



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การออกแบบและสร้างชุดเครื่องมืออิเล็กทรอสปินนิ่งสำหรับสังเคราะห์เส้นใยนาโน

Design and Construction of Electrospinning Apparatus
for Synthesis of Nanofibers

นางสาว ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณได้ ประจำปีงบประมาณ 2559

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การออกแบบและสร้างชุดเครื่องมืออิเล็กทรอสปินนิ่งสำหรับสังเคราะห์เส้นใยนาโน

Design and Construction of Electrospinning Apparatus
for Synthesis of Nanofibers

นางสาว ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

145938
สงขลานครินทร์
11 มิ.ย. 2560

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณได้ ประจำปีงบประมาณ 2559

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ การออกแบบและสร้างชุดเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่งสำหรับสังเคราะห์เส้นใยนาโน
แหล่งเงิน เงินรายได้
ประจำปีงบประมาณ 2559 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท
ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ ต.ค. 2558 ถึง ก.ย. 2559
หัวหน้าโครงการ นางสาว ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี สังกัด ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สจล.

บทคัดย่อ

ระบบอิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่งเป็นกระบวนการสังเคราะห์เส้นใยนาโนซึ่งเป็นวิธีที่ทำให้เส้นใยมีความต่อเนื่องเส้นผ่าศูนย์กลางคงที่ ขนาดระดับตั้งแต่นาโนเมตรถึงหลายไมโครเมตร ในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบอิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่งเพื่อการสังเคราะห์เส้นใยนาโน โดยระบบอิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่งมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ 4 ส่วน คือ เครื่องควบคุมกระบอกฉีดสารละลาย หลอดบรรจุสารละลายพร้อมเข็มโลหะ วัสดุรองรับ และแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงศักย์สูง เครื่องควบคุมกระบอกฉีดสารละลายประกอบด้วยแท่นขับเคลื่อนเชิงเส้นที่ขับเคลื่อนด้วยสเตปป์มอเตอร์ชนิด 5 เฟส ซึ่งถูกควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ อัตราการไหลของการฉีดสารละลายจะถูกป้อนผ่านทาง弁พิมพ์และแสดงผลทางจอแอลซีดี โดยสามารถป้อนหน่วยของอัตราการไหลได้ 4 แบบ คือ ไมโครลิตรต่อนาที ไมโครลิตรต่อชั่วโมง มิลลิลิตรต่อนาทีและมิลลิลิตรต่อชั่วโมง ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการแปลงอัตราการไหลเป็นจำนวนสเตปป์ของมอเตอร์ต่อหน่วยเวลาและส่งสัญญาณควบคุมไปยังสเตปป์มอเตอร์ผ่านทางชุดขับเคลื่อน หลอดบรรจุสารละลายที่ทำด้วยแก้วจะถูกติดตั้งบนชุดจับยึดของเครื่องควบคุมกระบอกฉีดสารละลายซึ่งทำด้วยพลาสติกเพื่อหลีกเลี่ยงการลัดวงจรของไฟฟ้าศักย์สูง แผ่นรองรับเส้นใยนาโนทำด้วยแผ่นพอลิเอทิลีน แผ่นกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงศักย์สูงเป็นของบริษัท Spellman รุ่น RH30PN60/100 ขนาด 0-30 kV, 2 mA ระบบที่พัฒนาขึ้นได้รับการทดสอบโดยการสังเคราะห์เส้นใยพอลิเมอร์จากโพลีสไตรีนที่ละลายในไดเมทิลฟอร์มาไมด์ด้วยความเข้มข้น 10 % w/v โดยใช้อัตราการไหลและสนามไฟฟ้าค่าต่าง ๆ เส้นใยพอลิเมอร์ที่ได้จะถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์เชิงแสง พบว่าได้เส้นใยที่มีความต่อเนื่องและเส้นใยนาโนซึ่งมีขนาด 163.2 nm โดยที่ลักษณะของเส้นใยมีความต่อเนื่อง

คำสำคัญ: อิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่ง, เส้นใยนาโน, สเตปป์มอเตอร์

Research Title Design and Construction of Electrospinning Apparatus for Synthesis of Nanofibers
Researcher Miss S.Tipawan Khlayboonme
Department of Physics, Faculty of Science, KMITL

ABSTRACT

Electrospinning is a process of creating nanofibers from a liquid polymer solution. Continuous fibers with constant diameter ranging from about 100 nm to several micrometers can be produced. This research is a development of electrospinning system for synthesis of nanofibers. The electrospinning system consists of four parts: a syringe pump, a glass syringe with a stainless steel needle, a metal collector plate and a high voltage power supply. The syringe pump comprises of a 5-phase stepping motor driven linear translator. The motor is controlled by a microcontroller. A flow rate of injection can be set via keypad and display on LCD display in four modes: microliter per minute, microliter per hour, milliliter per minute and milliliter per hour. Microcontroller converts the flow rate data to motor step per unit time and transfers control signals to drive the stepping motor of syringe pump via a motor driver. The glass syringe is mounted on a syringe holder of the syringe pump. The holder is made of plastic to prevent an electric shock. An aluminium sheet is used as a fibers collector. The high voltage of this system is provided by Spellman High Voltage DC Power Supply Model RHSR30PN60/100, 0-30 kV, 2 mA. The developed system was tested by synthesis of polymer nanofiber from 10 % w/v of polystyrene (PS) solution in dimethylformamide (DMF) with different flow rates and electric fields. The produced polymer fibers were observed by an optical microscope. The results show that the continuous fibers can be formed the fibers size is 163.2nm and the characteristics of the fibers are continuous.

Keywords: Electrospinning, Nanofiber, Stepping Motor

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยการวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ.....	VI
สารบัญตาราง.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย.....	2
1.5 แผนการดำเนินงานโครงการวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
16.1 เจริญพาณิชย์.....	3
16.2 เจริญสาธารณะ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เส้นใยนาโน (Nanofiber).....	4
2.2 เทคนิคการสังเคราะห์เส้นใยนาโน - Electrospinning.....	4
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะและขนาดของเส้นใยนาโน [19]	8
2.3.1 สมบัติของสารละลาย	8
2.3.2 ตัวแปรในระบบ	9
2.3.3 สภาพแวดล้อม	10
2.4 Syringe Driven	10

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	19
3.1 การออกแบบและพัฒนาระบบการสังเคราะห์เส้นใยนาโนด้วยวิธี Electrospinning.....	19
3.2 โปรแกรมควบคุมการทำงานชุดขับเคลื่อน Syringe	23
3.3 การสังเคราะห์เส้นใยนาโนจาก Electrospinning system.....	26
3.3.1 การสังเคราะห์ Polymer nanofibers.....	26
3.3.2 การสังเคราะห์ ZnO nanofibers.....	27
3.4 การวัดขนาดของ Nanofibers	28
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	29
4.1 ชุดเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์สำหรับสังเคราะห์เส้นใยนาโน	29
4.2 การสังเคราะห์เส้นใย.....	35
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	36
5.1 สรุปผลการวิจัย	36
5.1.1 ระบบสังเคราะห์เส้นใยนาโน.....	36
5.1.2 การสังเคราะห์เส้นใยนาโน.....	36
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	36
บทที่ 6 สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย.....	37
เอกสารอ้างอิง.....	41
ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย.....	43
หัวหน้าโครงการวิจัย.....	44

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2. 1 Drawing Process	5
ภาพที่ 2. 2 Taylor cone ที่เกิดขึ้นบริเวณปลายโลหะแหลม	5
ภาพที่ 2. 3 การฟอร์มตัวของเส้นนาโนเนื่องจากการเกิด Polarization ของโมเลกุลบริเวณผิวหน้าของสารละลายที่อยู่ตรงบริเวณปลายเข็ม	6
ภาพที่ 2.4 Basic Electrospinning Setup	7
ภาพที่ 2. 5 Taylor cone Formation ที่เกิดขึ้นบริเวณปลายโลหะแหลม ในขณะที่การป้อนแรงดันไฟฟ้าสูง	8
ภาพที่ 2. 6 New Pentagon stepping motor wiring diagram	11
ภาพที่ 2. 7 (a) Unipolar drive mode (b) Bipolar drive mode	12
ภาพที่ 2. 8 Pentagon 4-Phase Excitation Sequence (Full-Step Control Mode)	12
ภาพที่ 2. 9 Pentagon 4-5 Phase Excitation Sequence (Half-Step Control Mode)	13
ภาพที่ 2. 10 New Pentagon driver output circuit diagram	13
ภาพที่ 2. 11 ลักษณะการไหลของกระแสภายในขดลวดของมอเตอร์ เมื่อ Control Driver กระตุ้นมอเตอร์แบบ 4 Phase excitation sequence ในขณะที่มอเตอร์เริ่มทำงาน Step 0	15
ภาพที่ 2. 12 ลักษณะการไหลของกระแสภายในขดลวดของมอเตอร์ เมื่อ Control Driver กระตุ้นมอเตอร์แบบ 4 Phase excitation sequence ในขณะที่มอเตอร์หมุนไปที่ Step 1	15
ภาพที่ 2. 13 ลักษณะการไหลของกระแสภายในขดลวดของมอเตอร์ เมื่อ Control Driver กระตุ้นมอเตอร์แบบ 4 Phase excitation sequence ในขณะที่มอเตอร์หมุนไปที่ Step 2	16
ภาพที่ 2. 14 ลักษณะการไหลของกระแสภายในขดลวดของมอเตอร์ เมื่อ Control Driver กระตุ้นมอเตอร์แบบ 4-5 Phase excitation sequence ในขณะที่มอเตอร์เริ่มทำงาน ซึ่งก็คืออยู่ที่ Step 0	16
ภาพที่ 2. 15 ลักษณะการไหลของกระแสภายในขดลวดของมอเตอร์ เมื่อ Control Driver กระตุ้นมอเตอร์แบบ 4-5 Phase excitation sequence ในขณะที่มอเตอร์หมุนไปที่ Step 1	17
ภาพที่ 2. 16 ลักษณะการไหลของกระแสภายในขดลวดของมอเตอร์ เมื่อ Control Driver กระตุ้นมอเตอร์แบบ 4-5 Phase excitation sequence ในขณะที่มอเตอร์หมุนไปที่ Step 2	17

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 2. 17	ลักษณะการไหลของกระแสภายในขดลวดของมอเตอร์ เมื่อ Control Driver กระตุ้นมอเตอร์แบบ 4-5 Phase excitation sequence ในขณะที่มอเตอร์หมุนไปที่ Step 3.....	18
ภาพที่ 3. 1	ชุดขับเคลื่อน Syringe พร้อมฐานรองซึ่งทำมาจากวัสดุ Teflon สำหรับ an automated electrospinning apparatus.....	19
ภาพที่ 3. 2	Internal Block Diagram ของ SI-7502 IC ที่ต่อเชื่อมเข้ากับมอเตอร์.....	20
ภาพที่ 3. 3	Microcontroller Board MCS-51.....	21
ภาพที่ 3. 4	Connection Diagram ของ Microcontroller เบอร์ AT89C51ED2.....	21
ภาพที่ 3. 5	การเชื่อมต่อ 4x4 Matrix Keypad, MSC51-ATC8951 และ LCD Display.....	22
ภาพที่ 3. 6	การเชื่อมต่อกันระหว่างชุดขับเคลื่อน Syringe ซึ่งมีเข็มโลหะปลายแหลมติดอยู่ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง สารละลายที่บรรจุอยู่ภายใน Syringe และ Motor Driver Control & Display Box ของ Electrospinning System Setup.....	22
ภาพที่ 3. 7	ไดอะแกรมการทำงานของ an automated electrospinning apparatus.....	23
ภาพที่ 3. 8	Flow chart - 1.....	24
ภาพที่ 3. 9	Flow chart - 2.....	25
ภาพที่ 3. 10	กระบวนการทางเคมีและขั้นตอนการสังเคราะห์ Polymer nanofibers ด้วย Electrospinning setup.....	26
ภาพที่ 3. 11	กระบวนการทางเคมีและขั้นตอนการสังเคราะห์ ZnO nanofibers ด้วย Electrospinning setup.....	27
ภาพที่ 3. 12	Optical Microscope ติดตั้งอยู่ที่ Surface Physics and Plasma Applications Laboratory ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สจล.....	28
ภาพที่ 6. 1	ภาพถ่ายระบบการสังเคราะห์เส้นใยนาโนด้วย Electrospinning Technique.....	37
ภาพที่ 6. 2	LCD Display หลังจากเปิดเครื่อง และ รอคำสั่ง.....	37
ภาพที่ 6. 3	LCD Display ในขณะที่จะทำการป้อนความยาวของ Syringe.....	38
ภาพที่ 6. 4	LCD Display ในขณะที่จะทำการป้อนค่าปริมาตรของ Syringe.....	38
ภาพที่ 6. 5	LCD Display ในขณะที่จะทำการป้อนปริมาตรของสารละลายที่ต้องการฉีด.....	38
ภาพที่ 6. 6	LCD Display เมื่อทำการเลือกหน่วยอัตราเร็วในขณะที่ฉีดสารละลาย.....	38
ภาพที่ 6. 7	LCD Display ในขณะที่จะทำการป้อนอัตราเร็วของการฉีดสารละลาย.....	39
ภาพที่ 6. 8	LCD Display ในขณะที่มอเตอร์ทำงาน.....	39
ภาพที่ 6. 9	LCD Display เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการฉีดสารละลาย.....	39
ภาพที่ 6. 10	Polymer nanofiber ที่สังเคราะห์ได้จากเครื่องมือชุดอิเล็กทรอนิกส์ป็นิ่ง ที่ได้ทำการสร้างและพัฒนาขึ้นมา.....	40

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 6. 11 ZnO nanofiber ที่สังเคราะห์ได้จากเครื่องมือชุดอิเล็กทรอนิกส์สปinning ที่ได้ทำการสร้างและพัฒนาขึ้นมา	40
---	----



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2. 1 Excitation Mode แบบ 4-Phase excitation sequence	14
ตารางที่ 2. 2 Excitation Mode แบบ 4-5 Phase excitation sequence	14



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีว่ามนุษย์กำลังก้าวเข้าสู่การเผชิญกับปัญหาการลดลงของแหล่งปริมาณพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิล นอกจากนี้กระบวนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลยังทำให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน สารประกอบบอร์แกนิกที่ระเหยได้ เช่น Hydrofluorocarbons เป็นต้น ซึ่งก๊าซเหล่านี้ส่งผลทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน รวมทั้งแหล่งน้ำและสภาพแวดล้อมเป็นมลพิษ ซึ่งได้มีการคาดการณ์ว่าก่อนปี ค.ศ. 2075 จะมีประเทศต่าง ๆ ทั่วโลกต้องเผชิญกับปัญหาแหล่งน้ำที่สะอาดและมลพิษทางอากาศเพิ่มขึ้นเป็น 75% [1] การลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลต่าง ๆ ลง จึงเป็นวิถีทางโดยตรงที่จะลดและชะลอความเป็นพิษของสภาพแวดล้อม การพัฒนาเทคโนโลยีเทคโนโลยีสีเขียว (green technology) ที่มีประสิทธิภาพสำหรับการสร้างพลังงานทดแทน และ การบำบัดมลพิษทั้งทางอากาศและน้ำ จึงสิ่งจำเป็นที่ต้องร่วมกระทำไปพร้อมกันอีกด้วย

เส้นใยนาโน (Nanofibers) จัดเป็นวัสดุทางนาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) ที่มีความเหมาะสมที่จะแก้ปัญหาด้านพลังงานและสภาพแวดล้อม จนมีกลุ่มนักวิจัยกลุ่มหนึ่งได้ตีพิมพ์บทความเรื่อง “Electrospun nanofibers: solving global issue” [2] เส้นใยนาโนถูกนำมาประยุกต์ใช้กับงานหลากหลายด้านด้วยกัน [3,4] เช่น ขั้วไฟฟ้าในแบตเตอรี่ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (Optoelectronics) อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ระดับนาโน (Nanoelectronics devices) งานทางด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ (Tissue Engineering and tissue repair) หรือแม้กระทั่งเป็นตัวกรองหรือดักจับสารพิษที่มีอยู่ในอากาศและน้ำ (Membranes and Filters) เนื่องจากสมบัติของเส้นใยนาโนที่มีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรที่ค่อนข้างสูง สมบัติเชิงไฟฟ้า เชิงแสง เชิงความร้อน และ เชิงกลที่ดีขึ้นตามขนาดของเส้นใยที่ลดลง

Electrospinning ถือได้ว่าเป็นกระบวนการการสังเคราะห์เส้นใยนาโนที่มีประสิทธิภาพในสร้างเส้นใยและมีต้นทุนในการสร้างชุดเครื่องมือค่อนข้างต่ำ นอกจากนี้ยังสามารถสร้างเส้นใยได้มีขนาดเล็กจนถึงน้อยกว่า 2 nm สร้างเส้นใยที่เป็นเส้นเดี่ยวหรือเป็นกลุ่มของเส้นใยได้ อีกทั้งยังสามารถใช้สร้างเส้นใยนาโนได้ด้วยกันหลายชนิด [3] เช่น เส้นใยนาโนของโพลีเมอร์ เส้นใยนาโนของเซรามิกส์ เส้นใยนาโนของตัวนำไฟฟ้า และโปรงแสงกลุ่มเซรามิก ทั้งแบบที่มีการเคลือบและเจือปนสารบางอย่างลงไปบนตัวเส้นใย ตัวอย่างเช่น Ruthenium dye coated TiO₂ nanofibers และ Al-doped ZnO nanofibers ระบบการสร้างเส้นใยนาโนด้วย Electrospinning เป็นระบบที่นิยมใช้กันมากกับอุตสาหกรรมหลายประเภท [5-7] ตัวอย่างเช่น อุตสาหกรรมการผลิต สิ่งทอ ยา อุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์และเซ็นเซอร์ เป็นต้น

โครงการวิจัยนี้จึงเป็นการนำเสนอการออกแบบและสร้างชุดเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์สำหรับการสังเคราะห์เส้นใยนาโน องค์ประกอบพื้นฐานของชุดเครื่องมือ ได้แก่ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง หลอดบรรจุของเหลวที่ต้องการสร้างเป็นเส้นใยซึ่งใช้เป็นกระบอกฉีดยาพร้อมด้วยปลายเข็มโลหะ และฐานรองรับเส้นใยที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นกราวด์ อัตราการฉีดหรือการผลัดกันของของเหลวจากกระบอกฉีดยาจะถูกควบคุมด้วย Stepping motor โดยโครงการวิจัยนี้จะเน้นการสร้างระบบควบคุมอัตราการฉีดสารออกจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบอกลัดผ่านทางการขับเคลื่อนของ Stepping motor ด้วยการดันก้านสูบของกระบอกลัด พร้อมทั้งด้วยชุดควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ที่มีการสั่งการทำงานผ่านทางแป้นพิมพ์ขนาดเล็ก โดยประสิทธิภาพและความถูกต้องของชุดเครื่องมือจะถูกทดสอบด้วยการสังเคราะห์เส้นใยของ polystyrene

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อออกแบบและสร้างชุดเครื่องมือสำหรับสังเคราะห์เส้นใยนาโนไฟเบอร์ด้วยกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่ง

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 ออกแบบและสร้างชุดเครื่องมือสำหรับสังเคราะห์เส้นใยนาโนไฟเบอร์

1.3.2 ทดสอบประสิทธิภาพและความถูกต้องของชุดเครื่องมือด้วยการทดสอบการสังเคราะห์เส้นใยของ polystyrene

1.3.3 ศึกษาเงื่อนไขของระบบอิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่งที่มีต่อขนาดของเส้นใย

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

ในการพัฒนาชุดเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่งสำหรับการสังเคราะห์เส้นใยนาโน จะแบ่งการดำเนินงานออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

1. การออกแบบและสร้างชุดเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่ง
2. การศึกษาการผสมสารเพื่อนำมาสร้างเป็นเส้นใยนาโน
3. การทดสอบการใช้งาน

1.4.1 ขั้นตอนการออกแบบและสร้างชุดเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่ง เป็นการออกแบบส่วนประกอบทั้งหมดของระบบ ทั้งขนาด และวิธีการจับยึดหลอดฉีดยาเข้ากับชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ รวมทั้งการสร้างชุดควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์พร้อมด้วยชุดคำสั่งที่สามารถควบคุมและสั่งงานผ่านทางแป้นพิมพ์ขนาดเล็ก

1.4.2 ขั้นตอนการศึกษาการผสมสาร เป็น การศึกษาวิธีการผสมสารระหว่าง Dimethylformamide ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีสูตรเคมี $(\text{CH}_3)_2\text{NC}(\text{O})\text{H}$ กับ Polystyrene ซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดพลาสติกใส เพื่อนำมาสร้างเป็นเส้นใยนาโนของ Polystyrene

1.4.3 ขั้นตอนการทดสอบการใช้งาน เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของชุดเครื่องมือ เช่น ความถูกต้องในการควบคุมอัตราการฉีดยาของสารเคมีออกจากกระบอกลัด

1.5 แผนการดำเนินงานโครงการวิจัย

การดำเนินงาน	ระยะเวลา												
	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	
1. ขั้นตอนการสร้างและ ออกแบบชุดเครื่องมือ	←————→												
2. ขั้นตอนการศึกษาการผสม สารสำหรับสังเคราะห์เป็น เส้นใย						←————→							
3. ขั้นตอนการทดสอบและ ปรับปรุงการใช้งาน								←————→					
5. สรุปผลและเขียนรายงาน												←————→	

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

16.1 เชิงพาณิชย์

งานวิจัยนี้เป็นจุดเริ่มต้นหนึ่งของการพัฒนาองค์ความรู้เพื่อนำไปสู่การพัฒนาชุดเครื่องมือสำหรับการสังเคราะห์เส้นใยนาโนซึ่งการผลิตเส้นใยนาโนถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่จะนำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีสีเขียวที่มีประสิทธิภาพในการสร้างพลังงานสะอาด จึงถือได้ว่าเป็นการวิจัยในลักษณะบูรณาการที่มีความรู้พื้นฐานทางวิทยาศาสตร์เชิงลึกควบคู่ไปกับการประยุกต์ใช้งาน อีกทั้งยังเป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาองค์ความรู้ในการพัฒนาชุดเครื่องมือที่ถูกควบคุมและสั่งงานผ่านทางแป้นพิมพ์ขนาดเล็ก (keypad) โดยจุดเริ่มต้นนี้เน้นขั้นตอนการสร้าง ออกแบบ และ พัฒนาชุดเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ป็นิ่งที่สามารถสังเคราะห์เส้นใยนาโน

16.2 เชิงสาธารณะ

สามารถนำไปประโยชน์/แก้ปัญหา ให้กับ สังคม ชุมชน ท้องถิ่น ผลงานวิจัยที่จะได้ดำเนินการวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งที่จะนำไปสู่การพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทน จึงถือได้ว่าเป็นส่วนหนึ่งของการนำพาประเทศไปสู่สังคมคาร์บอนต่ำและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นการสร้างภูมิคุ้มกันด้านการค้าจากเงื่อนไขด้านสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังเป็นการแก้ปัญหาทางด้านทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เส้นใยนาโน (Nanofiber)

