

การออกแบบและสร้างเครื่องยืดฟิล์มแบบร้อนสำหรับ
พอลิเมอร์ไพโซอิเล็กทริก

DESIGN AND FABRICATION OF THERMALLY
STRETCHING MACHINE FOR PIEZOELECTRIC POLYMER



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานปีการศึกษา 2560 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND FABRICATION OF THERMALLY STRETCHING MACHINE FOR PIEZOELECTRIC POLYMER



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ACADEMIC YEAR 2017
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การออกแบบและสร้างเครื่องยืดฟิล์มแบบร้อนสำหรับพอลิเมอร์ไพเอโซอิเล็กทริก

Design and Fabrication of Thermally Stretching Machine for Piezoelectric Polymer

ชื่อนักศึกษา นางสาววารภรณ์ อัครเทสกุล รหัสนักศึกษา 57051024

นายวีรศักดิ์ โคตรทิพย์ รหัสนักศึกษา 57051031

นางสาวศศิธร พาหา รหัสนักศึกษา 57051033

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2560

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.พิศาล สุขวิสูตร

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2560

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.เอกภรณ์ สกลการะเวก ประธานกรรมการ	อ.ภรณ์ สกลการะเวก
ผศ.ดร.ราชศักดิ์ ศักดกนภาพ กรรมการ	ราชศักดิ์ ศักดกนภาพ
ดร.กาญจนา สุวรรณสุขโข กรรมการ	กาญจนา สุวรรณสุขโข
ดร.พิศาล สุขวิสูตร กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	พิศาล สุขวิสูตร

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การออกแบบและสร้างเครื่องยึดฟิล์มแบบร้อนสำหรับพอลิเมอร์โพไอโซอิลีทริก	
ชื่อนักศึกษา	นางสาววราภรณ์ อัครเทศกุล	รหัสนักศึกษา 57051024
	นายวีรศักดิ์ โคตรทิพย์	รหัสนักศึกษา 57051031
	นางสาวศศิธร พาหา	รหัสนักศึกษา 57051033
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)	
ภาควิชา	ฟิสิกส์	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)	
ปีการศึกษา	2560	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.พิศาล สุขวิสูตร	

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้สนใจการประดิษฐ์เครื่องยึดฟิล์มแบบร้อนสำหรับพอลิเมอร์โพไอโซอิลีทริก โดยใช้โปรแกรมไมโครซอฟท์ วิซวลสตูดิโอ (Microsoft Visual Studio) และบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูยโนโอโน (Arduino Uno) รุ่น 3 เป็นตัวควบคุมการทำงาน ส่วนประกอบของเครื่องยึดประกอบด้วยตัวร้อนและลิเนียร์มอเตอร์แบบแกนเดียว (single-axis linear motor) เครื่องยึดฟิล์มที่สร้างขึ้นนี้สามารถทำการยึดฟิล์มให้มีความยาวสูงสุด 12.5 เซนติเมตร นอกจากนี้ในโครงการนี้ยังได้เตรียมแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์-เฮกซะฟลูออโรโพรไพลีน (polyvinylidene fluoride - hexafluoropropylene, P(VDF-HFP)) โดยใช้อัตราส่วนพอลิเมอร์ต่อตัวทำละลายเป็น 1:5 และกานผสมที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสจนกระทั่งพอลิเมอร์ละลายได้อย่างสมบูรณ์ ส่วนผสมที่ได้จะถูกนำไปเทลงบนแผ่นกระจกแล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 คืน หลังจากนั้นฟิล์มที่ลอกออกจากแผ่นกระจกจะถูกนำไปยึดให้มีความยาวเป็น 2-5 เท่าของขนาดฟิล์มเริ่มต้น ผลการวิจัยพบว่าพื้นผิวของแผ่นฟิล์มเกิดริ้วที่มีลักษณะทรงรีขึ้นเป็นจำนวนมากที่บริเวณพื้นผิวและจะขยายขนาดใหญ่ขึ้นตามอัตราการยึดที่เพิ่มขึ้น ฟิล์มที่ไม่ผ่านการยึดจะมีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นเฟส α เมื่อได้รับการยึดจากเครื่องยึดแบบร้อนจะมีการเปลี่ยนโครงสร้างกลายเป็นเฟส β ซึ่งโครงสร้างแบบนี้จะมีความเป็นสมบัติทางไฟฟ้าโพไอโซอิลีทริก โดยปริมาณสัดส่วนเฟส β มีค่าสูงสุด 84% เมื่อยึดฟิล์มที่มีความยาว 4 เท่า

คำสำคัญ : โพไอโซอิลีทริก , เฟส α , เฟส β

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Design and Fabrication of Thermally Stretching Machine for Piezoelectric Polymer		
Students	Miss.Waraporn Aussawataesakul	Student ID	57051024
	Mr.Weerasuk Khottip	Student ID	57051031
	Miss.Sasithorn Phaha	Student ID	57051033
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)		
Department	Physics		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic Year	2017		
Advisor	Dr.Pisan Sukwisut		

Abstract

This special project has focused on objectives of this research project is centered around the influence of the invention of hot stretching machine for piezoelectric films by using the Microsoft Visual Studio program and microcontroller board of Arduino Uno version 3 as an operating control unit. The component of stretching machine is consisted of an oven and single-axis linear motor. The invented machine can stretch the film with the longest distance of 12.5 centimeter. Additionally, this work also prepared the poly(vinylidene fluoride-hexafluoropropylene) (P(VDF-HFP)) films by using the polymer and solvent with the ratio of 1:5 and stirring the mixture at 50 degree Celsius until the solution dissolved completely. Thereafter, the solution was poured onto a glass plate and dried at 90 degree Celsius for 1 night. The neat films peeled off from the glass were drawn with 2-5 times of the original length. The research findings show that the surfaces of stretched films are a large number of streaks with oval shape at the surface and is enlarged by increasing elongation rates. the structure of original film mainly exhibits a phase α . After stretching, the drawn film is able to be transform into a β phase whose structure displays the piezoelectricity. The maximum value of β phase fraction is 84% at the stretching distance 4 times.

Keywords : piezoelectric , phase α , phase β

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิจัยฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดีเนื่องจากผู้จัดทำได้รับความร่วมมือและช่วยเหลือจากบุคคลที่มีพระคุณหลายท่าน ผู้จัดทำขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย โดยมีบุคคลดังต่อไปนี้

ดร.พิศาล สุขวิสูตร ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่ให้คำแนะนำถ่ายทอดวิชาความรู้ด้านต่างๆทั้งด้านหลักการและทฤษฎี และชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหา รวมทั้งการตรวจแก้เล่มวิจัยเล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์

ผู้จัดทำขอขอบคุณ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นอย่างดีมาตลอด

สุดท้ายนี้สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากงานวิจัยเล่มนี้ผู้จัดทำขอมอบให้บิดา มารดา อาจารย์ที่เคารพ ผู้ที่ให้การสนับสนุนทางการศึกษาเป็นอย่างดี ถ้าหากงานวิจัยเล่มนี้มีข้อบกพร่องประการใด ผู้จัดทำต้องขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

วรารักษ์ อัครเทสกุล

วิรัชศักดิ์ โคตรทิพย์

ศศิธร พาหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญตาราง	ช
คำย่อ/สัญลักษณ์	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 หลักการพื้นฐานของพอลิเมอร์พอลิไซโอเล็กทริก	3
2.2 โครงสร้างผลึกของ PVDF	4
2.3 ทฤษฎีและหลักการของระบบ	7
2.3.1 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างทางโมเลกุลของพอลิเมอร์ FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrometer)	7
2.3.2 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวของพอลิเมอร์ SEM (Scanning Electron Microscope)	9
2.3.2.1 หลักการทำงานของเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope)	10
2.4 อาร์ดูอโน (Arduino)	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การวิจัยและการดำเนินการ	
3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ	15
3.2 การดำเนินงานวิจัย	18
3.2.1 การออกแบบและสร้างเครื่องยัดฟิล์ม	18
3.2.2 การเตรียม Poly (vinlidene fluoride-hexafluoropropylene) ; P(VDF-HFP)	22
3.2.3 การออกแบบโปรแกรมและการทำงาน	24
3.2.3.1 การออกแบบโปรแกรม	24
3.3.4 การดำเนินการทดลอง	29
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	
4.1 ผลของการเปลี่ยนโครงสร้างพอลิเมอร์หลังได้รับการยัดโดยใช้ FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrometer) วิเคราะห์	32
4.2 ผลของการเปลี่ยนโครงสร้างพอลิเมอร์หลังได้รับการยัดโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ โครงสร้างพื้นผิวของพอลิเมอร์ SEM (Scanning Electron Microscope) วิเคราะห์	35
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	39
5.2 ปัญหาและอุปสรรค	40
5.3 ข้อเสนอแนะแนวทางพัฒนาต่อ	40

เอกสารอ้างอิง

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า	3
2.2 โครงสร้าง (a) non-piezoelectric α -phase และ (b) piezoelectric β -phase ของ PVDF	5
2.3 ภาพแสดงกระบวนการเปลี่ยนรูปจาก α - crystal เป็น β - crystal ของ PVDF	6
2.4 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างทางโมเลกุลของพอลิเมอร์ FTIR	7
2.5 ส่วนประกอบและลำดับการทำงานของเครื่องตรวจวัด	8
2.6 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวของผลึก SEM	9
2.7 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่อง SEM	10
2.8 แสดงระดับพลังงานของอิเล็กตรอน	11
2.9 บอร์ด Arduino	12
2.10 (a) บอร์ด Arduino ต่อกับ LED (b) บอร์ด Arduino ต่อกับ Xbee shield	13
2.11 แสดงถึงส่วนประกอบที่ทำหน้าที่ต่างๆกันของบอร์ด Arduino	13
3.1 วัสดุและอุปกรณ์บางส่วน	17
3.2 การเจาะตุ๋อบ (ก)	18
3.2 การเจาะตุ๋อบ (ข)	18
3.2 การเจาะตุ๋อบ (ค)	18
3.2 การเจาะตุ๋อบ (ง)	18
3.3 การยึดลูกปืนเข้ากับด้านในของตุ๋อบ (ก)	19
3.3 การยึดลูกปืนเข้ากับด้านในของตุ๋อบ (ข)	19
3.4 ประกอบลิเมียร์ใส่ตุ๋อบ (ก)	19
3.4 ประกอบลิเมียร์ใส่ตุ๋อบ (ข)	19
3.5 ติดแผ่นเหล็กเข้ากับลิเนียร์ (ก)	20
3.5 ติดแผ่นเหล็กเข้ากับลิเนียร์ (ข)	20
3.6 เครื่องยึดฟิล์มที่ประกอบเสร็จแล้ว	20
3.7 ติดอุปกรณ์ทั้งหมดเข้ากับฐานไม้อัด	21
3.8 เครื่องยึดฟิล์มพร้อมทำการทดลอง	21
3.9 พอลิเมอร์ 5 กรัม ผสมกับโตเมทิลฟอร์มาไมด์ 25 มิลลิลิตร	22
3.10 กวนพอลิเมอร์ด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก	22
3.11 เอาพอลิเมอร์เข้าอบ	23
3.12 พอลิเมอร์ผ่านการอบ	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 แสดงแผนภาพไดอะแกรมของเครื่องมือ	24
3.14 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino	25
3.15 VEXTA Model pk264B2-sg36	25
3.16 ตัวคอนโทลสแต็ปมอเตอร์แบบ BL TB6600 V1.2	27
3.17 รางเลื่อนที่ใช้ในการทำการทดลอง	27
3.18 Power supply แบบ Switching	28
3.19 फिल्मที่ตัด 2.5 เซนติเมตร	29
3.20 ใส่ฟิล์มเข้าไปในตู้อบ	29
3.21 फिल्मที่ผ่านการยัดมาแล้ว (ก) फिल्मยัดที่ขนาด 2 เทา	30
3.21 फिल्मที่ผ่านการยัดมาแล้ว (ข) फिल्मยัดที่ขนาด 3 เทา	30
3.22 ตัดฟิล์มเตรียมนำไปตรวจผล	31
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Intensity และ Wavenumber ของฟิล์มที่ก่อนการยัด และหลังจากได้รับการยัดที่อัตราการยัด 2 , 3 , 4 และ 5 เทาของขนาดของฟิล์ม	32
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการยัดและสัดส่วนของเฟส β	34
4.3 ภาพการเปลี่ยนแปลงของฟิล์มจากเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 3,000	35
4.3 ภาพการเปลี่ยนแปลงของฟิล์มจากเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 6,000	36
4.3 ภาพการเปลี่ยนแปลงของฟิล์มจากเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 10,000	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ตารางแผนการดำเนินงาน	2
4.2 ตารางค่าสัดส่วนของเฟส β ที่อัตราการยี่ดต่างๆ	33



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
PVDF	พอลิเมอร์ไพโซโซอิเล็กทริก
α	แอลฟา
β	เบต้า
λ	อัตราการใช้
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectrometer
SEM	Scanning Electron Microscope
$F(\beta)$	ค่าสัดส่วนของเฟส β
A_α	ค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของฟิล์มที่มีโครงสร้างเป็นเฟส α
A_β	ค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของฟิล์มที่มีโครงสร้างเป็นเฟส β

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันสมบัติไพเอโซอิเล็กทริกและไพโรอิเล็กทริกเป็นสมบัติที่มีการศึกษาอย่างกว้างขวาง โดยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปที่การตรวจวัดสมบัติ ของพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) เนื่องจากมีสมบัติทางไฟฟ้าที่โดดเด่นซึ่งสัมพันธ์กับโครงสร้างผลึกของพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างผลึกเป็นพอลิเมอร์แบบกึ่งผลึก ประกอบไปด้วยเฟสของผลึกซึ่งมีทั้งหมด 5 เฟส ($\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon$) โดยเฟส α และเฟส β เป็นเฟสที่พบมากที่สุด เฟส α เป็นเฟสที่เสถียรมากที่สุดที่อุณหภูมิห้องและความดันปกติและเป็นเฟสเริ่มต้นของ PVDF และเฟส β ซึ่งมีเสถียรภาพแบบเชิงกลภายใต้อุณหภูมิและความดันบรรยากาศเป็นเฟสที่แสดงสมบัติไพเอโซอิเล็กทริกและไพโรอิเล็กทริกที่โดดเด่นมากและเป็นเฟสที่กำลังเป็นที่ต้องการอยู่ในขณะนี้

ฟิล์มของพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์สามารถเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากโครงสร้างผลึกที่อยู่ในรูป α ไปเป็นผลึกที่อยู่ในรูป β ได้โดยการนำฟิล์มพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์มายืดด้วยเงื่อนไข 3 เงื่อนไข คือ อุณหภูมิการยืด , อัตราการยืดและความเร็วในการยืด

เครื่องมือที่ใช้ในการยืดฟิล์มซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในส่วนของ Linear ที่ทำหน้าที่ดึงฟิล์มให้ยืดออกมีราคาค่อนข้างสูง ซึ่งในระดับมหาวิทยาลัยนั้นการที่จะนำเครื่องมือที่มีราคาสูงมาใช้ในงานวิจัยเป็นเรื่องที่มีความเป็นไปได้ยาก จึงได้มีการนำ Arduino และโปรแกรม Microsoft Visual Studio ที่มีราคาข้อมเยาหาซื้อได้ง่าย และสามารถใช้งานได้มาปรับใช้แทนเครื่องมือเหล่านั้นโดยการออกแบบและเขียนโปรแกรมควบคุมมอเตอร์การหมุนที่ใช้ในการยืดฟิล์ม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนเฟสของพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) เมื่อได้รับการยืด
2. เพื่อสร้างอุปกรณ์ที่สามารถใช้งานในการยืดฟิล์มได้จริง
3. เพื่อศึกษาการใช้โปรแกรม Microsoft Visual Studio และ Arduino ในการควบคุมการยืด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ออกแบบและทำการสร้างตู้อบร้อนที่สามารถยืดฟิล์ม พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) ตลอดทั้ง ศึกษาขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม โครงสร้างพื้นผิว กระบวนการเปลี่ยนเฟสของฟิล์มเมื่อได้รับการยืดและการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของเครื่องยืดด้วยการใช้บอร์ด Arduino และโปรแกรม

