คุณสมบัติพื้นฐานของฟิล์มที่สังเคราะห์โดยพอลิพิโรล

BASIC PROPERTIES OF POLYPYRROLE FILMS SYNTHESIZED

สุกฤษฎิ์ คงนิธิเฉลิม
สิริพร จันทะเสน

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

คุณสมบัติพื้นฐานของฟิล์มที่สังเคราะห์โดยพอลิพิโรล
BASIC PROPERTIES OF POLYPYRROLE FILMS SYNTHESIZED

สุกฤษฎิ์ คงนิธิเฉลิม
สิริพร จันทะเสน

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BASIC PROPERTIES OF POLYPYRROLE FILMS SYNTHESIZED

SUKRIT KONGNITHICHALERM
SIRIPORN JANTHASEN

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIRMENT
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN APPLIED PHYSICS
DEPARTMENT OF PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	คุณสมบัติพื้นฐานของฟิล์มที่สังเคราะห์โดยพอลิพิโรล
	BASIC PROPERTIES OF POLYPYRROLE FILMS SYNTHESIZED
ชื่อนักศึกษา	นางสาวสิริพร จันทะเสน รหัสนักศึกษา 54050615
	นายสุกฤษฎิ์ คงนิธิเฉลิม รหัสนักศึกษา 54050616
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2557
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ณัฐพร พรหมรส
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร. บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร. ประธาน บูรณศิริ	
รศ. สาหร่าย เล็กชะอุ่ม	
ดร. วิฑูรย์ ยินดีสุข	
ดร. ณัฐพร พรหมรส	
ผศ.ดร. บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงงานพิเศษ	คุณสมบัติพื้นฐานของฟิล์มที่สังเคราะห์โดยพอลิพิโรล
ชื่อนักศึกษา	นางสาว สิริพร จันทะเสน รหัสนักศึกษา 54050615
	นาย สุกฤษฎิ์ คงนิธิเฉลิม รหัสนักศึกษา 54050616
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2557
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ณัฐพร พรหมรส
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง

บทคัดย่อ

ผู้วิจัยได้สังเคราะห์ฟิล์มบางพอลิพิโรลลงบนแผ่นฟิล์ม polymethyl methacrylate ด้วยไฟฟ้ากระแสสลับโดยวิธีพลาสมาพอลิเมอร์ไรเซชั่น ฟิล์มชุดแรกถูกสังเคราะห์ขึ้นที่ความต่างศักย์ 800,900,1000,1100,1200 V ที่ความดัน 0.5 Torrเป็นเวลา 30 นาที ฟิมล์ชุดที่สองถูกสังเคราะห์ขึ้นที่ความดัน 0.1,0.3,0.5,0.7,0.9 Torrที่ความต่างศักย์ 800 V เป็นเวลา 30 นาที ฟิมล์ชุดที่สามถูกสังเคราะห์ขึ้นที่เวลา 45,60 นาที ที่ความต่างศักย์ 800 V ความดัน 0.5 Torrเพื่อทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของฟิล์มที่ได้จากผลที่ทางผู้วิจัยได้นำไปวัดค่าโดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine ยี่ห้อ Hounsfield รุ่น H 10 KMเพื่อวัดค่ามอดูลัสของยัง จุดคราก ความเครียด ความเค้น และวัดค่าความราบเรียบของพื้นผิวฟิล์มและความหนาด้วยเครื่อง Atomic Force Microscope จากนั้นจึงนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงและค่าการส่องผ่านของแสง จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางพอลิพิโรลที่แตกต่างกัน

คำสำคัญ:พลาสมาพอลิเมอร์ไรเซชั่น, พอลิพิโรล, มอดูลัสของยัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	BASIC PROPERTIES OF POLYPYRROLE FILMS SYNTHESIZED
Student	**Ms.**SIRIPORN JANTHASEN STUDENT ID 54050615
	Mr.SUKRIT KONGNITHICHALERM STUDENT ID 54050616
Degree	Bechelor of Science in Applied Physics
Department	Physics
Academic Year	2557
Advisor	Dr. Nathaporn Promros
Co-Advisor	Asst.Prof.Dr.Boonchoat Poasawatyanyong

ABSTRACT

Polypyrrole films were synthesized on polymethyl methacrylate by an alternating current induced plasma polymerization. First, film preparation was synthesized at an applied voltage of 800,900,1000,1100,1200 V under a pressure of 0.5 Torr for 30 minutes. Second, film preparation was synthesized at an applied voltage of 800 V under a pressure of 0.1,0.3,0.5,0.7,0.9Torr for 30 minutes. Third, film preparation was synthesized at an applied voltage of 800, V under a pressure of 0.5 Torr for 45 and 60 minutes. After film preparation we have to test it to see some basic properties of the film. We measure Young's modulus, strain, stress, Yield pointof a film by Universal Testing Machine brand Hounsfield generation H 10 KM. We also measure roughness and thickness of the film by Atomic Force Microscope. Furthermore we measure light absorption and light transmission. The results of this experiment show difference basic properties of Polypyrrole films.

Keyword: Plasma polymerization, Polypyrrole, Young's modulus

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษเล่นนี้สำเร็จสมบูรณ์ด้วยดีเนื่องจากผู้วิจัยได้รับอนุเคราะห์และความช่วยเหลืออย่างสูงจากดร.ณัฐพร พรหมรส ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ปลูกฝังวิธีการทำงาน จนถึงแนะนำการใช้ชีวิตในอนาคต ผู้วิจัยไม่สามารถจะหาสิ่งใดมาตอบแทนพระคุณนี้ได้ จึงขอให้ความดีที่ผู้วิจัยทำมาทั้งหมดตั้งแต่ชาติปางก่อนจนถึงปัจจุบันคุ้มครองอาจารย์ ให้อาจารย์มีสุขภาพร่างกาย มีพละกำลังที่จะทำงานและสั่งสอนลูกศิษย์ตราบนานเท่านาน

ขอบพระคุณ ผศ.ดร.บุญโชติเผ่าสวัสดิ์ยรรยง ที่คอยให้คำแนะนำในการทำงานเกี่ยวกับเครื่อง AC Plasma Polymerization และยังช่วยกระตุ้นให้การทำงานนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ทั้งนี้นั้นยังคอยให้ความรู้ คำปรึกษาเพื่อให้โครงงานพิเศษนี้มีความถูกต้องสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการคุมสอบโครงงานพิเศษ รศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม ดร.ประธาน บุรณศิริ และ ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข ที่สละเวลาอันมีค่าเข้ารับฟังการนำเสนองานวิจัย อีกทั้งยังให้คำปรึกษาและคำแนะนำในทุกๆเรื่องที่เกี่ยวข้องกับโครงงานพิเศษเล่นนี้

ขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เป็นสถานที่ ที่ให้ความรู้ ให้เพื่อนใหม่ ได้สังคมใหม่ๆ ได้เจออาจารย์ที่เปี่ยมไปด้วยความสามารถและความเมตตาและให้อนาคตสำหรับผู้วิจัยนี้ หากมีโอกาสผู้วิจัยจะมาตอบแทนบุญคุณและสร้างประโยชน์ให้กับสถาบัน ผู้วิจัยก็พร้อมและเต็มใจที่จะทำอย่างสุดความสามารถที่มีเสมอ
ขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้ห้องปฏิบัติการพลาสมาและวัสดุขั้นสูง ในการใช้เครื่อง AC Plasma Polymerization

คุณค่าและประโยชน์อันเกิดจากโครงงานพิเศษนี้ คณะผู้วิจัยขอมอบบูชาพระคุณบิดา มารดา ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือ และขอน้อมบูชาท่านบูรพาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาความรู้ด้วยความรักและเมตตา

สุกฤษฎ์ คงนิธิเฉลิม
สิริพร จันทะเสน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ฌ
คำย่อ/สัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่สอดคล้องกับงานวิจัย	4
2.1 กระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันและพอลิเมอร์	4
2.2 การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์	6
2.2.1 พอลิพิโรล	8
2.3 การสังเคราะห์พอลิเมอร์	9
2.4 พลาสมาและการสังเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยพลาสมา	10
2.4.1 พลาสมา	10
2.4.2 การสังเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยพลาสมา	10
2.5 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริคของพอลิเมอร์	12
2.5.1 Piezoresistive Strain Sensor	13
2.6 Shottky Diode	14
2.6.1 ไดโอดรอยต่อชอตกี	14
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	19
3.1 การสังเคราะห์ฟิล์มบางพอลิพิโรลโดยวิธี AC Plasma Polymerization	19
3.1.1 การเตรียมแผ่นรองรับ	19
3.1.2 สังเคราะห์ฟิล์มบางพอลิพิโรลโดยวิธี AC Plasma Polymerization	20
3.2 ระบบดีซีแมกนิตรอนสปัตเตอริง	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.1 ขั้นตอนการสปัตเตอริง	25
3.3 การเตรียมแผ่นรองรับเพื่อวัดคุณสมบัติ	26
3.3.1 การเตรียมแผ่นรองรับเพื่อวัดคุณสมบัติเชิงกลและศึกษาโครงสร้างพื้นผิว	26
3.3.2 การเตรียมแผ่นรองรับเพื่อวัดค่าการนำไฟฟ้า	31
3.3.3 การเตรียมแผ่นรองรับเพื่อสร้างเป็น Schottky Diode	33
3.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล	38
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	39
4.1 สมบัติเชิงกล	39
4.1.1 สมบัติเชิงกลในพอลิเมอร์	39
4.1.2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล	42
4.2 การศึกษาโครงสร้างพื้นผิว	46
4.2.1 การศึกษาโครงสร้างพื้นผิวด้วยวิธี Atomic Force Microscope(AFM)	46
4.2.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มบางพอลิพิโรลโดยเครื่อง Atomic Force Microscope	47
4.3การวัดค่าการดูดกลืนแสง	61
4.3.1 การวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer	61
4.3.2 ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางพอลิพิโรลโดยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer	62
4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี	66
4.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเครื่อง FTIR	66
4.4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเครื่อง FTIR	67
4.5 ผลการวิเคราะห์การนำไฟฟ้าของฟิล์ม	69
4.6 Schottky Diode	71
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	73
5.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล	73
5.2 ผลการทดสอบโครงสร้างพื้นผิว	73
5.3 การวัดค่าการดูดกลืนแสง	74
5.4 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม	74
เอกสารอ้างอิง	75-77
ภาคผนวก	78
ภาคผนวก ก	79-84
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	85-87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันที่ทำให้โมโนเมอร์มาเชื่อมต่อกันเป็นพอลิเมอร์	4
2.2 โครงสร้างพอลิเมอร์แบบร่างแหและแบบเชื่อมขวาง	5
2.3 โครงสร้างพอลิเมอร์แบบเส้น	5
2.4 โครงสร้างพอลิเมอร์แบบกิ่ง	5
2.5 การจำแนกการนำไฟฟ้าของวัสดุ	6
2.6 สูตรโครงสร้างทั่วไปของ พอลิไทโอฟีน พอลิพิโรล พอลิอะเซทิลีน พอลิพาราฟินิลลีน	7
2.7 แผนภาพแสดงค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุ	7
2.8 โครงสร้างการนำไฟฟ้าของพอลิพิโรลเมื่อทำการโดป	8
2.9 ลักษณะผิวของฟิล์มพอลิพิโรลที่สังเคราะห์ได้บนผิวอิเล็กโทรดโดยที่ (a) ลักษณะโครงสร้างผิวและ (b) ลักษณะภาพตัดขวางของผิวฟิล์มพอลิพิโรล	9
2.10 ลักษณะผิวของพอลิพิโรลที่สังเคราะห์โดยวิธีทางเคมี	9
2.11 ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของพอลิพิโรล	10
2.12 แสดงการเปลี่ยนสถานะจากแก๊สเป็นพลาสมาโดยการเพิ่มพลังงานให้กับแก๊ส	10
2.13 โครงสร้างของพอลิพิโรลที่สังเคราะห์โดยพลาสมาพอลิเมอไรเซชัน	11
2.14 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริค	12
2.15 แผนภาพแถบพลังงานรอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำ (ก) ก่อนการสัมผัส (ข) หลังการสัมผัส (ค) การกระจายประจุปริภูมิบริเวณรอยต่อ	15
2.16 แผนภาพแถบพลังงานรอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำชนิดพี (ก) ก่อนการสัมผัส (ข) หลังการสัมผัสและ (ค) การกระจายประจุปริภูมิบริเวณรอยต่อ	16
2.17 แผนภาพแถบพลังงานรอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเมื่อ$\phi_s > \phi_m$ (ก) ก่อนการสัมผัส (ข) หลังการสัมผัส	17
2.18 แผนภาพแถบพลังงานรอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำชนิดพีเมื่อ$\phi_s > \phi_m$ (ก) ก่อนการสัมผัส (ข) หลังการสัมผัส	18
3.1 แผนภาพระบบ AC Plasma Polymerization	21
3.2 ระบบดีซีแมกนิตรอนสปัตเตอริง	24
3.3 แผนภาพระบบดีซีแมกนิตรอนสปัตเตอริง	25
3.4 แสดงเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ยี่ห้อ Hounsfield รุ่น H 10 KM	38
4.1 แสดงช่วงของการเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติกและแบบพลาสติก	40
4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของพอลิเมอร์ลักษณะต่างๆ	41
4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของพอลิเมอร์ลักษณะต่างๆ	41
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของพลาสติกและพอลิพิโรลลงบนแผ่นพลาสติก PMMA ที่ความต่างศักย์ต่างกัน	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของพลาสติกและพอลิพิโรล ลงบนแผ่นพลาสติก PMMA ที่ความดันต่างกัน	44
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของพลาสติกและพอลิพิโรล ลงบนแผ่นพลาสติก PMMA ที่เวลาต่างกัน	45
4.7 ภาพแสดงเครื่อง Atomic Force Microscope	47
4.8 ภาพแสดงโครงสร้างพื้นผิวที่ปลูกบนฟิล์มที่ความต่างศักย์ 800 V	48
4.9 ภาพแสดงโครงสร้างพื้นผิวที่ปลูกบนฟิล์มที่ความต่างศักย์ 900 V	49
4.10 ภาพแสดงโครงสร้างพื้นผิวที่ปลูกบนฟิล์มที่ความต่างศักย์ 1000 V	50
4.11 ภาพแสดงโครงสร้างพื้นผิวที่ปลูกบนฟิล์มที่ความต่างศักย์ 1100 V	51
4.12 ภาพแสดงโครงสร้างพื้นผิวที่ปลูกบนฟิล์มที่ความต่างศักย์ 1200 V	52
4.13 ภาพแสดงโครงสร้างพื้นผิวที่ปลูกบนฟิล์มที่ความดัน 0.1 Torr	54
4.14 ภาพแสดงโครงสร้างพื้นผิวที่ปลูกบนฟิล์มที่ความดัน 0.3 Torr	55
4.15 ภาพแสดงโครงสร้างพื้นผิวที่ปลูกบนฟิล์มที่ความดัน 0.7 Torr	56
4.16 ภาพแสดงโครงสร้างพื้นผิวที่ปลูกบนฟิล์มที่ความดัน 0.9 Torr	57
4.17 ภาพแสดงโครงสร้างพื้นผิวที่ปลูกบนฟิล์มเป็นเวลา 45 นาที	59
4.18 ภาพแสดงโครงสร้างพื้นผิวที่ปลูกบนฟิล์มเป็นเวลา 60 นาที	60
4.19 ภาพแสดงเครื่อง UV-VIS spectrophotometer	61
4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับการดูดกลืนแสงที่ความต่างศักย์ต่างกัน	63
4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับการดูดกลืนแสงที่ความดันต่างกัน	64
4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับการดูดกลืนแสงที่เวลาต่างกัน	66
4.23 ภาพแสดงเครื่อง FT-IR spectrometer	67
4.24 กราฟแสดงเส้นสเปกตรัมของฟิล์มพอลิพิโรลที่ความต่างศักย์ ความดัน และเวลาต่างกัน	69
4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับกระแสของฟิล์มที่สร้างด้วยความความต่างศักย์ 800 V	70
4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับกระแสของฟิล์มที่สร้างด้วยความต่างศักย์ 1000 V	70
4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับกระแสของฟิล์มที่สร้างด้วยความต่างศักย์ 1200 V	71
4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับกระแสของฟิล์มที่สร้างเป็นรอยต่อแบบ Schottky	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
1ก ภาพแสดงเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นสแตนเลสด้านล่าง	79
2ก ภาพแสดงเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นสแตนเลสด้าน	81
3ก ภาพแสดงเส้นผ่านศูนย์กลางของ Monomer Vessel	82
4ก ภาพแสดงเส้นผ่านศูนย์กลางของ Cold Trap	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย	3
3.3.1.1 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่น PMMA ที่ความต่างศักย์ 800V	26
3.3.1.2 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่น PMMA ที่ความต่างศักย์ 900 V	27
3.3.1.3 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่น PMMA ที่ความต่างศักย์ 1000 V	27
3.3.1.4 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่น PMMA ที่ความต่างศักย์ 1100 V	28
3.3.1.5 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่น PMMA ที่ความต่างศักย์ 1200 V	28
3.3.1.6 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่น PMMA ที่ความดัน 0.1 Torr	29
3.3.1.7 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่น PMMA ที่ความดัน 0.3 Torr	29
3.3.1.8 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่น PMMA ที่ความดัน 0.7 Torr	30
3.3.1.9 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่น PMMA ที่ความดัน 0.9 Torr	30
3.3.1.10 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่น PMMA ที่เวลา 45 นาที	31
3.3.1.11 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่น PMMA ที่เวลา 60 นาที	31
3.3.2.1 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่นกระจกที่ความต่างศักย์ 800 V และความดัน 0.5 Torr	32
3.3.2.2 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่นกระจกที่ความต่างศักย์ 1000 V และความดัน 0.5Torr	32
3.3.2.3 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่นกระจกที่ความต่างศักย์ 1200 V และความดัน 0.5 Torr	33
3.3.3.1 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่นกระจกที่ความต่างศักย์ 800 V และความดัน 0.4 Torr	34
3.3.3.2 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่นกระจกที่ความต่างศักย์ 1000 V และความดัน 0.4 Torr	34
3.3.3.3 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่นกระจกที่ความต่างศักย์ 1200 V และความดัน 0.4 Torr	35
3.3.3.4 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่นกระจกที่ความต่างศักย์ 800 V และความดัน 0.5 Torr	35
3.3.3.5 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่นกระจกที่ความต่างศักย์ 1000 V และความดัน 0.5 Torr	36
3.3.3.6 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่นกระจกที่ความต่างศักย์ 1200 V และความดัน 0.5 Torr	36
3.3.3.7 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่นกระจกที่ความต่างศักย์ 800 V และความดัน 0.6 Torr	37
3.3.3.8 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่นกระจกที่ความต่างศักย์ 1000 V และความดัน 0.6 Torr	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้าที่
3.3.3.9 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่นกระจกที่ความต่างศักย์ 1200 V และความดัน 0.6 Torr	38
4.1.2.1 แสดงสมบัติเชิงกลของพลาสติกและพลาสติกที่เคลือบด้วยพอลิพิโรลที่ความต่างศักย์ต่างกัน	43
4.1.2.2 แสดงสมบัติเชิงกลของพลาสติกและพลาสติกที่เคลือบด้วยพอลิพิโรลที่ความดันต่างกัน	44
4.1.2.3 แสดงสมบัติเชิงกลของพลาสติกและพลาสติกที่เคลือบด้วยพอลิพิโรลที่เวลาต่างกัน	46
4.2.2.1 แสดงสมบัติพื้นผิวของฟิล์ม PMMA ที่เคลือบด้วยPolypyrroleโดยวิธี Plasma Polymerization ที่ความต่างศักย์ค่าต่างๆ	53
4.2.2.2 แสดงสมบัติพื้นผิวของฟิล์ม PMMA ที่เคลือบด้วยPolypyrroleโดยวิธี Plasma Polymerization ที่ความดันค่าต่างๆ	58
4.2.2.3 แสดงสมบัติพื้นผิวของฟิล์ม PMMA ที่เคลือบด้วยPolypyrroleโดยวิธี Plasma Polymerization ที่เวลาต่างๆ	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ	ความหมาย
PMMA	Polymethyl Methacrylate
PPy	Polypyrrole
Sccm	standard cubic centimeters per minute
V	ความต่างศักย์มีหน่วยเป็น โวลท์ (V)
P	ความดัน มีหน่วยเป็นทอร์ (Torr)
UTM	Universal Testing Machine
AFM	Atomic Force Microscope

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

พอลิพิโรล (polypyrrole, PPy) เป็นพอลิเมอร์ที่ได้รับความสนใจในการนำมาสังเคราะห์เป็นฟิล์มพอลิเมอร์และโดปด้วยสารโดปเพื่อเพิ่มค่าการนำไฟฟ้า เนื่องจากพอลิพิโรลมีโครงสร้างเป็นวงแหวนมีพันธะคู่สลับพันธะเดี่ยวตลอดสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งเป็นลักษณะของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า โดยที่ฟิล์มที่ได้จะมีน้ำหนักเบา ทนต่อสารเคมีเสถียรต่อความร้อนและสภาวะแวดล้อมโดยกระบวนการที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์นำไฟฟ้าโดยทั่วไปจะใช้วิธีทางเคมี (chemical polymerization method) และวิธีทางเคมีไฟฟ้า (electrochemical polymerization method) แต่วิธีเหล่านี้ยังมีข้อด้อยสำหรับการสังเคราะห์ฟิล์มพอลิเมอร์นำไฟฟ้า เนื่องจากวิธีทางเคมีไฟฟ้าจะให้ฟิล์มที่ค่อนข้างเปราะ ส่วนวิธีทางเคมีจะได้พอลิเมอร์ที่เป็นผงหรือเม็ดแข็ง ซึ่งไม่เหมาะกับการทำเป็นฟิล์ม เนื่องจากพอลิพิโรลไม่ละลายในตัวทำละลายจึงขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ยาก วิธีพลาสมาพอลิเมอไรเซชัน (plasma polymerization method) จะให้ฟิล์มที่มีสมบัติดีจึงเป็นวิธีที่เหมาะกับการสังเคราะห์พอลิพิโรลฟิล์ม ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยสนใจที่จะใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ (alternating current, AC) เป็นแหล่งพลังงานในการผลิตพลาสมา เนื่องจากการใช้ไฟฟ้ากระแสสลับไม่ต้องมีการแปลงพลังงานเข้าสู่ขดลวดเหมือนการใช้พลังงานจากความถี่คลื่นวิทยุหรือจากไฟฟ้ากระแสตรงที่ต้องผ่านไฟฟ้ากระแสสลับจากหม้อแปลงไฟฟ้าเข้าตัวปรับเปลี่ยนความต่างศักย์ (voltage regulator) ที่ทำหน้าที่ปรับค่าศักย์ไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงเพื่อให้พลังงานแก่ระบบ การสังเคราะห์พอลิพิโรลฟิล์มวิธีนี้น่าจะให้พอลิพิโรลฟิล์มนำไฟฟ้าที่มีสมบัติที่ดี และสามารถทำการ in situ doping ด้วยสารโดปไปพร้อมกับกระบวนการเกิดพอลิเมอไรเซชันของพอลิพิโรลได้ ทำให้สารโดปไม่หลุดออกจากแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ได้ง่าย พอลิพิโรลที่โดปด้วยสารโดปจึงน่าจะมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสามารถใช้งานได้นานขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. สังเคราะห์ฟิล์มบาง polypyrrole จากกระบวนการ Plasma Polymerization ในเงื่อนไขที่แตกต่างกันและศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางที่เตรียมได้
2. นำฟิล์มบางที่ได้ไปใช้เป็น Schottky Diode และตรวจสอบคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริค

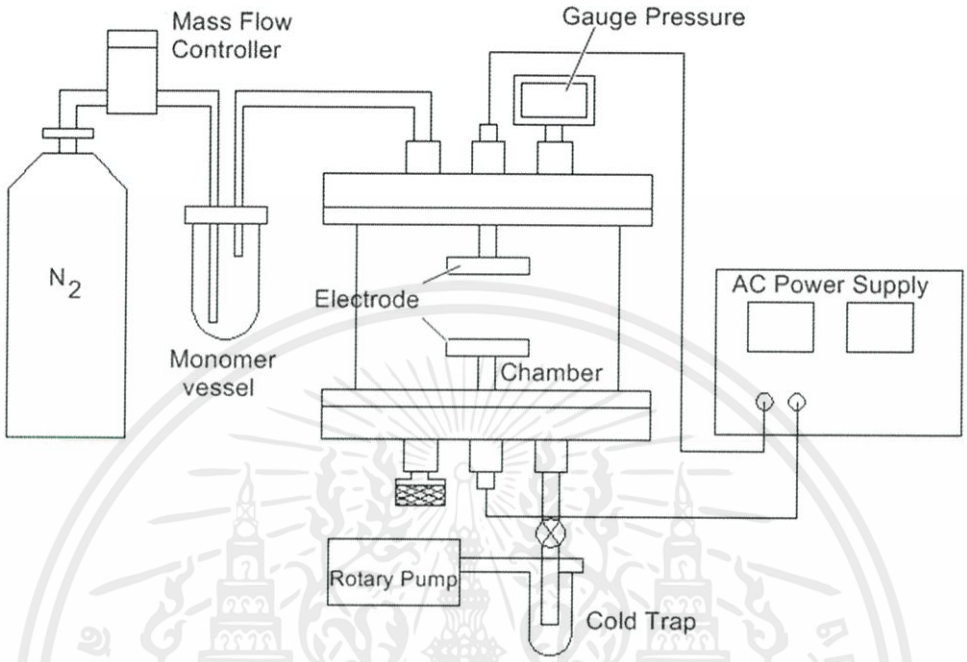
1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาการทำงานของกระบวนการ Plasma Polymerization เพื่อสังเคราะห์ polypyrrole
2. ศึกษาการเคลือบฟิล์มบางพอลิพิโรลโดยกระบวนการ Plasma Polymerization
3. วัดความเค้นและความเครียดเพื่อหาเกจแฟกเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับงานวิจัย
2. ศึกษาวิธีการใช้เครื่องมือดังรูป



3. สังเคราะห์ฟิล์มพอลิพิโรลฟิล์มโดยการปรับเปลี่ยนตัวแปร ความดัน ศักย์ไฟฟ้า ระยะเวลาการเคลือบ

4. ตรวจสอบสมบัติ และค่าการนำไฟฟ้าของพอลิพิโรลฟิล์มโดยใช้เทคนิคดังนี้ 2 Point probe ATR-FTIR UTM

5. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย

เดือน	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
ค้นคว้าการสร้างไดโอดแบบรอยต่อ Schottky	→	→										
ศึกษาการใช้เครื่องมือ AC Plasma polymerization		→	→	→								
สังเคราะห์ฟิล์มบางพอลิพิโรล์					→	→	→	→				
ตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางพอลิพิโรล์								→	→	→	→	
วิเคราะห์และสรุปผล											→	→

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงอุปกรณ์และหลักการสังเคราะห์ polypyrrole โดยวิธี Plasma Polymerization
2. ทราบถึงผลของตัวแปรต่างๆ อาทิเช่น ความต่างศักย์ เวลาในการเคลือบที่มีผลต่อการสังเคราะห์ฟิล์มบาง
3. ทำให้ทราบถึงการนำ polypyrrole ไปประยุกต์ใช้เป็น Schottky Diode และคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริค

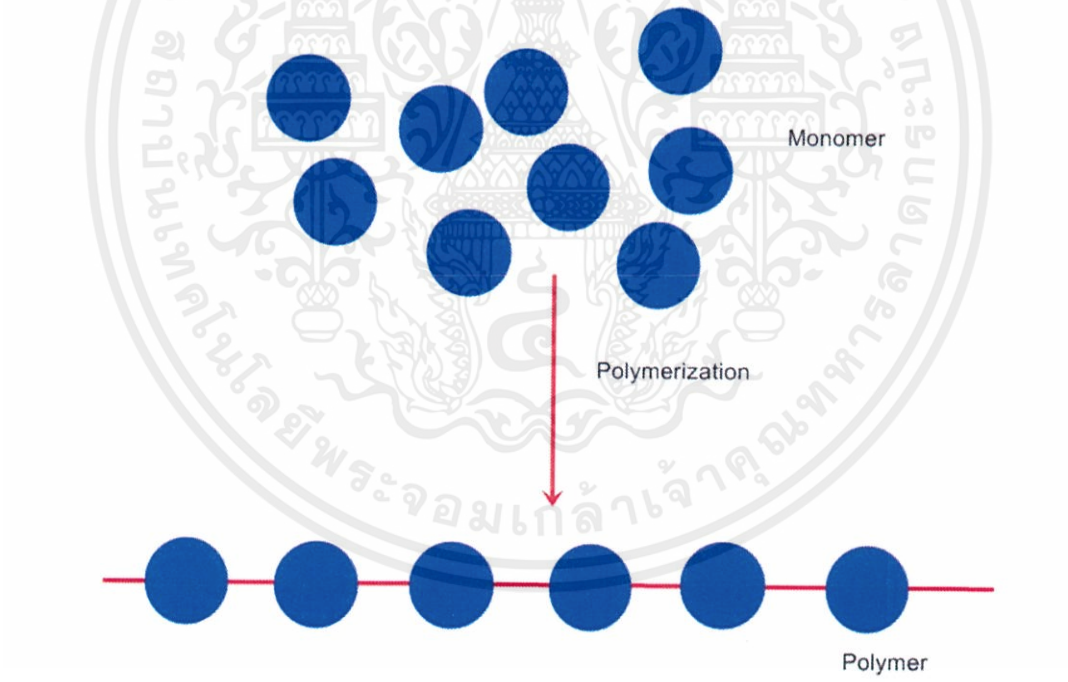
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่สอดคล้องกับงานวิจัย

ในบทนี้คณะผู้วิจัยจะกล่าวถึงหลักการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยโดยเริ่มต้นจากการอธิบายกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันและพอลิเมอร์จากนั้นเป็นการอธิบายการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์จากนั้นเป็นการอธิบายการสังเคราะห์พอลิเมอร์พลาสมาและการสังเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยพลาสมาจากนั้นเป็นการอธิบายปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริคของพอลิเมอร์ในส่วนสุดท้ายเป็นการอธิบายเรื่อง Schottky Diode

2.1 กระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันและพอลิเมอร์

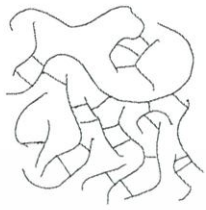
พอลิเมอร์ (polymer) หมายถึงสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) ซึ่งเป็นการรวมหน่วยเล็กๆจำนวนมาก ที่เรียกว่า โมโนเมอร์ (monomer) มาเชื่อมต่อกัน และพอลิเมอร์ที่ผ่านกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันถูกแสดงดังรูปด้านล่าง [1]



รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันที่ทำให้โมโนเมอร์มาเชื่อมต่อกันเป็นพอลิเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 พอลิเมอร์แบบร่างแหหรือแบบเชื่อมขวาง(network or cross-linked polymers) คือ พอลิเมอร์ที่เกิดจากโมโนเมอร์สร้างพันธะต่อกันเป็นร่างแหดังรูปที่ 2.2 ถ้ามีพันธะเชื่อมมากก็จะทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีลักษณะแข็งแรงไม่ยืดหยุ่นแตกหักง่ายแต่ถ้ามีพันธะเชื่อมระหว่างสายโซ่หลักมีน้อยก็จะยืดหยุ่นได้มาก

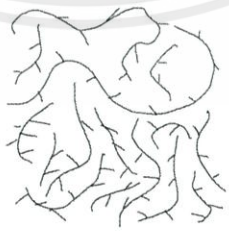


รูปที่ 2.2 โครงสร้างพอลิเมอร์แบบร่างแหหรือแบบเชื่อมขวาง [2]

2.1.2 พอลิเมอร์แบบเส้น (line polymers) คือ เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากโมโนเมอร์สร้างพันธะต่อกันเป็นสายยาว โซ่พอลิเมอร์เรียงชิดกันมากว่าโครงสร้างแบบอื่น ๆ จึงมีความหนาแน่น และจุดหลอมเหลวสูง มีลักษณะแข็ง เหนียวกว่าโครงสร้างอื่นๆดังรูปที่ 2.3

รูปที่ 2.3 โครงสร้างพอลิเมอร์แบบเส้น [2]

2.1.3 พอลิเมอร์แบบกิ่ง (branched polymers) คือ เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากโมโนเมอร์ยึดกันแตกกิ่งก้านสาขา มีทั้งโซ่สั้นและโซ่ยาว กิ่งที่แตกจาก พอลิเมอร์ของโซ่หลัก ทำให้ไม่สามารถจัดเรียงโซ่พอลิเมอร์ให้ชิดกันได้มาก จึงมีความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวต่ำแต่สามาถยืดหยุ่นได้มากขึ้น มีความเหนียวต่ำ โครงสร้างเปลี่ยนรูปได้ง่ายเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.4



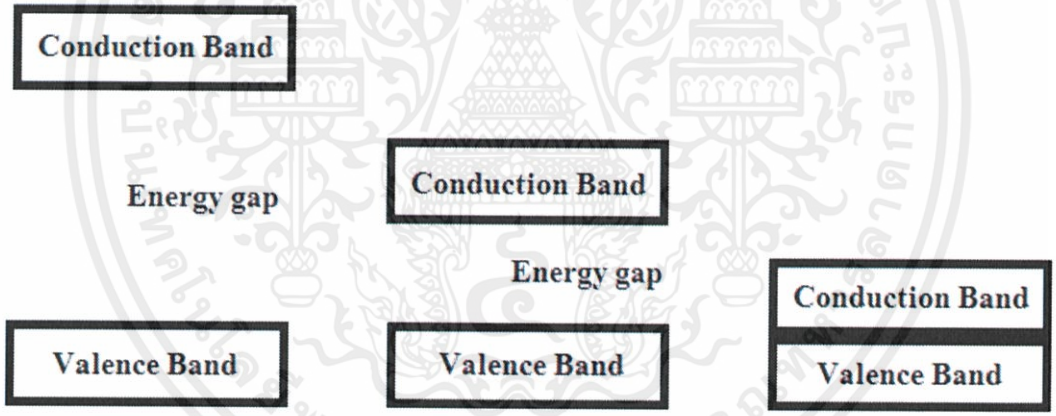
รูปที่ 2.4 โครงสร้างพอลิเมอร์แบบกิ่ง [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเมอร์เช่นยางหรือพลาสติกสังเคราะห์ได้ถูกนำมาใช้งานในด้านต่างๆเนื่องจากมีสมบัติที่ดีหลายประการเช่นไม่นำความร้อนไม่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีมีน้ำหนักเบาและความยืดหยุ่นสูงทำให้พอลิเมอร์เป็นที่นิยมในการนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางเป็นผลให้เทคโนโลยีด้านการผลิตถูกพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็วจนในปัจจุบันมีการสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้าได้เช่นเดียวกับโลหะมีการสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่แข็งแรงทนทานกระทั่งสามารถใช้แทนโลหะได้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างหรืออุตสาหกรรมรถยนต์ [3]