Nanofiber ถูกให้จำกัดนิยามว่า เป็นเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 100 nm แต่สำหรับในทางอุตสาหกรรมสิ่งทอแล้ว คือ เส้นใยที่จัดว่าเป็นเส้นใยระดับนาโนคือเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 1000 nm เนื่องจากมีขนาดของเส้นใหญ่ที่เล็ก จึงทำให้ nanofiber มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (surface-to-volume ratio) สูง ตัวอย่างเช่น ถ้า nanofiber มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 nm จะมี surface-to-volume ratio เป็น 1,000 เท่าของเส้นผมที่ผมที่มีขนาด 20 micron นอกจากนี้ เส้นใยนาโนจะมีขนาดของรูพรุนที่เล็กด้วย ส่งผลทำให้มีสมบัติพิเศษต่าง ๆ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้า หรือสมบัติทางชีวภาพ ปัจจุบันเริ่มมีการประยุกต์ใช้เส้นใยนาโนทางด้านต่าง ๆ อย่างกว้างขวางดังเช่น การประยุกต์ใช้งานของเส้นใยนาโนพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ ไม่เป็นพิษและมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ

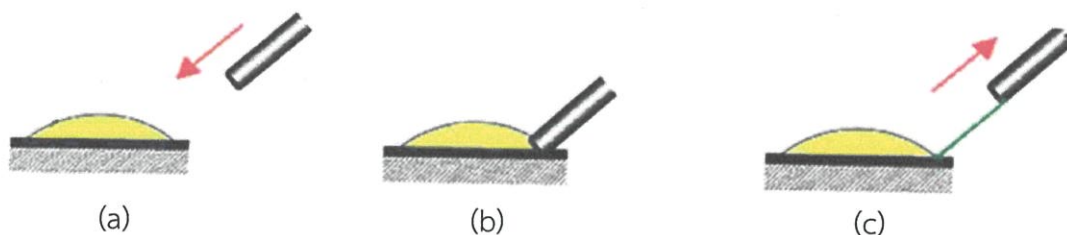
เส้นใยนาโนสังเคราะห์ที่มีการสังเคราะห์ขึ้นมานั้น โดยมากจะถูกสังเคราะห์เพื่อนำมาใช้งานด้วยคุณสมบัติพิเศษทางด้านการนำไฟฟ้าและคุณสมบัติเชิงกลของโครงสร้างนี้ เช่นการสังเคราะห์เส้นใยนาโนพอลิเมอร์หรือเส้นใยคาร์บอน เพื่อจะนำมาใช้ในการผลิตและสร้างอุปกรณ์ระดับนาโนทางอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เช่นการใช้เป็นตัวนำไฟฟ้า สร้างตัวเก็บประจุ ทรานซิสเตอร์ ไดโอด และนำมาใช้งานทางด้านเทคโนโลยีการเก็บข้อมูลหรือใช้ในระบบการส่งผ่านข้อมูลเช่น การสร้างหน่วยความจำและชิปสำหรับคอมพิวเตอร์และการสังเคราะห์เส้นใยวัสดุผสมระดับนาโน เพื่อนำมาใช้เตรียมหน่วยโครงสร้างพื้นฐานสำหรับการสร้างอุปกรณ์และโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ที่มีคุณสมบัติพิเศษที่สามารถตอบสนองความต้องการในการใช้งานของมนุษย์ได้ เช่น การนำมาใช้งานทางด้านเทคโนโลยีทางด้านการแปลงรูปพลังงานและการกักเก็บพลังงาน เช่น แบตเตอรี่หรือในเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell) หรือใช้เป็นส่วนผสมในเชิงโครงสร้างสำหรับใช้งานในเทคโนโลยีการบินทั้งในอากาศและในอวกาศหรือแม้กระทั่งประยุกต์ใช้สำหรับระบบการขนส่งยาและเกี่ยวกับประโยชน์ทางวิศวกรรมเนื้อเยื่อ เป็นต้น

2.2 เทคนิคการสังเคราะห์เส้นใยนาโน - Electrospinning

เส้นใยนาโนที่มีขนาดอยู่ในช่วงตั้งแต่ระดับไมโครเมตรจนถึงนาโนเมตรนั้นเป็นที่ได้รับความสนใจจากกลุ่มวิจัยที่ทำงานในด้านการวิจัยทางด้าน nano-electronics และ optical sensors เป็นอย่างมาก [8-9] เส้นใยนาโนที่ถูกนำไปประยุกต์กับในงานเหล่านี้จะต้องถูกสังเคราะห์ขึ้นทั้งในรูปแบบที่อาจเป็น 1D, 2D หรือ 3D network โดยลักษณะของเส้นใยที่ได้นั้นขึ้นอยู่กับเทคนิคและกระบวนการที่นำไปใช้ในการสังเคราะห์ ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี [10] ตัวอย่างเช่น Drawing process, Template Synthesis process, Phase Separation process, Self-Assembly process โดย Electrospinning [11] ซึ่งเป็นเทคนิคที่จะถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ โดยการสังเคราะห์เส้นใยแต่ละวิธีจะทำให้ได้ลักษณะของเส้นใยที่แตกต่างกันไป เช่น Drawing Process เป็นกระบวนการสังเคราะห์เส้นใยนาโนที่ทำให้เส้นใยเพียงเส้นเดียว ซึ่งทำได้หยุดสารละลาย sodium citrate ลงใน chloroauric acid ในขนาดปริมาตรระดับที่ทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของหยดมีขนาดระดับไมโครเมตร หลังจากนั้นจึง Micropipette จุ่มลงไปในหยดของสารใกล้กับ contact line

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

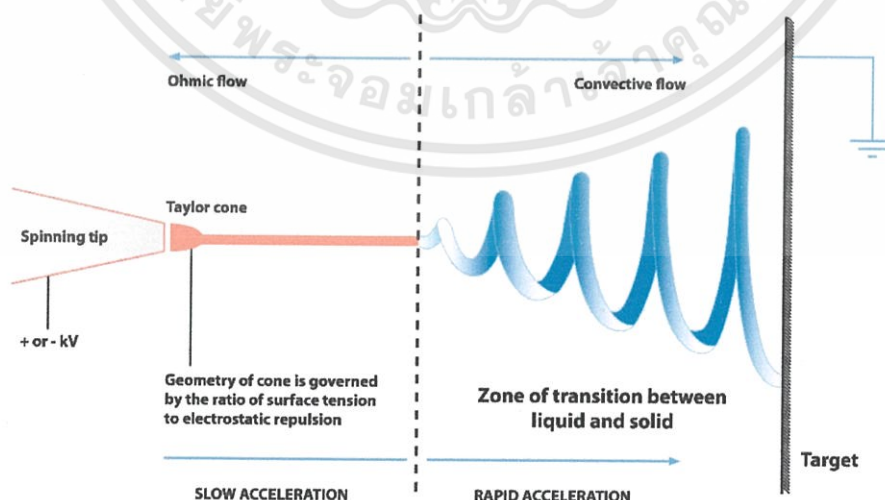
จากนั้นดึง Micropipette ออกอย่างรวดเร็วโดยใช้ความเร็วประมาณ 1×10^{-4} m/s เส้นใยนาโนจะถูกดึงออกมาพร้อม ๆ กับการระเหยไปของตัวทำละลาย ซึ่งเป็นดังภาพที่ 2. 1



ภาพที่ 2. 1 Drawing Process [12]

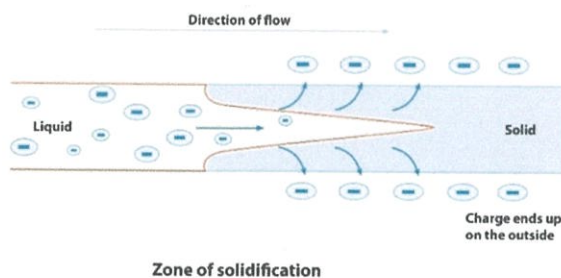
เทคนิคนี้จะต้องมีการทำซ้ำหลายครั้งจึงจะได้นาโนไฟเบอร์ในปริมาณที่มากพอต่อการนำไปใช้ ระบบจึงไม่สามารถทำได้อย่างต่อเนื่อง ในกระบวนการ drawing จะต้องใช้วัสดุที่มี viscoelastic เพียงพอต่อการเปลี่ยนรูปร่างในระหว่างการดึงโดยเทคนิคนี้มักจะเรียกได้อีกอย่างว่า dry spinning at a molecular level เป็นวิธีการที่ค้นพบโดย Ondarcuhu and Joachim ในปี 1998

สำหรับ Electrospinning เป็นกระบวนการที่ได้มีการจดสิทธิบัตรครั้งแรกในปี ค.ศ. 1902 ที่สหรัฐอเมริกา [8] แต่ก็ถูกล้มเลิกไปโดยไม่มีผู้ใดกล่าวถึง จนกระทั่ง ในปี 1990 เทคโนโลยีนาโนเริ่มเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์ กลุ่มนักวิจัยจึงพยายามเสาะแสวงหาวิธีการหรือกระบวนการในการสังเคราะห์วัสดุที่มีขนาดระดับนาโน โดยเฉพาะเส้นใยที่มีขนาดของเส้นระดับนาโนเมตร โดยการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิงเป็นหนึ่งในวิธีการที่กลุ่มนักวิจัยทั้งหลายได้ให้ความสนใจและนำมาประยุกต์ใช้กันมาก [9] Electrospinning เป็นวิธีการสังเคราะห์เส้นใยให้มีขนาดระดับนาโนเมตรได้ โดยของเหลวจะต้องเกิดการจัดเรียงตัวของอะตอมหรือโมเลกุลในลักษณะของรูปทรงกรวย ณ บริเวณปลายแหลมของโลหะ ภายใต้สภาวะที่มีการป้อนสนามไฟฟ้าความเข้มสูง รูปทรงกรวยของของเหลวดังกล่าวเรียกว่า Liquid metal cone หรือที่รู้จักกันในชื่อ Taylor cone ดังภาพที่ 2. 2 โดยเมื่อเกิดสภาวะสมดุลระหว่างแรงทางไฟฟ้า (Electric force) แรงตึงผิว (Surface tension) ของของเหลว และ อัตราการไหลเข้าแทนที่ของของเหลว แล้ว จะส่งผลทำให้ลำของของเหลวพุ่งออกมาสู่ free space ได้อย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 2. 2 Taylor cone ที่เกิดขึ้นบริเวณปลายโลหะแหลม [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.3 การฟอร์มตัวของเส้นนาโนเนื่องจากการเกิด Polarization ของโมเลกุลบริเวณผิวหน้าของสารละลายที่อยู่ตรงบริเวณปลายเข็ม [15]

การจัดเรียงตัวของโมเลกุลของของเหลวจะมีลักษณะเป็น Taylor cone นั้นเกิดขึ้นได้เนื่องจากการให้สนามไฟฟ้าความเข้มสูงกับปลายเข็ม (Needle tip) จะทำให้โมเลกุลของของเหลวอยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าความเข้มสูงเกิด polarization ของโมเลกุลบริเวณพื้นผิวหน้า ดังภาพที่ 2.3 เกิดการเคลื่อนที่ของประจุมาสะสมกับบริเวณผิวหน้าของของเหลวที่บริเวณปลายเข็ม เมื่อเพิ่มความเข้มของสนามไฟฟ้าขึ้นอีกจนกระทั่งประจุที่มาสะสมกันเกิดมีแรงผลักทางไฟฟ้ามากจนเอาชนะแรงตึงผิวได้ โมเลกุลของของเหลวก็จะหลุดออกมาจากพื้นผิว และ ถ้ามีการแทนที่ของโมเลกุลของของเหลวอย่างเหมาะสมแล้ว ร่วมกับเกิดความสมดุลระหว่างแรงผลักทางไฟฟ้ากับแรงตึงผิวของของเหลว จะทำให้โมเลกุลของของเหลว นั้นหลุดออกจากพื้นผิวในลักษณะเป็นเส้นอย่างต่อเนื่องได้ โดย Taylor [16] ได้เสนอความสัมพันธ์ของค่าสนามไฟฟ้าที่ทำให้โมเลกุลของของเหลว นั้นหลุดออกมา (Critical applied voltage) ตามความสัมพันธ์นี้

$$V_C^2 = 4 \ln\left(\frac{2h}{R}\right) (1.3\pi R\gamma) (0.09)$$

เมื่อ	V_C	คือ	แรงดันไฟฟ้าวิกฤต (Critical applied voltage)
	h	คือ	ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับฐานรองรับเส้นใย
	R	คือ	รัศมีด้านนอกของเข็มฉีดยา
	γ	คือ	แรงตึงผิวของของเหลว

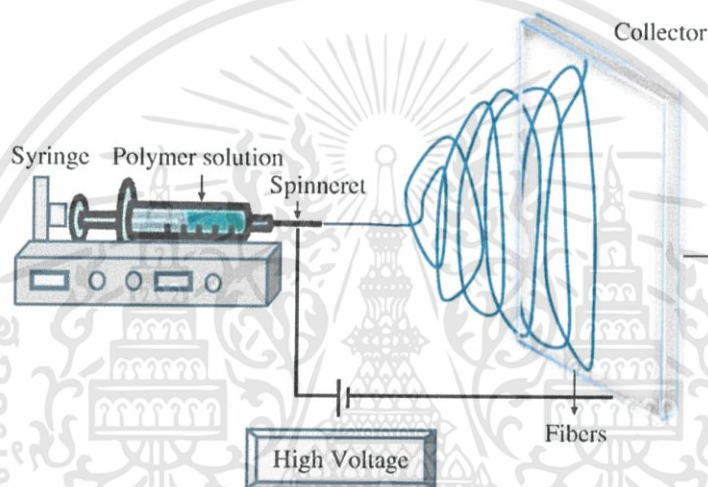
จากสมการนี้เห็นได้ว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นตัวกำหนดจุดเริ่มต้นของการเกิดเส้นใย ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้านี้มีค่าขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับเส้นใย ขนาดรัศมีของปลายเข็ม และ แรงตึงผิวของของเหลว นอกจากนี้ Ludus และ คณะ [17] ยังได้กล่าวถึงการจัดเรียงของโมเลกุลของของเหลวที่เกิดขึ้นเองที่ปลายเข็ม โดยค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตมีความสัมพันธ์กับแรงตึงผิวดังนี้

$$E_C = \sqrt[4]{4\gamma\rho/\varepsilon^2}$$

เมื่อ	ρ	คือ	ความหนาแน่นมวลของของเหลว (Liquid mass density)
	g	คือ	ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
	γ	คือ	แรงตึงผิวของของเหลว
	ε	คือ	permittivity

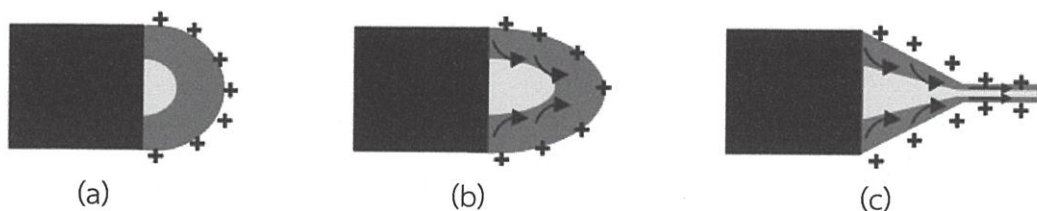
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ทั้งสอง เห็นได้ว่า สนามไฟฟ้าเป็นตัวแปรสำคัญในการกำหนดการเริ่มต้นการพุ่งหรือเคลื่อนที่ออกจากปลายเข็มของของเหลว จากหลักการทำงานของกระบวนการการสังเคราะห์เส้นใยนาโนด้วยอิเล็กโทรสปินนิง จึงต้องประกอบด้วยโลหะปลายแหลมที่เป็นเข็ม ที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนของของเหลวที่ปลายเข็ม ติดตั้งไว้กับ Liquid Reservoir ที่สามารถทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายโมเลกุลของของเหลวให้กับปลายเข็ม พร้อมระบบผลัดดันของเหลวเข้าสู่ปลายเข็ม เมื่อเกิดการสูญเสียของโมเลกุลนั้นเนื่องจากการถูกดึงออกไปเป็นเส้นใยได้อย่างต่อเนื่อง องค์ประกอบพื้นฐานของชุดเครื่องมืออิเล็กโทรสปินนิงจึงประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ๆ คือ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง (High voltage power supply) หลอดบรรจุสารละลายที่ติดเข็มโลหะ (Liquid reservoir syringe with needle tip) และฐานรองรับที่เป็นโลหะ (Metal collector) มีลักษณะเป็นดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 Basic Electrospinning Setup

หลักการทำงานของอิเล็กโทรสปินนิงอาศัยแรงทางไฟฟ้าที่เกิดจากศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง (High Voltage Power Supply) ในการทำให้เกิดแรงดึงของสารละลายที่บรรจุอยู่ในหลอดบรรจุสารละลายที่ติดเข็มโลหะ (Syringe with Needle) เพื่อให้เส้นใยตกลงบนวัสดุรองรับที่เป็นโลหะ (Metal Collector) ซึ่งเป็นอีกด้านหนึ่งของขั้วไฟฟ้า ในขณะที่ศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบยังมีค่าไม่สูงพอ จะไม่พบการเกิดขึ้นของเส้นใยนาโน แต่พบว่าที่บริเวณปลายเข็มโลหะซึ่งติดอยู่กับหลอดบรรจุสารละลายมีสารละลายจำนวนหนึ่งรวมตัวกันเป็นหยดรูปร่างครึ่งทรงกลม ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากแรงตึงผิว (Surface tension) แต่เมื่อให้แรงดันไฟฟ้ากำลังสูงแก่ระบบ จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าครอบคลุมตรงส่วนปลายเข็มของโลหะและมีประจุเกิดขึ้นในทิศตรงกันข้ามกับแรงตึงผิว เกิดแรงผลัทางไฟฟ้าส่งผลให้รูปร่างครึ่งทรงกลมของสารละลายที่อยู่ปลายเข็มยืดออกเป็นรูปร่างทรงกรวยที่เรียกว่า Taylor's cone และเมื่อสนามไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบมีค่าเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่งจะเกิดแรงผลัให้สารละลายพุ่งออกมาเป็นลำ (Solution jet) ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 Taylor cone Formation ที่เกิดขึ้นบริเวณปลายโลหะแหลมในขณะทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าสูง [18]

- (a) เมื่อแรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่า Critical Value จะส่งผลเพียงทำให้เกิดชั้นพื้นผิวของประจุของสารละลายมาสะสมกันบริเวณปลายแหลมของโลหะ
- (b) เมื่อแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น แต่ยังมีค่าน้อยกว่า Surface tension ของสารละลาย
- (c) เมื่อแรงดันไฟฟ้ามีค่ามากพอหรือสูงกว่า Critical value จะส่งผลทำให้สารละลายนั้นสามารถเคลื่อนที่ออกมาเป็นเส้นใย

ต่อมาลำของสารละลายนี้จะยืดออกจนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงถึงระดับนาโนเมตรแล้วตกลงบนวัสดุรองรับในลักษณะที่ไม่เกิดการถักทอ (nonwoven nanofibers) หรือเป็นเพียงการวางเรียงตัวซ้อนกันเป็นชั้น ๆ ในระหว่างที่เส้นใยถูกดึงออกมาจากปลายเข็มโลหะ จะเกิดปรากฏการณ์การบิดโค้งที่ไม่มีเสถียรภาพ (bending instability) สารละลายจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ผิวของสารละลาย และด้วยสนามไฟฟ้าภายนอกที่เกิดขึ้นเนื่องจากความต่างศักย์ระหว่างปลายเข็มถึงวัสดุรองรับที่เป็นตัวนำทั้งสอง จึงส่งผลให้เกิดลำของประจุขึ้น เกิดเป็นแรงที่ไม่สมดุล (unbalance force) ทำให้สารละลายยืดออกในเส้นทางที่ซับซ้อน ส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยลดลงอย่างมาก และยิ่งรอบการบิดโค้งมีจำนวนมากขึ้น จะทำให้สารละลายยืดออกเป็นเส้นที่เล็ก รวมถึงการระเหยออกไปของตัวทำละลาย ในที่สุดเกิดเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับนาโนได้ ในโครงการพิเศษนี้ใช้เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงเนื่องจากเป็นระบบที่มีความซับซ้อนน้อย ต้นทุนต่ำ และสามารถควบคุมขนาดและปริมาณการเกิดเส้นใยได้ต่อเนื่องมากยิ่งขึ้น

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะและขนาดของเส้นใยนาโน [19]

ปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อลักษณะและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง สามารถแบ่งตัวแปรที่สำคัญได้ 3 กลุ่ม คือ สมบัติสารละลาย พารามิเตอร์ของ electrospinning system และ สภาพแวดล้อมในขณะที่ทำการสังเคราะห์เส้นใย

2.3.1 สมบัติของสารละลาย

สมบัติของสารละลายเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่มีผลต่อลักษณะและความต่อเนื่องของเส้นใยเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งขนาดและรูปร่างของเส้นใย สมบัติของสารละลายดังกล่าวได้แก่ ความหนืด ความเข้มข้น สภาพการนำไฟฟ้า และ ค่าไดอิเล็กตริก

- 1) ความหนืดของสารละลาย (Solution Viscosity) ถ้าสารละลายมีความหนืดน้อย โมเลกุลของตัวทำละลาย ที่ไม่ได้จับกับโมเลกุลของพอลิเมอร์จะมีความหนาแน่นมาก ส่งผลให้จับตัวกันเป็นก้อนทรงกลม ลักษณะคล้ายเม็ดลูกปัด ที่เรียกว่า บีตส์ (Beat) เนื่องจากแรงตึงผิว แต่ในกรณีที่สารละลายมีความหนืดมาก จะเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของตัวทำละลายกับโมเลกุลของพอลิเมอร์มากขึ้น ส่งผลให้

สารละลายยี่ตออกดีขึ้นและลดการเกิดบิตส์ลงได้ แต่ถ้าสารละลายมีความหนืดมากเกินไป จะเกิดการแห้งตัวอย่างรวดเร็วที่ปลายเข็มโลหะทำให้เข็มอุดตันได้

- 2) *ความเข้มข้นของสารละลาย (Solution Concentration)* ถ้าใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นมากขึ้น จะได้เส้นใยที่มีบิตส์หรือหยดขนาดเล็กกลง แต่ถ้าความเข้มข้นของสารละลายมีค่ามากเกินไป จะลดปรากฏการณ์การบิดโค้งที่ไม่มีเสถียรภาพ ส่งผลให้เส้นทางการเคลื่อนที่ของสารละลายลดลง จะทำให้เส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้น
- 3) *สภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity)* เนื่องจากการยี่ตออกเป็นเส้นของสารละลายส่วนหนึ่ง เป็นผลของประจุที่ผิวของสารละลาย ดังนั้นถ้าสารละลายมีสภาพการนำไฟฟ้าที่ดีจะส่งผลให้มีประจุเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้การเพิ่มสภาพนำไฟฟ้าอาจทำได้โดยการเติมไอออน (ion) ลงในสารละลายซึ่งจะมีส่วนให้สารละลายยี่ตออกได้ดีขึ้นและช่วยลดการเกิดบิตส์ในเส้นใยอีกด้วย
- 4) *ค่าไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant)* ค่าไดอิเล็กตริกของตัวทำละลาย มีนัยสำคัญต่อกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิง ในแง่ที่ว่าหากสารละลายมีสมบัติทางไดอิเล็กตริกสูงจะช่วยลดการเกิดบิตส์และขนาดของเส้นใยลงได้ ดังนั้นอาจเติมตัวทำละลายที่มีค่าไดอิเล็กตริกสูง เช่น ไตเมทิลฟอมาไมด์ (N, N-Dimethylformamide) ลงในสารละลายเพื่อเพิ่มสมบัติทางไดอิเล็กตริก นอกจากนี้ยังพบว่าถ้าไดอิเล็กตริกมีค่าสูงจะส่งผลให้การบิดโค้งที่ไม่มีเสถียรภาพเกิดเพิ่มมากขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มพื้นที่การเกิดเส้นใยบนวัสดุรองรับ