Microsoft Visual Studio เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. จัดอุปกรณ์และศึกษาทฤษฎีการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของฟิล์ม polyvinylidene fluoride (PVDF)
2. ออกแบบการประกอบเครื่องยัดฟิล์ม
3. ศึกษาการเขียนคำสั่ง Arduino และ Visual Basic เพื่อใช้ในการควบคุมเครื่องยัดฟิล์ม
4. ทดสอบการยัดฟิล์ม
5. วิเคราะห์ สรุปผล เขียนรายงานการวิจัย และทำรูปเล่ม

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ระยะเวลา									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
ขั้นตอนที่ 1										
ขั้นตอนที่ 2										
ขั้นตอนที่ 3										
ขั้นตอนที่ 4										
ขั้นตอนที่ 5										

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับความรู้เกี่ยวกับการใช้โปรแกรม Microsoft Visual Studio และ Arduino ในการควบคุมการหมุนของมอเตอร์ที่อยู่ในเครื่องยัดฟิล์มและได้รับความรู้ในการวิเคราะห์ผลจาก FTIR และ SEM
2. ได้เครื่องยัดฟิล์มทางไพโอโซอิเล็กทริกไว้ใช้งานสำหรับการวิจัยในระดับสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

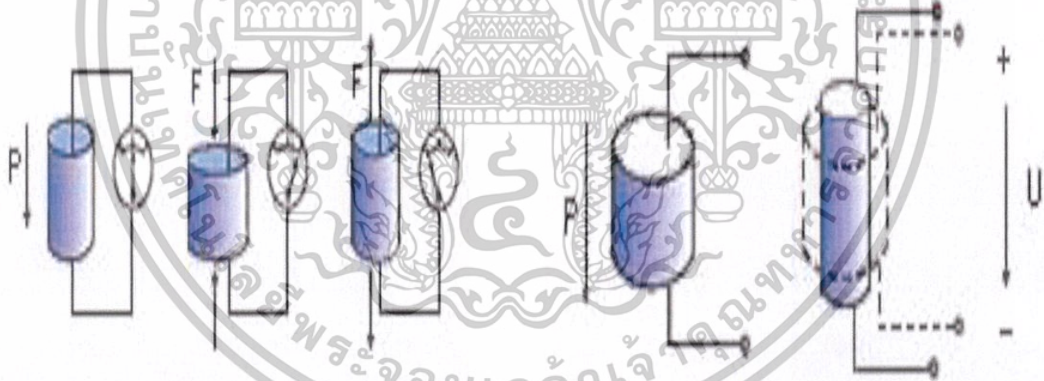
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้ได้อธิบายหลักการพื้นฐานและทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับพอลิเมอร์ไพโซอิเล็กทริก และเครื่องมือที่ใช้ในการทำงานวิจัย ทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาเพื่อเป็นพื้นฐานให้งานวิจัย รายละเอียดต่างๆ อธิบายได้ดังต่อไปนี้

2.1 หลักการพื้นฐานของพอลิเมอร์ไพโซอิเล็กทริก

วัสดุไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric material) คือ วัสดุเซรามิกที่เมื่อได้รับแรงกดหรือแรงดึง จะเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า เรียกว่าปรากฏการณ์แบบตรง (Direct Effect) หรือเมื่อวัสดุไพโซอิเล็กทริกได้รับกระแสไฟฟ้าจะเกิดการยืดหดตัวเองได้ ซึ่งขนาดของการยืดหดนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ได้รับ คือเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล เรียกว่า ปรากฏการณ์แบบทางอ้อม (Converse Effect)



a) Direct Piezo Effect

b) Converse Piezo Effect

รูปที่ 2.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงระหว่างพลังงานกลและพลังงานไฟฟ้าของวัสดุไพโซอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่เดิมมาพลาสติกหรือพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ มีประโยชน์เพียงใช้ทำสิ่งของเครื่องใช้พื้นบ้านต่างๆ เท่านั้น ในอดีตพอลิเมอร์ถูกจัดอยู่ในสารจำพวกฉนวนความร้อนหรือฉนวนไฟฟ้า แต่ต่อมาในปี ค.ศ.1969 นักวิทยาศาสตร์ญี่ปุ่นชื่อ คาวาอิ (H. Kawai) ได้พบว่า พอลิเมอร์ชนิดหนึ่ง คือ พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (polyvinylidene fluoride) ซึ่งเรียกกย่อๆ ว่า PVDF มีสมบัติไฟฟ้าไพเอโซอิเล็กทริก (piezoelectric) กล่าวคือ พอลิเมอร์ชนิดนี้สามารถให้กระแส ไฟฟ้า เมื่อได้รับแรงกด บีบหรือดึง เนื่องจากเกิดความเค้นภายในวัสดุ ทำให้วัสดุมีการกระจัดทางไฟฟ้า (Electrical displacement) สามารถก่อให้เกิดประจุไฟฟ้า ประจุไฟฟ้าบวก (Positive charge) อยู่ที่ผิวด้านหนึ่งและประจุลบ (Negative charge) อยู่ที่ผิวอีกด้านหนึ่งของวัสดุ ปริมาณของการกระจัดทางไฟฟ้านี้จะแปรผันตามความเค้น เรียกว่า ปรากฏการณ์ไพเอโซอิเล็กทริกแบบตรง (Direct piezoelectric effect) ซึ่งปรากฏการณ์นี้ถูกนำมาใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า ส่วนปรากฏการณ์ไพเอโซอิเล็กทริกแบบอ้อม (Converse piezoelectric effect) แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างวัสดุในลักษณะยืดออก (Extension) หรือหดเข้า (Contraction) สัมพันธ์กับทิศทางการกระจัดของไดโพลภายในวัสดุ วัสดุเกิดความเครียด (Strain) อันเป็นผลจากการกระจัดในสนามไฟฟ้าและความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นกับขนาดและทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้ ซึ่งปรากฏการณ์ไพเอโซอิเล็กทริกแบบอ้อมนี้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวกระตุ้นการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วย

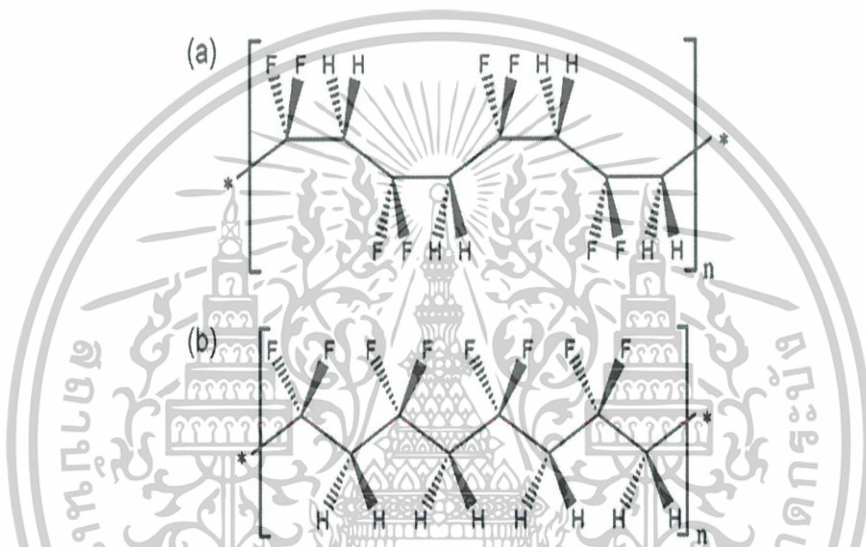
พอลิเมอร์ไพเอโซอิเล็กทริกเหล่านี้จะมีไดโพลถาวรทางไฟฟ้า (permanent electric dipole) อยู่ในตัวของมันเองถ้ามีสนามไฟฟ้าผ่านฟิล์ม PVDF แผ่นฟิล์มจะยืดหรือหดตัวได้ ถ้าสนามไฟฟ้าเป็นสนามไฟฟ้าแบบสลับ แผ่นฟิล์มจะยืดหดด้วยความถี่ของสนามไฟฟ้านั้น ซึ่งจะทำให้เกิดสัญญาณเสียงส่งออกมาโดยรอบ ที่ความถี่สูงมาก ๆ สัญญาณจะเป็นแบบอัลตรา-โซนิก แผ่นฟิล์มพอลิเมอร์แบบนี้สามารถตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าความถี่สูงมากถึงย่านไมโครเวฟ (10 GHz) และส่งสัญญาณคลื่นความถี่ขนาดนี้ออกมาซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการวิจัย ในทางกลับกันถ้าเรายืดหรือบีบพอลิเมอร์นี้จะทำให้ไดโพลถาวรของมันเปลี่ยนแปลงไป ทำให้เกิดประจุไฟฟ้าอิสระขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าโลหะที่ฉาบไว้บนแผ่นฟิล์มทั้งสองด้าน สมบัติข้อหลังนี้ทำให้เราสามารถนำ PVDF เป็นเครื่องรับสัญญาณเสียงความถี่ในย่านที่กว้างมากได้

2.2 โครงสร้างผลึกของ PVDF

สำหรับสมบัติไพเอโซอิเล็กทริกและไพโรอิเล็กทริกเป็นสมบัติที่มีการศึกษาอย่างกว้างขวาง ส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปที่การตรวจวัดสมบัติของพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) เนื่องจากมีสมบัติทางไฟฟ้าที่โดดเด่น ซึ่งสัมพันธ์กับโครงสร้างผลึกของพอลิเมอร์ ตามที่เราทราบ PVDF เป็นโพลีเมอร์แบบกึ่งผลึก ประกอบไปด้วยเฟสของผลึกซึ่งมีทั้งหมด 5 เฟส ($\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon$) ซึ่งเฟส α และเฟส β เป็นเฟสที่พบมากที่สุด และเฟส α เป็นเฟสที่เสถียรมากที่สุดที่อุณหภูมิห้องและความดันปกติและเป็นเฟสเริ่มต้นของ PVDF ในเฟสนี้สายโซ่โพลีเมอร์จะมีการเรียงตัวแบบ TG⁺TG⁻ (T- trans, G-gauche⁺, G'-gauche⁻) การเกิดเฟสเป็นแบบ dihedral และสายโซ่จะอัดตัวอยู่ในหน่วยเซลล์เพื่อให้ไดโพล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเมนต์ของโมเลกุลมีการเรียงตัวขนานกันแบบมีทิศทางข้ามกันส่งผลให้โครงสร้างผลึกเป็นแบบไม่มีขั้ว สังเกตได้จากรูปที่ 2.2 (a) เฟส β ซึ่งมีเสถียรภาพแบบเชิงกลภายใต้อุณหภูมิและความดันบรรยากาศเป็นเฟสที่แสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริกและไพโรอิเล็กทริกที่โดดเด่นมาก มีการจัดเรียงตัวแบบ TTTT ตลอดสายโซ่พอลิเมอร์ โครงสร้างและสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์จะตั้งฉากกับทิศทางของไดโพลโมเมนต์ แต่ไดโพลโมเมนต์ตลอดสายโซ่จะขนานกับไดโพลโมเมนต์ของผลึก สังเกตได้จากรูปที่ 2.2 (b) ซึ่งไดโพลโมเมนต์เหล่านี้สามารถเกิดการโพลาไรเซชันเองได้ หลังจากที่ผ่านมาการโพลาไรซ์ด้วยโวลเตจแรงสูง β -PVDF จะแสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริกที่ดี

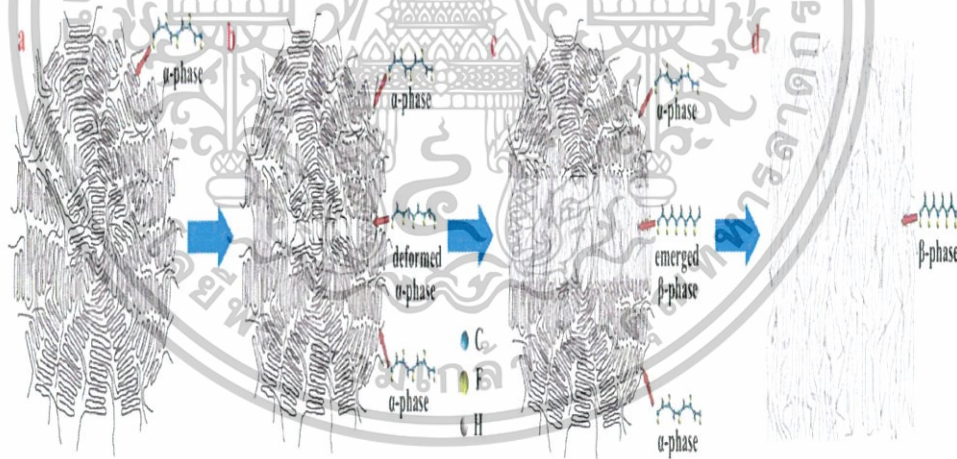


รูปที่ 2.2 โครงสร้าง(a) non-piezoelectric α -phase และ(b) piezoelectric β -phase ของPVDF

ฟิล์ม PVDF มีสูตรโครงสร้างเป็น $(-\text{CH}_2\text{CF}_2-)_n$ เมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่า 150°C โดยที่ฟิล์ม PVDF ซึ่งโดนหลอมเหลวจะเริ่มแข็งตัวเป็นของแข็ง ซึ่งไม่มีไดโพลทางไฟฟ้าถาวร วิธีที่จะทำให้ฟิล์ม PVDF นี้กลายเป็นฟิล์มไพโซอิเล็กทริกทำได้โดยการยืดฟิล์มนี้ออกประมาณ 3-5 เท่าของความยาวเดิมที่อุณหภูมิประมาณ 80°C จากนั้นอบฟิล์มประมาณ 2-3 นาทีที่ 100°C เพื่อลดความเครียดในฟิล์มที่อาจเกิดขึ้น พบว่าฟิล์มจะประกอบด้วยผลึกขนาดเล็กจำนวนมากและ ระหว่างผลึกมีฟิล์ม PVDF ที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (amorphous) ปนอยู่ด้วย จากการตรวจสอบด้วยรังสีเอกซ์พบว่าเมื่อฟิล์ม PVDF ถูกดึง สายโซ่ของฟิล์ม PVDF จะยืดออกตามแนวตั้งดังรูปที่ 2.3 โดยไดโพลจะมีทิศทางตั้งฉากกับแนวของสายโซ่ การวางตัวของสายโซ่ในหน่วยเซลล์ทำให้ไดโพลของแต่ละสายมีทิศเสริมกัน ดังนั้นผลึก PVDF แบบนี้จึงมีไดโพลถาวร ซึ่งมีทิศตั้งฉากกับแนวของสายโซ่หรือแนวตั้งนี้ อย่างไรก็ตามไดโพลของแต่ละผลึกยังมีทิศแบบสุ่มอยู่กล่าวคือ ชี้ในทุกทิศทุกทางซึ่งตั้งฉากกับแนวของสายโซ่ ดังนั้นถึงขณะนี้ฟิล์ม PVDF ก็ยังไม่มีไดโพลรวม วิธีที่จะทำให้ฟิล์ม PVDF นี้มีไดโพลรวมซึ่งสามารถแสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริกทำได้โดยการจัดขั้ว โดยให้สนามไฟฟ้าที่ใช้ในการจัดขั้วทางไฟฟ้าไม่ว่าการณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มสูงผ่านในแนวตั้งฉากกับฟิล์มและระเหยไออะลูมิเนียมไปจับผิวบนล่างของฟิล์มเป็นขั้วไฟฟ้าประกบฟิล์มให้เรียงด้วยแผ่นแก้ว 2 แผ่น จากนั้น ที่อุณหภูมิสูงซึ่งใช้ในการจัดขั้วทางไฟฟ้าจึงต่อขั้วไฟฟ้าทั้งสองเข้ากับขั้วไฟฟ้าความต่างศักย์สูง สนามไฟฟ้าความเข้มสูงมากนี้จะทำให้ผลึกเล็กๆ ของ PVDF หมุนตัวจนทิศของไดโพลของแต่ละผลึกชี้ไปในแนวเดียวกัน ซึ่งเป็นแนวตั้งฉากกับฟิล์มจากนั้นค่อยๆ ลดอุณหภูมิและลดความต่างศักย์ลงจนเป็นศูนย์ทิศของไดโพลของทุกผลึกจะตรึงอยู่ในทิศของสนามไฟฟ้า ผลคือฟิล์มนี้มีไดโพลรวมถาวรและแสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริก จากการวิจัยพบว่าการใช้สนามไฟฟ้า 80 MV/m จัดขั้วไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 80° C เป็นเวลาประมาณ 20 นาที ก็จะได้ฟิล์มซึ่งมีสมบัติไพโซอิเล็กทริกที่ดี