2.2 การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์

โดยทั่วไปสามารถจำแนกการนำไฟฟ้าของวัสดุสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทตามขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap) ดังรูปที่ 2.5 วัสดุที่เป็นโลหะจะมีแถบพลังงานทั้งสองซ้อนทับกันทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้ดีตรงข้ามกับวัสดุที่มีช่องว่างแถบพลังงานสูงจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากแถบเวเลนซ์ (valence band) ไปยังแถบนำ (conduction band) ได้ยากวัสดุนี้จึงกลายเป็นฉนวนไฟฟ้าตรงส่วนในสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีขนาดช่องว่างแถบพลังงานอยู่ระหว่างฉนวนกับตัวนำทำให้เมื่อได้รับพลังงานเพียงพอที่อิเล็กตรอนจากแถบเวเลนซ์สามารถไปยังแถบการนำแล้ววัสดุประเภทนี้จะนำไฟฟ้าได้



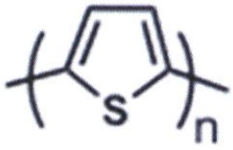
(ก) ฉนวน (ข) สารกึ่งตัวนำ (ค) ตัวนำไฟฟ้า

รูปที่ 2.5 การจำแนกการนำไฟฟ้าของวัสดุ

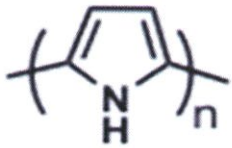
โดยธรรมชาติพอลิเมอร์จะแสดงสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าเพราะมีขนาดของช่องว่างแถบพลังงานที่มีค่าสูงทั้งนี้พอลิเมอร์บางประเภทสามารถแสดงสมบัติเหมือนดั่งสารกึ่งตัวนำได้โดยโครงสร้างทางเคมีที่สำคัญของพอลิเมอร์กลุ่มนี้คืออะตอมของคาร์บอนที่ต่อกันอยู่ด้วยพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยวเรียกว่าโครงสร้างแบบพายคอนจูเกต (π-conjugated polymer) ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ภายในโครงสร้างแบบพายคอนจูเกตของพอลิเมอร์นอกจากนี้ความสามารถในการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ยังขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์วิธีการสังเคราะห์การโดป (doping process) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเมอร์นำไฟฟ้านอกจากกลุ่มที่มีพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยวแล้วยังอาจเป็นกลุ่มที่มีโครงสร้างของวงแหวนอะโรมาติกหรือมีไนโตรเจนหรืออะตอมของกำมะถันอยู่ในวงแหวนก็ได้ดังแสดงในรูป 2.6

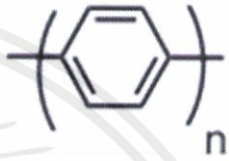


พอลิไทโอฟีน (polythiophene)



พอลิพิโรล (polypyrrole)

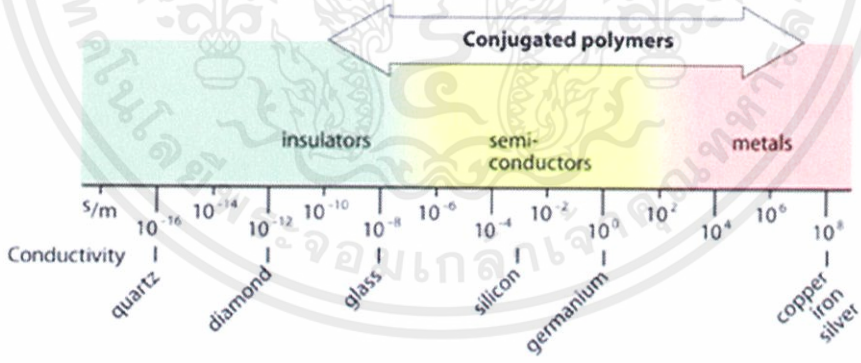
พอลิอะเซทิลีน (polyacetylene)



พอลิพาราฟินิลลีน (polyparaphenylene)

รูปที่ 2.6 สูตรโครงสร้างทั่วไปของ พอลิไทโอฟีน พอลิพิโรล พอลิอะเซทิลีน พอลิพาราฟินิลลีน [4]

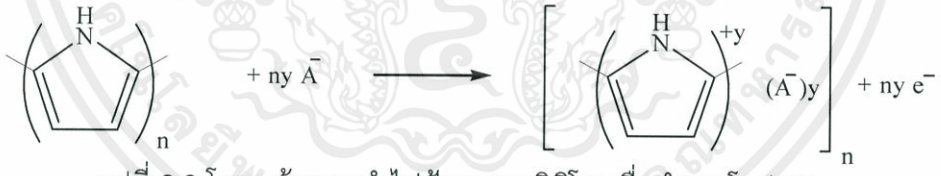
วัสดุที่มีค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 10^{-8}-10^{3} S/cm จัดเป็นวัสดุกึ่งตัวนำไฟฟ้า (semi-conductor) วัสดุที่มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำกว่า 10^{-8} S/cm จัดเป็นวัสดุไม่นำไฟฟ้าหรือฉนวนไฟฟ้า (insulator)โดยมากจะเป็นพวกพอลิเมอร์ ส่วนวัสดุที่มีค่าการนำไฟฟ้ามากกว่า 10^{3} S/cm จัดเป็นวัสดุนำไฟฟ้า (conductor) ซึ่งโดยมากจะเป็นกลุ่มโลหะ[5]



รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิพิโรลเป็นพอลิเมอร์มีค่าการนำไฟฟ้าอยู่ที่ช่วง 10^{-9}-10^{-12} S/cm [6] จึงจัดเป็นฉนวนไฟฟ้าแต่เมื่อมีการปรับปรุงค่าการนำไฟฟ้าโดยการใช้สารโดปมาโดปพอลิโรลทำให้พอลิเมอร์เปลี่ยนสมบัติจากวฉนวนไปเป็นวัสดุกึ่งตัวนำไฟฟ้าได้ พอลิพิโรลนี้นอกจากจะสามารถเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าได้แล้วยังมีสมบัติที่น่าสนใจอีกคือ ทนต่อสารเคมี มีน้ำหนักเบา เสถียรต่อความร้อนและสภาวะแวดล้อม [7] ทำให้เมื่อนำมาสังเคราะห์เป็นพอลิพิโรลฟิล์ม สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น ใช้เป็นตัวตรวจจับสัญญาณ (sensor) อุปกรณ์เปล่งแสงในหน้าจอแสดงภาพ (polymer light emitting diodes) ส่วนหนึ่งของแบตเตอรี่ (battery) เป็นต้น [8] ในการสังเคราะห์ฟิล์มพอลิพิโรลนำไฟฟ้าโดยทั่วไปมี 2 วิธีคือ วิธีทางเคมีไฟฟ้า (electrochemical polymerization method) และวิธีทางเคมี (chemical polymerization method) แต่วิธีเหล่านี้ยังมีข้อด้อยสำหรับสังเคราะห์ฟิล์มพอลิเมอร์นำไฟฟ้า เนื่องจากวิธีทางเคมีจะได้พอลิเมอร์ที่เป็นผงหรือเม็ดแข็ง ส่วนวิธีทางเคมีไฟฟ้าจะให้ฟิล์มที่ค่อนข้างเปราะ ซึ่งไม่เหมาะกับการทำเป็นฟิล์มพอลิเมอร์ จึงหันมาสนใจวิธีพลาสมาพอลิเมอร์ไรเซชัน (plasma polymerization method) ซึ่งสังเคราะห์ได้ฟิล์มที่มีสมบัติดี มีโครงสร้างเป็นเนื้อแน่น (dense) และไม่มีรูพรุน (pinhole free) จึงเหมาะสำหรับสังเคราะห์พอลิพิโรลฟิล์มโดยมีไฟฟ้ากระแสสลับเป็นตัวให้พลังงานที่ความถี่ประมาณ 50 Hz เข้าในระบบสุญญากาศทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นระหว่างขั้วบวกและลบและจะถ่ายทอดพลังงานไปยังโมเลกุลของแก๊สเป็นส่วนใหญ่ เมื่อโมเลกุลของแก๊สที่เป็นกลางได้รับพลังงานมากพอจึงทำให้โมเลกุลของแก๊สแตกตัวเข้าสู่สถานะที่เรียกว่าพลาสมาซึ่งเป็นสถานะที่ 4 ของสสาร ดังนั้นพลาสมาที่เกิดจะประกอบด้วย อิเล็กตรอนไอออนและอะตอมที่เป็นกลาง เมื่อเกิดพลาสมาภายในภาชนะสุญญากาศแล้วพอลิพิโรลจะเริ่มมีการตกสะสม (deposition) ลงบนวัสดุชิ้นฐาน (substrate) เป็นแผ่นฟิล์มบางของพอลิพิโรลและอาจมีการเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าโดยการโดปพอลิพิโรลฟิล์มด้วยไอโอดีนหรือสารโดปอื่นๆเมื่อโดปพอลิพิโรลจะเกิดประจุบวกขึ้น (*p*-doping) ที่ ¶-orbital ของพอลิเมอร์ ดังรูปที่ 3 ทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น

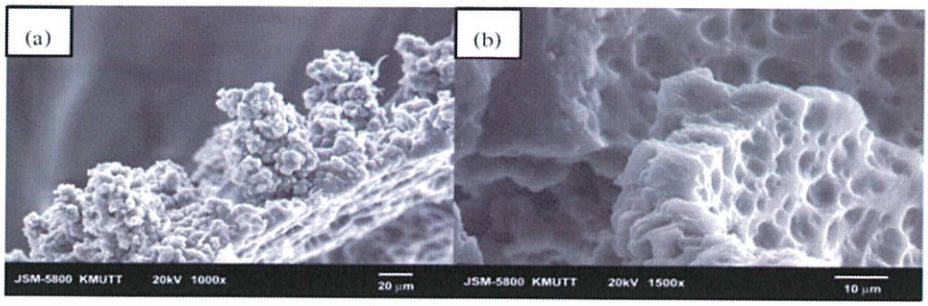


รูปที่ 2.8 โครงสร้างการนำไฟฟ้าของพอลิพิโรลเมื่อทำการโดป [8]

2.2.1 พอลิพิโรล

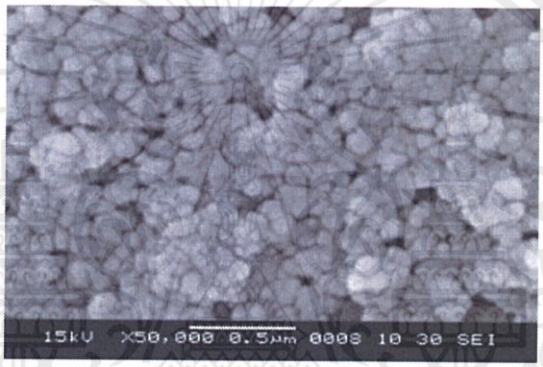
ในงานวิจัยนี้เลือกใช้พอลิพิโรลเป็นโมโนเมอร์ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์เนื่องจากพอลิพิโรลเป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ที่ได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวางสามารถสังเคราะห์ได้หลายวิธีโดยในปี 2007 กรวิชญ์ ดวงสา และคณะ [9] ได้ทำการสังเคราะห์พอลิพิโรลโดยใช้วิธีทางเคมีไฟฟ้าพบว่าพื้นผิวของพอลิพิโรลที่สังเคราะห์ได้เป็นดังรูปที่ 2.9 จะเห็นว่าพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นมีเนื้อไม่แน่นเป็นรูพรุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ลักษณะผิวของฟิล์มพอลิพิโรลที่สังเคราะห์ได้บนผิวอิเล็กโทรดโดยที่ (a) ลักษณะโครงสร้างผิวและ (b) ลักษณะภาพตัดขวางของผิวฟิล์มพอลิพิโรล [9]

ในปี 2011 Sathansatit และคณะ [10] ได้สังเคราะห์พอลิพิโรลโดยใช้วิธีทางเคมีพบว่าพื้นผิวของพอลิพิโรลที่สังเคราะห์ได้เป็นดังรูปที่ 2.10 จะเห็นว่าพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นมีเนื้อไม่แน่น



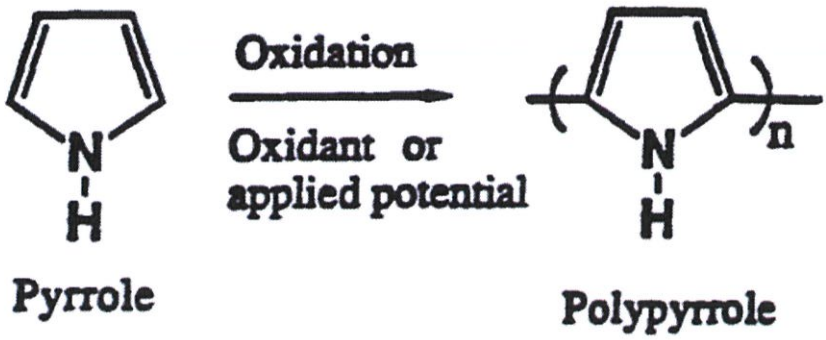
รูปที่ 2.10 ลักษณะผิวของพอลิพิโรลที่สังเคราะห์โดยวิธีทางเคมี [10]

การที่พอลิพิโรลมีโครงสร้างเป็นวงแหวนอะโรมาติกทำให้มีเสถียรภาพทางเคมีและคงสภาพที่อุณหภูมิห้องปัจจุบันพอลิพิโรลถูกนำมาสร้างเป็นตัวรับรู้ต่างๆจำนวนมากอาทิตัวตรวจวัดทางชีวภาพ [11,12] ตัวตรวจวัดแก๊ส [13] เป็นต้น

2.3 การสังเคราะห์พอลิเมอร์

การเกิดพอลิเมอร์หรือพอลิเมอไรเซชันโดยการทำให้โมโนเมอร์เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสามารถทำได้โดยให้ความต่างศักย์หรือใช้ตัวออกซิแดนซ์กับโมโนเมอร์จากนั้นโมโนเมอร์ที่สูญเสียอิเล็กตรอนจะรวมตัวกันเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้เป็นพอลิเมอร์ [14] ดังรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของพอลิพิโรล [14]

2.4 พลาสมาและการสังเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยพลาสมา

2.4.1 พลาสมา

พลาสมาคือสภาวะที่แก๊สเกิดการแตกตัวประกอบด้วยอนุภาคของแก๊สไอออนและอิเล็กตรอน จึงทำให้พลาสมาสามารถนำไฟฟ้าได้

พลาสมาสามารถเกิดได้โดยการให้สนามไฟฟ้าแก่แก๊สเมื่อพลังงานส่งผ่านไปยังอิเล็กตรอนอิสระมากพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระชนกับอะตอมหรือโมเลกุลของแก๊สการชนกันจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากโมเลกุลหรืออะตอมของแก๊สเรียกกระบวนการนี้ว่าการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) โดยจำเป็นต้องให้พลังงานกับอะตอมหรือโมเลกุลของแก๊สในปริมาณที่เท่ากับหรือมากกว่าพลังงานที่น้อยที่สุดที่จะทำให้อิเล็กตรอนตัวนอกหลุดออก (ionization energy)

รูปที่ 2.12 แสดงการเปลี่ยนสถานะจากแก๊สเป็นพลาสมาโดยการเพิ่มพลังงานให้กับแก๊ส [15]

2.4.2 การสังเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยพลาสมา

ในงานวิจัยนี้จะอาศัยหลักการของการเกิดพลาสมาในการสังเคราะห์พอลิเมอร์หรือที่เรียกกันว่ากระบวนการพลาสมาพอลิเมอร์ไรเซชันเนื่องจากเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในสถานะพลาสมาจึงจำเป็นต้องทำให้เกิดไอของโมโนเมอร์ก่อนจากนั้นให้พลังงานกับไอของโมโนเมอร์เพื่อทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนและเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันต่อในสถานะพลาสมาส่วนมากโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการพลาสมาพอลิเมอไรเซชันนี้จะเป็นโครงสร้างที่มีการเชื่อมกันระหว่างสายโซ่หลักของพอลิเมอร์สูง (highly cross-linking structure)และการแตกกิ่งสูง (highly branched structure) [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการพลาสมาพอลิเมอไรเซชันจะใช้กระบวนการพลาสมาทำให้โมโนเมอร์กลายเป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ซึ่งก็คือไอออนหรืออะตอมโมเลกุลไอออนที่มีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว (เวเลนซ์อิเล็กตรอนคู่ใดคู่หนึ่งของละตอมซึ่งไม่เกิดการสร้างพันธะ) [17]

$$M + plasma \rightarrow fragments^*$$

เมื่อ M แทนโมโนเมอร์

การมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวทำให้อนุมูลอิสระมีพลังงานสูงหรือไม่เสถียรจึงทำให้อนุมูลอิสระมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเมื่ออนุมูลอิสระชนเข้ากับโมโนเมอร์จึงทำให้เกิดพันธะร่วมกันแต่เนื่องจากยังคงมีพลังงานสูงเมื่อทำปฏิกิริยากับโมโนเมอร์จึงได้พอลิเมอร์ที่มีพลังงานสูง

$$fragments^* + M \rightarrow fragments\text{-}M^* \ldots\ldots \rightarrow fragments\text{-}M^* + M \rightarrow Pn^*$$

จากนั้นพอลิเมอร์ที่มีพลังงานสูงหรือเป็นอนุมูลอิสระจะมาสร้างพันธะร่วมกันกับสารอนุมูลอิสระตัวอื่นเพื่อเป็นการลดระดับพลังงานลดลงหรือเพื่อทำให้เกิดความเสถียร

$$2Pn^* \rightarrow Pn\text{-}Pn$$

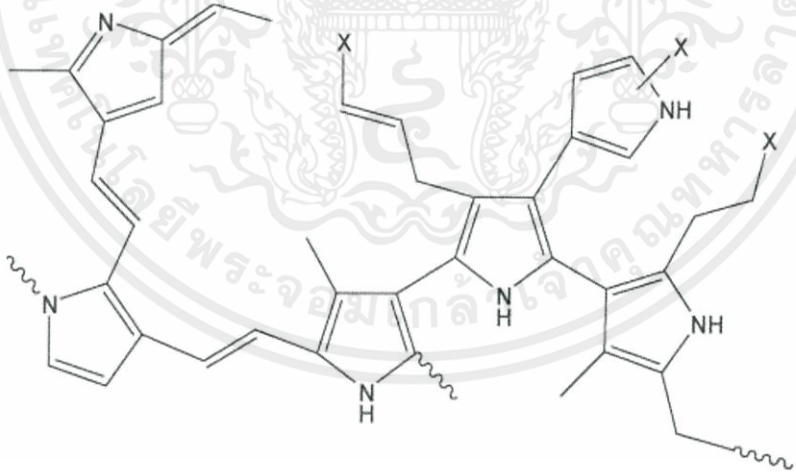
$$P1^* + P2^* \rightarrow P1\text{-}P2$$

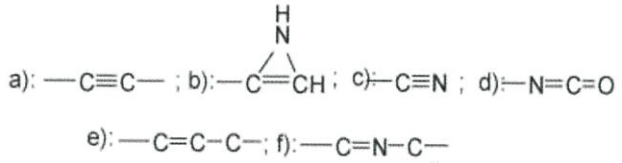
$$Pn^* + R \rightarrow Pn\text{-}R^*$$

$$Pn^* + fragments^* \rightarrow Pn\text{-}fragments$$

เมื่อ Pn แทนพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้น

ในปี 2003 Kumar และคณะได้สังเคราะห์พอลิพิโรลด้วยพลาสมาคลื่นความถี่วิทยุ (RF plasma) ที่ความดัน 0.2 ทอร์และความหนาแน่นกระแส 20 mA/cm^2 จากการวิเคราะห์สเปกตรัมของรังสีอินฟราเรดงานวิจัยได้ระบุถึงโครงสร้างทางเคมีของพอลิพิโรลฟิล์ม [18,19] ดังรูปที่ 2.13





รูปที่ 2.13 โครงสร้างของพอลิพิโรลที่สังเคราะห์โดยพลาสมาพอลิเมอไรเซชัน [20]

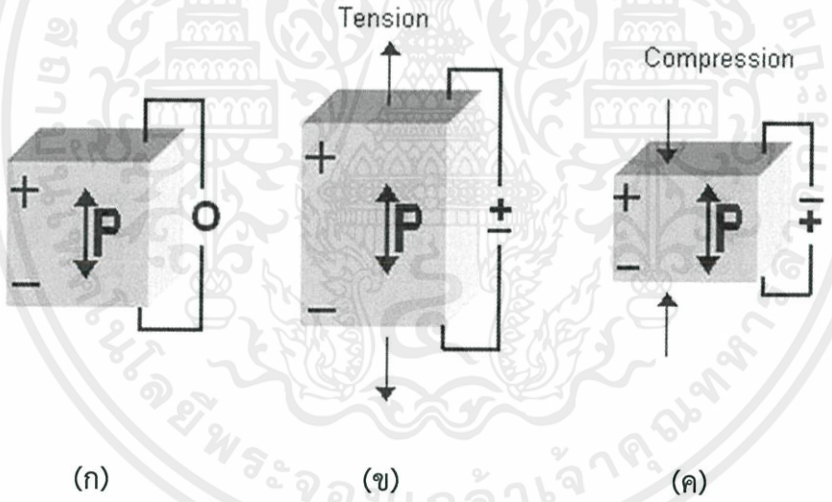
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี 2010 Paosawatyanyong และคณะได้ทำการสังเคราะห์ฟิล์มพอลิพิโรลด้วยเอซี-พลาสมาพอลิเมอไรเซชันและโดปฟิล์มด้วยไอโอดีนเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ในการสังเคราะห์พบว่าการแตกตัวของวงแหวนพิโรลเพิ่มขึ้น (จากอัตราส่วนของ C ต่อ N) รวมถึงความหนาของชั้นฟิล์มเพิ่มขึ้นและค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มพอลิพิโรลลดลงด้วย [21]

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [21] พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ที่เตรียมด้วยวิธีพลาสมาพอลิเมอไรเซชันจะทำให้ได้ฟิล์มที่มีเนื้อแน่นไม่มีรูพรุนและโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ประกอบด้วยการแตกกิ่งมีการเชื่อมกันระหว่างสายโซ่หลักของพอลิเมอร์ทำให้ขัดขวางการเกิดผลึกซึ่งส่งผลต่อการนำไฟฟ้าดังนั้นการจะสังเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยวิธีพลาสมาที่จะทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้ดีนั้นต้องลดการแตกกิ่งหรือเชื่อมกันระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์โดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเข้าช่วย

2.5 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริคของพอลิเมอร์

ในวัสดุผลรวมของประจุบวกและประจุลบสามารถสร้างไดโพลไฟฟ้าขึ้นมาหรือที่เรียกว่าการเกิดโพลาไรเซชันวัสดุเพียโซอิเล็กทริคคือวัสดุที่สามารถเปลี่ยนโพลาไรเซชันทางไฟฟ้าเมื่อได้รับแรงกดซึ่งเป็นแรงทางกลวัสดุจะให้กระแสออกมาหรือในทางกลับกันเมื่อวัสดุได้รับสนามไฟฟ้าเข้าไปก็สามารถทำให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างวัสดุได้เช่นกัน [22]



รูปที่ 2.14 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริค [23]

จากรูปที่ 2.14 (ก) วัสดุที่ภายในประกอบด้วยไดโพล ทำให้เกิดการโพลาไรเซชันตามทิศ P (ข) เมื่อให้ความต่างศักย์ทิศเดียวกันกับทิศของการโพลาไรเซชันจะทำให้วัสดุเกิดการขยายตัว (ค) เมื่อให้ความต่างศักย์ทิศตรงข้ามกับทิศของการโพลาไรเซชันจะทำให้วัสดุเกิดการหดตัว

ก่อนปี ค.ศ. 1940 วัสดุที่พบว่ามีคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริคนั้นมีเฉพาะวัสดุที่เป็นผลึกรูปเดี่ยว ได้แก่แอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (ammonium dihydrogen phosphate) ควอทซ์ (quartz) และทัวร์มาลีน (tourmaline) [24] แต่หลังจากช่วง ค.ศ. 1940 เป็นต้นมาคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริคก็สามารถพบได้ในกลุ่มวัสดุเซรามิก (polycrystalline ceramics) ได้ด้วยตัวอย่างที่เห็นชัดที่สุดของวัสดุกลุ่มนี้คือวัสดุผสมระหว่างเลดไททาเนท (lead titanate) แบเรียมไททาเนท (barium titanate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ เลดเซอร์โคเนท (lead zirconate) คุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริคนี้ยังสามารถพบได้ในวัสดุธรรมชาติเช่นกระดูกเอ็นยึดกระดูกกับกล้ามเนื้อ (tendon) และไม้เช่นเดียวกับพอลิอะมิโนแอซิด (polyaminoacid) ที่ได้จากการสังเคราะห์ตามที่ Fukada และคณะเคยสรุปเอาไว้

โดยทั่วไปแล้วสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริคในวัสดุส่วนใหญ่จะมีค่าน้อยมากจนไม่อาจนำไปใช้นอกระบบของตัววัสดุเองครั้งแรกที่มีการสังเคราะห์เพียโซอิเล็กทริคของพอลิเมอร์ที่พอจะใช้ในเชิงพาณิชย์ได้นั้นเป็นผลงานของ Kawai ในปีค.ศ.1969 ซึ่งรายงานถึงการตอบสนองต่อการเกิดขั้วของโพลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (polyvinylidene fluoride, PVDF)

นอกจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าแล้วคุณสมบัติทางกายภาพของเพียโซอิเล็กทริคในพอลิเมอร์นำไฟฟ้านั้นมีความคล้ายคลึงกับพอลิเมอร์ทั่วไป

2.5.1 Piezoresistive Strain Sensor

การนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริคมาใช้เป็นตัวรับรู้แรงหรือเพียโซรีซิสทีฟ (piezoresistive) [25] อาจกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของวัสดุจะขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงความเครียดโดยมีเกจแฟคเตอร์ (gauge factor, G) เป็นตัวบอกประสิทธิภาพของตัวรับรู้แรงซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\frac{\Delta R}{R_0} = G \cdot \varepsilon$$

โดยที่ $\Delta R=R-R_0$ โดยที่ R คือความต้านทานที่มีความเครียดเท่ากับ ε และ R_0 คือความต้านทานที่ $\varepsilon=0$

มีรายงานเกี่ยวกับพอลิพิโรลที่มีคุณสมบัติเป็นเพียโซอิเล็กทริคซึ่งเกิดจากการสังเคราะห์ฟิล์มโดยวิธีพอลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization) ทั้งจากทางเคมีทางเคมีไฟฟ้าหรือทางแสง

ค.ศ. 2005 Dunne และคณะพัฒนาพอลิพิโรลเคลือบโพลียูริเทนมีการสร้างต้นแบบชุดตรวจจับความเคลื่อนไหวที่มีเครื่องตรวจวัดติดอยู่ตามส่วนต่างๆของร่างกายเพื่อวัดการหายใจการเคลื่อนไหวไหล่คอและแรงกดของสะบัก [26]

ค.ศ. 2007 Pini และคณะสร้างโครงสร้าง PPy/p-toluene sulfonic acid (PPy/pTSA) ในโฟมของ IDE รอบชั้นของเส้นใยเซรามิคกลายเป็น active fiber composites (AFC) ซึ่งสามารถเป็นได้ทั้งตัวตรวจวัดและ actuator [27]

ค.ศ. 2009 Yamada และคณะพัฒนาวิธีการสร้างพอลิเมอร์ตัวนำในรูปแบบโครงสร้างสามมิติโดยในปีเดียวกัน Barnoss และคณะได้สังเคราะห์พอลิพิโรลด้วยวิธีพอลิเมอไรเซชันทางเคมีจากสถานะไอน้ำและทดลองหาความดันของแก๊สเฉื่อยหลายชนิดร่วมกับความหนาของฟิล์มซึ่งได้ผลสรุปว่าการตอบสนองของ piezoresistive ขึ้นอยู่กับ function of pressure และ pressurization ที่ความหนาของฟิล์มน้อยกว่า 70 นาโนเมตรดังนั้นจึงอาจพอสรุปได้ว่าพอลิพิโรลแบบบางเป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับการทำตัววัดความดันมากกว่าแบบหนา [28]

เอกสารนี้ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 Shottky Diode[34]

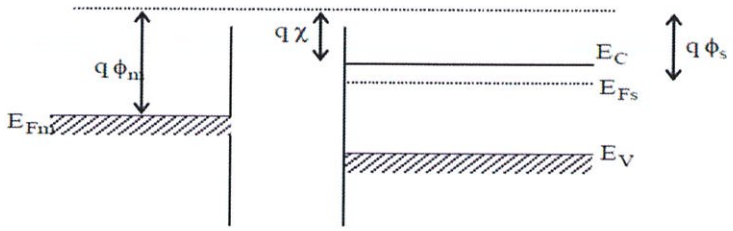
2.6.1 ไดโอดรอยต่อชอตกี

ไดโอดสร้างจากรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำและโลหะเป็นแบบที่วิธีการไม่ซับซ้อนเช่น ไดโอดชอตกีอย่างง่ายแบบแรกได้ถูกสร้างขึ้นประมาณต้นปีคศ. 1900 ใช้วิธีไดโอดชนิดนี้ถูกนำไปใช้ในงานที่มีกระแสต่ำเท่านั้นเช่นวงจรตัดสัญญาณคลื่นวิทยุเอเอ็มให้เป็นสัญญาณเสียง

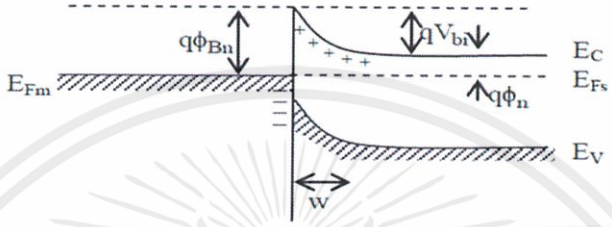
สมบัติทางฟิสิกส์ของรอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำพิจารณาได้จากแผนผังแถบพลังงานเช่นเดียวกับรอยต่อพีเอ็นดังแสดงในรูปที่ 2.15 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีค่าสัมพรรคภาพอิเล็กตรอน (electron affinity) ใช้สัญลักษณ์เป็นมีค่าฟังก์ชันงาน χ เป็น Φ_S ส่วนโลหะมีค่าฟังก์ชันงานเป็น Φ_m ก่อนการสัมผัสระดับพลังงานเฟร์มีของสารกึ่งตัวนำอยู่สูงกว่าระดับพลังงานเฟร์มีของโลหะเมื่อ $\Phi s < \Phi m$ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ก) เมื่อโลหะและสารกึ่งตัวนำเข้ามาสัมผัสกันระดับพลังงานเฟร์มีที่สภาวะสมดุลทางความร้อนของโลหะและสารกึ่งตัวนำจะมีค่าคงที่เท่ากันประจุอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำย่อมจะแพร่ข้ามไปยังระดับพลังงานที่ต่ำกว่าในโลหะที่บริเวณผิวสัมผัสทำให้เกิดประจุปริภูมิ (space charge) ชนิดบวกทางด้านสารกึ่งตัวนำดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ข) เกิดเป็นสนามไฟฟ้าของรอยต่อคล้ายในกรณีรอยต่อพีเอ็นสำหรับศักย์ไฟฟ้าด้านสารกึ่งตัวนำจะสูงขึ้นเมื่อเทียบทางด้านตัวนำยังคงมีศักย์ไฟฟ้าสม่ำเสมอเกิดเป็นกำแพงศักย์ของรอยต่อโดยมีค่าขนาดกำแพงศักย์ (barrier height) เป็น ϕ_{Bn} ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำยังแพร่ข้ามไปยังโลหะจนกระทั่งอยู่ในสภาวะสมดุลอิเล็กตรอนจะไม่สามารถแพร่ข้ามไปยังโลหะได้อีกทำให้กำแพงศักย์มีขนาดคงที่และมีค่าแตกต่างกันสำหรับรอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดสำหรับบริเวณที่เกิดประจุปริภูมิมีความกว้างจากรอยต่อเข้าไปทางด้านสารกึ่งตัวนำเป็น w เรียกว่าชั้นของการพร่อง (depletion layer) ลักษณะรอยต่อที่กล่าวมานี้เรียกว่ารอยต่อชอตกี (Schottky barrier)

ในรอยต่อสารกึ่งตัวนำชนิดพีกับโลหะเมื่อ $\phi m < \phi s$ แสดงในรูปที่ 2.16 ก่อนการสัมผัสจะสังเกตได้ว่าระดับพลังงานเฟร์มีของโลหะอยู่สูงกว่าของสารกึ่งตัวนำและโดยธรรมชาติของสารกึ่งตัวนำชนิดพีซึ่งเป็นการเจือแบบผู้รับดังนั้นหลังการสัมผัสอิเล็กตรอนจากโลหะจะเคลื่อนที่แพร่เข้าไปในสารกึ่งตัวนำ ณ บริเวณรอยต่อที่สภาวะสมดุลทางความร้อนของโลหะและสารกึ่งตัวนำระดับพลังงานเฟร์มีย่อมมีค่าเท่ากันส่วนระดับพลังงานแถบวาเลนซ์และแถบการนำบริเวณรอยต่อจะมีลักษณะตรงกันข้ามกับกรณีในรอยต่อของโลหะสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นสาหรับการกระจายของประจุแสดงในรูปที่ 2.16 (ค)