2.3.2 ตัวแปรในระบบ

ปัจจัยที่สำคัญมากอีกกลุ่มหนึ่งในกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิง คือ ตัวแปรของระบบที่ใช้สังเคราะห์เส้นใย โดยตัวแปรกลุ่มนี้ล้วนมีผลต่อลักษณะของเส้นใยแต่ส่งผลน้อยกว่าตัวแปรในกลุ่มด้านสารละลาย

- 1) *แรงดันไฟฟ้า (Voltage)* โดยส่วนใหญ่หากแรงดันไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้ขนาดของเส้นใยเล็กลง รวมทั้งมีส่วนทำให้ตัวทำละลายระเหยได้เร็วขึ้น
- 2) *ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเข็มโลหะ (Diameter of Needle)* ถ้าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเข็มเล็กลง พบว่าขนาดของเส้นใยจะเล็กลงด้วย เนื่องจากความตึงผิวของหยดสารละลายมากขึ้น ทำให้ระยะเวลาที่เส้นใยยี่ตออกก่อนตกลงบนวัสดุรองรับมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเข็มที่มีขนาดเล็กเกินไปอาจไม่สามารถทำให้สารละลายไหลออกมาได้
- 3) *วัสดุรองรับ (Collector)* เนื่องจากกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิงต้องอาศัยสนามไฟฟ้าระหว่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับ ดังนั้นวัสดุรองรับควรมีสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า เช่น แผ่นทองแดง
- 4) *อุณหภูมิของสารละลาย (Temperature)* ถ้าอุณหภูมิของสารละลายสูงจะเพิ่มอัตราการระเหยให้สูงขึ้น สารละลายมีความหนืดน้อยลงและพอลิเมอร์ละลายในตัวทำละลายได้ดีขึ้น ส่งผลให้สารละลายยี่ตออกได้ง่ายและทำให้ขนาดของเส้นใยนาโนเล็กลงอีกด้วย
- 5) *อัตราการไหลของสารละลาย (Feed rate)* ถ้าอัตราการไหลมีค่ามากจะทำให้เส้นใยและบิตส์มีขนาดใหญ่มากขึ้นแต่ทั้งนี้การเพิ่มอัตราการไหลจะช่วยทำให้เส้นใยมีขนาด

ใหญ่ขึ้นระดับหนึ่งเท่านั้น เนื่องจากปริมาณสารละลายจะออกมามากเกินไป ส่งผลให้ตัวทำละลายระเหยออกไม่ทันดังนั้นเส้นใยที่ได้จะมีลักษณะเป็นหยด

- 6) ระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ (Tip and collector distance) ถ้าระยะห่างมีค่ามากขึ้น เส้นใยจะมีขนาดเล็กลงเพราะลำของสารละลายมีเวลาในการยืดออกนานมากขึ้น แต่ในบางกรณีเมื่อเพิ่มระยะห่างแต่ขนาดของเส้นใยมีค่ามากขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากสนามไฟฟ้ามีค่าน้อยลงทำให้แรงที่ทำให้สารละลายยืดออกนั้นน้อยลงอย่างไรก็ตาม หากระยะห่างมากเกินไปจะไม่เกิดเส้นใยขึ้นบนวัสดุรองรับ ดังนั้นการเพิ่มระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ สามารถทำได้เพียงระดับหนึ่งเท่านั้น

2.3.3 สภาพแวดล้อม

ผลของสภาพแวดล้อมที่มีผลต่อสารละลายและทำให้ลักษณะเส้นใยเปลี่ยนไป ได้แก่

- 1) ความชื้น (Humidity) ปริมาณความชื้นในอากาศอาจส่งผลต่อสารละลายพอลิเมอร์ได้ ในกรณีที่ความชื้นสูงจะเกิดปรากฏการณ์คล้ายกับการควบแน่นเป็นหยดน้ำบนผิวของเส้นใย ทำให้ลักษณะของเส้นใยมีการเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะพอลิเมอร์ที่ละลายในตัวทำละลายที่ระเหยได้ ถ้าความชื้นในระบบมีค่าสูงจะทำให้เกิดรูพรุนบนเส้นใยในปริมาณที่มากขึ้น และเมื่อศึกษาเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Atomic Force microscope, AFM) พบว่ารูพรุนลึกลงไปในเส้นใยมากขึ้นด้วย ในทางตรงกันข้ามหากระบบมีความชื้นต่ำจะส่งผลให้ตัวทำละลายระเหยเร็วขึ้น ในบางครั้งสารละลายอาจแข็งตัวอย่างรวดเร็วและอุดตันอยู่ภายในเข็มโลหะ ทำให้กระบวนการอิเล็กทรอนิกส์นิ่งดำเนินต่อไปไม่ได้
- 2) องค์ประกอบของบรรยากาศ ส่วนประกอบของอากาศภายในระบบส่งผลต่อกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์นิ่ง โดยก๊าซต่างชนิดกันจะมีพฤติกรรมต่างกันออกไป ภายใต้สภาพที่มีสนามไฟฟ้าสูง ยกตัวอย่างเช่น กรณีของก๊าซฮีเลียมจะแตกตัวภายใต้สภาพสนามไฟฟ้าสูงส่งผลให้กระบวนการอิเล็กทรอนิกส์นิ่งไม่เกิดขึ้น แต่หากใช้ก๊าซที่แตกตัวได้ยากขึ้น เช่น ฟรีออน 12 (Freon - 12) พบว่ากระบวนการอิเล็กทรอนิกส์นิ่งเกิดได้ โดยเส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้น 2 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับสารสังเคราะห์ในสภาพอากาศปกติ
- 3) ความดัน (Pressure) หากทำการสังเคราะห์เส้นใยนาโนภายในระบบปิด โดยปกติจะพบว่า ถ้าความดันภายในระบบลดลงไม่มีผลให้กระบวนการอิเล็กทรอนิกส์นิ่งดีขึ้น ในกรณีที่ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศส่งผลให้สารละลายไหลออกจากหลอดที่ใช้บรรจุมากขึ้น ทำให้ลำสารละลายที่พุ่งออกมาไม่เสถียร นอกจากนี้ที่บริเวณปลายเข็มโลหะอาจพบว่าสารละลายพองแล้วแตก และหากความดันภายในระบบต่ำมาก ๆ พบว่ากระบวนการอิเล็กทรอนิกส์นิ่งไม่เกิดขึ้น เนื่องจากประจุไฟฟ้ามีการคายประจุโดยตรง (Direct discharge) ภายในระบบ

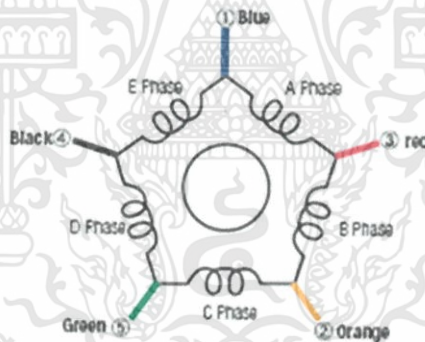
2.4 Syringe Driven

อย่างที่ได้อธิบายมาข้างต้นว่า องค์ประกอบพื้นฐานของชุดเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ๆ คือ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง (High voltage power supply) หลอดบรรจุเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายที่ติดเข็มโลหะ (Liquid reservoir syringe with needle tip) และ ฐานรองรับที่เป็นโลหะ (Metal collector) โดยในส่วนของหลอดบรรจุสารละลายที่ติดเข็มโลหะจะต้องมีระบบขับเคลื่อนที่ทำหน้า ผลักดันและควบคุมการอัตราการส่งผ่านสารละลายหรืออัตราการฉีดของสารละลายออกมาจากปลายเข็มให้ มีความเหมาะสมกับสนามไฟฟ้าที่ทำหน้าดึงและยึดเส้นใย ซึ่งในที่นี้ การควบคุมอัตราการไหลออกของ สารละลายที่ผ่านออกมาจากปลายเข็มโลหะนั้น ทำได้โดยผลักดันก้านของ Syringe ซึ่งจะถูกดันและ ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ ซึ่งมอเตอร์จะถูกควบคุมการทำงานผ่านทาง Microcontroller

ในปัจจุบันมอเตอร์ที่นิยมนำมาใช้ควบคู่กับ Microcontroller มีอยู่ด้วยกัน 3 ชนิด คือ Stepping Motor, Servo Motor และ DC Motor มอเตอร์เป็นอุปกรณ์แบบหนึ่งที่สามารถควบคุมการทำงานได้โดยใช้ ไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์ได้อย่างสะดวกและมีประสิทธิภาพ ความละเอียดในการขับเคลื่อน องศาในการ หมุน และ ความเรียบ (Stepping smooth) ในการหมุนของมอเตอร์ขึ้นอยู่กับชนิดมอเตอร์และชุดวงจรที่ทำ หน้าทีในการควบคุมรูปแบบการจ่ายกระแสให้กับขดลวด (Motor Driver) โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือก Stepping Motor ทำหน้าที่ขับเคลื่อนก้าน Syringe ซึ่งทำให้สารละลายถูกผลักดันออกมาจากปลายเข็ม

Stepping Motor สามารถทำหน้าที่ขับเคลื่อนก้าน Syringe ได้ครั้งละ 1 step ซึ่ง ใน 1 step จะ ขับเคลื่อนหรือทำให้เกิดการหมุนได้กี่องศาขึ้นอยู่กับชนิดของมอเตอร์ และ ระบบควบคุมมอเตอร์ (Motor Control System) หรือ Driver เพื่อความสามารถและความละเอียดในการขับเคลื่อนก้าน Syringe จึงได้ เลือก Stepping Motor แบบ 5 phases ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างของขดลวดภายในมอเตอร์เป็นแบบ Pentagon ดังภาพที่ 2. 6

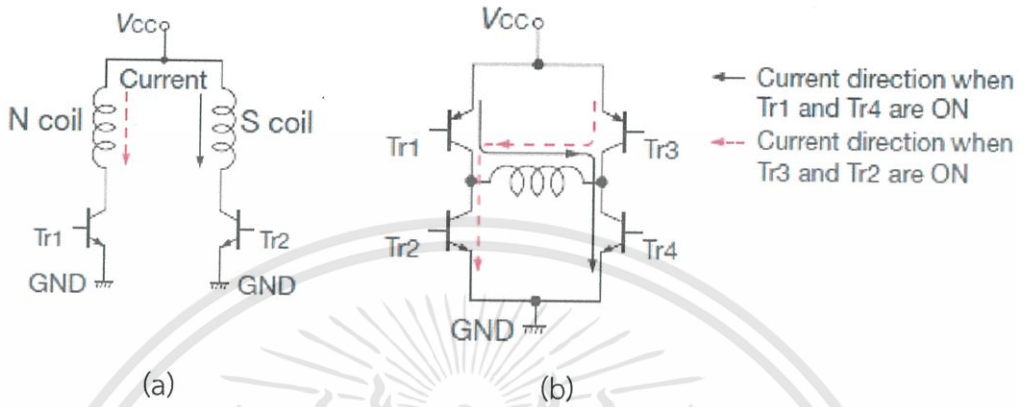


ภาพที่ 2. 6 New Pentagon stepping motor wiring diagram [20]

ในส่วนของระบบควบคุมการทำงานของมอเตอร์ (Driver control) ซึ่งมีหน้าที่การบังคับหรือ ควบคุมทำให้มอเตอร์ทำงานตามคำสั่งหรือทำตามความต้องการของผู้ควบคุม ซึ่งลักษณะการบังคับหรือ ควบคุมหลายลักษณะ เช่น การควบคุมให้ทำงาน การกลับทางหมุน การควบคุมความเร็วรอบ การทำงาน แบบเรียงลำดับและการหยุด เป็นต้น การควบคุมมอเตอร์ผู้ออกแบบจะออกแบบการควบคุมการทำงาน ต่าง ๆ ตามจุดประสงค์ของการควบคุมมอเตอร์ เพื่อให้ Five phase step motor ทำงานอย่างถูกต้อง และมีประสิทธิภาพสูงสุด Driver Control จึงเป็นส่วนสำคัญ ซึ่งมีหน้าที่ส่งสัญญาณทางไฟฟ้าจากผู้ใช้งานไป ยัง motor หรือที่เป็นส่วนควบคุมการหมุนของมอเตอร์ (Motor control system)

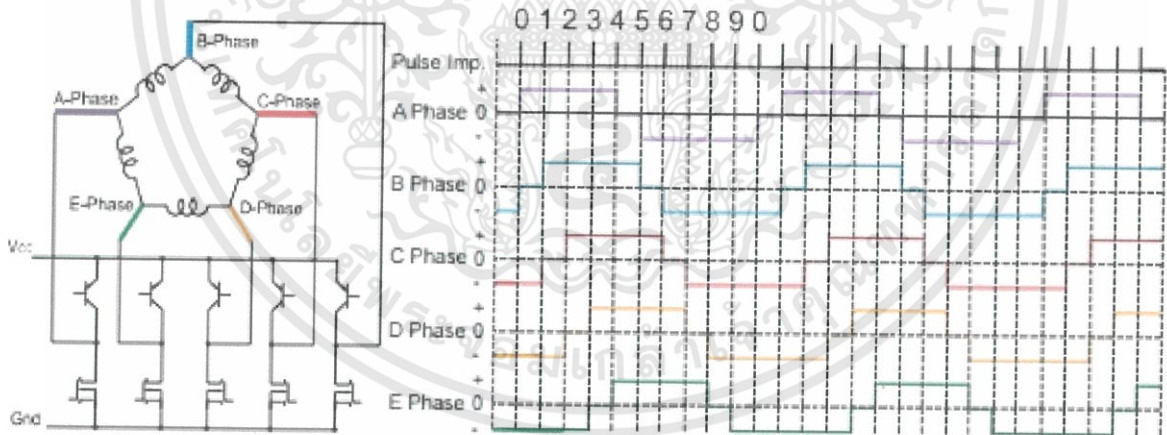
วิธีการควบคุมมอเตอร์ (Drive mode) แบ่งออกได้เป็น 2 วิธีการ หลัก ๆ คือ Unipolar mode และ Bipolar mode ซึ่งการควบคุมจะเป็นแบบวิธีการใดขึ้นอยู่กับทิศทางกระแส (Direction of motor current) ที่ป้อนให้กับขดลวดของมอเตอร์ในการสร้างขั้วแม่เหล็กดังภาพที่ 2. 7 ความละเอียดใน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหมุนแต่ละรอบขึ้นอยู่กับจ่ายกระแสหรือแรงดันไฟฟ้า (Power Supply Mode) ให้กับขดลวดแต่ละขดในแต่ละช่วงเวลา หรือที่เรียกว่า Excitation sequence สำหรับ Five-phase step motor ซึ่งต้องใช้ Bipolar driver นั้น มี Excitation mode อยู่ด้วยกัน 3 mode [20] ได้แก่ Full-step driving mode, Half-step driving mode และ Micro-step driving mode



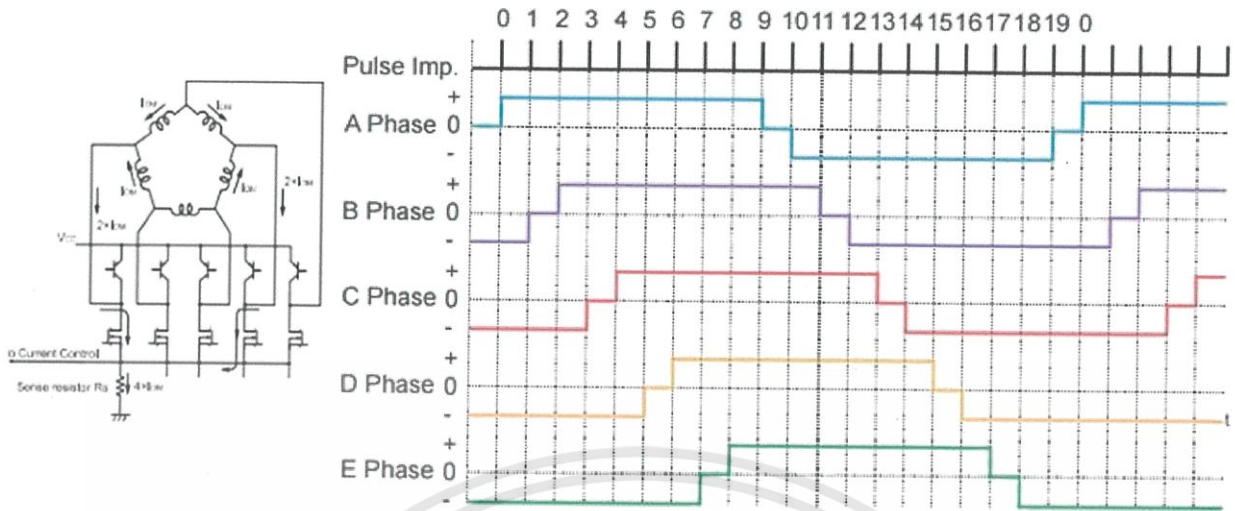
ภาพที่ 2. 7 (a) Unipolar drive mode (b) Bipolar drive mode [20]

Full-step driving mode เป็นลำดับการป้อนกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าให้กับขดลวดของมอเตอร์แต่ละขดแล้วส่งผลทำให้มอเตอร์นั้นเกิดการหมุนครั้งละ 0.72° หรือ ใน 1 รอบ มอเตอร์จะหมุนทั้งหมด 10 steps ซึ่งมีลำดับการกระตุ้น (Exciting Sequence) ดังภาพที่ 2. 8 Exciting pattern ดังกล่าวมีชื่อเรียกว่า 4-phase exciting pattern



ภาพที่ 2. 8 Pentagon 4-Phase Excitation Sequence (Full-Step Control Mode) [20]

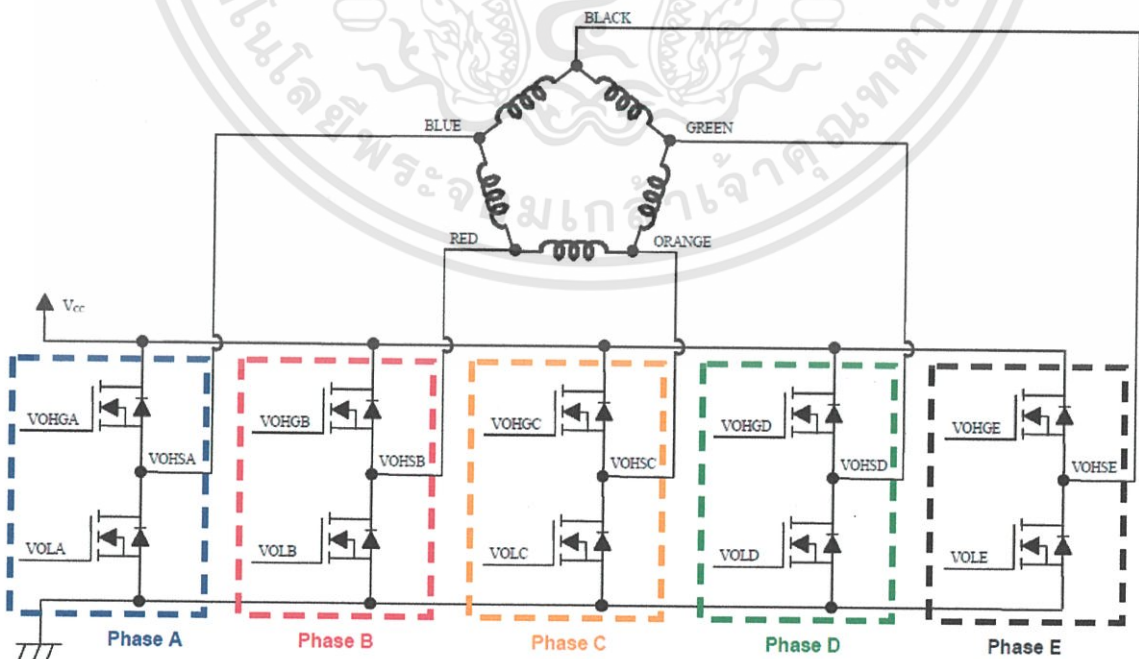
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2. 9 Pentagon 4-5 Phase Excitation Sequence (Half-Step Control Mode) [20]

ส่วน Half-step driving mode จึงเป็นลำดับการป้อนกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าแล้วส่งผลให้มอเตอร์นั้นเกิดการหมุนครั้งละ 0.36° หรือ ใน 1 รอบ มอเตอร์จะหมุนได้ทั้งหมด 20 steps ซึ่งมีลำดับการกระตุ้น (Exciting Sequence) ดังภาพที่ 2. 9 Exciting pattern ดังกล่าวมีชื่อเรียกว่า 4-5 phase exciting pattern สำหรับ Micro-step driving mode นั้นเป็นวิธีการกระตุ้นที่ส่งผลทำให้มอเตอร์สามารถหมุนได้ครั้งละ $1/N^\circ$ โดยที่ N คือ จำนวน step ทั้งหมดที่มอเตอร์หมุนได้ใน 1 รอบ ซึ่งสามารถทำได้โดยควบคุมระดับกระแสที่ป้อนให้กับขดลวดแต่ละขด

ถ้าขดลวดแต่ละขดของ Stepping Motor ถูกต่อเชื่อมด้วย driver circuit ดังภาพที่ 2. 10 ลำดับการกระตุ้นของขดลวดแต่ละขดทั้งในแบบ Full-step driving mode และ Half-step driving mode แสดงดังตารางที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ โดย H หมายถึง MOSFET นั้นอยู่ในสถานะ active



ภาพที่ 2. 10 New Pentagon driver output circuit diagram [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2. 1 Excitation Mode แบบ 4-Phase excitation sequence [21]

