

การพัฒนาขั้วไฟฟ้าจากวัสดุผสมระหว่าง พอลิเมอร์นำไฟฟ้ากับวัสดุนาโน

DEVELOPMENT OF COMPOSITED ELECTRODE FROM CONDUCTIVE POLYMER:  
NANOMATERIAL



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุนาโน

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF COMPOSITED ELECTRODE FROM CONDUCTIVE  
POLYMER: NANOMATERIAL



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN NANOMATERIALS ENGINEERING  
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY KMITL  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี**  
**วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**โครงการพิเศษ**

**หัวข้อโครงการพิเศษ**      การพัฒนาขั้วไฟฟ้าจากวัสดุผสมระหว่าง พอลิเมอร์นำไฟฟ้ากับวัสดุ  
นาโน

**Special Project Title**      Development of composited electrode from conductive  
polymer : nanomaterial

**นักศึกษา**                      นางสาวจินนภา ดวงพาลี                      รหัสประจำตัว 57110005  
   นางสาวธนัชชา บุญเรืองศักดิ์                      รหัสประจำตัว 57110021

**ปริญญา**                      วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

**ภาควิชา**                      นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

**สาขาวิชา**                      วิศวกรรมวัสดุนาโน

**ปีการศึกษา**                      2560

**อาจารย์ที่ปรึกษา**                      ผศ.ดร.นวพันธ์ ชัยนกิจ

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. นวพันธ์	ชัยนกิจ	
ผศ.ดร. ทศิตยาภรณ์	ทิววงศ์	
ดร.กิตติพงษ์	อำนวยการสวัสดิ์	

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้  
 โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน  
**KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดารินี พรหมโยธิน)  
 หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี  
 วันที่..... 15 ..... เดือน..... มิ.ย. .... พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การพัฒนาขั้วไฟฟ้าจากวัสดุผสมระหว่างพอลิเมอร์นำไฟฟ้ากับวัสดุนาโน
นักศึกษา	นางสาวจินนภา ดวงพาลี นางสาวธนัชชา บุญเรืองศักดิ์
รหัสประจำตัว	57110005 57110021
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. นวพันธ์ ชัยนกิจ

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการเตรียมชั้นสารผสมระหว่างวัสดุนาโนกับพอลิเมอร์นำไฟฟ้า เพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถโค้งงอได้ โดยใช้สมบัติการนำไฟฟ้า และความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ร่วมกับการนำไฟฟ้าที่ดีของวัสดุนาโน โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้วัสดุนาโนของ อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ (indium tin oxide nanoparticles; ITO-NPs) และคาร์บอนนาโนทิวป์ (carbonnanotube; CNTs) ซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงที่ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากมีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี มีความเสถียรทางเคมีสูง ในขณะที่พอลิเมอร์ที่เลือกใช้ร่วมกับวัสดุนาโน คือ Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)/poly(styrene sulfonic acid) หรือ PEDOT:PSS เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดี มีเสถียร มีความโปร่งแสงสูง มีความยืดหยุ่น และทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมได้ดี รวมทั้งสามารถรับและส่งผ่านพาหะกับ ITO-NPs, CNTs ได้ดี โดยฟิล์มบางของสารผสมระหว่างวัสดุนาโน ITO-NPs, CNTs และ PEDOT:PSS จะถูกเตรียมโดยวิธีทางสารละลาย (solution process) โดยทำการศึกษาเพื่อหาวิธีการเตรียมที่มีประสิทธิภาพสูง รวมทั้งทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของสารทั้งสองชนิดเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียมขั้วไฟฟ้า โดยพิจารณาจากสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางสารผสมที่เตรียมได้

**คำสำคัญ :** พอลิเมอร์นำไฟฟ้า, อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ (indium tin oxide nanoparticles; ITO-NPs), คาร์บอนนาโนทิวป์ (carbonnanotube; CNTs), ขั้วไฟฟ้า

<b>Thesis Title</b>	Development of composited electrode from conductive polymer: nanomaterial
<b>Student</b>	Miss. Jinnapa Duangphalee Miss. Thanatcha Bunrueangsak
<b>Student ID.</b>	57110005 57110021
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering
<b>Program</b>	Nanomaterials Engineering
<b>Year</b>	2017
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Dr. Navaphan Kayunkid

## ABSTRACT

Electrode is an important component determining the performance of electronic device. Electrode with high flexibility is one of the requirements for plastic electronic applications. The aim of this research is to study the possibility to fabricate the flexible electrode from composited materials between nanoparticles and conductive polymer. In this work, indium tin oxide (ITO) nanoparticles and carbonnanotubes (CNTs) are chosen due to its excellent in electrical properties and environmental stability. On the other hand, two requirements are required for the conducting polymer blended with ITO nanoparticles and CNTs; (i) high conductivity and (ii) ability to transfer charges from/to ITO nanoparticles and CNTs. Among hundreds of conducting polymers used in plastic electronic applications, poly(3,4-ethylenedioxythiophene)/poly(styrene sulfonic acid) (PEDOT:PSS) is suitable material owing to its good conductivity and high solubility in lots of organic solvents (alcohol/water) as well as well matching energy between HOMO level and work function of ITO, CNTs leading to effectively transfer charges between two materials. The solution methods are employed to find the proper preparation method while the ratio between two materials are varied to determine the optimization conditions by considering the optical and electrical properties of the composited electrode.

**Keyword** : Conducting polymers, indium tin oxide nanoparticles; ITO-NPs, carbonnanotube; CNTs, Electrode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นวพันธ์ ชยันกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา และความช่วยเหลือ ในทุกเรื่องที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย จนทำให้งานลุล่วงได้ดี ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หุติยาภรณ์ ทิววงศ์ และ ดร.กิตติพงศ์ อำนวยสวัสดิ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งให้คำแนะนำและแก้ไขเพิ่มเติม ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คณะอาจารย์คณะวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตลอดระยะเวลาการศึกษา จนผู้วิจัยสามารถนำความรู้มาใช้ในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จ

ขอขอบคุณ คุณสุกฤตยะ เจษฎาลักษณ์ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี คณะวิทยาลัยนาโนพระจอมเกล้าลาดกระบัง และห้องปฏิบัติการควอนตัมและสารกึ่งตัวนำทางแสง (QOS LAB) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง รวมทั้งเจ้าหน้าที่ในภาควิชาวิศวกรรมวัสดุนาโนทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือแก่ผู้วิจัยตลอดมา

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา และญาติๆ เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้การสนับสนุน เป็นกำลังใจ และให้ความสำคัญต่อการศึกษามาเสมอ

จินนภา ดวงพาลี  
ธันชชา บุญเรืองศักดิ์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญภาพ.....	vii
สารบัญตาราง.....	xiii
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับสมบัติและโครงสร้างของสาร.....	6
2.1.1 ออกไซด์ของอินเดียมที่เจือด้วยดีบุก (Tin doped indium oxide-ITO).....	6
2.1.2 สาร PEDOT-PSS.....	8
2.1.3 คาร์บอนนาโนทิวป์ (Carbon nanotube/CNTs).....	9
2.1.4 สารกึ่งตัวนำ (semiconductor).....	11
2.2 เทคนิคการเคลือบฟิล์ม.....	17
2.2.1 เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางแบบการนำพาการระเหย (Rapid convective eposition).....	17
2.2.2 เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางแบบดอกเตอร์เบลต (Doctor Blade).....	18
2.2.3 เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating).....	19
2.3 พลาสมา (Plasma).....	20
2.3.1 การเกิดอนุภาคที่มีประจุ (Production of charged particles).....	20
2.3.2 การแตกตัวโดยการชน (Ionization by collision).....	21
2.3.3 ปฏิกิริยาเคมีของพลาสมา (plasma surface chemistry).....	22
2.4 แรงตึงผิว (Surface tension).....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5 มุมสัมผัส (contact angle).....	26
2.6 ทฤษฎีเบื้องต้นในการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม.....	28
2.6.1 เครื่องวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด.....	28
2.6.2 เครื่องวัดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ด้วยแสงช่วง UV-Visible.....	31
2.7 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	35
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	37
3.1 ขั้นตอนดำเนินการศึกษาวิจัย.....	37
3.2 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น.....	38
3.2.1 กระบวนการเคลือบฟิล์มโดยวิธีต่างๆ.....	38
3.2.2 การศึกษาการทำงานของเครื่องมือชนิดต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย..	39
3.3 การออกแบบการดำเนินการทดลอง.....	39
3.3.1 วัสดุที่ใช้ในการดำเนินการทดลอง.....	39
3.3.2 สารเคมีที่ใช้ในการดำเนินการทดลอง.....	40
3.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการทดลอง.....	42
3.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	46
3.4.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานก่อนการเคลือบผิว.....	46
3.4.2 ขั้นตอนกระบวนการเตรียมพื้นผิวด้วยพลาสมา.....	49
3.4.3 ขั้นตอนกระบวนการเคลือบฟิล์ม.....	49
3.4.4 ขั้นตอนการทดสอบ.....	53
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	56
4.1 ผลการทดลองเพื่อหาวิธีปลูกฟิล์มของข้าวให้มีประสิทธิภาพ.....	56
4.1.1 การหยดเคลือบ (drop cast method).....	56
4.1.2 การ spin coating.....	63
4.1.3 การ plasma O <sub>2</sub> + ปาดเคลือบ.....	65
4.2 ทดลองเพื่อหาอัตราส่วนในสารผสมระหว่างอนุภาคนาโน กับพอลิเมอร์ที่มี ความโปร่งแสงและสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีที่สุด.....	68
4.2.1 การเปรียบเทียบขั้นในการปลูกฟิล์มบาง.....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2.2 การเปรียบเทียบอัตราส่วนในการปลูกฟิล์มบางของสารละลาย PEDOT- PSS, ITO และ CNT.....	76
4.3 ทดลองเพื่อหาสมบัติในการโค้งงอ.....	100
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง ปัญหา และแนวทางแก้ไข.....	105
5.1 บทสรุป.....	105
5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข.....	106
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	106
บรรณานุกรม.....	107
ประวัติผู้เขียน.....	109



# สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของคอนจูเกตพอลิเมอร์ที่ใช้ในงานด้านอิเล็กทรอนิกส์.....	2
2.1 โครงสร้างผลึกของ ITO.....	7
2.2 แสดงโครงสร้างทางระดับพลังงานของ ITO.....	8
2.3 แสดงโครงสร้างของ PEDOT-PSS.....	9
2.4 แสดงลักษณะโครงสร้างของ CNTs.....	9
2.5 แสดงลักษณะของการม้วนแผ่นกราฟีนเป็นท่อนาโน.....	10
2.6 ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในแต่ละลำดับชั้น.....	12
2.7 แสดงวงโคจร นิวเคลียส และระดับวงโคจรของอิเล็กตรอน.....	13
2.8 (a) แสดงระดับพลังงานของสถานะ $2p$ , $3s$ และ $3p$ ในกลุ่มของอะตอมที่เหมือนกับเป็นฟังก์ชันของช่องว่างอะตอม (b) แสดงแถบพลังงาน และตำแหน่งของช่องว่างภายในโครงสร้างตามตำแหน่งในอะตอม.....	14
2.9 แสดงแผนภาพระดับพลังงานสำหรับผลึกของอะตอมต่างๆไประดับความนำ (conduction band) และแถบวาเลนซ์ (valence band).....	14
2.10 (a) ภาพแสดงแถบพลังงานของฉนวน (b) ภาพแสดงแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ (c) ภาพแสดงแถบพลังงานของตัวนำไฟฟ้า.....	15
2.11 เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางแบบการนำพาการระเหย.....	18
2.12 เทคนิคการเคลือบแบบดอกเตอร์เบลด.....	19
2.13 เทคนิคการเคลือบแบบการหมุนเหวี่ยง.....	19
2.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มกับความเร็วเวลาและปริมาตร ของสารที่ใช้ในการหมุนเหวี่ยง.....	20
2.15 แสดงสถานะของสสารและตัวอย่างสถานะที่พบได้ในธรรมชาติ.....	21
2.16 แสดงพันธะการทำพลาสมาแบบ hydrogen, oxygen, argon.....	22
2.17 แสดงอนุภาคต่างๆที่อยู่ในห้องพลาสมา.....	24
2.18 แสดงอันตรกิริยาของพลาสมากับพื้นผิวที่มีความหนาแน่นกับพลังงานจลน์ที่แตกต่างกัน.....	25
2.19 แรงระหว่างโมเลกุลที่บริเวณผิวและในของเหลว.....	26

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.20 แสดงมุมสัมผัส( $\theta_c$ ).....	26
2.21 แสดงคุณสมบัติของหยดน้ำกับมุมสัมผัสที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว.....	27
2.22 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด.....	29
2.23 ปรับค่า $F_2$ ขนาดตามแนวระนาบของชิ้นงาน.....	30
2.24 แสดงสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	31
2.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงกับเปอร์เซ็นต์การทะลุผ่านของแสง.....	33
3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	37
3.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย (ต่อ).....	38
3.3 กระจกสไลด์ (Glass slides) ใช้เป็นฐานรองรับในการเตรียมฟิล์มบาง.....	40
3.4 กระจกสไลด์(Glass slides) ที่จะตัดให้มีขนาดความกว้าง 2.5 เซนติเมตร และความยาว 2.5 เซนติเมตร.....	40
3.5 เครื่องทำความสะอาดด้วยการสั่นความถี่สูง.....	42
3.6 ปืนเป่าลม (Air Duster Gun).....	42
3.7 เครื่องทำความสะอาดด้วยพลาสมา (Plasma cleaner) รุ่น PDC-001/002 ยี่ห้อ HARRICK PLASMA.....	43
3.8 เครื่องเคลือบฟิล์มบางแบบการนำพาการระเหย.....	43
3.9 เครื่องเคลือบฟิล์มบางแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating).....	44
3.10 ไมโครปิเปต(Micropipette).....	44
3.11 เครื่องวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด (four-point probe) ที่ประกอบขึ้นใน ห้องปฏิบัติการเพื่อใช้ในการวัดความต้านทานของฟิล์มบางที่สร้างจากอนุภาคนาโน ITO กับ พอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT-PSS.....	45
3.12 เครื่องวัดสเปกตรัมของแสงในช่วงแสงยูวีและ แสงที่ตามองเห็น (UV-Vis Spectrophotometer).....	45
3.13 การทำความสะอาดด้วยเครื่องล้างความถี่สูง โดยใช้น้ำ DI.....	46
3.14 ทำความสะอาดด้วยเครื่องล้างความถี่สูง โดยใช้ของเหลวอะซิโตน.....	46
3.15 ความสะอาดด้วยเครื่องล้างความถี่สูง โดยใช้ของเหลวไอโซโพรพานอล.....	47
3.16 การทำความสะอาดด้วยเครื่องล้างความถี่สูงโดยใช้น้ำไร้ประจุ (DI) ล้างครั้งสุดท้าย.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.17 การเป่ากระจกสไลด์ด้วยปืนเป่าลม (Air Duster Gun).....	48
3.18 เช็ดชิ้นงานด้วยเอทานอล.....	48
3.19 การเคลือบผิวชิ้นงานด้วยพลาสมา (Plasma).....	49
3.20 การเกิดพลาสมาขณะทำการเคลือบ.....	49
3.21 การวางชิ้นงานบนฐานให้ความร้อน (Hot plate).....	50
3.22 การ Drop สารด้วย Micropipette.....	50
3.23 การวางชิ้นงานบนฐานให้ความร้อน (Hot plate).....	51
3.24 การ Drop สารด้วย Micropipette.....	51
3.25 การเคลือบฟิล์มด้วยวิธี Spin coating.....	52
3.26 นำชิ้นงานวางบนฐานเครื่องเคลือบฟิล์มบางแบบการนำพาการระเหย....	52
3.27 แสดงการทำปาดเคลือบ.....	53
3.28 เครื่องมือวัดค่าความต้านทาน.....	54
3.29 แสดงช่องสำหรับใส่เป็นชิ้นงาน และ glass side.....	55
3.30 เครื่องวัดสเปกตรัมของแสง (UV-Vis Spectrophotometer).....	55
4.1 แสดงการหยดสารลงบน glass side.....	56
4.2 แสดงการหยดเคลือบ (drop cast method) แบบมี mask.....	60
4.3 เปรียบเทียบค่าความต้านทานของสาร PEDOT-PSS, ITO-NPs และ PEDOT-PSS+ITO-NPs ทำการปาดเคลือบ แบบมี mask.....	62
4.4 แสดงการทดลองทำ spin coating.....	63
4.5 เปรียบเทียบก่อนและหลังทำ plasma O <sub>2</sub> .....	65
4.6 เปรียบเทียบค่าความต้านทานของสาร PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs ทำการทดลองด้วยวิธีการปาดเคลือบ + plasma O <sub>2</sub> .....	67
4.7 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานแบบปาดเคลือบ 1 รอบ ของสาร PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs.....	71
4.8 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานแบบปาดเคลือบ 2 รอบ ของสาร PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs.....	71
4.9 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานแบบปาดเคลือบ 3 รอบ ของสาร PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.10 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานแบบปาดเคลือบ 4 รอบ ของสาร PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs.....	73
4.11 เปรียบเทียบการทะลุผ่านของแสงแบบปาดเคลือบ 1 รอบ ของสาร PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs.....	73
4.12 เปรียบเทียบการทะลุผ่านของแสงแบบปาดเคลือบ 2 รอบ ของสาร PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs.....	74
4.13 เปรียบเทียบการทะลุผ่านของแสงแบบปาดเคลือบ 3 รอบ ของสาร PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs.....	75
4.14 เปรียบเทียบการทะลุผ่านของแสงแบบปาดเคลือบ 4 รอบ ของสาร PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs.....	75
4.15 แสดงชั้น PEDOT-PSS + ITO-NPs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 1 รอบ 1 ชั้น.....	77
4.16 แสดงชั้น PEDOT-PSS + ITO-NPs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 1 รอบ 2 ชั้น.....	77
4.17 แสดงชั้น PEDOT-PSS + CNTs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 1 รอบ 1 ชั้น.....	78
4.18 แสดงชั้น PEDOT-PSS + CNTs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 1 รอบ 2 ชั้น.....	79
4.19 แสดงชั้น PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 1 รอบ 1 ชั้น.....	80
4.20 แสดงชั้น PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 1 รอบ 2 ชั้น.....	80
4.21 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานของสารละลาย PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs การปาดเคลือบ 1 ชั้น 1 รอบ.....	81
4.22 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานของสารละลาย PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs การปาดเคลือบ 2 ชั้น 1 รอบ.....	82

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.23 เปรียบเทียบการทะลุผ่านแสงของสารละลาย PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs การปาดเคลือบ 1 ชั้น 1 รอบ.....	83
4.24 เปรียบเทียบการทะลุผ่านแสงของสารละลาย PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs การปาดเคลือบ 2 ชั้น 1 รอบ.....	83
4.25 แสดงชั้น PEDOT-PSS + ITO-NPs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 2 รอบ 1 ชั้น.....	85
4.26 แสดงชั้น PEDOT-PSS + ITO-NPs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 2 รอบ 2 ชั้น.....	85
4.27 แสดงชั้น PEDOT-PSS + CNTs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 2 รอบ 1 ชั้น.....	86
4.28 แสดงชั้น PEDOT-PSS + CNTs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 2 รอบ 2 ชั้น.....	87
4.29 แสดงชั้น PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 2 รอบ 1 ชั้น.....	88
4.30 แสดงชั้น PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 2 รอบ 2 ชั้น.....	88
4.31 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานของสารละลาย PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs การปาดเคลือบ 1 ชั้น 2 รอบ.....	89
4.32 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานของสารละลาย PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs การปาดเคลือบ 1 ชั้น 2 รอบ.....	90
4.33 เปรียบเทียบการทะลุผ่านแสงของสารละลาย PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs การปาดเคลือบ 1 ชั้น 2 รอบ.....	91

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.34 เปรียบเทียบการทะลุผ่านแสงของสารละลาย PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs การปาดเคลือบ 1 ชั้น 2 รอบ.....	91
4.35 แสดงชั้น PEDOT-PSS + ITO-NPs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 4 รอบ 1ชั้น.....	93
4.36 แสดงชั้น PEDOT-PSS + ITO-NPs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 4 รอบ 2ชั้น.....	93
4.37 แสดงชั้น PEDOT-PSS + CNTs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 4 รอบ 1ชั้น.....	94
4.38 แสดงชั้น PEDOT-PSS + CNTs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 4 รอบ 2ชั้น.....	95
4.39 แสดงชั้น PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 4 รอบ 1ชั้น.....	96
4.40 แสดงชั้น PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 4 รอบ 2ชั้น.....	96
4.41 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานของสารละลาย PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs การปาดเคลือบ 1 ชั้น 4 รอบ.....	97
4.42 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานของสารละลาย PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs การปาดเคลือบ 2 ชั้น 4 รอบ.....	98
4.43 เปรียบเทียบการทะลุผ่านแสงของสารละลาย PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs การปาดเคลือบ 1 ชั้น 4 รอบ.....	99
4.44 เปรียบเทียบการทะลุผ่านแสงของสารละลาย PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs การปาดเคลือบ 2 ชั้น 4 รอบ.....	99
4.45 ประยุกต์ขั้วไฟฟ้าแบบเส้นตรง.....	103
4.46 ประยุกต์ขั้วไฟฟ้าแบบคลื่น.....	104
4.47 ประยุกต์ขั้วไฟฟ้าแบบเกลียว.....	104