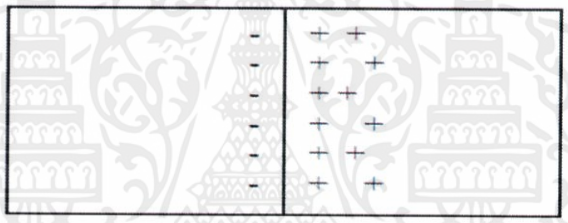
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

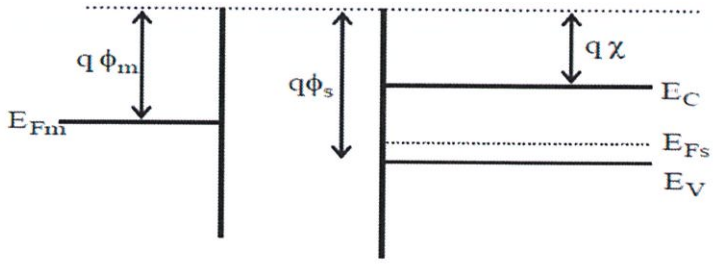


โลหะ สารกึ่งตัวนำ

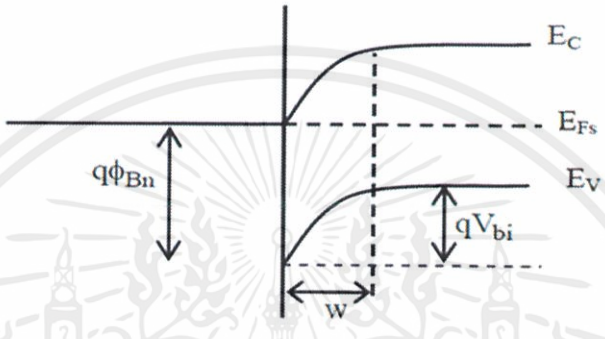
(ค)

รูปที่ 2.15 แผนภาพแถบพลังงานรอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำ (ก) ก่อนการสัมผัส (ข) หลังการสัมผัส (ค) การกระจายประจุบริภูมิบริเวณรอยต่อ

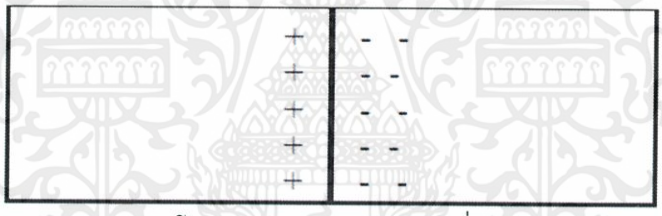
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

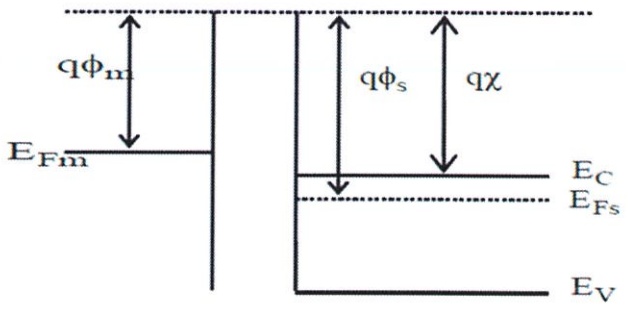


(ค)

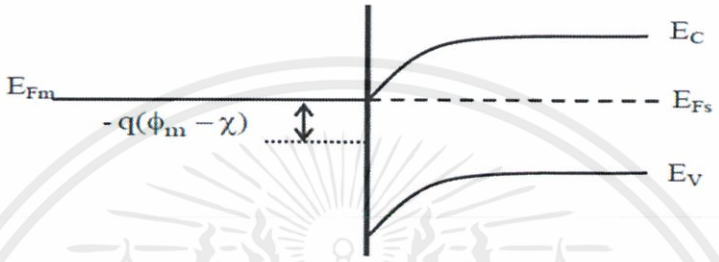
รูปที่ 2.16 แผนภาพแถบพลังงานรอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำชนิดพี (ก) ก่อนการสัมผัส (ข) หลังการสัมผัสและ (ค) การกระจายประจุปริภูมิบริเวณรอยต่อ

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนแพร่เข้าไปในสารกึ่งตัวนำกรณีนี้จะเกิดประจุปริภูมิและชั้นการพร่องตรงข้ามกับกรณีแรกส่วนขนาดกำแพงศักย์ ณ รอยต่อ รอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำที่กล่าวมาทั้งสองกรณีเกิดประจุปริภูมิชั้นการพร่องและกำแพงศักย์เมื่อถูกไบแอสด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้าภายนอกจะมีสมบัติเป็นรอยต่อเรียงกระแสคล้ายกับรอยต่อพีเอ็นซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวถึงต่อไปนอกจากลักษณะรอยต่อที่กล่าวมานี้ยังมีรอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำอีกสองลักษณะที่มีสมบัติเป็นรอยต่อโอห์มมิกได้แก่รอยต่อในกรณีที่ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมากกว่าฟังก์ชันงานโลหะแผนภาพแถบพลังงานก่อนการสัมผัสและหลังการสัมผัสแสดงในรูปที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

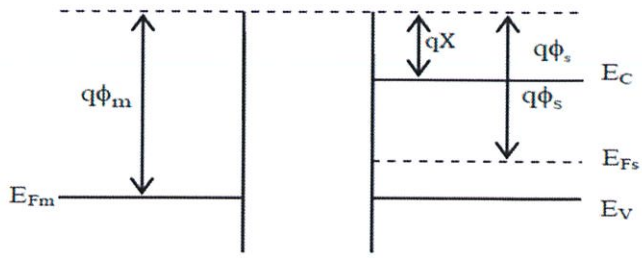


(ข)

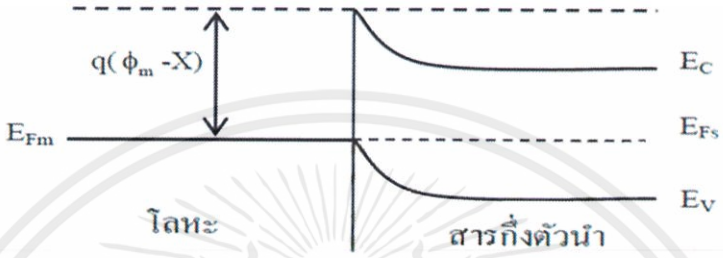
รูปที่ 2.17 แผนภาพแถบพลังงานรอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเมื่อ $\phi_s > \phi_m$
(ก) ก่อนการสัมผัส (ข) หลังการสัมผัส

รอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำเอ็นกรณี $\phi_s > \phi_m$ หลังการสัมผัสอิเล็กตรอนจำนวนหนึ่งจะเคลื่อนที่ไปยังสารกึ่งตัวนำทำให้ระดับเฟร์มีเกิดการปรับระดับจนระดับเท่ากันเกิดกำแพงศักย์ขนาดเล็กโดยที่อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ง่ายทั้งสองด้านเมื่อถูกไบแอสรอยต่อนี้จึงมีสมบัติเป็นรอยต่อโอห์มมิกกรณีของรอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำพีเมื่อฟังก์ชันงานโลหะสูงกว่าฟังก์ชันงานสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดเป็นรอยต่อโอห์มมิกจากการที่อิเล็กตรอนจำนวนเล็กน้อยเคลื่อนที่ไปยังโลหะหลังการสัมผัสทำให้เกิดกำแพงศักย์ที่แคบมากดังนั้นอิเล็กตรอนจึงสามารถเคลื่อนที่ผ่านกำแพงศักย์ด้วยกระบวนการอุโมงค์ได้ทั้งสองด้านโดยง่ายเมื่อถูกไบแอสเพียงเล็กน้อยรอยต่อนี้จึงเป็นรอยต่อโอห์มมิกลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อแสดงในรูปที่ 2.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.18 แผนภาพแถบพลังงานรอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำชนิดพีเมื่อ$\phi_s > \phi_m$
(ก) ก่อนการสัมผัส (ข) หลังการสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีการทดลอง

ในบทนี้ส่วนแรกจะกล่าวถึงการสังเคราะห์ฟิล์มบางพอลิพิโรลโดยวิธี AC Plasma Polymerization ส่วนที่สองจะอธิบายถึงระบบดีซีแมกนิตรอนสปัตเตอริง ส่วนที่สามจะอธิบายถึงการศึกษาพื้นผิว ความหนาฟิล์มบางและในส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึงการศึกษาโครงสร้างทางเคมีของฟิล์มบาง

อุปกรณ์ที่ใช้มีดังต่อไปนี้

Substrate ที่ต้องการ , Polypyrrole , เมทานอล , อะซิโตน , น้ำยาล้างจาน , ถุงมือ , ตู้อบ, ตัวจับเวลา,เครื่อง ultrasonic , ที่ตัดกระจก , น้ำปลอดประจุ

3.1 การสังเคราะห์ฟิล์มบางพอลิพิโรลโดยวิธี AC Plasma Polymerization

3.1.1 การเตรียมแผ่นรองรับ

เลือกแผ่นพลาสติกอะคริลิค (polymethyl methacrylate, PMMA) โปร่งแสงที่มีความหนา 0.11 มิลลิเมตรและกระจกมาเป็นฐานรองรับเนื่องจากมีความยืดหยุ่นและทนต่อการผุกร่อน [29] ทำให้เหมาะแก่การสร้างตัวรับรู้แรงหรือสเตรนเกจ

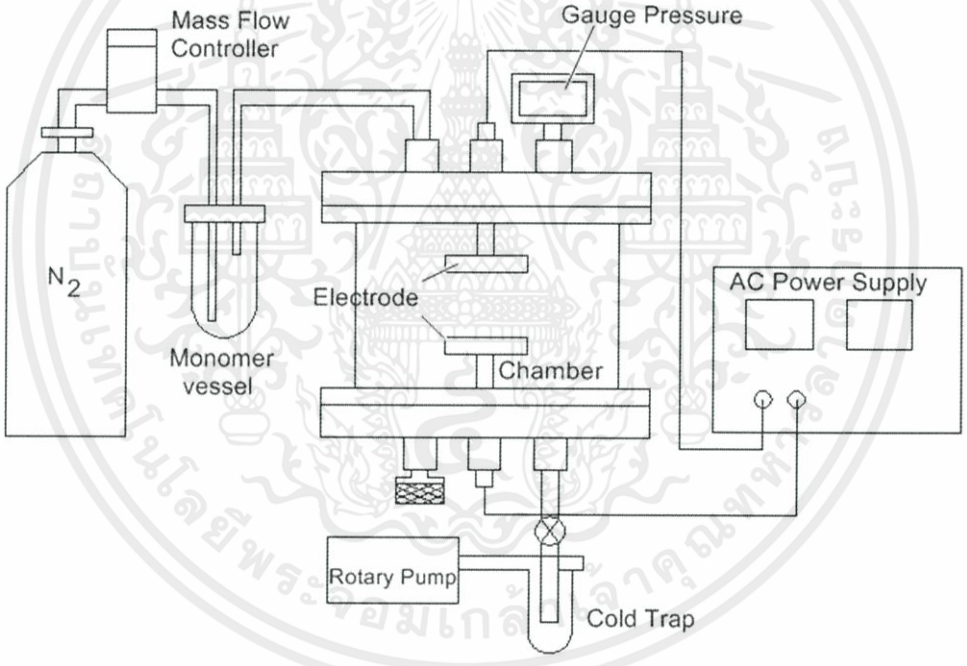
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำแผ่น PMMA ไปตัดให้มีความกว้าง 1.5 ซม. และความยาว 2 ซม. แล้วทำความสะอาดด้วยขั้นตอนต่างๆดังต่อไปนี้

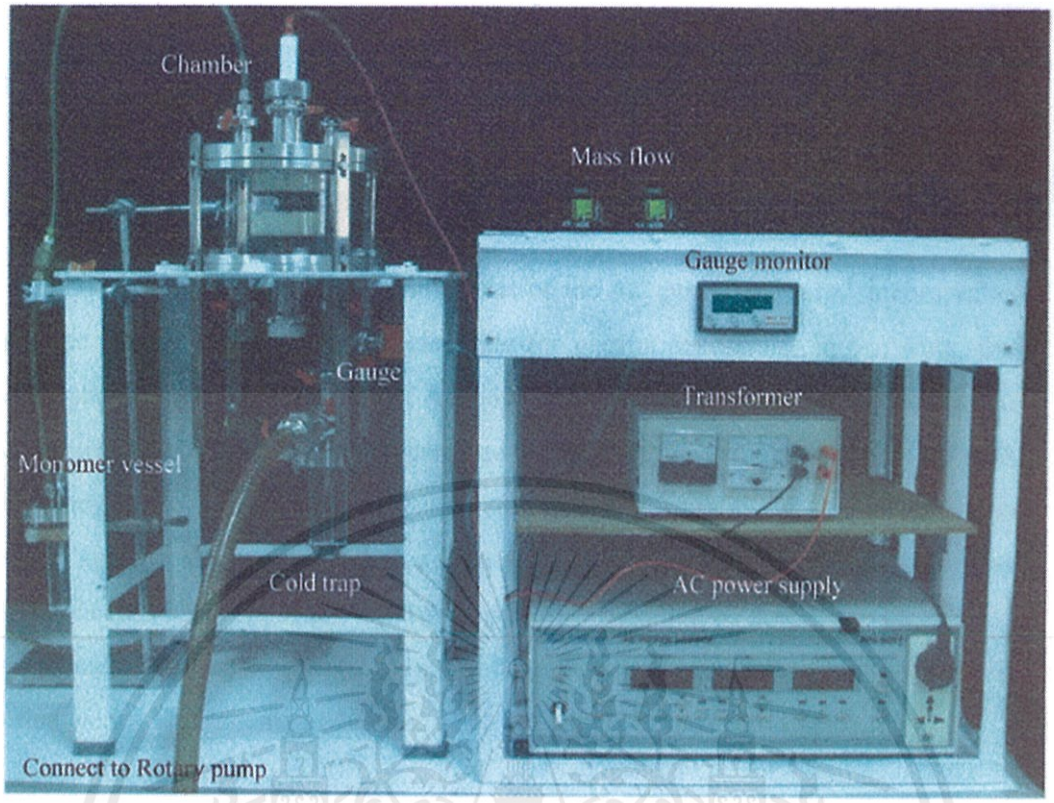
1. ทำความสะอาดแผ่นพลาสติกอะคริลิคและกระจกด้วยน้ำยาล้างจาน
2. ทำความสะอาดด้วยอะซิโตนในเครื่องอุลตร้าโซนิกเป็นเวลา 5 นาที
3. ทำความสะอาดด้วยเมทานอลในเครื่องอุลตร้าโซนิกเป็นเวลา 5 นาที
4. ทำความสะอาดด้วยน้ำปลอดประจุในเครื่องอุลตร้าโซนิกเป็นเวลา 5นาที
5. ใช้แก๊สไนโตรเจนเป่าให้แห้งก่อนนำไปเข้าระบบ AC Plasma Polymerization

3.1.2 สังเคราะห์ฟิล์มบางพอลิพิโรลโดยวิธี AC Plasma Polymerization

การสร้างฟิล์มบางพอลิพิโรลจากพอลิพิโรลด้วยระบบAC Plasma Polymerization ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งจะใช้ไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำให้เกิดพลาสมาระหว่างขั้วอิเล็กโทรดจนเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชั่นเป็นฟิล์มบางพอลิพิโรลโดยปฏิกิริยานี้สามารถเกิดได้จากทุกทิศทางทำให้สามารถสร้างฟิล์มบางได้ทั่วบริเวณที่ต้องการได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

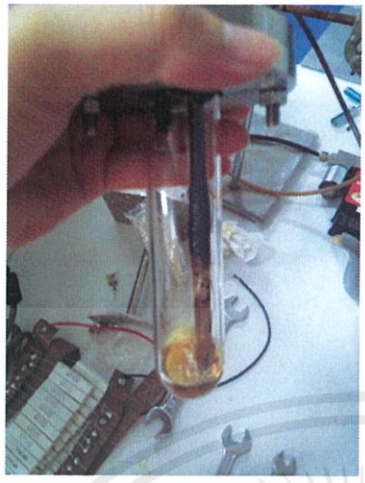
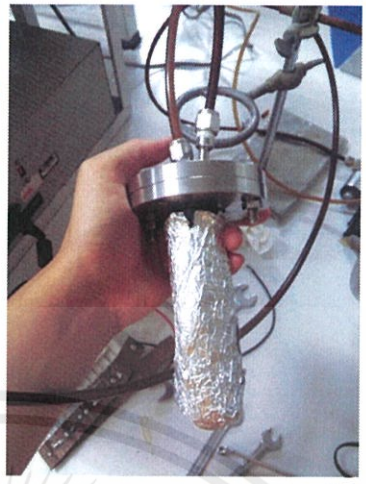


รูปที่ 3.1 แผนภาพระบบ AC Plasma Polymerization [30]

1. นำแผ่น PMMA หรือกระจกสไลด์มาวางระหว่างขั้วอิเล็กโทรด
2. ลดความดันภายในภาชนะสูญญากาศโดยใช้ปั๊มกลโรตารีจนมีความดันน้อยกว่า 0.09 Torr

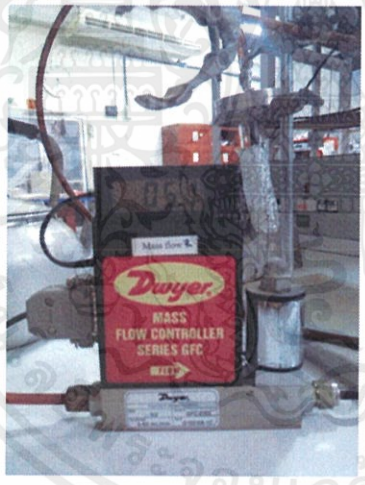
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

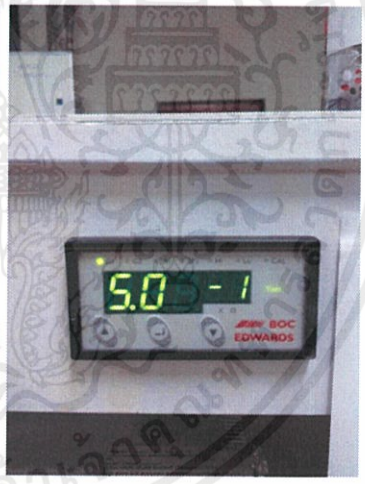
3. ใส่ Polypyrrole ลงไปใน Monomer vessel

4. ให้ความเย็นกับ Cold Trap โดยการใส่น้ำแข็งไว้ด้านนอก

5. ป้อนแก๊สไนโตรเจนผ่านทางเครื่องควบคุมการไหลของแก๊สโดยมวลโดยควบคุมให้อัตราการไหลของแก๊สคงที่อย่างต่อเนื่องมีค่าเท่ากับ 5 มวลแก๊สในหน่วยลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที (sccm) จนมีความดัน 0.5 Torr



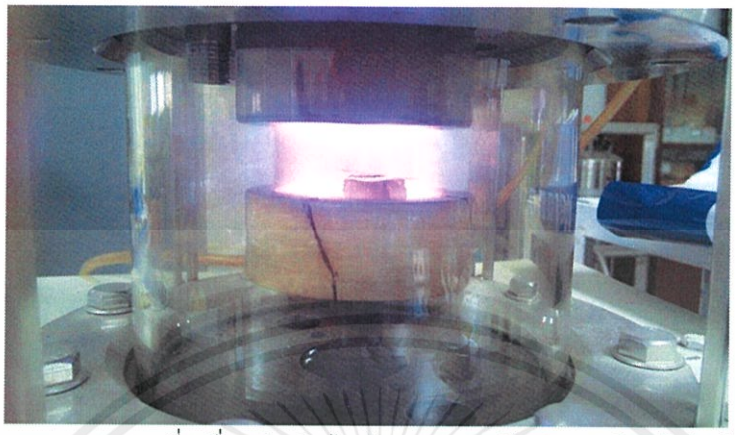


6. จ่ายไฟเอซีความต่างศักย์ตามเงื่อนไขเพื่อทำความสะอาดระบบเป็นเวลา 1 นาที

7. ป้อนแก๊สไนโตรเจนผ่านภาชนะบรรจุโมโนเมอร์เพื่อพาโมโนเมอร์ไปยังภาชนะสูญญากาศโดยผ่านเครื่องควบคุมการไหลโดยอัตราการไหลมีค่าเท่ากับ 5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแป ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. สังเคราะห์ฟิล์มบางพอลิพิโรลที่ความดัน 0.5 Torr จ่ายความต่างศักย์ตามเงื่อนไขเป็นเวลา 30 นาที



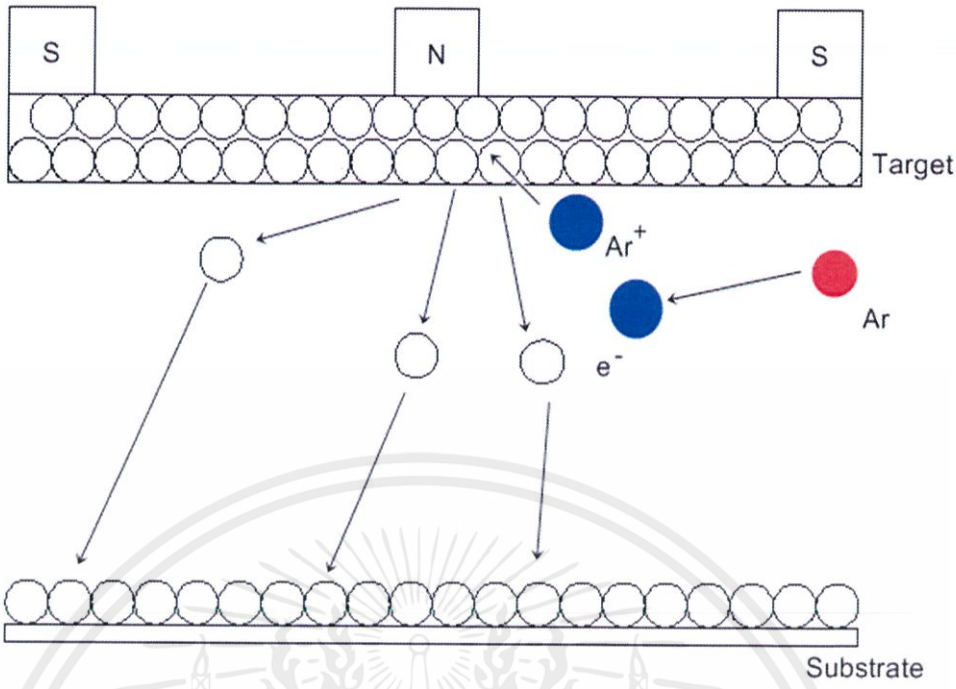
9. ปิด out put ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ปิดวาล์วแก๊สไนโตรเจน ปิด Rotary pump ทำความสะอาดขั้วอิเล็กโทรดและนำไปอบให้แห้ง

3.2 ระบบดีซีแมกนิตรอนสปัตเตอริง

ดีซีสปัตเตอริงเป็นเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางในระบบสูญญากาศประกอบด้วยขั้วแคโทดและขั้วแอโนดวางอยู่ในระบบสูญญากาศแล้วติดตั้งเป้าไว้ที่ด้านหน้าของขั้วแคโทดส่วนแผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่ต้องการเคลือบสารจะถูกวางอยู่ที่ขั้วแอโนดในระบบนี้จะใช้สนามไฟฟ้าเร่งอิเล็กตรอนให้เข้าชนอะตอมของแก๊สที่ใช้ในการสปัตเตอริงให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอนโดยไอออนบวกจะถูกเร่งให้เข้าชนผิวของเป้าที่ขั้วแคโทดทำให้อะตอมที่ผิวของเป้าหลุดออกมาและตกลงสู่แผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่ต้องการพร้อมกับการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาจากนั้นอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้าให้เข้าชนกับอะตอมของแก๊สและเกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกมากขึ้นก่อนที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วแอโนด

ในระบบดีซีแมกนิตรอนสปัตเตอริงจะมีการใช้สนามแม่เหล็กในการเพิ่มระยะทางในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและกักเก็บอิเล็กตรอนไว้บริเวณผิวเป้าดังรูปที่ 3.2 ทำให้อัตราการแตกตัวเป็นไอออนสูงขึ้นส่งผลให้การสปัตเตอริงมีค่าสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

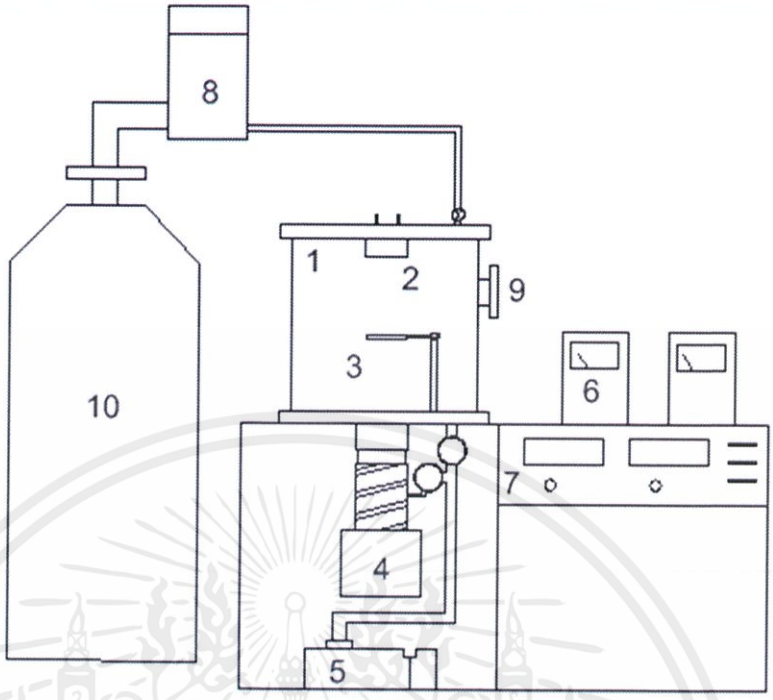


รูปที่ 3.2 ระบบดีซีแมกนิตรอนสปัตเตอริง [31]

สร้างขั้วทองแดงบนแผ่นพลาสติกที่เตรียมไว้ด้วยเครื่องดีซีแมกนิตรอนสปัตเตอริง [32] แสดงดังรูปที่ 3.3 ประกอบด้วย

1. ภาชนะสูญญากาศ (vacuum chamber)
2. หัวแมกนิตรอน
3. แท่นวางแผ่นรองรับ
4. ปั๊มไอฟุ้งกระจาย (diffusion pump)
5. ปั๊มกลโรตารี (rotary pump)
6. เครื่องอ่านความดัน
7. แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง
8. เครื่องควบคุมการไหลของแก๊สโดยมวล
9. ช่องสังเกตการสปัตเตอริง (window)
10. แก๊สอาร์กอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แผนภาพระบบดีซีแมกนิตรอนสปัตเตอริง [32]

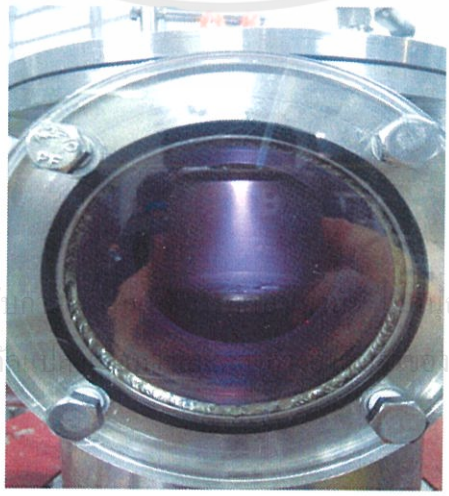
3.2.1 ขั้นตอนการสปัตเตอริง

1. นำแผ่น PMMA หรือกระจกมาติดด้วยเทปอะลูมิเนียมขนาดความกว้าง 1 มม. และความยาวขนาด 1.5 ซม. บนแท่นวางแผ่นรองรับ

2. ลดความดันภายในภาชนะสูญญากาศโดยใช้ Rotary pump และ Diffusion pump ตามลำดับจนมีความดันน้อยกว่าน้อยกว่า 5×10^{-5} Torr

3. ป้อนแก๊สอาร์กอนผ่านทางเครื่องควบคุมการไหลของแก๊สโดยมวลโดยควบคุมให้อัตราการไหลของแก๊สคงที่อย่างต่อเนื่องมีค่าเท่ากับ 5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที (sccm) และเปิดวาล์วเพื่อปล่อยแก๊สอาร์กอนเข้าไปในภาชนะสูญญากาศจนความดันภายในภาชนะสูญญากาศมีค่าน้อยกว่าน้อยกว่า 5×10^{-3} Torr

4. จ่ายความต่างศักย์กระแสตรงให้กับระบบ 450 โวลต์และสังเกตการเกิดพลาสมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ ญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดั เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ปรับเงื่อนไขให้เป็นไปตามต้องการ Pre Sputter เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นจึงเปิดชัตเตอร์เป็นเวลา 30 นาที

6. ปิด Diffusion pump รอ 30 นาทีเพื่อให้น้ำมันเย็นก่อนปิด Rotary

3.3 การเตรียมแผ่นรองรับเพื่อวัดคุณสมบัติ

3.3.1 การเตรียมแผ่นรองรับเพื่อวัดคุณสมบัติเชิงกลและศึกษาโครงสร้างพื้นผิว

1. นำแผ่นฟิล์มที่ได้จากตอนที่ 3.1.1 มาห่อด้วยฟลอย

2. สังเคราะห์ฟิล์มบางพอลิพิโรลโดยวิธี AC Plasma Polymerization ตามหัวข้อที่ 3.1.2 บนแผ่น PMMA

2.1 เปลี่ยนความต่างศักย์ที่ 800,900,1000,1100,1200 โดยคงที่ค่าอัตราการไหลของแก๊ส 5 sccm เป็นเวลา 30 นาที ที่ความดัน 0.5 Torr

2.2 เปลี่ยนความดันที่ 0.1,0.3,0.7,0.9 โดยคงที่อัตราการไหลของแก๊ส 5 sccm เป็นเวลา 30 นาที ที่ความต่างศักย์ 800 V

2.3 เปลี่ยนเวลาที่ 45,60 นาที โดยคงที่อัตราการไหลของแก๊ส 5 sccm ที่ความต่างศักย์ 800 V และความดัน 0.5 Torr

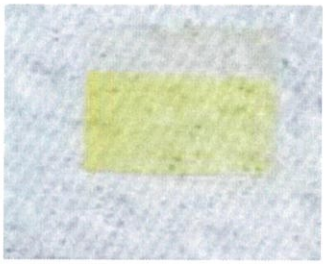
3. นำไปวัดค่าคุณสมบัติเชิงกลและนำฟิล์มมาตัดขนาด 1cm. x 1cm. แล้วนำไปวัดโครงสร้างพื้นผิว

ตารางที่ 3.3.1.1 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่น PMMA ที่ความต่างศักย์ 800 V

ความดันพื้นฐาน	น้อยกว่า 0.09 Torr
ความดันที่การเกิดดิสชาร์จ	0.5 Torr
อัตราการไหลของ N_2	5 sccm
ความต่างศักย์	800 V
เวลา	30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3.1.2 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่น PMMA ที่ความต่างศักย์ 900 V

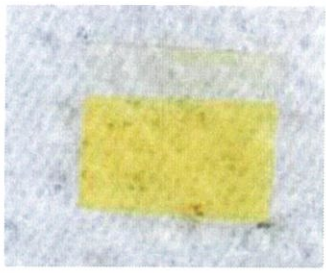
	
ความดันพื้นฐาน	น้อยกว่า 0.09 Torr
ความดันที่การเกิดดิสชาร์จ	0.5 Torr
อัตราการไหลของ N_2	5 sccm
ความต่างศักย์	900 V
เวลา	30 นาที

ตารางที่ 3.3.1.3 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่น PMMA ที่ความต่างศักย์ 1000 V

ความดันพื้นฐาน	น้อยกว่า 0.09 Torr
ความดันที่การเกิดดิสชาร์จ	0.5 Torr
อัตราการไหลของ N_2	5 sccm
ความต่างศักย์	1000 V
เวลา	30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3.1.4 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่น PMMA ที่ความต่างศักย์ 1100 V

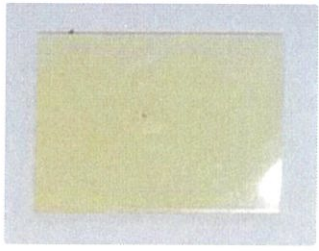
	
ความดันพื้นฐาน	น้อยกว่า 0.09 Torr
ความดันที่การเกิดดิสชาร์จ	0.5 Torr
อัตราการไหลของ N_2	5 sccm
ความต่างศักย์	1100 V
เวลา	30 นาที

ตารางที่ 3.3.1.5 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่น PMMA ที่ความต่างศักย์ 1200 V

ความดันพื้นฐาน	น้อยกว่า 0.09 Torr
ความดันที่การเกิดดิสชาร์จ	0.5 Torr
อัตราการไหลของ N_2	5 sccm
ความต่างศักย์	1200 V
เวลา	30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3.1.6 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่น PMMA ที่ความดัน 0.1 Torr

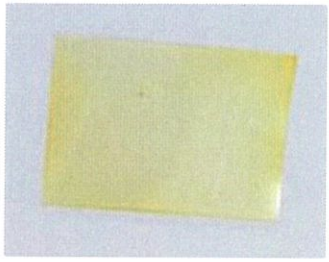
	
ความดันพื้นฐาน	น้อยกว่า 0.09 Torr
ความดันที่การเกิดดิสชาร์จ	0.1 Torr
อัตราการไหลของ N_2	5 sccm
ความต่างศักย์	800 V
เวลา	30 นาที

ตารางที่ 3.3.1.7 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่น PMMA ที่ความดัน 0.3 Torr