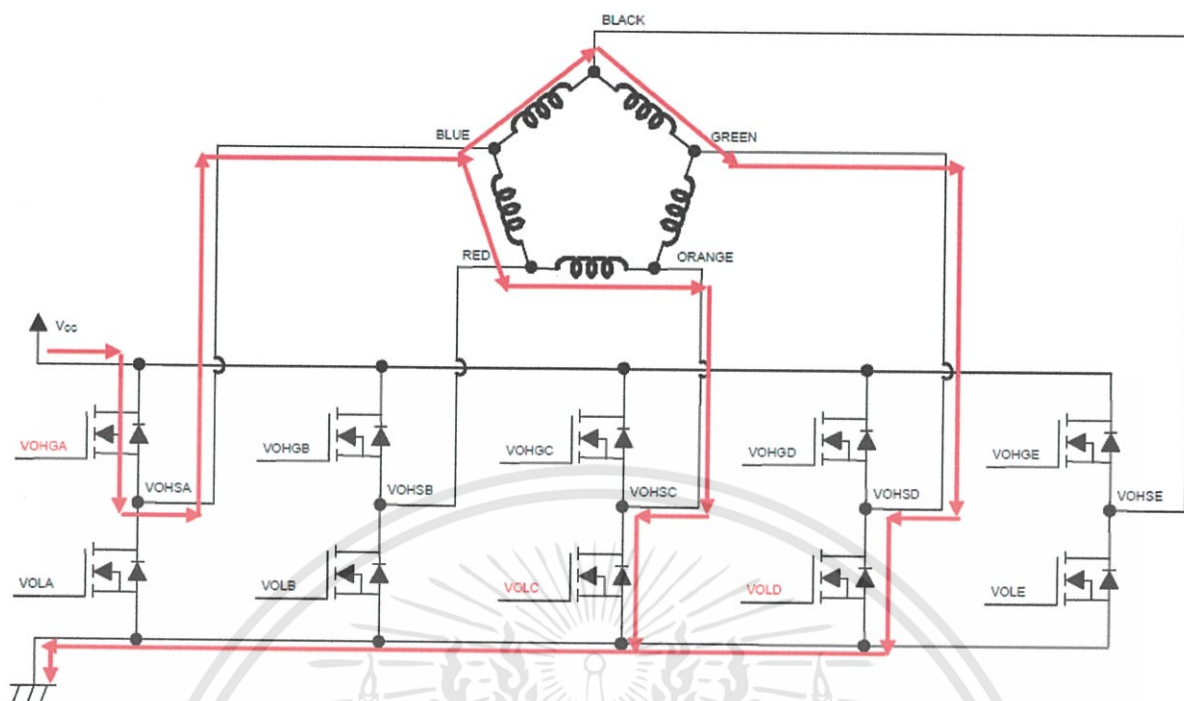
Step	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
VOHGA	H	H	L	L	L	L	L	L	L	H
VOHGB	L	H	H	H	L	L	L	L	L	L
VOHGC	L	L	L	H	H	H	L	L	L	L
VOHGD	L	L	L	L	L	H	H	H	L	L
VOHGE	L	L	L	L	L	L	L	H	H	H
VOLA	L	L	L	L	H	H	H	L	L	L
VOLB	L	L	L	L	L	L	H	H	H	L
VOLC	H	L	L	L	L	L	L	L	H	H
VOLD	H	H	H	L	L	L	L	L	L	L
VOLE	L	L	H	H	H	L	L	L	L	L
TIM	H	L	L	L	L	L	L	L	L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

ตารางที่ 2. 2 Excitation Mode แบบ 4-5 Phase excitation sequence [21]

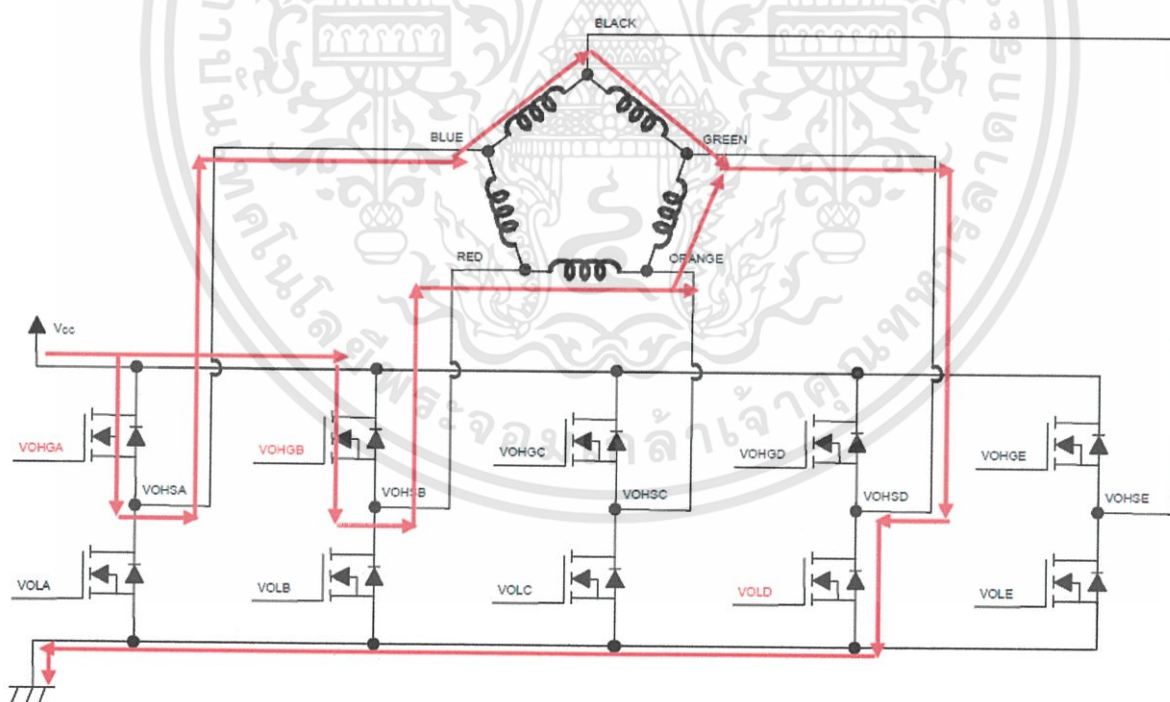
Step	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
VOHGA	H	H	H	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	H	H
VOHGB	L	L	H	H	H	H	H	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
VOHGC	L	L	L	L	L	L	H	H	H	H	H	L	L	L	L	L	L	L	L	L
VOHGD	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	H	H	H	H	H	L	L	L	L	L
VOHGE	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	H	H	H	H	H	L
VOLA	L	L	L	L	L	L	L	L	H	H	H	H	H	L	L	L	L	L	L	L
VOLB	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	H	H	H	H	H	L	L	L
VOLC	H	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	H	H	H
VOLD	H	H	H	H	H	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
VOLE	L	L	L	L	H	H	H	H	H	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
TIM	H	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
CW	→																			
CCW	←																			

เมื่อ Control driver กระตุ้นมอเตอร์ แบบ 4 Phase excitation sequence ในขณะที่มอเตอร์เริ่มทำงานคือที่ Step 0 และ เกิดการขยับไปที่ Step 1 และ Step 2 จะทำให้เกิดกระแสที่ไหลผ่านขดลวดทั้ง 5 ขด เป็นดังภาพที่ 2. 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

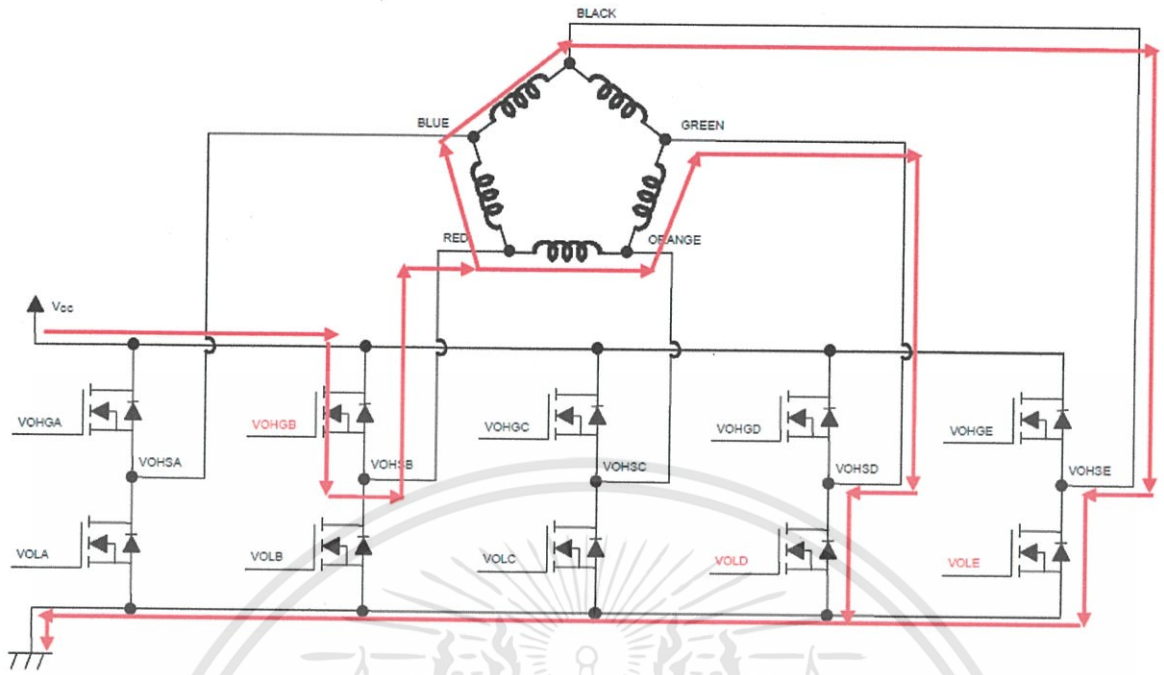


ภาพที่ 2. 11 ลักษณะการไหลของกระแสภายในขดลวดของมอเตอร์ เมื่อ Control Driver กระตุ้นมอเตอร์แบบ 4 Phase excitation sequence ในขณะที่มอเตอร์เริ่มทำงาน Step 0 [21]



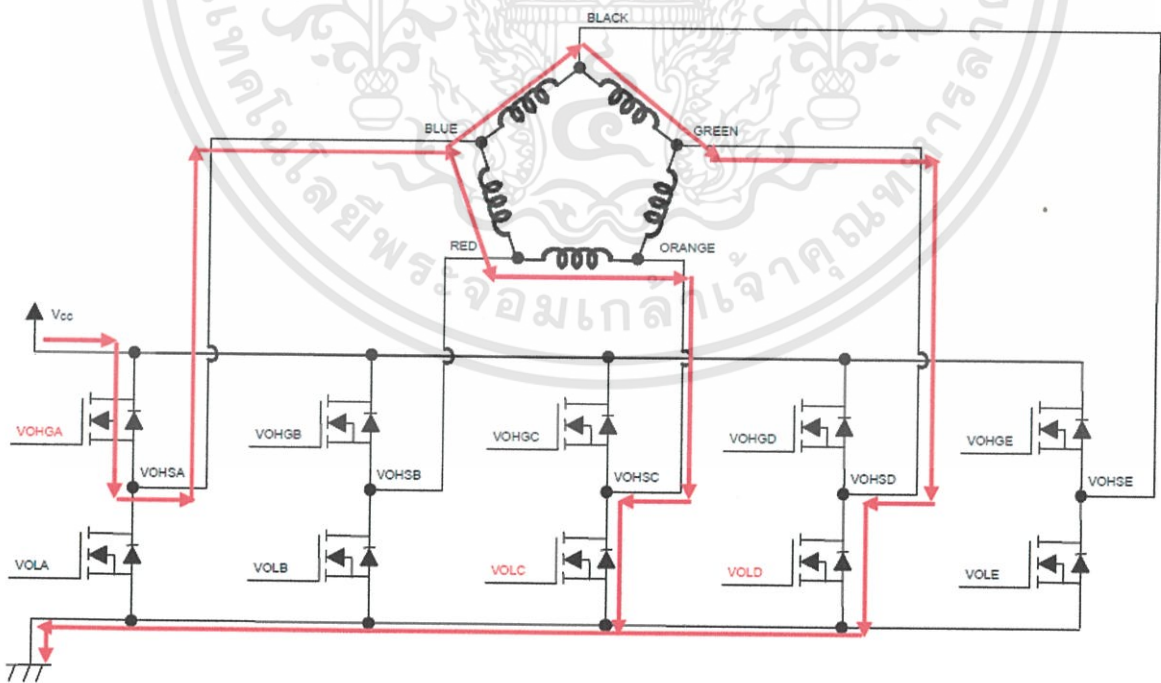
ภาพที่ 2. 12 ลักษณะการไหลของกระแสภายในขดลวดของมอเตอร์ เมื่อ Control Driver กระตุ้นมอเตอร์แบบ 4 Phase excitation sequence ในขณะที่มอเตอร์หมุนไปที่ Step 1 [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



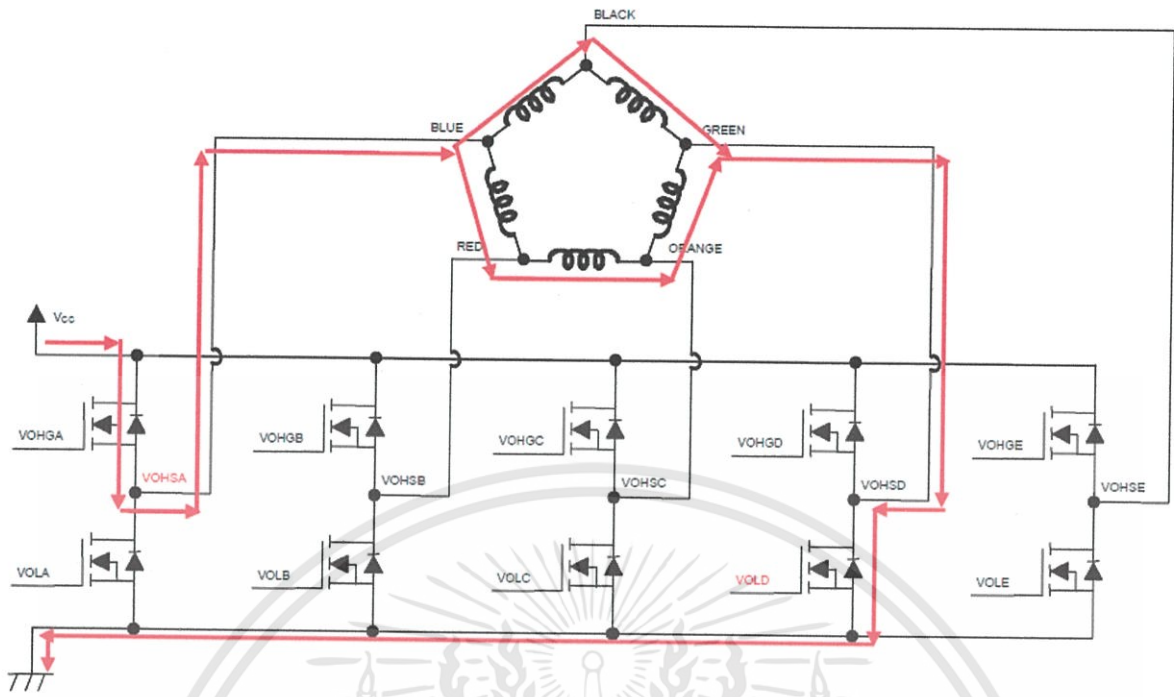
ภาพที่ 2.13 ลักษณะการไหลของกระแสภายในขดลวดของมอเตอร์ เมื่อ Control Driver กระตุ้นมอเตอร์แบบ 4 Phase excitation sequence ในขณะที่มอเตอร์หมุนไปที่ Step 2 [21]

เมื่อ Control driver กระตุ้นมอเตอร์ แบบ 4-5 Phase excitation sequence กระแสที่ไหลผ่านขดลวดทั้ง 5 ขด เมื่อมอเตอร์เริ่มทำงาน Step 0 จนเกิดการขยับไปที่ Step 1, 2 และ 3 เป็นดังภาพที่ 2.14 - ภาพที่ 2.17

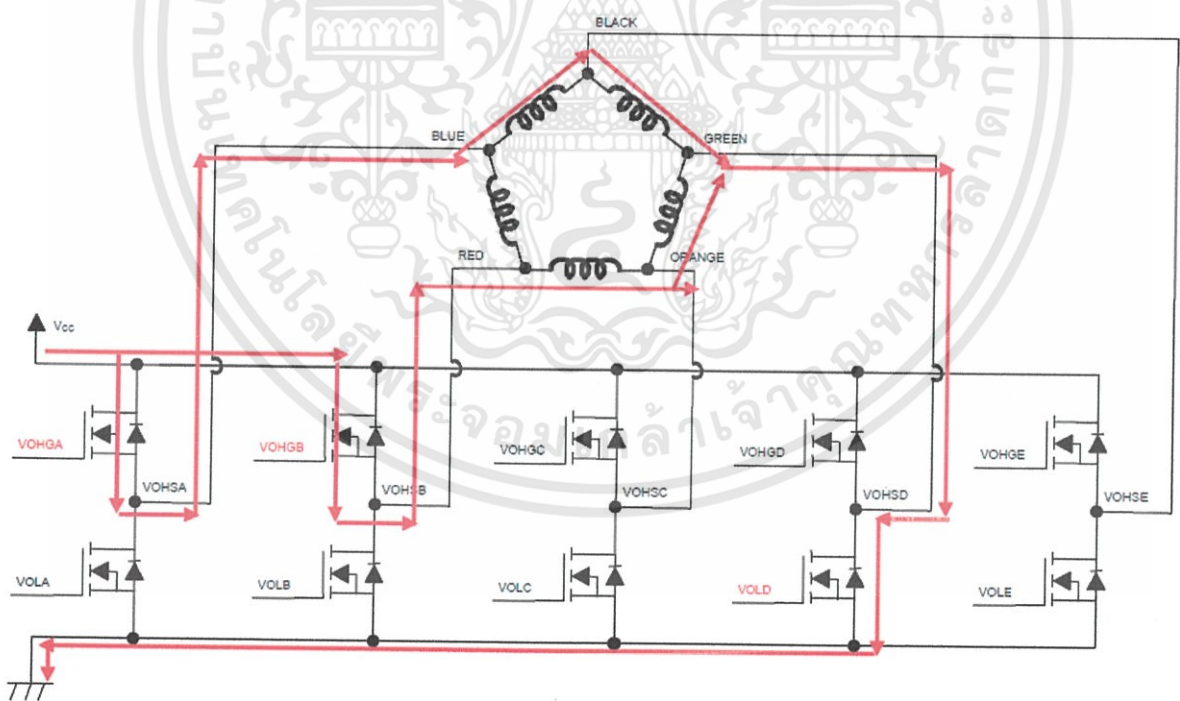


ภาพที่ 2.14 ลักษณะการไหลของกระแสภายในขดลวดของมอเตอร์ เมื่อ Control Driver กระตุ้นมอเตอร์แบบ 4-5 Phase excitation sequence ในขณะที่มอเตอร์เริ่มทำงาน ซึ่งก็คืออยู่ที่ Step 0 [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

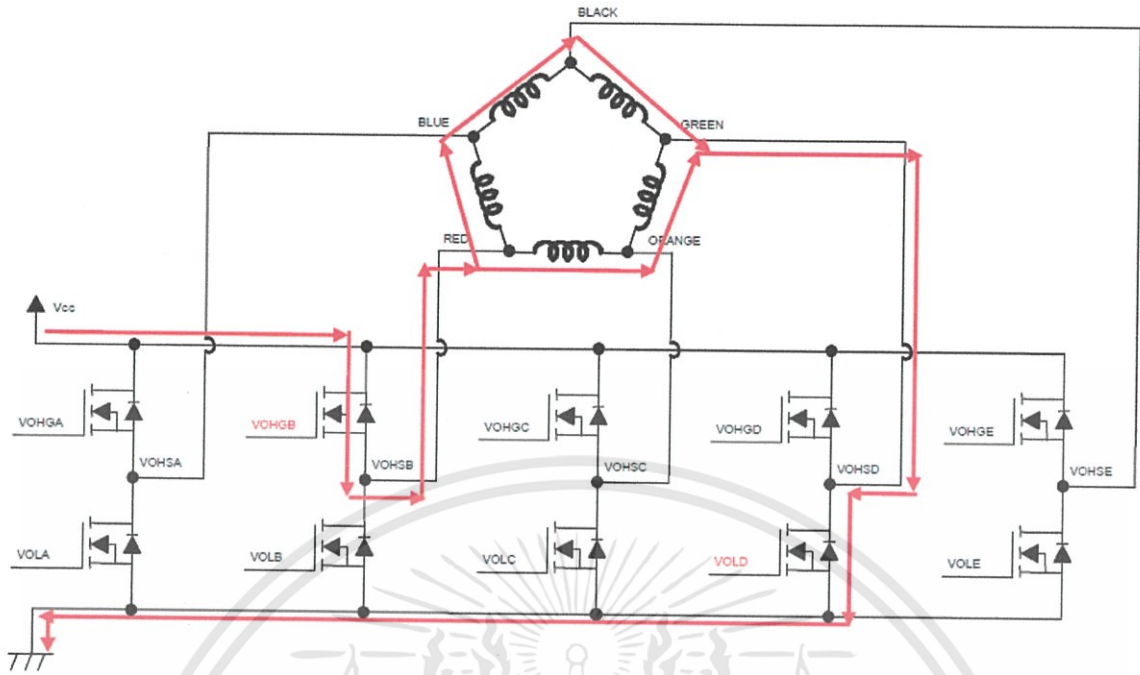


ภาพที่ 2. 15 ลักษณะการไหลของกระแสภายในขดลวดของมอเตอร์ เมื่อ Control Driver กระตุ้นมอเตอร์แบบ 4-5 Phase excitation sequence ในขณะที่มอเตอร์หมุนไปที่ Step 1 [21]



ภาพที่ 2. 16 ลักษณะการไหลของกระแสภายในขดลวดของมอเตอร์ เมื่อ Control Driver กระตุ้นมอเตอร์แบบ 4-5 Phase excitation sequence ในขณะที่มอเตอร์หมุนไปที่ Step 2 [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



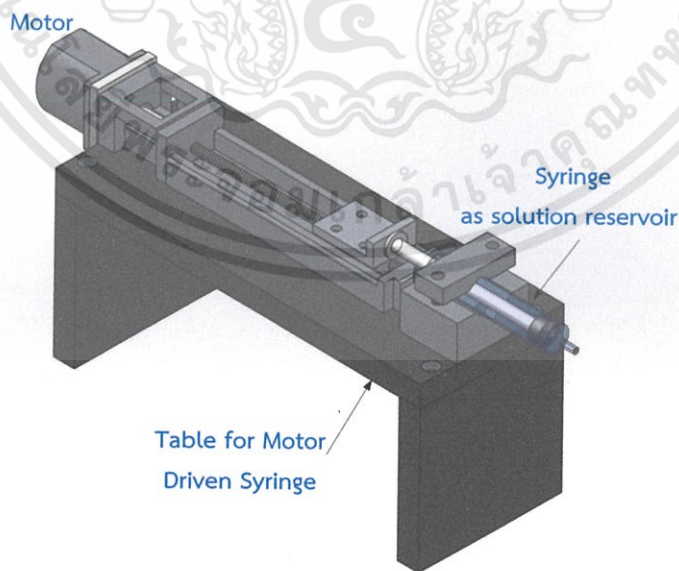
ภาพที่ 2.17 ลักษณะการไหลของกระแสภายในขดลวดของมอเตอร์ เมื่อ Control Driver กระตุ้นมอเตอร์แบบ 4-5 Phase excitation sequence ในขณะที่มอเตอร์หมุนไปที่ Step 3 [21]

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยในโครงการ “การออกแบบและสร้างชุดเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์สำหรับสังเคราะห์เส้นใยนาโน” ได้แบ่งออกเป็น 2 ช่วงด้วยกัน คือ ช่วงแรกเป็นการดำเนินการออกแบบและสร้างระบบการสังเคราะห์เส้นใยนาโน และ ช่วงที่สองเป็นการดำเนินการทดสอบด้วยการสังเคราะห์เส้นใยนาโนด้วยระบบที่ได้ทำการสร้างขึ้นรวมทั้งทำการทดลองเพื่อทำการหาและบ่งบอกว่าพารามิเตอร์ใดมีผลการขนาดของเส้นใยนาโน