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สรุปคุณสมบัติทั่วไปของคาร์บอนนาโนทิวป์.....	11
3.1 พารามิเตอร์ (ไม่ได้ทำ Plasma).....	50
3.2 พารามิเตอร์ (มี mask + ไม่ได้ทำ Plasma).....	51
3.3 พารามิเตอร์ (Spin coating + ไม่ได้ทำ Plasma).....	52
3.4 พารามิเตอร์ (Rapid convective deposition + Plasma).....	53
3.5 พารามิเตอร์ช่วงที่สอง (Rapid convective deposition + Plasma).....	53
4.1 พารามิเตอร์ PEDOT-PSS ที่ Drop ลงบนชิ้นงานของการหยดเคลือบ (drop cast method) .....	58
4.2 พารามิเตอร์ ITO-NPs ที่ Drop ลงบนชิ้นงานของการหยดเคลือบ (drop cast method) .....	61
4.3 พารามิเตอร์ ITO-NPs ที่ Drop ลงบนชิ้นงานของการหยดเคลือบ (drop cast method) แบบมี mask.....	61
4.4 พารามิเตอร์ PEDOT-PSS ที่ Drop ลงบนชิ้นงานทำ spin coating.....	70
4.5 พารามิเตอร์ PEDOT-PSS ที่ Drop ลงบนชิ้นงานของ plasma O <sub>2</sub> + ปาดเคลือบ.....	65
4.6 พารามิเตอร์ CNTs ที่ Drop ลงบนชิ้นงานของของ plasma O <sub>2</sub> + ปาดเคลือบ.....	66
4.7 พารามิเตอร์ ITO nanoparticle ที่ Drop ลงบนชิ้นงานของของ plasma O <sub>2</sub> + ปาดเคลือบ.....	66
4.8 พารามิเตอร์ PEDOT-PSS ที่ Drop ลงบนชิ้นงานในการเปรียบเทียบชั้น.....	68
4.9 พารามิเตอร์ ITO-NPs ที่ Drop ลงบนชิ้นงานในการเปรียบเทียบชั้น.....	69
4.10 พารามิเตอร์ CNT ที่ Drop ลงบนชิ้นงานในการเปรียบเทียบชั้น.....	70
4.11 พารามิเตอร์ PEDOT-PSS + ITO-NPs ที่ Drop ลงบนชิ้นงานของปาดเคลือบ 1รอบ.....	78
4.12 พารามิเตอร์ PEDOT-PSS + CNTs ที่ Drop ลงบนชิ้นงานของปาดเคลือบ 1รอบ.....	79
4.13 พารามิเตอร์ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs ที่ Drop ลงบนชิ้นงานของ ปาดเคลือบ 1รอบ.....	81

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.14 พารามิเตอร์ PEDOT-PSS + ITO-NPs ที่ Drop ลงบนชิ้นงานของปาดเคลือบ 2 รอบ.....	86
4.15 พารามิเตอร์ PEDOT-PSS + CNTs ที่ Drop ลงบนชิ้นงานของปาดเคลือบ 2 รอบ.....	87
4.16 พารามิเตอร์ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs ที่ Drop ลงบนชิ้นงานของปาดเคลือบ 2 รอบ.....	89
4.17 พารามิเตอร์ PEDOT-PSS + ITO-NPs ที่ Drop ลงบนชิ้นงานของปาดเคลือบ 4รอบ.....	94
4.18 พารามิเตอร์ PEDOT-PSS + CNTs ที่ Drop ลงบนชิ้นงานของปาดเคลือบ 4รอบ.....	95
4.19 พารามิเตอร์ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs ที่ Drop ลงบนชิ้นงานของปาดเคลือบ 4 รอบ.....	97
4.20 พารามิเตอร์ ที่ Drop ลงบนชิ้นงาน.....	101
4.21 พารามิเตอร์ การโค้งงอ.....	102

# บทที่ 1

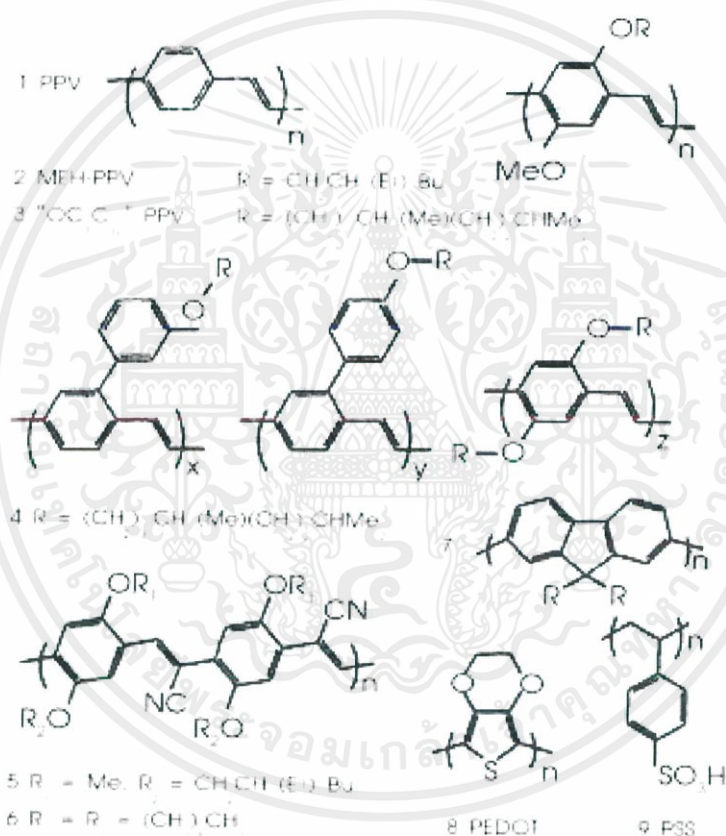
## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

พอลิเมอร์เป็นวัสดุที่ไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ ด้วยเหตุนี้การใช้งานที่เกี่ยวข้องทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ในยุคแรกจึงเน้นการใช้งานจากสมบัติความเป็นฉนวนของตัววัสดุ เช่น ใช้เป็นวัสดุหุ้มสายไฟฟ้า หรือใช้เป็นวัสดุในตัวเก็บประจุ จนกระทั่งปี ค.ศ.1974 การใช้งานวัสดุพอลิเมอร์ในงานด้านอิเล็กทรอนิกส์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างสิ้นเชิงเมื่อ ศาสตราจารย์ชิราคาเวะ (Shirakawa) และทีมวิจัยชาวญี่ปุ่น ได้ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์ฟิล์มพอลิเมอร์ที่สามารถนำไฟฟ้าได้โดยการพ่นก๊าซอะเซทิลีนลงบนผิวหน้าสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้โพลูอินเป็นตัวทำละลาย พบว่าฟิล์มที่เกิดขึ้นบริเวณผนังภายในมีรูปลักษณ์ภายนอกคล้ายทองแดง และโครงสร้างโพลีอะเซทิลีนที่เตรียมได้มีการจัดวางแบบ cis ตลอดความยาวสายโซ่ นอกจากนี้ ศาสตราจารย์ชิราคาเวะยังสามารถสังเคราะห์โพลีอะเซทิลีนที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบ Trans ซึ่งสามารถแสดงสมบัติการนำไฟฟ้าได้เช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามสภาพการนำไฟฟ้าของโพลีอะเซทิลีนที่มีโครงสร้างโมเลกุลทั้งสองชนิดมีค่าไม่สูงมากนัก เมื่อพิจารณาโครงสร้างของโพลีอะเซทิลีนทั้งแบบ cis และแบบ trans จะพบว่าโครงสร้างประกอบด้วยพันธะเดี่ยวและพันธะคู่สลับกันไปตลอดทั้งสายโซ่โมเลกุล  $(-CH=CH-)_n$  การสลับกันระหว่างพันธะคู่และพันธะเดี่ยวนี้เองเป็นสาเหตุให้สมบัติทางไฟฟ้าต่างไปจากพอลิเมอร์ชนิดอื่น โดยอิเล็กทรอนิกส์จากพันธะ  $\pi$  ในพันธะคู่สามารถเกิดการเคลื่อนที่ไปได้ตลอดความยาวสายโซ่ โดยเรียกพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเช่นนี้ว่า พอลิเมอร์แบบคอนจูเกต (conjugated polymer) ด้วยสมบัติดังกล่าวทำให้แถบพลังงานของโมเลกุลพอลิเมอร์ชนิดนี้สามารถแบ่งออกเป็นระดับพลังงาน  $\pi$  และ  $\pi^*$  (bonding และ anti-bonding ตามลำดับ) แต่เนื่องจากแต่ละระดับพลังงานในแถบพลังงานทั้งสองสามารถรับอิเล็กตรอนได้ทั้งสองตัว (สปินขึ้นและลง) ในภาวะปกติแถบพลังงาน  $\pi^*$  ซึ่งมีพลังงานสูงกว่าจึงว่างเปล่า ในขณะที่แถบพลังงาน  $\pi$  บรรจุอิเล็กตรอนไว้เต็ม ดังนั้นจึงมักเรียกระดับพลังงานสูงสุดในแถบพลังงาน  $\pi$  ว่า Highest Occupied Molecular Orbital (HOMO) และเรียกพลังงานต่ำสุดในแถบพลังงาน  $\pi^*$  ว่า Lowest Unoccupied Molecular Orbital (LUMO) โดยช่องว่างระหว่างพลังงานทั้งสองนี้เรียกว่า แถบช่องว่างพลังงาน (Energy gap,  $E_g$ ) ซึ่งหากอิเล็กตรอนถูกกระตุ้นด้วยพลังงานในรูปแบบต่างๆ ที่มีค่าน้อยเท่ากับแถบช่องว่างพลังงาน อิเล็กตรอนก็จะสามารถถูกกระตุ้นจากระดับพลังงาน  $\pi$  ไปสู่ ระดับพลังงาน  $\pi^*$  การนำไฟฟ้าก็จะสามารถเกิดขึ้นได้ด้วยเหตุนี้เองพอลิเมอร์แบบคอนจูเกตจึงสามารถแสดงสมบัติของสารกึ่งตัวนำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำพอลิเมอร์มาถูกกระตุ้นด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะสามารถทำให้อิเล็กตรอนจากแถบพลังงาน HOMO จะถูกกระตุ้นไปยังแถบพลังงาน LUMO เกิดเป็นการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า รวมทั้งสามารถปลดปล่อยพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่ออิเล็กตรอนลดระดับพลังงานจากสถานะกระตุ้น โดยความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดการดูดกลืน และ ปลดปล่อยออกมาจะขึ้นกับขนาดแถบช่องว่างพลังงาน ซึ่งค่าแถบช่องว่างพลังงานนี้สามารถปรับเปลี่ยนสมบัติได้ตามโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ด้วยเหตุนี้นักวิทยาศาสตร์จึงพยายามสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบคอนจูเกตที่มีโครงสร้างหลากหลายแบบเพื่อปรับเปลี่ยนสมบัติให้ได้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของคอนจูเกตพอลิเมอร์ที่ใช้ในงานด้านอิเล็กทรอนิกส์

สารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลขนาดเล็กมักพบปัญหาระหว่างการใช้งาน คือ มักเกิดการจัดเรียงโมเลกุลเป็นผลึกใหม่ได้ง่าย ซึ่งแตกต่างจากพอลิเมอร์ที่สามารถทนอุณหภูมิได้สูงกว่า การค้นพบสมบัติ (กึ่ง) นำไฟฟ้าในพอลิเมอร์จึงเป็นการจุดประกายความคิดในการนำเอาพอลิเมอร์นำไฟฟ้าบางชนิดซึ่งสามารถแสดงสมบัติทางแสงมาประยุกต์ใช้งานด้านการตรวจวัด และ การปลดปล่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสง เพื่อทดแทนสารประกอบอินทรีย์ซึ่งนิยมใช้ในเทคโนโลยีปัจจุบัน เนื่องจากข้อได้เปรียบหลายประการ เช่น มีความหลากหลายในการสังเคราะห์ ใช้กระบวนการขึ้นรูปที่ง่ายและต้นทุนต่ำ เช่น การหมุนเคลือบ (spin coating) และ การปาดเคลือบ (blade coating) เป็นต้น

ในการประยุกต์ใช้งานด้านอิเล็กทรอนิกส์ วัสดุพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จะถูกเตรียมให้ในลักษณะฟิล์มบางที่มีความหนาในระดับนาโนเมตร กั้นระหว่างขั้วไฟฟ้า ซึ่งจะทำหน้าที่ฉีดพาหะบวก (โฮล) และ พาหะลบ (อิเล็กตรอน) เข้าสู่ชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ หรือทำหน้าที่ดึงพาหะบวก (โฮล) และ ลบ (อิเล็กตรอน) ออกจากชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ โดยสมบัติของขั้วไฟฟ้าจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์อย่างมีนัยสำคัญโดยวัสดุที่นิยมใช้ในการทำขั้วไฟฟ้าร่วมกับสารพอลิเมอร์ ได้แก่ อินเดียมทินออกไซด์ ITO-NPs (indium tin oxide nanoparticles) และ คาร์บอนนาโนทิวป์ (CNTs) ซึ่งมีค่าฟังก์ชันงาน (work function) สูงเหมาะสำหรับการฉีดพาหะบวกเข้าสู่ชั้น HOMO ของฟิล์มพอลิเมอร์ รวมทั้ง ITO-NPs, CNTs นั้นมีความโปร่งแสงเป็นสามารถใช้เป็นขั้วไฟฟ้าที่ยอมให้แสงส่งผ่านไปยังพอลิเมอร์ รวมทั้งสามารถส่งผ่านแสงที่เปล่งจากพอลิเมอร์ออกมาได้เช่นเดียวกัน ส่วนทางด้านขั้วลบ มักจะใช้โลหะที่มีค่าฟังก์ชันการทำงานต่ำๆ เพื่อให้สามารถฉีดพาหะลบ เข้าไปยังชั้น LUMO ของพอลิเมอร์ เช่น เงิน แมกนีเซียม อะลูมิเนียม แคลเซียม หรือในบางครั้งใช้โลหะผสม เช่น อะลูมิเนียม/แมกนีเซียม เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายของแมกนีเซียม

เมื่อพิจารณาขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการฉีดพาหะบวกเข้าสู่ชั้น HOMO ของพอลิเมอร์ แม้ว่า ITO-NPs และ CNTs จะเป็นวัสดุที่นิยมใช้งานอย่างแพร่หลาย แต่ด้วยสมบัติที่เป็นฟิล์มบางแข็งเกร็งจึงทำให้ ITO-NPs และ CNTs ไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่ต้องการความโค้งงอ (flexible devices) ได้ ด้วยเหตุนี้จึงมีงานวิจัยที่เริ่มนำ ITO-NPs และ CNTs ในรูปแบบอนุภาคในระดับนาโนมาประยุกต์สร้างเป็นขั้วไฟฟ้าเพื่อเพิ่มสมบัติความยืดหยุ่นให้กับขั้วไฟฟ้า อย่างไรก็ตามพบว่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากวัสดุนาโน ITO-NPs และ CNTs มีค่าสูงซึ่งเป็นผลมาจากความไม่ต่อเนื่องกันของวัสดุนาโนจึงทำให้มีช่องว่างซึ่งขัดขวางการเดินทางของพาหะจากอนุภาคหนึ่งไปยังอนุภาคข้างเคียง แม้ว่าปัญหานี้จะสามารถแก้ไขได้โดยใช้กระบวนการเผาที่อุณหภูมิสูง (sintering process) เพื่อให้วัสดุนาโนของ ITO-NPs และ CNTs เชื่อมต่อกันส่งผลให้ความต้านทานของขั้วไฟฟาลดลงอย่างมาก แต่ด้วยอุณหภูมิที่สูงทำให้ไม่สามารถเลือกใช้ฐานรองรับที่โค้งงอประเภท พลาสติกชนิดต่างๆ ซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่ไม่สูงได้ ด้วยเหตุนี้จึงมีแนวความคิดที่จะพัฒนาชั้นฟิล์มบางรูปแบบใหม่โดยเน้นให้มีสมบัติด้านความสามารถในการโค้งงอและมีความต้านทานต่ำพอที่จะประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าได้

จากแนวคิดข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดที่จะศึกษาความเป็นไปได้ของการเตรียมชั้นสารผสมระหว่างวัสดุนาโน ITO-NPs และ CNTs กับพอลิเมอร์นำไฟฟ้า เพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าที่สามารถโปร่งแสง โดยใช้สมบัติการนำไฟฟ้า และ ความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ร่วมกับการนำไฟฟ้าที่ดีของวัสดุนาโน ITO-NPs และ CNTs เมื่อพิจารณาถึงวัสดุพอลิเมอร์ที่เลือกใช้ร่วมกับวัสดุนาโน จะต้องเป็นพอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดี สามารถรับและส่งผ่านพาหะกับ ITO-NPs และ CNTs ได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวคือต้องมีระดับพลังงาน HOMO หรือ LUMO โกล้เคียงกับฟังก์ชันงานของ ITO-NPs และ CNTs จากสมบัติที่กล่าวมาข้างต้น Poly (3,4-ethylenedioxythiophene) /poly(styrene sulfonic acid) หรือ PEDOT-PSS เป็นพอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้าได้และมีค่า work function ซึ่งความเหมาะสมอย่างยิ่ง เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ ที่นิยมใช้เป็นชั้นส่งผ่านพาหะ บวก ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจาก สารอินทรีย์ / พอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังเป็นสารที่นิยมใช้คู่กับขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจาก ITO-NPs และ CNTs จึงมีความสามารถในการส่งผ่านพาหะระหว่าง PEDOT-PSS กับ ITO-NPs และ CNTs ได้ดี

โดยงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักๆ คือ (1) การหาวิธีการที่เหมาะสมในการเตรียมชั้น ขั้วไฟฟ้าที่สร้างจากวัสดุผสมระหว่างพอลิเมอร์ กับ วัสดุนาโน ITO-NPs และ CNTs (2) การตรวจสอบ สมบัติเฉพาะของชั้นขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้ เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นส่วนหนึ่งของอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากสารพอลิเมอร์ได้ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะมีจุดประสงค์เพื่อการศึกษา

- 1.2.1 ศึกษาการเตรียมฟิล์มบางโครงสร้างนาโนจากวัสดุนาโนอินเดียมทินออกไซด์ (indium tin oxide nanoparticles; ITO-NPs)
- 1.2.2 ศึกษาการเตรียมฟิล์มบางโครงสร้างนาโนจากวัสดุนาโนคาร์บอนนาโนทิวป์ (Carbon nanotubes; CNTs)
- 1.2.3 ศึกษาการเตรียมฟิล์มบางจากพอลิเมอร์นำไฟฟ้า Poly (3, 4 –ethylene dioxy thiophene) / poly (styrene sulfonic acid) หรือ PEDOT-PSS
- 1.2.4 ศึกษาการเตรียมฟิล์มบางจากสารผสมระหว่าง วัสดุนาโน ITO-NPs, CNTs และ PEDOT-PSS
- 1.2.5 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าด้วย เครื่องวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด (four-point probe)
- 1.2.6 ศึกษาสมบัติการทะลุผ่านของแสงด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer

## 1.3 ขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย

สำหรับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยประกอบด้วยดังนี้

- 1.3.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ พอลิเมอร์นำไฟฟ้า รวมทั้งทฤษฎี เกี่ยวกับวิธีการเตรียมฟิล์มบาง และ เทคนิคการตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.2 ศึกษาเรียนรู้การใช้งานและการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เช่น เครื่องสร้างพลาสมาของออกซิเจน (Oxygen plasma treatment) และ เครื่องวัดความต้านทานแบบสี่จุด (four-point probe measurement)

1.3.3 เตรียมฟิล์มบางจากวัสดุนาโน ITO-NPs, CNTs และ พอลิเมอร์ PEDOT-PSS โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างวัสดุนาโน และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า รวมทั้งนำฟิล์มที่ได้ไปตรวจวัดและวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์ม

1.3.4 ศึกษาสมบัติทางโครงสร้าง สมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของฟิล์มบางสารผสม ระหว่าง ITO-NPs, CNTs และ PEDOT-PSS เพื่อดูความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

## 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 มีความรู้เกี่ยวกับสมบัติของสารกึ่งตัวนำ ITO-NPs, CNTs และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT-PSS

