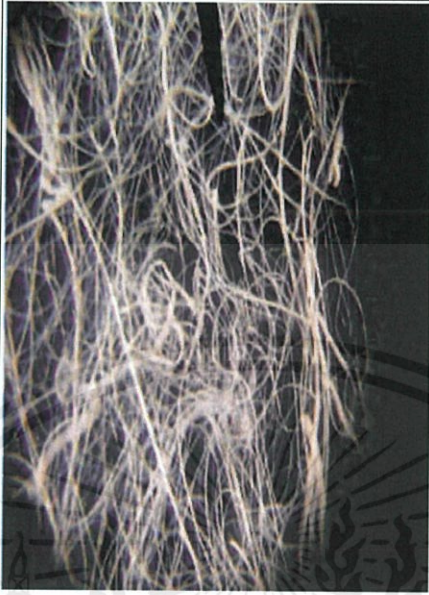
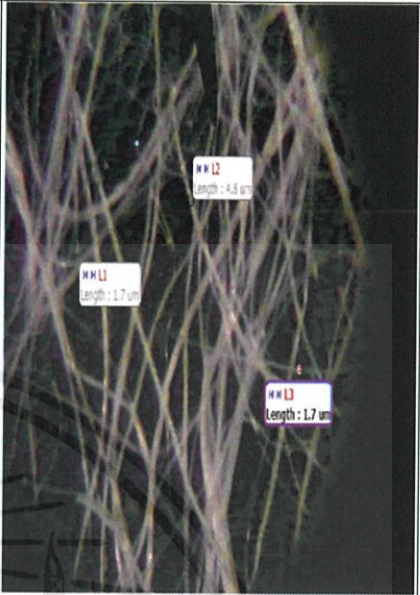

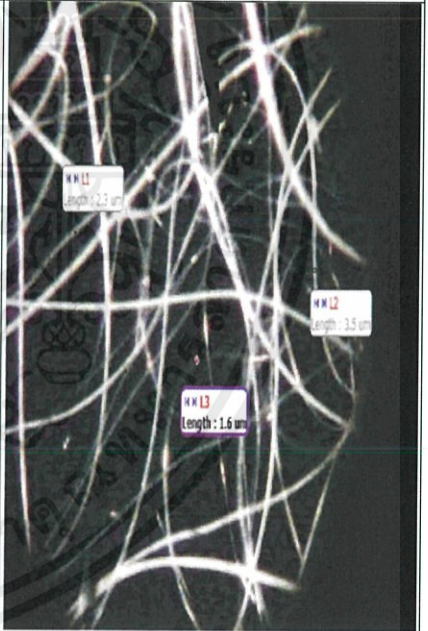
หัวเข็มเบอร์ 24 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.55 mm. ค่าความต่างศักย์(V)15kV

อัตราเร็ว ($\mu\text{l}/\text{min}$)	ระยะห่าง (cm)	รูปจากผลการทดลอง	
		4x	11x
5	10		
	15		

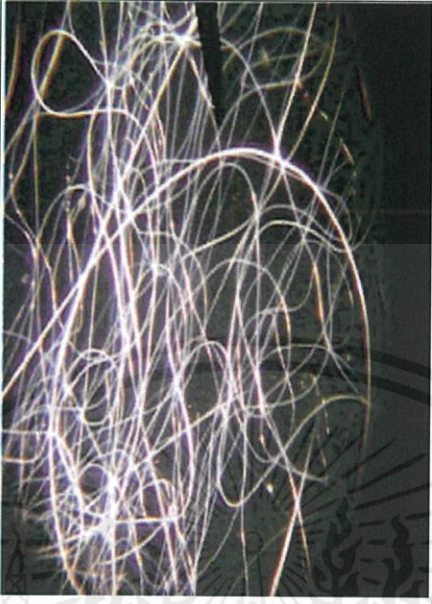
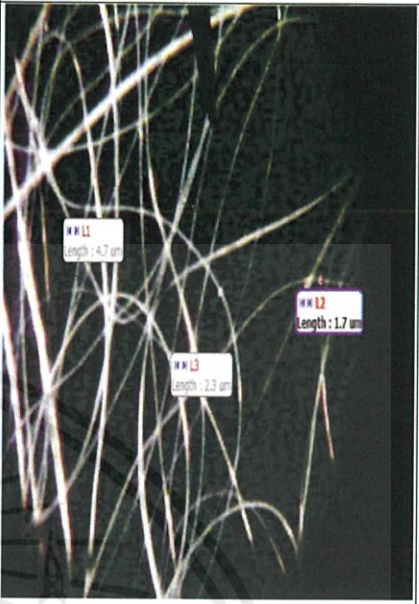

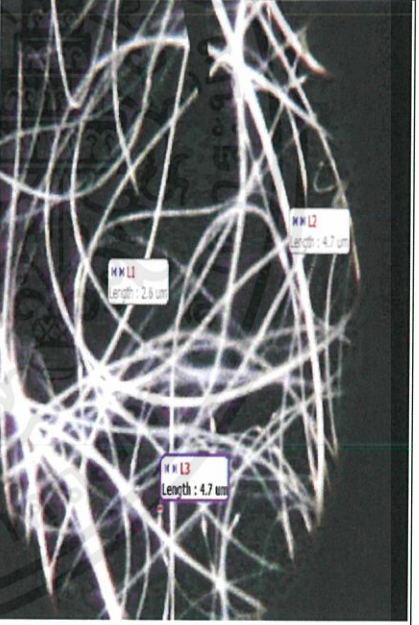
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราเร็ว ($\mu\text{l}/\text{min}$)	ระยะห่าง (cm)	รูปจากผลการทดลอง	
		4x	11x
8	10		
	15		