3.1 การออกแบบและพัฒนาระบบการสังเคราะห์เส้นใยนาโนด้วยวิธี Electrospinning

Electrospinning System ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ๆ คือ ชุดขับเคลื่อน Syringe ซึ่งมีเข็มโลหะปลายแหลมติดอยู่ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (High voltage source) สารละลายที่บรรจุอยู่ใน Syringe และ ฐานรองรับเส้นใยนาโน หรือเรียกว่า Collector โดยในการสร้างและพัฒนา An automated electrospinning apparatus นั้น ส่วนที่เป็นชุดขับเคลื่อน Syringe นั้นถือได้เป็นหัวใจสำคัญของงานวิจัยนี้ ชุดขับเคลื่อน Syringe นี้มีหน้าที่ในการผลักดันสารละลายที่บรรจุอยู่ในหลอดฉีดยาให้เคลื่อนออกมาหรือมีอัตราการไหล (Flow rate of solution) ที่พอเหมาะกัอัตราการดึงให้สารละลายนั้นกลายเป็นเส้นใย ซึ่ง Syringe นี้จะถูกควบคุมการเคลื่อนที่ด้วย Stepping motor ทั้ง Syringe และ Stepping motor จะถูกติดตั้งอยู่บนฐานรองรับซึ่งทำมาจากเทฟลอน ดังภาพที่ 3. 1 อัตราการไหลออกของสารละลายจึงขึ้นอยู่กับความเร็วที่ของมอเตอร์ ซึ่งการเคลื่อนที่ของมอเตอร์จะถูกควบคุมและสั่งงานผ่านทาง Microcontroller การพัฒนา Electrospinning system จึงต้องทำการพัฒนาโปรแกรมที่ป้อนให้กับ Microcontroller ที่สามารถควบคุมการขับเคลื่อนของ Motor ได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วย

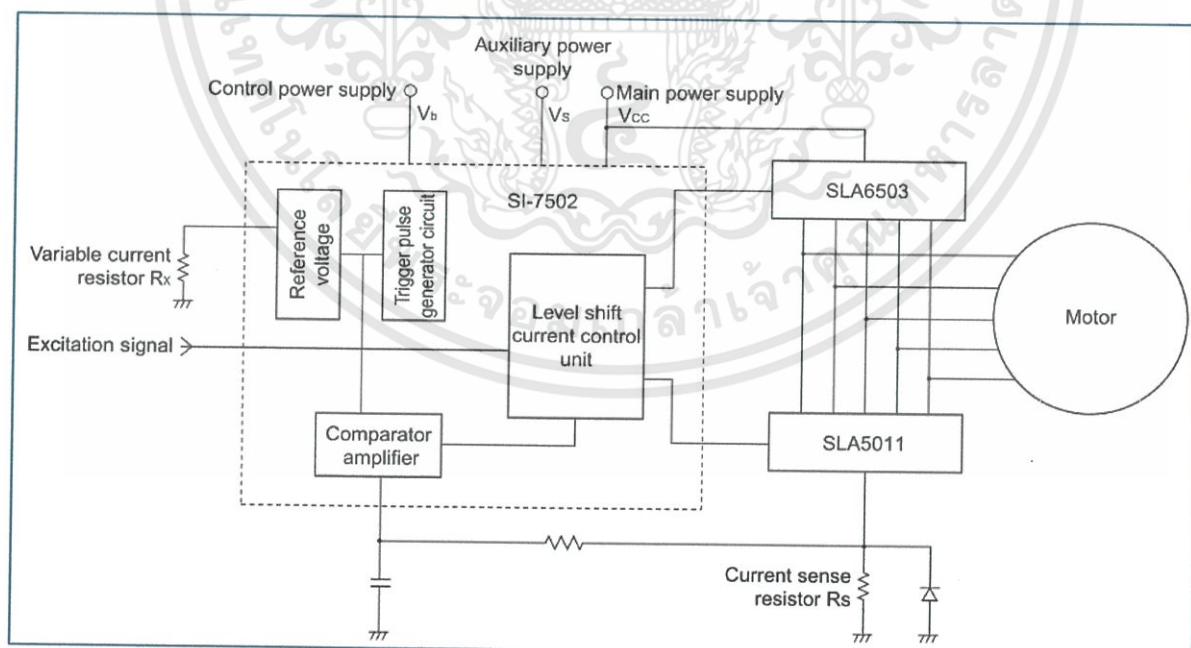


ภาพที่ 3. 1 ชุดขับเคลื่อน Syringe พร้อมฐานรองซึ่งทำมาจากวัสดุ Teflon สำหรับ an automated electrospinning apparatus

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

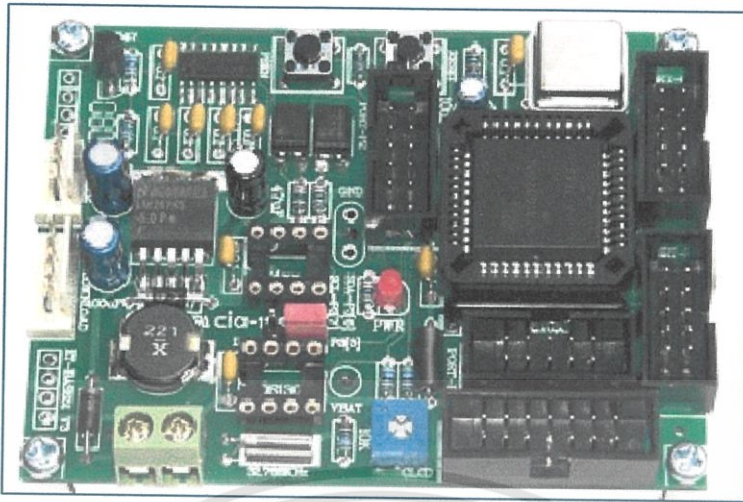
ในงานวิจัยนี้ได้เลือกมอเตอร์ชนิด Five-phase stepping motor with pentagon coil configuration นำมาใช้ในงาน มอเตอร์จะถูกสั่งและควบคุมการทำงานผ่านทาง Motor Driver Control & Display Box ที่ได้ทำการออกแบบและพัฒนาขึ้นเพื่อใช้งาน ซึ่งภายใน Motor Driver Control & Display Box ประกอบด้วย Motor Driver, Microcontroller, Keypad และ LCD Display มอเตอร์จะถูกต่อเชื่อมเข้ากับ Motor Driver ซึ่ง Driver จะทำหน้าที่ส่งสัญญาณไฟฟ้าให้กับขดลวดแต่ละขดของมอเตอร์ตามคำสั่งของที่ได้รับจาก Microcontroller โดยผู้ใช้งานนั้นสามารถติดต่อกับ Microcontroller ได้ทาง Keypad และ Microcontroller จะแสดงผลการเชื่อมต่อและสั่งงานผ่านทาง LCD Display โดยการเชื่อมต่อ

Motor Driver ที่ได้เลือกใช้สำหรับงานวิจัยนี้ประกอบขึ้นจาก IC 3 ตัวด้วยกัน คือ IC เบอร์ SI-7502, SLA5011 และ SLA6503 มีไดอะแกรมการต่อเชื่อมกับ Five-Phase Motor ดังไดอะแกรมในภาพที่ 3. 2 Motor Driver จะรับและส่งสัญญาณผ่านทาง Microcontroller ซึ่งเป็น Microcontroller Board ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะดังภาพที่ 3. 3 ซึ่งอยู่ในตระกูล MCS51 ขนาด PLCC-44 Pin โดยมี Controller เบอร์ AT89C51ED2 ของ ATMEL เป็น MCU ประจําบอร์ด ซึ่งมี Connection Diagram ดังภาพที่ 3. 4 MCU รุ่นนี้จะบรรจุอยู่ภายในตัวถังแบบ PLCC-44 MCU รุ่นนี้มีความเร็วในการประมวลผลด้วยความถี่สูงสุด 60MHz ที่ 12 Clock / 1 Machine Cycle นอกจากนี้แล้วยังมีความเพียบพร้อมด้วยอุปกรณ์พื้นฐานต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อการใช้งาน โดยมีหน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลแบบ EEPROM ขนาด 2 Kbytes หรือหน่วยความจำใช้งานแบบ RAM ซึ่งมีมากถึง 1792 bytes และยังมีส่วนในด้านของอุปกรณ์ Peripheral ทำให้เหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับการควบคุมและประมวลผลต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี ซึ่งมีทั้ง SPI, UART, Watchdog, Timer/Counter, PWM ฯลฯ สำหรับในการออกแบบโครงสร้างของบอร์ดนั้นยังเน้นเรื่องขนาดของบอร์ดให้มีขนาดเล็ก จึงทำให้ง่ายและสะดวกต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน

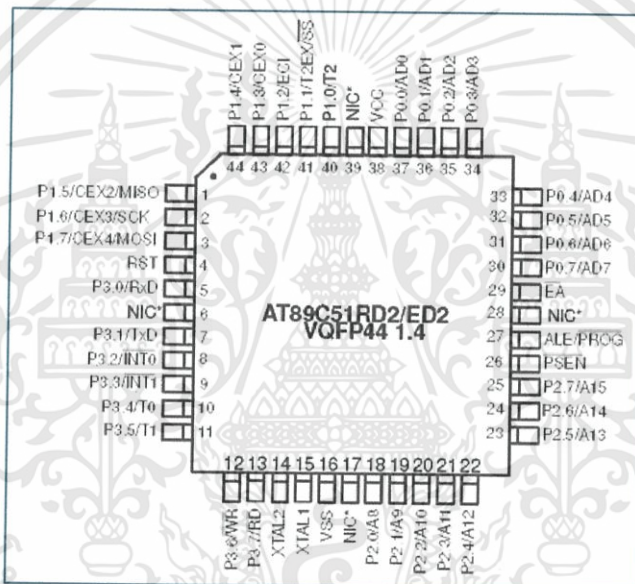


ภาพที่ 3. 2 Internal Block Diagram ของ SI-7502 IC ที่ต่อเชื่อมเข้ากับมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



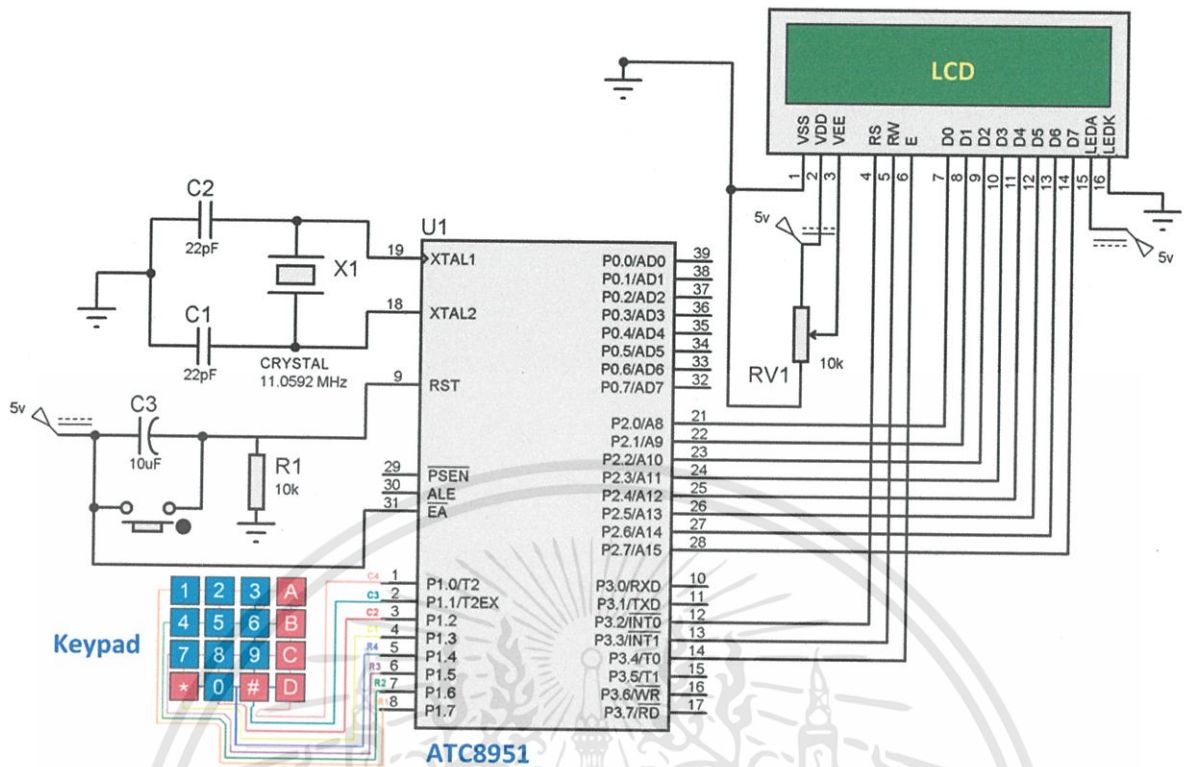
ภาพที่ 3. 3 Microcontroller Board MCS-51



ภาพที่ 3. 4 Connection Diagram ของ Microcontroller เบอร์ AT89C51ED2

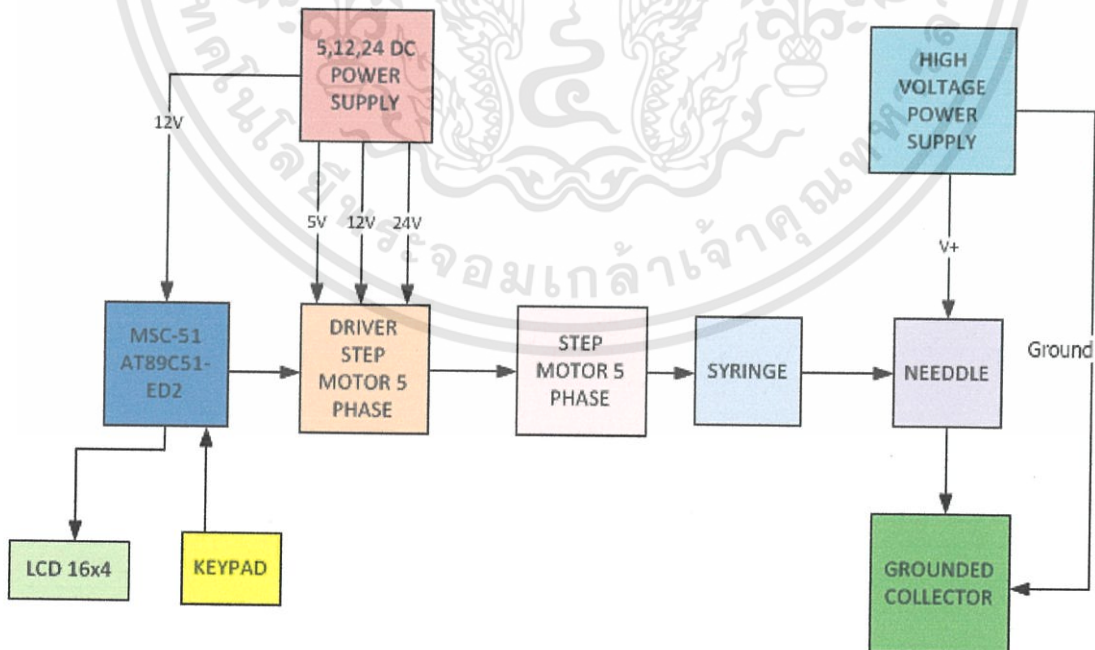
สำหรับการเชื่อมต่อผู้ใช้งานกับ microcontroller เข้าด้วยกันนั้นจะเป็นหน้าที่ของ 4x4 Matrix Keypad ผู้ใช้งานสามารถควบคุมการทำงานของมอเตอร์ได้โดยป้อนคำสั่งผ่านทาง Keypad นั้นเอง โดยข้อมูลที่ป้อนให้ประกอบด้วย อัตราการผลัดกันสารถ่ายในหน่วยปริมาตรต่อเวลา ทั้ง Microcontroller, Keypad และ LCD Display จะถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกันดังไดอะแกรมภาพที่ 3. 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3. 5 การเชื่อมต่อ 4x4 Matrix Keypad, MSC51-ATC8951 และ LCD Display

โดยส่วนประกอบของ Electrospinning System ซึ่งได้แก่ ชุดขับเคลื่อน Syringe ซึ่งมีเข็มโลหะปลายแหลมติดอยู่ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง สารละลายที่บรรจุอยู่ใน Syringe และ Motor Driver Control & Display Box ถูกต่อเชื่อมเข้าด้วยกันดังภาพที่ 3. 6

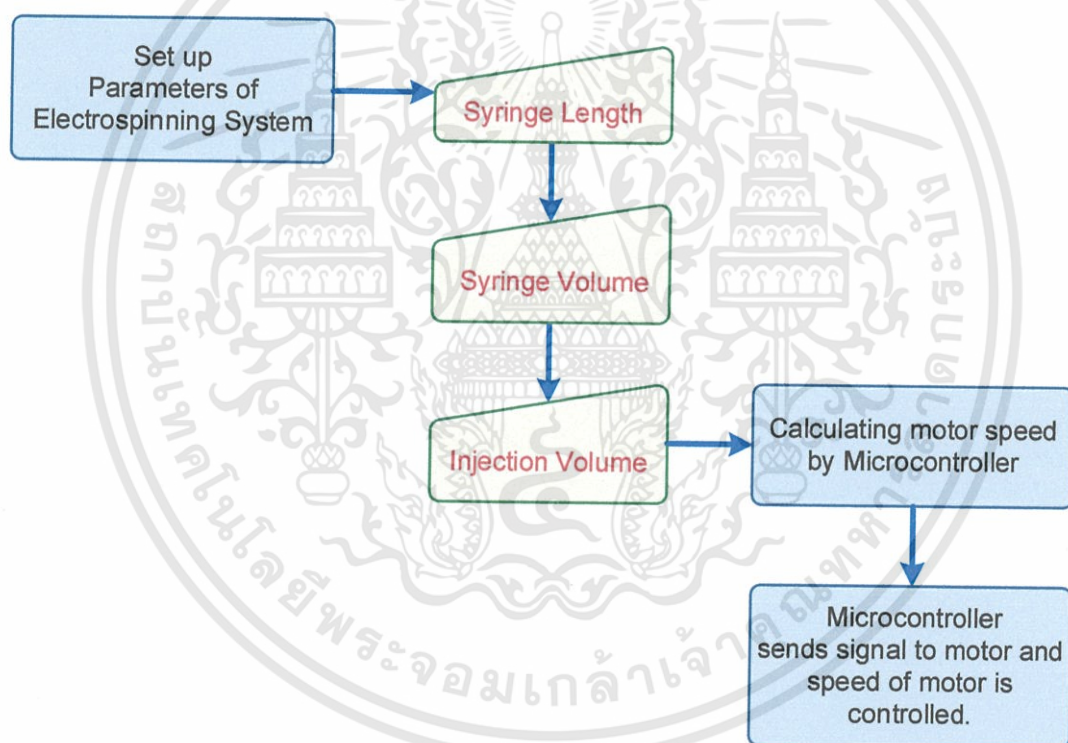


ภาพที่ 3. 6 การเชื่อมต่อกันระหว่างชุดขับเคลื่อน Syringe ซึ่งมีเข็มโลหะปลายแหลมติดอยู่ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง สารละลายที่บรรจุอยู่ใน Syringe และ Motor Driver Control & Display Box ของ Electrospinning System Setup

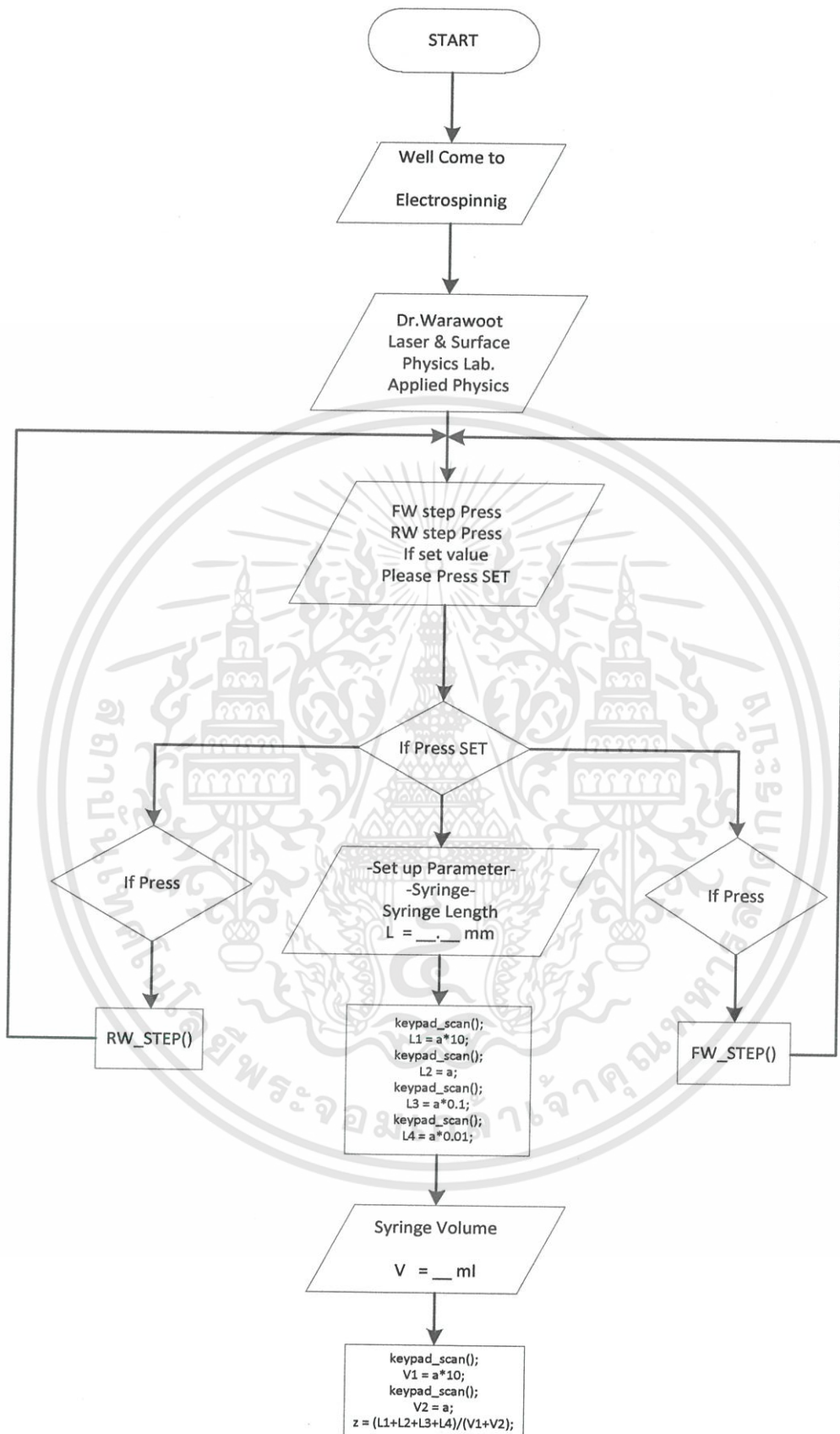
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 โปรแกรมควบคุมการทำงานชุดขับเคลื่อน Syringe