เมื่อ PVDF ที่ได้จากการถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างช้าๆจนถึงอุณหภูมิห้องจากสถานะสารละลายหรือสารละลาย PVDF ที่ได้จากการปาดของสารละลายที่อยู่ในตัวทำละลายอินทรีย์ PVDF จะเกิดเป็นเฟส α ได้ง่าย อย่างไรก็ตามเฟสที่ต้องการจากมุมมองเชิงเทคโนโลยี คือ เฟส β ดังนั้นจึงมีการคาดหวังว่าจะสามารถเปลี่ยนจากเฟส α เป็นเฟส β ได้ ในขั้นตอนแรกมักใช้เฟส α เพื่อให้เกิดเฟส β ซึ่งมีคุณสมบัติทางไพโซอิเล็กทริกและไพโรอิเล็กทริกที่ดี



รูปที่ 2.3 แสดงกระบวนการเปลี่ยนรูปจาก α -crystal เป็น β -crystal ของ PVDF โดยการยืดเชิงกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ทฤษฎีและหลักการของระบบ

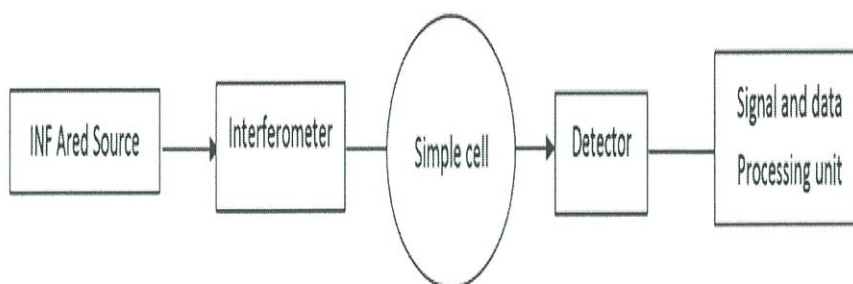
2.3.1 เครื่องวิเคราะห์ที่โครงสร้างทางโมเลกุลของพอลิเมอร์ FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrometer)



รูปที่ 2.4 เครื่องวิเคราะห์ที่โครงสร้างทางโมเลกุลของพอลิเมอร์ FTIR

เครื่องวิเคราะห์ที่โครงสร้างทางโมเลกุลของพอลิเมอร์ FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrometer) เป็นเครื่องมือที่สามารถบอกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพันธะเคมีในโมเลกุลได้โดยการใช้หลักการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่มีความถี่ต่างๆ ของตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งมีลักษณะเฉพาะตัวซึ่งการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิสูงกว่าศูนย์องศาสมบูรณ์จะทำให้อะตอมทุกตัวในโมเลกุลเกิดการสั่นอยู่ตลอดเวลา เมื่อความถี่ของการสั่นมีค่าเท่ากับความถี่ของรังสีอินฟราเรดที่ฉายมายังโมเลกุลของตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ จะเกิดการดูดกลืนรังสีโดยจำนวนแถบการดูดกลืนทั้งหมดที่ได้จะมีค่าไม่เท่ากับการสั่นมูลฐานของโมเลกุลทั้งหมดแต่จะมีค่าลดลงเพราะมีบางแถบพลังงานที่ไม่มีการตอบสนองต่อพลังงานในช่วงรังสีอินฟราเรด เครื่องวิเคราะห์ที่โครงสร้างทางโมเลกุลของพอลิเมอร์มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน ดังรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

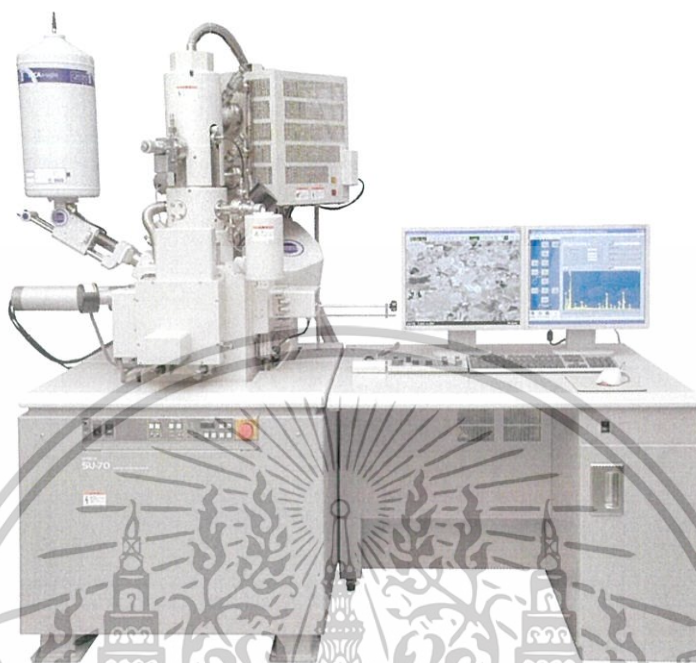


รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบและลำดับการทำงานของเครื่องตรวจวัด

ส่วนแรก คือ แหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรด (Infrared Spectrometer) ซึ่งเป็นสารเนื้อเยื่อที่ถูกทำให้อนุภาคมีอุณหภูมิระหว่าง 1,000 – 1,800 องศาเซลเซียส จากนั้นจะส่งไปให้ตัวแยกรังสีแบบ Interferometer ที่มีหน้าที่แยกลำรังสีออกจากกันและทำให้เกิด Path difference ระหว่างลำแสง ซึ่งประกอบด้วยกระจกที่สามารถเคลื่อนที่ไต่กระจกที่ตรึงอยู่กับที่ โดยทั้งสองตั้งฉากซึ่งกันและกันและตัวแยกแสงซึ่งเป็นอุปกรณ์กึ่งสะท้อนแสง ลำรังสีครึ่งหนึ่งจะทะลุผ่านไปยังกระจกที่ตรึงอยู่กับที่และอีกครึ่งหนึ่งจะสะท้อนไปยังกระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ หลังจากนั้นลำรังสีก็จะสะท้อนจากกระจกกลับมารวมกันที่ตัวแยกแสงเกิดการแทรกสอดขึ้นหลังจากนั้นลำรังสีก็จะผ่านไปยังตัวอย่างและในที่สุดก็จะตกลงบนเครื่องตรวจวัดซึ่งทำหน้าที่ประมวลผลจากสัญญาณการแทรกสอดที่ส่งผ่านมาจากตัวแยกรังสี Path difference ระหว่างลำรังสีที่ถูกแยกออกจากกันเกิดขึ้นจากระยะทางสัมพันธ์ระหว่างกระจกทั้งสองถ้าแขนยึดกระจกทั้งสองข้างของ Interferometer ยาวเท่ากันลำรังสีทั้งสองก็จะเดินทางด้วยระยะทางที่เท่ากันและมีเฟสตรงกัน ทำให้สัญญาณที่ไปถึงเครื่องตรวจวัดมีค่ามากที่สุดเมื่อกระจกเคลื่อนที่ไปนระยะทาง $\lambda/4$ ระยะทางเดินของรังสีจะเปลี่ยนเป็น $\lambda/2$ รังสีทั้งสองจะมีเฟสต่างกัน 180 องศา การแทรกสอดจะอยู่ในตำแหน่งหักล้าง เมื่อเคลื่อนกระจกเป็นระยะทางอีก $\lambda/4$ ระยะทางเดินของรังสีจะเปลี่ยนเป็น λ รังสีทั้งสองลำจะกลับมามีเฟสตรงกันเมื่อกระจกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ความเข้มของสัญญาณที่เครื่องตรวจวัดวัดได้จะมีลักษณะของ interferogram เป็นรูปคลื่น sine โดยกราฟจะพล็อตระหว่างการตอบสนองที่เครื่องตรวจวัดบันทึกได้ และเวลาที่กระจกมีการเคลื่อนที่ ถ้าตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์เกิดการดูดกลืนรังสีที่ค่าความถี่นี้ ขนาดของแอมพลิจูดจะลดลงโดยสัมพันธ์กับปริมาณของตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์หลังจากนั้นใช้ Fourier Transform ซึ่งเป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ในการแปลงผลที่ได้ (ขึ้นกับเวลา) ให้กลายเป็นค่าความเข้มกับความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวของพอลิเมอร์ SEM (Scanning Electron Microscope)



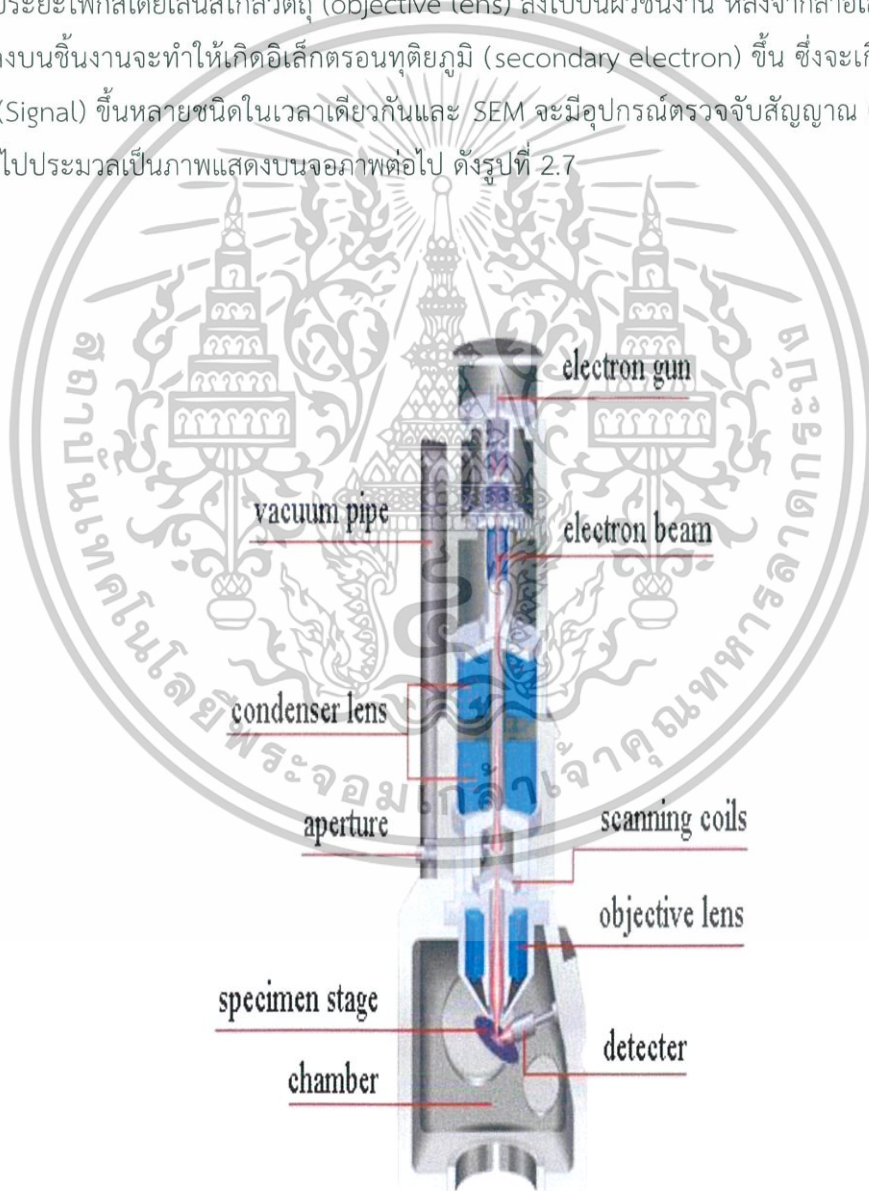
รูปที่ 2.6 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวของพอลิเมอร์ SEM

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสงซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุในระดับจุลภาคซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมากและเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่าลักษณะพื้นฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษาและกำลังความสามารถในการแยกความชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดา มีค่าต่ำ ใช้วัตถุเล็กสุดประมาณ 0.2 ไมโครเมตรและให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3,000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมากๆได้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง มีความสามารถในการแยกความชัดได้ดีเนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้นเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 100,000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

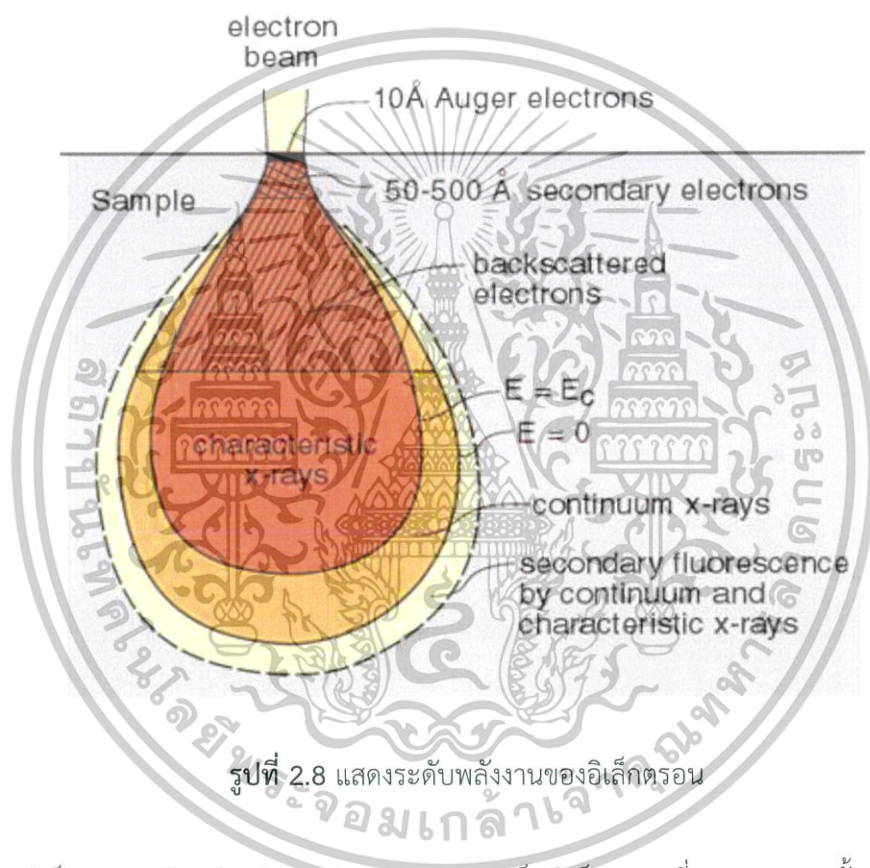
2.3.2.1 หลักการทำงานของเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope)

จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบโดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกสร้างจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงให้ขดลวดทั้งสแตนท์ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาแล้วจะเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามลำกล้องซึ่งภายในลำกล้องต้องมีสภาพเป็นสุญญากาศเพื่อที่จะให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้โดยไม่สูญเสียพลังงาน จากนั้น กลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์ที่ใช้สำหรับรวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับขนาดของลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดใหญ่หรือเล็กตามต้องการได้ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้น ลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงาน หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกวาดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น ซึ่งจะเกิดสัญญาณต่างๆ (Signal) ขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกันและ SEM จะมีอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ (Detector) และส่งไปประมวลเป็นภาพแสดงบนจอภาพต่อไป ดังรูปที่ 2.7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูผู้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่อง SEM
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดมีต้นกำเนิดเป็นอิเล็กตรอนแทนแสง โดยต้นกำเนิดอิเล็กตรอนถูกสร้างจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงแก่ขดลวดทั้งสแตน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากขดลวด จากนั้นอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะถูกควบคุมทิศทางภายใต้สนามแม่เหล็ก ซึ่งอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กหรือที่เรียกว่าเลนส์แม่เหล็กทำให้ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้ามากระทบกับชิ้นงาน เกิดอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนต่อชิ้นงานหลายแบบ เนื่องจากลำอิเล็กตรอนที่วิ่งมากระทบชิ้นงานมีพลังงานสูง ทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชิ้นงานมีหลายระดับพลังงาน ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงระดับพลังงานของอิเล็กตรอน

อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) เป็นอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชั้นแถบการนำ (Conduction band) หรือแถบพลังงานเวเลนซ์ (Valance band) ซึ่งไม่ต้องใช้พลังงานสูงสามารถหลุดออกจากผิวชิ้นงานได้ง่าย บางครั้งเรียกว่าอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งจะมีช่วงพลังงาน 10 ถึง 50 อิเล็กตรอนโวลต์ อิเล็กตรอนชนิดนี้จะใช้ในการสร้างภาพที่บริเวณพื้นผิวของชิ้นงานสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM)

อิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (Back scattered electron) เป็นอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้าชนกับชิ้นงาน โดยสูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงานเพียงบางส่วน แล้วเกิดการกระเจิงกลับออกมาจากชิ้นงาน ซึ่งพลังงานของอิเล็กตรอนชนิดนี้จะมีค่าตั้งแต่พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิไปจนถึงพลังงานอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ค่าพลังงานต่างๆที่กระเจิงกลับมานั้นจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นกับเลขมวลอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน ดังนั้นอิเล็กตรอนชนิดนี้จึงสามารถใช้สร้างภาพที่แสดงความแตกต่างของธาตุได้ โดยแสดงในรูปแบบของความเข้ม และความสว่างของภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณ ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน

รังสีเอกซ์ (X-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น มีความถี่สูง เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนชิ้นงาน ทำให้อิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่างๆ (K, L, M, ...) ได้รับความพลังงานมากพอจนหลุดออกจากวงโคจร แล้วอิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่ ทำให้มีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา ซึ่งสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่ปล่อยออกมาสามารถนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยค่าพลังงานนี้จะขึ้นกับเลขอะตอมของธาตุ ซึ่งจะใช้หวัตรังสีเอกซ์ (EDS) ในการวิเคราะห์ข้อมูลประกอบกับ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM)

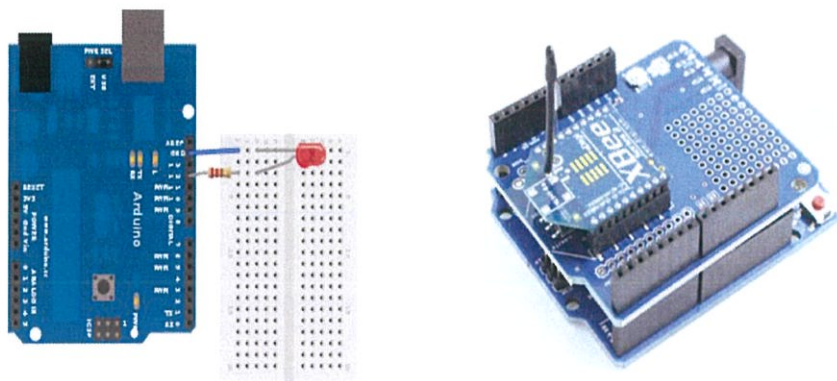
2.4 อาร์ดูอิโน้ (Arduino)



รูปที่ 2.9 บอร์ด Arduino

Arduino อ่านว่า (อา-ดู-อิ-โน้ หรือ อาดูยโน้) เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่มีการพัฒนาแบบ Open Source คือมีการเปิดเผยข้อมูลทั้งด้าน Hardware และ Software ตัวบอร์ด Arduino ถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้นศึกษา ทั้งนี้ผู้ใช้งานยังสามารถดัดแปลงเพิ่มเติม พัฒนาต่อยอดทั้งตัวบอร์ดหรือโปรแกรมต่อได้อีกด้วย ความง่ายของบอร์ด Arduino ในการต่ออุปกรณ์เสริมต่างๆ คือผู้ใช้งานสามารถต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์จากภายนอกแล้วเชื่อมต่อเข้ามาที่ขา I/O ของบอร์ด ดังรูปที่ 2.10 (a) หรือเพื่อความสะดวกสามารถเลือกต่อกับบอร์ดเสริม (Arduino Shield) ประเภทต่างๆ ดังรูปที่ 2.10 (b) เช่น Arduino XBee Shield, Arduino Music Shield , Arduino Relay Shield , Arduino Wireless Shield , Arduino GPRS Shield เป็นต้น มาเปรียบกับบอร์ดบนบอร์ด Arduino แล้วเขียนโปรแกรมพัฒนาต่อได้เลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)

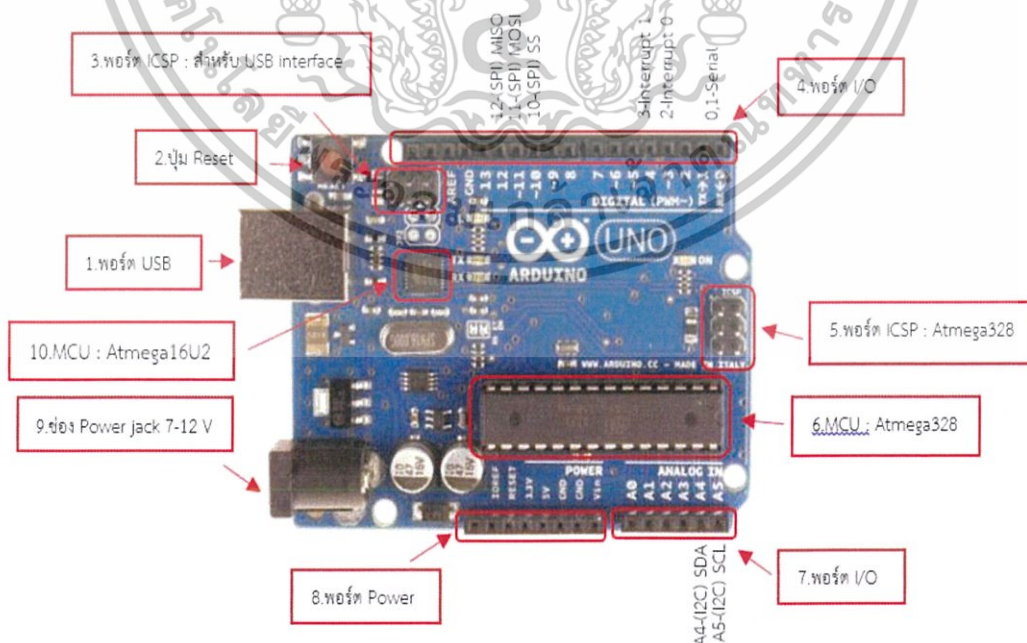
(b)

รูปที่ 2.10 (a) บอร์ด Arduino ต่อกับ LED (b) บอร์ด Arduino ต่อกับ Xbee shield

จุดเด่นที่ทำให้บอร์ด Arduino เป็นที่นิยม

1. ง่ายต่อการพัฒนา มีรูปแบบคำสั่งพื้นฐาน ไม่ซับซ้อนเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้น
2. มี Arduino Community กลุ่มคนที่ร่วมกันพัฒนาที่แข็งแกร่ง
3. Open Hardware ทำให้ผู้ใช้สามารถนำบอร์ดไปต่อยอดใช้งานได้หลายด้าน
4. ราคาไม่แพง
5. Cross Platform สามารถพัฒนาโปรแกรมบน OS ใดก็ได้

Layout & Pin out Arduino Board (Model: [Arduino UNO R3](#))



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.11 แสดงถึงส่วนประกอบที่ทำหน้าที่ต่าง ๆ กันของบอร์ด Arduino
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. USBPort : ใช้สำหรับต่อกับ Computer เพื่ออัปโหลดโปรแกรมเข้า MCU และจ่ายไฟให้กับบอร์ด
2. Reset Button : เป็นปุ่ม Reset ใช้กดเมื่อต้องการให้ MCU เริ่มการทำงานใหม่
3. ICSP Port ของ Atmega16U2 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Visual Com port บน Atmega16U2
4. I/O Port : Digital I/O ตั้งแต่ขา D0 ถึง D13 นอกจากนี้ บาง Pin จะทำหน้าที่อื่นๆ เพิ่มเติมด้วย เช่น Pin0,1 เป็นขา Tx,Rx Serial, Pin 3 , 5 , 6 , 9 , 10 และ 11 เป็นขา PWM
5. ICSP Port : Atmega328 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Bootloader
6. MCU : Atmega328 เป็น MCU ที่ใช้บนบอร์ด Arduino
7. I/O Port : นอกจากจะเป็น Digital I/O แล้วยังเปลี่ยนเป็นช่องรับสัญญาณอนาล็อกตั้งแต่ขา A0-A5
8. Power Port : ไฟเลี้ยงของบอร์ดเมื่อต้องการจ่ายไฟให้กับวงจรภายนอก ประกอบด้วยขาไฟเลี้ยง +3.3 V, +5V, GND, V_{in}
9. Power Jack : รับไฟจาก Adapter โดยที่แรงดันอยู่ระหว่าง 7-12 V
10. MCU ของ Atmega16U2 เป็น MCU ที่ทำหน้าที่เป็น USB to Serial โดย Atmega328 จะติดต่อกับ Computer ผ่าน Atmega16U2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การวิจัยและการดำเนินการ

ในบทนี้จะเป็นการศึกษาเกี่ยวกับขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม การออกแบบและสร้างเครื่องยัดฟิล์มแบบร้อนสำหรับพอลิเมอร์ไพโซอิเล็กทริก และดำเนินการทดลองยัดฟิล์มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสที่อัตราการยัด 2-5 เท่าของขนาดของฟิล์ม

3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ

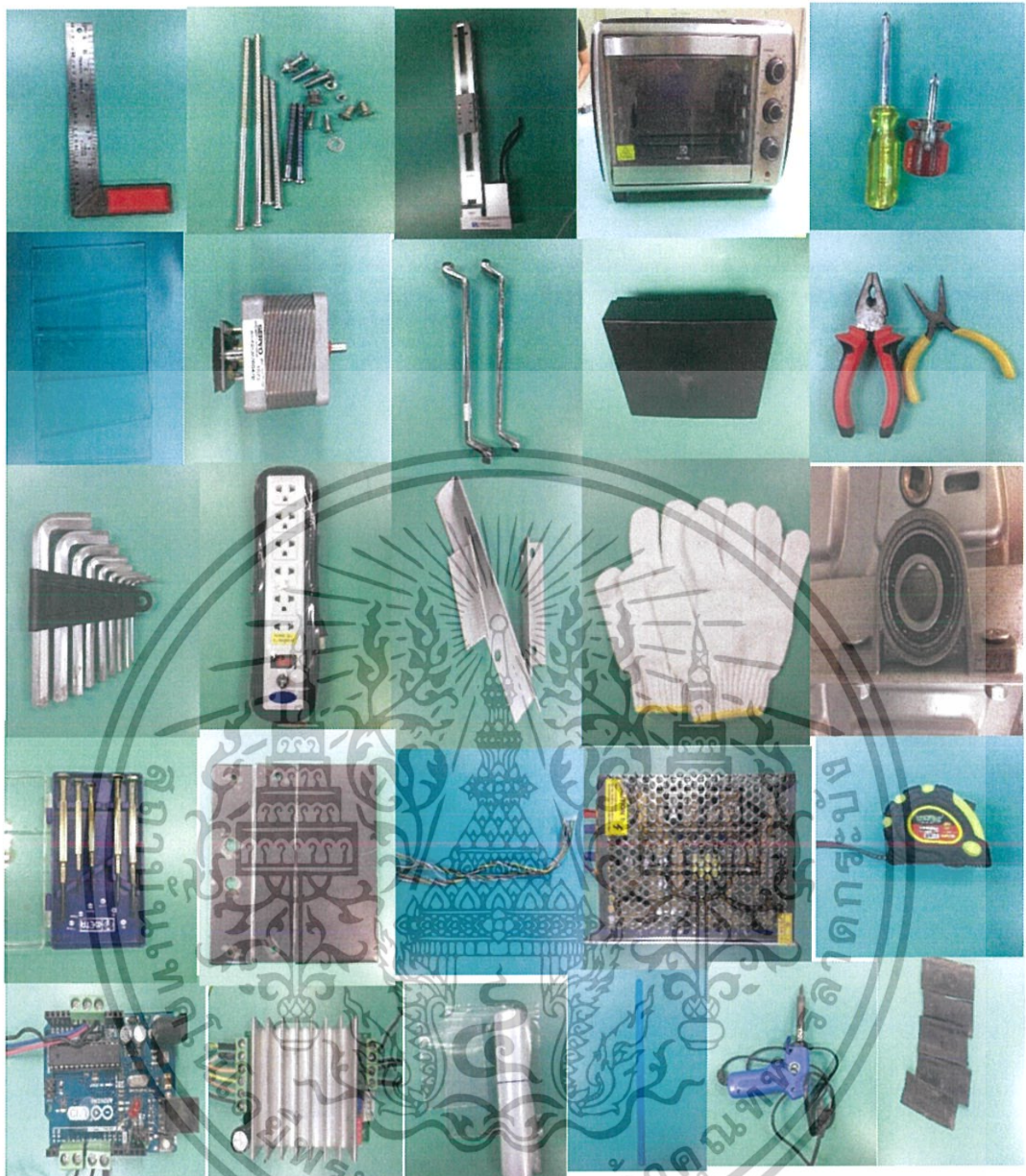
- 1) ตู้อบ (สำหรับสร้างเป็นเครื่องยัดฟิล์ม)
- 2) แผ่นไม้ขนาด 40x80 cm
- 3) เครื่องจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (24V 3A)
- 4) ลิเนียร์มอเตอร์แบบแกนเดี่ยว (single-axis linear motor)
- 5) สเต็ปปีงมอเตอร์
- 6) นี้อต (สำหรับยัด)
- 7) บอร์ดอาร์ดุยโน อูโน รุ่น3
- 8) ไดรเวอร์สเต็ปปีงมอเตอร์
- 9) พอลิไวนิลฟลูออไรด์-เฮกซะฟลูออโรโพรพิลีนโคพอลิเมอร์ (Poly(vinylidene fluoride-hexafluoropropylene))
- 10) ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (Dimethylformamide)
- 11) เครื่องกวนแม่เหล็ก
- 12) เครื่องซังสาร
- 13) ปีกเกอร์
- 14) กระจกตวง
- 15) ซ้อนดักสาร
- 16) ถุงมือ
- 17) แท่งแม่เหล็กคนสาร
- 18) ตู้อบฟิล์ม
- 19) กระจกขนาด 12x20 cm
- 20) กระจกปรีคขนาด 15x23 cm และ 18x28 cm
- 21) เทอร์โมมิเตอร์
- 22) ขาตั้งและที่ยึดจับ (Stand and Clamp)