ความดันพื้นฐาน	น้อยกว่า 0.09 Torr
ความดันที่การเกิดดิสชาร์จ	0.3 Torr
อัตราการไหลของ N_2	5 sccm
ความต่างศักย์	800 V
เวลา	30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3.1.8 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่น PMMA ที่ความดัน 0.7 Torr



ความดันพื้นฐาน	น้อยกว่า 0.09 Torr
ความดันที่การเกิดดิสชาร์จ	0.7 Torr
อัตราการไหลของ N_2	5 sccm
ความต่างศักย์	800 V
เวลา	30 นาที

ตารางที่ 3.3.1.9 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่น PMMA ที่ความดัน 0.9 Torr

ความดันพื้นฐาน	น้อยกว่า 0.09 Torr
ความดันที่การเกิดดิสชาร์จ	0.9 Torr
อัตราการไหลของ N_2	5 sccm
ความต่างศักย์	800 V
เวลา	30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3.1.10 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่น PMMA ที่เวลา 45 นาที

ความดันพื้นฐาน	น้อยกว่า 0.09 Torr
ความดันที่การเกิดดิสชาร์จ	0.5 Torr
อัตราการไหลของ N_2	5 sccm
ความต่างศักย์	800 V
เวลา	45 นาที

ตารางที่ 3.3.1.11 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่น PMMA ที่เวลา 60 นาที

ความดันพื้นฐาน	น้อยกว่า 0.09 Torr
ความดันที่การเกิดดิสชาร์จ	0.5 Torr
อัตราการไหลของ N_2	5 sccm
ความต่างศักย์	800 V
เวลา	60 นาที

3.3.2 การเตรียมแผ่นรองรับเพื่อวัดค่าการนำไฟฟ้า

การวัดค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มพอลิไพร์โรลจำเป็นต้องสร้างขั้วไฟฟ้าให้กับฟิล์มในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องดีซีแมกนิตรอนสปัตเตอริงในการสร้างขั้วทองแดง

1. นำแผ่นกระจกที่ได้จากตอนที่ 3.1.1 มาห่อด้วยฟลอย

2. สร้างขั้วไฟฟ้าให้กับกระจกโดยใช้เครื่อง ดีซีแมกนิตรอนสปัตเตอริง ตามหัวข้อที่ 3.2.1 โดยมีเงื่อนไข V = 450 V, P = $1x10^{-3}$ Torr, อัตราการไหลของแก๊ส 10 sccm และ t = 15 min

3. สังเคราะห์ฟิล์มบางพอลิพิโรลโดยวิธี AC Plasma Polymerization ตามหัวข้อที่ 3.1.2 บนแผ่นกระจก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 เปลี่ยนความต่างศักย์ที่ 800,1000,1200 โดยคงที่ค่าอัตราการไหลของแก๊ส 5 sccm เป็นเวลา 30 นาที ที่ความดัน 0.4 Torr

3.2 เปลี่ยนความต่างศักย์ที่ 800,1000,1200 โดยคงที่ค่าอัตราการไหลของแก๊ส 5 sccm เป็นเวลา 30 นาที ที่ความดัน 0.5 Torr

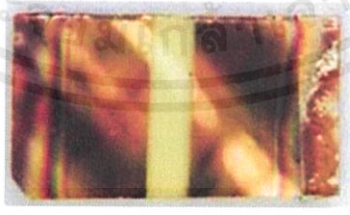
3.3 เปลี่ยนความต่างศักย์ที่ 800,1000,1200 โดยคงที่ค่าอัตราการไหลของแก๊ส 5 sccm เป็นเวลา 30 นาที ที่ความดัน 0.6 Torr

4. นำไปวัดค่าการนำไฟฟ้าด้วยเทคนิค 2 point probe

ตารางที่ 3.3.2.1 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่นกระจกที่ความต่างศักย์ 800 V และความดัน 0.5 Torr

ความดันพื้นฐาน	น้อยกว่า 0.09 Torr
ความดันที่การเกิดดิสชาร์จ	0.5 Torr
อัตราการไหลของ N_2	5 sccm
ความต่างศักย์	800 V
เวลา	30 นาที

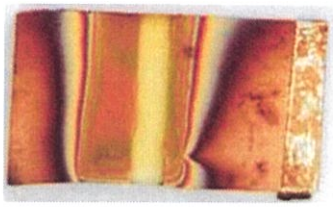
ตารางที่ 3.3.2.2 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่นกระจกที่ความต่างศักย์ 1000 V และความดัน 0.5 Torr



ความดันพื้นฐาน	น้อยกว่า 0.09 Torr
ความดันที่การเกิดดิสชาร์จ	0.5 Torr
อัตราการไหลของ N_2	5 sccm
ความต่างศักย์	1000 V
เวลา	30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3.2.3 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่นกระจกที่ความต่างศักย์ 1200 V และความดัน 0.5 Torr



ความดันพื้นฐาน	น้อยกว่า 0.09 Torr
ความดันที่การเกิดดิสชาร์จ	0.5 Torr
อัตราการไหลของ N_2	5 sccm
ความต่างศักย์	1200 V
เวลา	30 นาที

3.3.3 การเตรียมแผ่นรองรับเพื่อสร้างเป็น Schottky Diode

1. นำแผ่นกระจกที่ได้จากตอนที่ 3.1.1 มาห่อด้วยฟลอย

2. สร้างขั้วไฟฟ้าให้กับกระจกโดยใช้เครื่อง ดีซีแมกนิตรอนสปัตเตอริง ตามหัวข้อที่ 3.2.1 โดยมีเงื่อนไข V = 450 V, P = $1x10^{-3}$ Torr, อัตราการไหลของแก๊ส 10 sccm และ t = 15 min

3. สังเคราะห์ฟิล์มบางพอลิพิโรลโดยวิธี AC Plasma Polymerization ตามหัวข้อที่ 3.1.2โดยมีเงื่อนไขดังนี้

3.1 เปลี่ยนความต่างศักย์ที่ 800,1000,1200 โดยคงที่ค่าอัตราการไหลของแก๊ส 5 sccm เป็นเวลา 30 นาที ที่ความดัน 0.4 Torr

3.2 เปลี่ยนความต่างศักย์ที่ 800,1000,1200 โดยคงที่ค่าอัตราการไหลของแก๊ส 5 sccm เป็นเวลา 30 นาที ที่ความดัน 0.5 Torr

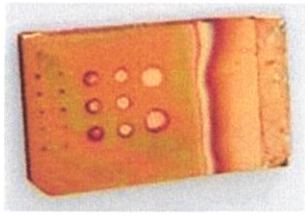
3.3 เปลี่ยนความต่างศักย์ที่ 800,1000,1200 โดยคงที่ค่าอัตราการไหลของแก๊ส 5 sccm เป็นเวลา 30 นาที ที่ความดัน 0.6 Torr

4. สร้างขั้วไฟฟ้าให้กับกระจกรอบที่ 2 โดยใช้เครื่อง ดีซีแมกนิตรอนสปัตเตอริง ตามหัวข้อที่ 3.2.1 โดยมีเงื่อนไข V = 450 V, P = $1x10^{-3}$ Torr, อัตราการไหลของแก๊ส 10 sccm และ t = 15 min

5. นำไปวัดค่าทดสอบคุณสมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3.3.1 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่นกระจกที่ความต่างศักย์ 800 V และความดัน 0.4 Torr

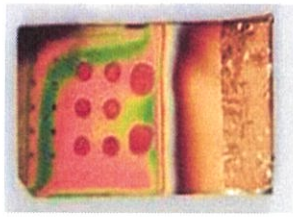
	
ความดันพื้นฐาน	น้อยกว่า 0.09 Torr
ความดันที่การเกิดดิสชาร์จ	0.4 Torr
อัตราการไหลของ N_2	5 sccm
ความต่างศักย์	800 V
เวลา	30 นาที

ตารางที่ 3.3.3.2 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่นกระจกที่ความต่างศักย์ 1000 V และความดัน 0.4 Torr

ความดันพื้นฐาน	น้อยกว่า 0.09 Torr
ความดันที่การเกิดดิสชาร์จ	0.4 Torr
อัตราการไหลของ N_2	5 sccm
ความต่างศักย์	1000 V
เวลา	30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3.3.3 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่นกระจกที่ความต่างศักย์ 1200 V และความดัน 0.4 Torr



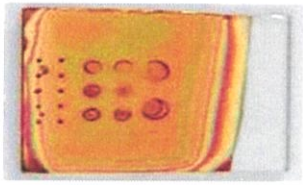
ความดันพื้นฐาน	น้อยกว่า 0.09 Torr
ความดันที่การเกิดดิสชาร์จ	0.4 Torr
อัตราการไหลของ N_2	5 sccm
ความต่างศักย์	1200 V
เวลา	30 นาที

ตารางที่ 3.3.3.4 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่นกระจกที่ความต่างศักย์ 800 V และความดัน 0.5 Torr

ความดันพื้นฐาน	น้อยกว่า 0.09 Torr
ความดันที่การเกิดดิสชาร์จ	0.5 Torr
อัตราการไหลของ N_2	5 sccm
ความต่างศักย์	800 V
เวลา	30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3.3.5 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่นกระจกที่ความต่างศักย์ 1000 V และความดัน 0.5 Torr



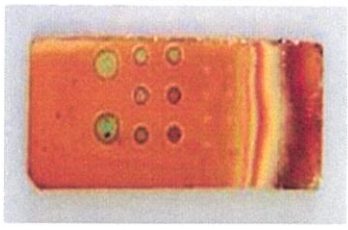
ความดันพื้นฐาน	น้อยกว่า 0.09 Torr
ความดันที่การเกิดดิสชาร์จ	0.5 Torr
อัตราการไหลของ N_2	5 sccm
ความต่างศักย์	1000 V
เวลา	30 นาที

ตารางที่ 3.3.3.6 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่นกระจกที่ความต่างศักย์ 1200 V และความดัน 0.5 Torr

ความดันพื้นฐาน	น้อยกว่า 0.09 Torr
ความดันที่การเกิดดิสชาร์จ	0.5 Torr
อัตราการไหลของ N_2	5 sccm
ความต่างศักย์	1200 V
เวลา	30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3.3.7 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่นกระจกที่ความต่างศักย์ 800 V และความดัน 0.6 Torr



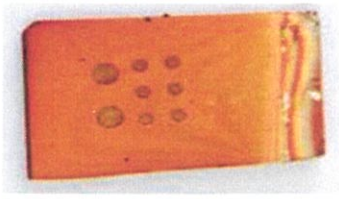
ความดันพื้นฐาน	น้อยกว่า 0.09 Torr
ความดันที่การเกิดดิสชาร์จ	0.6 Torr
อัตราการไหลของ N_2	5 sccm
ความต่างศักย์	800 V
เวลา	30 นาที

ตารางที่ 3.3.3.8 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่นกระจกที่ความต่างศักย์ 1000 V และความดัน 0.6 Torr

ความดันพื้นฐาน	น้อยกว่า 0.09 Torr
ความดันที่การเกิดดิสชาร์จ	0.6 Torr
อัตราการไหลของ N_2	5 sccm
ความต่างศักย์	1000 V
เวลา	30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3.3.9 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy บนแผ่นกระจกที่ความต่างศักย์ 1200 V และความดัน 0.6 Torr



ความดันพื้นฐาน	น้อยกว่า 0.09 Torr
ความดันที่การเกิดดิสชาร์จ	0.6 Torr
อัตราการไหลของ N_2	5 sccm
ความต่างศักย์	1200 V
เวลา	30 นาที

3.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล

การทดสอบแรงดึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวัดคุณสมบัติความต้านทานของวัสดุต่อแรงดึงรวมถึงอธิบายสมบัติเชิงกลของวัสดุโดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ยี่ห้อ Hounsfield รุ่น H 10 KM โดยจับยึดชิ้นงานที่ปลายทั้งสองด้านด้วยระยะคงที่แล้วทำการดึงยืดชิ้นงานด้วยอัตราการดึงคงที่

รูปที่ 3.4 แสดงเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ยี่ห้อ Hounsfield รุ่น H 10 KM

เอกสารนี้เป็นเอกสาร โยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ารนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 สมบัติเชิงกล

4.1.1 สมบัติเชิงกลในพอลิเมอร์

สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์จะบอกด้วยพารามิเตอร์หลายตัวที่เหมือนในโลหะ [1] เช่น มอดูลัสสภาพยืดหยุ่น (elastic modulus, E) ความทนต่อแรงดึง (tensile strengths) เป็นต้น

ความเค้น (stress, σ) คือ แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่พยายามต้านทานแรงภายนอกที่มากระทำ เพื่อไม่ให้วัสดุเปลี่ยนขนาดและรูปร่าง โดยแรงต้านทานนี้จะกระจายอย่างสม่ำเสมอบนพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ

$$\text{ความเค้น} = \frac{\text{แรงภายนอกที่มากระทำ}}{\text{พื้นที่หน้าตัด}} = \frac{F}{A}$$

โดยที่ ความเค้น มีหน่วยเป็น ปอนด์/นิ้ว (psi), นิวตัน/เมตร^2 (N/m^2) หรือปาสคาล (Pa; 1 Pa = 1 N/m^2)

ความเครียด (strain, ε) คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ

$$\text{ความเครียด} = \frac{\text{ความยาวที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ}}{\text{ความยาวเดิม}} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

การเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุสามารถแบ่งได้เป็น

1. การเปลี่ยนรูปหรือความเครียดแบบอิลาสติก (elastic deformation or elastic Strain)

เป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะที่เมื่อหยุดให้แรงกระทำ วัสดุจะคืนรูปเดิมเหมือนกับตอนก่อนที่จะให้แรงกระทำ ความเครียดอีลาสติกจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเค้นที่ให้ เรียกว่า มอดูลัสสภาพยืดหยุ่น หรือ มอดูลัสของยัง (Young's modulus) ซึ่งเป็นค่าที่บอกระดับความแข็งตึง (stiffness) ของวัสดุ

$$\text{มอดูลัสของยัง} = \frac{\text{ความเค้นตามยาว}}{\text{ความเครียดอิลาสติก}}$$

$$E = \frac{F/A}{\Delta L/L_0} \qquad (1)$$

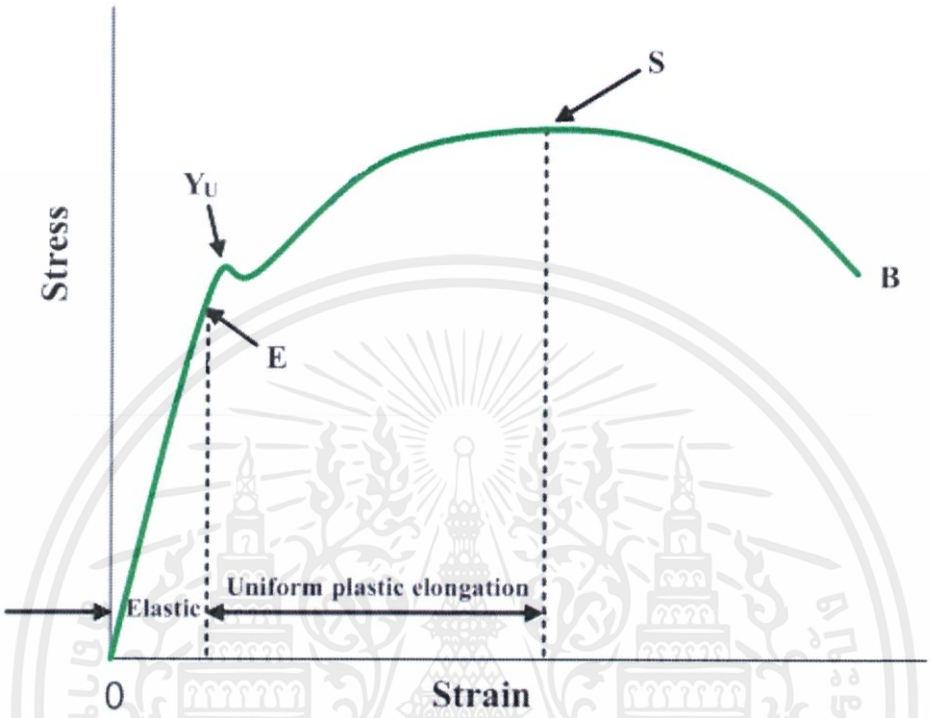
2. การเปลี่ยนรูปหรือความเครียดแบบพลาสติก (plastic deformation or plastic strain)

เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปที่ถึงหยุดให้แรง วัสดุก็จะยังคงรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงไปความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบโดยการดึง ทำให้เกิดความเค้นและความเครียดในวัสดุ ความสัมพันธ์เป็นดังรูปที่ 4.1 ในช่วง 0 ถึง E ความเครียดของวัสดุจะเพิ่มขึ้นเมื่อให้ความเค้นเพิ่ม เป็นไปตามกฎของฮุค (Hooke's Law) คือ ความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดแบบอิลาสติก และวัสดุยังมีความ

ยืดหยุ่นจนถึงจุด E ซึ่งเรียกว่า ขีดจำกัดการแปรผันตรง (proportional limit) ซึ่งเมื่อเลยจุด E ไป ความเครียดจะไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเค้น และเรียกจุด E ว่า ขีดจำกัดสภาพยืดหยุ่น (elastic limit)

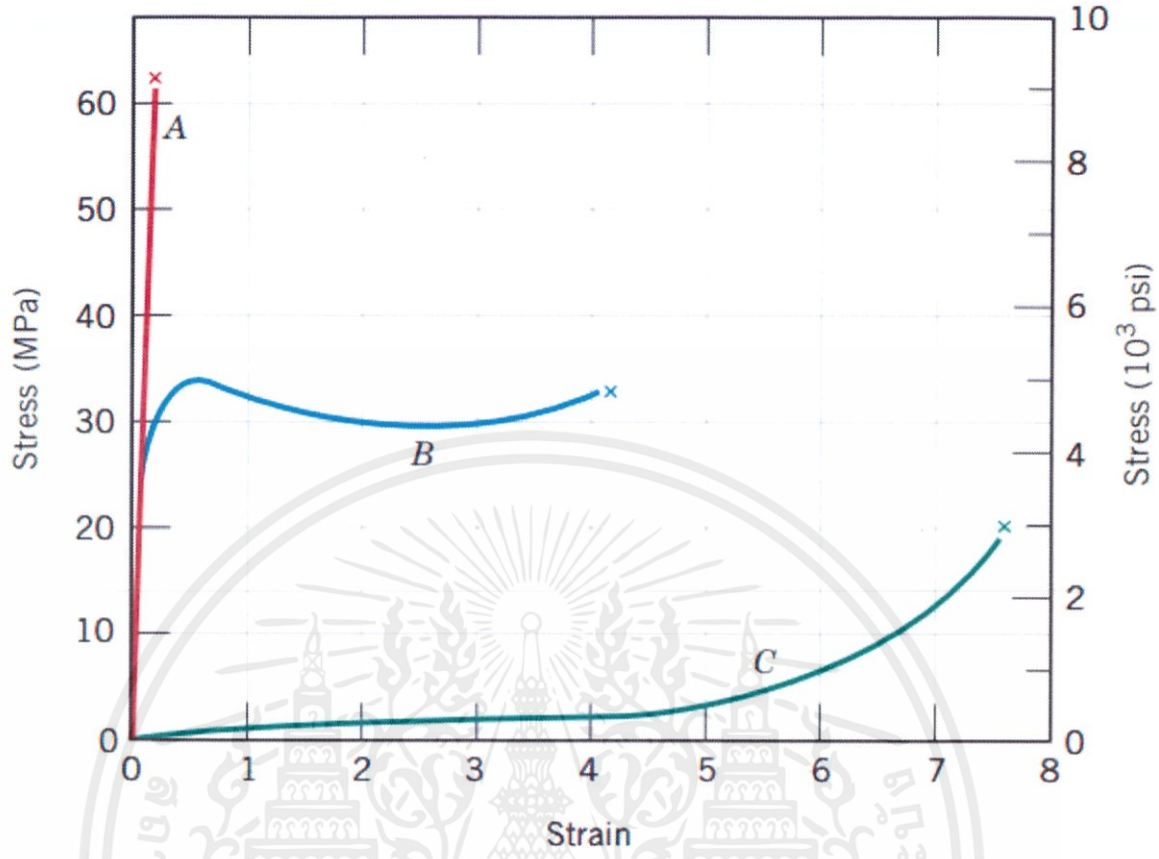


รูปที่ 4.1 แสดงช่วงของการเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติก และแบบพลาสติก [35]

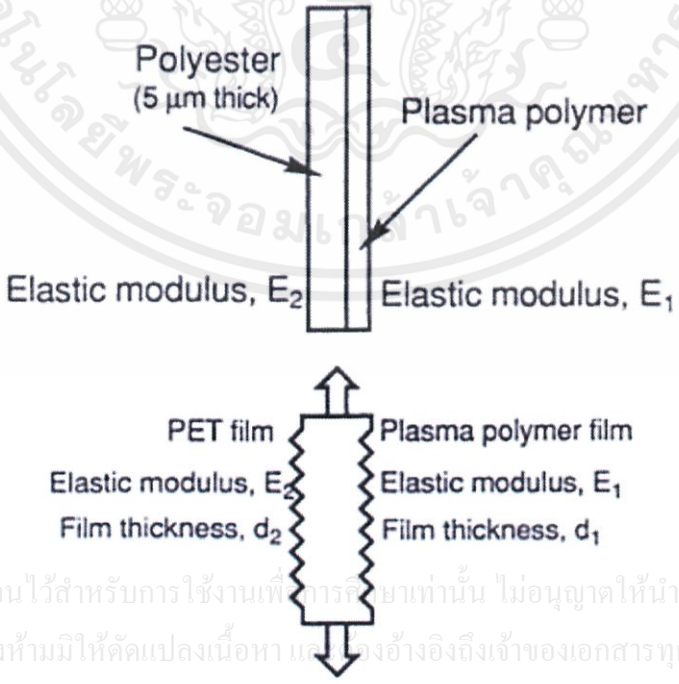
จุด YU เรียกว่า จุดคราก (yield strength) เป็นจุดที่แบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูป (การเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติก) กับพฤติกรรมการคงรูป (การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก) ซึ่งเมื่อให้ความเค้นเพิ่มขึ้น ความเครียดก็จะเพิ่มขึ้นจนเกิดการแตกหักที่จุด B นอกจากนี้บางกราฟอาจแสดงจุด S (maximum stress หรือ ultimate stress) ซึ่งอยู่สูงกว่าจุด B เนื่องจากเมื่อวัสดุยืดตัวออกจะทำให้พื้นที่หน้าตัดเล็กลง จึงใช้ความเค้นน้อยลงในการทำให้วัสดุแตกหัก

วัสดุพอลิเมอร์สามารถแบ่งได้ 3 ประเภท ตามลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด [29] ดังรูปที่ 4.2 กราฟ A แสดงลักษณะของพอลิเมอร์ที่แข็งเปราะ โดยจะทนรับแรงเค้นได้สูง แต่เกิดการแตกหักในช่วงที่เกิดการเสียรูปแบบยืดหยุ่น กราฟ B แสดงลักษณะของพอลิเมอร์แบบเดียวกันกับที่พบในวัสดุกลุ่มโลหะ กล่าวคือช่วงแรกจะเกิดการเสียรูปแบบยืดหยุ่น จากนั้นจึงเสียรูปแบบถาวรก่อนที่จะเกิดการแตกหักในที่สุด กราฟ C แสดงลักษณะของพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง เช่น ยาง เป็นวัสดุที่สามารถยืดออกแบบคืนรูปได้มากภายใต้แรงเค้นต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของพอลิเมอร์ลักษณะต่างๆ สำหรับสมบัติเชิงกลของพลาสมาพอลิเมอร์ [36]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของพอลิเมอร์ลักษณะต่างๆ

วัสดุที่ประกอบด้วยสองฟิล์ม คือ ฟิล์ม 1 และฟิล์ม 2 ซึ่งมีค่ามอดูลัสของยังเป็น E1 และ E2 ฟิล์มมีความหนาเป็น d1 และ d2 ตามลำดับ ดังรูป 4.3 สำหรับค่ามอดูลัสของยังรวมของทั้งสองฟิล์ม จะเป็นไปตามสมการที่ 6 จาก Takayanaki's model ซึ่งได้อธิบายค่ามอดูลัสของยังที่ประกอบด้วยฟิล์มแต่ละส่วน ดังสมการที่ 2

$$E = \alpha E_1 + (1-\alpha)E_2 \quad (2)$$

โดยที่ α คือ อัตราส่วนของปริมาตรฟิล์ม 1 ต่อปริมาตรฟิล์มรวม

$1-\alpha$ คือ อัตราส่วนของปริมาตรฟิล์ม 2 สำหรับพื้นที่หน้าตัดเดียวกัน ค่า α จะเป็นไปตามสมการที่ 3

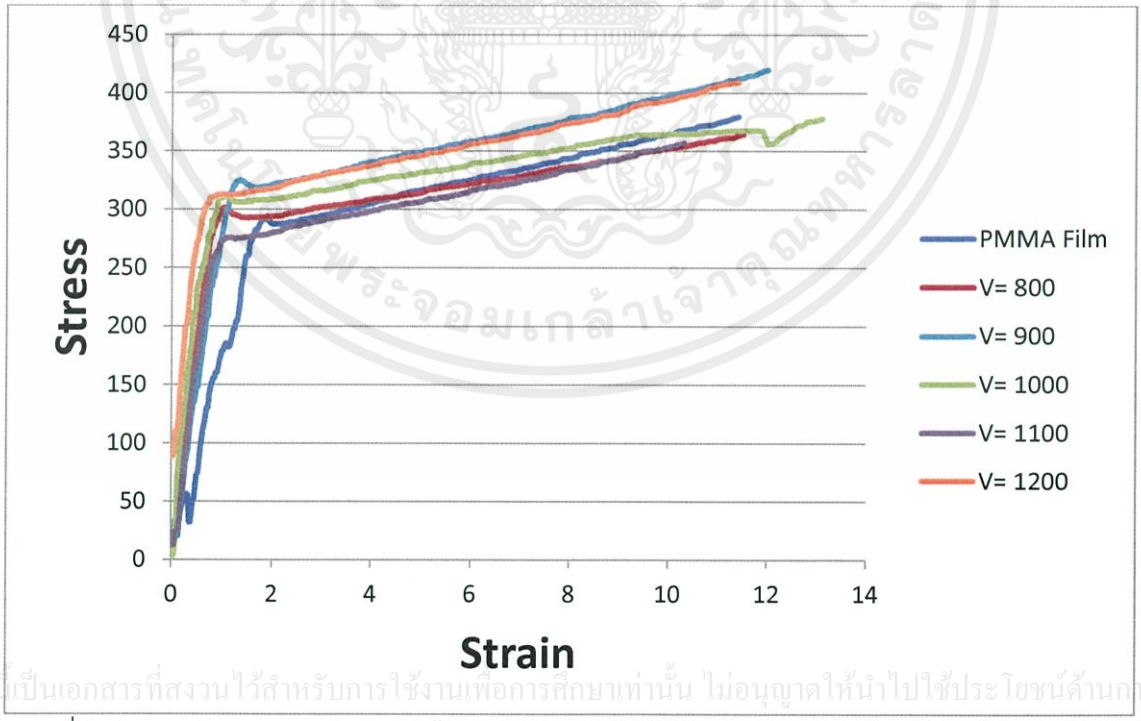
$$\alpha = \frac{d_1}{d_1+d_2} \quad (3)$$

สามารถหาค่ามอดูลัสของฟิล์มที่ 1 ได้จากสมการที่ 4

$$E1 = E2 + \frac{E-E_2}{\alpha} \quad (4)$$

4.1.2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

จากการวิเคราะห์ผลด้วยเครื่อง UTM ซึ่งเป็นเครื่องที่ใช้ทดสอบแรงดึงของวัสดุ พบว่า สมบัติเชิงกลของพลาสติก PMMA มีการเปลี่ยนแปลงไป เมื่อเคลือบพลาสติก PMMA ด้วยฟิล์มบางพอลิพิโรลด้วยวิธีเอซีพลาสมา ดังรูปที่ 4.4 และได้สมบัติเชิงกลดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของพลาสติก และ พอลิพิโรลบนแผ่นพลาสติก PMMA ที่ความต่างศักย์ต่างกัน

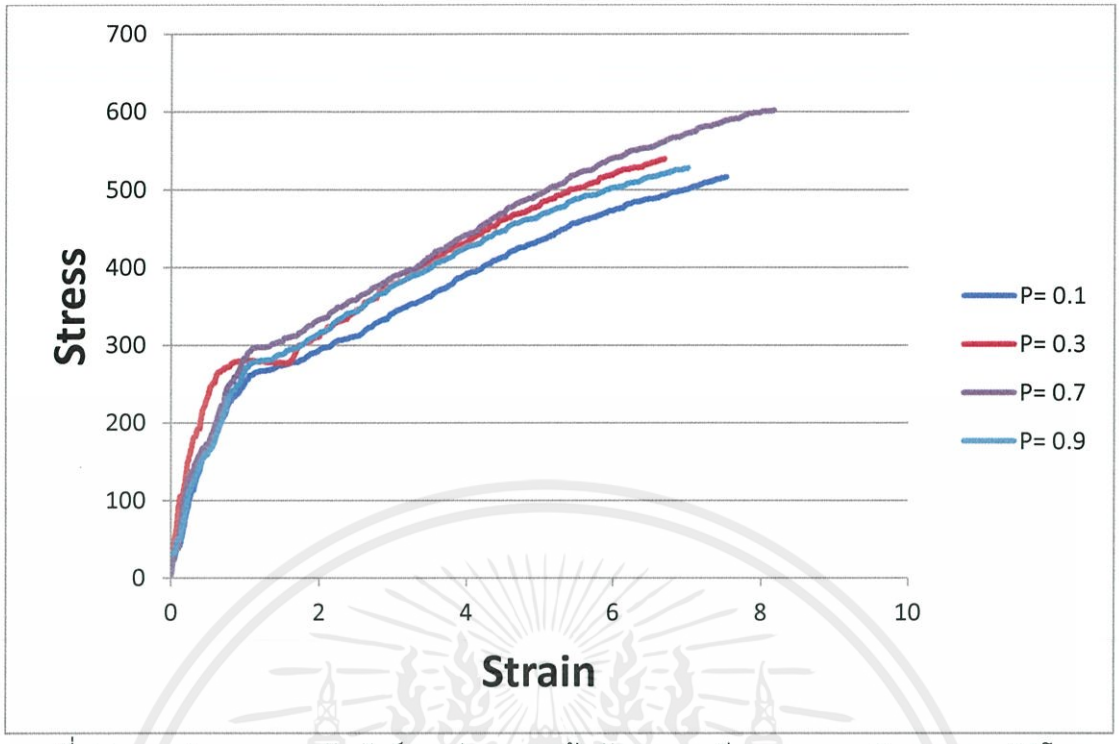
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1.2.1 แสดงสมบัติเชิงกลของพลาสติกและพลาสติกที่เคลือบด้วยพอลิพิโรลที่ความต่างศักย์ต่างกัน

	พลาสติก PMMA	พลาสติก PMMA ที่เคลือบด้วย Polypyrrole ที่ความต่างศักย์ (V)				
		800	900	1000	1100	1200
มอดูลัสของยัง (MPa)	618	1361	495.3	1706	1314	820
จุดคราก (MPa)	36.75	198.9	204.5	206.9	245.1	222.4
ความเครียดสูงสุด (MPa)	248.8	240.7	263.9	252.0	245.1	222.4
แรงดึงที่จุดขาด (MPa)	248.8	240.7	263.9	252.0	245.1	183.1
พลังงานที่ใช้เพื่อทำให้วัสดุเกิดการแตกหัก (J)	3.308	3.582	4.143	3.647	3.069	4.317

จากรูปที่ 4.4 แสดงถึงค่าของสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม PMMA และแผ่นฟิล์ม PMMA ที่เคลือบด้วย Polypyrrole ด้วยวิธี Plasma Polymerization ที่ความต่างศักย์ค่าต่างๆ พบว่าค่ามอดูลัสของยังมีค่าสูงขึ้นโดยค่าที่สูงสุดของค่ามอดูลัสอยู่ที่ความต่างศักย์ 1000 V แสดงถึงค่าความเค้นของวัสดุที่มากขึ้น ค่าของจุดครากที่เพิ่มขึ้นทำให้ฟิล์มสามารถยืดออกได้สูงขึ้นก่อนจะเสียรูปทรงเดิมไปโดยมีค่ามากที่สุดคือความต่างศักย์ 1100 V ความเครียดของวัสดุมีค่าใกล้เคียงกับแผ่น PMMA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



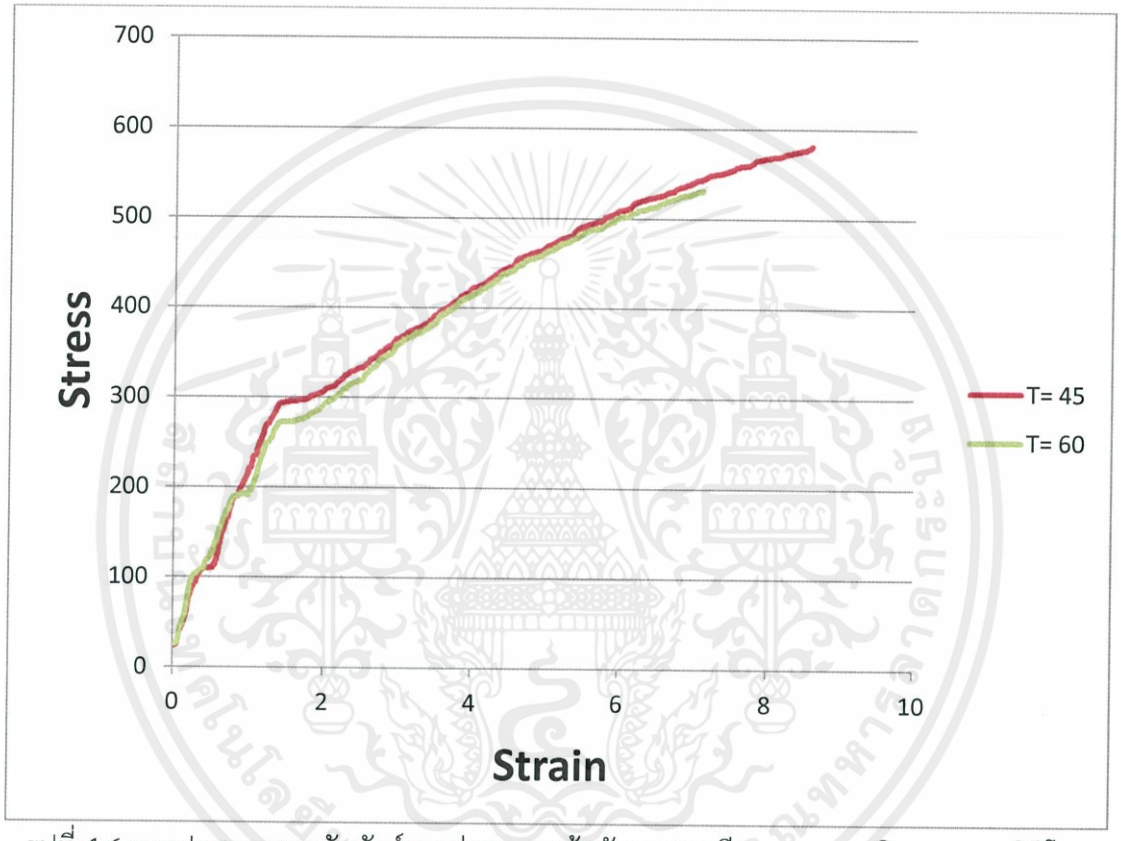
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของพลาสติก และ พอลิพิโรล บนแผ่นพลาสติก PMMA ที่ความดันต่างกัน