1.4.2 มีความรู้และสามารถพัฒนาเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางได้อย่างชำนาญและมีประสิทธิภาพ

1.4.3 มีทักษะในการตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางด้วยเครื่องวัดความต้านทานแบบเข็มวัดสี่จุด (four-point probe)

1.4.4 มีความรู้เกี่ยวกับการนำวัสดุนาโนไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมนาโนอิเล็กทรอนิกส์ในอนาคต

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

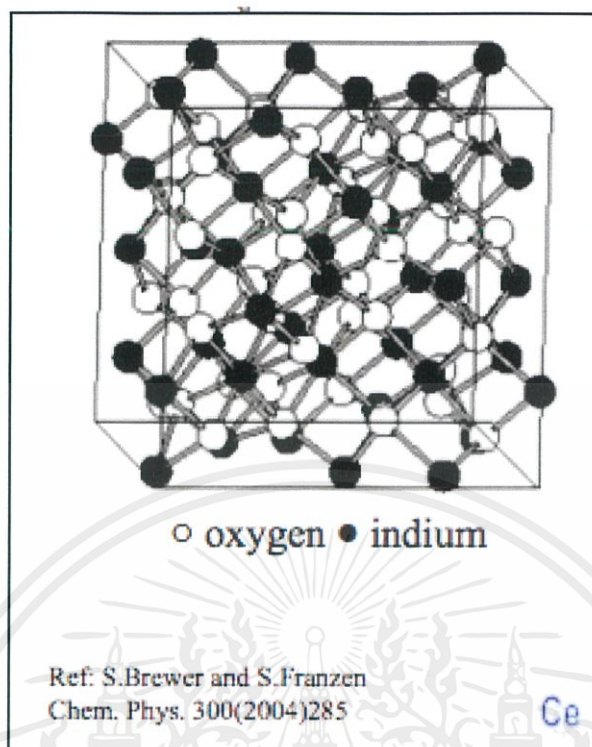
ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

1. ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับสมบัติและโครงสร้างของสาร
2. เทคนิคการเคลือบฟิล์ม
3. พลาสมา (Plasma)
4. แรงตึงผิว (Surface tension)
5. มุมสัมผัส (contact angle)
6. ทฤษฎีเบื้องต้นในการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม
7. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1. ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับสมบัติและโครงสร้างของสาร

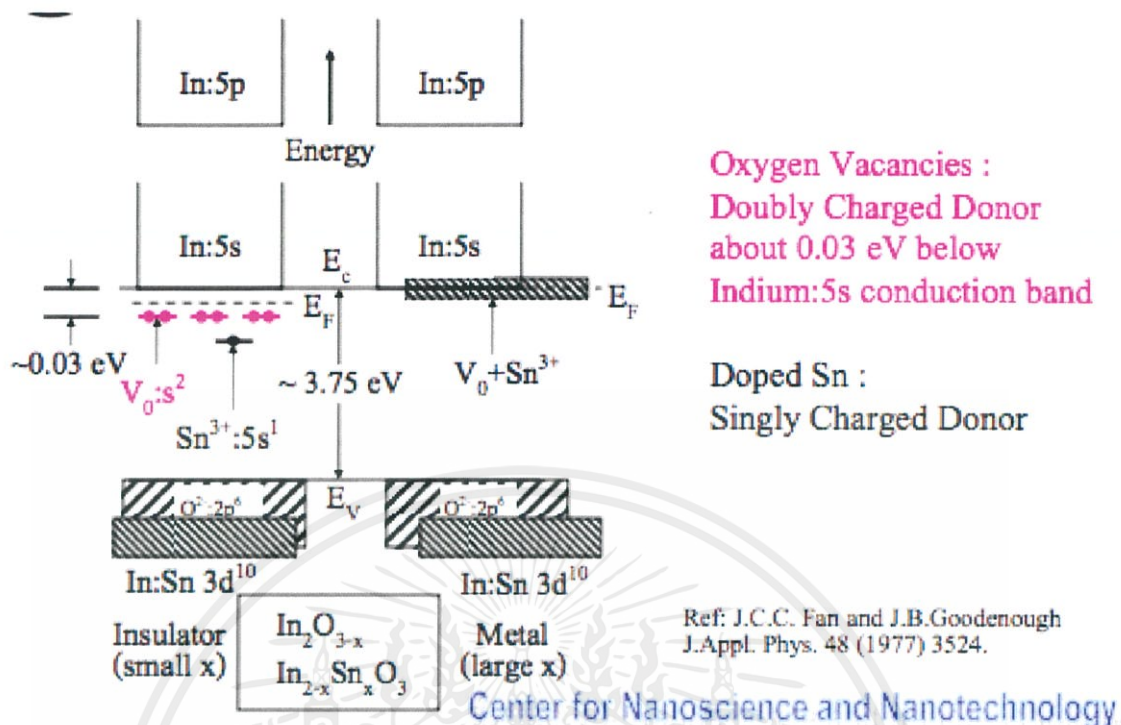
##### 2.1.1 ออกไซด์ของอินเดียมที่เจือด้วยดีบุก (Tin doped indium oxide nanoparticles – ITO-NPs )

ออกไซด์ของอินเดียมที่เจือด้วยดีบุก ที่เรียกกันว่า ITO-NPs มีโครงสร้างผลึกแบบ bixybite ชนิดที่ สาม (bixybite c-type rare earth; I3a) มีค่าคงที่ผลึกอยู่ระหว่าง 10.117-10.310 อังสตรอม และมีพลังงานของแถบต้องห้ามในช่วง 3.5-4.6 อิเล็กตรอนโวลต์ ค่าดัชนีหักเหทางแสงอยู่ระหว่าง 1.8-2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของ ITO

โครงสร้างของแถบพลังงานของ ITO มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.1 ความกว้างทางพลังงานของแถบต้องห้าม (band gap) วัดจากแถบวาเลนซ์ (valence band) ถึงแถบการนำ (conduction band) ในช่วง 3.5-4.6 อิเล็กตรอนโวลต์ ความบกพร่อง (defect) ในโครงสร้างผลึก เช่น ช่องว่างจากการสูญหายของออกซิเจน (oxygen vacancy) การแทนที่อินเดียม ( $\text{In}^{3+}$ ) ด้วยดีบุก ( $\text{Sn}^{4+}$ ) ดีบุกมีสถานะทางประจุไฟฟ้าและขนาดที่ต่างออกไปจากอินเดียม ทำให้เกิดสถานะใหม่ขึ้นในแถบต้องห้าม เรียกว่า สถานะโดเนอร์ (donor state) อยู่ที่ตำแหน่งต่ำกว่าแถบการนำ ประมาณ 0.03 อิเล็กตรอนโวลต์ ความบกพร่องของผลึกในกรณีนี้ จะช่วยเพิ่มความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ (carrier concentration ;n) ในแถบการนำให้มากขึ้น นอกเหนือจากอิทธิพลที่มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ ความเป็นผลึกยังมีความสำคัญต่อสภาพคล่องในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ( $\mu$ ) อีกด้วย ผลึกที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน หรือมีความเป็นผลึกเดี่ยวที่สมบูรณ์มาก อิเล็กตรอนจะสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระ สมบัติทางไฟฟ้าจะดีขึ้นด้วย



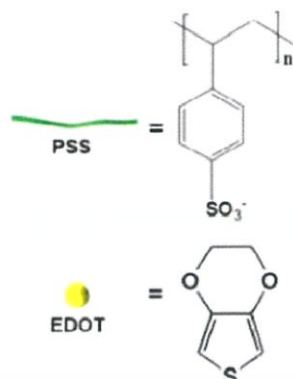
รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างทางระดับพลังงานของ ITO

สภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุ ( $\sigma$ ) สัมพันธ์โดยตรงกับผลคูณระหว่างความหนาแน่นของประจุพา ( $n$ ) และค่าสภาพคล่องตัวในการเคลื่อนที่ ( $\mu$ ) ตามความสัมพันธ์  $\sigma = \frac{1}{\rho} = ne\mu$

### 2.1.2 สาร PEDOT/PSS

PEDOT-PSS หรือ Poly (3, 4-ethylenedioxythiophene)/poly(styrene sulfonic acid) โพลีสไตรีนซัลโฟเนต เป็นพอลิเมอร์ผสมระหว่างสองไอออนเมอร์ ประกอบไปด้วย โซเดียมโพลีสไตรีนซัลโฟเนต ซึ่งเป็น พอลีสไตรีนแบบ sulfonated ส่วน Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) หรือ PEDOT เป็นพอลิเมอร์ conjugated และมีประจุบวกและขึ้นกับ polythiophene เป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ที่รวมกันเป็นโมเลกุลอะโรมาติก ดังรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

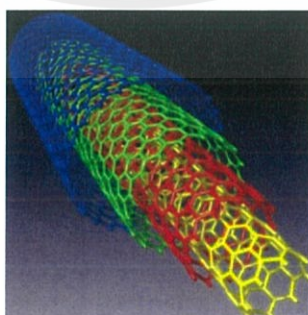


รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของ PEDOT/PSS

จากโครงสร้างตามรูปที่ 2.3 PEDOT/PSS หรือ Poly (3,4-ethy lenedioxythiophene) /poly (styrene sulfonic acid) เป็นสารพอลิเมอร์ ซึ่งประกอบด้วยด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็น PSS และ PEDOT โดยส่วนที่เป็น PSS จะทำหน้าที่ยึดติดกับสารเคมีชนิดอื่น และ PEDOT ทำหน้าที่ในการนำไฟฟ้า สารพอลิเมอร์ชนิดนี้เป็นหนึ่งในพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่สามารถนำไฟฟ้าได้ค่อนข้างดี สามารถละลายน้ำได้ มีความเสถียร มีความโปร่งแสงสูง มีความยืดหยุ่น และทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมได้ดี จึงเป็นที่นิยมนำมาใช้ในการเคลือบพื้นผิวต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

### 2.1.3 คาร์บอนนาโนทิวป์ (Carbon nanotubes/CNTs)

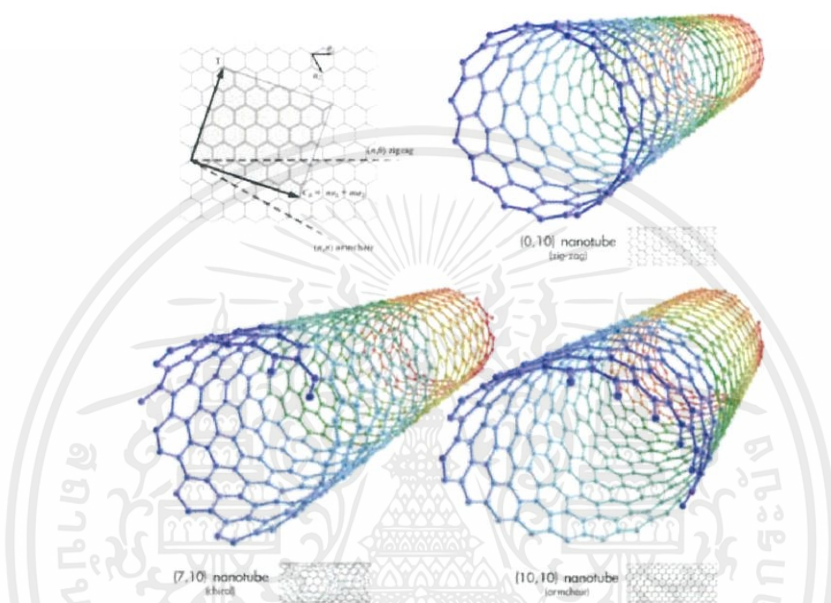
คาร์บอนนาโนทิวป์ คือ วัสดุสังเคราะห์โครงสร้างนาโนรูปทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตร ลักษณะการจัดเรียงอะตอมของธาตุคาร์บอนเป็นแผ่น เชื่อมโยงเป็นตาข่ายที่มีรูรูปหกเหลี่ยมและม้วนตัวเข้าหากันเป็นทรงกระบอก อะตอมของคาร์บอนที่จัดเรียงตัวกันทำให้เกิดคุณสมบัติพิเศษที่ดีหลายประการ



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะโครงสร้างของ CNTs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ สามารถสังเคราะห์โครงสร้างของท่อให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 0.4 - 4.0 นาโนเมตร และมีความยาวได้ถึง 10 ไมโครเมตร การสังเคราะห์อาจแบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ แบบผนังชั้นเดียว (Single wall carbon nanotube) และ แบบผนังหลายชั้น (Multi wall carbon nanotube) และแต่ละลักษณะยังสามารถแบ่งย่อยไปอีก 3 แบบ ตามการม้วนของตาข่าย ได้แก่ armchair, zig zag และ chiral ดังรูป



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะของการม้วนแผ่นกราฟีนเป็นท่อนาโน

ด้วยลักษณะโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์ทั้ง 3 แบบ ดังกล่าว และรวมถึงพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนมีความยาวเพียง 0.14 นาโนเมตร ทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์มีคุณสมบัติที่พิเศษที่โดดเด่นออกมามากมาย เช่น มีความแข็งแรงที่มากกว่าเพชรและกราไฟต์ การเปรียบเทียบกับสิ่งใกล้ตัวให้ชัดเจนกว่านี้สามารถบอกได้ว่าคาร์บอนนาโนทิวป์มีความแข็งแรงมากกว่าเหล็กกล้าถึง 10-100 เท่า รวมทั้งมีความยืดหยุ่นสูงถึง 1 TPa ในขณะที่เพชรมีค่าความยืดหยุ่นเป็น 1.2 TPa จึงพบว่าทั้งสองมีค่าต่างกันเล็กน้อย นอกจากนั้นคาร์บอนนาโนทิวป์ยังมีสมบัติทางการนำไฟฟ้าและสมบัติทางความร้อนที่ดี นั่นคือ คาร์บอนนาโนทิวป์สามารถทนความร้อนได้สูงถึง 2,800 °C ที่สภาวะสูญญากาศ และมีความสามารถในการนำความร้อนได้ดีกว่าเพชร และยังสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดี คือ มีค่าความจุการนำไฟฟ้าสูงกว่าทองแดงถึง 1,000 เท่า ซึ่งได้แสดงตารางสรุปคุณสมบัติทั่วไปของคาร์บอนนาโนทิวป์ ดังตารางด้านล่างนี้

## ตารางที่ 2.1 สรุปคุณสมบัติทั่วไปของคาร์บอนนาโนทิวป์

Properties of Carbon Nanotubes	
Specific Density	1.3 - 2
Elongation (TPa)	1
Strength (GPa)	10 - 60
Strain at Break (%)	10
Thermal Conductivity (W/m.k)	> 3000
Electrical Conductivity	10 <sup>6</sup> - 10 <sup>7</sup>

### 2.1.4 สารกึ่งตัวนำ (semiconductor)

กึ่ง (Semi) คือค่าแสดงออกถึงระดับกึ่งกลางระหว่างคุณสมบัติของตัวนำ (Conductor) กับคุณสมบัติของตัวฉนวน (Insulator)

“ตัวนำ” คือ วัสดุใดๆ ที่ยอมให้ประจุไฟฟ้าไหลผ่าน หรือมีความนำจำเพาะสูง

“ฉนวน” คือ วัสดุใดๆ ที่ไม่ยอมให้ประจุไฟฟ้า ไหลผ่าน หรือมีความนำจำเพาะต่ำ

ดังนั้น สารกึ่งตัวนำ คือวัสดุที่มีความนำจำเพาะ อยู่ระหว่างความนำจำเพาะของตัวนำไฟฟ้า กับฉนวน

ความนำทางไฟฟ้า (G) กับความต้านทานทางไฟฟ้า (R) ของวัสดุมีความสัมพันธ์ คือ  $R=1/G$  แสดงว่าถ้ามีความนำทางไฟฟ้าสูงขึ้น ระดับของความต้านทานทางไฟฟ้าจะมีค่าลดลง ดังนั้น ความต้านทานทางไฟฟ้าจึงเป็นตัวบ่งชี้คุณสมบัติของวัสดุได้เช่นกัน

จากความต้านทานจำเพาะ (Resistivity ;  $\rho$ ) จะได้

$$\rho = \frac{RA}{l} = \frac{(\Omega)(\text{cm}^2)}{\text{cm}} \rightarrow \Omega \cdot \text{cm} \quad (2.1)$$

จากสมการ (2.1) ทำให้ทราบว่า ค่าความต้านทานจำเพาะแปรผันตรงกับความต้านทานทางไฟฟ้าโดย

$$|R| = \rho \frac{l}{A} = \rho \frac{(1\text{cm})}{(1\text{cm}^2)} = |\rho| \text{ ohms}$$

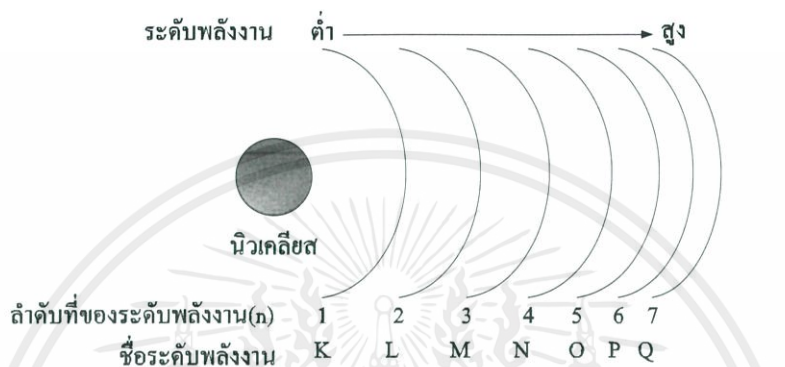
#### 2.1.4.1 โครงสร้างแถบพลังงาน (The Energy-Band)

เมื่ออะตอมหลายๆอะตอมมารวมกันเป็นโมเลกุล ซึ่งแต่ละอะตอมประกอบด้วยอิเล็กตรอนจำนวนมาก ถ้าแบ่งอะตอมออกเป็นนิวเคลียสและอิเล็กตรอน ซึ่งจะเป็นสถานะของชั้นอิเล็กตรอนนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนที่หมุนรอบนิวเคลียสในแต่ละชั้นของวงโคจร จะมีพลังงานแยกออกจากกันอย่างอิสระ อิเล็กตรอนอยู่ห่างจากนิวเคลียสมาก ระดับพลังงานยิ่งมากขึ้น อิเล็กตรอนที่แยกออกมาจากอะตอมเดิมของมันจะมีระดับพลังงานสูงกว่าอิเล็กตรอนที่ยังคงหมุนอยู่รอบนิวเคลียส

ระดับพลังงานอิเล็กตรอนในแต่ละลำดับชั้นนี้ และในขณะเดียวกันเราสามารถคำนวณหาจำนวนของอิเล็กตรอนที่มีได้มากที่สุดในแต่ละลำดับชั้นได้



รูปที่ 2.6 ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในแต่ละลำดับชั้น

$$N_e = 2n^2 \quad (2.2)$$

เมื่อ

$N_e$  คือจำนวนอิเล็กตรอนที่มีได้มากที่สุดในแต่ละลำดับชั้น

$n$  คือลำดับชั้นของระดับพลังงาน

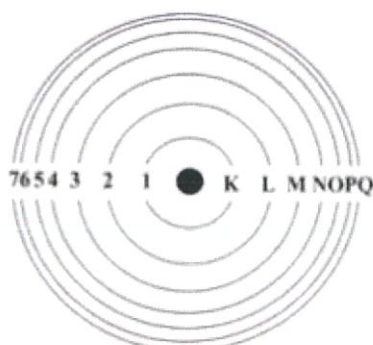
เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (1.2) จะพบว่าอิเล็กตรอนในแต่ละลำดับชั้นของระดับพลังงานจะมีจำนวนไม่เท่ากัน\* ตัวอย่างเช่น

ลำดับชั้นที่ \*K\* มีจำนวนอิเล็กตรอนเท่ากับ \*2\* ตัว

ลำดับชั้นที่ \*L\* มีจำนวนอิเล็กตรอนเท่ากับ \*8\* ตัว

ลำดับชั้นที่ \*M\* มีจำนวนอิเล็กตรอนเท่ากับ \*18\* ตัว

ลำดับชั้นที่ \*N\* มีจำนวนอิเล็กตรอนเท่ากับ \*32\* ตัว\* เป็นต้น

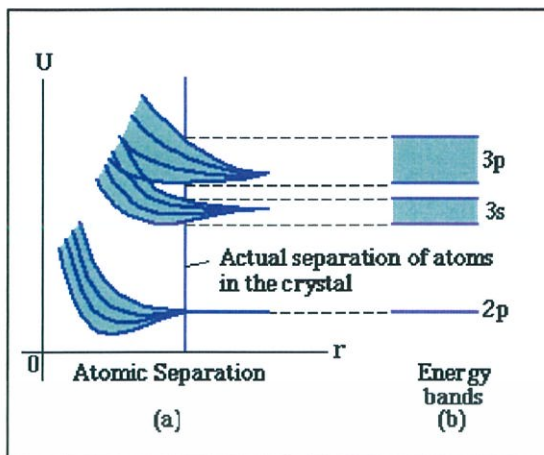


รูปที่ 2.7 แสดงวงโคจร นิวเคลียส และระดับวงโคจรของอิเล็กตรอน

เมื่ออะตอมจำนวนมากๆ อยู่ร่วมกันสถานะของระดับพลังงานเหล่านั้นเกิดเป็นพลังงานที่ได้จากอิเล็กตรอนในแถบพลังงาน ซึ่งแถบพลังงานนี้เป็นการกำหนดคุณสมบัติเบื้องต้นของสาร