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 23) ลูกปืน สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 24) เหล็กฉาก
- 25) เหล็กแผ่นขนาด 3x15 cm
- 26) ก่อองเอนกประสงค์สำหรับใส่วงจร
- 27) เครื่องวัดอุณหภูมิ
- 28) ฉากอลูมิเนียมขนาด 10 cm
- 30) ยางในรถจักรยานยนต์
- 31) ไชควง
- 32) ประแจหกเหลี่ยม
- 33) ตะไบ
- 33) แวนตา
- 34) ลูกหมุดต่ออลูมิเนียม
- 35) ส่วนไฟฟ้า
- 36) ตลับเมตร
- 37) เลื่อยตัดเหล็ก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 วัสดุและอุปกรณ์บางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การดำเนินงานวิจัย

3.2.1 การออกแบบและสร้างเครื่องยึดฟิล์ม

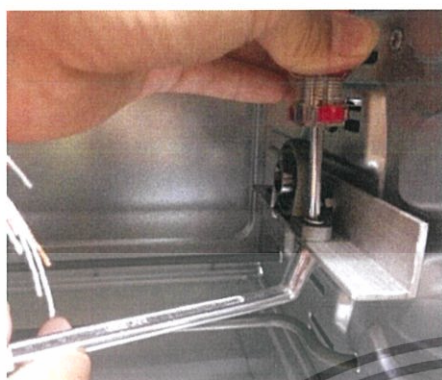
1. นำตุ๋บที่เตรียมไว้สำหรับสร้างเครื่องยึดมาแกะแยกดูส่วนประกอบภายในดังรูปที่ 3.2 (ก) แล้วเลือกด้านข้างที่ไม่ค่อยมีส่วนประกอบหลักของตุ๋บมาทำการเจาะรูดังรูปที่ 3.2 (ข) โดยเจาะทั้งด้านข้างของฝาครอบตุ๋บและด้านข้างภายในของตุ๋บไว้สำหรับเป็นช่องใส่ลิเนียร์มอเตอร์ดังรูปที่ 3.2 (ค) ต้องเจาะให้ตัวคานเลื่อนของลิเนียร์มอเตอร์อยู่จุดกึ่งกลางของตุ๋บและต้องเจาะให้มีขนาดพอดีกับตัวลิเนียร์มอเตอร์ที่จะใส่เข้าไป หลังจาก หลังจากทำการเจาะเสร็จก็ใช้ตะไบลบความคมของอลูมิเนียมให้เรียบดังรูปที่ 3.2 (ง)



รูปที่ 3.2 การเจาะตุ๋บ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. นำสลักลูกปืนที่เตรียมไว้มาติดใส่ด้านข้างของฝั่งตรงข้ามกับด้านที่เจาะรูเอาไว้ดังรูปที่ 3.3 (ก) จะใช้ฉากอลูมิเนียมเป็นฐานรองสลักลูกปืนที่ยึดกับผนังด้านในของตู้ดังรูปที่ 3.3 (ข)



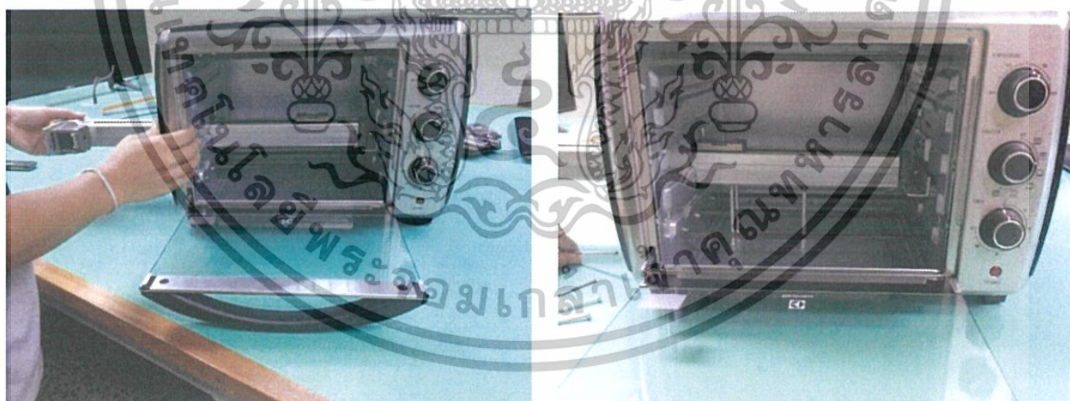
(ก)



(ข)

รูปที่ 3.3 การยึดลูกปืนเข้ากับด้านในของตู้

3. นำลิเนียร์มอเตอร์ที่เตรียมไว้มาแกะแยกส่วนประกอบที่เป็นพลาสติกออกหรือส่วนที่ไม่ได้ใช้ แล้วนำไปประกอบเข้ากับลูกปืนที่ติดไว้ภายในตู้ก่อนหน้านี้ โดยจะเอาลิเนียร์ผ่านช่องที่เจาะรูเอาไว้แล้วของด้านข้างตู้ดังรูปที่ 3.4 (ก) พร้อมกับใส่เนื้อยาว 10 cm เพื่อเป็นฐานรองรับน้ำหนักของตัวลิเนียร์มอเตอร์เพราะปลายอีกด้านที่ติดลูกปืนจะได้ไม่ต้องรับน้ำหนักมากดังรูปที่ 3.4 (ข)



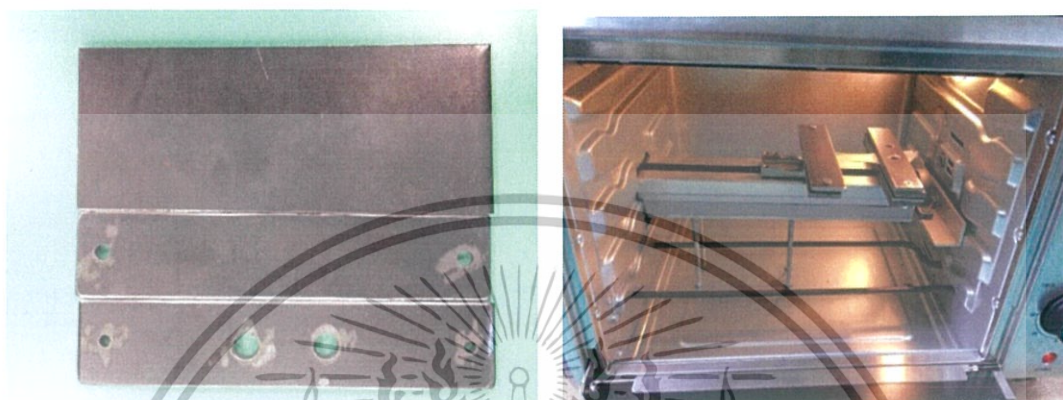
(ก)

(ข)

รูปที่ 3.4 ประกอบลิเนียร์ใส่ตู้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. นำแผ่นเหล็กมาตัดให้ได้ขนาด 3x16 cm และนำแผ่นเหล็กมาเจาะรูให้ได้ขนาดเท่ากับรูที่ตัวลิเนียร์มอเตอร์ แล้วลบความคมของเหล็กให้เรียบร้อยก่อนตั้งรูปที่ 3.5 (ก) เพื่อจะประกอบเข้าติดกับลิเนียร์มอเตอร์โดยใช้เป็นคานสำหรับหนีบแผ่นฟิล์มขณะทำการยึดฟิล์มตั้งรูปที่ 3.5 (ข) โดยจะเจาะรูไว้ที่ปลายของแผ่นเหล็กเพื่อหนีบปะกบแผ่นฟิล์มให้แน่นเข้าด้วยกัน



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.5 ตัดแผ่นเหล็กเข้ากับลิเนียร์

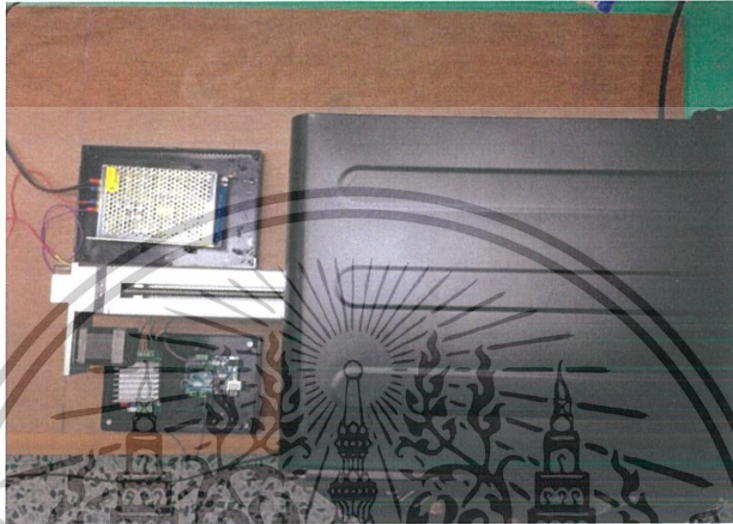
5. เครื่องยึดฟิล์มที่ประกอบชิ้นส่วนหลักเข้าด้วยกันเสร็จแล้วดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องยึดฟิล์มที่ประกอบเสร็จแล้ว

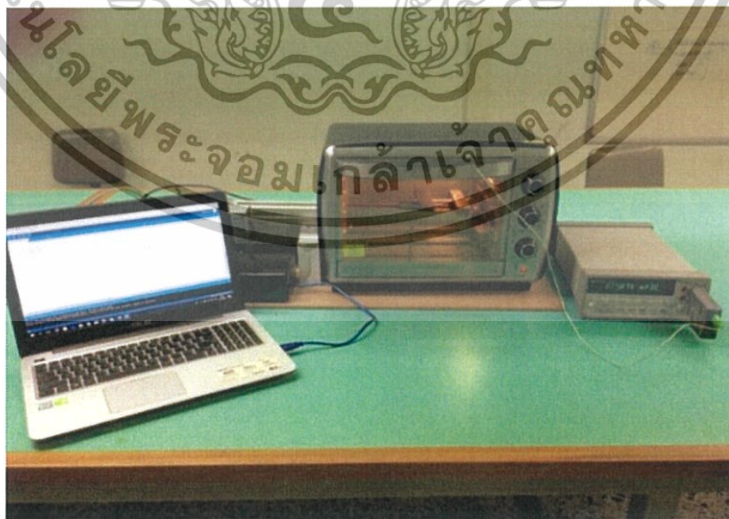
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ติดเครื่องยึดฟิล์มเข้ากับแผ่นไม้อัดขนาด 40x80 cm เพื่อทำเป็นฐานรองเครื่องยึด พร้อมติดกล่องพลาสติกเพื่อใส่เครื่องจ่ายแรงดันไฟฟ้า บอร์ดอาร์ดูอีโน้ กระแสตรงและไดรเวอร์สเต็ป มอเตอร์ดังรูปที่ 3.7 เชื่อมต่ออุปกรณ์ทั้งหมดเข้าด้วยกันแล้วควบคุมการยึดฟิล์มผ่านโปรแกรม คอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.7 ติดอุปกรณ์ทั้งหมดเข้ากับฐานไม้อัด

7. ติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดเข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อทำการทดลอง

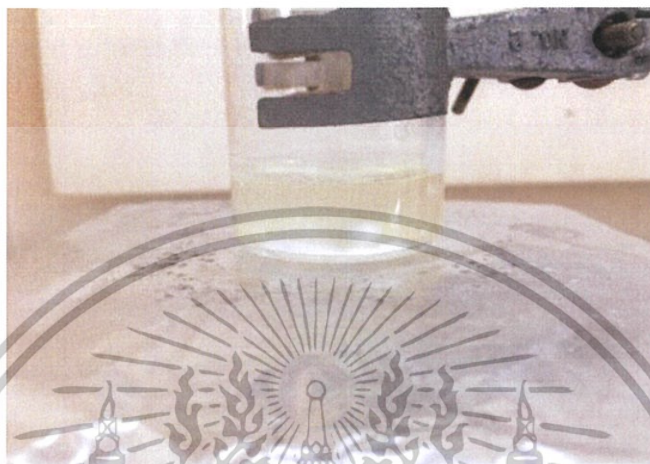


รูปที่ 3.8 เครื่องยึดฟิล์มพร้อมทำการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การเตรียม Poly (vinlidene fluoride-hexafluoropropylene) ; P(VDF-HFP)

1. นำผงพอลิเมอร์ P(VDF-HFP) ปริมาณ 5 กรัม ผสมกับไดเมทิลฟอร์มาไมด์ปริมาณ 25 มิลลิลิตรในปิกเกอร์ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 พอลิเมอร์ 5 กรัม ผสมกับไดเมทิลฟอร์มาไมด์ 25 มิลลิลิตร

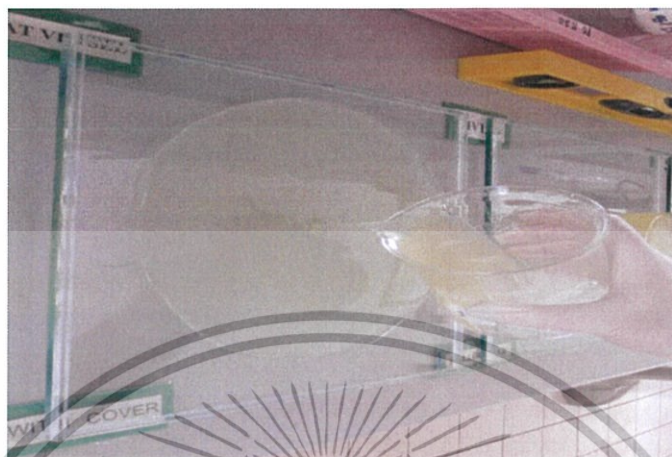
2. นำพอลิเมอร์ P(VDF-HFP) ที่ผสมกับไดเมทิลฟอร์มาไมด์แล้วไปกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กด้วยอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จนผงพอลิเมอร์ละลายจนหมดโดยใช้แท่งแม่เหล็กคนสารขนาด 3 เซนติเมตรดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 กวนพอลิเมอร์ด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำพอลิเมอร์ที่กวนเสร็จแล้วเทลงบนกระดาษไขขนาด 12x20 cm เซนติเมตรและนำไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ค่ำ ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 เทพอลิเมอร์เข้าตู้อบ

4. นำพอลิเมอร์ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ค่ำแล้วออกมาลอกออกจากกระดาษไขใส่ถุงซิปรอมนำไปยัด