ตารางที่ 4.1.2.2 แสดงสมบัติเชิงกลของพลาสติกและพลาสติกที่เคลือบด้วยพอลิพิโรลที่ความดันต่างกัน

	พลาสติก PMMA	พลาสติก PMMA ที่เคลือบด้วย Polypyrrole ที่ความดัน (Torr)				
		0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
มอดูลัสของยัง (MPa)	618	1442	1756	1361	1781	1305
จุดคราก (MPa)	36.75	391.9	358.1	198.9	417.4	388.6
ความเครียดสูงสุด (MPa)	248.8	391.9	358.1	240.7	417.4	388.6
แรงดึงที่จุดขาด (MPa)	248.8	391.9	358.1	240.7	417.4	388.6
พลังงานที่ใช้เพื่อทำให้วัสดุเกิดการแตกหัก (J)	3.308	2.730	1.211	3.582	1.242	2.645

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 แสดงถึงค่าของสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม PMMA และแผ่นฟิล์ม PMMA ที่เคลือบด้วย Polypyrrole ด้วยวิธี Plasma Polymerization ที่ความดันค่าต่างๆ พบว่าค่ามอดูลัสของยังมีค่าสูงขึ้นโดยค่าที่สูงสุดของค่ามอดูลัสอยู่ที่ 0.7 Torr แสดงถึงค่าความเค้นของวัสดุที่มากขึ้น ค่าของจุดครากที่เพิ่มขึ้นทำให้ฟิล์มสามารถยืดออกได้สูงขึ้นก่อนจะเสียรูปทรงเดิมไปโดยมีค่ามากที่สุดคือความดัน 0.7 Torr ความเครียดของวัสดุมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นจากเดิมแสดงถึงการยืดออกที่มากขึ้นกว่าปกติ



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของพลาสติก และ พอลิพิโรล บนแผ่นพลาสติก PMMA ที่เวลาต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1.2.3 แสดงสมบัติเชิงกลของพลาสติกและพลาสติกที่เคลือบด้วยพอลิพิโรลที่เวลาต่างกัน

	พลาสติก PMMA	พลาสติก PMMA ที่เคลือบด้วย Polypyrrole ที่เวลา (min)		
		30	45	60
มอดูลัสของยัง (MPa)	618	1361	594	547
จุดคราก (MPa)	36.75	198.9	363.3	360.7
ความเครียดสูงสุด(MPa)	248.8	240.7	363.3	360.7
แรงดึงที่จุดขาด(MPa)	248.8	240.7	363.3	360.7
พลังงานที่ใช้เพื่อทำให้วัสดุเกิดการแตกหัก (J)	3.308	3.582	3.474	2.587

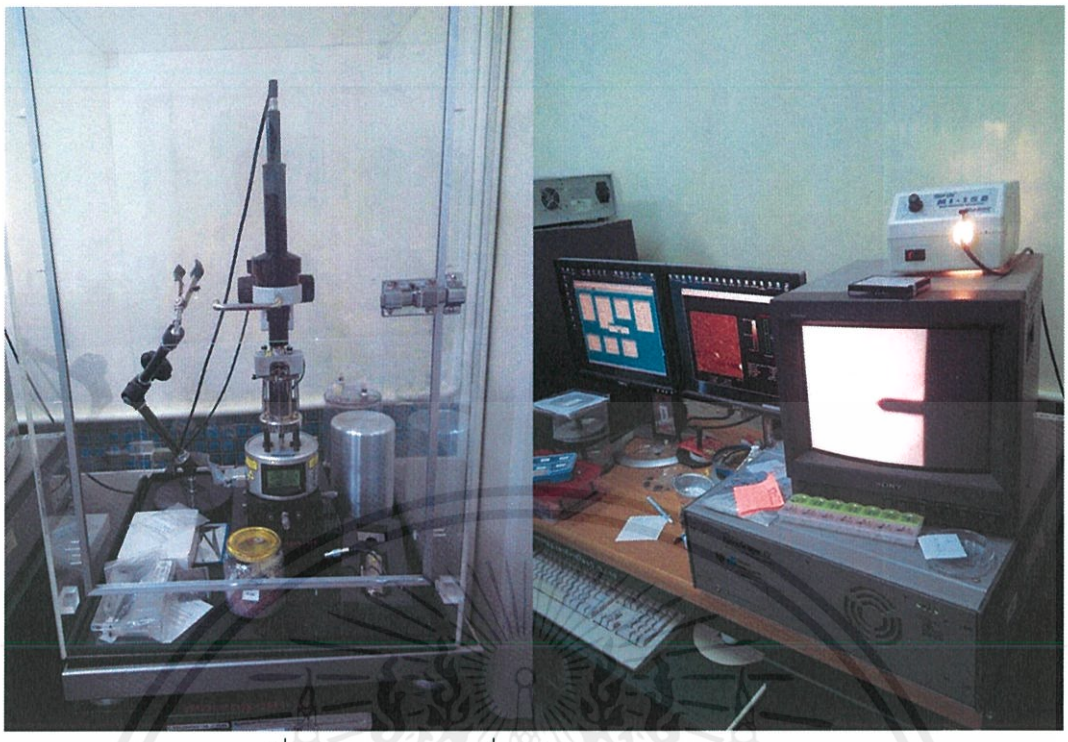
จากรูปที่ 4.6 แสดงถึงค่าของสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม PMMA และแผ่นฟิล์ม PMMA ที่เคลือบด้วย Polypyrrole ด้วยวิธี Plasma Polymerization ที่เวลาค่าต่างๆ พบว่าค่ามอดูลัสของยังมีค่าสูงสุดของค่ามอดูลัสอยู่ที่เวลา 30 นาที และค่าของมอดูลัสของยังที่เวลา 45 และ 60 นาทีมีค่าลดลงแสดงถึงค่าความเค้นที่ลดลง ค่าของจุดครากที่เพิ่มขึ้นทำให้ฟิล์มสามารถยืดออกได้สูงขึ้นก่อนจะเสียรูปทรงเดิมไปโดยมีค่ามากที่สุดคือที่เวลา 45 นาที ความเครียดของวัสดุมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นจากเดิมแสดงถึงการยืดออกที่มากขึ้น

4.2 การศึกษาโครงสร้างพื้นผิว

4.2.1 การศึกษาโครงสร้างพื้นผิวด้วยวิธี Atomic Force Microscope (AFM)

กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope) หรือ AFM เป็นกล้องจุลทรรศน์ชนิดหัวอ่านส่องกราด (Scanning Probe Microscopes, SPMs) ชนิดหนึ่ง AFM มีหลักการทำงานโดยการใช้หัวอ่านซึ่งเป็นเข็มขนาดเล็กประมาณ 10 นาโนเมตร เป็นตัววัดแรงดึงดูดหรือแรงผลักที่เกิดขึ้นระหว่างหัวเข็มกับพื้นผิวที่ต้องการวิเคราะห์เพื่อสร้างเป็นภาพ โดยเมื่อกดหัวอ่านลงบนผิ้นผิวที่จะตรวจวัด จะเกิดแรงที่กระทำต่อก้าน (cantilever) ของหัวอ่าน จะทำให้หัวอ่านเอียงด้วยมุมต่างๆกันตามสภาพความสูงต่ำของพื้นผิวซึ่งจะสามารถตรวจวัดได้จากมุมสะท้อนของลำแสงเลเซอร์ที่ยิงลงไปยังก้านของหัวอ่าน จากนั้นคอมพิวเตอร์ก็จะแปลงสัญญาณออกมาเป็นภาพของพื้นผิวที่ต้องการตรวจสอบได้ โดย AFM มีความสามารถพิเศษคือสามารถใช้ได้กับพื้นผิวที่หลากหลายทั้งที่เป็นฉนวนและพื้นผิวที่นำไฟฟ้าได้ และมีระดับความสูงต่ำ (roughness) ไม่เกิน 4 ไมโครเมตร และขนาดภาพสแกนใหญ่ที่สุดไม่เกิน 100 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

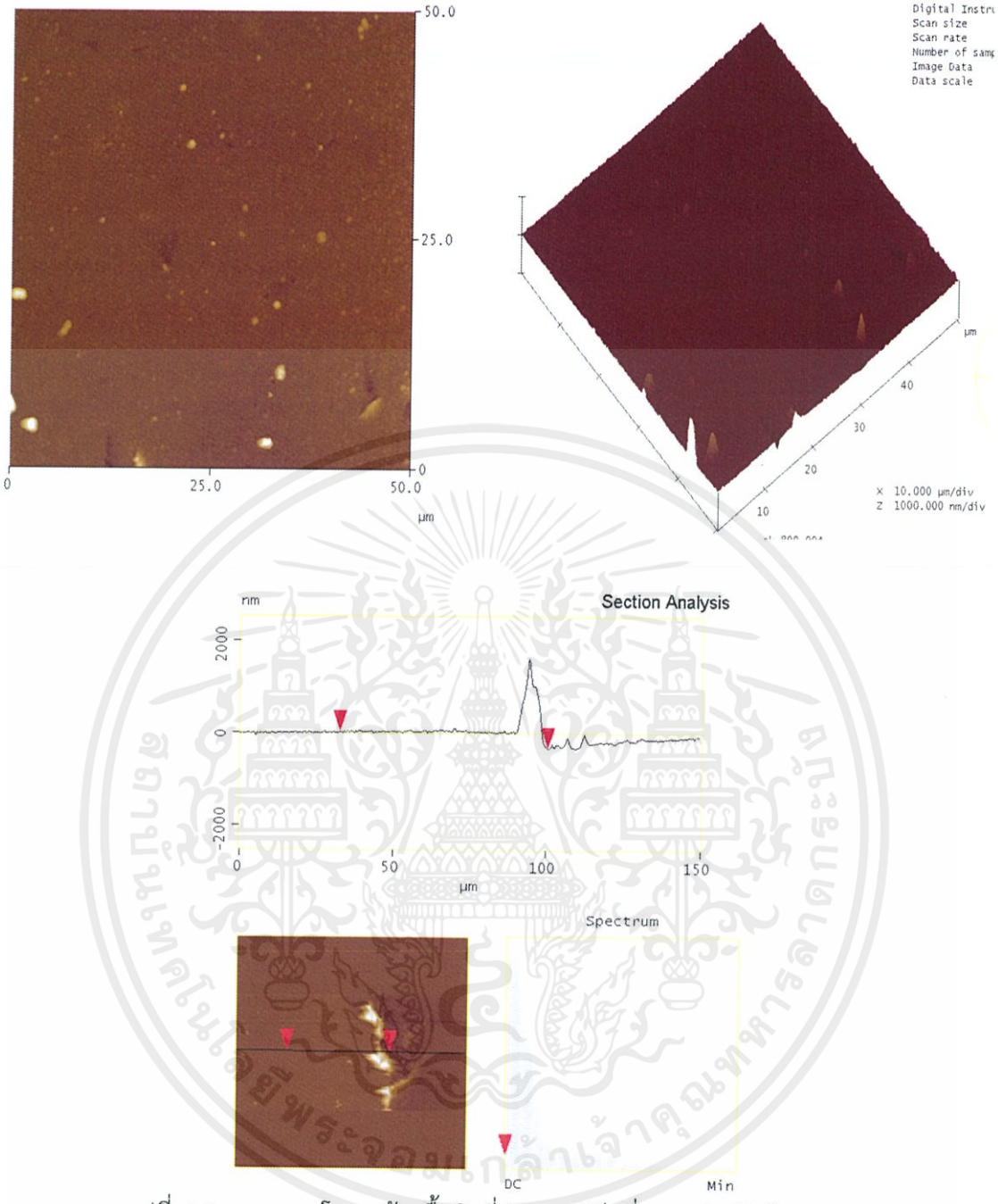


รูปที่ 4.7 ภาพแสดงเครื่อง Atomic Force Microscope

4.2.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มบางพอลิพิโรลโดยเครื่อง Atomic Force Microscope

การวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มบางพอลิพิโรลที่สร้างด้วยวิธีเอซีพลาสมา ด้วยเครื่อง Atomic Force Microscope โดยผู้ทดลองต้องการวัดความเรียบของพื้นผิวชิ้นงาน ภาพ 2 มิติ ภาพ 3 มิติ และความหนาของชิ้นงานที่เงื่อนไขการสร้างแตกต่างกัน

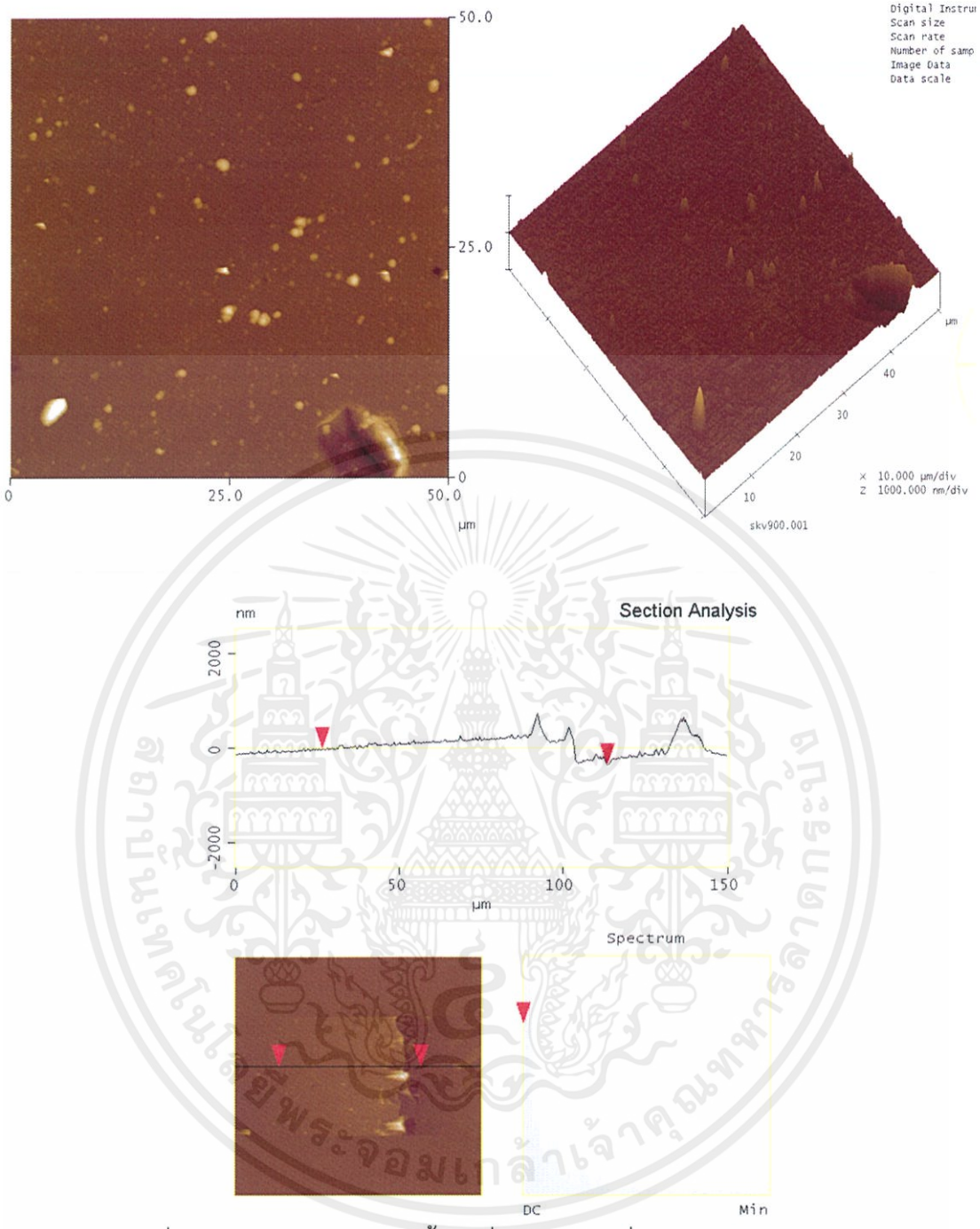
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ภาพแสดงโครงสร้างพื้นผิวที่ปลูกบนฟิล์มที่ความต่างศักย์ 800 V

จากผลการทดลองที่ความต่างศักย์ 800 V ฟิมล์ที่ได้มีความหนา 347.45 nm มีค่าความขรุขระของพื้นผิว 33.860 nm และมีค่าเฉลี่ยของความขรุขระของพื้นผิว 17.870 nm

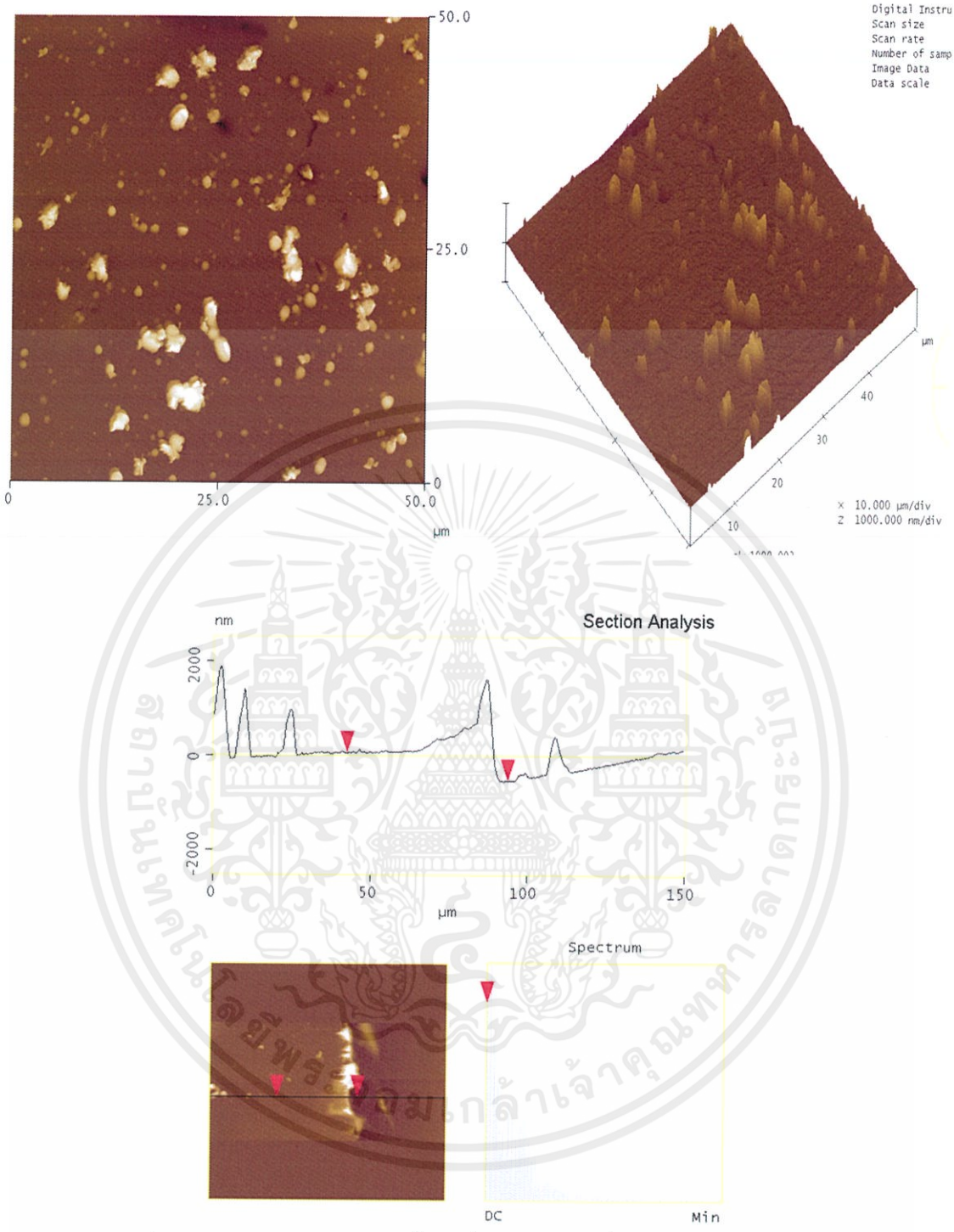
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ภาพแสดงโครงสร้างพื้นผิวที่ปลูกบนฟิล์มที่ความต่างศักย์ 900 V

จากผลการทดลองที่ความต่างศักย์ 900 V ฟิมล์ที่ได้มีความหนา 336.79 nm มีค่าความขรุขระของพื้นผิว 47.830 nm และมีค่าเฉลี่ยของความขรุขระของพื้นผิว 22.354 nm

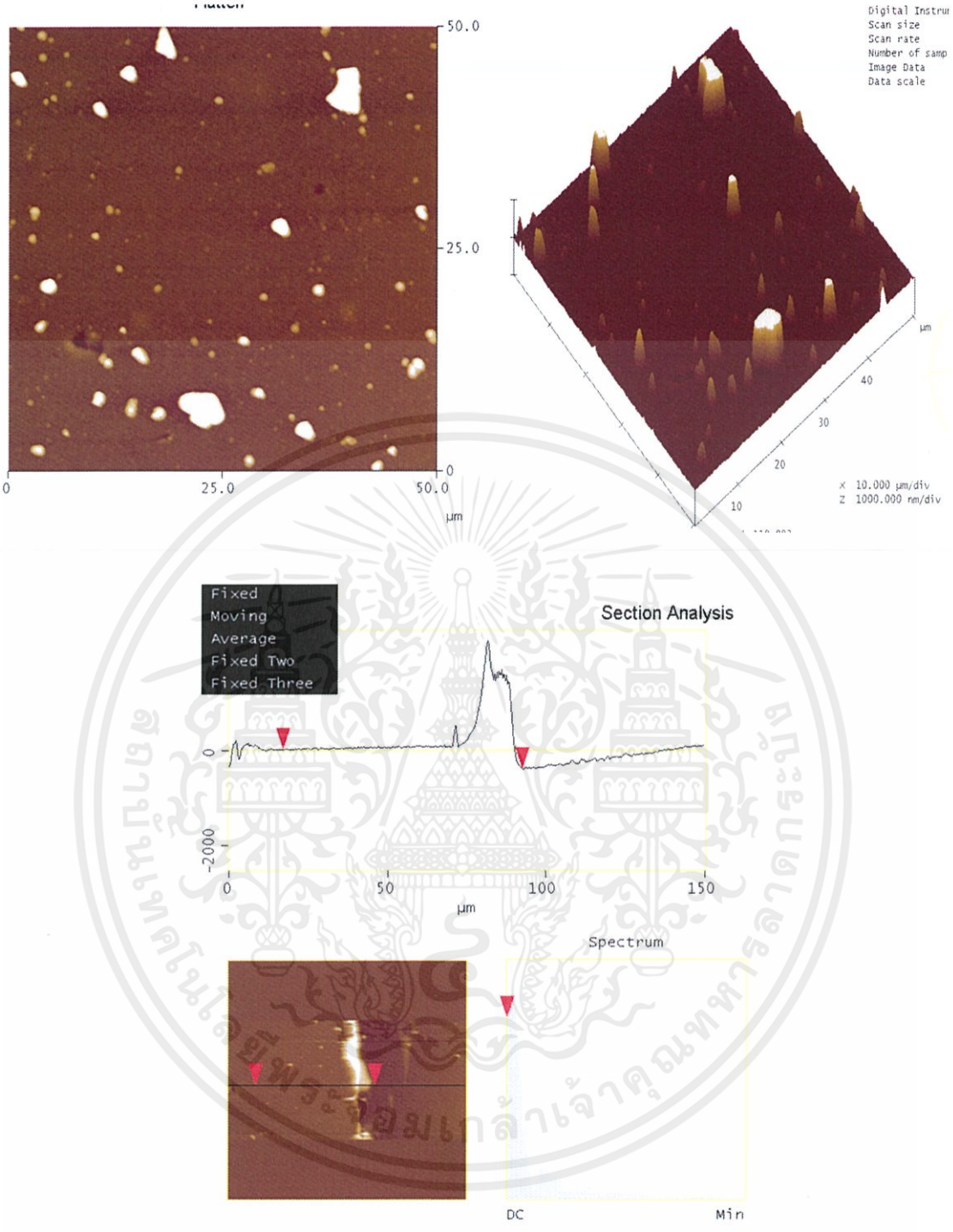
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ภาพแสดงโครงสร้างพื้นผิวที่ปลูกบนฟิล์มที่ความต่างศักย์ 1000 V

จากผลการทดลองที่ความต่างศักย์ 1000 V ฟิมล์ที่ได้มีความหนา 853.41 nm มีค่าความขรุขระของพื้นผิว 88.621 nm และมีค่าเฉลี่ยของความขรุขระของพื้นผิว 49.385 nm

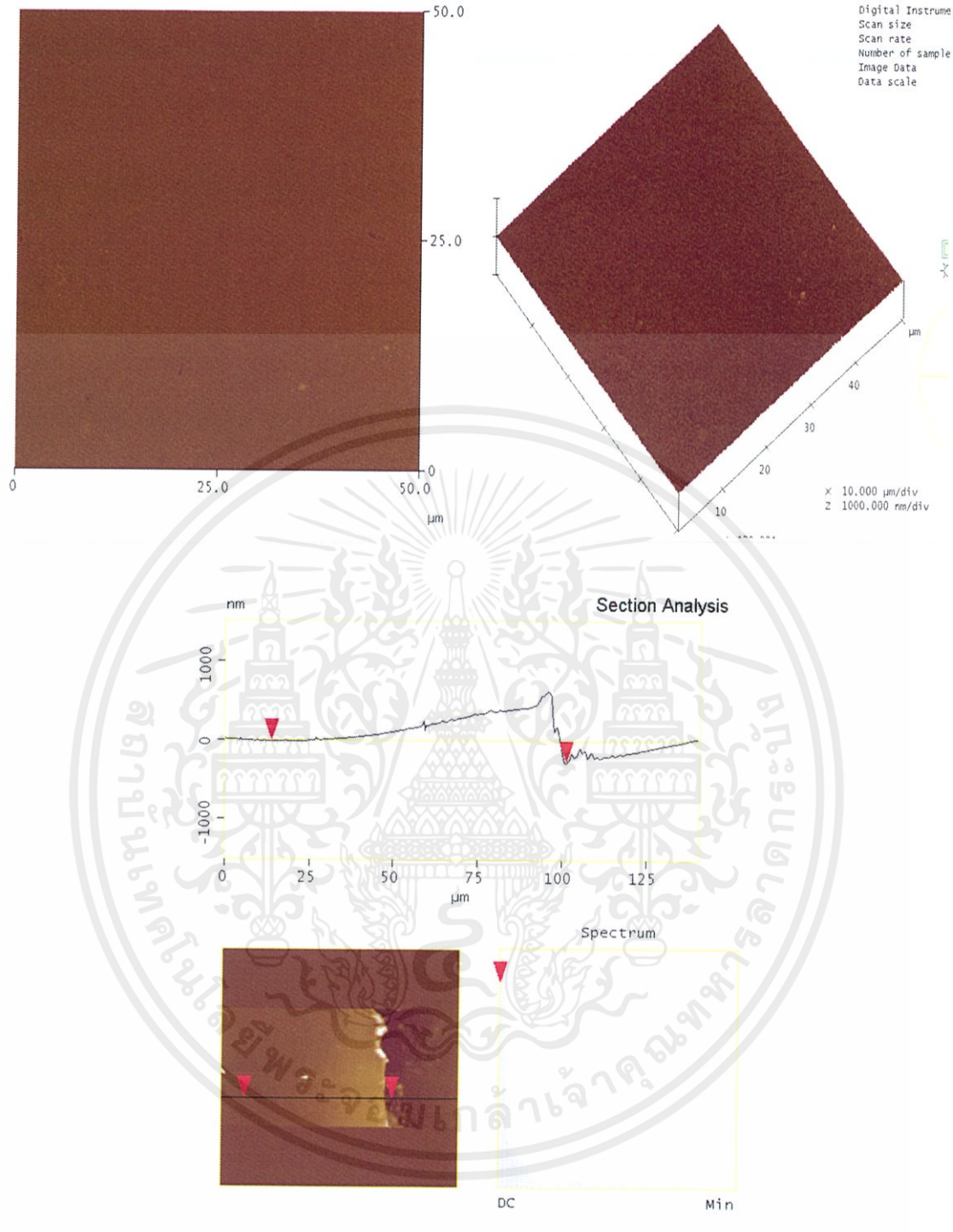
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ภาพแสดงโครงสร้างพื้นผิวที่ปลูกบนฟิล์มที่ความต่างศักย์ 1100 V

จากผลการทดลองที่ความต่างศักย์ 1100 V ฟิมล์ที่ได้มีความหนา 405.12 nm มีค่าความขรุขระของพื้นผิว 178.05 nm และมีค่าเฉลี่ยของความขรุขระของพื้นผิว 58.990 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ภาพแสดงโครงสร้างพื้นผิวที่ปลูกบนฟิล์มที่ความต่างศักย์ 1200 V

จากผลการทดลองที่ความต่างศักย์ 1200 V ฟิมล์ที่ได้มีความหนา 264.41 nm มีค่าความขรุขระของพื้นผิว 18.846 nm และมีค่าเฉลี่ยของความขรุขระของพื้นผิว 14.961 nm

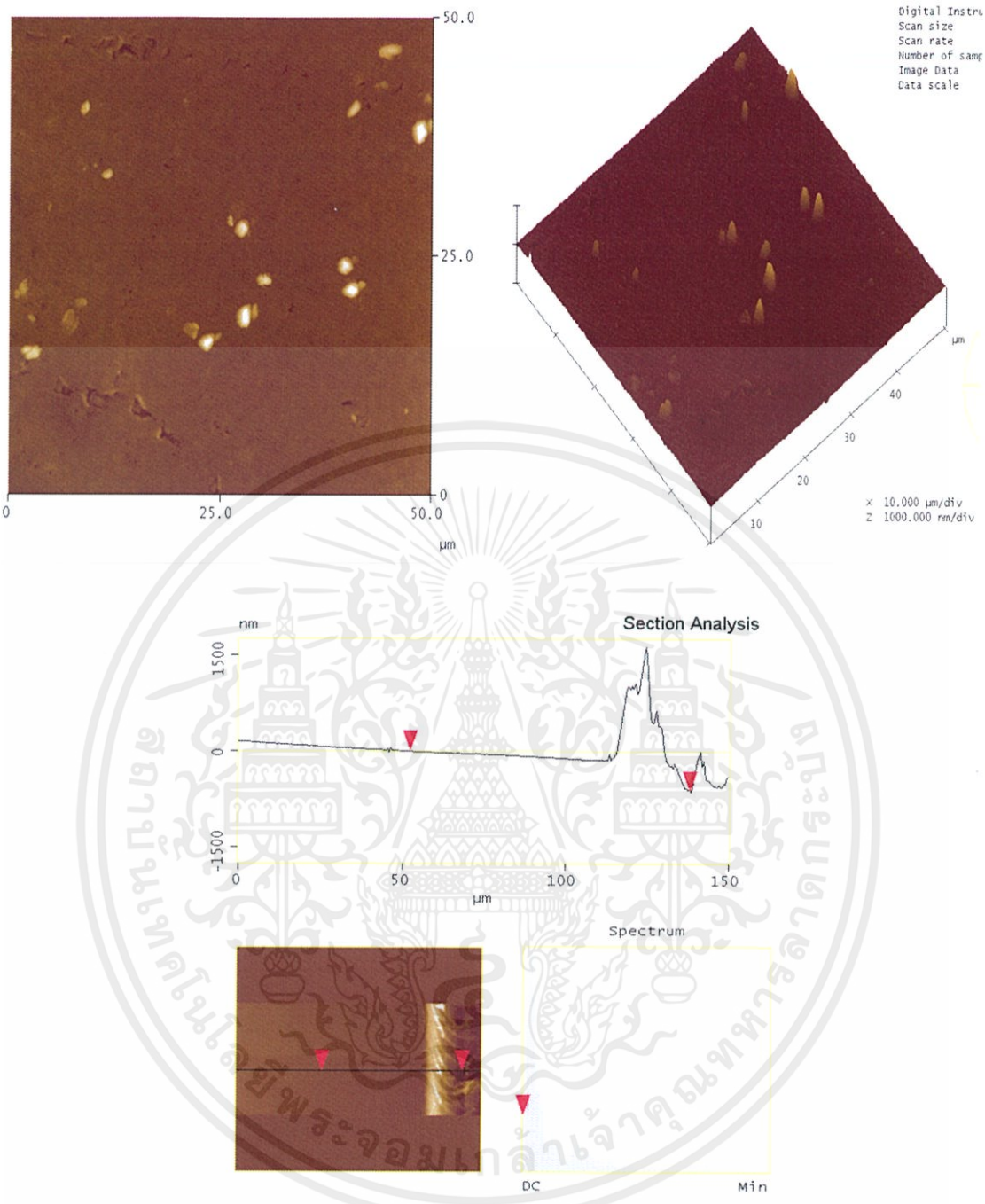
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2.2.1 แสดงสมบัติพื้นผิวของฟิล์ม PMMA ที่เคลือบด้วย Polypyrrole โดยวิธี Plasma Polymerization ที่ความต่างศักย์ค่าต่างๆ