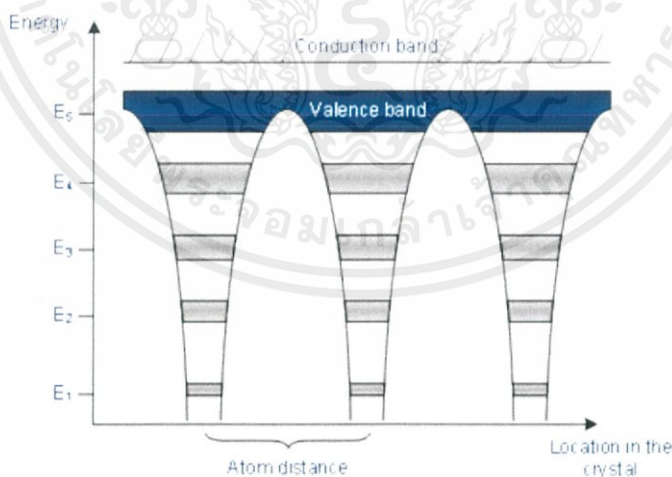
แผนภาพระดับพลังงานทั่วไปใน 1 มิติ ตามความยาวซึ่งกำหนดตำแหน่งของอิเล็กตรอนแต่ละตัวได้ โดยขึ้นอยู่กับสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนตัวนั้น ขนาดของพลังงานจะเป็นตัววัดเป็นค่าแรงดันของอิเล็กตรอน นั่นคือ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่อยู่ข้างล่างเมื่อมีสถานะพลังงานต่ำที่สุด

เมื่ออะตอมอยู่ร่วมกันมากๆ เป็นลักษณะของของแข็ง ลักษณะแผนภาพระดับพลังงานจะใกล้เคียงกับแผนภาพของอะตอมเดี่ยวๆ ซึ่งระดับพลังงานของแต่ละอะตอมที่อยู่รวม มีผลกระทบซึ่งกันและกันสามารถอธิบายอย่างง่ายดังนี้ เมื่อนำอะตอมชนิดเดียวกัน 2 อะตอม เข้ามาใกล้กันจะเกิดปรากฏการณ์ที่จำนวนอิเล็กตรอนในแต่ละอะตอม ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่จะเกิดการเคลื่อนที่อย่างช้าๆ ในแถบพลังงาน ผลกระทบจากการที่อะตอมอยู่ใกล้กันนี้ จะทำให้ช่องว่างของแถบระดับพลังงานที่อะตอมเข้าไปอยู่ใกล้กัน และชั้นวงแหวนนอกสุด 2 ระดับ มีผลในการตอบสนองความสัมพันธ์แบบการรวมระดับพลังงานเข้าด้วยกัน (Covalent) และระดับพลังงานที่ถูกกระตุ้น (Excitation Level) จะแสดงให้เห็นถึงเหนือระดับวาเลนซ์เป็นระดับที่จะมีอิเล็กตรอนได้ เมื่ออิเล็กตรอนจากแถบที่ต่ำกว่ามีพลังงานมากพอที่จะกระโดดขึ้นไปในช่วงระดับนี้ โดยการรับโปรตอนหรือโปรตอนเข้าไปนั่นเอง



รูปที่ 2.8 (a) แสดงระดับพลังงานของสถานะ 2p ,3s และ 3p ในกลุ่มของอะตอมที่เหมือนกับเป็นฟังก์ชันของช่องว่างอะตอม (b) แสดงแถบพลังงาน และตำแหน่งของช่องว่างภายในโครงสร้างตามตำแหน่งในอะตอม

ปรากฏการณ์ที่เกิดจากการนำเอาอะตอมมาอยู่ใกล้กัน แต่ละตัวจะมีการรบกวนกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่เล็กน้อยการกระจายของระดับพลังงานในอะตอมขึ้นอยู่กับความชิดกันระหว่าง 2 อะตอม เหมือนกับถ้านำอะตอมหลายๆอะตอมมารวมกันก็จะเพิ่มการแพร่กระจายของระดับพลังงานออกไปจากเดิมอีก



รูปที่ 2.9 แสดงแผนภาพระดับพลังงานสำหรับผลึกของอะตอมทุกๆไป ระดับความนำ (conduction band) และแถบวาเลนซ์ (valence band)

จากรูปสังเกตเห็นว่าเป็นแผนภาพระดับพลังงานที่เกิดความยุ่งเหยิงเป็นส่วนที่ถูกแรงเป็นแถบ ซึ่งในแถบมีอะตอมอยู่เป็นจำนวนมาก กลุ่มของอะตอมมีความสัมพันธ์ในแถบของอะตอม โดย

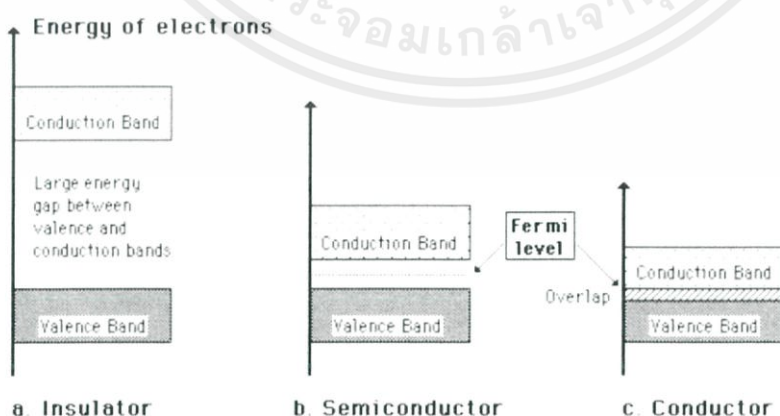
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แถบวาเลนซ์จะบรรจุไปด้วยวาเลนซ์อิเล็กตรอนของอะตอมและช่องว่างของพลังงานที่อยู่เหนือแถบวาเลนซ์ เรียกว่า ช่องว่างแถบพลังงาน (Energy gap) หรือ แถบพลังงานต้องห้าม (Forbidden gap, Forbidden energy band) เพราะอิเล็กตรอนไม่สามารถอาศัยได้อยู่ในช่องว่างนี้ และแถบพลังงานที่อยู่เหนือแถบพลังงานต้องห้ามเรียก แถบความนำ (conduction band) แถบนี้จะเป็นแถบที่ตอบสนองต่ออะตอมเมื่อเพิ่มพลังงานให้แก่อะตอม ซึ่งโดยปกติแล้วแถบความนำนี้เกือบไม่มีอิเล็กตรอนอาศัยอยู่

### 2.1.4.2 โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ (The Band structure of Insulators)

ธาตุที่มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าอยู่กึ่งกลางระหว่างธาตุที่เป็นตัวนำและฉนวน โดยทั่วไปสารกึ่งตัวนำจะมีค่าความต้านทานอยู่ระหว่าง  $10^5 \Omega\text{-cm}$  ถึง  $10^8 \Omega\text{-cm}$  ซึ่งสารกึ่งตัวนำถือเป็นธาตุที่มีประโยชน์อย่างมากในทางอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากเป็นธาตุที่มีลักษณะพิเศษ ที่สามารถนำมาเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ ให้มีสภาพการนำไฟฟ้าได้มากขึ้น ตามต้องการโดยใช้ความร้อนหรือแสง จึงทำให้สารกึ่งตัวนำเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีใช้งานกันในปัจจุบัน

สารกึ่งตัวนำจะแตกต่างจากฉนวน ในเรื่องความกว้างของแถบพลังงานต้องห้าม ซึ่งที่แถบพลังงานต้องห้ามนั้น ไม่มีระดับชั้นพลังงานที่ว่าง และอยู่ใกล้กับระดับชั้นพลังงานสูงสุด ที่มีอิเล็กตรอนอยู่ อิเล็กตรอนจะได้รับพลังงานเสริมในการกระโดดข้ามช่องว่าง ของแถบพลังงานต้องห้ามทำให้เกิดความเกี่ยวข้องกันระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ในแถบความนำโฮลในแถบวาเลนซ์เป็นจำนวนมากพอ ที่ทำให้เกิดความเหมาะสมของค่าความนำไฟฟ้า



รูปที่ 2.10

- (a) ภาพแสดงแถบพลังงานของฉนวน
- (b) ภาพแสดงแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ
- (c) ภาพแสดงแถบพลังงานของตัวนำไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติเฉพาะของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์สามารถเปลี่ยนแปลง โดยการเติมอะตอมของสารเจือปนเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ เรียกว่า กระบวนการโด๊ป (Doping Process) แม้จะเติมสารเจือปนเข้าไปในสารกึ่งตัวนำเพียงเล็กน้อย ก็สามารถเปลี่ยนโครงสร้างของแถบพลังงาน และเกิดการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้า เรียกว่า วัสดุสารกึ่งตัวนำแบบไม่บริสุทธิ์ มีจำนวนพาหะของประจุเป็นจำนวนมากขึ้นที่อุณหภูมิห้อง หากได้รับการกระตุ้นด้วยพลังงานความร้อน พาหะประจุ โฮล หรือ อิเล็กตรอนตามชนิดสารเจือ ทำให้วัสดุกึ่งตัวนำแบบไม่บริสุทธิ์จึงมีค่าสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้าที่ค่อนข้างสูง นิยมนำมาใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

### 2.1.4.3 การนำไฟฟ้า (Electric conduction)

ค่าความนำไฟฟ้าหรือค่าความต้านทานจำเพาะ เป็นสิ่งที่น่าสนใจซึ่งเกี่ยวข้องกับการควบคุมประจุไฟฟ้า โดยสารแต่ละชนิดมีค่าความต้านทานจำเพาะที่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญโดยมีการกำหนดค่าขอบเขตรวมของค่าความต้านทานจำเพาะ

สารกึ่งตัวนำเป็นวัสดุที่อยู่ระหว่างฉนวน และตัวนำไฟฟ้า โดยมีการแบ่งขอบเขตค่าความต้านทานจำเพาะอยู่ในช่วง ประมาณ  $10^{-4}$  ถึง  $10^4$  โอห์ม·เมตร ( $\Omega \cdot m$ ) และ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะอยู่ในช่วง 5 ถึง 50

ค่าสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้า ( $\sigma$ ) บอกลักษณะทางไฟฟ้าของวัสดุ ซึ่งเป็นส่วนกลับของค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานไฟฟ้า

$$\sigma = 1/\rho \quad (2.3)$$

เป็นการบอกความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าของวัสดุ ในหน่วย  $\sigma$  เป็นส่วนกลับของโอห์ม·เมตร คือ  $(\Omega \cdot m)^{-1}$  หรือ mho/m เพื่ออธิบายสมบัติทางไฟฟ้าและใช้ค่าสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้า และค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทาน

จากกฎของโอห์ม

$$J = \sigma E \quad (2.4)$$

โดยที่  $J$  เป็นความหนาแน่นกระแส หรือกระแสต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ( $I/A$ ) และ  $E$  คือค่าความเข้มสนามไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ระหว่าง 2 จุดหารระยะทางระหว่าง 2 จุด

$$E = \frac{V}{l} \quad (2.5)$$

ซึ่งสมบัติการนำไฟฟ้าจะมีช่วงที่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยช่วงของค่าสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้าของวัสดุสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) คือวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้า โดยทั่วไปอยู่ระหว่าง  $10^{-6}$  ถึง  $10^4(\Omega \cdot m)^{-1}$

#### 2.1.4.4 สมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ (Electric conduction in polymers)

วัสดุพอลิเมอร์ส่วนมากจะนำไฟฟ้าได้ไม่ค่อยดี เพราะไม่มีอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมากในการเป็นพาหะนำไฟฟ้า แต่ถ้าเป็นพอลิเมอร์ที่มีความบริสุทธิ์สูง จะทำให้ในการนำไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอน

โดยช่วงหลายปีที่ผ่านมา ได้มีการพัฒนาพอลิเมอร์ให้มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดี เทียบเท่ากับการนำไฟฟ้าของโลหะ เรียกว่า พอลิเมอร์นำไฟฟ้า (conducting polymer) ซึ่งบางชนิดมีการนำไฟฟ้าถึง  $1.5 \times 10^{-7} (\Omega \cdot m)^{-1}$  ต่อหน่วยปริมาตร โดยถ้าเทียบต่อหน่วยน้ำหนักจะได้ค่าการนำไฟฟ้าประมาณ 2 เท่า ของทองแดง

ยกตัวอย่างวัสดุ เช่น พอลิพาราฟินิลิน พอลิอะเซทีลีน พอลิอะนิลีน และพอลิไพร์โรล ที่เจือสารเจือในอัตราส่วนที่เหมาะสม จึงนำมาประยุกต์ในวัสดุสารกึ่งตัวนำ แต่แตกต่างกันที่ชนิดของสารเจือไม่ได้แทนที่ อะตอมหรือโมเลกุลในพอลิเมอร์

ศักยภาพของพอลิเมอร์ในการใช้งานหลากหลาย เนื่องจากมีความยืดหยุ่นสามารถบิดงอได้ มีความหนาแน่นต่ำ ง่ายต่อการผลิต มีการใช้งานเป็นขั้วของแบตเตอรี่ที่สามารถชาร์จไฟใหม่การใช้งานเป็นส่วนประกอบของยานอวกาศ สายไฟในเครื่องบิน สารเคลือบบนผิวหนังป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิต วัสดุกรองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

## 2.2. เทคนิคการเคลือบฟิล์ม

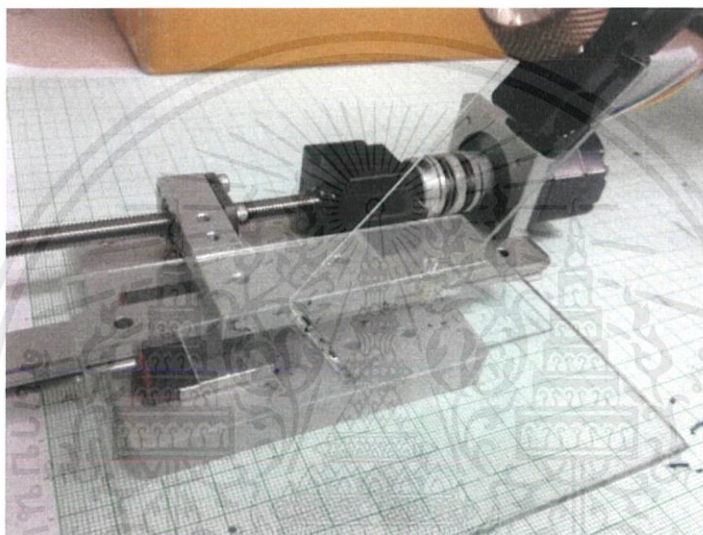
เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางเป็นการเคลือบผิวของวัสดุต่างๆ (งานวิจัยนี้จะเคลือบฟิล์มลงบนผิวกระจกที่เคลือบฟิล์มบาง PEDOT-PSS เจือด้วย ITO-NPs, CNTs เพื่อปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุตามความต้องการโดยใช้เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ

### 2.2.1 เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางแบบการนำพาการระเหย (Rapid convective deposition)

เป็นเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางโดยการพาสที่มีลักษณะเป็นของเหลวขนาดวัสดุนาโน ให้เคลือบลงบนพื้นผิวของวัสดุ สามารถปรับขนาดความหนาฟิล์มที่เคลือบลงบนพื้นผิวของวัสดุได้เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสให้กับสิ่งประดิษฐ์ กลไกพื้นฐานของเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางวิธีนี้จะใช้สารที่มีขนาดวัสดุนาโนในการเคลือบฟิล์มบางแทนการใช้สารเคมีที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์เพื่อป้องกันสารไหลมารวมกัน เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางวิธีนี้จะมีผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาและความไม่เสถียรของสารแควนลอยที่ลักษณะความโค้งเป็นแบบชั้นเดียว (Unimodal) และสองชั้น (Bimodal)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและคุณสมบัติของฟิล์มบางระหว่างการเคลือบฟิล์มลงบนพื้นผิวของวัสดุ ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงการเปลี่ยนแปลงรูปแบบลักษณะทางสัณฐานวิทยาต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการเกิดเป็นเส้นคลื่นหรือรอยแตกของฟิล์มซึ่งมีผลต่อการศึกษา การที่จะทำให้เทคนิคนี้มีประสิทธิภาพที่ดี เช่น การเพิ่มขนาดของวัสดุนาโนและลดการสั่นสะเทือนจากภายนอกจะช่วยให้การเคลือบฟิล์มมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นและสามารถนำวัสดุที่เคลือบได้มาประยุกต์ใช้กับงานต่างๆ ได้ เช่น ใช้เป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กทรอนิกส์ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง เพื่อให้สามารถหลีกเลี่ยงอิเล็กทรอนิกส์เข้าสู่เซลล์ได้มากขึ้นทำให้เซลล์ที่ได้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางแบบการนำพาการระเหย

## 2.2.2 เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางแบบดอกเตอร์เบลด (Doctor Blade)

เป็นเทคนิคการเคลือบฟิล์มที่ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสารอินทรีย์ เป็นเทคนิคที่มีหลักการค่อนข้างง่าย โดยการนำกระจกสไลด์แบบเรียบวางลงบนพื้นผิวของวัสดุที่มีสารเคมีที่จะใช้เคลือบโดยทำมุมเอียง 45 องศา แล้วปาดไปในระยะที่คงที่เพื่อให้ฟิล์มเคลือบลงบนพื้นผิว ของวัสดุตามขนาดที่ต้องการ ดังรูปที่ 2.11 สารเคมีที่หยดลงไปในนั้นจะหยดลงด้านหน้าหรือด้านหลังของกระจกสไลด์ก็ได้ แล้วนำกระจกสไลด์ มาปาดตามการหยดสารเคมีลงไป เพื่อให้ฟิล์มเรียบและทั่วถึงบริเวณพื้นที่ที่ต้องการเคลือบ ซึ่งต้องมีความสัมพันธ์กับความเร็วที่ใช้ในการปาดสาร เพื่อไม่ให้ฟิล์มเกิดการขรุขระหรือเป็นรอยหยัก ซึ่งไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ สารที่จะนำมาใช้เคลือบลงบนพื้นผิวของวัสดุต้องมีลักษณะเป็นของเหลว ทั้งนี้ความหนาของฟิล์มที่จะได้ขึ้นอยู่กับระยะความห่างกระจกสไลด์ และพื้นผิวของวัสดุ ทำให้ระดับพลังงานบนพื้นผิวของวัสดุมีความแตกต่างกัน ดังนั้น เพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ ควรจะกำหนดช่องความหนาระหว่างกระจกสไลด์ กับพื้นผิวของวัสดุให้มีความเหมาะสม ซึ่งจะทำให้ขนาดความหนาของฟิล์มที่ได้เกิดความเหมาะสมเช่นกัน

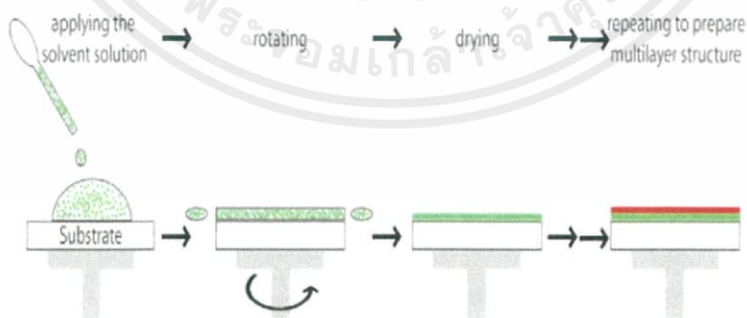
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 เทคนิคการเคลือบแบบดอกเตอร์เบลด

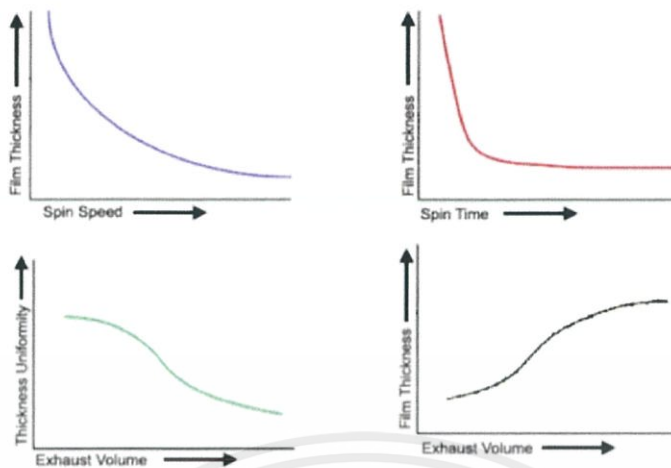
### 2.2.3 เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating)

การเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงเป็นวิธีการเคลือบอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการผลิตฟิล์มบาง โดยการหยดสารเคลือบซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นของเหลวลงบนจุดศูนย์กลางของวัสดุฐาน และเหวี่ยงด้วยความเร็วสูง ความเร่งสู่ศูนย์กลาง ทำให้สารเคลือบกระจายไปทั่วแผ่นรอง สุดท้ายจะเกิดฟิล์มบางเคลือบบนวัสดุฐาน (รูปที่ 2.13) ความหนาและสมบัติอื่นๆ ของฟิล์มบางจะขึ้นอยู่กับสมบัติของสารเคลือบ เช่น ความหนืด อัตราการทำให้แห้ง (Rate of drying) เฟอร์เซ็นต์ของแข็งและแรงตึงผิว (Surface tension) ปัจจัยที่มีผลต่อความหนาในกระบวนการหมุนเหวี่ยง คือ ความเร็วของการหมุน เวลาในการหมุน ปริมาณของสารเคลือบ จากกราฟในรูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาฟิล์มกับความเร็วในการหมุนและเวลาในการหมุน โดยฟิล์มจะบางลงเมื่อความเร็วและเวลาในการหมุนมากขึ้น และฟิล์มที่หนาจะมีความเร็วในการหมุนต่ำ เวลาในการหมุนน้อย และปริมาณของสารเคลือบมาก



รูปที่ 2.13 เทคนิคการเคลือบแบบการหมุนเหวี่ยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



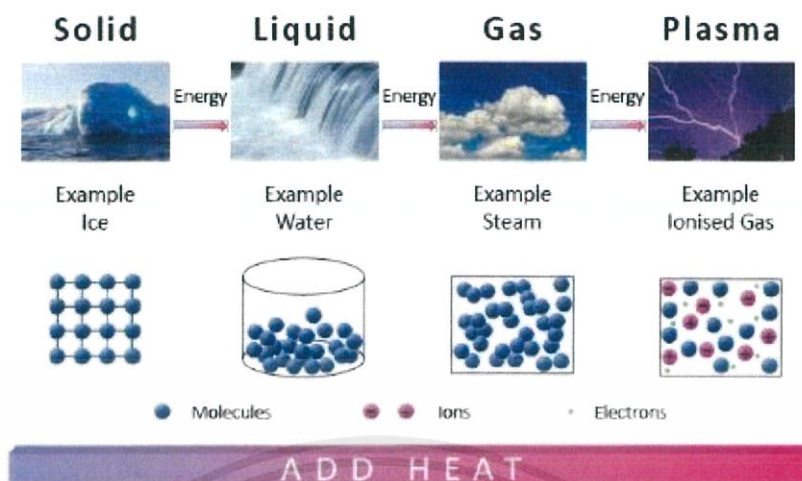
รูปที่ 2.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์ม กับความเร็ว เวลาและปริมาตรของสารที่ใช้ในการหมุนเหวี่ยง

### 2.3. พลาสมา (Plasma)

พลาสมา ด้านของฟิสิกส์และเคมี เป็นสถานะที่ 4 ของสารซึ่งเกิดจากแก๊สในสถานะที่บางเบา เมื่ออุณหภูมิของสสารเพิ่มมากขึ้น จะเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็ง เป็นของเหลว จากของเหลวไปเป็นสถานะก๊าซ และถูกกระตุ้นจากภายนอกให้แตกตัวแก๊สที่มีสภาพเป็นไอออน และมักจะถือเป็นสถานะหนึ่งของสสาร ที่มีสภาพเป็นไอออนอีกความหมายว่า จะมีอิเล็กตรอนอย่างน้อย 1 ตัว ถูกดึงออกจากโมเลกุล หรืออะตอมในกรณีที่เป็นแก๊สเฉื่อย ประจุไฟฟ้าอิสระทำให้พลาสมามีสภาพการนำไฟฟ้าเกิดขึ้น ซึ่งเป็นไอออน และอิเล็กตรอนอย่างต่อเนื่อง โดยที่ไอออนสามารถที่จะกลับมารวมตัวกันกลับเป็นโมเลกุลหรืออะตอมเดิมอีกครั้ง พร้อมกับคายพลังงานส่วนเกินที่ได้รับออกมา หรืออิเล็กตรอนบางส่วนจะชนเข้ากับอิเล็กตรอนของอะตอมอื่นๆ ที่เหลือทำให้อะตอมเหล่านั้นถูกกระตุ้นหรือแตกตัวเป็นปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง

#### 2.3.1 การเกิดอนุภาคที่มีประจุ (Production of charged particles)

เนื่องจากมีลักษณะที่เป็นเอกลักษณ์และแตกต่างไปจากสถานะอื่นอย่างชัดเจน ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุทั้งประจุบวกและลบ ในสัดส่วนที่ทำให้ประจุสุทธิเป็นศูนย์ การอยู่รวมกันของอนุภาคเหล่านี้เป็นแบบประหนึ่งเป็นกลาง (quasineutral) ซึ่งหมายความว่าอิเล็กตรอนและไอออนในบริเวณนั้น โดยรวมแล้วมีจำนวนเท่า ๆ กัน และแสดงพฤติกรรมร่วม (collective behavior)



รูปที่ 2.15 แสดงสถานะของสสารและตัวอย่างสถานะที่พบได้ในธรรมชาติ

ในพฤติกรรมร่วมที่หมายถึง เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคในพลาสมา โดยจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในบริเวณพื้นที่นั้นๆ เท่านั้น และขึ้นกับผลโดยรวมจากพลาสมาส่วนใหญ่ มากกว่าจะเป็นผลมาจากการชนกันของอนุภาคที่อยู่บริเวณใกล้เคียงกัน เพราะอนุภาคที่อยู่ในพลาสมาที่สถานะสมดุล จะมีการสั่นด้วยความถี่ที่สูงกว่าความถี่ในการชนกันของอนุภาค 2 ตัวที่อยู่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นพฤติกรรมร่วมนี้ เป็นพฤติกรรมที่กลุ่มพลาสมาแสดงออกมาร่วมกัน

### 2.3.2 การแตกตัวโดยการชน (Ionization by collision)

การทำพลาสมาให้แตกตัวมีหลายแบบเช่น การแตกตัวเป็นพลาสมาโดยใช้แสง และการชนด้วยอิเล็กตรอน เป็นต้น ซึ่งเมื่ออิเล็กตรอนแตกตัว เป็นไอออน หรืออิเล็กตรอน วิ่งเข้าด้วยความเร็วค่าหนึ่งหาอะตอมใดๆ จะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานซึ่งกันและกัน หากหลังการชนอะตอมที่โดนชนไม่อยู่ในสถานะที่ถูกกระตุ้น (non-excitation) หรือ ไม่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออน จะเป็นการชนในแบบยืดหยุ่น (elastic collision) ในทางตรงกันข้ามหากอะตอมที่โดนชนอยู่มนสถานะที่ถูกกระตุ้น (excitation) การชนนี้จะแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic collision)

การที่อนุภาคชนกับอิเล็กตรอนนั้นจะทำให้อะตอมที่โดนชนเกิดการแตกตัวเป็นไอออน ทำให้เกิดปรากฏการณ์ การแตกตัวเป็นไอออนแบบการชนด้วยอิเล็กตรอน ในกรณีนี้ที่อิเล็กตรอนมีพลังงานจลน์ มากกว่าหรือเท่ากับ พลังงานการแตกตัวเป็นไอออน สามารถเขียนเป็นสมการ ดังนี้

$$\frac{1}{2}mv^2 \geq W_i \quad (2.6)$$

$m$  คือ มวลของอิเล็กตรอน

$v$  คือ ความเร็วของอิเล็กตรอน

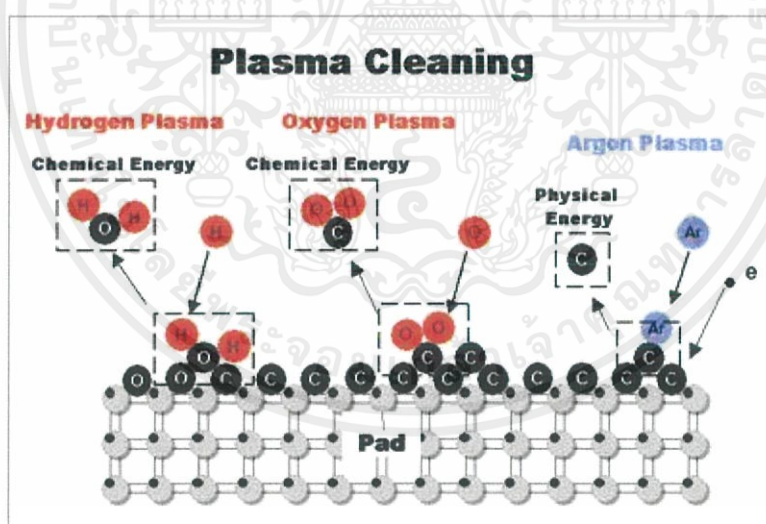
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$W_i$  คือ พลังงานการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม

หลังการชนพลังงานจลน์จะลดลง และอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะมีค่าพลังงานจลน์ค่าหนึ่ง ซึ่งพลังงานจลน์ของกรณีที่จะอะตอมที่เกิดการแตกตัวกลายเป็นไอออนจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง เพราะอะตอมที่มีมวลมากเปรียบเทียบกับมวลของอิเล็กตรอน บางครั้งอะตอมที่ถูกชนก็ไม่เกิดการแตกตัวเป็นไอออนแต่อยู่ในสถานะที่มีการกระตุ้นเท่านั้น ก่อนที่จะอะตอมจะกลับสู่สถานะพื้น (ground state) มีอิเล็กตรอนอีกตัวจนอาจทำให้อะตอมนั้นสามารถแตกตัวเป็นไอออนได้ การแตกตัวเป็นไอออนในขั้นตอนนี้ เรียกว่า การแตกตัวเป็นไอออนแบบขั้น (step ionization) โดยอิเล็กตรอนที่เข้าชนจะมีความหนาแน่นสูง และการกระตุ้นอยู่ในสถานะกึ่งเสถียร (metastable excited state) ส่งผลทำให้มีช่วงชีวิต (life time) ยาวนานกว่าสถานะถูกกระตุ้นแบบปกติ

### 2.3.3 ปฏิกิริยาเคมีของพลาสมา (plasma surface chemistry)

สถานะพลาสมาที่มีพลังงานสูง เช่น ไอออน อิเล็กตรอน หรือโปรตอนนั้น สามารถถ่ายเทพลังงานให้แก่โมเลกุลหรืออะตอมอื่นได้ ทำให้สสารหลุดออกไปจากตำแหน่งเดิม หรือทำลายพันธะ ทำให้โมเลกุลแตกตัว หรือมีการจัดเรียงเป็นโครงสร้างใหม่ ทำให้สมบัติของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 2.16 แสดงพันธะการทำพลาสมาแบบ hydrogen ,oxygen ,argon

#### 2.3.3.1 ความหนาแน่นของพลาสมา (plasma density)

ในพลาสมาประกอบไปด้วยไอออน อิเล็กตรอน และอะตอมรวมกันอยู่ จะมีความหนาแน่นขององค์ประกอบที่แตกต่างกันไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การแตกตัวเป็นไอออน} = \frac{n_i}{(n_i+n_e+n_n)} \times 100 \% \quad (2.7)$$

$n_i$  คือ ความหนาแน่นของไอออน

$n_e$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

$n_n$  คือ ความหนาแน่นของอนุภาคที่เป็นกลาง

เปอร์เซ็นต์การแตกตัวเป็นไอออนมีค่าน้อยกว่า 1% ต้องพิจารณาผลของรงปฏิริยาของอนุภาคที่เป็นกลาง แต่ถ้าเปอร์เซ็นต์การแตกตัวของไอออนมีค่ามากกว่า 10 % จะถือว่ามี การแตกตัวเป็นไอออนได้มาก

### 2.3.3.2 ระยะปลอดการชนเฉลี่ย (mean free path)

เป็นระยะทางเฉลี่ยที่อนุภาคสามารถเคลื่อนที่ได้โดยไม่กับการชนกับอนุภาคอื่นภายในระบบ โดยใช้เป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดว่าพลาสมาที่สร้างขึ้นสามารถเป็นสถานะพลาสมาแบบต่อเนื่องได้

ล้าอนุภาคที่ชนที่ระยะทาง  $x$  ใดๆ มี  $n$  จำนวนอนุภาค ดังนั้นจำนวนอนุภาคในล้าอนุภาคที่เกิดการสูญเสียพลังงานจากการกระเจิง เมื่อเคลื่อนไป  $dx$  เขียนสมการดังนี้

$$dn = -nN\pi(r_1+r_2)^2 dx \quad (2.8)$$

$r_1$  คือ รัศมีของอนุภาคที่เล็ก

$r_2$  คือ อนุภาคที่ใหญ่

กำหนด จำนวนอนุภาค  $n_0$  ที่ระยะ  $x = 0$  จะได้

$$n = n_0 \exp[-N\pi(r_1+r_2)^2 x] \quad (2.9)$$

ความน่าจะเป็นที่ระยะปลอดการชนมีค่า  $x$  มีค่าเท่ากับความน่าจะเป็น  $p(x)$  ที่การชนจาก  $x$

ถึง  $x+dx$  ซึ่งมีค่า  $\frac{dn}{n_0}$

$$p(x) = \frac{dn}{n_0} = N\pi(r_1+r_2)^2 \exp[-N\pi(r_1+r_2)^2 x] dx \quad (2.10)$$

จะได้ระยะปลอดการชนเฉลี่ย (mean free path;  $\lambda$ )

$$\begin{aligned} \lambda &= \int_{x=0}^{\infty} x p(x) dx \\ &= \frac{1}{N\pi(r_1+r_2)^2} \end{aligned} \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้อนุภาคที่ชนกันเป็นอนุภาคที่เหมือนกัน คือ  $r_1 = r_2 = r$  จากสมการที่ 2.11 จะได้ระยะเฉลี่ยของการปลดการชนเป็น

$$\lambda = \frac{1}{4\pi(r)^2 N} \quad (2.12)$$

สำหรับกรณีของอนุภาคที่เป็นกลางเป็นโมเลกุลของแก๊ส ระยะปลดการชนเฉลี่ย ( $\lambda$ ) จะมีค่า

$$\lambda_s = \frac{1}{\sqrt{2}} \lambda = \frac{kT}{4\sqrt{2}\pi r^2 p} \quad (2.13)$$

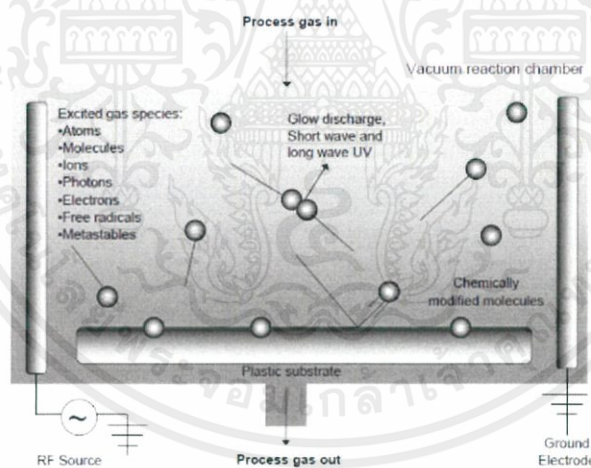
$r$  คือ รัศมีของโมเลกุลของแก๊ส

$p$  คือ ความดันของระบบ

$T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

$k$  คือ ค่าคงที่ของโบลต์มันน์

### 2.3.3 ปฏิกริยาระหว่างพลาสมากับพื้นผิว (Plasma Surface Interactions)

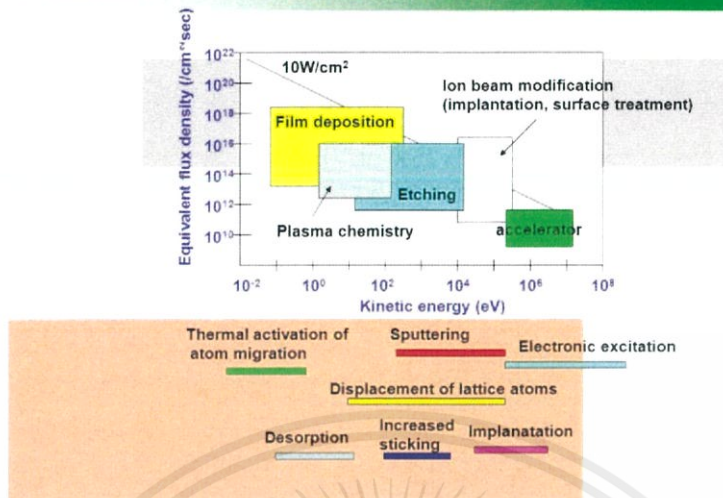


รูปที่ 2.17 แสดงอนุภาคต่างๆที่อยู่ในห้องพลาสมา

ปฏิกริยาเคมีระหว่างสารเนื้อเดียวของพลาสมากับปฏิกริยาระหว่างสารต่างชนิดกับพลาสมา โดยเป็นปฏิกริยาระหว่างพลาสมาซึ่งอันตรกิริยาเชิงกายภาพระหว่างอนุภาคที่มีพลังงานสูง และโฟตอนในพลาสมาที่สัมผัสกับผิวที่สัมผัสกับพลาสมา จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่พื้นผิวกับอนุภาคชนิดต่างๆในพลาสมากับพื้นผิวที่สัมผัสกับพลาสมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Plasma Surface Interactions



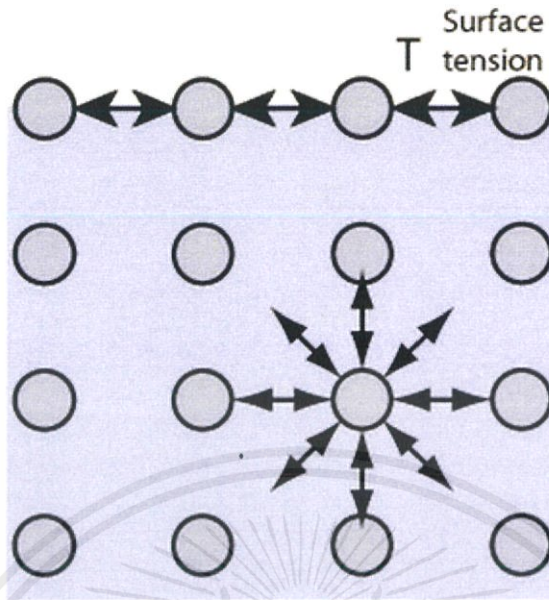
รูปที่ 2.18 แสดงอันตรกิริยาของพลาสมา กับพื้นผิวที่มีความหนาแน่นกับพลังงานจลน์ที่แตกต่างกัน

การบวกระต่างๆที่เกิดขึ้นบนฐานรองรับ หรือการปลูกฟิล์มบางนั้น จะได้รับผลกระทบจากการเข้าชน (bombardment) ของอนุภาคที่มีพลังงานสูงที่อยู่ในพลาสมา

### 2.4 แรงตึงผิว (Surface tension)

เกิดจากปรากฏการณ์ที่พื้นผิวของของเหลวมีลักษณะเป็นเหมือนแผ่นยางยืด (elastic sheet) ที่เกิดจากแรงตึงผิว เช่น ใบบัวลอยบนผิวน้ำ แมลงจิ้งจกน้ำเดินบนผิวน้ำ ซึ่งแรงผิวน้ำเกิดจากผิวหน้าของของเหลวเชื่อมต่อกับผิวหน้าของของแข็ง แต่ถ้าเป็นผิวของของเหลวกับผิวของของเหลว จะเรียกว่า แรงระหว่างผิว (interfacial tension) อยู่ในหน่วย มิลลินิวตันต่อเมตร (mN/m) หรือไดน์ต่อเซนติเมตร (dyne/cm) โดย  $1 \text{ mN/m} = 1 \text{ dyne/cm}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