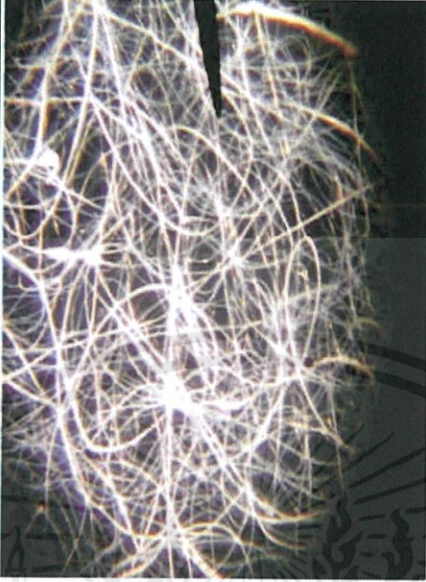
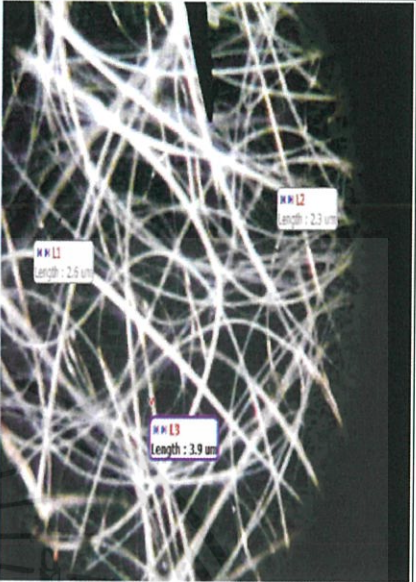

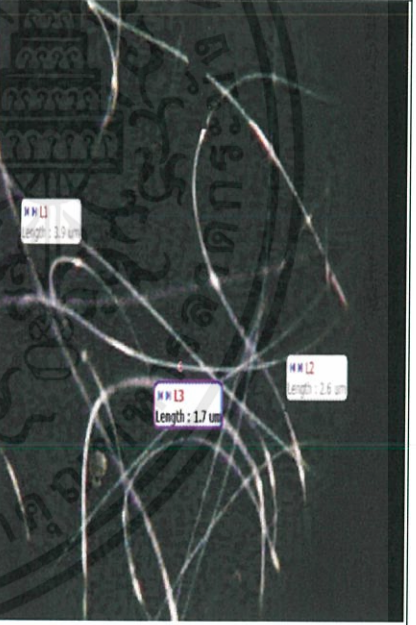
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราเร็ว ($\mu\text{l}/\text{min}$)	ระยะห่าง (cm)	รูปจากผลการทดลอง	
		4x	11x
10	10		
	15		

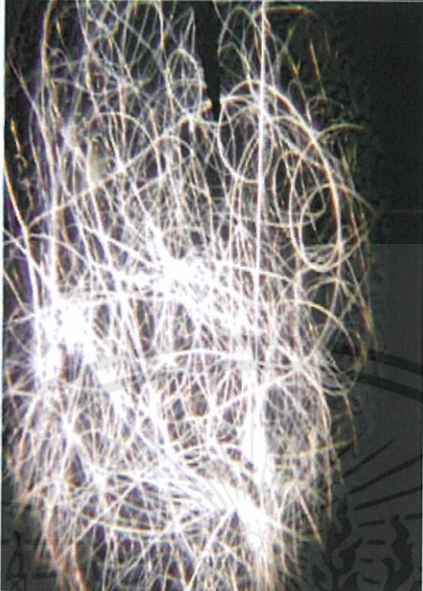
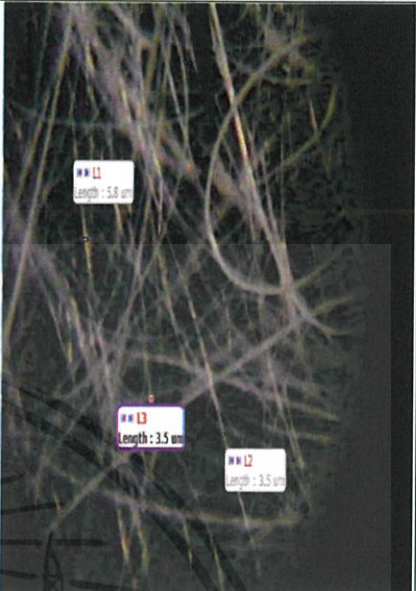

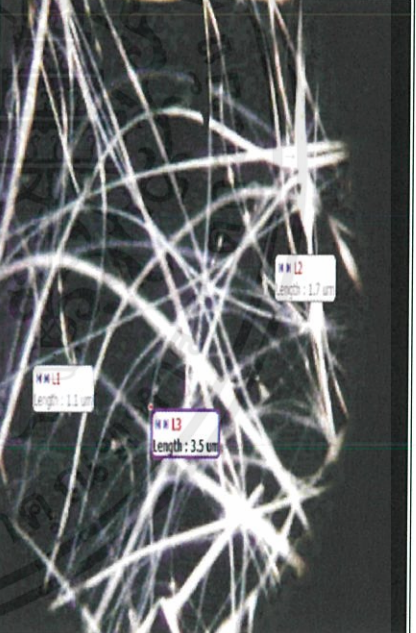
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราเร็ว ($\mu\text{l}/\text{min}$)	ระยะห่าง (cm)	รูปจากผลการทดลอง	
		4x	11x
20	10		
	15		

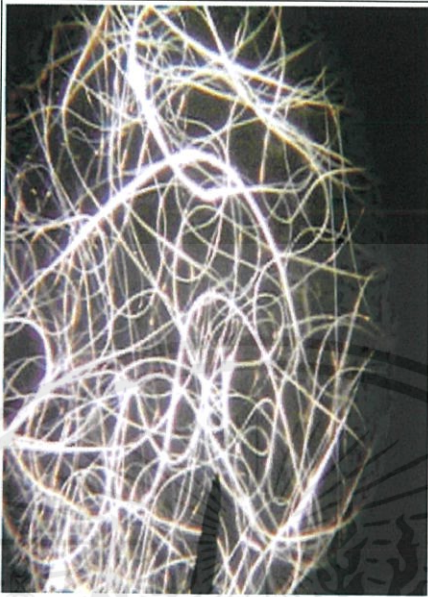
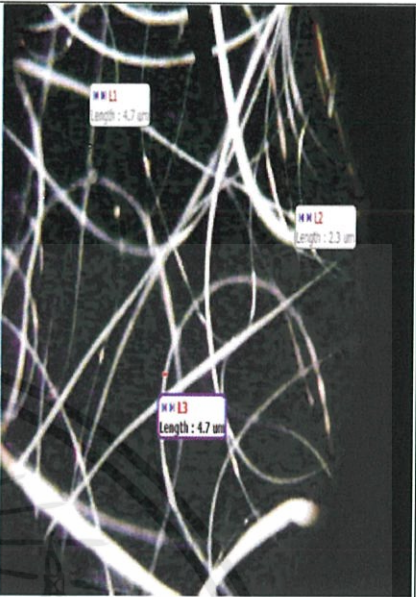
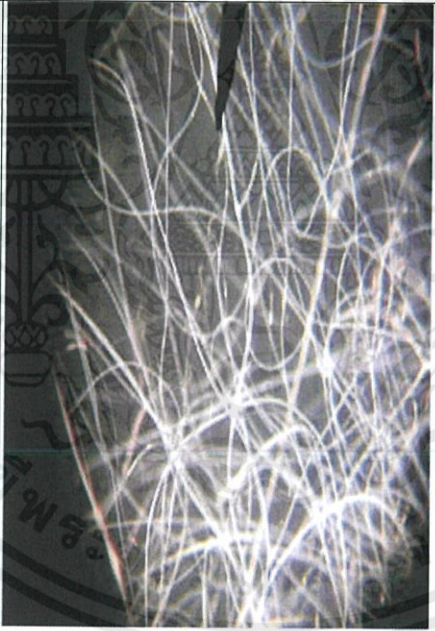