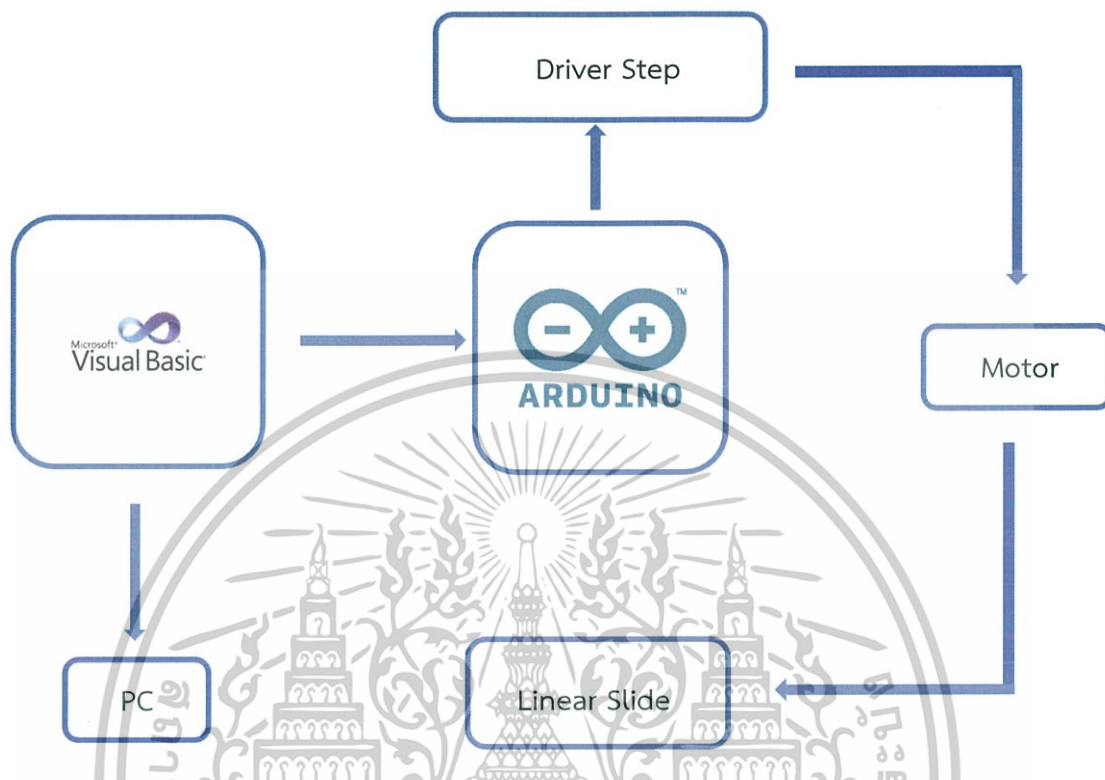


รูปที่ 3.12 พอลิเมอร์ผ่านการอบ 1 ค่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การออกแบบโปรแกรมและการใช้งาน

3.2.3.1 การออกแบบโปรแกรม



รูปที่ 3.13 แสดงแผนภาพโคะแกรมของเครื่องมือ

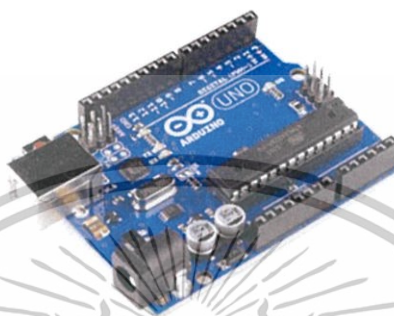
1. ส่วนติดต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์

ในส่วนนี้เราจะใช้ตัว Arduino ในการควบคุมตัว Driver Step Motor และตัว Driver Step Motor จะจ่ายกระแสให้กับตัว Motor เพื่อทำให้รางเลื่อนเคลื่อนที่ไปตามระยะที่ต้องการที่เขียนผ่านตัว Arduino จากนั้นเราจะส่วนนี้ในการติดต่อสื่อสารระหว่างตัวอุปกรณ์ Arduino กับเครื่องคอมพิวเตอร์ ผ่านพอร์ต USB ผู้ใช้งานสามารถใช้งานได้โดยผ่านโปรแกรม Microsoft Visual Studio ในการแสดงผลและควบคุม และจะใช้ Microsoft Visual Studio ในการดำเนินการทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ส่วนการประมวลผลโดยไมโครคอนโทรลเลอร์

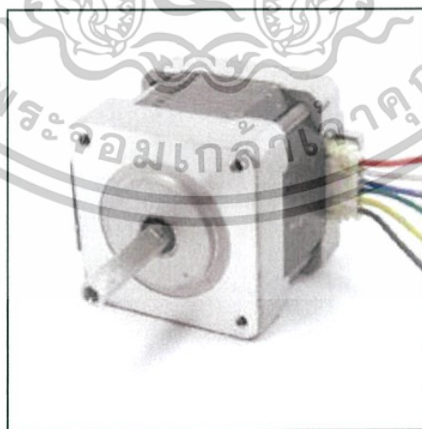
ในส่วนนี้จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ในการควบคุมการทำงานของวงจรมีหน้าที่ในการติดต่อทางพอร์ต USB รับส่งข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ทำการประมวลผลข้อมูลและควบคุมอุปกรณ์ในการแสดงสถานะของเครื่องมีรับคำสั่งจากโปรแกรม Microsoft Visual Studio และรับค่าจาก Detector สั่งการทำงานไปยังตัวควบคุม Stepper motor



รูปที่ 3.14 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino

3. ส่วนสเต็ปมอเตอร์ แบบ 2 เฟส

ในงานโครงงานพิเศษนี้เลือกใช้สเต็ปมอเตอร์แบบ 2 เฟส ที่มีโครงสร้างขดลวด ชนิด แบบขดไม่อิสระ ของ VEXTA Model pk264B2-sg36 ที่มีความละเอียด 0.225 องศาต่อสเต็ป



รูปที่ 3.15 VEXTA Model pk264B2-sg36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณ

ทำการควบคุมเป็นแบบ Micro step ด้วยความละเอียด 1/16 จะได้

❖ ถ้า 3200 สเต็ป	เคลื่อนที่ไป 360 องศา
1 สเต็ป	เคลื่อนที่ไป 0.1125 องศา
ถ้า 3200 สเต็ป	เคลื่อนที่ไป 0.6 เซนติเมตร
1 สเต็ป	เคลื่อนที่ไป 0.0001875 เซนติเมตร
0.6 เซนติเมตร	เคลื่อนที่ไป 3200 สเต็ป
1 เซนติเมตร	เคลื่อนที่ไป 5333.33333 สเต็ป

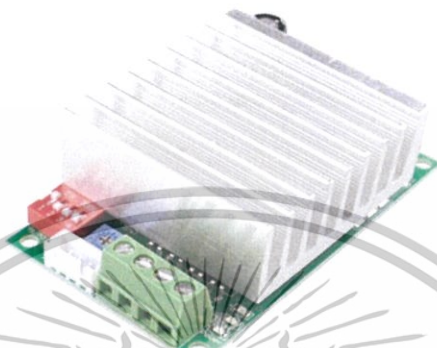
จากการทดลอง ทำการยึดฟิล์มตามระยะที่กำหนด ดังนี้

- ที่ระยะ 1 เท่า เท่ากับ 2.5 เซนติเมตร เคลื่อนที่ไป 13333.333325 สเต็ป
- ที่ระยะ 2 เท่า เท่ากับ 5 เซนติเมตร เคลื่อนที่ไป 26666.66665 สเต็ป
- ที่ระยะ 3 เท่า เท่ากับ 7.5 เซนติเมตร เคลื่อนที่ไป 40000 สเต็ป
- ที่ระยะ 4 เท่า เท่ากับ 10 เซนติเมตร เคลื่อนที่ไป 53333.33333 สเต็ป
- ที่ระยะ 5 เท่า เท่ากับ 12.5 เซนติเมตร เคลื่อนที่ไป 66666.666625 สเต็ป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ส่วนการควบคุมสเต็ปเปอร์มอเตอร์

ตัวคอนโทรล BL TB6600 V1.2 ทำหน้าที่ในควบคุมสเต็ปเปอร์มอเตอร์ไปควบคุมการเคลื่อนที่ของตัวยึดติดฟิล์ม ใช้ในการขับเคลื่อนสเต็ปเปอร์มอเตอร์โดยการทำงานจะรับค่าบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ให้ตัวบอร์ดสั่งการมาที่ ตัวคอนโทรล BL TB6600 V1.2 ให้ทำการขับเคลื่อนสเต็ปเปอร์



รูปที่ 3.16 ตัวคอนโทรลสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบ BL TB6600 V1.2

5. ส่วนของฐานรางเลื่อน

ใช้ในการเคลื่อนที่เพื่อทำการยึดฟิล์มโดยรางเลื่อนจะจับกับตัวหมุนของสเต็ปเปอร์ให้มีการเคลื่อนที่เพื่อยึดฟิล์มตามระยะที่กำหนด



รูปที่ 3.17 รางเลื่อนที่ใช้ในการทำการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ส่วนของการจ่ายไฟ

ในส่วนนี้จะใช้การจ่ายไฟในการทำงานของบอร์ดควบคุมมอเตอร์โดยใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแบบสวิตซิ่ง (Switching 24VDC) ดังแสดงในรูป 3.6

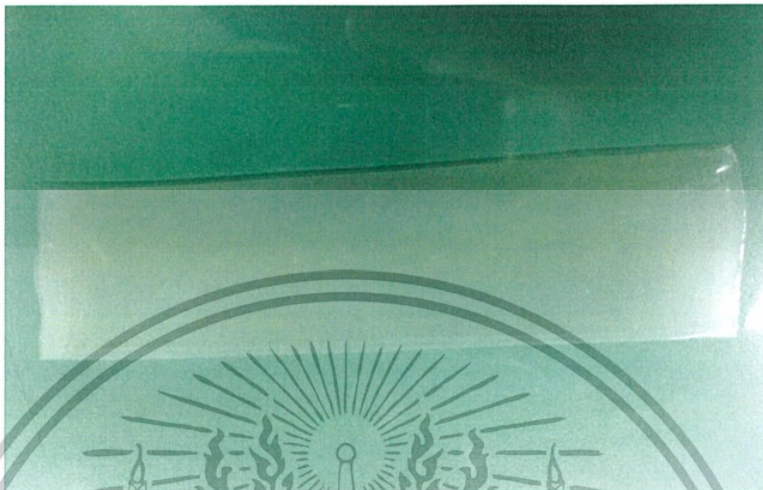


รูปที่ 3.18 แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแบบสวิตซิ่ง (Switching 24VDC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 การดำเนินการทดลอง

1. ตัดฟิล์มที่ได้มาจากการเตรียมฟิล์มให้มีขนาดยาว 2.5 cm เพื่อเตรียมไว้สำหรับการนำไปยัดในเครื่องยัดฟิล์ม



รูปที่ 3.19 ฟิล์มที่ตัด 2.5 เซนติเมตร

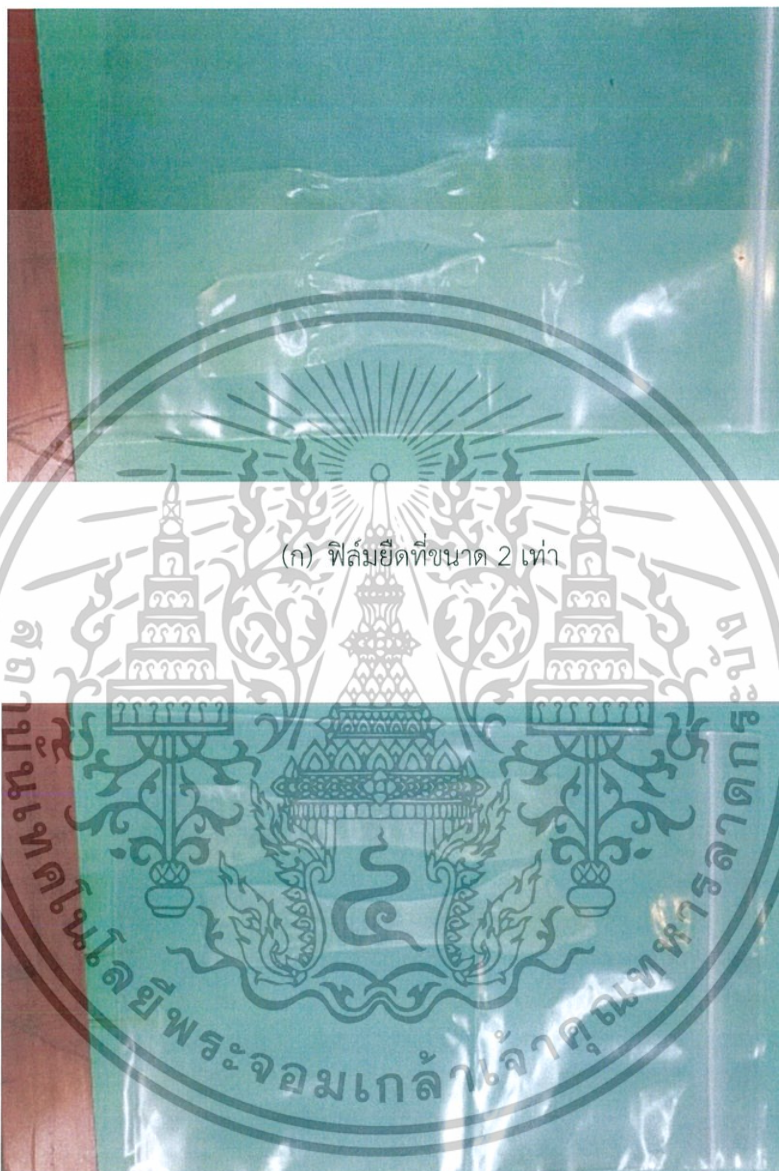
2. นำฟิล์มที่ตัดขนาดยาว 2.5 cm เข้าเครื่องยัดฟิล์มเพื่อทำการยัด โดยใช้แผ่นเหล็กเป็นตัวหนีบฟิล์มให้ตึงไม่ให้เกิดการเลื่อน และได้มีการใส่ยางในรถจักรยานยนต์เข้าไปรองระหว่างแผ่นเหล็กเพื่อให้แน่นเพิ่มมากขึ้น และก่อนจะทำการยัดจะเปิดเครื่องไว้สักพักเพื่อให้อุณหภูมิภายในเครื่องยัดถึง 90 องศาเซลเซียสก่อนแล้วค่อยสั่งเริ่มโปรแกรมยัด



รูปที่ 3.20 ใส่ฟิล์มเข้าไปในตูบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. หลังจากที่ได้ทำการยัดฟิล์มเสร็จทุกครั้งจะต้องรอให้อุณหภูมิภายในเครื่องยัดเย็นลงที่อุณหภูมิห้องแล้วค่อยนำฟิล์มที่ยัดเสร็จออกเก็บไว้ในถุงซิปลแล้วค่อยทำการยัดอันใหม่ต่อไป

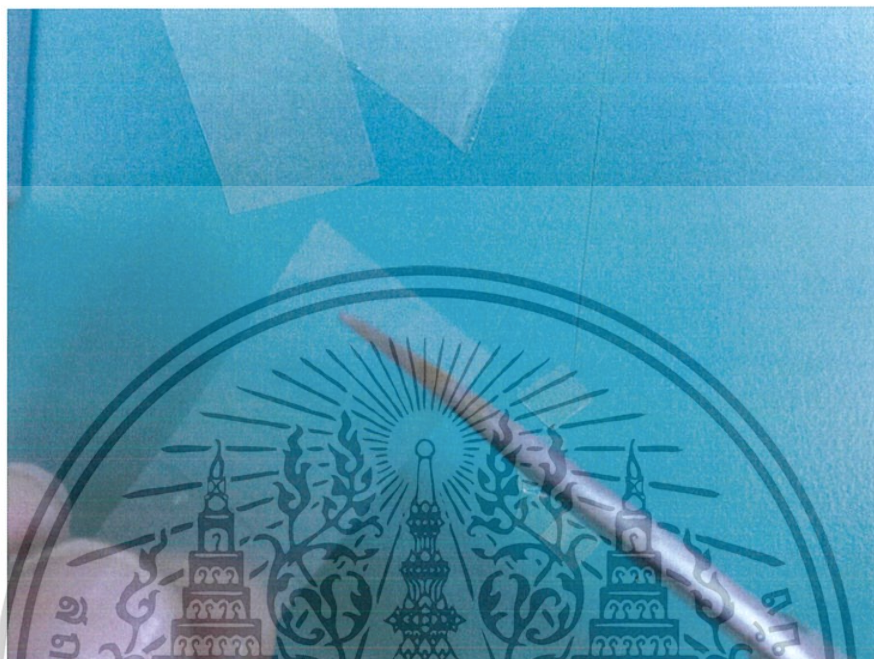


(ข) ฟิล์มที่ยัดขนาด 3 เท่า

รูปที่ 3.21 ตัวอย่างฟิล์มที่ผ่านการยัดมาแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. นำฟิล์มที่ยืดเสร็จแล้วมาตัดขนาด 0.5x0.5 cm เพื่อนำไปตรวจผลของการยืดด้วยเครื่อง FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrometer) กับเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope)