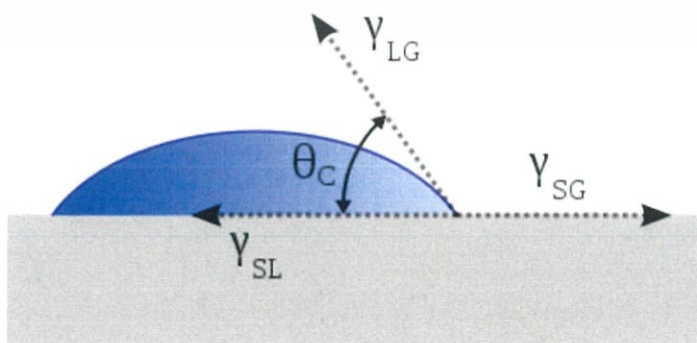


รูปที่ 2.19 แรงระหว่างโมเลกุลที่บริเวณผิวและในของเหลว

แรงตึงผิวเกิดขึ้นมาจากความไม่สมดุลระหว่างแรงระหว่างโมเลกุลในของเหลว ที่บริเวณพื้นผิวด้านบนของของเหลว จะมีโมเลกุลของของเหลวด้านล่างดึงดูดระหว่างโมเลกุลอยู่ ถ้ามีค่ามาก โมเลกุลจะยึดเหนี่ยวกันได้ดีทำให้ ถ้าวัตถุสามารถลอยบนผิวของของเหลวได้ เนื่องจากน้ำหนักของวัตถุมีค่าต่ำกว่าแรงตึงผิวของผิวของเหลวจึงทำให้ไม่จม

## 2.5 มุมสัมผัส (contact angle)

เป็นมุมที่ของเหลวไปก่อตัวหยดอยู่บนพื้นผิวของของแข็ง การวัดมุมทำได้โดยหยดของเหลว ลงไป ของเหลวจะเป็นหยดอยู่บนพื้นที่ผิวและเกิดมุมขึ้น มุมที่เกิดระหว่างรอยต่อของของแข็งกับของเหลว และรอยต่อระหว่างของเหลวกับ อากาศ เรียกว่ามุมสัมผัส



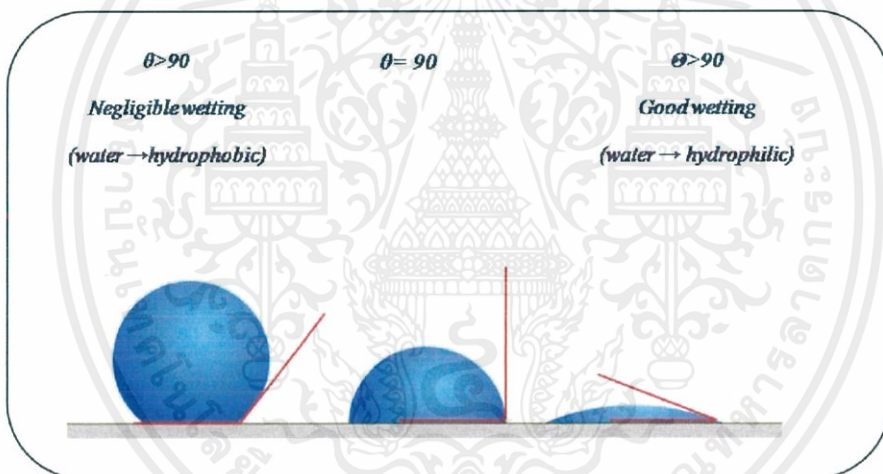
รูปที่ 2.20 แสดงมุมสัมผัส ( $\theta_c$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้วัดมุมที่เกิดขึ้นและใช้ศึกษารายละเอียดของหยดของเหลว คือ สมการของยัง (Young's equation) นอกจากนี้ยังอธิบายเกี่ยวกับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารชนิดเดียวกัน (cohesion force) และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารต่างชนิดกัน (adhesion force) ซึ่งบอกในรูปของพลังงานพื้นที่ผิว (surface energy)

$$\gamma^{sv} = \gamma^{sl} + \gamma^{lv} \cos \theta_c \quad (2.14)$$

- $\theta_c$  คือ มุมสัมผัส  
 $\gamma^{sv}$  คือ พลังงานบริเวณที่ไม่มีของแข็ง  
 $\gamma^{sl}$  คือ พลังงานบริเวณที่ไม่มีของแข็งกับของเหลว  
 $\gamma^{lv}$  คือ พลังงานบริเวณที่ไม่มีของเหลวกับอากาศ



รูปที่ 2.21 แสดงสมบัติของหยดน้ำกับมุมสัมผัสที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว

พื้นผิวของหยดของของเหลวที่เกิดมุมสัมผัสมากกว่า  $90^\circ$  เรียกพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ทำให้วัสดุมีสมบัติไม่เปียกน้ำง่าย แรงยึดเหนี่ยวต่ำ และมีพลังงานพื้นผิวดำ แต่ถ้เกิดมุมสัมผัสน้อยกว่า  $90^\circ$  เรียกพื้นผิวที่ชอบน้ำ (hydrophilic) ทำให้วัสดุมีสมบัติเปียกน้ำที่ดี แรงยึดเหนี่ยวสูงกว่า และมีพลังงานพื้นผิวสูง นอกจากนี้ยังสามารถช่วยอธิบายความขรุขระและความสะอาดของพื้นผิวได้ด้วย

## 2.6. ทฤษฎีเบื้องต้นในการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม

### 2.6.1 เครื่องวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด

สมบัติที่สำคัญในการใช้กำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำเป็นขั้วไฟฟ้าคือ การวัดความต้านทานไฟฟ้า จำเป็นต้องพิจารณาเมื่อต้องการนำมาเป็นวัสดุในการทำสิ่งประดิษฐ์ทางไฟฟ้า ซึ่งสามารถตรวจวัดพารามิเตอร์รอบๆ ได้อย่างแม่นยำ ใช้วัดค่าความต้านทานทำให้ประเมินคุณภาพของวัสดุได้ง่าย รวดเร็ว แม่นยำ กำหนดค่าได้ละเอียด และยังเป็นกรวัดแบบไม่ทำลายวัสดุหรือชิ้นงานสิ่งประดิษฐ์

วิธีการหาค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุเป็นวิธีง่ายๆ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.15)$$

R คือ ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโอห์ม ( $\Omega$ )

$\rho$  คือ ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าขึ้นกับวัสดุ มีหน่วยเป็นโอห์ม-เซนติเมตร ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )

l คือ ขนาดของความยาว มีหน่วยเป็นเซนติเมตร (cm)

A คือ พื้นที่หน้าตัด มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร ( $\text{cm}^2$ )

และสมการ

$$R = V / I \quad (2.16)$$

V คือ ค่าความต่างศักย์ มีหน่วยเป็นโวลต์

I คือ ค่ากระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็น แอมแปร์

จากสมการ 2.16 สามารถเขียนสมการอยู่ในรูปการวัดค่าพิกัดความต้านทานทางไฟฟ้า ดังนี้

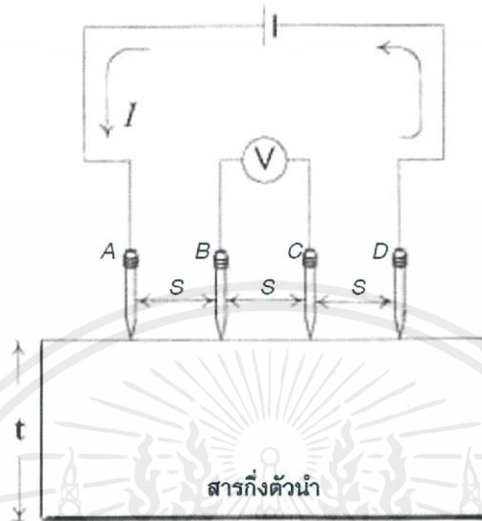
$$\rho = \frac{RA}{l} \quad (2.17)$$

ในการแสดงลักษณะของการวัดค่าพิกัดความต้านทานทางไฟฟ้าของชิ้นงานนั้น ถ้าการตัดขวางเป็นไปอย่างเป็นระเบียบ และทราบขนาดที่ถูกต้อง ซึ่งต้องแน่ใจว่าไม่มีรอยต่อของสิ่งกีดขวางอื่นที่จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมขึ้น แรงดันจะถูกวัดเป็นคู่หัววัดพิเศษทำให้เกิดความสมดุลของการวัดเมื่อให้แรงดันไม่มีกระแสที่หัววัดระหว่างกรวัด และค่าความนำไฟฟ้าของชิ้นงานสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\sigma = \frac{LI}{AV} \quad (2.18)$$

จากสมการข้างต้นนี้ยังไม่นิยมมาใช้ในการวัดค่าความนำไฟฟ้า เนื่องจากไม่สะดวกในการทำสาคให้เป็นแท่งยาว และเรื่องความเร็วในการทดลอง แต่ในการทดสอบนี้จะไม่เกิดอันตรายต่อผลึกของสาร จึงได้มีการพัฒนาวิธีวัดนี้โดยสามารถประยุกต์ใช้กับชิ้นสารตัวอย่างอื่นๆ ที่มีลักษณะเดียวกันหรือสามารถตัดผิวหน้าให้เรียบ

การวัดความต้านทานลักษณะนี้ ที่บริเวณขั้วไฟฟ้าที่ปลายทั้งสองข้างจะเกิดเป็นรอยสัมผัสโอห์มมิก (ohmic contact) เพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด โดยวิธีการวัดด้วยเข็มวัด 4 จุด สามารถวัดได้โดยใช้เข็มวัดแทนการสร้างรอยสัมผัสโอห์มมิก



รูปที่ 2.22 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด

การวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด ทั้ง 4 เข็มมีระยะห่างระหว่างทั้ง 4 เข็มเท่ากัน  $s$  โดยการวัดเริ่มจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าคงที่ผ่านเข็ม A กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านจาก เข็ม A ผ่านวัสดุไปยังเข็ม D ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม ทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่เข็ม B และ C และนำค่าที่วัดได้มาคำนวณหาสภาพความต้านทานทางไฟฟ้า บนผิวของชิ้นงานจากการแก้สมการสนามไฟฟ้าบนผิวชิ้นงาน ดังนี้

$$\rho = 2\pi s \frac{V}{I} \quad (2.19)$$

ในแต่ละชิ้นงานตัวอย่างอาจไม่เป็นตามเงื่อนไขของลักษณะขอบเขตที่ไม่สามารถจำกัดแนวเขตได้ทั้งในแนวระนาบและแนวลึกจึงทำให้ค่าที่ได้ยังไม่ถูกต้อง ต้องปรับโดยใช้ ค่าפקเตอร์ความถูกต้อง (correction factor) ซึ่งสมการ ดังนี้

$$F = F_1 F_3 [\ln(2) F_2 / \pi] \quad (2.20)$$

$F_1$  คือ ค่าปรับสำหรับความหนาของชิ้นงาน

$F_2$  คือ ค่าปรับขนาดตามแนวระนาบ

$F_3$  คือ ค่าปรับตำแหน่งการวางหัวโพรบเทียบกับขอบเขตของชิ้นงาน

ค่า  $F_1$  กรณีผิวด้านใต้ชิ้นงานเป็นผิวที่ไม่นำไฟฟ้า (non-conducting surface)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_1 = F_{11} = \frac{t/s}{2 \ln[\sinh(t/s)/\sinh(t/2s)]} \quad (2.21)$$

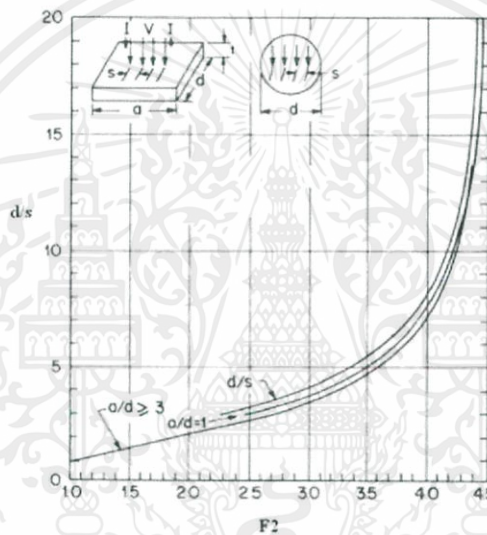
ค่า  $F_1$  กรณีผิวด้านใต้ชิ้นงานเป็นผิวที่นำไฟฟ้า (conducting surface)

$$F_1 = F_{12} = \frac{t/s}{2 \ln[\cosh(t/s)/\cosh(t/2s)]} \quad (2.22)$$

โดย  $t$  คือค่าความหนาของชิ้นงาน

การวัดค่าความต้านทานบนชิ้นงาน ที่ถูกทำเป็นกล่องเล็กๆ และมีความหนาร่วมด้วย เรียกว่า ลูกเต๋า แสดงให้เห็นลักษณะการวัดค่าพิกัดความต้านทานของวัสดุ ตามสมการ ดังนี้

$$\rho = \rho_0 R \left( \frac{t}{s} \right) \quad (2.23)$$



รูปที่ 2.23 ปรับค่า  $F_2$  ขนาดตามแนวระนาบของชิ้นงาน

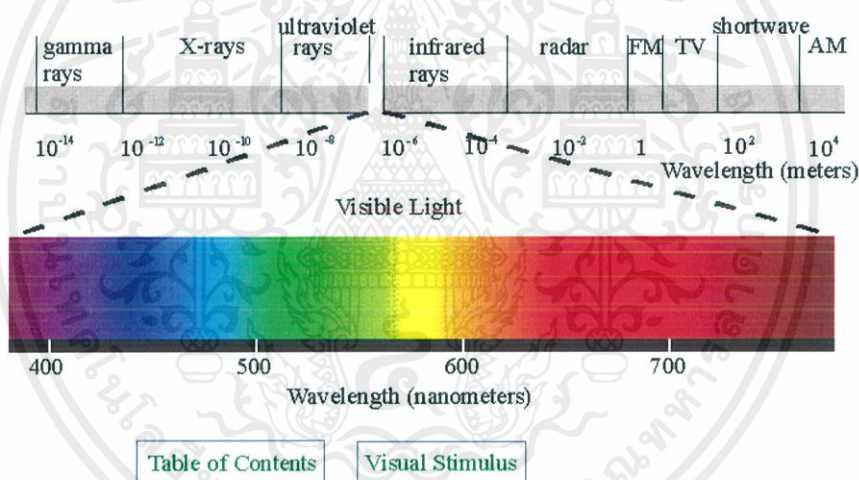
การปรับขนาดชิ้นงานตามแนวระนาบแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ ชิ้นงาน รูปวงกลม กับ ชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยม โดยถ้าหากชิ้นงานเป็นวงกลมจะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $d$  ตูจากเส้นผ่านศูนย์กลาง ชิ้นงานเปรียบเทียบกับระยะระหว่างเข็มวัด

ในกรณีที่ชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมที่มีความยาว  $a$  ความกว้าง  $d$  จะพิจารณาขนาดชิ้นงานตาม แนวทางเปรียบเทียบกับขนาดตามความกว้าง ( $a/d$ ) และได้แสดงลักษณะเส้นกราฟ คือ  $a/d = 1$  และ  $a/d \geq 3$  จากนั้นคำนวณหาอัตราส่วนระหว่าง ความกว้างของชิ้นงานกับระยะระหว่างเข็มวัด ( $d/s$ ) โดยปรับค่า  $F_2$  ให้ค่าสูงสุด เมื่อขนาดความกว้างของชิ้นงานมีค่ามากกว่าระยะระหว่างเข็มวัดมากๆ เหมือนในชิ้นงานเป็นแบบวงกลม

วิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุดนี้มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง และให้ ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องอย่างเพียงพอในการนำไปใช้ในการคำนวณอื่นๆ

## 2.6.2 เครื่องวัดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ด้วยแสงช่วง UV – Visible (UV/VIS Spectrophotometer)

UV/VIS Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มของแสง (intensity) ในช่วงรังสียูวี (Ultraviolet) ที่มีช่วงความยาวคลื่นที่ 100-400 nm และช่วงแสงขาว (Visible light) ที่มีช่วงความยาวคลื่นที่ 400-800 nm ที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างหรือชิ้นงาน (sample) ที่ต้องการศึกษาซึ่งวางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงที่ใช้จะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและสสารสามารถดูดกลืนแสงหรือรังสีได้ ซึ่งสารที่สามารถดูดกลืนรังสีได้ ได้แก่ พวกลสารอินทรีย์ (organic compound) สารประกอบเชิงซ้อน (complex compound) สารประกอบอนินทรีย์ (inorganic compound)



รูปที่ 2.24 แสดงสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน (Energy, E) กับ ความถี่ (frequency,  $\nu$ )

$$E = h\nu = hc/\lambda \quad (2.24)$$

- E คือ ค่าพลังงาน 1 โฟตอน มีหน่วยเป็นจูล (J)
- h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant)  
 $= 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} = 6.626 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg/s} = 6.62 \times 10^{-27} \text{ erg}\cdot\text{s}$
- c คือ ค่าคงที่ความเร็วของแสง =  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของการดูดกลืนแสงของสาร โมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงในช่วงรังสียูวีหรือแสงขาวที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมของสารมีการดูดกลืนแสงที่ผ่านเข้ามาแล้วทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ทะลุผ่านมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆตามกฎของ Beer-Lambert ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ ซึ่งในการรับพลังงานของตัวอย่างหรือชิ้นงานของแต่ละธาตุหรือโมเลกุลแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ขึ้นกับชนิดของพันธะ

#### กฎของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer-Lambert)

เมื่อมีแสงที่มีค่าความยาวคลื่นเดียว (monochromatic light) เคลื่อนผ่านตัวกลางเนื้อเดียว ทำให้ลำแสงที่ทะลุผ่านสาร สัดส่วนของความเข้มแสงที่ผ่านตัวกลาง โดยสัดส่วนความเข้มของแสงที่ผ่านตัวกลางที่ถูกดูดกลืนนั้นจะมีค่าแปรผันตรงกับปริมาณของตัวกลางที่ดูดกลืนแสงไว้ เมื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย ปริมาณความเข้มของแสงที่ถูกดูดกลืนขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลาย และความหนาของสารละลายที่แสงทะลุผ่าน

ในการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างสามารถทำได้ โดยให้ลำแสงผ่านเข้าไปในสารละลายตัวอย่าง (incident light,  $I_0$ ) แล้วทำการวัดค่าปริมาณแสงที่เหลือทะลุผ่านออกมา ( $I$ ) โดยเปรียบเทียบกับค่าความเข้มแสงที่ผ่านออกมาโดยไม่มีสารตัวอย่าง

ค่าการทะลุผ่านของแสง (Transmittance,  $T$ ) คือ สัดส่วนของปริมาณแสงที่ทะลุผ่านออกมา ( $I$ ) ต่อปริมาณแสงที่ทะลุผ่านออกมาจากสารตัวอย่าง ( $I_0$ ) เขียนเป็นสมการ ดังนี้

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (2.25)$$

สมการการดูดกลืนแสง (Absorbance,  $A$ ) ดังนี้

$$A = \log \frac{I_0}{I} = -\log T \quad (2.26)$$

ซึ่งปกติจะรายงานค่าการทะลุผ่านของแสงเป็นเปอร์เซ็นต์ (%T) จะได้

$$\%T = 100 \frac{I}{I_0}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

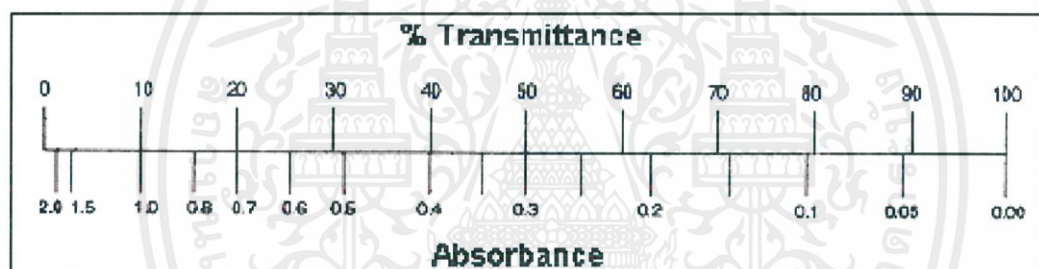
$$\log \%T = \log 100 \frac{I}{I_0}$$

$$\log \%T = 2 + \log \frac{I}{I_0}$$

$$\log \%T = 2 - A \quad \text{หรือ}$$

$$A = 2 - \log \%T$$

ดังนั้นค่าการทะลุผ่านของแสง (T) จะมีค่าอยู่ในช่วง 0-1 และค่า %T มีค่าอยู่ในช่วง 0-100 ส่วนค่าของการดูดกลืนของแสง  $A = 0$  หมายถึงแสงที่ผ่านเข้าไปในตัวอย่างไม่ถูกดูดกลืน และสามารถทะลุผ่านออกมาได้ 100% แต่ถ้า  $A=1$  แสดงว่าเมื่อแสงที่ผ่านเข้าไปในตัวอย่างถูกดูดกลืน 90% และ  $A=2$  แสดงว่าเมื่อแสงที่ผ่านเข้าไปในตัวอย่างถูกดูดกลืน 99%



รูปที่ 2.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง กับ เปอร์เซนต์การทะลุผ่านของแสง