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราเร็ว ($\mu\text{l}/\text{min}$)	ระยะห่าง (cm)	รูปจากผลการทดลอง	
		4x	11x
40	10		
	15		

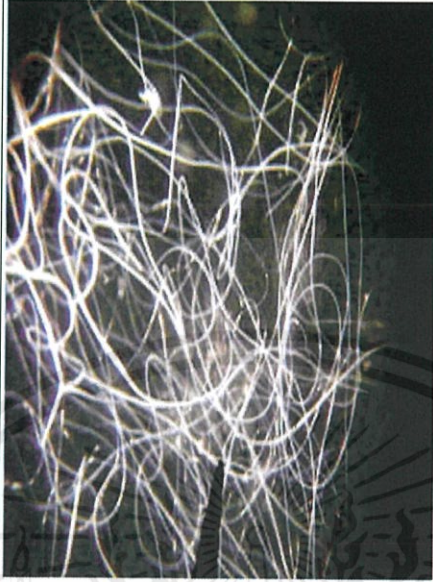
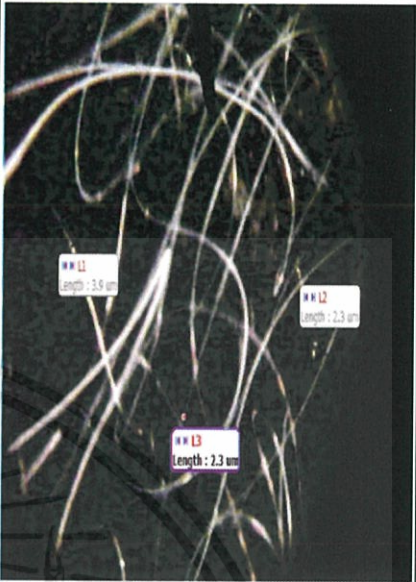


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราเร็ว ($\mu\text{l}/\text{min}$)	ระยะห่าง (cm)	รูปจากผลการทดลอง	
		4x	11x
60	10		
	15		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราเร็ว ($\mu\text{l}/\text{min}$)	ระยะห่าง (cm)	รูปจากผลการทดลอง	
		4x	11x
80	10		
	15		

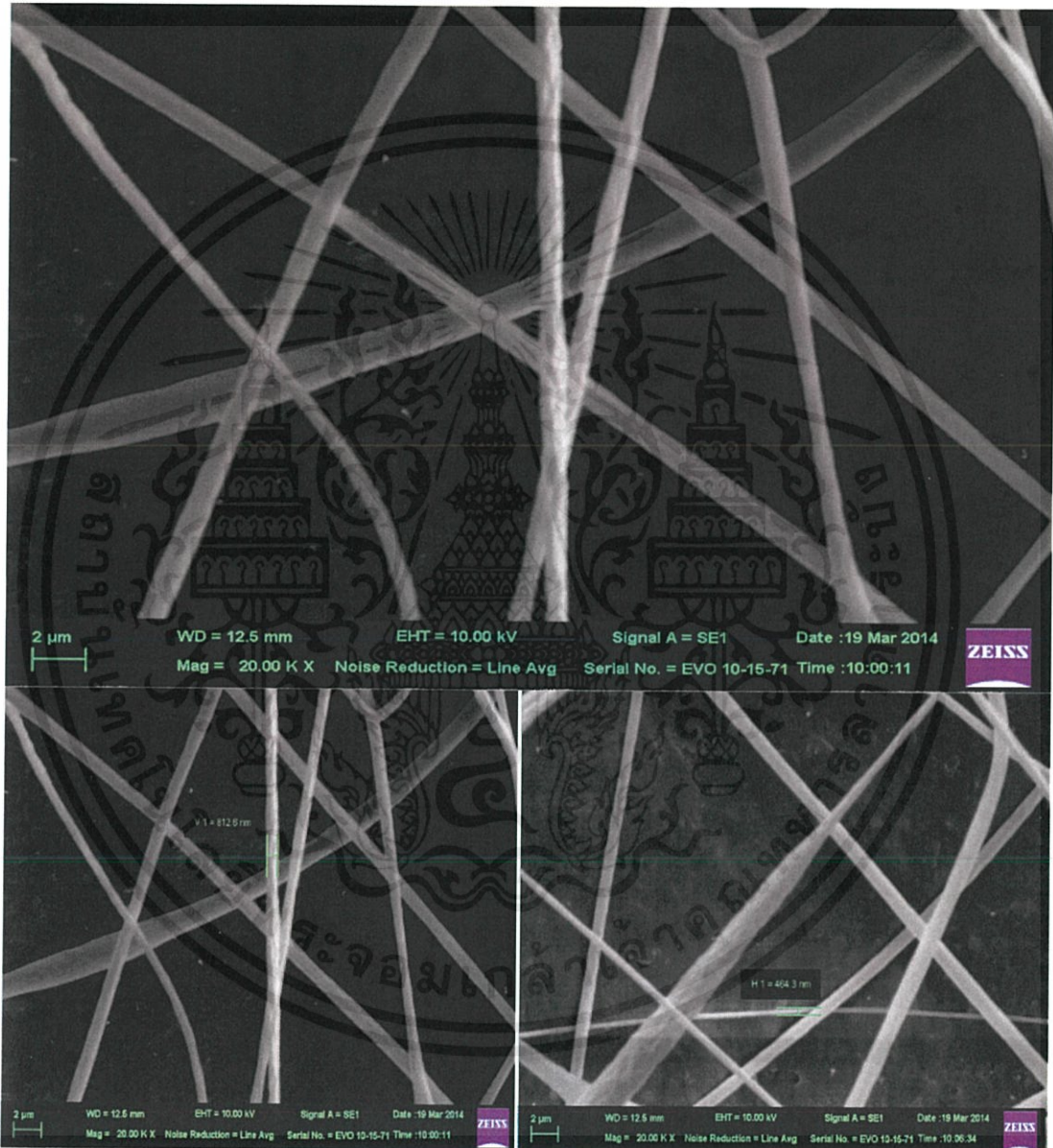
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราเร็ว ($\mu\text{l}/\text{min}$)	ระยะห่าง (cm)	รูปจากผลการทดลอง	
		4x	11x
100	10		
	15		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 สารละลายอัตราส่วน 1.5 : 10