รูปที่ 3.22 ตัดฟิล์มเตรียมนำไปตรวจผล

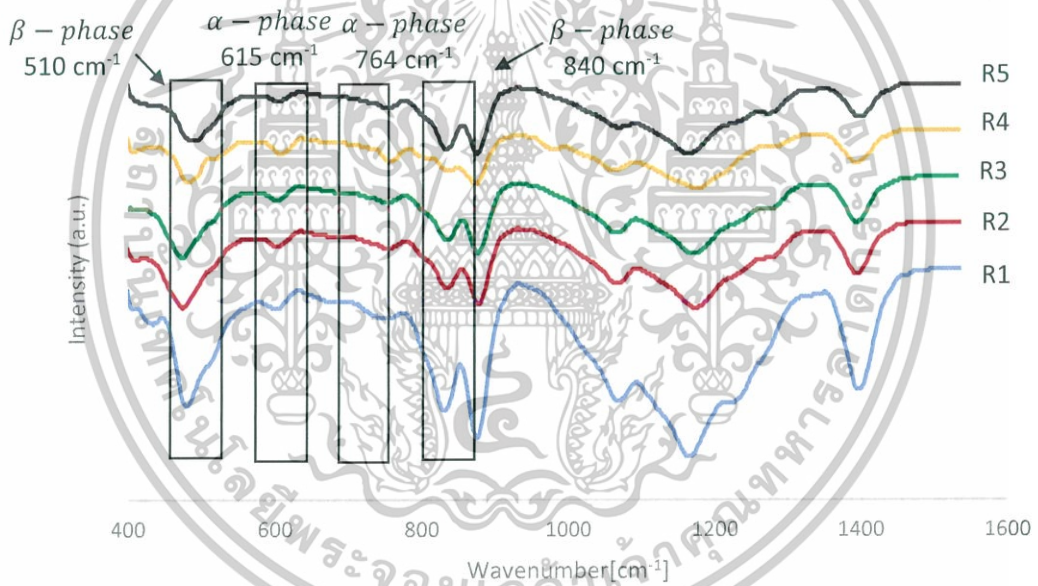
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในบทนี้จะเป็นการนำเสนอผลการวิจัยและอภิปรายผลของการยัดพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติทางไพโซอิเล็กทริกด้วยเครื่องยัดฟิล์มแบบร้อนโดยใช้อุณหภูมิในการยัดที่ 80 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษากระบวนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่อัตราการยัดที่ 2, 3, 4 และ 5 เท่าของขนาดของฟิล์ม โดยผลการวิเคราะห์ต่างๆ แสดงดังต่อไปนี้

4.1 ผลของการเปลี่ยนโครงสร้างพอลิเมอร์หลังได้รับการยัดโดยใช้ FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrometer) วิเคราะห์



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Intensity และ Wavenumber ของฟิล์มที่ก่อนการยัด และหลังจากได้รับการยัดที่อัตราการยัด 2, 3, 4 และ 5 เท่าของขนาดของฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผล FTIR สามารถคำนวณค่าสัดส่วนของเฟส β ได้ จากสมการ (4.1)

$$F(\beta) = \frac{X_\beta}{X_\alpha + X_\beta} = \frac{A_\beta}{\left(\frac{K_\beta}{K_\alpha}\right)A_\alpha + A_\beta} = \frac{A_\beta}{1.26A_\alpha + A_\beta} \quad (4.1)$$

เมื่อ $F(\beta)$ คือ ค่าสัดส่วนของเฟส β

A_α คือ ค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของฟิล์มที่มีโครงสร้างเป็นเฟส α

A_β คือ ค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของฟิล์มที่มีโครงสร้างเป็นเฟส β

K_α คือ ค่าสัมประสิทธิ์ดูดกลืนที่ Wavenumber มีค่าเท่ากับ $6.1 \times 10^4 \text{ cm}^2 \text{ mol}^{-1}$

K_β คือ ค่าสัมประสิทธิ์ดูดกลืนที่ Wavenumber มีค่าเท่ากับ $7.7 \times 10^4 \text{ cm}^2 \text{ mol}^{-1}$

X_α คือ ค่ามุมของผลึก α

X_β คือ ค่ามุมของผลึก β

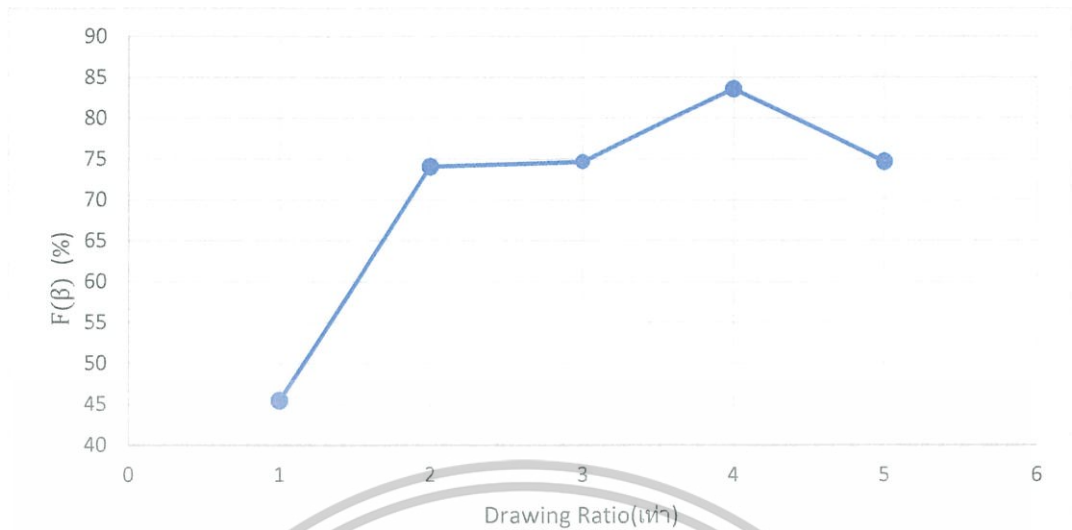
1.26 คือ ค่าสัดส่วนของ $\left(\frac{K_\beta}{K_\alpha}\right)$

โดยจะใช้ค่าความเข้มแสงของฟิล์มที่เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ 764 cm^{-1} แทนลักษณะของโครงสร้างฟิล์มที่เป็นเฟส α และค่าความเข้มแสงของฟิล์มที่เลขคลื่นมีค่าเท่ากับ 840 cm^{-1} แทนลักษณะโครงสร้างฟิล์มที่เป็นเฟส β และจากสมการที่ (4.1) และ (4.2) สามารถคำนวณหาค่าสัดส่วนของเฟส β ได้ดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ค่าสัดส่วนของเฟส β ที่อัตราการยืดต่างๆ

อัตราการยืด	สัดส่วนของเฟส β
1	45
2	74
3	75
4	84
5	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

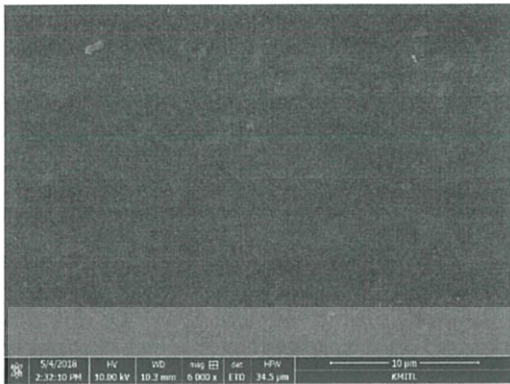


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการยืดและปริมาณสัดส่วนของเฟส β

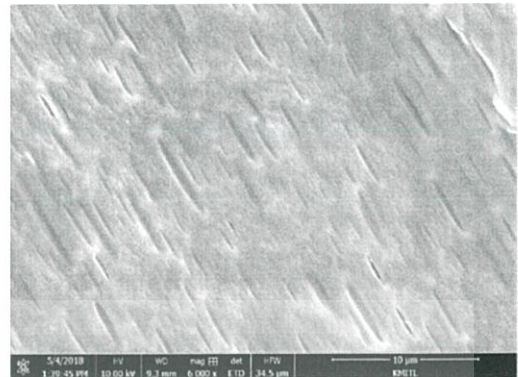
จากรูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการยืดและปริมาณสัดส่วนของเฟส β ของฟิล์ม P(VDF-HFP) ของฟิล์มก่อนได้รับการยืด และที่การยืดฟิล์มที่ 2-5 เท่าของขนาดฟิล์มเริ่มต้น ค่าสัดส่วนเป็น 45, 74, 75, 84 และ 75 ตามลำดับ จากผลค่าสัดส่วนของเฟส β พบว่า ที่อัตราการยืด 2, 3 และ 5 เท่าของขนาดของฟิล์มมีค่าสัดส่วนของเฟส β ที่ใกล้เคียงกัน และที่อัตราการยืดที่ 4 เท่าของขนาดของฟิล์มมีค่าสัดส่วนของเฟส β มากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 เท่า



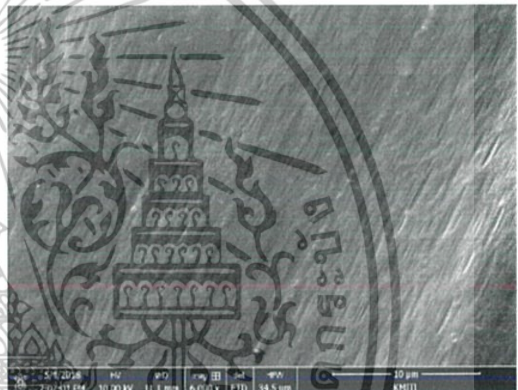
2 เท่า



3 เท่า



4 เท่า



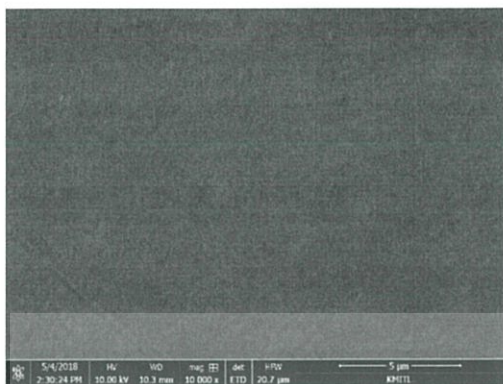
5 เท่า



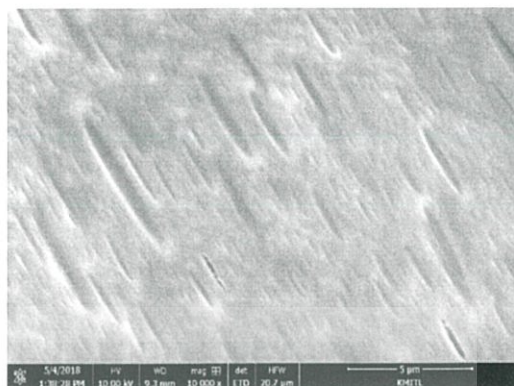
รูปที่ 4.4 แสดงพื้นผิวของที่กำลังขยาย 6,000 เท่า ของฟิล์มก่อนได้รับการยึดและหลังการยึดที่อัตรา
การยึด 2-5 เท่าของขนาดฟิล์มเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 เท่า



2 เท่า



3 เท่า



4 เท่า



5 เท่า



รูปที่ 4.5 แสดงพื้นผิวของที่กำลังขยาย 10,000 เท่า ของฟิล์มก่อนได้รับการยืดและหลังการยืดที่ อัตราการยืด 2-5 เท่าของขนาดฟิล์มเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 ถึงรูปที่ 4.5 แสดงถึงพื้นผิวของฟิล์มก่อนได้รับการยึด และหลังได้รับการยึดที่ อัตราการยึด 2-5 เท่าของขนาดฟิล์มเริ่มต้น พบว่าที่พื้นผิวของฟิล์มก่อนได้รับการยึดมีลักษณะราบเรียบ แต่เมื่อได้รับการยึดที่อัตราการยึดต่างๆ แล้ว จะสังเกตเห็นว่าที่พื้นผิวของฟิล์มเกิดริ้วที่มีลักษณะเป็นทรงรีจำนวนมาก โดยที่อัตราการยึด 2 และ 5 เท่าของขนาดฟิล์มเริ่มต้นสามารถเห็นความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงได้ดี ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกันที่กำลังขยาย 10,000 เท่าแล้วจะเห็นว่าที่อัตราการยึด 2 เท่าของขนาดฟิล์มเริ่มต้นมีขนาดของริ้วที่เกิดจากการยึด 358 ไมครอนและเมื่อเพิ่มอัตราการยึดที่ 5 เท่าของขนาดฟิล์มเริ่มต้นริ้วที่เกิดจากการยึดมีขนาด 429 ไมครอน ซึ่งมากกว่าที่อัตราการยึดที่ 2 เท่า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเมื่อฟิล์มได้รับการยึดแล้วจะทำให้เกิดริ้วของฟิล์มที่มีลักษณะเป็นทรงรีจำนวนมากและริ้วดังกล่าวจะมีขนาดขยายใหญ่ขึ้นแปรผันตามอัตราการยึด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพอลิเมอร์ P(VDF-HFP) โดยการยัดด้วยเครื่องยัดฟิล์มแบบร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ที่อัตราการยัดที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 เท่าของขนาดของฟิล์มและนำไปตรวจสอบและวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงสร้างทางโมเลกุลของพอลิเมอร์ FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrometer) และเครื่องวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวของพอลิเมอร์ SEM (Scanning Electron Microscope) ซึ่งมีผลการตรวจสอบและการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

จากการทดลองสร้างเครื่องยัดฟิล์มแบบร้อนสำหรับพอลิเมอร์ที่มีสมบัติไพโซอิเล็กทริกโดยการใช้โปรแกรม Microsoft Visual Studio ร่วมกับ Arduino เพื่อเป็นตัวควบคุมการทำงานของเครื่องยัดฟิล์มซึ่งในการทดลองยัดฟิล์มจะกำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในการยัดที่ 90 องศาเซลเซียสและขนาดของฟิล์มเริ่มต้นที่ 2.5 เซนติเมตร สามารถยัดฟิล์มได้ตั้งแต่อัตราการยัดที่ 2-5 เท่าของขนาดฟิล์มเริ่มต้น พบว่าอัตราการยัดที่เหมาะสมที่สุดที่สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากเฟส α ไปเป็นเฟส β คือที่อัตราการยัดที่ 4 เท่าของขนาดฟิล์มเริ่มต้น

ผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR และนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าสัดส่วนของเฟส β พบว่าฟิล์มที่ได้รับการยัดที่ 2-5 เท่าของขนาดฟิล์มเริ่มต้น ค่าสัดส่วนเป็น 74, 75, 84 และ 75 ตามลำดับ จากผลค่าสัดส่วนของเฟส β พบว่าที่อัตราการยัดที่ 4 เท่าของขนาดของฟิล์มมีค่าสัดส่วนของเฟส β มากที่สุด