	Vertical distance	RMS	Mean Roughness
V = 800 V	347.45 nm	33.860 nm	17.870 nm
V = 900 V	336.79 nm	47.830 nm	22.354 nm
V = 1000 V	853.41 nm	88.621 nm	49.385 nm
V = 1100 V	405.12 nm	178.05 nm	58.990 nm
V = 1200 V	264.41 nm	18.846 nm	14.961 nm

ค่าสมบัติพื้นผิวของมีความหนามากที่สุดที่ความต่างศักย์ 1000 V และน้อยที่สุดที่ความต่างศักย์ 1200 V โดยค่าความขรุขระของพื้นผิวที่ 1100 V มีค่ามากที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 58.990 nm และที่น้อยที่สุด คือที่ 1200 V โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 14.961 nm

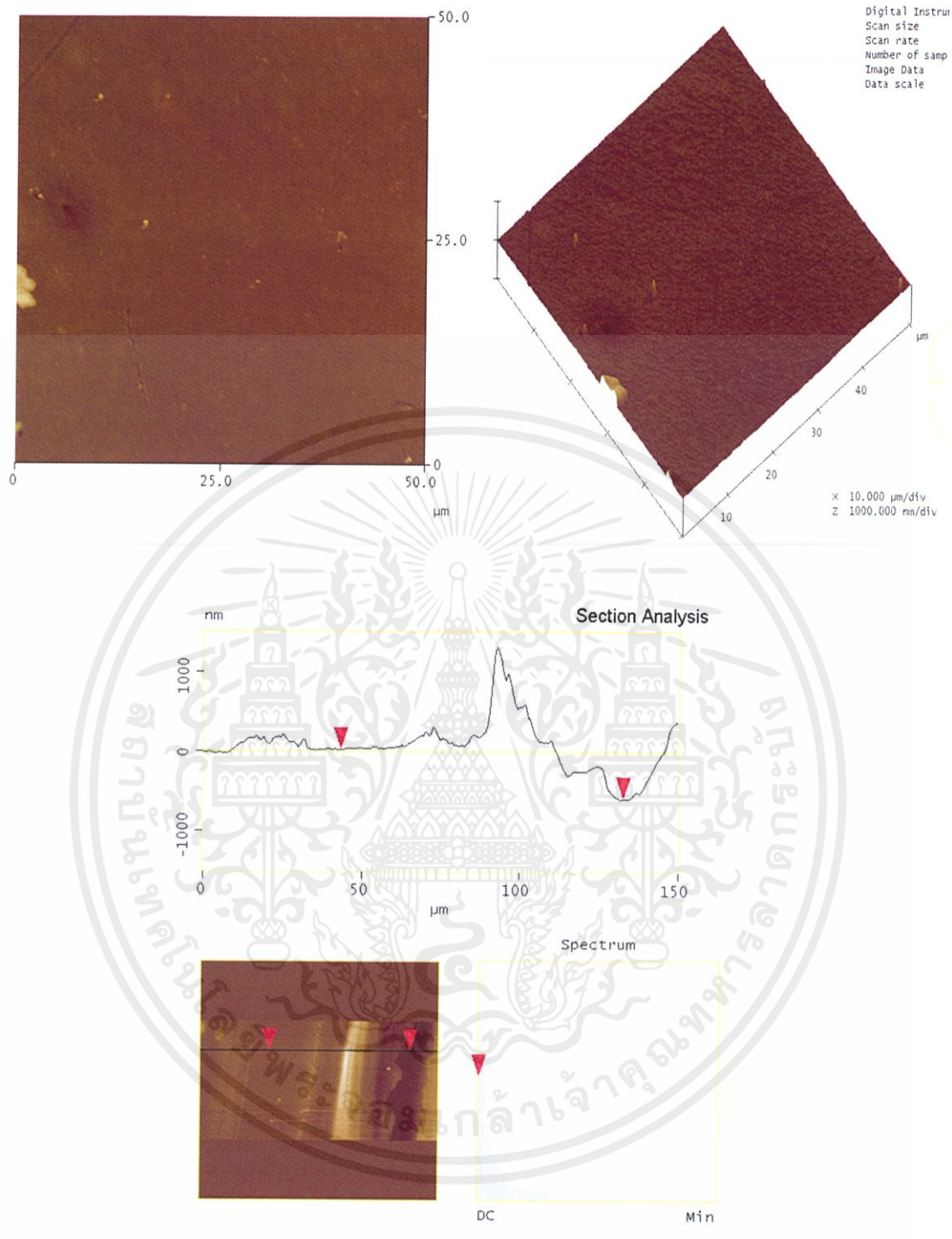
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ภาพแสดงโครงสร้างพื้นผิวที่ปลูกบนฟิล์มที่ความดัน 0.1 Torr

จากผลการทดลองที่ความดัน 0.1 Torr ฟิมล์ที่ได้มีความหนา 617.33 nm มีค่าความขรุขระของพื้นผิว 41.065 nm และมีค่าเฉลี่ยของความขรุขระของพื้นผิว 21.586 nm

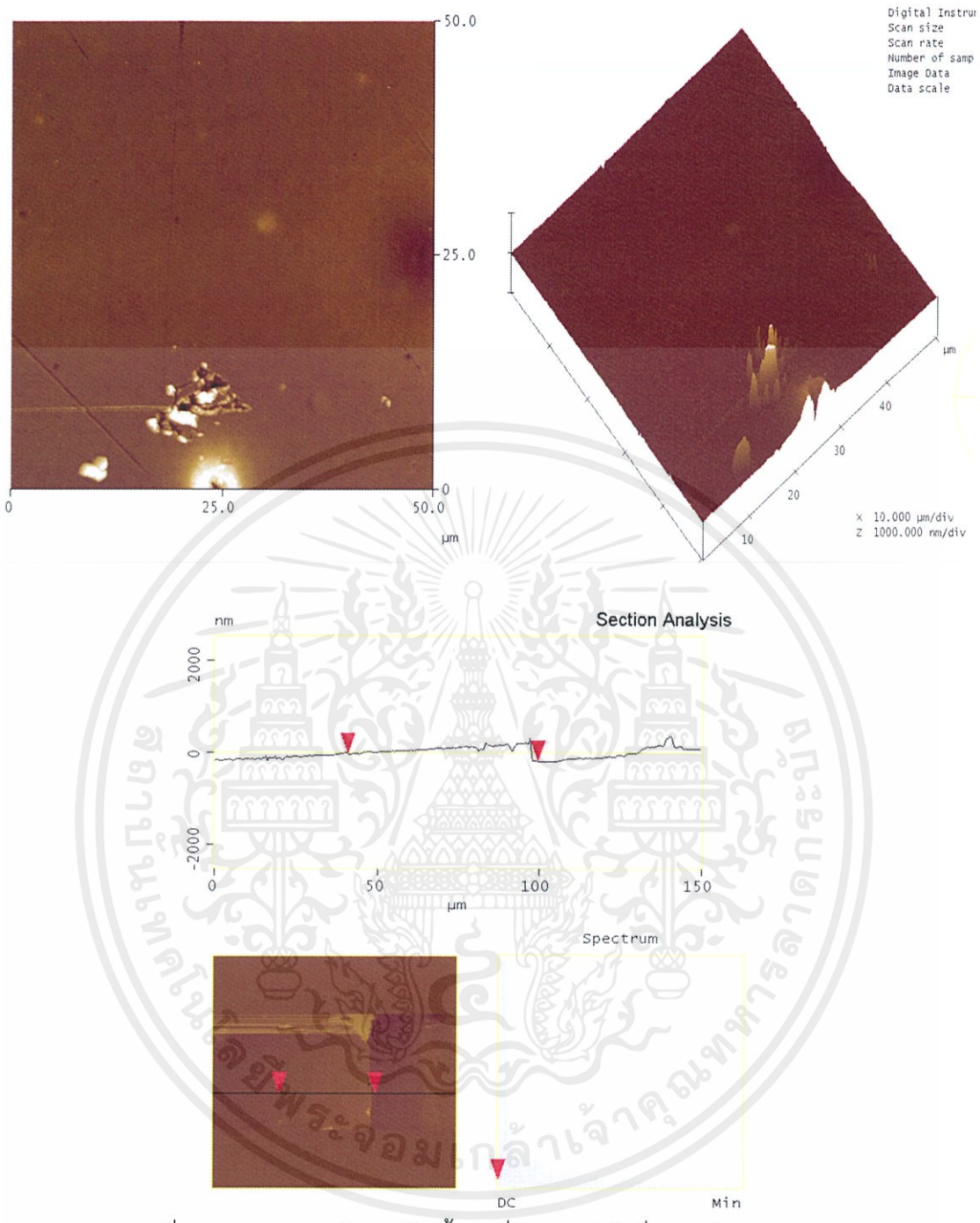
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ภาพแสดงโครงสร้างพื้นผิวที่ปลูกบนฟิล์มที่ความดัน 0.3 Torr

จากผลการทดลองที่ความดัน 0.3 Torr ฟิมล์ที่ได้มีความหนา 608.22 nm มีค่าความขรุขระของพื้นผิว 22.266 nm และมีค่าเฉลี่ยของความขรุขระของพื้นผิว 12.789 nm

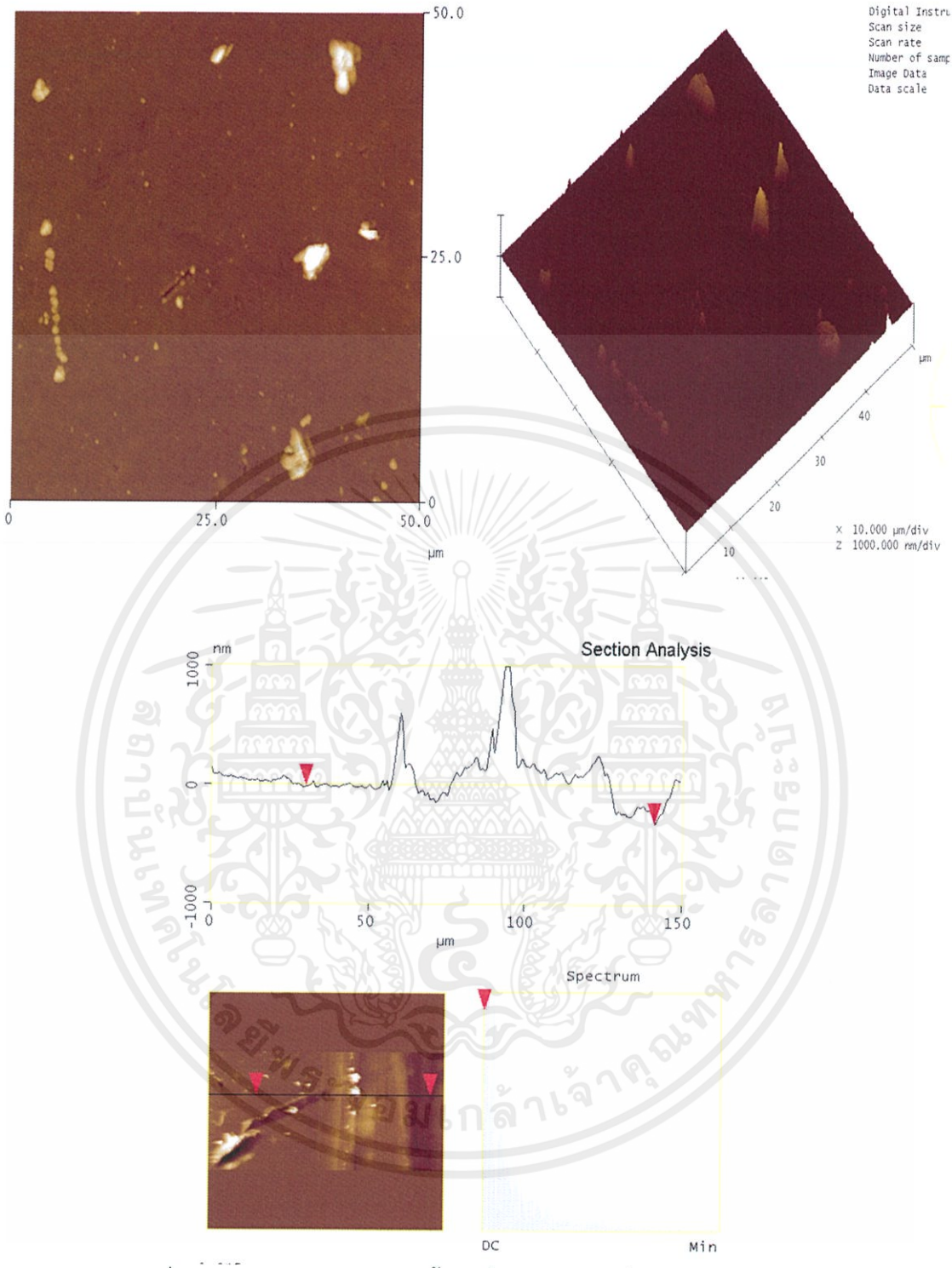
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ภาพแสดงโครงสร้างพื้นผิวที่ปลูกบนฟิล์มที่ความดัน 0.7 Torr

จากผลการทดลองที่ความดัน 0.7 Torr ฟิมล์ที่ได้มีความหนา 156.03 nm มีค่าความขรุขระของพื้นผิว 67.647 nm และมีค่าเฉลี่ยของความขรุขระของพื้นผิว 28.025 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ภาพแสดงโครงสร้างพื้นผิวที่ปลูกบนฟิล์มที่ความดัน 0.9 Torr

จากผลการทดลองที่ความดัน 0.9 Torr ฟิมล์ที่ได้มีความหนา 308.66 nm มีค่าความขรุขระของพื้นผิว 55.429 nm และมีค่าเฉลี่ยของความขรุขระของพื้นผิว 22.636 nm

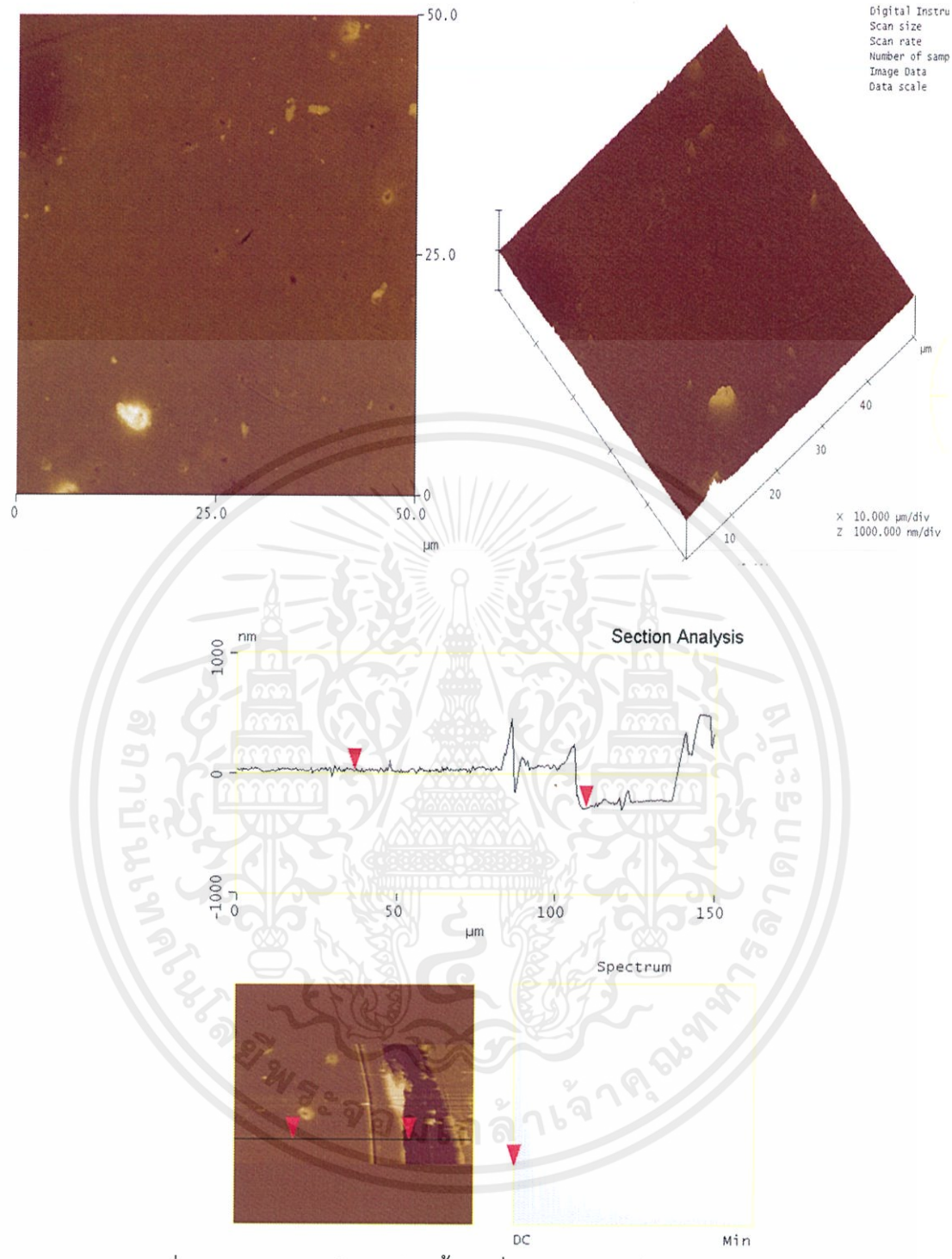
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2.2.2 แสดงสมบัติพื้นผิวของฟิล์ม PMMA ที่เคลือบด้วย Polypyrrole โดยวิธี Plasma Polymerization ที่ความดันค่าต่างๆ

	Vertical distance	RMS	Mean Roughness
P = 0.1 Torr	617.33 nm	41.065 nm	21.586 nm
P = 0.3 Torr	608.22 nm	22.266 nm	12.789 nm
P = 0.5 Torr	347.45 nm	33.860 nm	17.870 nm
P = 0.7 Torr	156.03 nm	67.647 nm	28.025 nm
P = 0.9 Torr	308.66 nm	55.429 nm	22.636 nm

ค่าสมบัติพื้นผิวของมีความหนามากที่สุดที่ความดัน 0.1 Torr และน้อยที่สุดที่ความดัน 0.7 Torr โดยค่าความขรุขระของพื้นผิวที่ 0.7 Torr มีค่ามากที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 28.025 nm และที่น้อยที่สุด คือที่ 0.3 Torr โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 12.789 nm

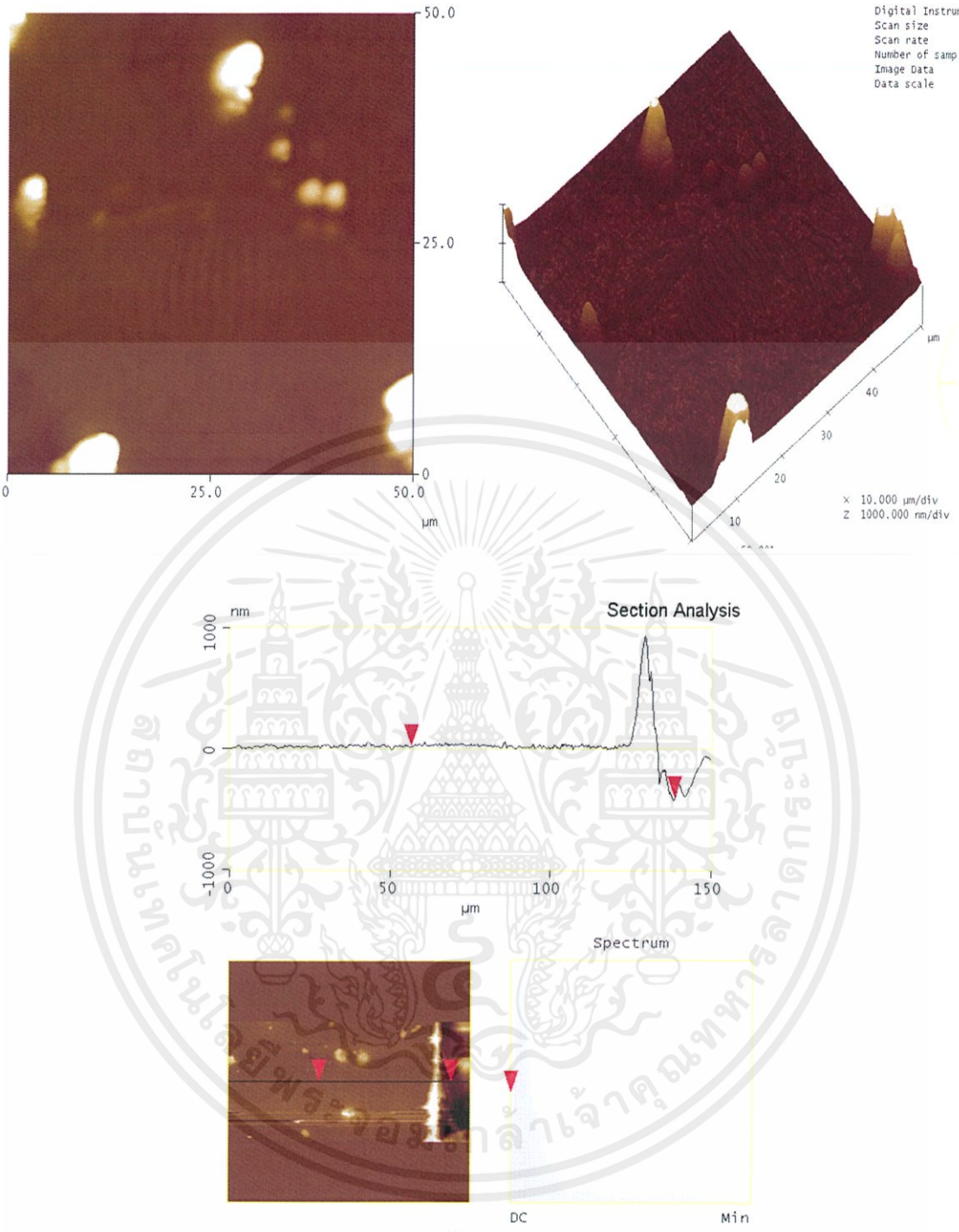
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ภาพแสดงโครงสร้างพื้นผิวที่ปลูกบนฟิล์มเป็นเวลา 45 นาที

จากผลการทดลองที่เวลา 45 นาทีฟิมล์ที่ได้มีความหนา 311.38 nm มีค่าความขรุขระของพื้นผิว 34.005 nm และมีค่าเฉลี่ยของความขรุขระของพื้นผิว 18.006 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ภาพแสดงโครงสร้างพื้นผิวที่ปลูกบนฟิล์มเป็นเวลา 60 นาที

จากผลการทดลองที่เวลา 60 นาทีฟิมล์ที่ได้มีความหนา 422.41 nm มีค่าความขรุขระของพื้นผิว 146.26 nm และมีค่าเฉลี่ยของความขรุขระของพื้นผิว 60.892 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2.2.3 แสดงสมบัติพื้นผิวของฟิล์ม PMMA ที่เคลือบด้วย Polypyrrole โดยวิธี Plasma Polymerization ที่เวลาต่างๆ

	Vertical distance	RMS	Mean Roughness
t = 30 min	347.45 nm	33.860 nm	17.870 nm
t = 45 min	311.38 nm	34.005 nm	18.006 nm
t = 60 min	422.41 nm	146.26 nm	60.892 nm

ค่าสมบัติพื้นผิวของมีความหนามากที่สุดที่เวลา 60 นาทีและน้อยที่สุดที่เวลา 45 นาที โดยค่าความขรุขระของพื้นผิวที่เวลา 60 นาที มีค่ามากที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 60.892 nm และที่น้อยที่สุดคือที่เวลา 30 นาที โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 17.870 nm

4.3 การวัดค่าการดูดกลืนแสง

4.3.1 การวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer

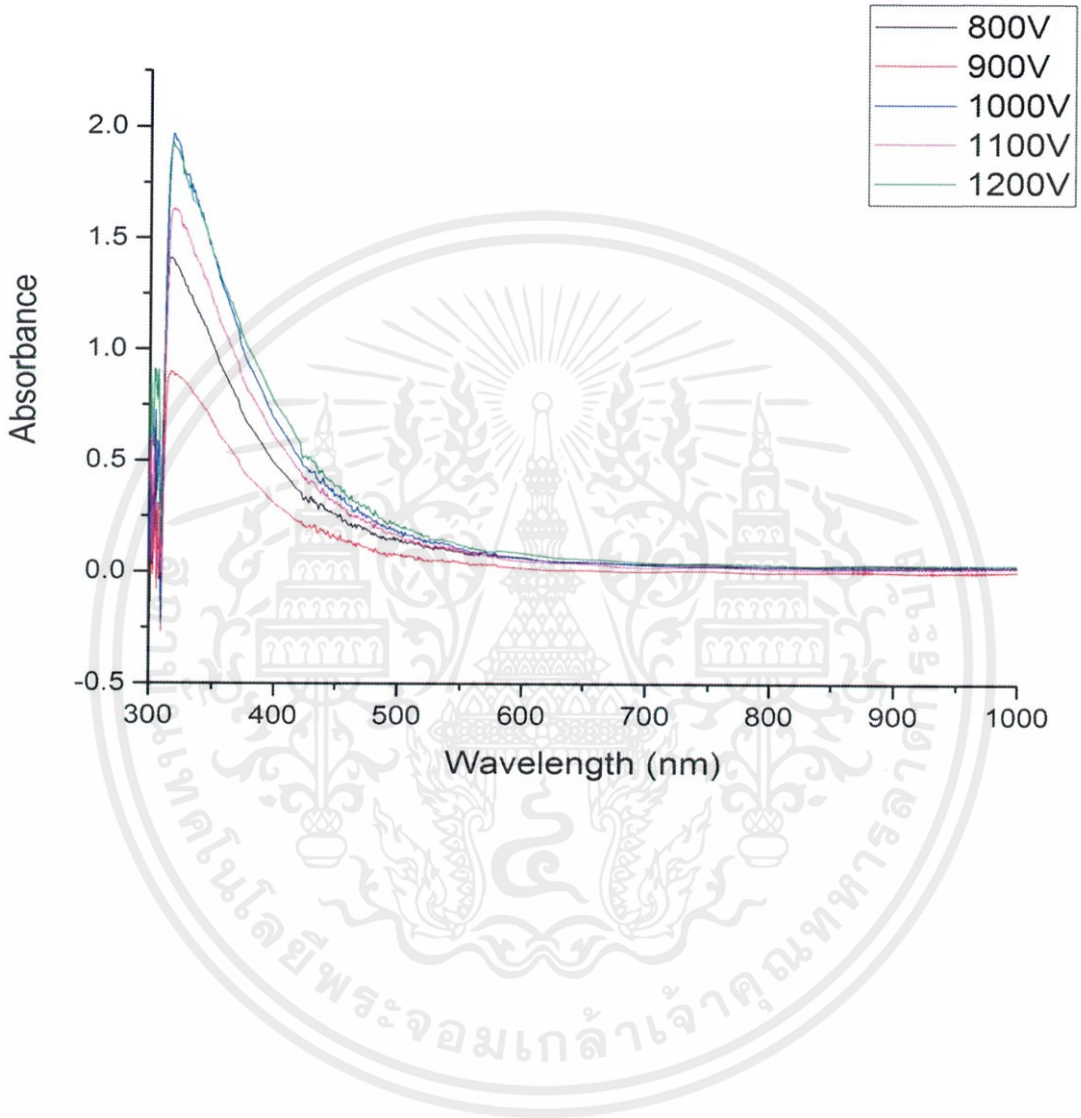
UV-VIS spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในวิเคราะห์สารโดยอาศัยหลักการดูดกลืนรังสีของสารที่อยู่ในช่วง Ultra violet (UV) และ Visible (VIS) ความยาวคลื่นประมาณ 190-1000 nm ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน หรือสารอนินทรีย์ ทั้งที่มีสีและไม่มีสี สารแต่ละชนิดจะดูดกลืนรังสีในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกันและปริมาณการดูดกลืนรังสีก็ขึ้นอยู่กับความเข้มของสารนั้น การดูดกลืนแสงของสารต่างๆเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร จึงสามารถวิเคราะห์ได้ในเชิงคุณภาพและปริมาณ เป็นเทคนิคที่ให้สภาพไวที่ดี และใช้กันอย่างแพร่หลาย ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และค่าความยาวคลื่น (Wavelength) ซึ่งเรียกว่า Spectrum

รูปที่ 4.19 ภาพแสดงเครื่อง UV-VIS spectrophotometer

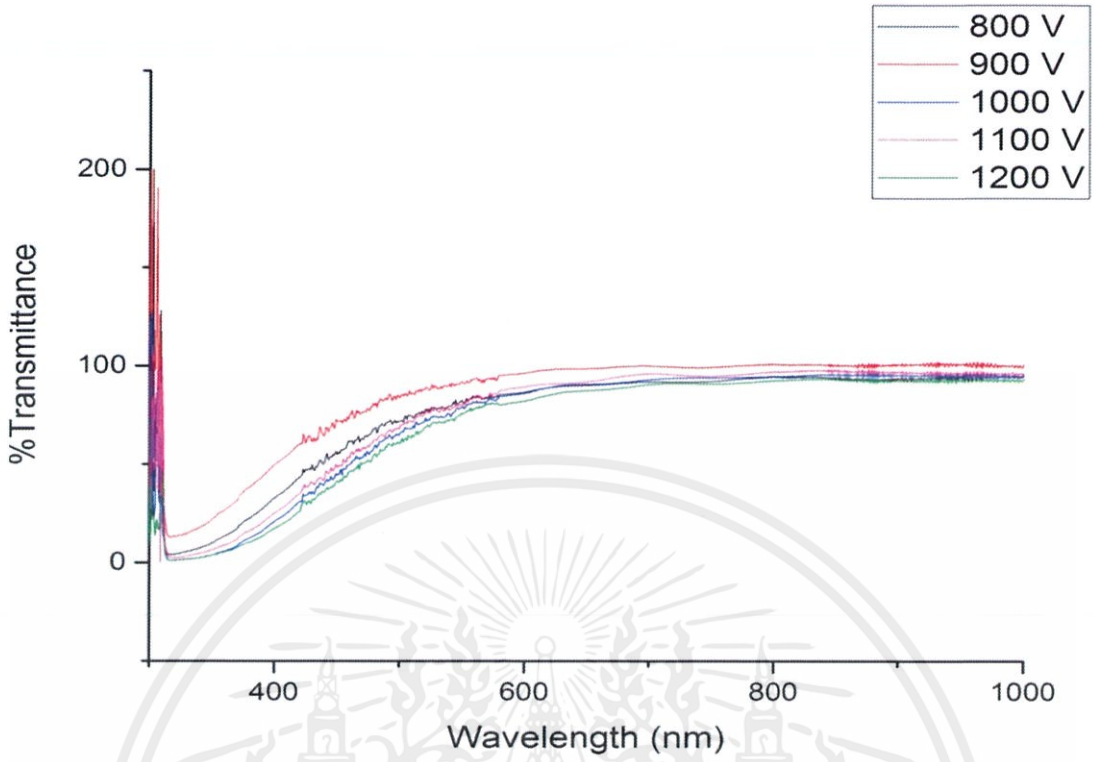
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางพอลิพิโรลโดยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer

จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer พบว่าผลที่ได้ของค่าการดูดกลืนแสงได้แสดงออกมาดังรูป



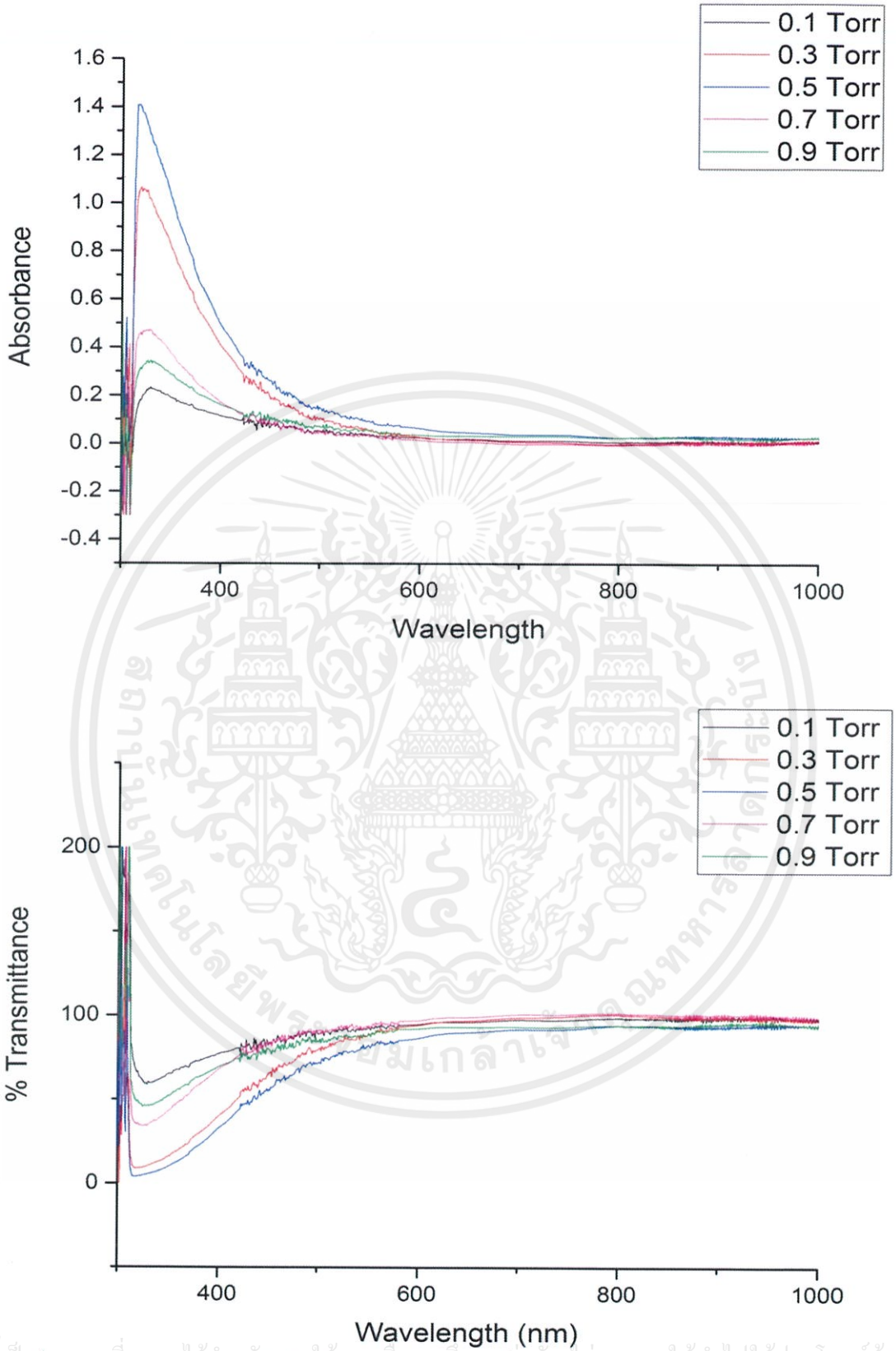
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับการดูดกลืนแสงและการส่งผ่านแสงที่ความต่างศักย์ต่างกัน