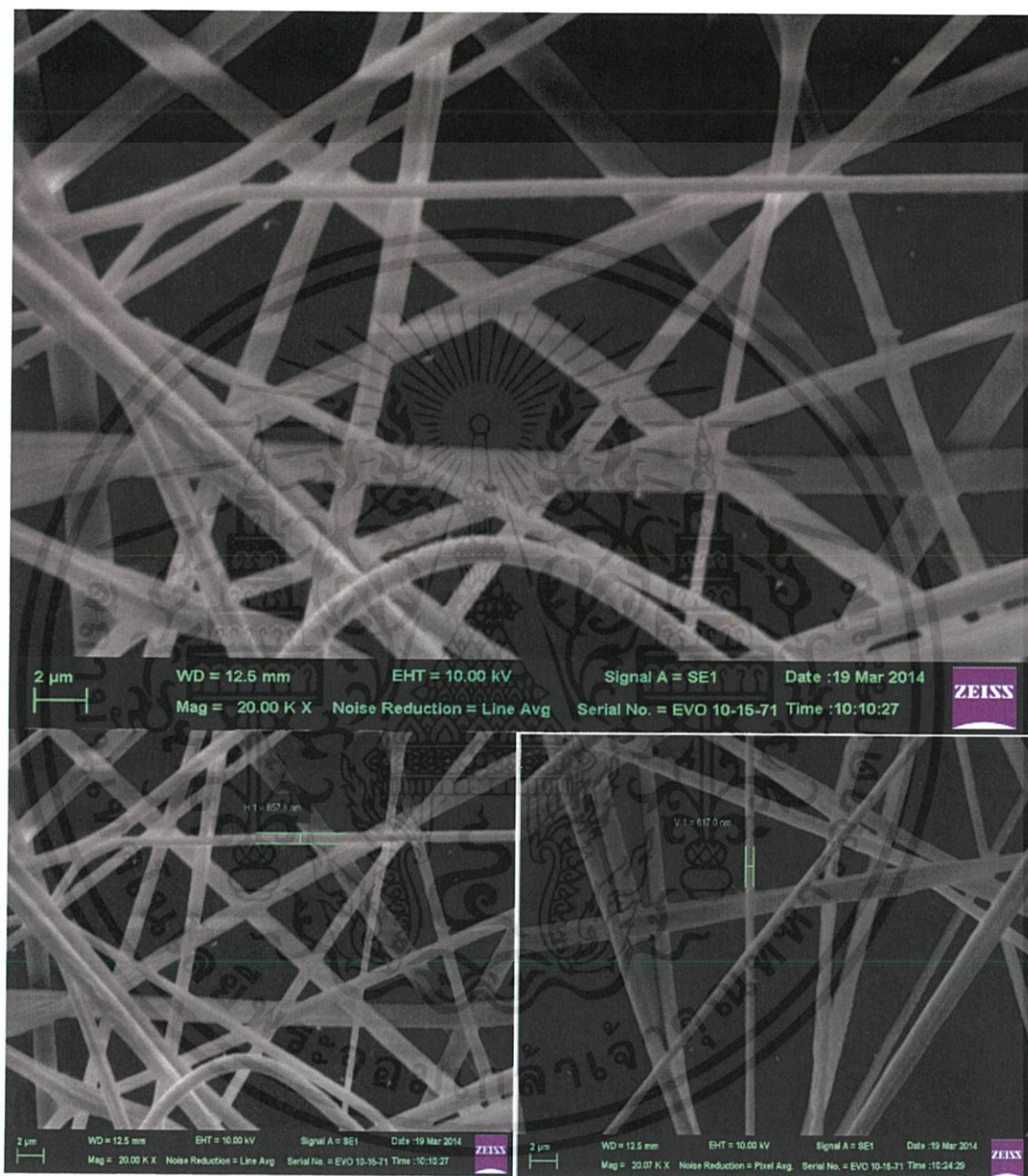
หัวเข็มเบอร์ 24 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.55 mm. ค่าความต่างศักย์ 15kV ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 10cm. อัตราการไหลของสารละลาย 140 $\mu\text{l}/\text{min}$ (ถ่ายภาพโดยเครื่อง Scanning Electron Microscope กำลังขยาย 20,000 เท่า)



ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดขนาดของเส้นใย = 696.07nm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