ผลการวิเคราะห์ด้วย SEM พบว่าที่พื้นผิวของฟิล์มก่อนได้รับการยัดมีลักษณะราบเรียบ แต่เมื่อได้รับการยัดที่อัตราการยัดต่างๆแล้ว และที่อัตราการยัด 2 และ 5 เท่าของขนาดฟิล์มเริ่มต้นสามารถเห็นความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงได้ดี ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกันแล้วจะเห็นว่าที่อัตราการยัด 2 เท่าของขนาดฟิล์มเริ่มต้นมีขนาดของริ้วที่เกิดจากการยัด 358 ไมครอน และเมื่อเพิ่มอัตราการยัดที่ 5 เท่าของขนาดฟิล์มเริ่มต้นริ้วที่เกิดจากการยัดมีขนาด 439 ไมครอน ซึ่งมากกว่าที่อัตราการยัดที่ 2 เท่า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเมื่อฟิล์มได้รับการยัดแล้วจะทำให้เกิดริ้วของฟิล์มที่มีลักษณะเป็นทรงรีจำนวนมากและริ้วดังกล่าวจะมีขนาดขยายใหญ่ขึ้นแปรผันตามอัตราการยัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 อุปสรรคและปัญหา

1. ไม่สามารถใช้โปรแกรมสั่งการให้เครื่องยัดทำงานได้ตามระยะที่กำหนดในการยัดฟิล์มได้
2. ฟิล์มที่ใช้ในการทดสอบยัดฟิล์มมีฟองอากาศเป็นจำนวนมาก เมื่อนำฟิล์มดังกล่าวไปทดสอบ จะทำให้ขาดง่าย

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. เครื่องยัดควรมีการติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิเพื่อไม่ให้เครื่องยัดมีอุณหภูมิเนกำหนดที่ใช้ในการยัด
2. ควรติดตั้งพัดลมระบายความร้อนให้กับเครื่องยัดฟิล์มเพื่อไม่ให้มอเตอร์ร้อนมากเกินไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

รศ.ดร.อนันตสิน เตชะกำพุช, 2538, พอลิเมอร์เพียโซ-ไพโรอิเล็กทริก,

เข้าถึงเมื่อ 22 พฤศจิกายน 2560

เข้าถึงได้จาก https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/243_20.pdf

Air Quality Analytical (Gasmeter - Usa), 2548, หลักการ FTIR,

เข้าถึงเมื่อ 22 พฤศจิกายน 2560

เข้าถึงได้จาก http://digi.library.tu.ac.th/thesis/ra/0126/19APPENDIX_E.pdf

เพชริน สงค์ประเสริฐ, 2551, การพัฒนารูปแบบการบริหารงานวิชาการโดยยึดหลักการทำงานเป็นทีม
ในสถานศึกษาขั้นพื้นฐาน, เข้าถึงเมื่อ 10 มกราคม 2561

เข้าถึงได้จาก <http://www.physics.sci.ku.ac.th/physkm/Storage/KMStorage5.htm>

รศ.ดร.พินิจ หวังสมนึก, การใช้กล้องจุลทรรศน์ Microscopy,

เข้าถึงเมื่อ 22 พฤศจิกายน 2560 เข้าถึงได้จาก https://sc3.kku.ac.th/devav/e-learning/microscope/type/type_01.html

หัสวิภา หมายมัน, 2555, เครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบโครงสร้างจุลภาค SEM,

เข้าถึงเมื่อ 22 พฤศจิกายน 2560 เข้าถึงได้จาก

<http://web2.mfu.ac.th/center/stic/micro-analysis-instrument-menu/item/96-scanning-electron-microscope.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



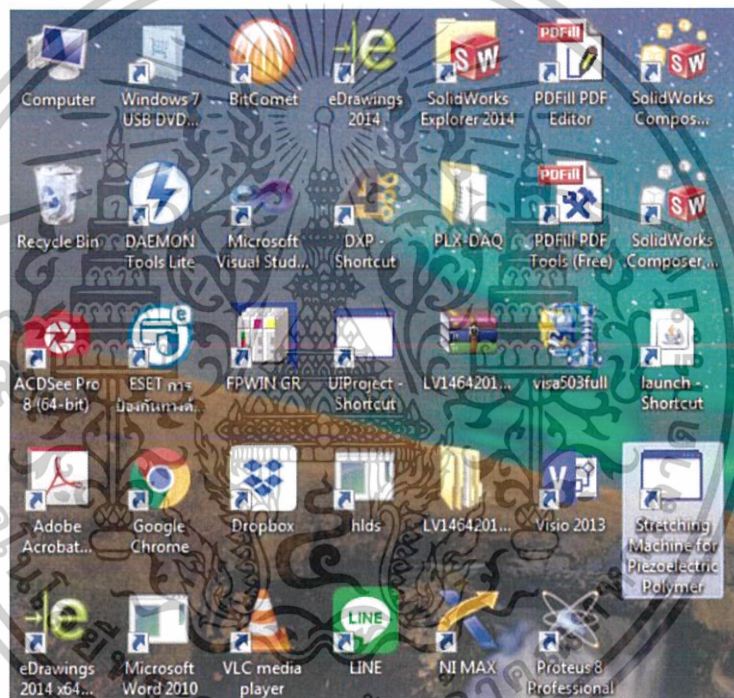
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND FABRICATION OF THERMALLY STRETCHING MACHINE FOR PIEZOELECTRIC POLYMER

วิธีการทดลอง

วิธีการทดลองและใช้โปรแกรมเครื่องมือวัด แบ่งตามขั้นตอนดังนี้

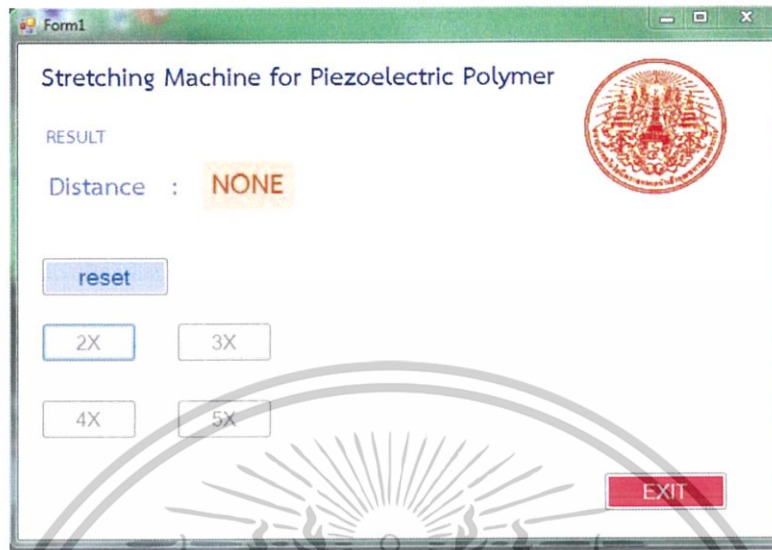
1.ดับเบิลคลิกที่ไอคอนชื่อ Stretching Machine for Piezoelectric Polymer



รูปที่ 1 หน้าไอคอนคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

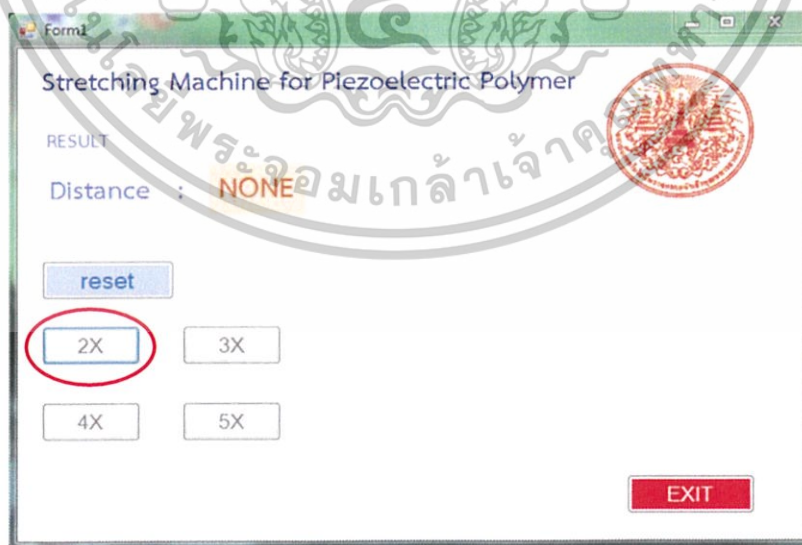
2.โปรแกรมจะแสดงหน้า User Interface



รูปที่ 2 หน้าตาโปรแกรม Stretching Machine for Piezoelectric Polymer

3.ทำการเชื่อมต่อสาย USB ที่คอมพิวเตอร์กับกล่องควบคุมคอนโทรลเลอร์

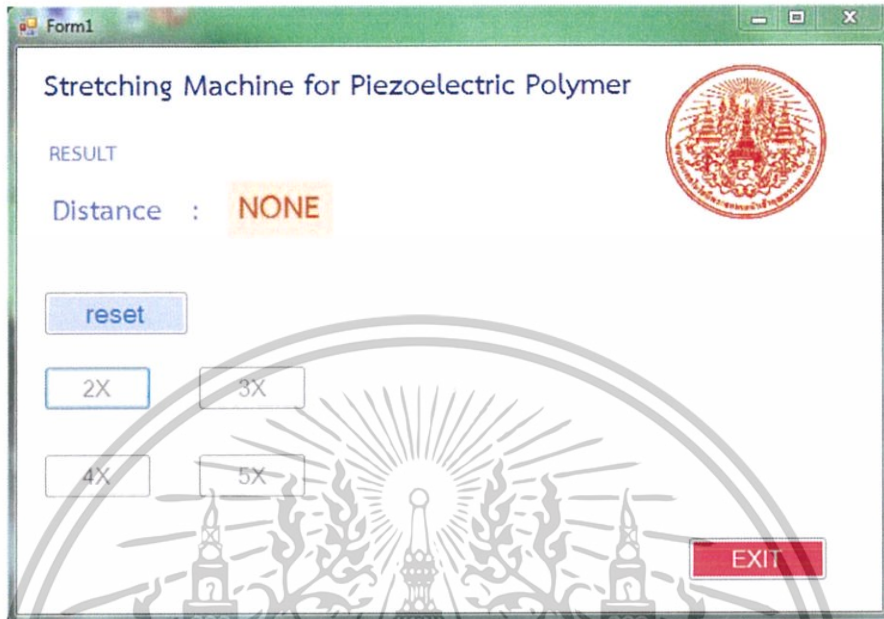
4.คลิกเลือก 2X เพื่อเป็นการเริ่มต้นให้คานหมุนออก 2.5 เซนติเมตร เพื่อใส่ฟิล์มที่ต้องการจะยืด



รูปที่ 3 คำสั่งเริ่มทำงานโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. จากนั้นทำการกดเลือกขนาดที่จะต้องการจะยืดออก โดยเลือกได้ ตั้งแต่ 2X ไปจนถึง 5X ทำไปเรื่อยๆจนกว่าจะได้ฟิล์มตามขนาดที่เราต้องการ



รูปที่ 4 หน้าตาโปรแกรมยืดตั้งแต่ระยะยืด2-5เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

❖ โค้ดส่วนการควบคุม

```
Public Class Form1
```

```
Private Sub Label1_Click(sender As System.Object, e As System.EventArgs) Handles Label1.Click
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Form1_Load(sender As System.Object, e As System.EventArgs) Handles MyBase.Load
```

```
SerialPort1.PortName = "COM15" 'เลือก Port ที่จะส่งข้อมูล
```

```
SerialPort1.BaudRate = 9600 'กำหนดอัตราการส่งข้อมูล
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Button1_Click(sender As System.Object, e As System.EventArgs) Handles Button1.Click
```

```
SerialPort1.Open() 'เปิด Port เพื่อส่งข้อมูล
```

```
SerialPort1.Write(1) 'ส่งค่า 1 ออกจาก Port เป็น Char
```

```
SerialPort1.Close() 'ปิด Port เมื่อส่งข้อมูลเสร็จ
```

```
Label2.Text = "2.5 cm"
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Button2_Click(sender As System.Object, e As System.EventArgs) Handles Button2.Click
```

```
SerialPort1.Open()
```

```
SerialPort1.Write(2) 'ส่งค่า 2 ออกจาก Port เป็น Char
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
SerialPort1.Close()
```

```
Label2.Text = "5 cm"
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Button3_Click(sender As System.Object, e As System.EventArgs)
```

```
Handles Button3.Click
```

```
SerialPort1.Open()
```

```
SerialPort1.Write(3) ' ส่งค่า 3 ออกจาก Port เป็น Char
```

```
SerialPort1.Close()
```

```
Label2.Text = "7.5 cm"
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Button6_Click(sender As System.Object, e As System.EventArgs)
```

```
Handles Button6.Click
```

```
SerialPort1.Open()
```

```
SerialPort1.Write(4) ' ส่งค่า 4 ออกจาก Port เป็น Char
```

```
SerialPort1.Close()
```

```
Label2.Text = "10 cm"
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Button5_Click(sender As System.Object, e As System.EventArgs)
```

```
SerialPort1.Open()
```

```
SerialPort1.Write(5) ' ส่งค่า 5 ออกจาก Port เป็น Char
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

SerialPort1.Close()

Label2.Text = "12.5 cm"
End Sub

Private Sub Button4_Click(sender As System.Object, e As System.EventArgs)
Handles Button4.Click
SerialPort1.Open()

SerialPort1.Write(7) ' ส่งค่า 7 ออกจาก Port เป็น Char

SerialPort1.Close()

Label2.Text = "reset"
End Sub
Private Sub Button7_Click_2(sender As System.Object, e As System.EventArgs)
Handles Button7.Click
Me.Close()
End Sub
End Class

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

❖ โค้ดส่วนของการเก็บข้อมูล

```

char i = '0';
int PUL=6; //define Pulse pin
int DIR=8; //define Direction pin
int ENA=10; //define Enable Pin
long x;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode (PUL, OUTPUT);
  pinMode (DIR, OUTPUT);
  pinMode (ENA, OUTPUT);
  digitalWrite(ENA,HIGH); }
void loop(){
  if (Serial.available()>0){
    i = Serial.read();
    //Serial.println(i); }
  if (i =='7'){
    for( x = 0; x <= 26665; x++){
      digitalWrite(DIR,LOW);
      digitalWrite(PUL,HIGH);
      delayMicroseconds(400);
      digitalWrite(PUL,LOW);
      delayMicroseconds(400); }}
  else if (i =='1'){
    for( x = 0; x <= 13333.333325; x++){
      digitalWrite(DIR,HIGH);
      digitalWrite(PUL,HIGH);
      delayMicroseconds(1600);
      digitalWrite(PUL,LOW);
      delayMicroseconds(1600); }}
  else if (i =='2'){
    for( x = 0; x <= 26666.66665; x++){
      digitalWrite(DIR,HIGH);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

digitalWrite(PUL,HIGH);
delayMicroseconds(1600);
digitalWrite(PUL,LOW);
delayMicroseconds(1600); }}
else if (i =='3'){
  for( x = 0; x <= 40000; x++){
    digitalWrite(DIR,HIGH);
    digitalWrite(PUL,HIGH);
    delayMicroseconds(1600);
    digitalWrite(PUL,LOW);
    delayMicroseconds(1600);}}
else if (i =='4'){
  for( x = 0; x <= 53333.3333; x++){
    digitalWrite(DIR,HIGH);
    digitalWrite(PUL,HIGH);
    delayMicroseconds(1600);
    digitalWrite(PUL,LOW);
    delayMicroseconds(1600);}}
else if (i =='5'){
  for( x = 0; x <= 66666.6666625; x++){
    digitalWrite(DIR,HIGH);
    digitalWrite(PUL,HIGH);
    delayMicroseconds(1600);
    digitalWrite(PUL,LOW);
    delayMicroseconds(1600);}}
i=0;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้