จากรูปที่ 4.20 แสดงให้เห็นถึงค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางพอลิพิโรลพบว่าที่ 800 V มีค่าการดูดกลืนแสงมากที่สุดที่ความยาวคลื่น 317 nm 900 V มีค่าการดูดกลืนแสงมากที่สุดที่ความยาวคลื่น 318 nm 1000 V มีค่าการดูดกลืนแสงมากที่สุดที่ความยาวคลื่น 318 nm 1100 V มีค่าการดูดกลืนแสงมากที่สุดที่ความยาวคลื่น 319 nm และ 1200 V มีค่าการดูดกลืนแสงมากที่สุดที่ความยาวคลื่น 318 nm แสดงให้เห็นว่าค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มนั้นมีค่าอยู่ในช่วง 317-319 nm โดยที่ 1000 V สามารถดูดกลืนแสงได้ดีที่สุดและ 900 V ดูดกลืนแสงได้น้อยที่สุด สำหรับค่าการส่งผ่านแสงนั้นมีค่าเช่นเดียวกับการดูดกลืนแสงโดยที่การดูดกลืนแสงมากที่สุดนั้นจะมีค่าการส่งผ่านแสงน้อยที่สุดและที่การดูดกลืนแสงน้อยที่สุดนั้นจะมีค่าการส่งผ่านแสงมากที่สุด

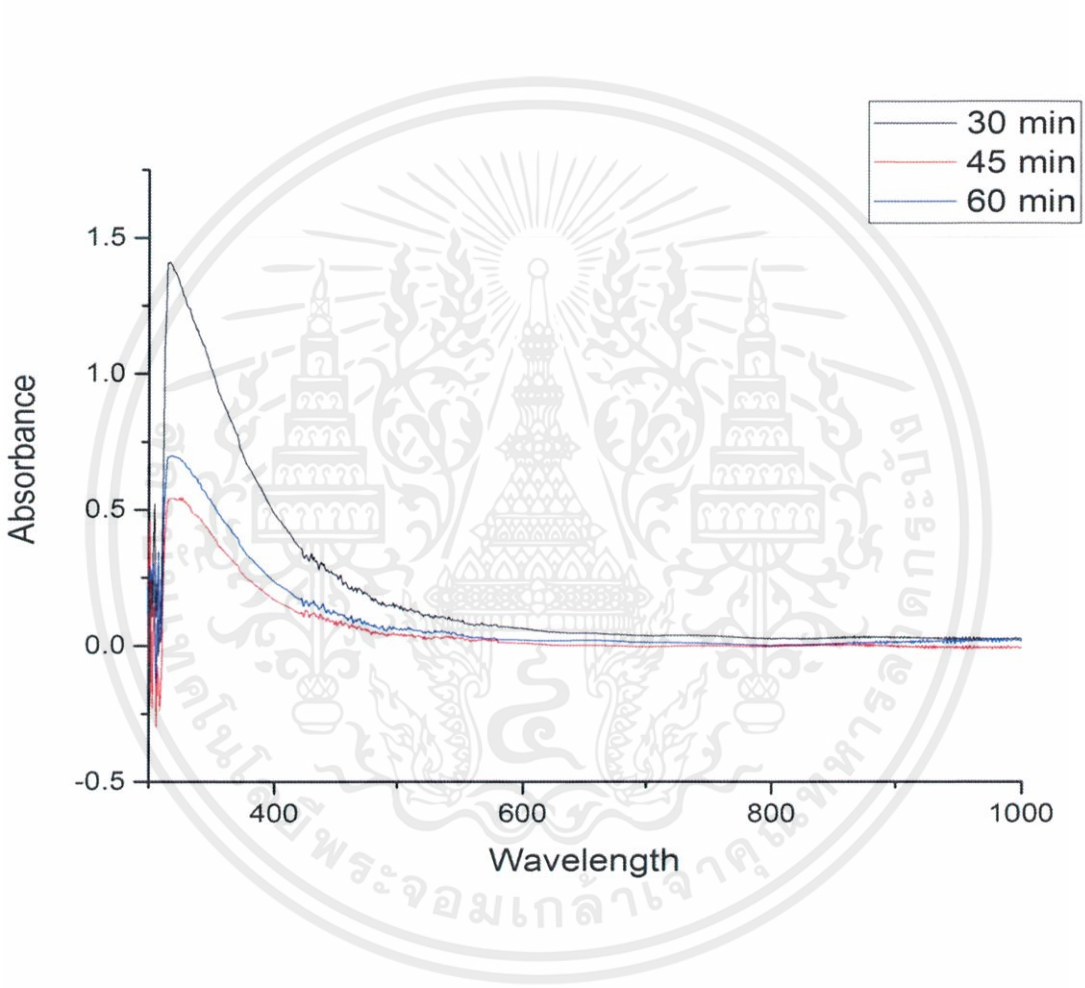
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



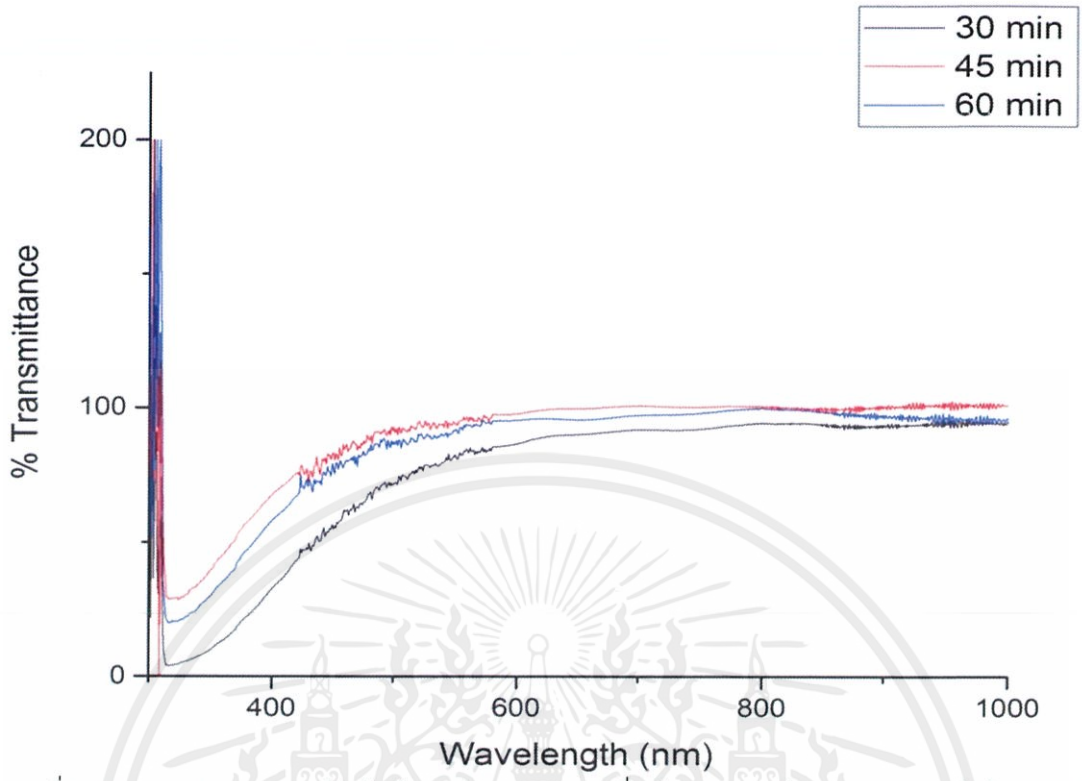
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับการดูดกลืนแสงและการส่งผ่านแสงที่ความดันต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นถึงค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางพอลิพิโรลพบว่าที่ความดัน 0.1 Torr มีค่าการดูดกลืนแสงมากที่สุดที่ความยาวคลื่น 329 nm 0.3 Torr มีค่าการดูดกลืนแสงมากที่สุดที่ความยาวคลื่น 319 nm 0.5 Torr มีค่าการดูดกลืนแสงมากที่สุดที่ความยาวคลื่น 317 nm 0.7 Torr มีค่าการดูดกลืนแสงมากที่สุดที่ความยาวคลื่น 325 nm และ 0.9 Torr มีค่าการดูดกลืนแสงมากที่สุดที่ความยาวคลื่น 331 Torr แสดงให้เห็นว่าค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มนั้นมีค่าอยู่ในช่วง 317-331 nm โดยที่ 0.5 Torr สามารถดูดกลืนแสงได้ดีที่สุดและ 0.1 Torr ดูดกลืนแสงได้น้อยที่สุด สำหรับค่าการส่งผ่านแสงนั้นมีค่าเช่นเดียวกับการดูดกลืนแสงโดยที่การดูดกลืนแสงมากที่สุดนั้นจะมีค่าการส่งผ่านแสงน้อยที่สุดและที่การดูดกลืนแสงน้อยที่สุดนั้นจะมีค่าการส่งผ่านแสงมากที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับการดูดกลืนแสงและการส่งผ่านแสงที่เวลาต่างกัน

จากรูปที่ 4.22 แสดงให้เห็นถึงค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางพอลิพิโรลพบว่าที่เวลา 30 นาทีมีค่าการดูดกลืนแสงมากที่สุดที่ความยาวคลื่น 317 nm 45 นาทีมีค่าการดูดกลืนแสงมากที่สุดที่ความยาวคลื่น 325 nm และ 60 นาทีมีค่าการดูดกลืนแสงมากที่สุดที่ความยาวคลื่น 318 nmแสดงให้เห็นว่าค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มนั้นมีค่าอยู่ในช่วง 317-325 nm โดยที่เวลา 30 นาทีสามารถดูดกลืนแสงได้ดีที่สุดและที่เวลา 45 นาทีดูดกลืนแสงได้น้อยที่สุดสำหรับค่าการส่งผ่านแสงนั้นมีค่าเช่นเดียวกับการดูดกลืนแสงโดยที่การดูดกลืนแสงมากที่สุดนั้นจะมีค่าการส่งผ่านแสงน้อยที่สุดและที่การดูดกลืนแสงน้อยที่สุดนั้นจะมีค่าการส่งผ่านแสงมากที่สุด

4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี

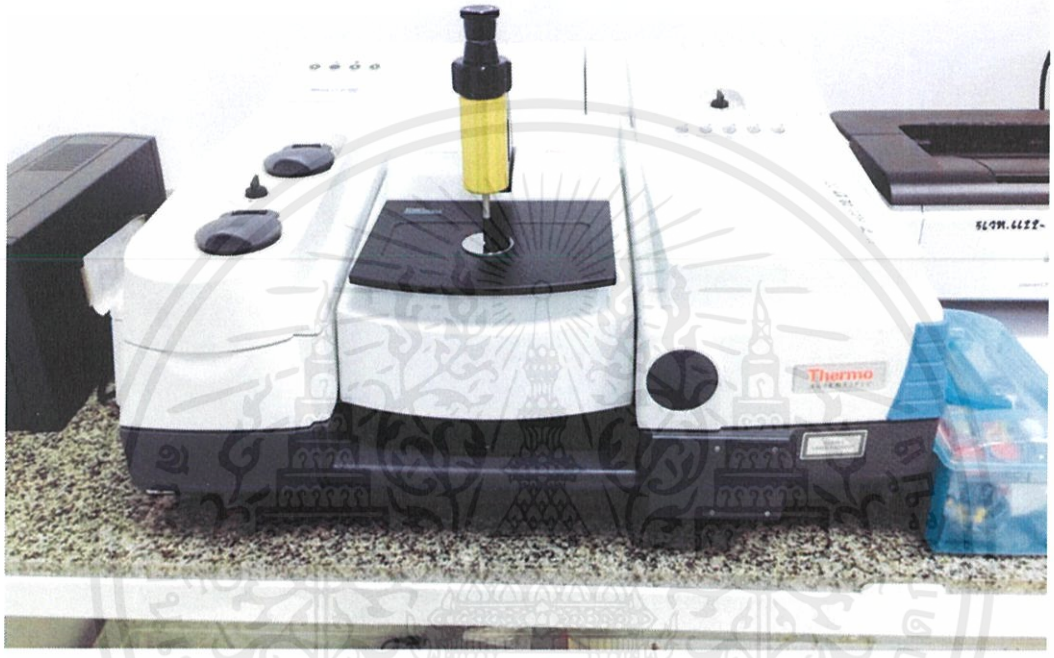
4.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเครื่อง FTIR

FT-IR spectrometer (Fourier Transform Infrared Spectrometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบ โครงสร้างของสาร โดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด ที่อยู่ในช่วงเลขคลื่น (Wave number) ประมาณ 12800 - 10 cm^{-1} ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ

รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าแต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้ ช่วงของรังสีอินฟราเรดที่ใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ทางเคมีได้แก่ช่วง 4000-200 cm^{-1} เนื่องจากรังสีอินฟราเรดมีพลังงานค่อนข้างต่ำ เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเข้าไปจะทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ของโมเลกุล การที่โมเลกุลจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้นั้นความถี่ของรังสีอินฟราเรดต้องเท่ากับความถี่การสั่นของ

เอกสารนี้ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น

โมเลกุลของสารนั้นๆ ซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ของการสั่นที่จำเพาะและแตกต่างกันไป ทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารอินทรีย์ได้ การแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Wave number กับ Transmittance ซึ่งเรียกว่า Infrared spectrum

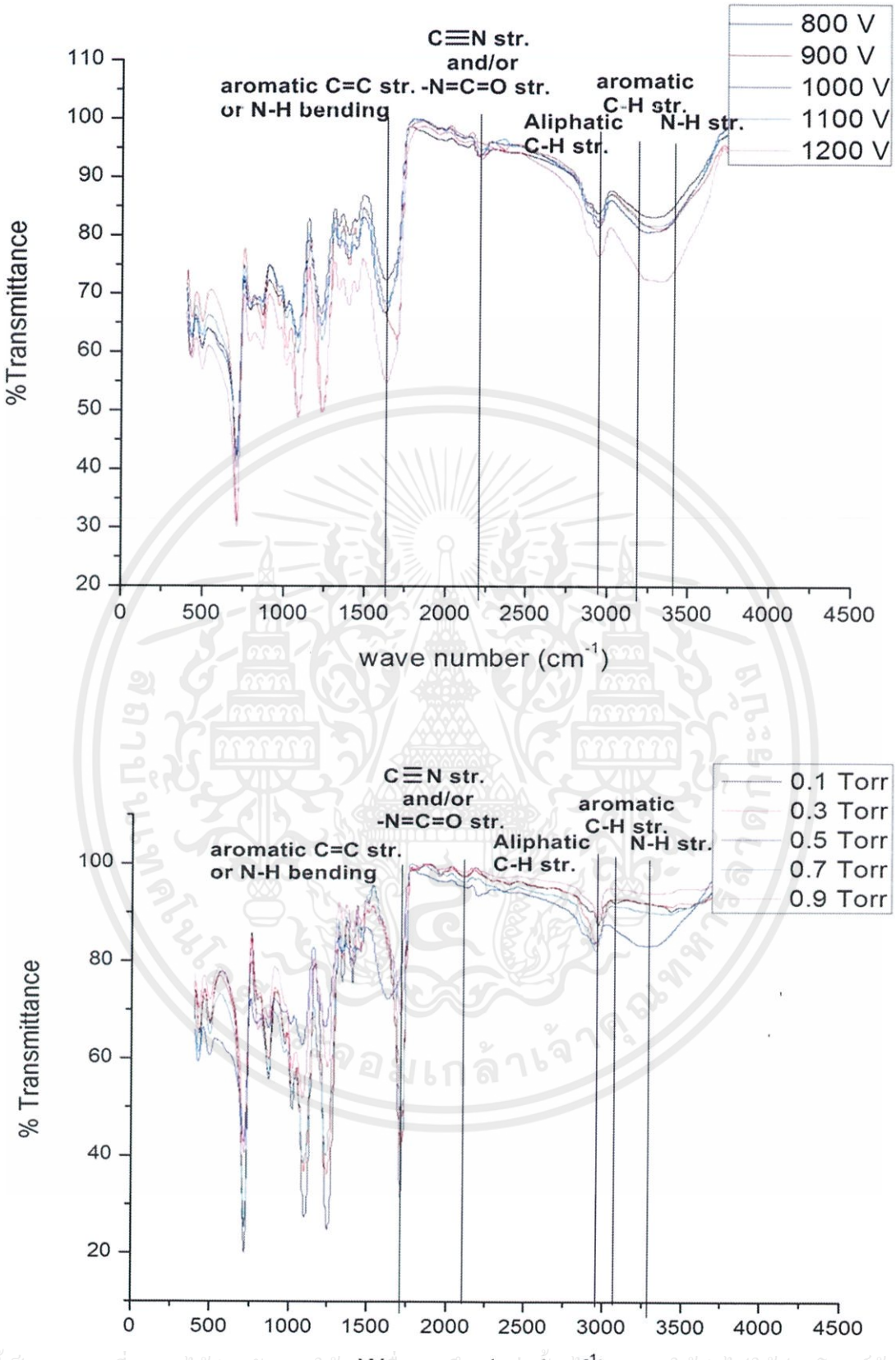


รูปที่ 4.23 ภาพแสดงเครื่อง FT-IRspectrometer

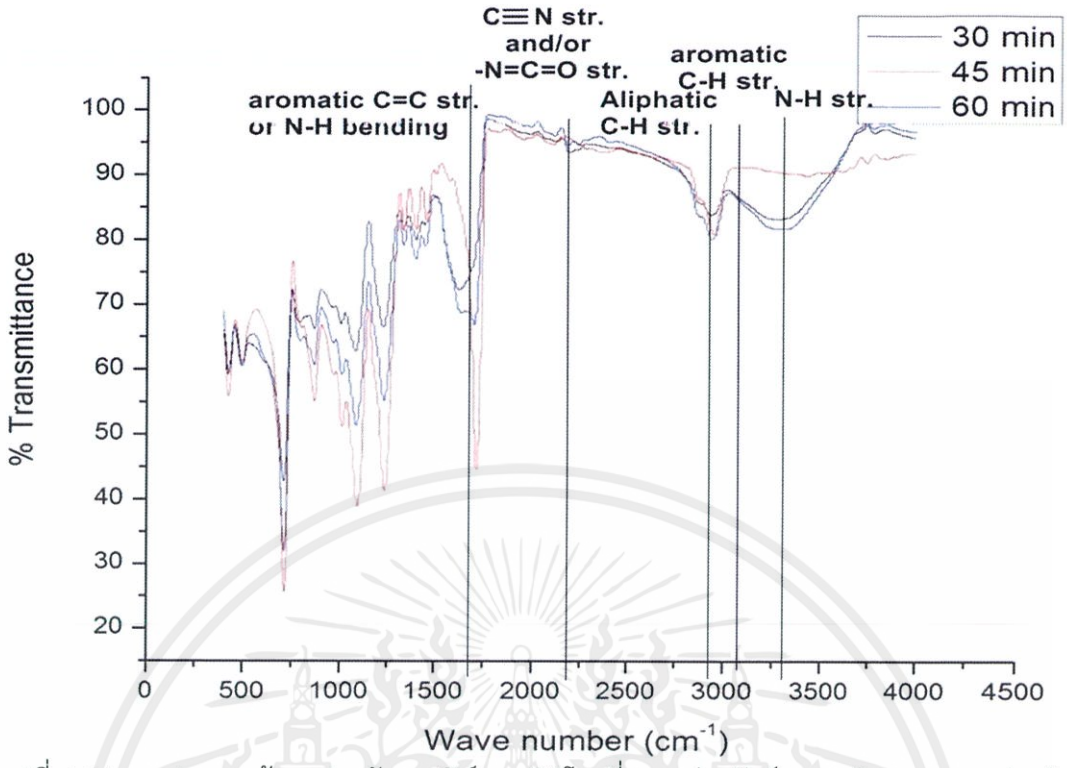
4.4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเครื่อง FTIR

การวิเคราะห์โครงสร้างพอลิพิโรลที่สร้างโดยวิธี Plasma Polymerization ด้วยเทคนิค ATR-FTIR จะวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีโดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



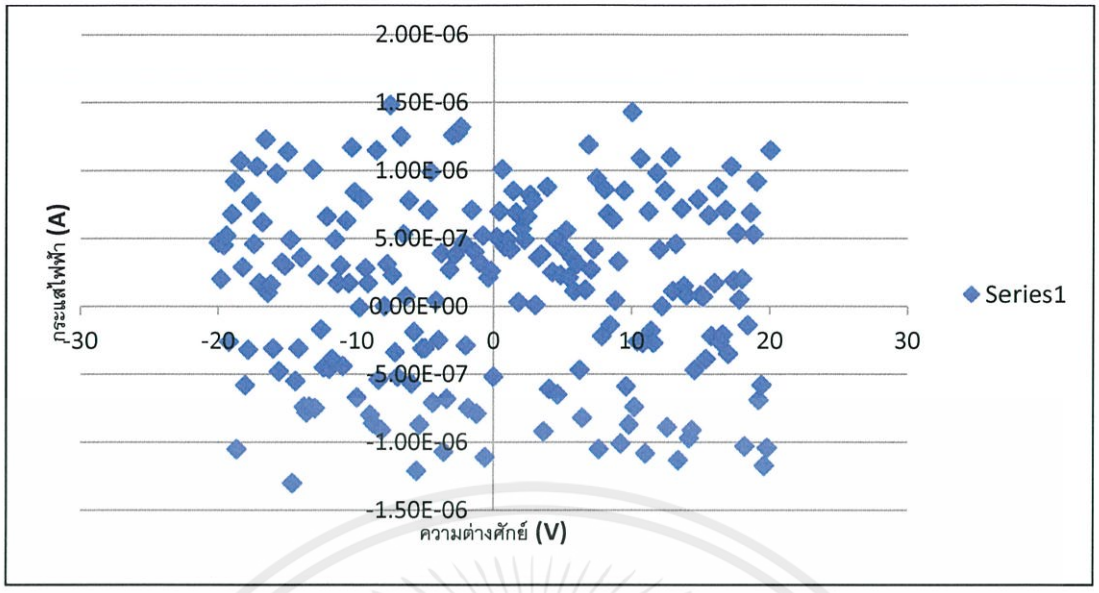
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงเส้นสเปกตรัมของฟิล์มพอลิพิโรลที่ความต่างศักย์ ความดัน และเวลาต่างกัน

การยืดขยายของ N-H ที่ถูกแผ่ออกของพิวโรที่ตำแหน่ง 3400 cm^{-1} ซ้อนทับกับการยืดตัวของวงแหวนอโรมาติค C-H ที่ตำแหน่งประมาณ 3100 cm^{-1} พบว่ามีการยืดตัวของสารประกอบพันธะ C-H ที่ตำแหน่งประมาณ 2950 cm^{-1} การรวมกันของ N-H หรือการยืดของวงแหวนอโรมาติค C=C ที่ตำแหน่งประมาณ 1600 cm^{-1} โดยตำแหน่งการยืดตัวของวงแหวนอโรมาติค C=C นี้ เป็นการบอกอย่างชัดเจนถึงโซ่ของพอลิพิโรล ได้ถูกยืนยันการมีอยู่ของโครงสร้างอโรมาติก และที่ตำแหน่ง 2200 cm^{-1} อาจจะบอกถึง C≡N และ/หรือ–N=C=O แสดงถึงออกซิเจนที่อาจมีอยู่ในระบบ

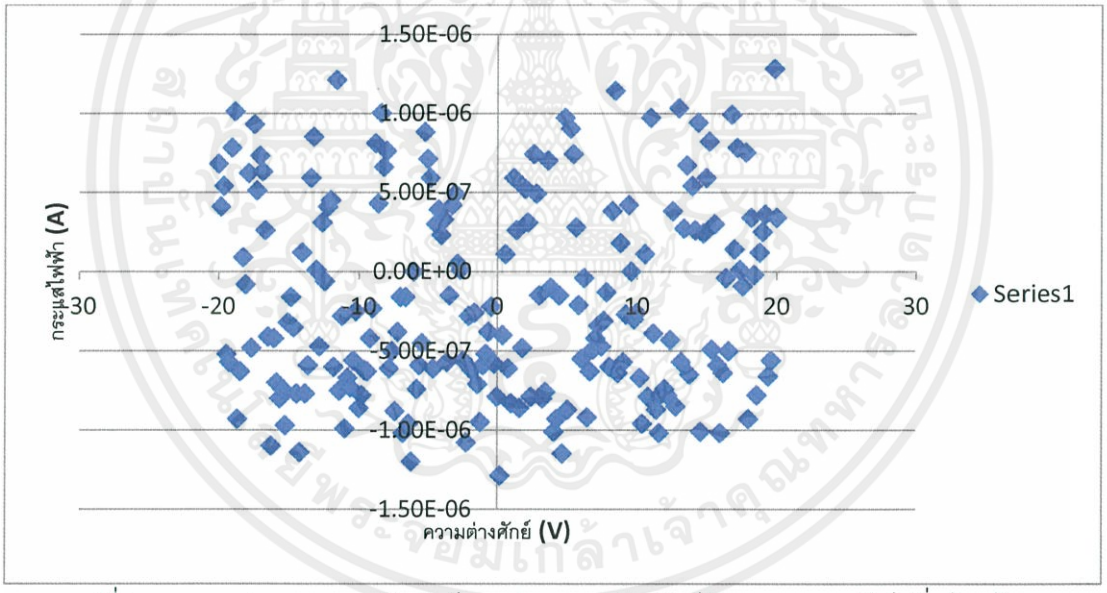
4.5 ผลการวิเคราะห์การนำไฟฟ้าของฟิล์ม

การวัดค่าการนำไฟฟ้าจะทำโดยการนำหัววัดสองตัวต่อคร่อมกับวัสดุที่ต้องการหาความต้านทาน โดยจ่ายความต่างศักย์ระหว่าง -20 ถึง 20 โวลต์ เข้าไปในวัสดุผ่านทางขั้วไฟฟ้าแล้ววัดค่ากระแสที่ไหลผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

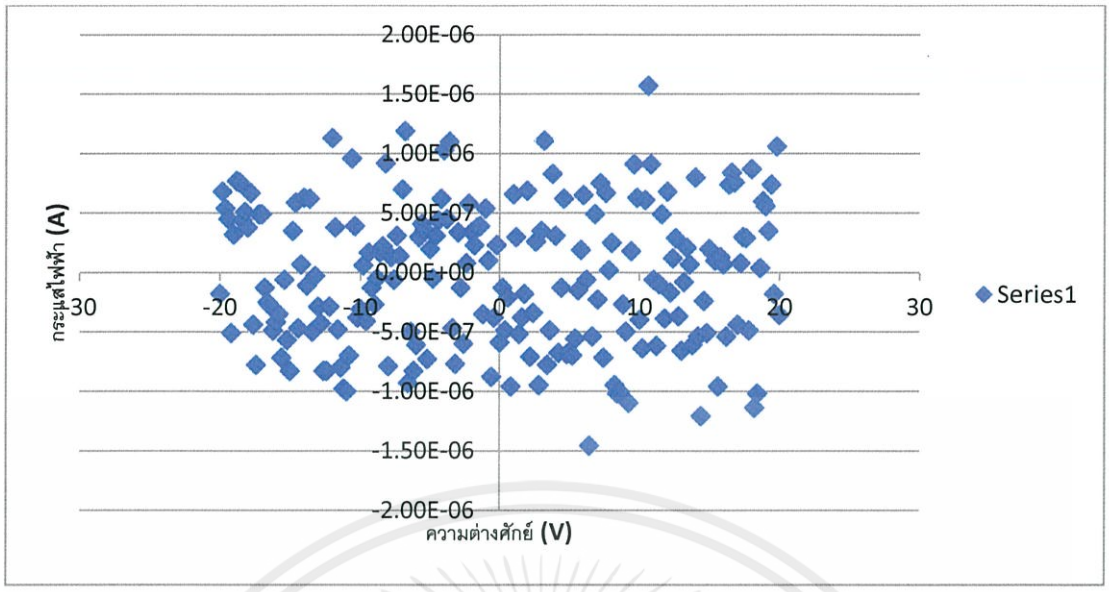


รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับกระแสของฟิล์มที่สร้างด้วยความต่างศักย์ 800 V



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับกระแสของฟิล์มที่สร้างด้วยความต่างศักย์ 1000 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



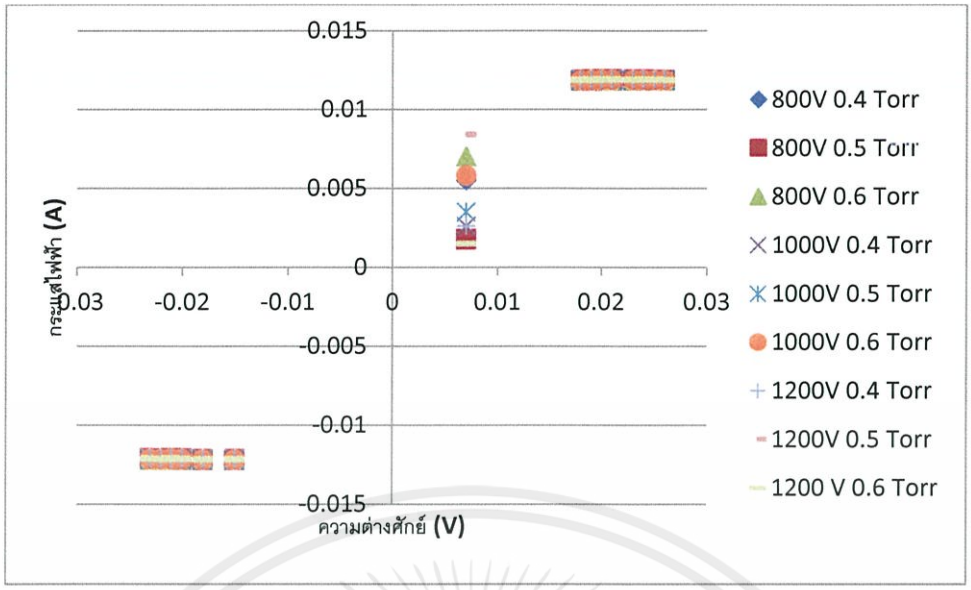
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับกระแสของฟิล์มที่สร้างด้วยความต่างศักย์ 1200 V

จากกราฟที่ได้แสดงให้เห็นว่า ฟิล์มที่ได้นั้นไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ซึ่งจากในการทดลองที่ผ่านมาฟิล์มบางพอลิพิโรลนั้นสามารถนำไฟฟ้าได้ที่ $1x10^{-7}$ - $8.4x10^{-8}$ S/cm แสดงให้เห็นว่าการสังเคราะห์ฟิล์มบางของผู้วิจัยนั้นไม่สามารถวัดค่าการนำไฟฟ้าได้ซึ่งทางผู้วิจัยคาดว่าที่ฟิล์มของทางผู้วิจัยไม่สามารถวัดค่าได้อาจเกิดจากการเคลือบของระยะห่างระหว่างทองแดงของขั้วทั้งสองข้าง

4.6 Schottky Diode

การวัดค่าคุณสมบัติของ schottky diode จะทำโดยการนำหัววัดสองตัวต่อคร่อมกับวัสดุที่ต้องการหาความต้านทาน โดยจ่ายความต่างศักย์ระหว่าง -20 ถึง 20 โวลต์ เข้าไปในวัสดุผ่านทางขั้วไฟฟ้าแล้ววัดค่ากระแสที่ไหลผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับกระแสของฟิล์มที่สร้างเป็นรอยต่อ แบบ Schottky

จากกราฟที่ได้ ฟิล์มมีลักษณะของการนำไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่า ลักษณะของทองแดงที่สร้างขึ้นนั้นเชื่อมต่อถึงกันเนื่องจากเครื่องวัดมีการจำกัดค่ากระแสไว้ที่ 120mA จึงไม่สามารถแสดงให้เห็นถึงค่าการนำไฟฟ้าที่จะแสดงออกถึงการเป็นตัวนำไฟฟ้าซึ่งเกิดจากการเคลือบของชั้นทองแดงได้มีพลังงานที่สูงในขณะการสปัตเตอริงทำให้ชั้นของทองแดงเชื่อมถึงกันค่าที่ได้จึงได้เป็นผลของตัวนำไฟฟ้าซึ่งทางผู้วิจัยเห็นว่าการแก้ไขจะสามารถทำได้โดยการเคลือบในชั้นสุดท้ายให้เคลือบด้วยเทคนิคอื่น เช่น Evaporation เป็นต้นแล้วจึงทำการวัดค่าอีกครั้งและสังเกตกราฟว่ามีลักษณะของ Schottky Diode หรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

ที่ความต่างศักย์ค่าต่างๆ พบว่าความเค้นของแผ่น PMMA ที่เคลือบด้วย Polypyrrole ด้วยวิธี Plasma Polymerization มีค่าสูงขึ้นแสดงให้เห็นว่าแผ่น PMMA มีความแข็งแรงมากขึ้น ค่าของจุดครากที่เพิ่มขึ้นแสดงถึงอัตราการยืดออกก่อนจะเสียรูปของแผ่น PMMA ที่เคลือบด้วย Polypyrrole ได้สูงขึ้นกว่าแผ่น PMMA ที่ไม่ได้เคลือบ