### 2.6.2.1 ส่วนประกอบของเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer

ส่วนประกอบของเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

#### 1) แหล่งกำเนิดแสง

แหล่งกำเนิดแสงในเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ให้รังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการอย่างต่อเนื่อง และคงที่ตลอดเวลา มีความเข้มแสงที่มากพอในการใช้งานด้วย ในหลอดกำเนิดแสง มีหลายชนิดตามความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมา ซึ่งต้องเลือกใช้ให้ถูกต้องเหมาะสมกับตัวอย่างสารที่นำมาวัดค่าดูดกลืนแสง

ตัวอย่างแหล่งกำเนิดแสง ช่วง UV ใช้หลอด  $H_2$  and  $D_2$  lamp ให้ความยาวคลื่นอยู่ในย่าน 160-380 nm ชนิดของสเปกโทรสโกปี UV molecular absorption และช่วง visible ใช้หลอด

Tungsten/halogen ให้ความยาวคลื่นในช่วง 240-2,500 nm ชนิดของสเปกโทรสโกปีเป็นแบบ UV/visible/near-IR molecular absorption

## 2) Monochromator

ส่วนประกอบนี้เป็นส่วนที่ใช้ในการควบคุมแสงโดยจะทำให้แสงรังสีที่ออกมาจากต้นกำเนิดแสง ซึ่งเป็นพอลิโครเมติก (polychromatic) เป็นแถบแสงที่กว้างหรือมีค่าความยาวคลื่นหลายค่า เปลี่ยนให้เป็นแสงโมนโครเมติก (monochromatic) ซึ่งเป็นแถบแสงแคบๆ หรือมีความยาวคลื่นเดียว โดยมีการใช้ฟิลเตอร์ (กระจกสี) ปริซึม (prism) หรือ เกรตติ้ง (grating) ในการทำให้ได้ลำแสงเพียงความยาวคลื่นเดียว

## 3) เซลล์ที่ใช้บรรจุสารละลายตัวอย่าง

เซลล์ที่ใส่สารตัวอย่าง (cell sample) เรียกว่า คิวเวทท์ (cuvettes) รูปแบบที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่เซลล์ที่ทำด้วยแก้วธรรมดา จะใช้ได้เฉพาะช่วงแสง visible เพราะเนื้อแก้วธรรมดาถูกดูดกลืนแสงในช่วงยูวีได้ และเซลล์ที่ทำด้วยซิลิกา และควออตซ์ (quartz) ใช้ได้ทั้งช่วงยูวีและ visible

## 4) Detector

ทำหน้าที่ในการวัดความเข้มของรังสีที่ถูกดูดกลืนโดยการแปลงพลังงานคลื่นรังสีเป็นพลังงานไฟฟ้าเครื่อง detector ที่ใช้ในการตรวจจับสัญญาณที่ดีต้องมีสภาพไวสูง โดยถ้าหากปริมาณแสงมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย แต่ยังสามารถตรวจจับสัญญาณความแตกต่างได้อย่างรวดเร็ว เครื่องวัดแสงหรือ detector ที่ยังนิยมกันอยู่ในปัจจุบัน คือ หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (photomultiplier tube, PMT) และเครื่องวัดแสงชนิดซิลิกอนไดโอด (silicon diode detector)

### 2.6.2.2 ข้อมูลจำเพาะ (Specifications)

- 1) ระบบการวัดการดูดกลืนแสงเป็นแบบลำแสงคู่ (double Beam) โดยมีแหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอดทิวเทอร์เรียม และหลอดทังสเตนฮาโลเจน
- 2) มีระบบแยกคลื่นแสงแบบ double monochromator
- 3) สามารถวัดการดูดกลืนแสงได้ในช่วงความยาวคลื่น 190 ถึง 900 นาโนเมตร ซึ่งสามารถตั้งค่าความยาวคลื่นได้ละเอียดถึง 0.1 นาโนเมตร
- 4) สามารถปรับความกว้างของลำแสง (spectral bandwidth) ได้ ในช่วง 0.1- 5 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5) ชุดตรวจวัดแสง (detector) เป็นชนิด Photomultiplier
- 6) ความถูกต้องของความยาวคลื่น (wavelength accuracy) มีความผิดพลาดไม่เกิน +0.15 นาโนเมตรในช่วง UV/VIS
- 7) ความแม่นยำของความยาวคลื่น (wavelength reproducibility) มีความคลาดเคลื่อน ไม่เกิน +0.06 นาโนเมตรในช่วง UV/VIS
- 8) มีชุด Integrating Sphere สำหรับวัดค่า Transmittance และ Reflectance ของพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่างโดยสามารถ ใช้ได้กับชิ้นงานตัวอย่างที่เป็นของแข็งและของเหลว
- 9) สามารถควบคุมอุณหภูมิของสารละลายตัวอย่างได้ในช่วง 5-90 องศาเซลเซียส

## 2.7 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 Shirakawa, Alan Heeger and MacDiarmid ได้ศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าของโพลีอะเซทิลีน โดยทดลองความนำไฟฟ้าของอะโพลีอะเซทิลีนแบบ trans ที่ถูกโด๊ปด้วยไอโอดีน ผลปรากฏว่า ความนำไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าสูงถึง  $3000 \text{ S m}^{-1}$  ซึ่งเพิ่มขึ้นมาถึงสิบล้านเท่า ( $10^7$  เท่า)

2.7.2 ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ได้ศึกษา การออกแบบ การสร้าง และวัดลักษณะสมบัติของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีลักษณะของขั้วไฟฟ้า แบบอินเตอร์ดิฟิเคท โดยจากการทดลองพบว่าที่ความกว้างของขั้วไฟฟ้า และระยะห่างของขั้วไฟฟ้า ITO เท่ากับ  $40 \mu\text{m}$  นั้นมีลักษณะสมบัติการตอบสนองทางแสง กระแสตรงและกระแสสลับเหมาะสมกันมากที่สุด โดยมีอัตราส่วนระหว่างกระแสแสงต่อกระแสมืดที่ความเข้มแสง  $25,000 \text{ lux}$  ภายใต้แรงดันไบอัส  $10 \text{ V}$  เท่ากับ  $1,900$  เท่า ประสิทธิภาพควอนตัม  $6.3\%$  สภาพการตอบสนองทางแสง  $0.042 \text{ A/W}$  และการตอบสนองทางความถี่  $350 \text{ kHz}$

2.7.3 บทความ เจริญชัย เหลืองอ่อน ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ได้ทำการศึกษา การวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด ซึ่งเป็นวิธีการมาตรฐานในการวัดค่าความต้านของสารกึ่งตัวนำที่สามารถตัดผลกระทบจากความต้านทานของสายไฟที่ใช้วัด และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมจุดวัดออกไปได้ จึงทำให้ค่าความต้านทานที่คำนวณได้มีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น รวมไปถึงสามารถวัดได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงขนาดและรูปร่างของวัสดุ

2.7.4 Wan et al. ได้ศึกษาชนิดของก๊าซที่ใช้ในการประยุกต์พลาสมา เพื่อดัดแปรพื้นผิวของพอลิแลคติก (Poly-L-lactic) ที่สภาวะความดันก๊าซ กำลังไฟฟ้า และเวลาในการประยุกต์พลาสมา พบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตัดแปรพื้นผิวของ PLLA ด้วยการประยุกต์พลาสมาของก๊าซแอมโมเนียส่งผลให้ PLLA มีคุณสมบัติชอบน้ำหรือมีขี้้วมากกว่าการใช้ก๊าซชนิดอื่น

2.7.5 บทความ วันชัย เลิศวิจิตรจรัส, โกสินทร์ ทาระชะวี, อำนาจ สิทธิตระกูล ภาควิชาวิทยาการ และวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้ศึกษาพัฒนาการของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า และการนำไปใช้งาน โดยพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีระบบ Conjugation อยู่ในโมเลกุล เมื่อได้รับการ Doping ด้วยปฏิกิริยา Reduction หรือ Oxidation แล้ว จะช่วยทำให้การนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นได้

2.7.6 ศาสตราจารย์ ทาคาโอะ โซเมยะ และ ดร.โทโมยุกิ โยโกตะ ได้ศึกษาและพัฒนาฟิล์มคุณภาพสูง ที่บางน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร แต่สามารถนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์แสดงผลอิเล็กทรอนิกส์ที่สวมใส่ได้ที่มี ประสิทธิภาพสูง ยืดหยุ่น และบางมาก โดยส่วนที่เป็นส่วนอนินทรีย์ใช้ Silicon Oxynitride และส่วนอนินทรีย์ใช้ Parylene เป็นวัสดุ

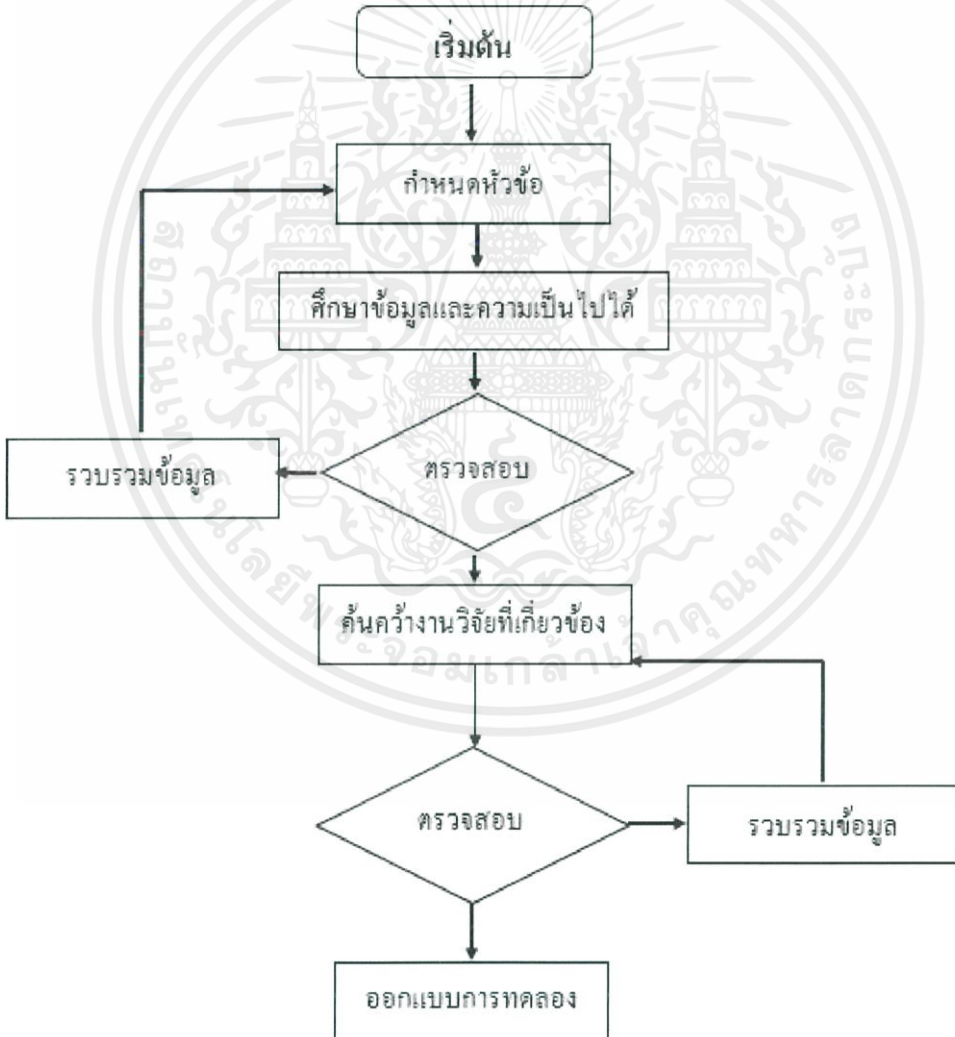
2.7.7 ทีมนักวิจัยเนคเทค สวทช.ได้ทำการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับการสังเคราะห์แกรฟีน ด้วยเทคนิค เคมีไฟฟ้า ลอกเอาแผ่นแกรฟีนบริสุทธิ์ออกจากขั้วแกรไฟต์และผสมเข้าไปในเนื้อพอลิเมอร์นำไฟฟ้า ทำให้ได้หมึกนำไฟฟ้าที่สามารถนำไปพิมพ์เป็นอุปกรณ์ต่างๆ ด้วยเทคนิคอิงค์เจ็ตราคาถูก

# บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงานวิจัย

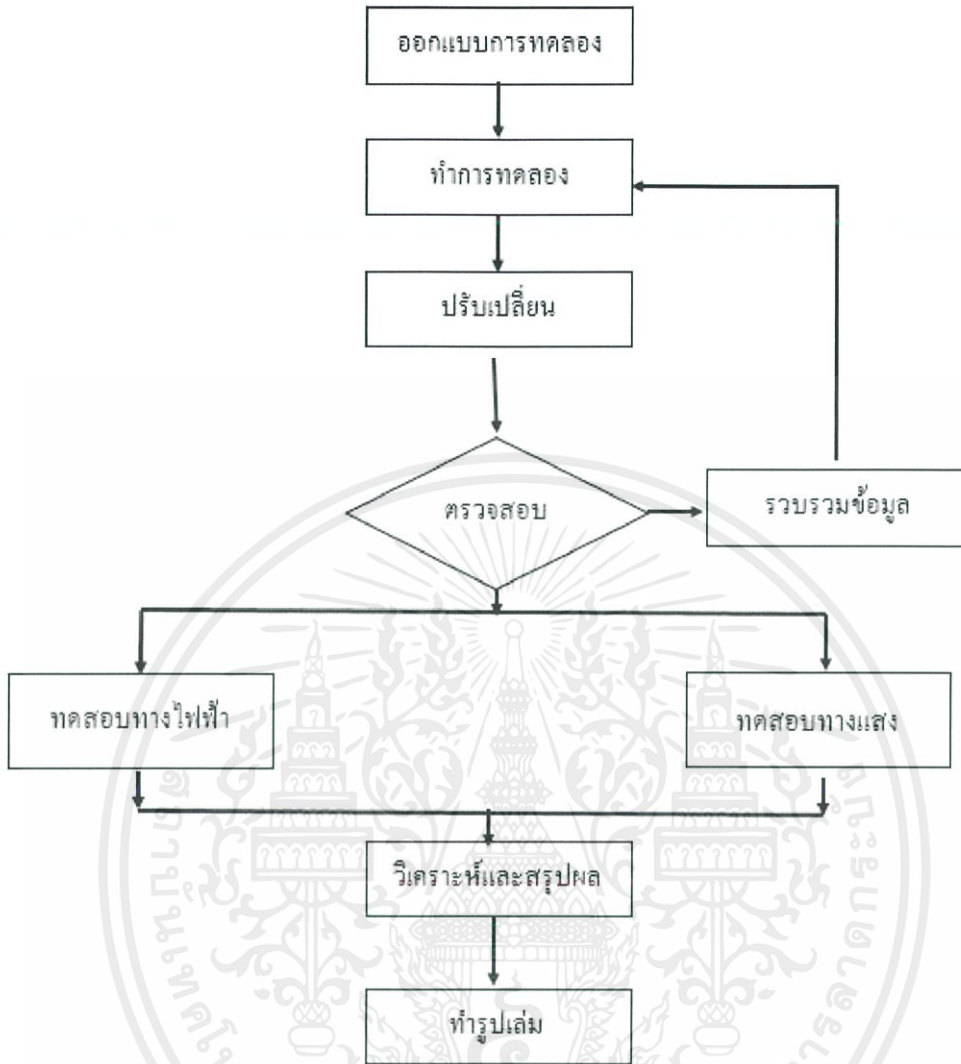
### 3.1 ขั้นตอนดำเนินการศึกษาวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการเตรียมฟิล์มบางเพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้า จากวัสดุผสมระหว่างวัสดุนาโน ITO, CNT และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS โดยทำการหาวิธีการเตรียมและเงื่อนไขในการเตรียมที่เหมาะสมกับวัสดุที่ใช้ รวมทั้งทำการตรวจวัดสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางที่เตรียม โดยขั้นตอนการดำเนินการศึกษาวิจัยจะแสดงดังแผนภาพในรูปที่ 3.1 และ 3.2



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย (ต่อ)

### 3.2 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

ขั้นตอนแรกของการทดลอง คือ การศึกษาข้อมูลเพื่อหาประโยชน์ในการออกแบบการทดลอง และเป็นประโยชน์สำหรับการทดลอง โดยมีข้อมูลเบื้องต้นที่จะศึกษาดังนี้

#### 3.2.1 กระบวนการเคลือบฟิล์มโดยวิธีต่างๆ

ฟิล์มบาง คือ ชั้นของวัสดุที่เรียงตัวอยู่บนชิ้นงานที่มีความหนาอยู่ในระดับนาโนเมตร จนถึงในระดับไมโครเมตร ซึ่งโดยหลัก ๆ แล้วเราจะประยุกต์ใช้ฟิล์มบางในด้านอิเล็กทรอนิกส์ ยกตัวอย่างเช่น การผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งในโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นก็ต้องมีการเตรียมวัสดุขึ้นมาที่มีลักษณะเป็นฟิล์มบาง โดยที่กระบวนการเตรียมฟิล์มบางนั้นมีมากมายหลายวิธี ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ การเคลือบฟิล์มโดยไอระเหย (Physical Vapor Deposition) และการเคลือบฟิล์มโดยสารละลาย (Solution Deposition) ตัวอย่างการเคลือบฟิล์มโดยไอระเหย เช่น การระเหยสารด้วยความร้อน (Thermal Evaporation) และการสปัตเตอร์ริง (Sputtering deposition) ซึ่งกระบวนการเคลือบฟิล์มทั้ง 2 แบบนี้อาศัยหลักการทางฟิสิกส์มาเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนสถานะของวัสดุให้เกิดการระเหยเพื่อเคลือบฟิล์มบนฐานรองรับ ในขณะที่กระบวนการเคลือบฟิล์มโดยสารละลาย เช่น การหยดเคลือบ (dip-coating) หรือ การหมุนปั่น (Spin coating method) จะใช้เตรียมวัสดุที่สามารถละลาย หรือ กระจายตัวได้ดีในตัวกลางที่เป็นของเหลว เพื่อเคลือบบนฐานรองรับ เมื่อพิจารณาถึงวัสดุที่สนใจในงานวิจัยนี้ได้แก่ วัสดุนาโน ITO ซึ่งมีจุดเดือดที่สูง และ PEDOT:PSS ซึ่งเป็นพอลิเมอร์จึงไม่สามารถเตรียมได้ในสถานะไอระเหย กระบวนการเคลือบฟิล์มบางโดยใช้สารละลายจึงเหมาะสมกับงานวิจัยนี้ เนื่องจาก วัสดุนาโน ITO สามารถกระจายตัวได้ดีในสารละลายอินทรีย์ เช่น แอลกอฮอล์ หรือ น้ำ ในขณะที่ PEDOT:PSS เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถกระจายตัว/ละลายได้ดีในสารละลายอินทรีย์ประเภทเดียวกัน

### 3.2.2 การศึกษาการทำงานของเครื่องมือชนิดต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

- 1) เครื่องทำความสะอาดด้วยการสั่นความถี่สูง (Ultrasonic Cleaner) เพื่อใช้ในการทำความสะอาดฐานรองรับกระจก
- 2) เครื่องทำความสะอาดด้วยพลาสมา (Plasma cleaner) เพื่อใช้ในการทำความสะอาดฐานรองรับกระจก และเพิ่มความสามารถในการยึดติดสารบนฐานรองรับกระจก
- 3) เครื่องวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัดสี่จุด (Four-point probe measurement) เพื่อใช้ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางวัสดุผสมที่เตรียมขึ้น
- 4) เครื่องวัดสเปกตรัมของแสงในช่วงแสงยูวี และแสงที่ตามองเห็น (UV/VIS Spectrophotometer) เพื่อใช้ในการวัดสมบัติการส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบางวัสดุผสมที่เตรียมขึ้น
- 5) เครื่องเคลือบฟิล์มบางแบบพาสการด้วยการระเหยอย่างรวดเร็วในสุญญากาศ เพื่อใช้เคลือบผิวของวัสดุต่างๆ

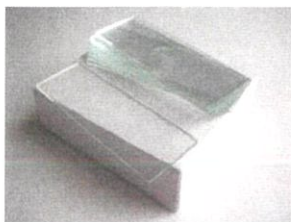
## 3.3 การออกแบบการดำเนินการทดลอง

### 3.3.1 วัสดุที่ใช้ในการดำเนินการทดลอง

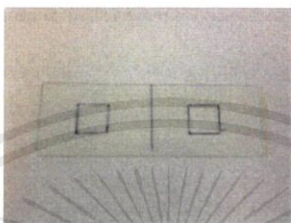
วัสดุที่ใช้เป็นฐานรองรับในการเคลือบด้วยวัสดุผสม วัสดุนาโน ITO และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS คือ กระจกสไลด์ (glass slides) ขนาดความหนา 0.1 เซนติเมตร ที่ตัดให้มีขนาดความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว้าง 2.5 เซนติเมตร และ ความยาว 2.5 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 กระจกสไลด์ (Glass slides) ใช้เป็นฐานรองรับในการเตรียมฟิล์มบาง