ก้านของ Syringe ของ an automated electrospinning system จะถูกควบคุมอัตราการเคลื่อนที่ด้วยมอเตอร์ซึ่งถูกควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นผ่านทาง Microcontroller ชุดคำสั่งของโปรแกรมทั้งหมดจะถูกบันทึกลงใน Microcontroller โดยผู้ใช้งานสามารถเชื่อมต่อหรือสั่งงานมอเตอร์ได้ทาง Keypad หลังจากนั้น Keypad จะส่งคำสั่งผ่านเข้าทางพอร์ตเชื่อมต่อไปยัง Microcontroller แล้ว Microcontroller จึงทำหน้าที่ส่งผ่านคำสั่งต่าง ๆ ออกไปยังมอเตอร์ โดยมอเตอร์จะหมุนด้วยการอัตราความเร็วเท่าไรขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่ใช้กับกับ electrospinning system พารามิเตอร์ดังกล่าวได้แก่ Syringe Length, Syringe volume และ Injection volume เมื่อป้อนค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ผ่านทาง Keypad แล้วนั้น โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าต่าง ๆ เหล่านี้เป็นกลายเป็นความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ที่ทำการผลักดันสารละลายออกมาจาก Syringe ไดอะแกรมการทำงานของ An automated electrospinning apparatus แสดงดังภาพที่ 3. 7 และ Flowchart ของโปรแกรมที่ควบคุมการทำงานของระบบทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 3.8 และ 3.9

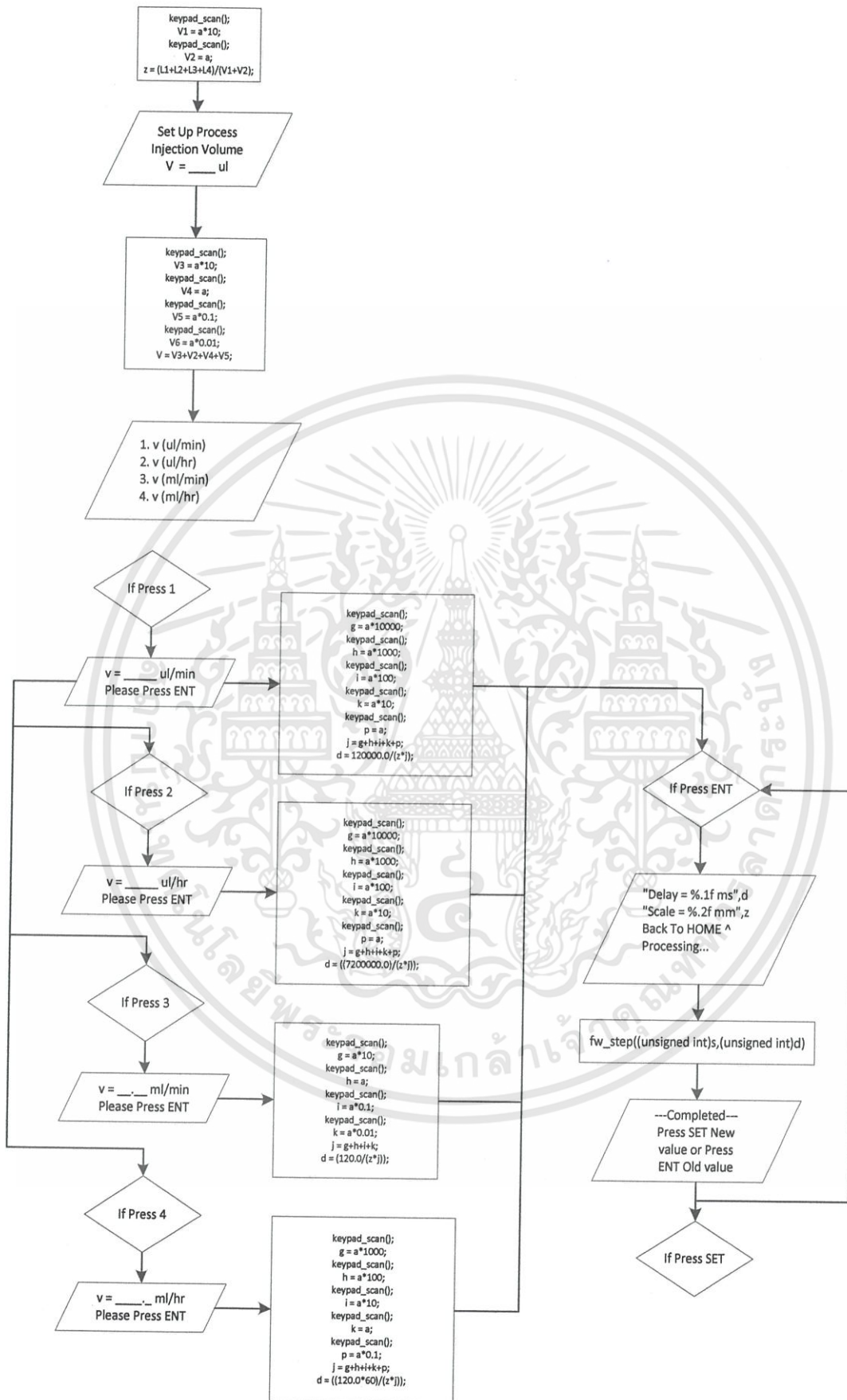


ภาพที่ 3. 7 ไดอะแกรมการทำงานของ an automated electrospinning apparatus



ภาพที่ 3. 8 Flow chart - 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3. 9 Flow chart - 2

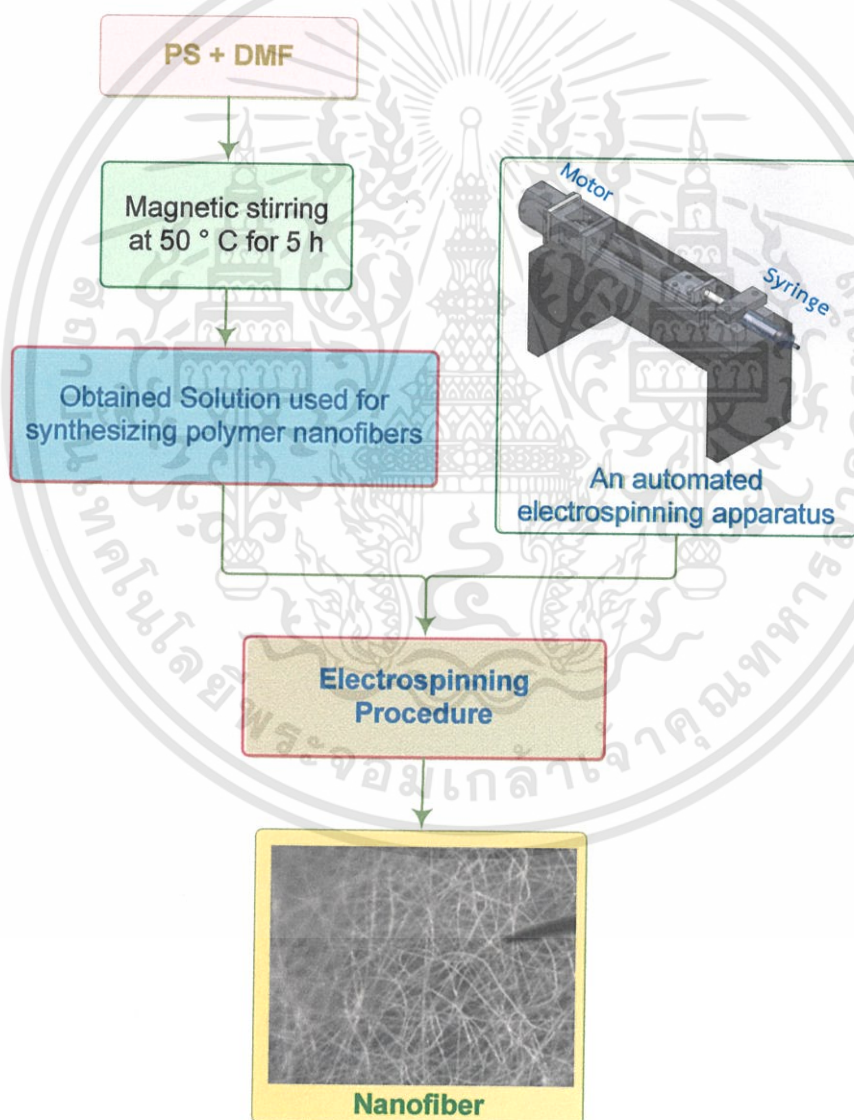
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การสังเคราะห์เส้นใยนาโนจาก Electrospinning system

เพื่อเป็นการทดสอบประสิทธิภาพในการทำงานของ Electrospinning system ที่ได้ทำการสร้างและพัฒนา จึงได้มีการทดสอบและทดลองสังเคราะห์เส้นใย โดยได้ทำการทดลองสังเคราะห์เส้นใย 2 ชนิดด้วยกัน คือ Polymer nanofiber และ ZnO nanofiber ซึ่งมีขั้นตอนการและกระบวนการทางเคมีสำหรับเตรียมสารตั้งต้นดังนี้

3.3.1 การสังเคราะห์ Polymer nanofibers

Polymer nanofibers ที่ได้ทำการสังเคราะห์ขึ้นในงานวิจัยนี้มีสารตั้งต้นอยู่ 2 ชนิดด้วยกัน ได้แก่ Polystyrene (PS) และ Dimethylformamide (DMF) โดยผสม PS และ DMF ในอัตราส่วน 1.5:10 หลังจากนั้นคนอย่างต่อเนื่องด้วย magnetic stirrer ที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จึงได้สารละลายโพลิเมอร์พร้อมใช้งาน ขั้นตอนเป็นดังไดอะแกรมภาพที่

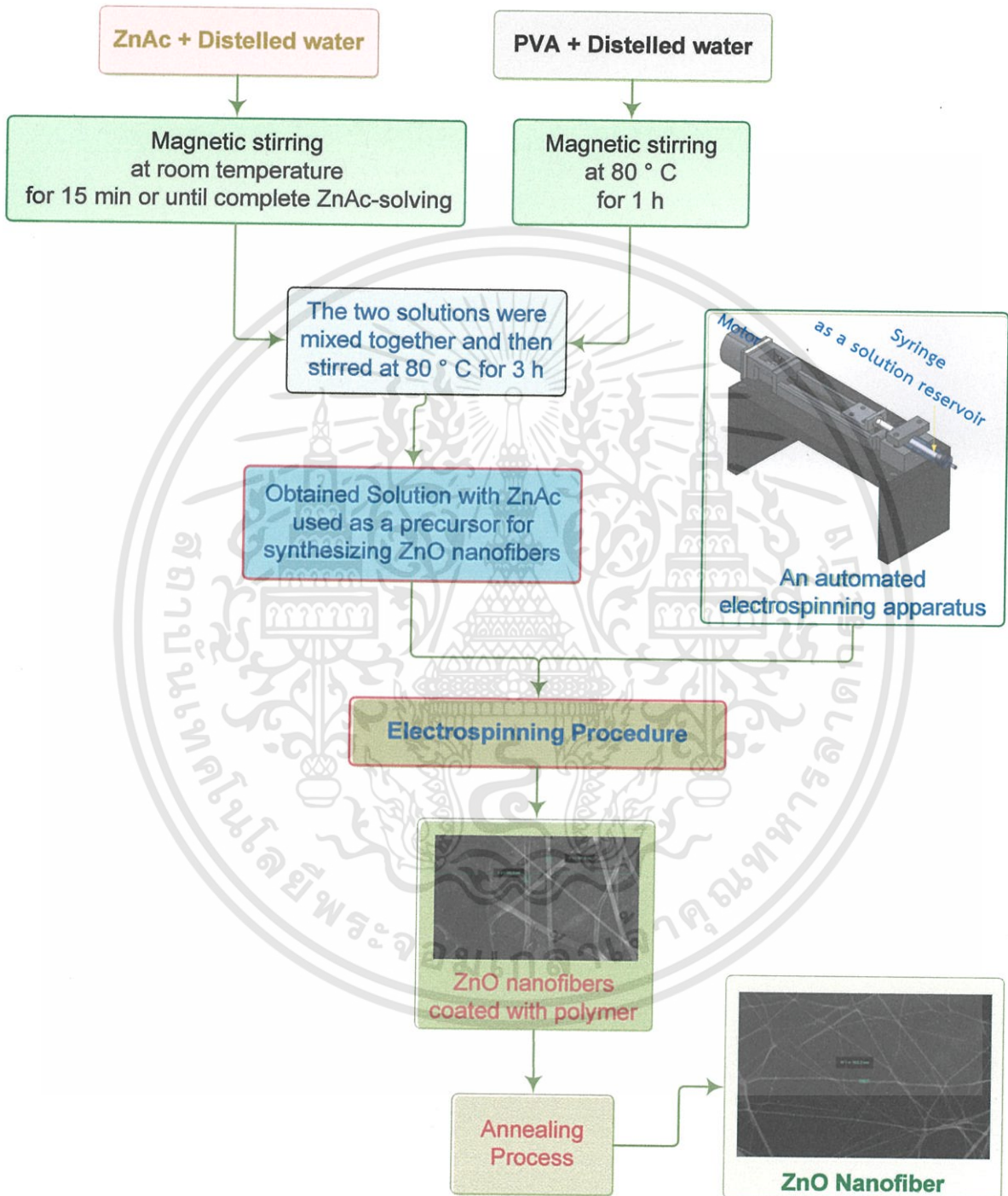


ภาพที่ 3. 10 กระบวนการทางเคมีและขั้นตอนการสังเคราะห์ Polymer nanofibers ด้วย Electrospinning setup

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การสังเคราะห์ ZnO nanofibers

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้นำ Zinc acetate (ZnAc) มาเป็นสารตั้งต้น (Precursor) การสังเคราะห์ ZnO nanofibers โดยก่อนที่จะนำ ZnAc ไปใช้งานนั้นมีขั้นตอนการและกระบวนการทางเคมีในการเตรียมสารตั้งโดยอะแกรมภาพที่ 3. 11



ภาพที่ 3. 11 กระบวนการทางเคมีและขั้นตอนการสังเคราะห์ ZnO nanofibers ด้วย Electrospinning setup

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การวัดขนาดของ Nanofibers

เส้นใยนาโนที่ได้ทำการสังเคราะห์ขึ้นมาจะถูกวัดขนาดด้วย Optical Microscope ติดตั้งอยู่ที่ Surface Physics and Plasma Applications Research Laboratory ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สจล. ดังภาพที่ 3. 12 ซึ่งมีกำลังขยายถึง 220 เท่า และ เมื่อเส้นใยมีขนาดเล็กจนไม่สามารถวัดได้ด้วย Optical Microscope แล้ว เส้นใยนาโนจึงจะถูกส่งออกไปวัดด้วย Scanning Electron Microscope



ภาพที่ 3. 12 Optical Microscope ติดตั้งอยู่ที่ Surface Physics and Plasma Applications Laboratory ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สจล.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

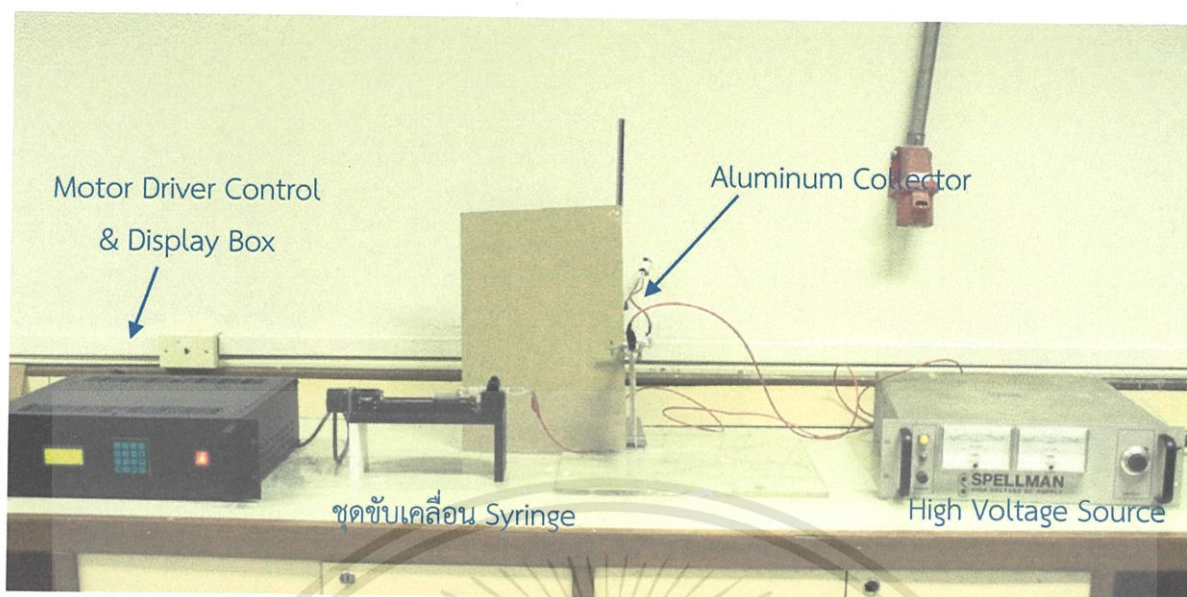
ผลการดำเนินงานการวิจัย

ผลผลิตที่ได้จากการดำเนินงานวิจัยภายใต้โครงการ การออกแบบและสร้างชุดเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่งสำหรับสังเคราะห์เส้นใยนาโน ประกอบด้วย ชุดเครื่องมือสร้างเส้นใยนาโนพร้อมโปรแกรมควบคุมการทำงานจึงเรียกระบบดังกล่าวว่า An automated electrospinning apparatus และ เส้นใยนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยเครื่องมือที่ได้ทำการสร้างขึ้น โดยชุดเครื่องมือดังกล่าวนี้ผู้ใช้งานสามารถสั่งงานผ่านทาง Keypad โดยคำสั่งจะถูกส่งต่อไปยังระบบด้วย Microcontroller หลังจากนั้น Microcontroller จะควบคุมการทำงานให้เป็นไปอย่างอัตโนมัติ ซึ่งชุดคำสั่งทั้งหมดที่ควบคุมการทำงานของระบบก็ได้ทำการเขียนและพัฒนาขึ้นภายใต้โครงการนี้เช่นเดียวกัน

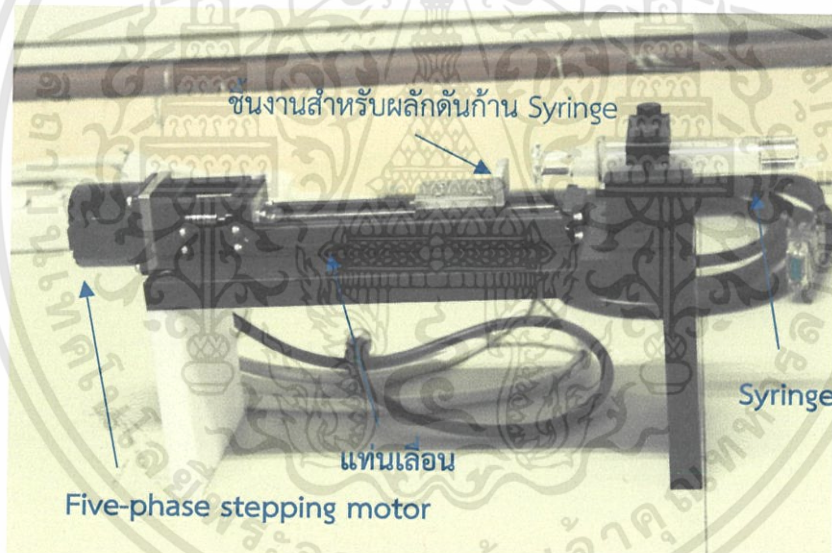
หลังจากที่ได้ดำเนินการสร้าง An automate electrospinning apparatus ซึ่งการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องทำได้โดยการสังเคราะห์เส้นใยนาโนด้วยเครื่องมือดังกล่าว แต่เนื่องจากการดำเนินงานในโครงการวิจัยนี้ได้ทำการสร้างและออกแบบ ซึ่ง Process Parameters ของ Electrospinning system ที่ส่งผลต่อขนาดและสมบัติของเส้นใยมีอยู่ด้วยหลายพารามิเตอร์ ได้แก่ ความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับ collector และ อัตราการไหลของสารละลาย รวมทั้งความเข้มข้นสารตั้งต้น ซึ่งการจะศึกษาถึงผลกระทบของ Process Parameters ที่มีผลต่อขนาดของเส้นใยนาโนภายในเวลาเพียง 1 ปี นั้นไม่สามารถทำได้ ทางผู้ดำเนินการวิจัยจึงได้สุ่มเลือก เงื่อนไขในการทดลองสังเคราะห์เส้นใยขึ้นมาเป็นกรณีศึกษา เพื่อเป็นตัวอย่างและแสดงให้เห็นว่าเครื่องมือที่ได้ทำการออกแบบ สร้าง และ พัฒนาขึ้นมานั้นสามารถเส้นใยที่มีขนาดในระดับนาโนเมตรได้

4.1 ชุดเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่งสำหรับสังเคราะห์เส้นใยนาโน

ชุดเครื่องมือ Electrospinning ที่ได้ทำการสร้างและพัฒนาขึ้นเป็นดังภาพถ้ายดงภาพที่ 4. 1 ประกอบด้วย Motor Driver Control & Display Box, Syringe driven by 5-phase stepping motor, Aluminum collector และ High Voltage source โดย Motor Driver Control & Display Box ถูกเชื่อมต่อเข้ากับ 5-phase stepping motor ซึ่ง Motor จะถูกต่อเชื่อมเข้ากับแท่นเลื่อนที่ระยะการขับเคลื่อนได้ถึง 12 cm บนแท่นเลื่อนได้ทำการติดตั้งชิ้นงานทำมาจาก Stainless steel มีหน้าที่หลักดันให้ก้าน Syringe ของหลอดเข็มฉีดยาเคลื่อนที่ซึ่งมีผลทำให้สารละลายภายในหลอดเข็มฉีดยาเคลื่อนที่ออกมาดังภาพที่ 4. 2 เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าสูงให้กับปลายของหลอดเข็มฉีดยา กับ Aluminum collector ในขณะที่สารละลายเคลื่อนที่ออกมาปลายของเข็มฉีดยา อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่เหมาะสมกับ Surface tension และ Solution flow rate แล้ว จะส่งผลทำให้สารละลายนั้นยืดตัวออกมาเป็นเส้นและตกสะสมลงบน Collector



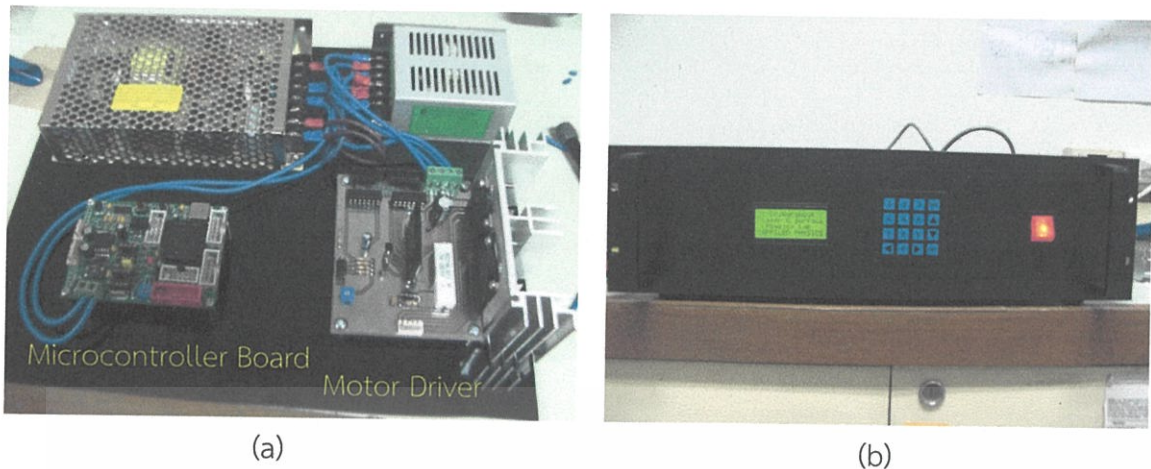
ภาพที่ 4. 1 ชุดเครื่องมือ Electrospinning สำหรับสังเคราะห์เส้นใยนาโนที่ได้ทำการสร้างและพัฒนาขึ้น โดยติดตั้งอยู่ที่ Surface Physics and Plasma Applications Laboratory ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สจล.