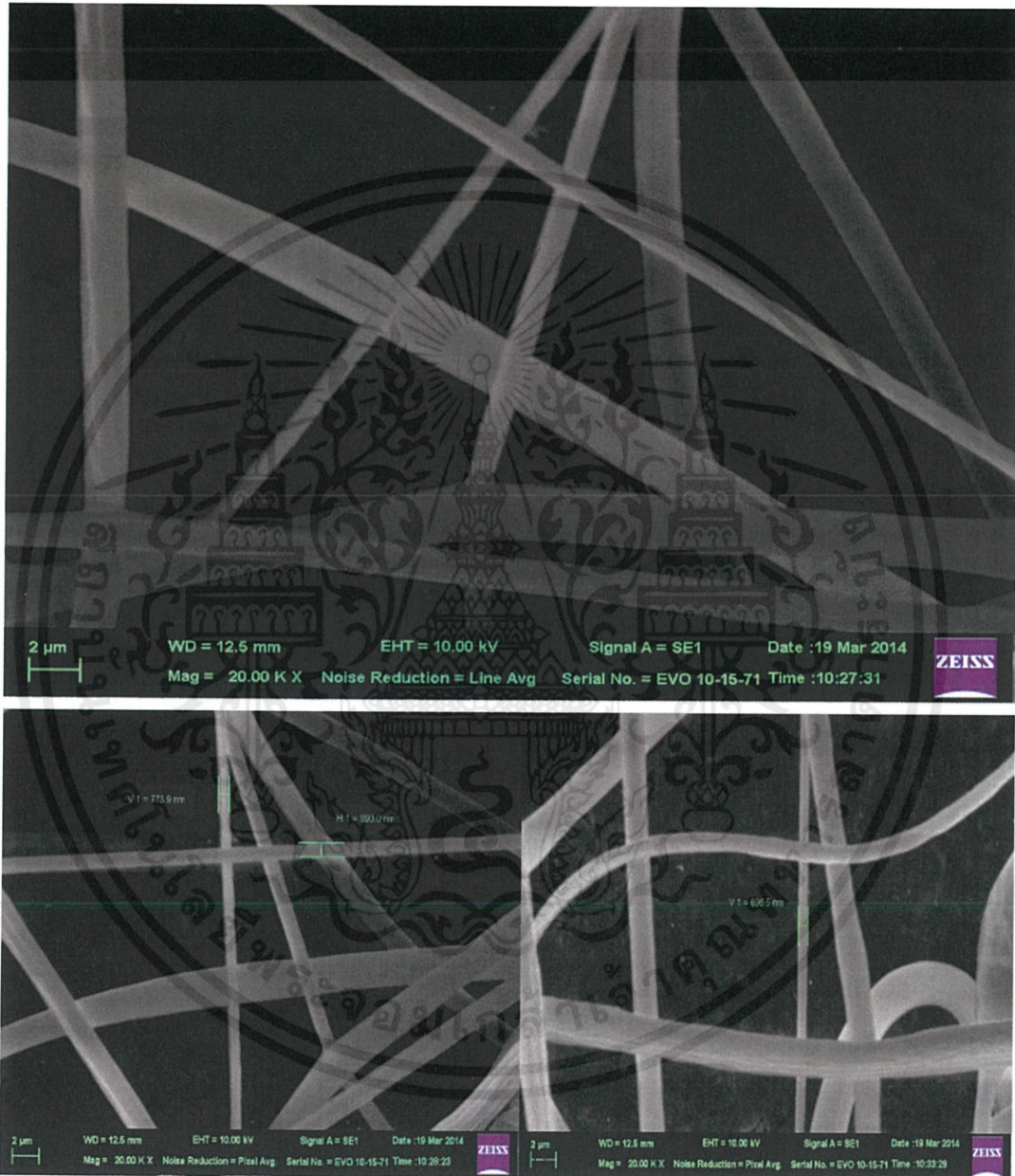
หัวเข็มเบอร์ 24 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.55 mm. ค่าความต่างศักย์ 15kV ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 15cm. อัตราการไหลของสารละลาย 140 $\mu\text{l}/\text{min}$ (ถ่ายภาพโดยเครื่อง Scanning Electron Microscopeกำลังขยาย 20,000 เท่า)



ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดขนาดของเส้นใย = 618.40nm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวเข็มเบอร์ 24 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.55 mm. ค่าความต่างศักย์ 15kV ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 10cm. อัตราการไหลของสารละลาย 150 $\mu\text{l}/\text{min}$ (ถ่ายภาพ โดยเครื่อง Scanning Electron Microscopeกำลังขยาย 20,000 เท่า)



ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดขนาดของเส้นใย = 773.90nm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

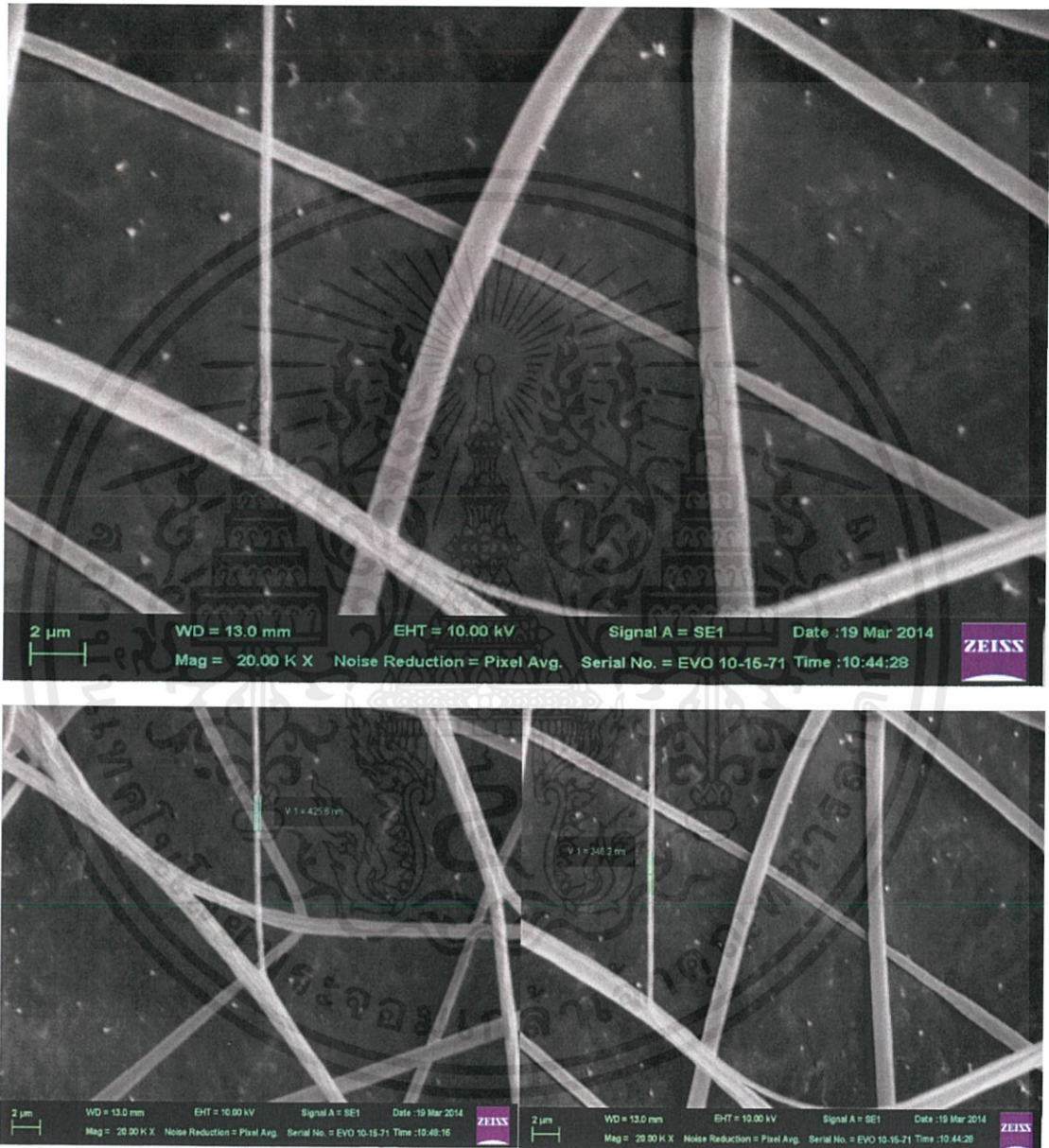
หัวเข็มเบอร์ 24 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.55 mm. ค่าความต่างศักย์ 15kV ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 15cm. อัตราการไหลของสารละลาย 150 $\mu\text{l}/\text{min}$ (ถ่ายภาพ โดยเครื่อง Scanning Electron Microscopeกำลังขยาย 20,000 เท่า)



ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดขนาดของเส้นใย = 696.50nm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

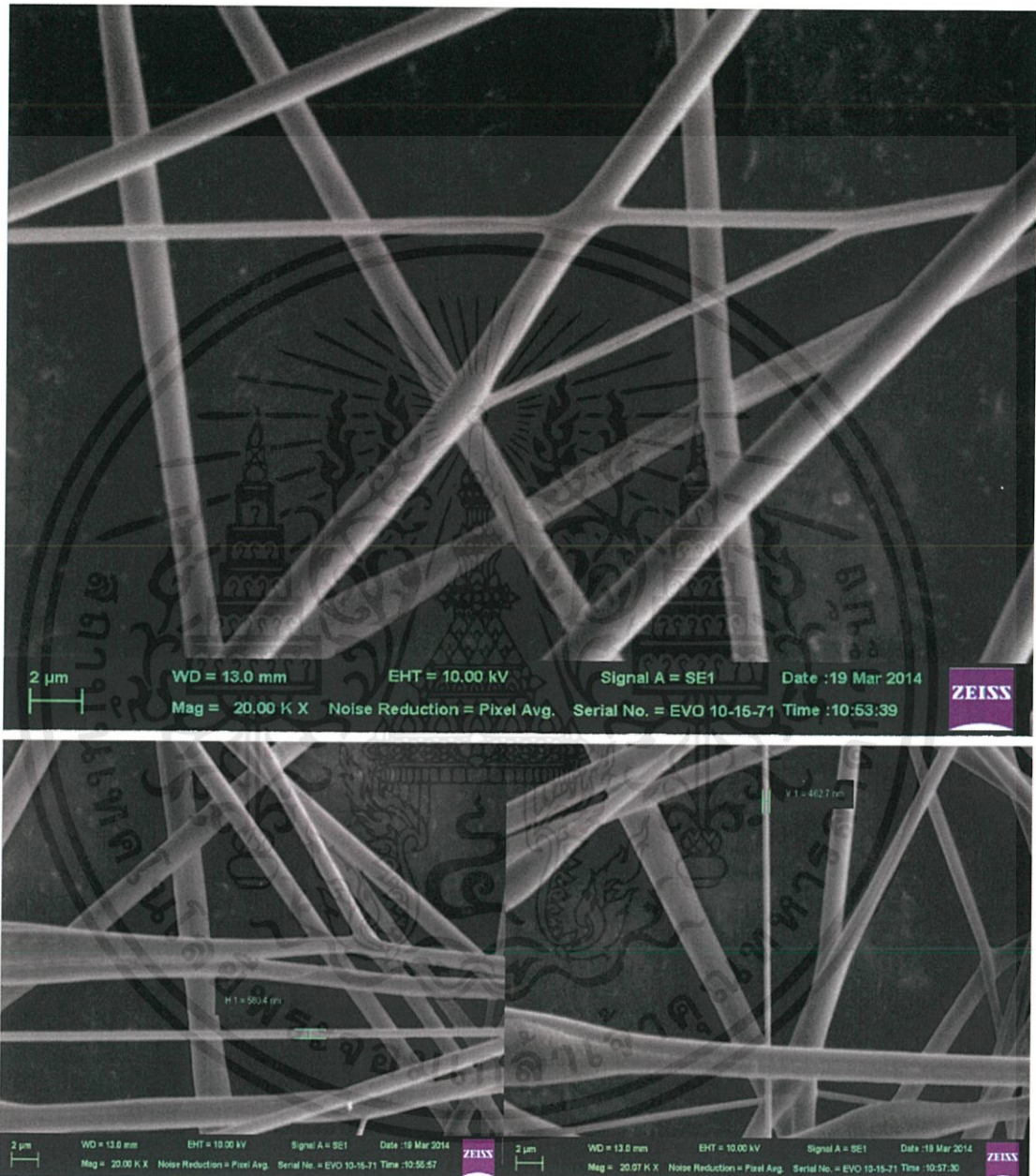
หัวเข็มเบอร์ 24 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.55 mm. ค่าความต่างศักย์ 15kV ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 10cm. อัตราการไหลของสารละลาย 160 $\mu\text{l}/\text{min}$ (ถ่ายภาพโดยเครื่อง Scanning Electron Microscopeกำลังขยาย 20,000 เท่า)



ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดขนาดของเส้นใย = 438.50nm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