ที่ความดันค่าต่างๆ พบว่าความเค้นของแผ่น PMMA ที่เคลือบด้วย Polypyrrole ด้วยวิธี Plasma Polymerization มีค่าสูงขึ้นแสดงให้เห็นว่าแผ่น PMMA มีความแข็งแรงมากขึ้น ค่าของจุดครากที่เพิ่มขึ้นแสดงถึงอัตราการยืดออกก่อนจะเสียรูปของแผ่นฟิล์ม PMMA ที่เคลือบด้วย Polypyrrole ได้สูงขึ้นกว่าแผ่น PMMA ที่ไม่ได้เคลือบ และค่าความเครียดของแผ่นฟิล์ม PMMA ที่เคลือบด้วย Polypyrrole นั้นมีค่าสูงขึ้นทำให้แผ่นฟิล์มสามารถยืดออกได้มากขึ้นก่อนที่ฟิล์มจะขาดออกจากกัน

ที่เวลาค่าต่างๆ พบว่าที่เวลา 45 และ 60 นาที ค่าความเค้นของแผ่น PMMA ที่เคลือบด้วย Polypyrrole ด้วยวิธี Plasma Polymerization มีค่าลดลง แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงไปของแผ่นฟิล์มที่ยืดหยุ่นมากขึ้นมีลักษณะเหนียวกว่าเดิม ค่าของจุดครากที่เพิ่มขึ้นแสดงถึงอัตราการยืดออกก่อนจะเสียรูปของแผ่น PMMA ที่เคลือบด้วย Polypyrrole ได้สูงขึ้นกว่าแผ่นฟิล์ม PMMA ที่ไม่ได้เคลือบ และค่าของความเครียดของแผ่นฟิล์ม PMMA ที่เคลือบด้วย Polypyrrole นั้นมีค่าสูงขึ้นทำให้แผ่นฟิล์มสามารถยืดออกได้มากขึ้นก่อนที่ฟิล์มจะขาดออกจากกัน

5.2 ผลการทดสอบโครงสร้างพื้นผิว

ที่ความต่างศักย์ค่าต่างๆ พบว่าความหนาของ Polypyrrole ที่เคลือบบนแผ่นฟิล์มนั้นมีค่ามากที่สุดที่ ความต่างศักย์ 1000 V น้อยที่สุดที่ ความต่างศักย์ 1200 V ตามหลักแล้วค่าที่หนามากที่สุดควรจะเป็นที่ความต่างศักย์ 1200 V จากผลที่ได้อาจเกิดจากค่าของเงื่อนไขต่างๆ เช่นความดัน อัตราการไหลของแก๊สที่ไม่เหมาะสมกัน ทำให้ฟิล์มที่ได้ไม่หนาเท่าที่ควรจะเป็น และค่าความขรุขระของพื้นผิวที่ความต่างศักย์ 1100 V มีค่ามากที่สุดโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 58.990 nm ค่าความขรุขระที่ได้นั้นอาจเกิดจากความร้อนระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทำให้เกิดการเผาไหม้ของฟิล์ม Polypyrrole ที่เคลือบอยู่ระหว่างขั้วโลหะทั้งสองทำให้แผ่นฟิล์มนั้นหลุดออกมาจากขั้วอิเล็กโทรดทำให้การเคลือบนั้นไม่สม่ำเสมอ

ที่ความดันค่าต่างๆ พบว่าความหนาของ Polypyrrole ที่เคลือบบนแผ่นฟิล์มนั้นมีค่ามากที่สุดที่ความดัน 0.1 Torr โดยมีแนวโน้มยิ่งความดันมากขึ้นความหนาจะน้อยลงตามลำดับ ค่าความขรุขระนั้นมีค่ามากที่สุดที่ 0.7 Torr มีค่ามากที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 28.025 nm และที่น้อยที่สุดคือที่ 0.3 Torr โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 12.789 nm

ที่เวลาค่าต่างๆ พบว่าที่เวลา 60 นาที มีความหนามากที่สุด ตามปกติแล้วยิ่งใช้เวลาเคลือบมากควรจะได้ความหนาที่มากขึ้นแต่ที่เวลา 45 นาที พบว่าความหนาน้อยกว่า 30 นาทีอาจเกิดได้จากการล้างแผ่น PMMA ไม่สะอาดทำให้ Polypyrrole ติดฟิล์มได้ไม่ดีเท่าที่ควร

เอกสารนี้ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

5.3 การวัดค่าการดูดกลืนแสง

ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางพอลิพอโรลนั้นแสดงให้เห็นถึงการดูดกลืนแสงของฟิล์มพอลิพิโรลอยู่ในย่านความยาวคลื่น 317-331 nm อยู่ในคลื่นของแสงสีม่วงแสดงให้เห็นว่าแผ่นฟิล์มจะดูดกลืนแสงได้ดีในย่านนี้ ทำให้มีการส่องผ่านแสงเกิดขึ้นในช่วงระหว่าง 400 - 1000 nm โดยค่าที่ดูดกลืนแสงได้ดีที่สุดพบว่าอยู่ที่ความต่างศักย์ 1000 V และค่าที่ดูดกลืนแสงได้น้อยที่สุดอยู่ที่ความดัน 0.1 Torr

5.4 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

1. คุณสมบัติของสมบัติเชิงกลนั้นควรจะเปรียบเทียบกับแผ่นพลาสติกชนิดอื่นๆ ด้วย

2. เนื่องจากแผ่นฟิล์ม PMMA นั้นมีความหนามากกว่า Polymer ที่เคลือบไปมากควรจะทดสอบกับ Polymer ตัวอื่นหรือแผ่นฟิล์มตัวอื่นด้วยเพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้ว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] รศ. เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์. วัสดุศาสตร์มูลฐาน.ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2543.

[2] Charles A. Harper, Polymer Structure and Synthesis [Online]. Available from: http://www.globalspec.com/reference/64225/203279/1-2-polymer-structure-and-synthesis

[3] ยิ่งพิศ พรพัฒน์กุล. พอลิเมอร์นำไฟฟ้าพอลิอะนิลีนที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธีดิสเพอร์ชันพอลิเมอไรเซชัน.วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 21 ฉบับที่ 1 ม.ค. - เม.ย. 2554

[4] Jing Tian, Yen Wei, Dachuan Yang. Polymerization of pyrrole and its derivatives. Aug 6, 1992

[5] http://cmbi.bjmu.edu.cn/news/0010/43.htm

[6] Cruz, G.; Morales, J.; Olayo,R. "Films obtained by plasma polymerization of pyrrole" *Thin Solid Films* **1999**, *342*, 119.

[7] **Nalwa, H.S, ed.,** "Handbook of organic conductive molecules and polymers" Vol. 2 *John Wiley & Sons*, Chichester,**1997**.

[8] **Nalwa, H.S, ed.,** "Handbook of organic conductive molecules and polymers" Vol. 4*John Wiley & Sons*, Chichester,**1997**.

[9] กรวิชญ์ ดวงสา. Electropolymerization of Polypyrrole (PPy) for Detection of Sulfur dioxide (SO2) in Gas Sensors. สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. การประชุมวิชาการ ด้านพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ ครั้งที่ 1

[10] H. Shirakawa, E.J. Louis, A.G. MacDiarmid, C.K. Chiang, and A.J. Heager, Synthesis ofconducting organic polymers: halogen derivatives of polyacethylene. Chemical Communications, 1997

[11] J.C. Vidal, E. Garcia, J.R. Castillo, Anal. Chim.Acta 385 (1-3) (1999) 213.

[12] T.E. Campbell, A.J. Hodgson, G.G. Wallace, Electroanalysis 11 (4) (1999) 215.

[13] D. Kincal, A. Kamer, A.D. Child, J.R. Reynold, Synth. Met. 92 (1998) 53

[14] Jing Tian, Yen Wei, Dachuan Yang. Polymerization of pyrrole and its derivatives. Aug 6, 1992

[15] D. Kincal, A. Kamer, A.D. Child, J.R. Reynold, Synth. Met. 92 (1998) 53

[16] DechaLapsongphol. Fabrication of electronic devices using plasma-polymerized polypyrrole.
Master's Thesis, Chulalongkorn University, 2011.

[17] Piezoelectric Effect [Online]. Available from: http://www.cosmic-energy.org/?page_id=771

เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์ เอกสารนี้ได้รับการสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น และไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[18] D. Yan, X. Xu, G. Ma, J. Sheng. Low temperatureplasma-initiated precipitation copolymerization of styrene and maleic. Journal of applied Polymer Science 125 (2012) 1352-1356

[19] F.F. Shi, Recent advances in polymer thin films prepared by plasma polymerization Synthesis, structural characterization, properties and applications, Surface and Coatings Technology 82 (1996) 1-15

[20] [Online]. Available from: http://www.degruyter.com/view/j/polyeng.2013.33.issue-5/polyeng-2012-0122/graphic/polyeng-2012-0122_fig14.jpg

[21] BoonchoatPaosawatyanyong, KanyaTapaneeyakorn, WorawanBhanthumnavin. AC plasma polymerization of pyrrole. Surface & Coatings Technology 204 (2010) 3069–3072

[22] OzgurAtalay, William Richard Kennon, and Muhammad Dawood Husain. Textile-Based Weft Knitted Strain Sensors: Effect of Fabric Parameters on Sensor Properties. Sensors (Basel, Switzerland) Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI) 2013

[23] Piezoelectric Effect [Online]. Available from: http://www.cosmic-energy.org/?page_id=771

[24] D. Berlincourt, H.H.A. Krueger. Dependence of the Ratio of Piezoelectric Coefficients on Density and Composition of Barium Titanate Ceramics. Physical Review 105 (1957) 56-57

[25] Stanley Kona, KennOldhamb and Roberto Horowitza. Piezoresistive and Piezoelectric MEMS Strain Sensors for Vibration Detection. Computer Mechanics Laboratory, University of California, Berkeley, CA 94720;bArmy Research Lab, 2800 Powder Mill Road, Adelphi, MD 20783 Proc. of SPIE Vol. 6529 65292V-1

[26] L. Dunne, S. Brady, B. Smyth, D. Diamond, Initial development and testing of a novel foam-based pressure sensor for wearable sensing, Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation

[27] N. Pini, S. Busato, H-R. Elsener, P. Ermanni, In situ growth of interdigitated electrodes made of polypyrrole for active fiber composites, Polymers for Advanced Technologies 18 (2007) 249-253

[28] K. Yamada, J. Sone, J. Chen, Three-dimensional photochemical microfabrication of conductive polymers in transparent polymer sheet, Optical Review 16 (2009) 208-212

[29] William D. Callister, Jr.,Materials Science and Engineering:An Introduction, 7ed 1940

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น รวมทั้งห้ามมิให้ทำซ้ำ ดัดแปลง เผยแพร่ หรือนำไปฝากขาย ไม่อนุญาตให้นำไปใช้

[30] DechaLapsongphol. Fabrication of electronic devices using plasma-polymerized polypyrrole.
Master's Thesis, Chulalongkorn University, 2011.

[31] EUCLID TECHLABS Thick Film Ceramic/Dielectric Sputtering Metallization Technology Available from:
http://www.euclidtechlabs.com/product/sputtering.php

[32] ณัฐพร พรหมรส. การออกแบบและลักษณะเฉพาะของหัวดีซีแมกนิตรอนสปัตเทอริง. 2548

[33] FT-IR Spectroscopy Attenuated Total Reflectance (ATR) Available from:

[34] ฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำและรอยต่อ Physics of semiconductors and junctions นรินทร์ สิริกุล-รัตน์

[35] Dr. Dmitri Kopeliovich.Tensile test and Stress-Strain DiagramAvailable from:
http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=tensile_test_and_stress-strain_diagram

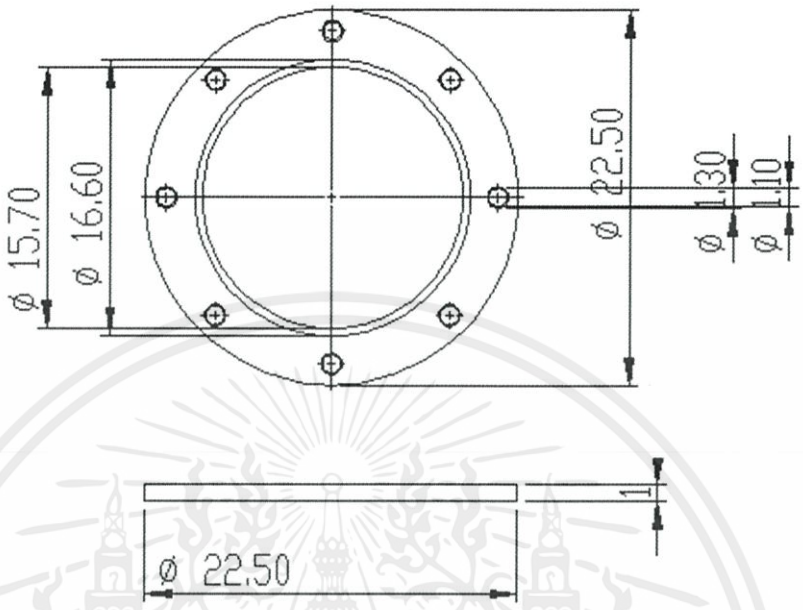
[36] Norihiro Inagaki.Plasma Surface Modification and Plasma Polymerization.
Technomic company (1996) 156

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

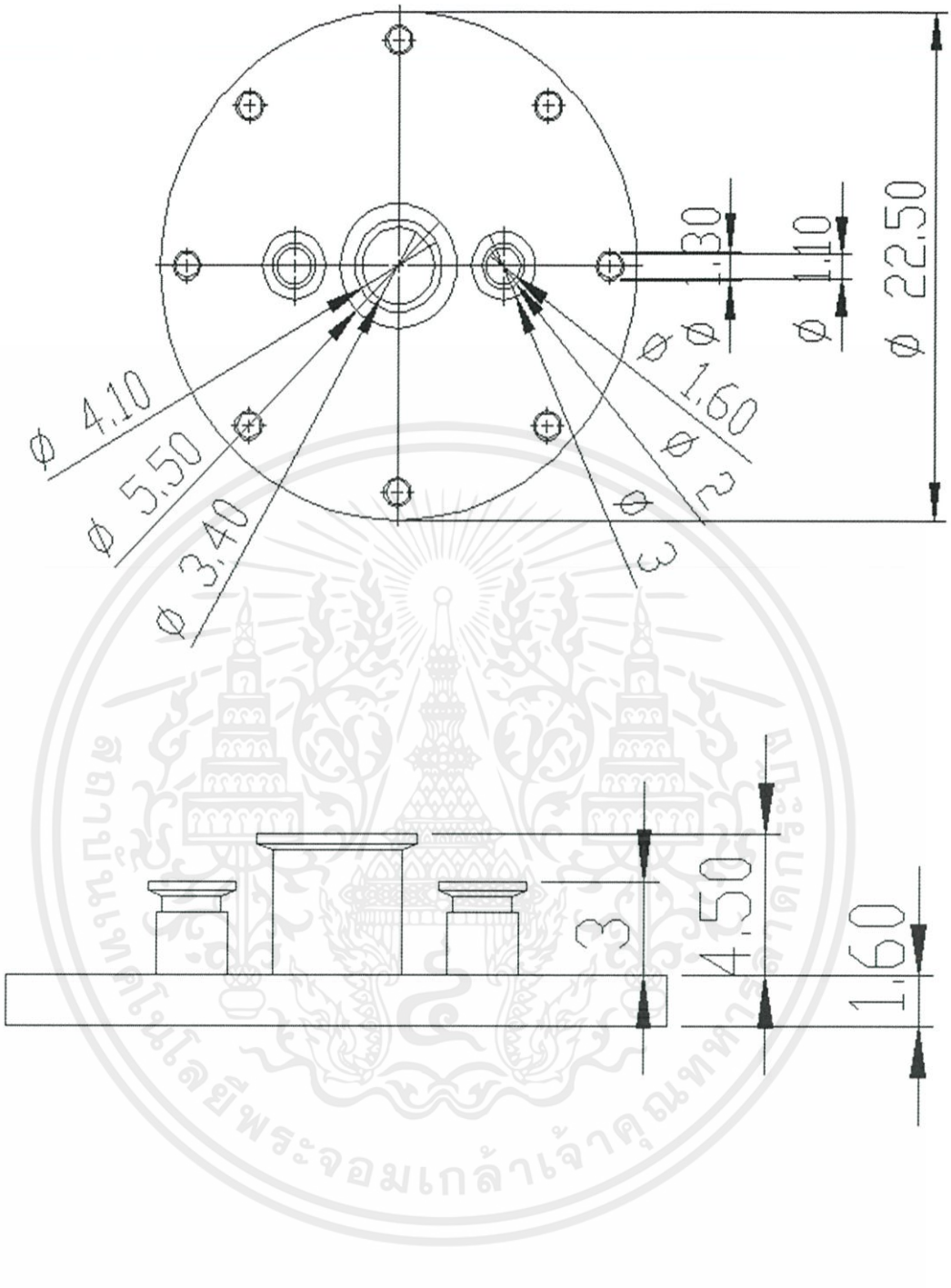
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

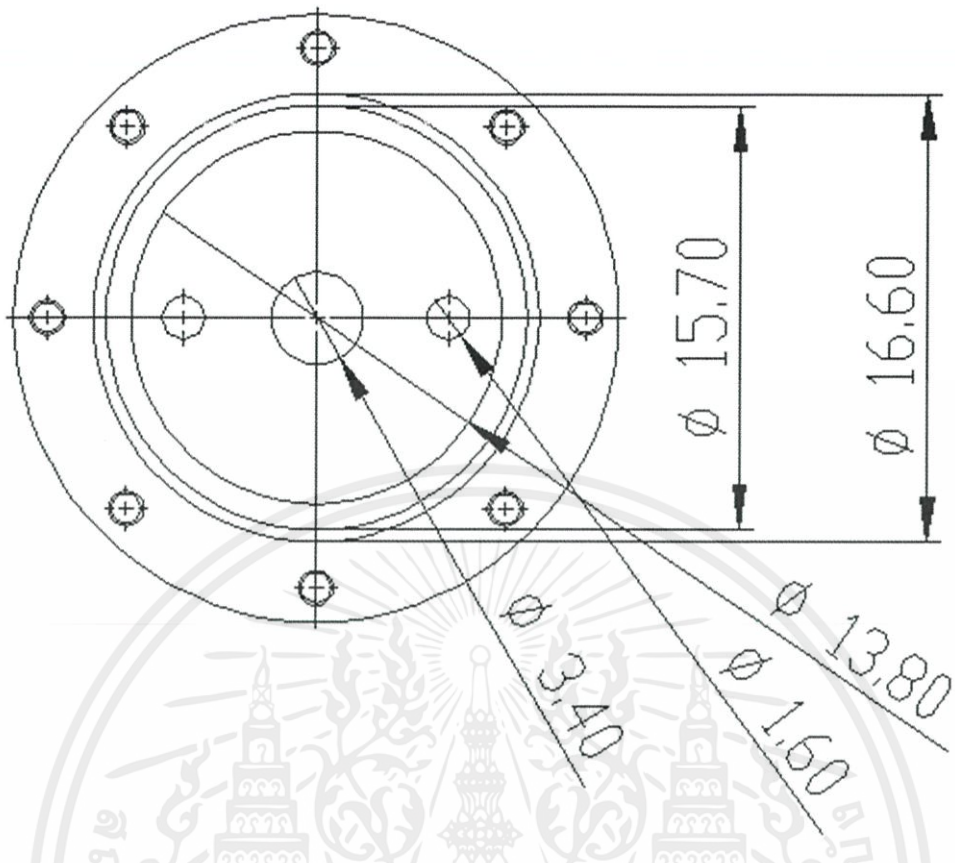


รูปที่ 1ก ภาพแสดงเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นสแตนเลสด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

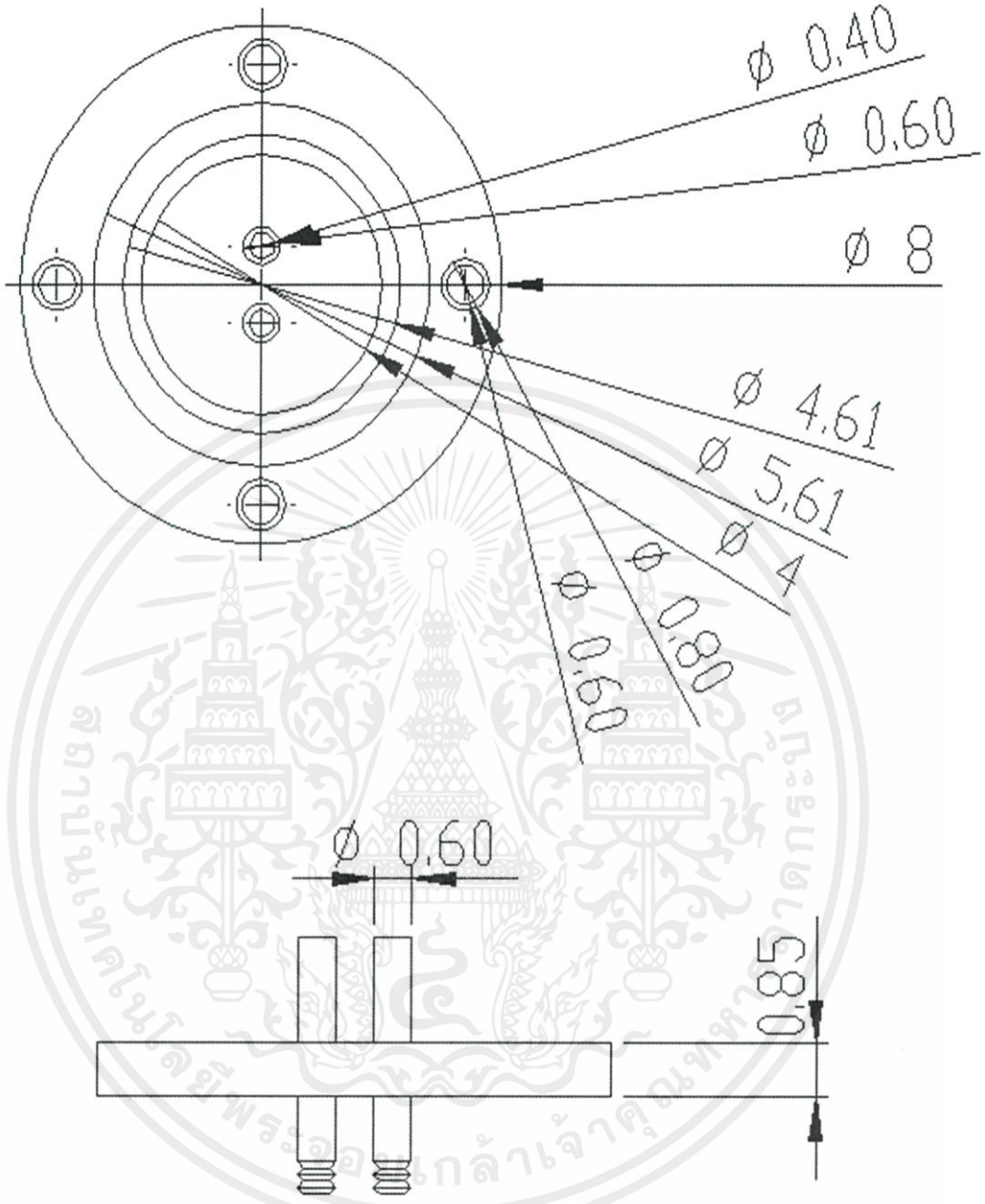


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



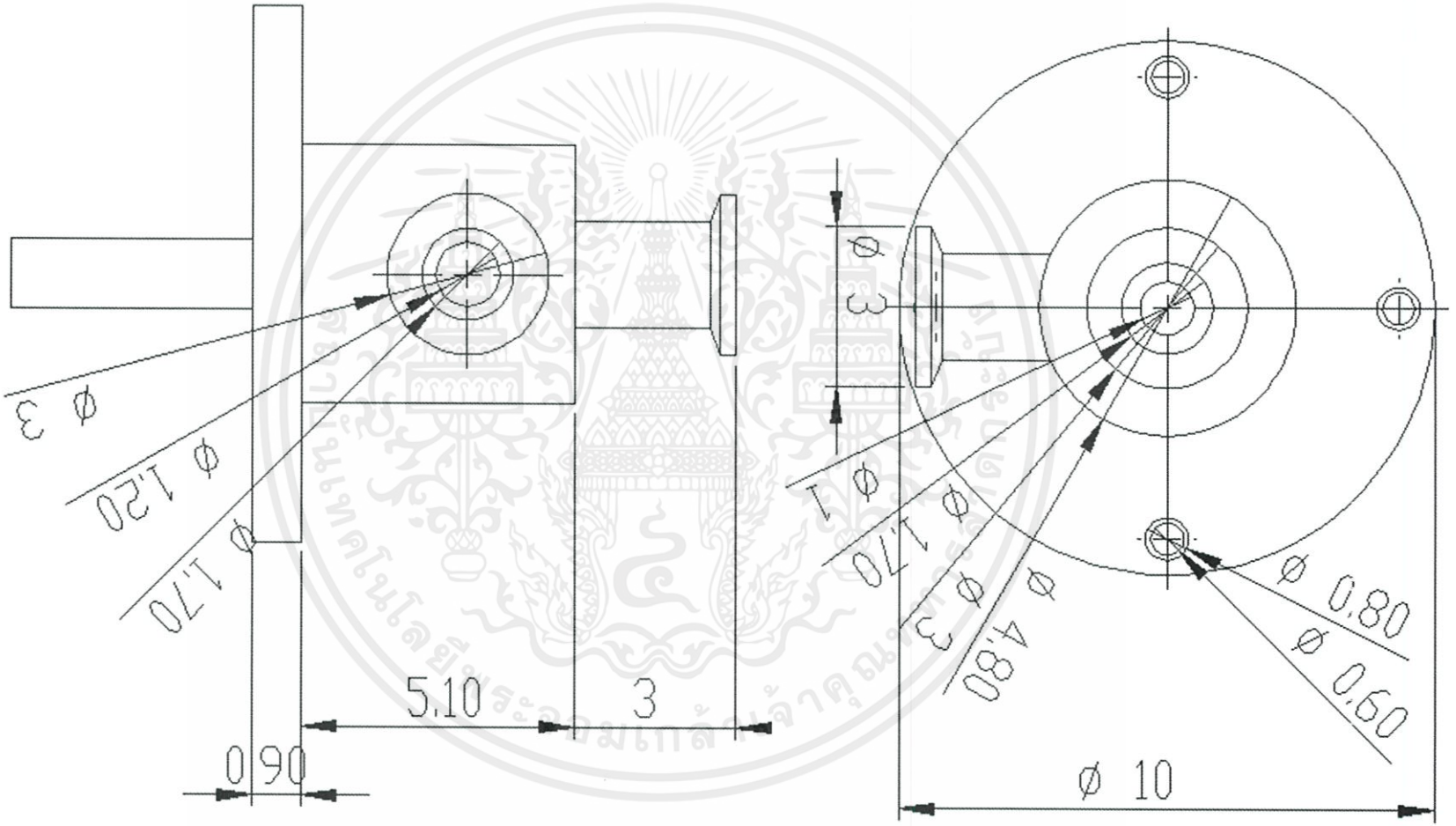
รูปที่ 2ก ภาพแสดงเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นสแตนเลสด้านบน

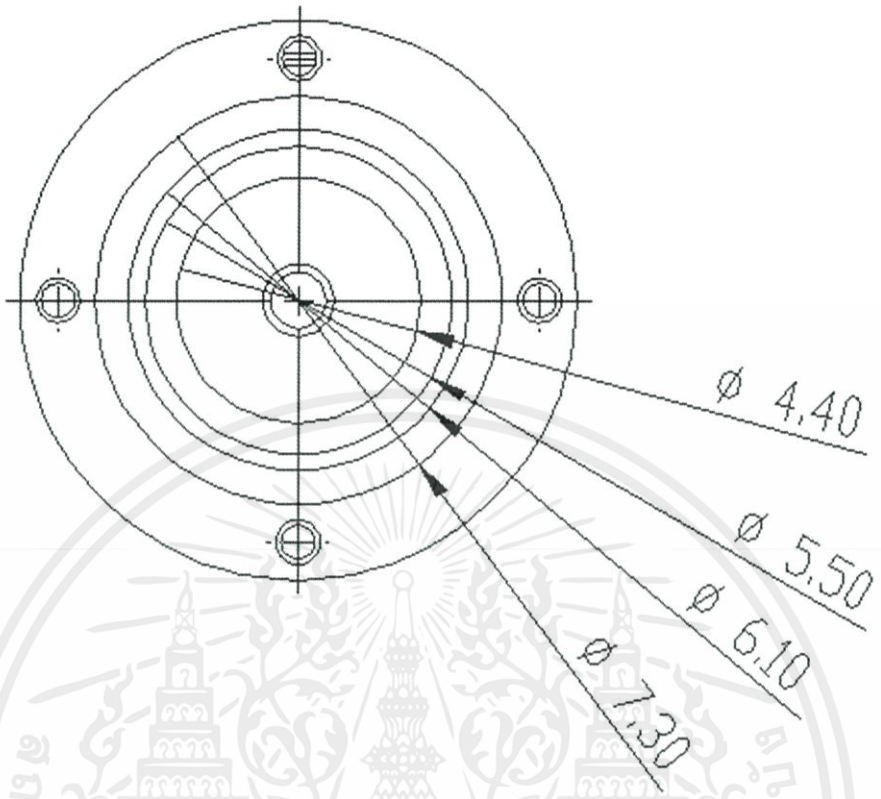
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3ก ภาพแสดงเส้นผ่านศูนย์กลางของ Monomer Vessel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


ø 3
ø 1.20
ø 1.70
5.10
3
0.90
ø 3
ø 1
ø 1.70
ø 3
ø 4.80
ø 0.80
ø 0.60
ø 10



รูปที่ 4ก ภาพแสดงเส้นผ่านศูนย์กลางของ Cold Trap

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้วิจัย

นายสุกฤษฎ์ คงนิธิเฉลิม เกิดวันที่ 29 เมษายน 2536 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร จบชั้นมัธยมศึกษาที่ โรงเรียนเทพศิรินทร์ร่มเกล้า ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เกรดเฉลี่ย 2.62

ประวัติการทำงาน

ผู้ช่วยสอนวิชา Intermediate Laboratory 1 (การตกแบบอิสระ, สนามแม่เหล็กโลก), 2 (เทอร์มิสเตอร์, เฮมโอล์ซเรโซแนน) 2556-2558

ฝึกงานที่ห้องปฏิบัติการพลาสมาและวัสดุขั้นสูงภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์ 1 เม.ย. - 31 พ.ค.2558

ผู้ช่วยออกข้อสอบวิชาฟิสิกส์ในกิจกรรมงานสัปดาห์วันวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้ช่วยวิจัยห้องแลบปฏิบัติการพลาสมาและวัสดุขั้นสูงภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์

ผลงานด้านวิชาการ

S.Kongnithichalerm, S.Janthasen, N.Promros, R.Songtanasi, S.Sanorpim ,B.Paosawatyanyong The 40th Congress on Science and Technology of Thailand (STT40),P.72, Piezoresistive Effects And Mechanical Properties Of Polypyrrole Films Synthesize On Polymethyl Methacrylate By Alternating Current Induced Plasma Polymerization, 2014 (Abstract & Poster)

P.Sittimart, N.Patanoo, S.Kongnithichalerm, M.Horprathum, N.Promros, W.Bhuanthunnavin, B Paosawatyanyong The 40th Congress on Science and Technology of Thailand (STT40),P.70, Magnetic Field Characteristics of a Locally Designed Compact Mangnetron Sputtering Source, 2014 (Abstract & Poster)

A.Kangwalkai, S.Kongnithichalerm, W.Kaenrai, N.Promros, B.Paosawatyanyong, S.Kiatgamolchai The 40th Congress on Science and Technology of Thailand (STT40),P.69, Plasma Parameters Of Direct-Current Glow Discharge Obtained By Single Langmuir Probe Technique, 2014 (Abstract & Poster)

N.Promros, P.Sittimart, N.Patanoo, S.Kongnithichalerm, M.Horprathum, W.Bhaunthumanavin, B.Paosawatyanyong The 2nd International Conference on Applied Physics And Material Applications,P.246, Physical Properties of Copper Films Deposited by an Affordable Compact-Size Magnetron Sputtering Source with Changing Outer Magnet Ring, 2015 (Abstract & Poster)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บุคคลอ้างอิง

ดร.ณัฐพร พรหมรส อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผศ. ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ นางสาวสิริพร จันทะเสน เกิดเมื่อวันที่ 15 พฤษาภาคม พ.ศ.2536 ที่จังหวัดจันทบุรี

ประวัติการศึกษา

ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย ที่โรงเรียนสตรีมารดาพิทักษ์ จังหวัดจันทบุรี

ระดับการศึกษาปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์ทำงาน

- ❖ โครงการรางวัลนวัตกรรมแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14
  - การพัฒนาระบบอัลตร้าโซนิคในการผลิตน้ำทะเลเป็นน้ำจืด
- ❖ การประกวด Lamina Innovative contest
- ❖ เข้าร่วมงานการประกวดโครงการวิจัยและสิ่งประดิษฐ์เพื่ออนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อม ระดับอุดมศึกษา ชิงถ้วยพระราชทานสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดา ฯ สยามบรมราชกุมารี คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
  - Applied Table take care doctor

Acceptance abstract

S.Kongnithichalerm, S.Janthasen, N.Promros, R.Songtanasi, S.Sanorpim ,B.Paosawatyanyong The 40th Congress on Science and Technology of Thailand (STT40)

- ➢ Piezoresistive Effects and Mechanical Properties of Polypyrrole Films Synthesized on Polymethyl Methacrylate by Alternating Current Induced Plasma Polymerrization

บุคคลอ้างอิง

ดร.ณัฐพร พรหมรส อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผศ. ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้