ภาพที่ 4. 2 ชุดขับเคลื่อน Syringe ประกอบด้วย Motor พร้อมด้วยแท่นเลื่อน ชิ้นงานผลัดกัน Syringe และ หลอดเข็มฉีดยา ทำหน้าที่เป็น Solution Reservoir

สำหรับ Motor Driver Control & Display Box ภายในประกอบด้วย Motor Driver, Microcontroller Board และ Power supply 2 กล่อง ดังภาพที่ 4. 3 (a) โดย Motor Driver ประกอบขึ้นจาก IC 3 ตัวด้วยกัน คือ IC เบอร์ SI-7502, SLA5011 และ SLA6503 ด้านหน้าของกล่องมีจอ LCD display ขนาด 4 แถว พร้อมด้วย Keypad และ Switch ON/OFF ดังภาพที่ 4. 3 (b)

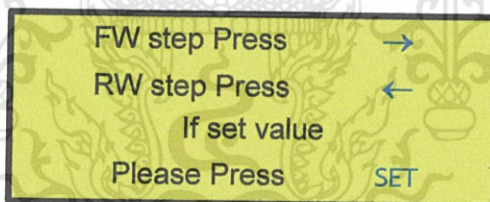
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.3 (a) อุปกรณ์ภายใน และ (b) ด้านหน้าของ Motor Driver Control & Display Box

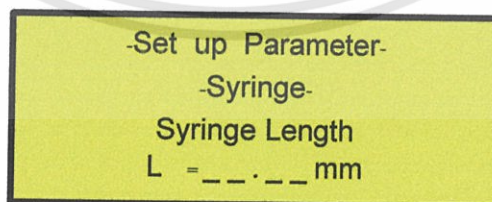
จากโปรแกรมที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นเพื่อควบคุมการทำงานของ Electrospinning apparatus ให้กับ Motor Driver Control & Display Box ดัง Flow chart ในภาพที่ 3.8 และ ภาพที่ 3.9 นั้น จึงทำให้มีขั้นตอนการและวิธีการใช้ Motor Driver Control & Display Box ดังนี้

- 1) เมื่อเปิด Switch ON ของเครื่อง LCD Display จะปรากฏเป็นดังภาพที่ 4.4 ซึ่งผู้ใช้งานสามารถสั่งให้มอเตอร์เคลื่อนที่ไปทาง ข้างหน้า หรือ ถอยหลัง ด้วยการกดคีย์ \rightarrow หรือ \leftarrow ตามลำดับ บน Keypad แต่ ถ้าต้องการตั้งค่าสำหรับการสังเคราะห์เส้นใยนาโนให้ กดปุ่ม **SET** บน keypad



ภาพที่ 4.4 LCD Display หลังจากเปิดเครื่อง และ รอคำสั่ง

- 2) เมื่อกดปุ่ม SET จอ LCD แสดงข้อความดังภาพที่ 4.5

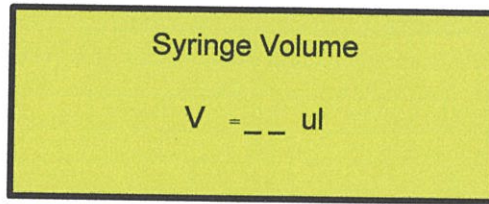


ภาพที่ 4.5 LCD Display ในขณะที่จะทำการป้อนค่าความยาวของ Syringe

- 3) ให้ทำการป้อนค่าความยาวของ Syringe ด้วยตัวเลข 4 digits เช่น เช่น ถ้าความยาวของ Syringe อยู่ที่ตำแหน่งของหลอดฉีดยาที่มีความยาว 58 mm ให้ทำการป้อนค่าด้วยตัวเลข 58.00 เป็นต้น

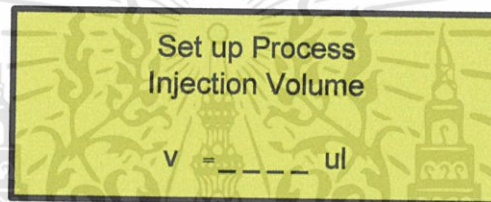
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) หลังจากนั้น LCD Display จะปรากฏข้อความขึ้นดังภาพที่ 4. 6 ให้ทำการป้อนค่าปริมาตรของ Syringe ทั้งหมด ด้วยตัวเลข 2 digits ตัวอย่างเช่น ถ้าปริมาตรของ Syringe มีขนาดเป็น 5 ml ให้กดตัวเลข 05 เป็นต้น



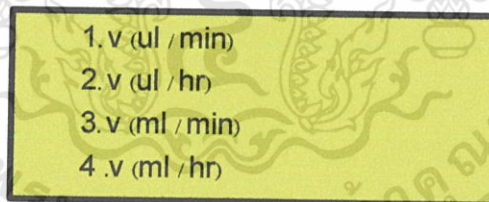
ภาพที่ 4. 6 LCD Display ในขณะที่จะทำการป้อนค่าปริมาตรของ Syringe

- 5) เมื่อป้อนค่าปริมาตรแล้ว LCD Display จะปรากฏหน้าจอเป็นดังภาพที่ 4. 7 ให้ทำการป้อนค่าปริมาตรของสารละลายที่ต้องการจะฉีดออกไปในหน่วย μl ซึ่งต้องทำการป้อนตัวเลขด้วยกัน 4 digits



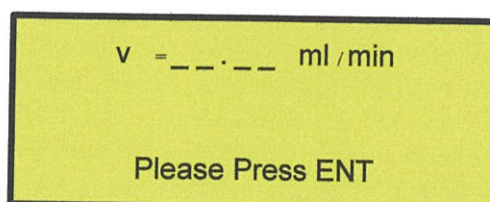
ภาพที่ 4. 7 LCD Display ในขณะที่จะทำการป้อนปริมาตรของสารละลายที่ต้องการฉีด

- 6) เมื่อจอ LCD แสดงข้อความดังภาพที่ 4. 8 ให้ทำการเลือกหน่วยอัตราเร็วในขณะที่ฉีดสารละลาย



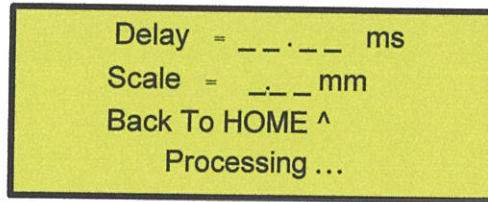
ภาพที่ 4. 8 LCD Display เมื่อทำการเลือกหน่วยอัตราเร็วในขณะที่ฉีดสารละลาย

- 7) กดตัวเลข 1, 2, 3, หรือ 4 เพื่อทำการเลือกหน่วย ซึ่งหลังจากนั้น LCD Display จะปรากฏให้ป้อนค่าอัตราเร็วของการฉีดยาสารละลายพร้อมด้วยหน่วยที่ถูกเลือกดังภาพที่ 4. 9 และ กดปุ่ม ENT เพื่อเริ่มกระบวนการฉีดสารละลาย



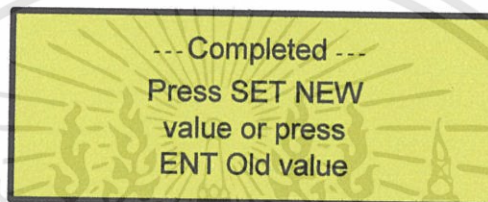
ภาพที่ 4. 9 LCD Display ในขณะที่จะทำการป้อนอัตราเร็วของการฉีดสารละลาย

- 8) หลังจากกดปุ่ม ENT ในข้อ 7) แล้ว LCD Display จะแสดงระยะเวลาการทำงาน และ ระยะทางที่มอเตอร์ต้องทำการขับเคลื่อน Syringe พร้อมทั้งจะแสดงคำว่า Processing ซึ่งเป็นแสดงให้เห็นว่าระบบกำลังทำงานอยู่ ดังภาพที่ 4. 10



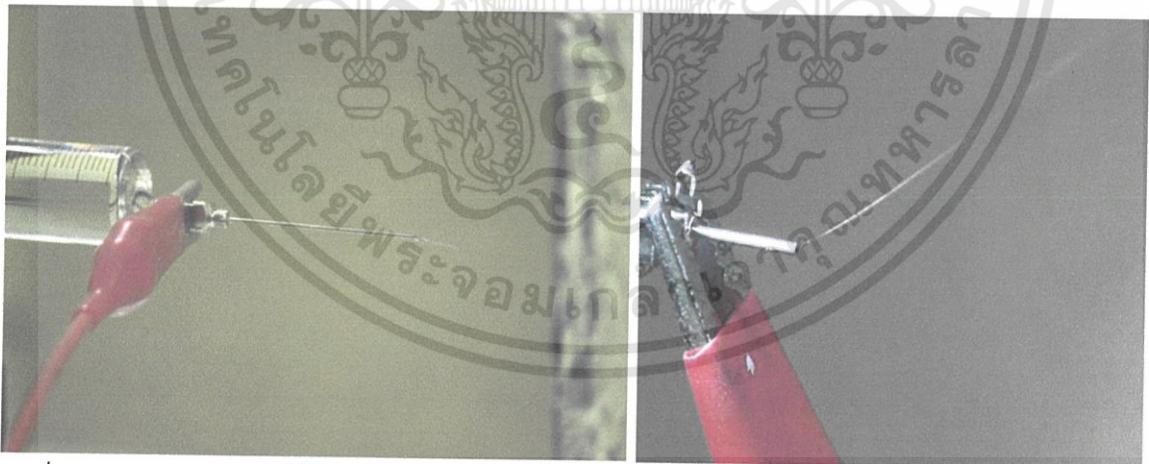
ภาพที่ 4. 10 LCD Display ในขณะที่มีมอเตอร์ทำงาน

- 9) เมื่อจอ LCD แสดงข้อความดังภาพที่ 4. 11 แสดงว่าเสร็จสิ้นกระบวนการ

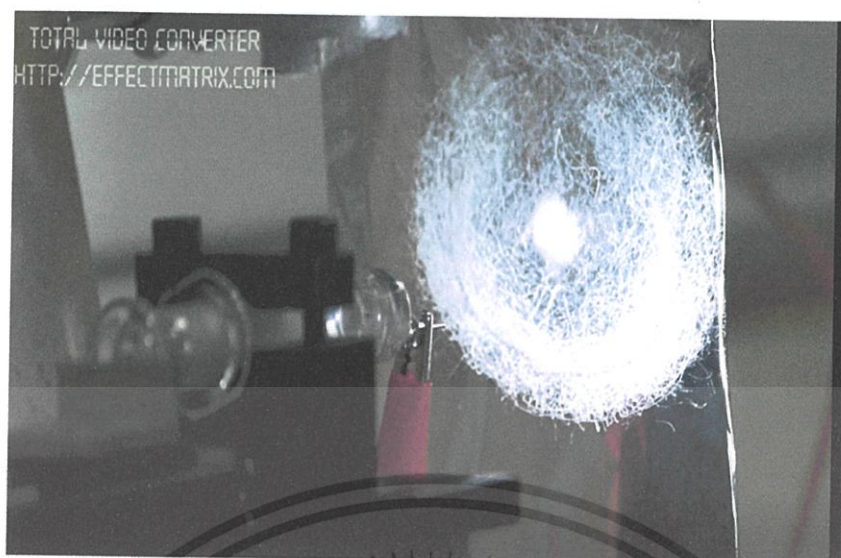


ภาพที่ 4. 11 LCD Display เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการฉีดสารละลาย

จากการทดลองสังเคราะห์ Polymer nanofibers ด้วยการป้อนแรงดันไฟฟ้าขนาด 15 kV ซึ่งมีระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับ Aluminum collector เป็นระยะ 6 cm พบว่า เกิดเส้นใยออกมาจากปลายเข็มมีลักษณะเป็นดังภาพที่ 4. 12 เมื่อสังเกตที่แผ่นรองรับพบว่าเกิดเส้นใยนาโนบน Aluminum Collector ดัง และ ขนาดของเส้นใยนาโนที่สังเกตด้วย Optical Microscope เป็นดัง



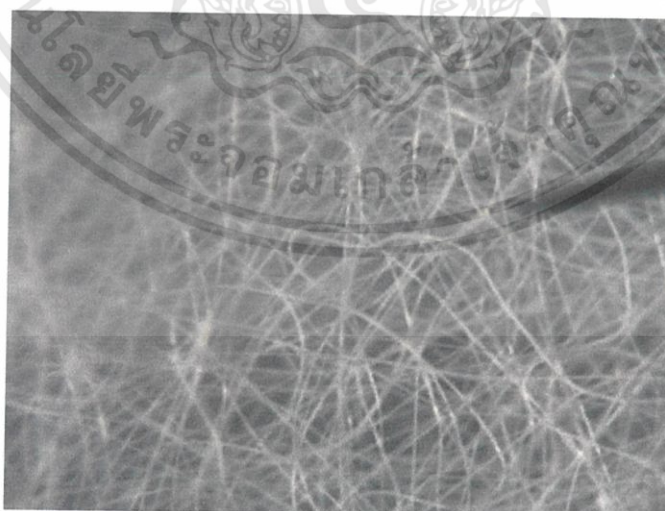
ภาพที่ 4. 12 เส้นใยนาโนที่ออกจากปลายเข็มในขณะที่ทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าขนาด 15 kV ที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับ Aluminum collector เป็นระยะ 6 cm



ภาพที่ 4. 13 เส้นใยนาโนที่เกิดขึ้นบน Aluminum Collector



ภาพที่ 4. 14 เส้นใยนาโนที่เอาออกมาจาก Aluminum Collector

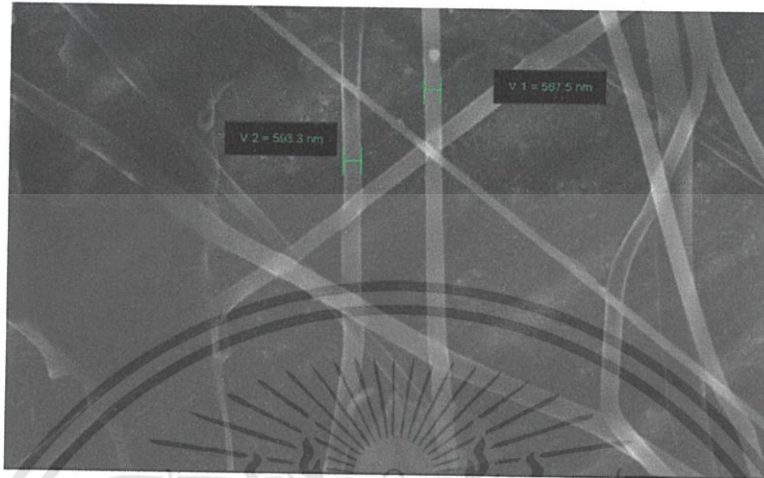


ภาพที่ 4. 15 เส้นใยนาโนที่สังเกตด้วย Optical Microscope ที่กำลังขยาย 220 เท่า

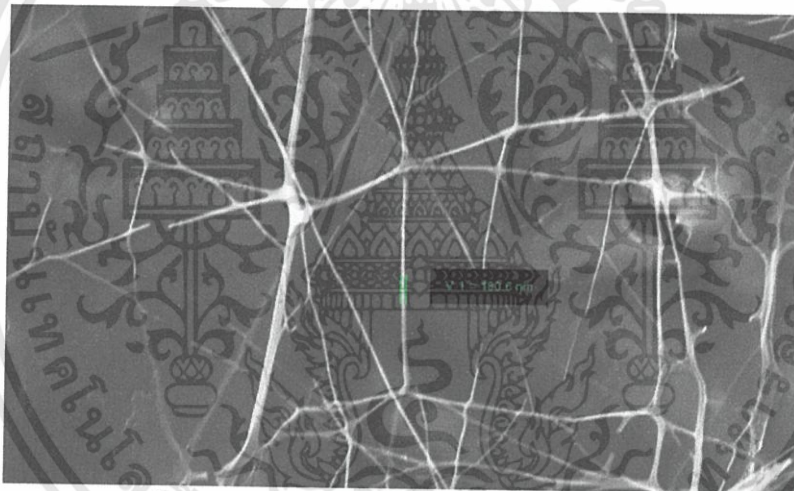
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การสังเคราะห์เส้นใย

ผลการวิเคราะห์โดย Scanning electron microscope (SEM) เส้นใย นาโนซิงค์ออกไซด์ ที่ ความเข้มข้นของ Zn 5g: PVA 5g อัตราส่วนของสารละลายเป็น 2:5



ภาพที่ 4. 16 ZnO nanofiber ก่อนผ่านกระบวนการอบ



ภาพที่ 4. 17 ZnO nanofiber หลังผ่านกระบวนการอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ระบบสังเคราะห์เส้นใยนาโน

การศึกษาการทำงานของวงจร 5-phase Stepping Motor Pentagon Connection Driver สรุปได้ว่า เมื่อ Power supply ทำงานในโหมด Normal mode คือ $R_x = \infty$ จะพบว่า ความกว้างของพัลส์ที่ output ของ ไอซีเบอร์ 7502 ที่ขา 24,23,16,15,7 มากที่สุด ส่งผลให้มอเตอร์ทำงานที่กระแสสูงสุด ทำให้มอเตอร์มีความร้อนอย่างมาก ส่งผลให้มอเตอร์มีอุณหภูมิสูง และมีกำลังสูงสุด แต่เมื่อทำงาน ในสถานะ เป็น power down mode คือ $R_x = 20 \text{ K ohm}$ จะพบว่า ความกว้างของพัลส์ที่ output ของ ไอซีเบอร์ 7502 ที่ขา 24,23,16,15,7 แคบลง นั่นคือส่งผลให้ มอเตอร์ทำงานที่กระแสลดต่ำลงมา แต่กำลังมอเตอร์จะมีค่าน้อยลง เมื่อทำการปรับค่า R_x ให้มีค่าต่ำลงมาเรื่อยๆ ผลที่เกิด มอเตอร์จะค่อยๆเสียกำลังลงเรื่อยๆ และเมื่อ R_x มีค่าเท่ากับศูนย์ จะทำให้มอเตอร์ หยุดนิ่ง แต่อุณหภูมิของมอเตอร์จะทำอุณหภูมิห้อง

5.1.2 การสังเคราะห์เส้นใยนาโน

การทดลองผลิตเส้นใยนาโนด้วยระบบอิเล็กโทรสปินนิง ด้วย Polystyrene ผสมกับ Dimethylformamide จะเห็นได้ว่าการฉีดสารละลายผ่านสนามไฟฟ้าสามารถทำให้สารละลายเกิดเป็นเส้นใยได้จริง โดยผลการทดลองสามารถสรุปได้คือ

1. สนามไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบ ถ้าสนามไฟฟ้ามากส่งผลให้สารละลายระเหยได้เร็วขึ้น แต่ทำให้เกิดบีดส์มากขึ้น เส้นใยจะมีการกระจายตัวเป็นวงกว้างมากขึ้นด้วย
2. อัตราการไหลของสารละลาย ถ้าอัตราการไหลของสารละลายมากจะทำให้เส้นใยและบีดส์มีขนาดใหญ่มากขึ้นและทำให้สารละลายที่ไหลออกมาระเหยไม่ทัน ทำให้เส้นใยไม่แห้งและหลอมรวมกันเป็นแผ่น

นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองสังเคราะห์ ZnO nanofiber พบว่า เส้นใยที่มีขนาดที่อยู่ในระดับนาโนเมตร

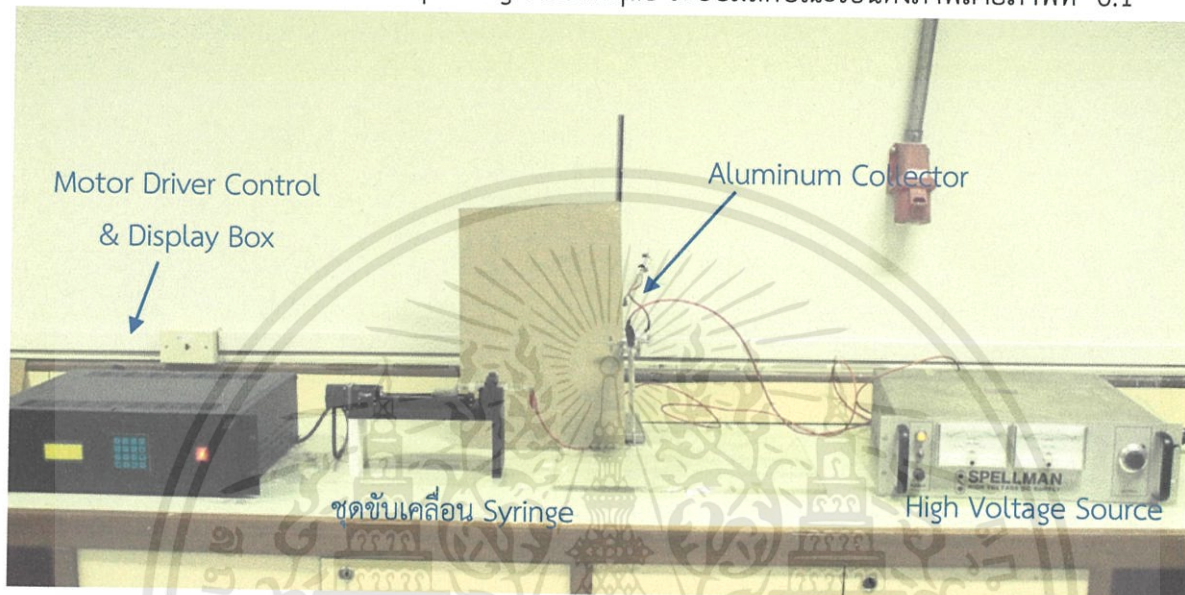
5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการที่ได้ออกแบบ วงจร 5-phase Stepper Motor Pentagon Connection Driver และได้ทำการสร้างลายพิมพ์วงจรเอง จากการวัดผลจาก oscilloscope จะเห็นว่า สัญญาณ ที่ได้ นั้น มีสัญญาณรบกวนสูงเนื่องจากที่สายทองแดง มีเส้นกราวด์เล็กเกินไปทำให้กระแสที่ไหลกลับไหลกลับได้ยาก ส่งผลให้กระแสไหลย้อนกลับเข้ามาในวงจร ทำให้อุปกรณ์ต่าง ๆ ในวงจรมีความร้อนสูง ควรจะมีการทำ ground plane ในวงจร เพื่อมีทางให้กระแสกลับได้สะดวกมากขึ้นและทำให้สัญญาณรบกวนน้อยลง การทำงานของวงจรจะมีประสิทธิภาพมากขึ้น