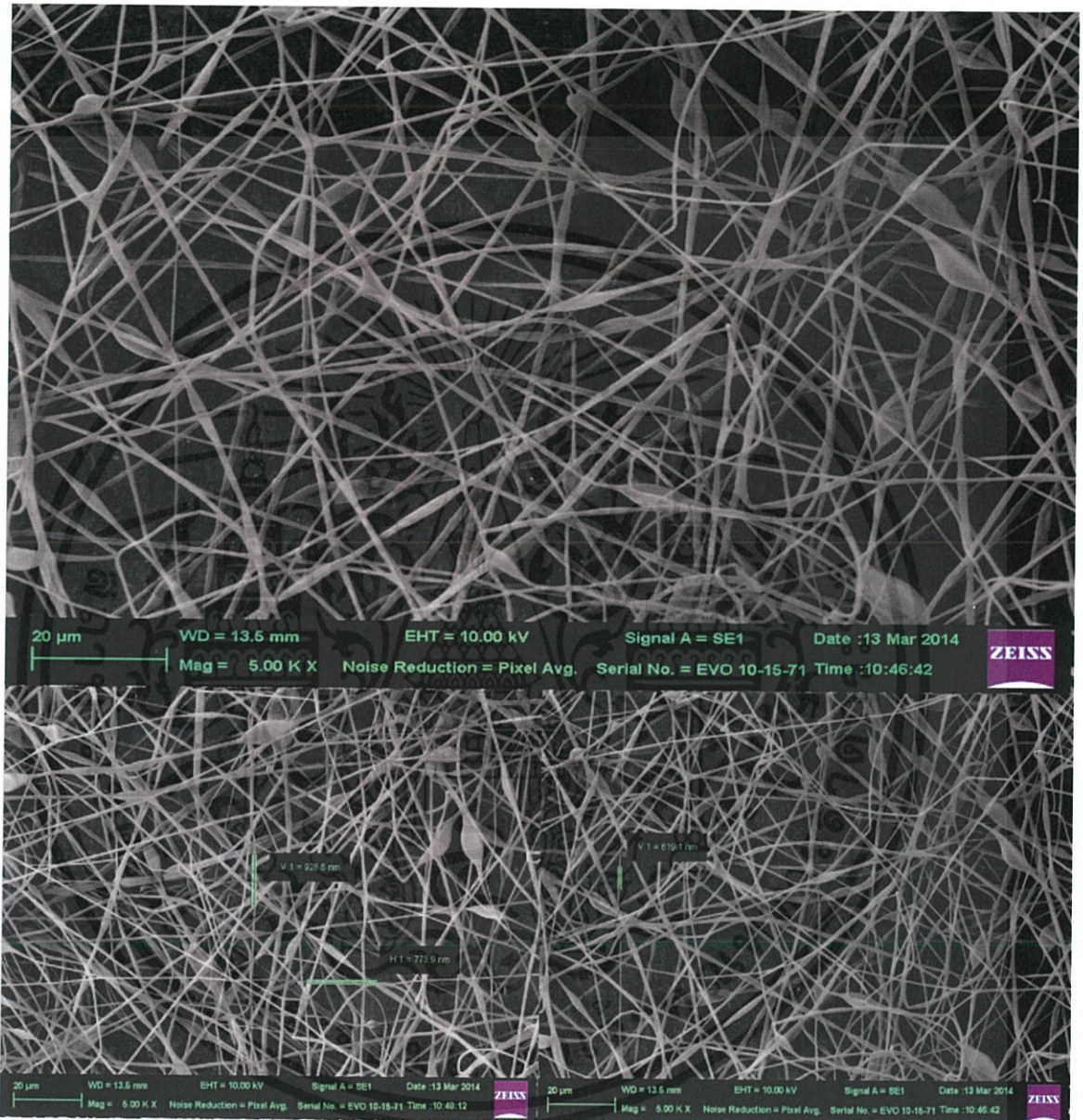
หัวเข็มเบอร์ 24 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.55 mm. ค่าความต่างศักย์ 15kV ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุ
รองรับ 15cm. อัตราการไหลของสารละลาย 160 $\mu\text{l}/\text{min}$ (ถ่ายภาพ โดยเครื่อง Scanning Electron
Microscopeกำลังขยาย 20,000 เท่า)



ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดขนาดของเส้นใย = 502.47nm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

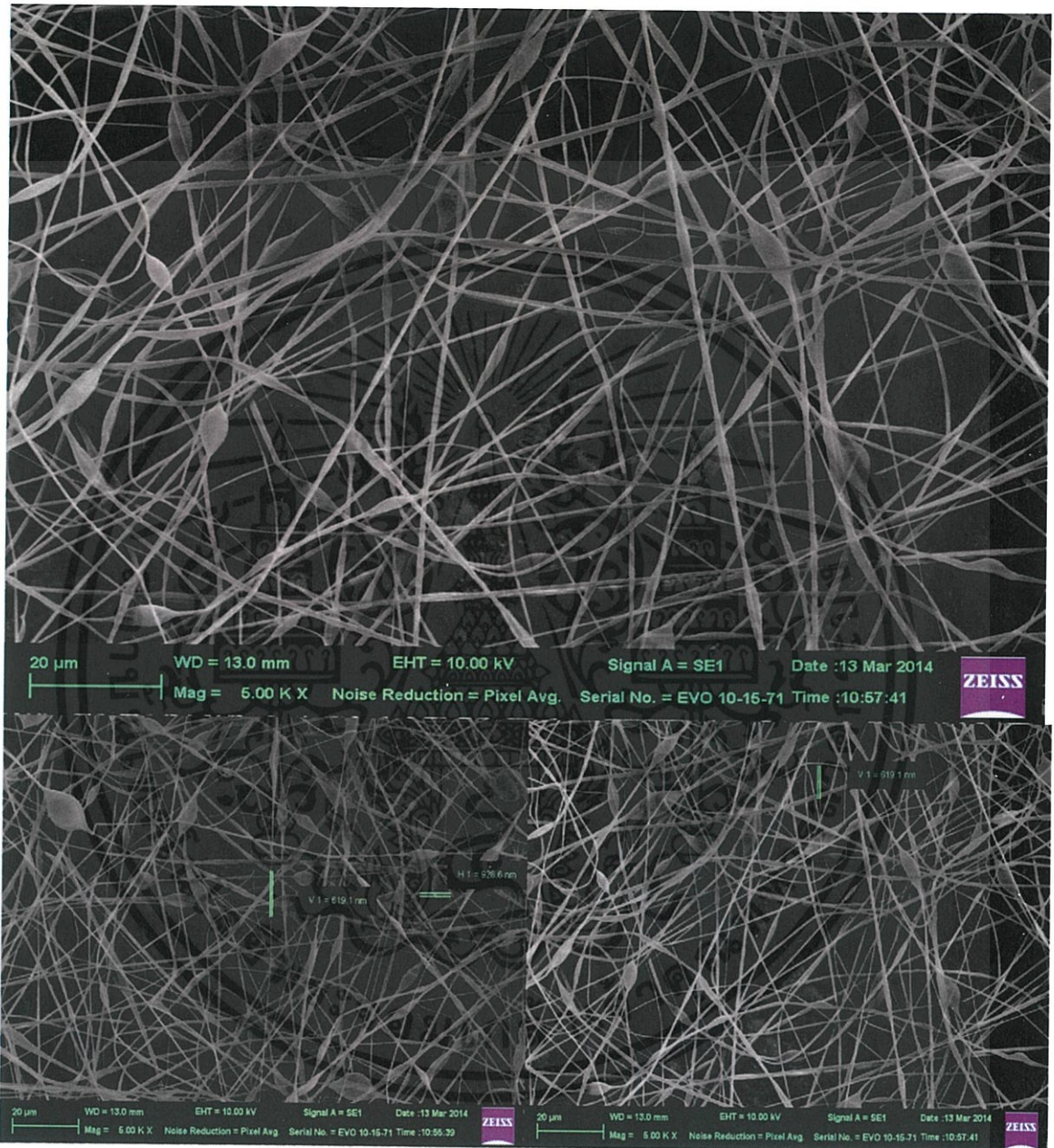
หัวเข็มเบอร์ 24 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.55 mm. ค่าความต่างศักย์ 15kV ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุ
 รองรับ 10cm. อัตราการไหลของสารละลาย 100 μ l/min (ถ่ายภาพโดยเครื่อง Scanning Electron
 Microscopeกำลังขยาย 5,000 เท่า)



ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดขนาดของเส้นใย = 773.87nm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวเข็มเบอร์ 24 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.55 mm. ค่าความต่างศักย์ 15kV ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุ
รองรับ 15cm. อัตราการไหลของสารละลาย 100 $\mu\text{l}/\text{min}$ (ถ่ายภาพโดยเครื่อง Scanning Electron
Microscopeกำลังขยาย 5,000 เท่า)



ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดขนาดของเส้นใย = 773.87nm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 อภิปรายผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อผลิตเส้นใยนาโน ที่ใช้หัวเข็มเหล็กที่มีขนาด 0.7 mm. , 0.6 mm. และ 0.55 mm. เมื่อทำการตั้งค่าอัตราเร็วในการฉีดที่ 800 $\mu\text{m}/\text{min}$, 600 $\mu\text{m}/\text{min}$, 400 $\mu\text{m}/\text{min}$,200 $\mu\text{m}/\text{min}$, 160 $\mu\text{m}/\text{min}$, 150 $\mu\text{m}/\text{min}$, 140 $\mu\text{m}/\text{min}$, 100 $\mu\text{m}/\text{min}$, 80 $\mu\text{m}/\text{min}$, 60 $\mu\text{m}/\text{min}$, 40 $\mu\text{m}/\text{min}$, 20 $\mu\text{m}/\text{min}$, 10 $\mu\text{m}/\text{min}$, 8 $\mu\text{m}/\text{min}$ และ 5 $\mu\text{m}/\text{min}$ หลังจากนั้นจ่ายสนามไฟฟ้าแรงสูงให้แก่ปลายเข็ม โดยเปลี่ยนค่าทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ 15 kV, 20 kV และ 25 kV สารละลายที่ปลายเข็มที่เป็นรูปครึ่งวงกลมจะยืดออกเป็นรูปร่างทรงกรวย และเมื่อสนามไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบมีค่ามากขึ้นจนถึงค่าวิกฤติ ค่าหนึ่งจะทำให้สารละลายพุ่งออกมาเป็นลำแล้วตกมายังกระดาษฟอยล์ที่มีระยะห่างจากปลายเข็ม 10 cm. และ 15 cm. การเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรทั้งหมด เพื่อสังเกตความเปลี่ยนแปลงต่อขนาดของเส้นใย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองผลิตเส้นใยนาโนด้วยระบบอิเล็กโทรสปินนิงด้วยสารพอลิสไตรีนผสมกับ ไคเมทิลฟอร์มาร์ไมด์ จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการฉีดสารละลายผ่านสนามไฟฟ้าสามารถทำให้ สารละลายเกิดเป็นเส้นใยได้จริง จากผลการทดลอง ถ้าใช้หัวเข็มที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก ให้ ค่าความต่างศักย์ที่พอดีไม่สูงมากเกินไป อัตราการไหลของสารละลายที่ต่ำแต่ไม่ต่ำจนทำให้เกิด บีดส์ ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับไม่เกิน 15 ซม. และที่สำคัญที่สุด คือ อัตราส่วนในการ ผสมสารละลาย ถ้าสารละลายมีความหนืดมากจะทำให้เส้นใยมีขนาดใหญ่ แต่ถ้าสารละลายมีความ หนืดน้อยลงจะทำให้เส้นใยมีขนาดเล็ก โดยเส้นใยที่ได้ที่มีขนาดใหญ่ที่สุด และไม่เกิดบีดส์นั้น ได้ จากการผสมสารพอลิสไตรีนกับไคเมทิลฟอร์มาร์ไมด์ในอัตราส่วน 3.0 : 10 โดยปริมาตร เข้มเบอร์ 22 (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 ซม.) ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ระยะห่างจากปลายเข็มถึง วัสดุรองรับ 10 ซม. อัตราการไหลของสารละลาย 800 ไมโครลิตร / นาที เงื่อนไขทั้งหมดนี้ทำให้ได้ เส้นใยเฉลี่ย 3.97 ไมโครเมตร ส่วนเส้นใยที่ได้ที่มีขนาดเล็กที่สุด และไม่เกิดบีดส์นั้น ได้จากการ ผสมสารพอลิสไตรีนกับไคเมทิลฟอร์มาร์ไมด์ในอัตราส่วน 1.5 : 10 โดยปริมาตร เข้มเบอร์ 24 (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.55 ซม.) ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ระยะห่างจากปลายเข็มถึงวัสดุ รองรับ 10 ซม. อัตราการไหลของสารละลาย 160 ไมโครลิตร / นาที เงื่อนไขทั้งหมดนี้ทำให้ได้เส้น ใยเฉลี่ย 438.5 นาโนเมตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทดลองมีการใช้เครื่อง High Voltage ซึ่งควรใช้ค่าความต่างศักย์ไม่เกิน 15 กิโลโวลต์ และควรใช้ด้วยความระมัดระวัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

R. Rangkupan, Electrospinning process of polymer melts, Ph.D. Dissertation, The University of Akron, Akron, OH, USA, 200

[Online]. Available : <http://en.wikipedia.org/wiki/Electrospinning>

[Online]. Available : <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/38972>

[Online]. Available: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104663220090001

00006



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้