บทที่ 6

สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

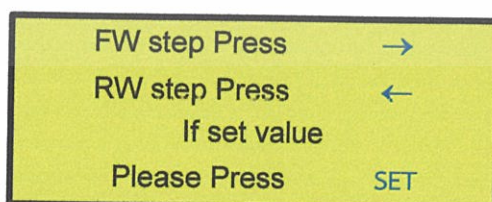
จากแหล่งเงินทุนของการดำเนินงานภายใต้โครงการวิจัยหัวข้อเรื่อง “การออกแบบและสร้างชุดเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่งสำหรับสังเคราะห์เส้นใยนาโน” ผู้วิจัยได้ทำการสร้างชุดเครื่องมือสำหรับสังเคราะห์เส้นใยนาโนด้วย Electrospinning Technique ระบบมีลักษณะเป็นดังภาพถ่ายภาพที่ 6.1



ภาพที่ 6.1 ภาพถ่ายระบบการสังเคราะห์เส้นใยนาโนด้วย Electrospinning Technique

ชุดเครื่องมือสังเคราะห์เส้นใยนาโนที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นมาสามารถควบคุมการทำงานผ่านทาง Keypad ที่ติดตั้งอยู่ด้านหน้าของ Motor Driver Control & Display Box ขั้นตอนการใช้ชุดเครื่องมือ Electrospinning apparatus เพื่อทำการสังเคราะห์เส้นใยนาโนเป็นไปดังนี้

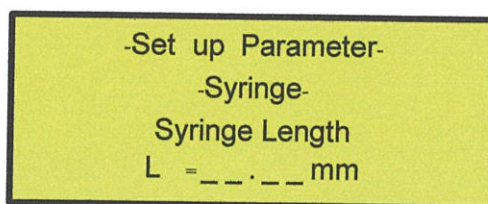
- 1) เมื่อเปิด Switch ON ของเครื่อง LCD Display จะปรากฏเป็นดังภาพที่ 6.2 ซึ่งผู้ใช้งานสามารถสั่งให้มอเตอร์เคลื่อนที่ไปทาง ข้างหน้า หรือ ถอยหลัง ด้วยการกดคีย์ → หรือ ← ตามลำดับ บน Keypad แต่ ถ้าต้องการตั้งค่าสำหรับการสังเคราะห์เส้นใยนาโนให้ กดปุ่ม **SET** บน keypad



ภาพที่ 6.2 LCD Display หลังจากเปิดเครื่อง และ รอคำสั่ง

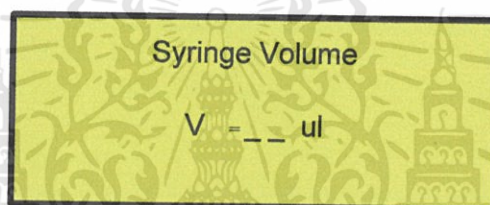
- 2) เมื่อกดปุ่ม SET จอ LCD แสดงข้อความดังภาพที่ 6.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



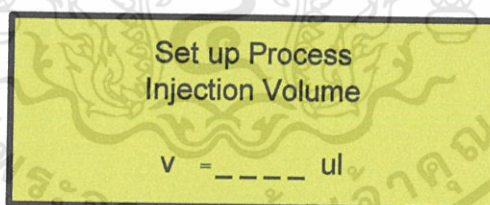
ภาพที่ 6. 3 LCD Display ในขณะที่จะทำการป้อนความยาวของ Syringe

- 3) ให้ทำการป้อนค่าความยาวของ Syringe ด้วยตัวเลข 4 digits เช่น ถ้าความยาวของ Syringe อยู่ที่ตำแหน่งของหลอดฉีดยาที่มีความยาว 58 mm ให้ทำการป้อนค่าด้วยตัวเลข 58.00 เป็นต้น
- 4) หลังจากนั้น LCD Display จะปรากฏข้อความขึ้นดังภาพที่ 6.4 ให้ทำการป้อนค่าปริมาตรของ Syringe ทั้งหมด ด้วยตัวเลข 2 digits ตัวอย่างเช่น ถ้าปริมาตรของ Syringe มีขนาดเป็น 5 ml ให้กดตัวเลข 05 เป็นต้น



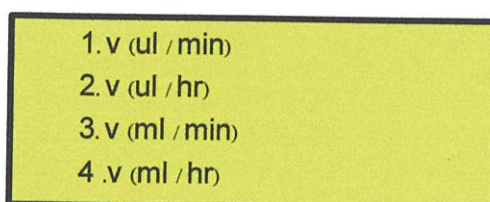
ภาพที่ 6. 4 LCD Display ในขณะที่จะทำการป้อนค่าปริมาตรของ Syringe

- 5) เมื่อป้อนค่าปริมาตรแล้ว LCD Display จะปรากฏหน้าจอเป็นดังภาพที่ 6.5 ให้ทำการป้อนค่าปริมาตรของสารละลายที่ต้องการจะฉีดออกไปในหน่วย μl ซึ่งต้องทำการป้อนตัวเลขด้วยกัน 4 digits



ภาพที่ 6. 5 LCD Display ในขณะที่จะทำการป้อนปริมาตรของสารละลายที่ต้องการฉีด

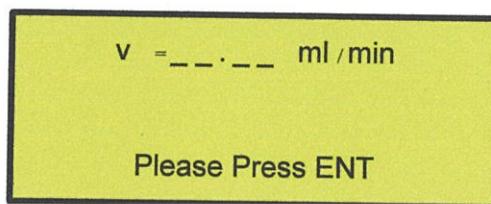
- 6) เมื่อจอ LCD แสดงข้อความดังภาพที่ 6.6 ให้ทำการเลือกหน่วยอัตราเร็วในขณะฉีดสารละลาย



ภาพที่ 6. 6 LCD Display เมื่อทำการเลือกหน่วยอัตราเร็วในขณะฉีดสารละลาย

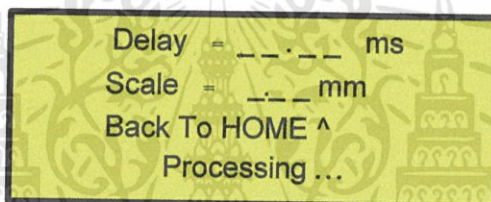
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 7) กดตัวเลข 1, 2, 3, หรือ 4 เพื่อทำการเลือกหน่วย ซึ่งหลังจากนั้น LCD Display จะปรากฏให้ป้อนค่าอัตราเร็วของการฉีดยาสารละลายพร้อมด้วยหน่วยที่ถูกเลือกดังภาพที่ 6.7 และ กดปุ่ม ENT เพื่อเริ่มกระบวนการฉีดสารละลาย



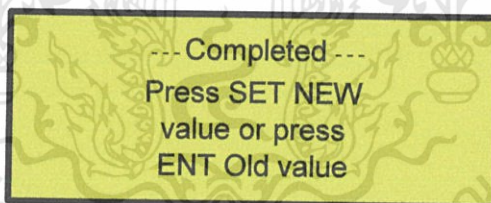
ภาพที่ 6.7 LCD Display ในขณะที่จะทำการป้อนอัตราเร็วของการฉีดสารละลาย

- 8) หลังจากกดปุ่ม ENT ในข้อ 7) แล้ว LCD Display จะแสดงระยะเวลาการทำงาน และ ระยะทางที่มอเตอร์ต้องทำการขับเคลื่อน Syringe พร้อมทั้งจะแสดงคำว่า Processing ซึ่งเป็นแสดงให้เห็นว่าระบบกำลังทำงานอยู่ ดังภาพที่ 6.8



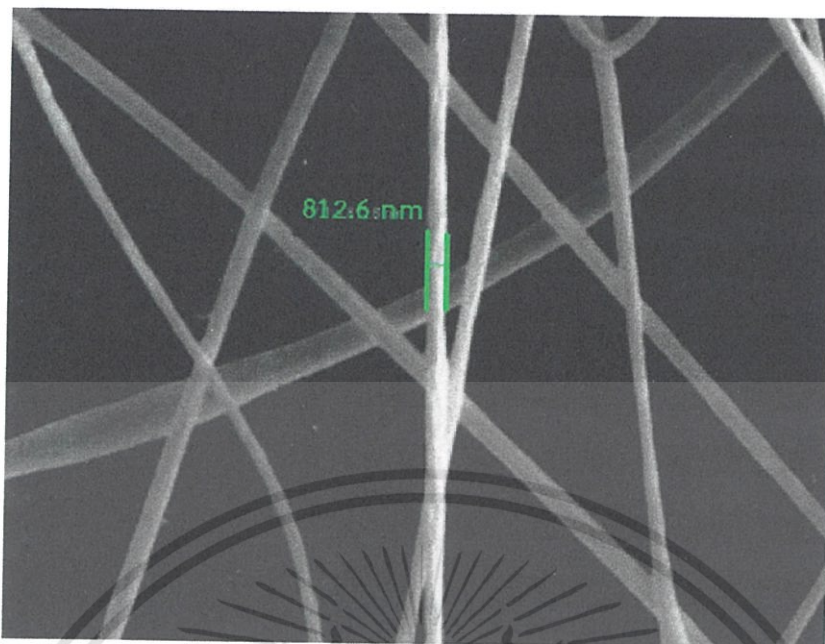
ภาพที่ 6.8 LCD Display ในขณะที่มอเตอร์ทำงาน

- 9) เมื่อจอ LCD แสดงข้อความดังภาพที่ 6.9 ภาพที่ 4. 11 แสดงว่าเสร็จสิ้นกระบวนการ

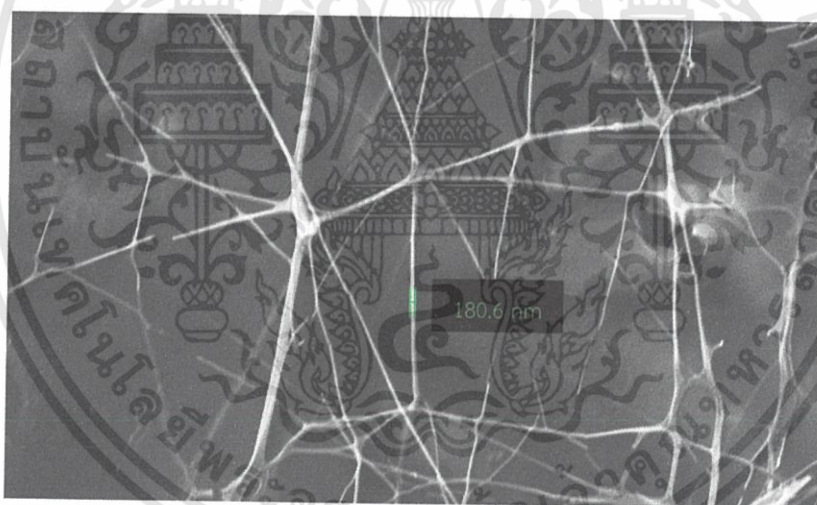


ภาพที่ 6.9 LCD Display เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการฉีดสารละลาย

Polymer nanofiber และ ZnO nanofiber ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่องมือที่ได้ทำการออกแบบและพัฒนาขึ้นเป็นดังภาพที่ 6.10 และ 6.11



ภาพที่ 6. 10 Polymer nanofiber ที่สังเคราะห์ได้จากเครื่องมือชุดอิเล็กทรอนิกส์ที่
 ที่ได้ทำการสร้างและพัฒนาขึ้นมา



ภาพที่ 6. 11 ZnO nanofiber ที่สังเคราะห์ได้จากเครื่องมือชุดอิเล็กทรอนิกส์ที่
 ได้ทำการสร้างและพัฒนาขึ้นมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] B. Veleirinho, M. F. Rei and J. A. Lopes-da-Silva, Solvent and concentration effect on the properties of electrospun poly(ethylene terephthalate) nanofiber mats. *J. Polym. Sci., Part B*, 2008(46), 460–471.
- [2] S. Ramakrishna, K. Fujihara, Wee-Eong Teo, T. Yong, Z. Ma and R. Ramaseshan, Electrospun nanofibers: solving global issue, *Materialstoday* 2006(9), 40-50.
- [3] Hui WU, Wei PAN, Dandan LIN, Heping LI, Electrospinning of ceramic nanofibers: Fabrication, assembly and applications, *J. Adv. Ceram.* 2012(1), 2-23.
- [4] N. Bhardwaj, S. C. Kundu, Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique, *Biotechnology Advances* (2010)28, 325–347.
- [5] Li D, Xia YN. Electrospinning of nanofibers: Reinventing the wheel? *Adv Mater* 2004, 16: 1151-1170.
- [6] Li D, Wang YL, Xia YN. Electrospinning of polymeric and ceramic nanofibers as uniaxially aligned arrays. *Nano Lett* 2003(3), 1167-1171
- [7] Li D, McCann JT, Xia YN. Electrospinning: A simple and versatile technique for producing ceramic nanofibers and nanotubes. *J. Am. Ceram. Soc.* 2006(89) 1861-1869.
- [8] Xianfeng Wang, Bin Ding, Min Sun, Jianyong Yub, Gang Sun, Nanofibrous polyethyleneimine membranes as sensitive coatings for quartz crystal microbalance-based formaldehyde sensors, *Sensors and Actuators B: Chemical* Volume 144, Issue 1, 29 January 2010, Pages 11–17
- [9] Bin Ding, Moran Wang, Xianfeng Wang, Jianyong Yub, Gang Sun, Electrospun nanomaterials for ultrasensitive sensors, *Materials Today* Volume 13, Issue 11, November 2010, Pages 16–27
- [10] Recent advances in nanofibre fabrication techniques Rajkishore Nayak^{1,2}, Rajiv Padhye¹, Ilias Louis Kyratzis², Yen Bach Truong² and Lyndon Arnold, *Textile Research Journal* 82(2) 129-147
- [11] Nandana Bhardwaj, Subhas C. Kundu Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique, *Biotechnology Advances* 28 (2010) 325–347.
- [12] Ondarçuhu T., Joachim C.: Drawing a single nanofibre over hundreds of microns. *Europhysics letters*, 42 (2), pp. 215-220, (1998)
- [13] Morton, W. J., Method of Dispersing Fluids, US Patent 1902(691) 705.
- [14] Doshi, J., and Reneker, D. H., Electrospinning process and application of electrospun fibers. *J. Electrostatics* 1995(35) 151-160.
- [15] <https://en.wikipedia.org/wiki/Electrospinning>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] Taylor G. (1969). Electrically driven jets. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1969(313) 453-475.
- [17] Lukas D., Sarkar A. & Pokorny P. (2008). Self-organization of jets in electrospinning from free liquid surface: A generalized approach. *J. App. Phys.* 2008 (1030) 084309
- [18] Journal of Biomaterials Science Polymer Edition 22(13):1695-712 · January 2011
- [19] Vince Beachley a, Xuejun Wen Effect of electrospinning parameters on the nanofiber diameter and length, *Materials Science and Engineering C* 29 (2009) 663–668.
- [20] <http://www.orientalmotor.com/technology/articles/article-5-phase-driver-technology.html>
- [21] <http://www.orientalmotor.com/technology/articles/article-new-pentagon-bipolar-driver.html>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวหน้าโครงการวิจัย



1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นางสาว ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Miss S. Tipawan Khlayboonme
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3-1011-00042-23-1
ที่อยู่ 21/138 ถ.สารีบุตร-ทับยาว แขวงทับยาว เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ ระดับ 6
4. หน่วยงานที่สังกัด ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เลขที่ 3 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กทม. 10520
ที่อยู่ โทรศัพท 02-326-4111 ต่อ 6197
โทรศัพทมือถือ 081-269-2134
โทรสาร 02-326-4413
E-mail s.tipawan.kh@kmitl.ac.th

5. ประวัติการศึกษา

ปี	ระดับ	วุฒิ	สถาบัน	ประเทศ
2540	ปริญญาตรี	วท.บ (ฟิสิกส์ประยุกต์-โซลิตสเตรท	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	ไทย
2544	ปริญญาโท	อิเล็กทรอนิกส์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	ไทย
2556	ปริญญาเอก	วท.ม (ฟิสิกส์ประยุกต์) ปร.ด (ฟิสิกส์ประยุกต์)	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	ไทย

6. ประสบการณ์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และ/หรือที่ผ่านมา ทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละข้อเสนองานวิจัย

6.1 การพัฒนาเทคนิคโฟกัสลำไอออนเพื่อประยุกต์ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด “คลับแซนวิช” Phase 1A

ตำแหน่ง ผู้ช่วยนักวิจัย
แหล่งทุนสนับสนุน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ปี พ.ศ. 2541-2544
งบประมาณ 5,104,960.00 บาท

6.2 การพัฒนาเทคนิคโฟกัสลำไอออนเพื่อประยุกต์ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด “คลับแซนวิช” Phase 1B

ตำแหน่ง ผู้ช่วยนักวิจัย
แหล่งทุนสนับสนุน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ปี พ.ศ. 2544-2546
งบประมาณ 2,701,496.00 บาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 6.3 การพัฒนาเทคนิคโพกัสล่าไอออนเพื่อประยุกต์ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด “คลับแซนวิช” Phase 2
- | | |
|------------------|---|
| ตำแหน่ง | ผู้ร่วมวิจัย |
| แหล่งทุนสนับสนุน | สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ปี พ.ศ. 2546-2548 |
| งบประมาณ | 3,815,350.00 บาท |
- 6.4 การพัฒนาอุปกรณ์ชุด Secondary Ion Mass Spectroscopy และการใช้งาน
- | | |
|------------------|---|
| ตำแหน่ง | ผู้ร่วมวิจัย |
| แหล่งทุนสนับสนุน | ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ปี พ.ศ. 2546-2548 |
| งบประมาณ | 4,069,109.00 บาท |
- 6.5 การพัฒนาแหล่งกำเนิดไอออนแบบรวมลำไอออนและระบบโพกัสเพื่อการประยุกต์ใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด “คลับแซนวิช”
- | | |
|------------------|---|
| ตำแหน่ง | ผู้ร่วมวิจัย |
| แหล่งทุนสนับสนุน | สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ปี พ.ศ. 2548-2550 |
| งบประมาณ | 9,986,000.00 บาท |
- 6.6 การสังเคราะห์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่มีโครงสร้างระดับนาโนด้วยเทคนิค Ultrasonic Spray Pyrolysis เพื่อประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับตัวเก็บประจุยิ่งยวด
- | | |
|------------------|--|
| ตำแหน่ง | หัวหน้าโครงการ |
| แหล่งทุนสนับสนุน | งบเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ สจล. ปีงบประมาณ 2558 |
| งบประมาณ | 200,000.00 บาท |
- 6.7 การปลูกและวัดสมบัติฟิล์มบางเพียโซอิเล็กทริกอลูมิเนียมไนไตรด์ที่เตรียมด้วยวิธีแอททีฟอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงบนฐานรองรับพลาสติก PET
- | | |
|------------------|--|
| ตำแหน่ง | หัวหน้าโครงการ |
| แหล่งทุนสนับสนุน | งบเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ สจล. ปีงบประมาณ 2558 |
| งบประมาณ | 50,000.00 บาท |
- 6.8 การออกแบบและสร้างชุดเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์พินนิ่งสำหรับสังเคราะห์เส้นใยนาโน
- | | |
|------------------|--|
| ตำแหน่ง | หัวหน้าโครงการ |
| แหล่งทุนสนับสนุน | งบเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ สจล. ปีงบประมาณ 2559 |
| งบประมาณ | 50,000.00 บาท |
- 6.9 การออกแบบและสร้างชุดเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์พินนิ่งสำหรับสังเคราะห์เส้นใยนาโน
- | | |
|------------------|--|
| ตำแหน่ง | หัวหน้าโครงการ |
| แหล่งทุนสนับสนุน | งบเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ สจล. ปีงบประมาณ 2559 |
| งบประมาณ | 50,000.00 บาท |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.10 การสังเคราะห์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์เจือด้วยทองแดงโดยกระบวนการอัลตราโซนิกแอโรโซล
ไพโรไลซิส

ตำแหน่ง	หัวหน้าโครงการ
แหล่งทุนสนับสนุน	งบเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ สจล. ปีงบประมาณ 2560
งบประมาณ	160,000.00 บาท

6.10 การพัฒนาระบบเคลือบแบบจุ่มซบเคลือบด้วยความแม่นยำสูงสำหรับการสร้างชั้นฟิล์มบาง
นาโน

ตำแหน่ง	หัวหน้าโครงการ
แหล่งทุนสนับสนุน	งบเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ สจล. ปีงบประมาณ 2559
งบประมาณ	140,000.00 บาท

6.12 การพัฒนาระบบการเคลือบฟิล์มบางด้วยเทคนิคการสปีดเตอร์ด้วยลำไอออน

ตำแหน่ง	หัวหน้าโครงการ
แหล่งทุนสนับสนุน	งบประมาณแผ่นดิน วช. ปีงบประมาณ 2560
งบประมาณ	491,500.00 บาท

ผลงานตีพิมพ์

1. S.Tipawan Khlayboonme, Pitiporn Thanomngam and Warawoot Thowladda, Effect of SnCl₄ Concentration on Transparent and Conducting Undoped Tin Oxide Thin Films Key Engineering Materials, Vol. 690, 246-251 (2015).
2. S.Tipawan Khlayboonme and Warawoot Thowladda, Comparative Study of Non-Annealing and Annealing on Properties of ITO Deposited by RF Magnetron Sputtering, Key Engineering Materials Vol. 659, 615-619 (2015).
3. S. Suriyasirikune, S.T. Khlayboonme, W. Thowladda, Phase-Shifting Interferometry for Surface Roughness Measurement on Glass Substrates, to be published in Advanced Materials Research
4. S.T. Khlayboonme and W. Thowladda, Plasma Impedance Tuning Effect on Nanostructure of Diamond Films , Applied Mechanics and Materials Vol. 394, 32-37 (2013)
5. S.T. Khlayboonme and W. Thowladda, Nanocrystalline Diamond Films Deposited by Two-step Approach from CH₄/H₂ Microwave Plasma: The Influence of Reactor Pressure, Applied Mechanics and Materials Vol. 339, 657-664 (2013)
6. S.Tipawan Khlayboonme, Wichan Wicharn Techitdheera and Warawoot Thowladda, Effect of Two-step Deposition Process on Morphology and Optical Properties of Nanostructured Diamond Films, Advanced Materials Research Vol. 651, 148-153 (2013)
7. Piti Sinnuntasen, S.Tipawan Khlayboonme, and Warawoot Thowladda, Effect of low-pressure DC plasma cleaning on leadframe surface: contact angle, wire pull and stitch pull strength studies, Proceeding of The 7th Annual Conference of The Thai Physics Society, SIAM PHYSICS CONGRESS 2012.
8. Piti Sinnuntasen, S.Tipawan Khlayboonme, and Warawoot Thowladda, Effect of low-pressure DC plasma cleaning on leadframe surface, 1st Mae Fah Luang University International Conference 2012.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รางวัลที่เคยได้รับ: Best Poster Award in the 8th International Conference on Materials Science and Technology for the presentation in Surface Engineering and Heat Treatment Session entitled Comparative Study of Non-Annealing and Annealing on the Properties of ITO Deposited by RF Magnetron Sputtering



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้