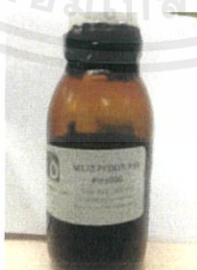


รูปที่ 3.4 กระจกสไลด์ (Glass slides) ที่จะตัดให้มีขนาด ความกว้าง 2.5 เซนติเมตร และ ความยาว 2.5 เซนติเมตร

### 3.3.2 สารเคมีที่ใช้ในการดำเนินการทดลอง



1) วัสดุนาโนอินเดียมทินออกไซด์ (indium tin oxide: ITO)



2) PEDOT/PSS PH1000 หรือ

Poly (3,4-ethylenedioxythiophene)/poly (styrene sulfonic acid)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



3)ผง Carbon nanotube

4)อะซิโตน (Acetone:  $\text{CH}_3\text{COCH}_3$ )

5)น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water: DI)

6)ไอโซโพรพานอล (Isopropanol :  $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$ )7)เอทานอล (Ethanol:  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มตามลักษณะการใช้งานในแต่ละขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

#### 3.3.3.1 อุปกรณ์สำหรับเตรียมตัวอย่างก่อนการเคลือบผิว

- 1) เครื่องทำความสะอาดด้วยการสั่นความถี่สูง (Ultrasonic Cleaner) รุ่น GT-1730QTS ยี่ห้อ GT sonic ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ใช้เป็นอุปกรณ์ทำความสะอาดชิ้นงานก่อนเข้าสู่กระบวนการเคลือบพื้นผิว โดยการสั่นด้วยความถี่สูงจะเป็นตัวช่วยให้สารละลายอินทรีย์ที่ใช้ในการทำความสะอาดสามารถเกิดอันตรกริยากับตัวผิวกระจกได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น



รูปที่ 3.5 เครื่องทำความสะอาดด้วยการสั่นความถี่สูง (Ultrasonic Cleaner) รุ่น GT-1730QTS ยี่ห้อ GT sonic

- 2) ปืนเป่าลม (Air Duster Gun) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเป่าลมชิ้นงานหลังจากทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดด้วยการสั่นความถี่สูง เพื่อกำจัดละอองของน้ำและฝุ่นที่อาจติดอยู่บนชิ้นงาน

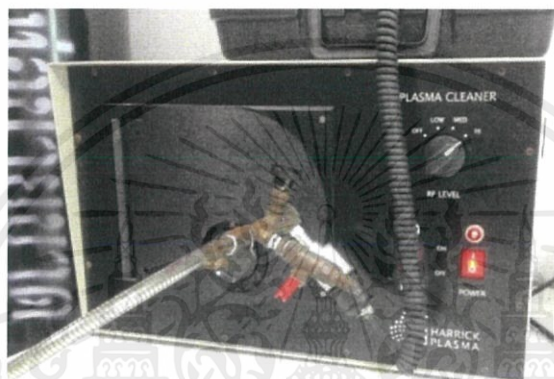


รูปที่ 3.6 ปืนเป่าลม (Air Duster Gun)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

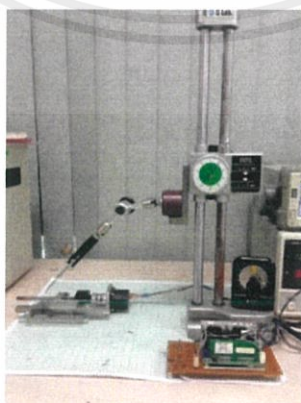
### 3.3.3.2 อุปกรณ์สำหรับเคลือบผิว

- 1) เครื่องทำความสะอาดด้วยพลาสมา (Plasma cleaner) รุ่น PDC-001/002 ยี่ห้อ HARRICK PLASMA เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการปรับสภาพผิววัสดุต่าง ๆ โดยพลาสมาจะถูกสร้างขึ้นจากการผ่านก๊าซความดันต่ำเข้าไปในห้องสุญญากาศ (Vacuum chamber) ก๊าซจะถูกกระตุ้นด้วยพลังงาน ทำให้โมเลกุลของก๊าซแตกตัวเป็นพลาสมาอยู่ในรูปของไอออน อิเล็กตรอน อนุภาคอิสระต่างๆ โดยพื้นผิวที่สัมผัสพลาสมาจะถูกปกคลุมด้วยอนุภาคเล็กๆ และมีการถ่ายเทพลังงานจากอนุภาคพลาสมาสู่ผิววัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.7 เครื่องทำความสะอาดด้วยพลาสมา (Plasma cleaner)  
รุ่น PDC-001/002 ยี่ห้อ HARRICK PLASMA

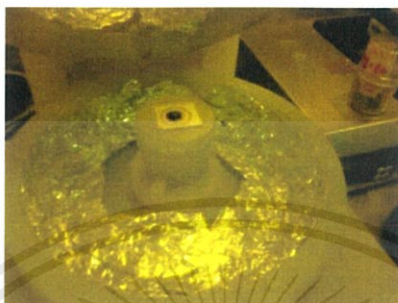
- 2) เครื่องเคลือบฟิล์มบางแบบพาสการด้วยการระเหยอย่างรวดเร็วในสุญญากาศ (Rapid Convective deposition) เป็นเครื่องมือที่ใช้เคลือบฟิล์ม โดยการพาสการที่มีลักษณะเป็นของเหลวขนาดวัสดุนาโนให้เคลือบลงบนพื้นผิวของวัสดุ ซึ่งสามารถปรับขนาดความหนาฟิล์มที่เคลือบลงบนพื้นผิวของวัสดุได้ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสให้กับสิ่งประดิษฐ์



รูปที่ 3.8 เครื่องเคลือบฟิล์มบางแบบการนำพาการระเหย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) เครื่องเคลือบฟิล์มบางแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating) เป็นเครื่องมือที่ใช้เคลือบฟิล์ม โดยการหยดสารเคลือบซึ่งอยู่ในภาวะที่เป็นของเหลวลงบนจุดศูนย์กลางของวัสดุฐาน และเหวี่ยงด้วยความเร็วสูง ความแรงสู่ศูนย์กลางทำให้สารเคลือบกระจายไปทั่วแผ่นรอง สุดท้ายจะเกิดฟิล์มบางเคลือบบนวัสดุฐาน



รูปที่ 3.9 เครื่องเคลือบฟิล์มบางแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating)

- 4) ไมโครปิเปต (Micropipette) ขนาด 20-200 ไมโครลิตร เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับปิเปตสารละลายที่มีปริมาณน้อยๆ



รูปที่ 3.10 ไมโครปิเปต(Micropipette)

### 3.3.3.3 อุปกรณ์สำหรับตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียม

1) เครื่องวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด (four-point probe) เป็นเครื่องที่ใช้วัดและวิเคราะห์ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) ด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด ซึ่งเป็นวิธีการมาตรฐานในการวัดค่าความต้านทานของวัสดุสารกึ่งตัวนำ เพื่อพิจารณาในการใช้เป็นขั้วไฟฟ้า โดยเข็มวัดคู่หนึ่งใช้จ่ายกระแสให้กับชิ้นงานทดสอบ ส่วนเข็มอีกคู่จะใช้วัดแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากชิ้นงานทดสอบ ด้วยลักษณะนี้สามารถตัดผลกระทบจากความต้านทานภายนอกที่เกิดจากเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ต่อเชื่อม (Contact resistance) และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมจุดวัด จึงทำให้ค่าความต้านทานที่คำนวณ

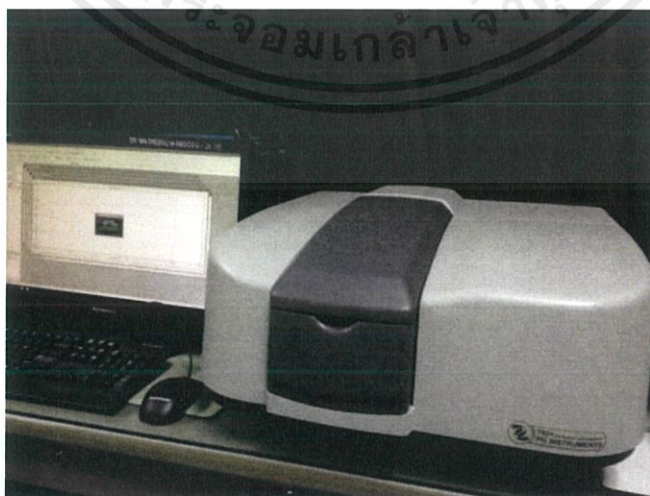
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้มีความถูกต้องมากขึ้น โดยระบบวัดที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นระบบวัดที่ประกอบขึ้นเองในห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 เครื่องวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด (four-point probe) ที่ประกอบขึ้นในห้องปฏิบัติการเพื่อใช้ในการวัดความต้านทานของฟิล์มบางที่สร้างจากวัสดุนาโน ITO-NPs กับ พอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT-PSS

2) เครื่องวัดสเปกตรัมของแสงในช่วงแสงยูวีและแสงที่ตามองเห็น (UV-Vis Spectrophotometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบหาประสิทธิภาพการส่งผ่าน/การดูดกลืนของแสงในช่วงรังสียูวี ที่มีช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 190 ถึง 400 นาโนเมตร และ แสงที่ตามองเห็นที่มีช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 ถึง 800 นาโนเมตร ของฟิล์มบางที่เตรียมในงานวิจัย โดยเครื่องที่ใช้ในการทดลองเป็น UV-Vis spectrophotometer รุ่น T90+ ของบริษัท PG Instrument ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เครื่องวัดสเปกตรัมของแสงในช่วงแสงยูวีและแสงที่ตามองเห็น (UV-Vis Spectrophotometer)

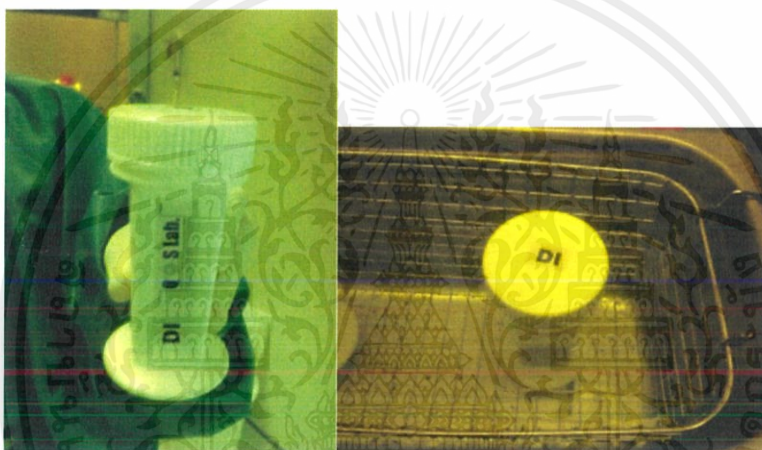
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 ขั้นตอนดำเนินการทดลอง

ในการทดลองนี้ได้แบ่งขั้นตอนในการดำเนินการทดลองเป็น 3 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

#### 3.4.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานก่อนการเคลือบผิว

- 1) นำชิ้นงานกระจกสไลด์ (Glass slides) ที่มีขนาด 2.5 x 2.5 เซนติเมตร มาทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดด้วยการสั่นความถี่สูง โดยใช้ไน้ไร้ประจุ (DI) ล้างกระจกสไลด์ (Glass slides) ก่อนเป็นเวลา 15 นาที โดยให้ความร้อนเป็นอุณหภูมิที่ 36 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การทำความสะอาดด้วยเครื่องล้างความถี่สูง โดยใช้ไน้ DI

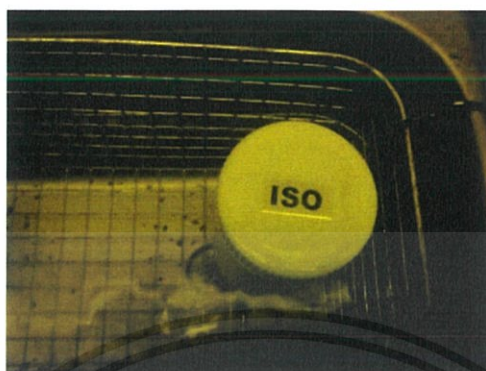
- 2) นำกระจกสไลด์ (Glass slides) มาล้างต่อด้วยของเหลวอะซิโตนซึ่งเป็นตัวชะล้างทำความสะอาด เป็นเวลา 15 นาที เช่นกัน โดยให้ความร้อนเป็นอุณหภูมิที่ 36 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ทำความสะอาดด้วยเครื่องล้างความถี่สูง โดยใช้ของเหลวอะซิโตน

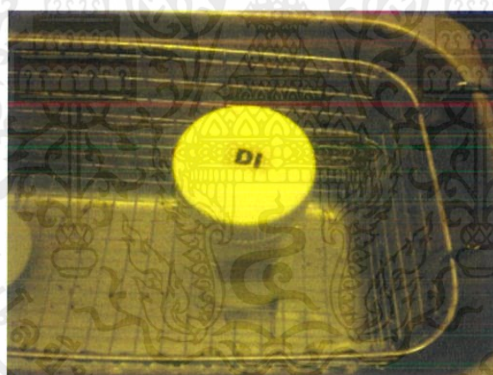
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) นำกระจกสไลด์ (Glass slides) มาล้างต่อด้วยของเหลวไอโซโพรพานอลซึ่งเป็นตัวชะล้างทำความสะอาด เป็นเวลา 15 นาที เช่นกัน โดยให้ความร้อนเป็นอุณหภูมิที่ 36 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ความสะอาดด้วยเครื่องล้างความถี่สูง โดยใช้ของเหลวไอโซโพรพานอล

- 4) แล้วนำมาล้างต่อด้วยของเหลวน้ำไร้ประจุ (DI) อีกครั้ง โดยทำความสะอาด เป็นเวลา 15 นาที เช่นเดียวกัน ใช้ความร้อนเป็นอุณหภูมิที่ 36 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การทำความสะอาดด้วยเครื่องล้างความถี่สูง โดยใช้น้ำไร้ประจุ (DI) ล้างครั้งสุดท้าย

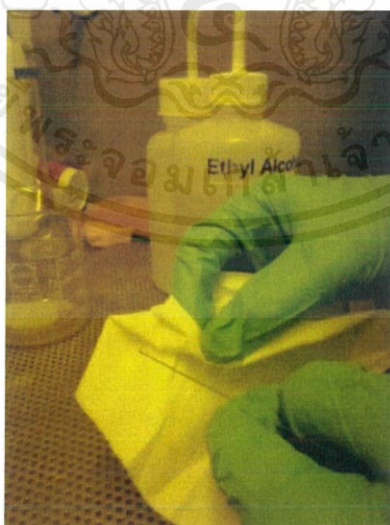
- 5) จากนั้นนำกระจกสไลด์ (Glass slides) ที่ล้างเสร็จแล้ว มาเป่าด้วยปืนเป่าลม (Air Duster Gun) เพื่อขจัดละอองน้ำบนกระจก ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การเป่ากระจกสไลด์ด้วยปืนเป่าลม (Air Duster Gun)

#### 3.4.2 ขั้นตอนกระบวนการเตรียมพื้นผิวด้วยพลาสติก

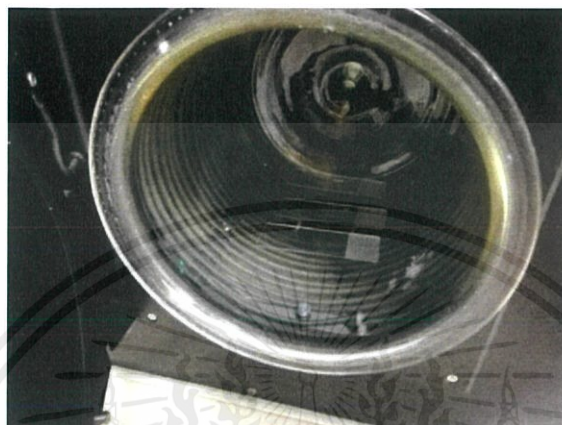
- 1) นำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วยเครื่องล้างความถี่สูงมาทำความสะอาดด้วยเอทานอลอีกครั้ง จึงจะนำชิ้นงานไปทำความสะอาดและปรับสภาพพื้นผิวด้วยพลาสติกต่อไป ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 เช็ดชิ้นงานด้วยเอทานอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) ทำการเคลือบผิวชิ้นงาน ด้วยเครื่องทำความสะอาดด้วยพลาสมา (Plasma cleaner) ดังรูปที่ 3.19 โดยใช้ก๊าซ  $O_2$  โดยควบคุมเวลาที่ใช้ในการทำพลาสมา ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรกทำพลาสมาที่เวลา 10 นาที และช่วงที่สองทำพลาสมาที่เวลา 15 นาที โดยระหว่างที่ทำการพลาสมาเป็นสีม่วงอ่อนดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.19 การเคลือบผิวชิ้นงานด้วยพลาสมา (Plasma)



รูปที่ 3.20 การเกิดพลาสมาขณะทำการเคลือบ

### 3.4.3 ขั้นตอนกระบวนการเคลือบฟิล์ม

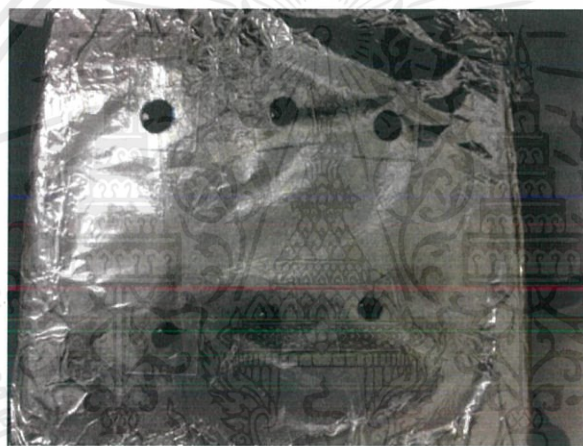
#### ตอนที่ 1 (ไม่ได้ทำ Plasma)

นำชิ้นงานที่ล้างด้วยเครื่องล้างความถี่สูงเสร็จแล้วไปวางบนฐานให้ความร้อน (Hot plate) ดังรูปที่ 3.21 แล้วทำการ Drop สาร ITO-NPs และ PEDOT-PSS ด้วย Micropipette ช่วง 20-200 ไมโครลิตร ลงบนชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.22 โดยมีการควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 การวางชิ้นงานบนฐานให้ความร้อน (Hot plate)



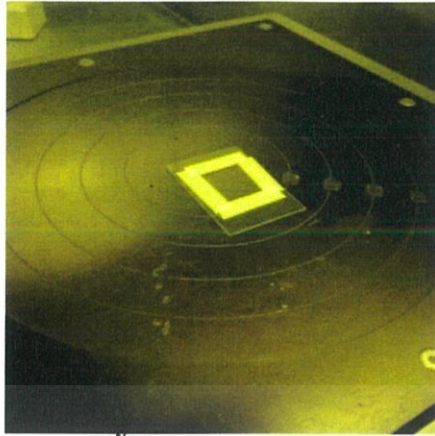
รูปที่ 3.22 การ Drop สารด้วย Micropipette

### ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ (ไม่ได้ทำ Plasma)

เวลาที่วางชิ้นงานบน Hot plate	1 นาที
จำนวนสาร ITO-NPs ที่ Drop ลงบนชิ้นงาน	80 ไมโครลิตร
จำนวนสาร PEDOS-PSS ที่ Drop ลงบนชิ้นงาน	40 ไมโครลิตร

### ตอนที่ 2 (มี mask + ไม่ได้ทำ Plasma)

นำชิ้นงานที่ล้างด้วยเครื่องล้างความถี่สูงเสร็จแล้วไปวางบนฐานให้ความร้อน (Hot plate) ดังรูปที่ 3.23 แล้วทำการ Drop สาร ITO และ PEDOT-PSS ด้วย Micropipette ช่วง 20-200 ไมโครลิตร ลงบนชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.24 โดยมีการควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.23 การวางชิ้นงานบนฐานให้ความร้อน (Hot plate)



ดั่งรูปที่ 3.24 การ Drop สารด้วย Micropipette

**ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ (มี mask + ไม่ได้ทำ Plasma)**

จำนวนรอบต่อวินาที	10 นาที
จำนวนสาร ITO ที่ Drop ลงบนชิ้นงาน	80 ไมโครลิตร
จำนวนสาร PEDOS-PSS ที่ Drop ลงบนชิ้นงาน	40 ไมโครลิตร

**ตอนที่ 3 (Spin coating + ไม่ได้ทำ Plasma)**

นำชิ้นงานที่ล้างด้วยเครื่องล้างความถี่สูงเสร็จแล้วไปวางบนฐาน แล้วทำการ Drop สาร PEDOT-PSS (แบบ A) ด้วย Micropipette ช่วง 20-200 ไมโครลิตร ลงบนชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.25 โดยมีการควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 3.3



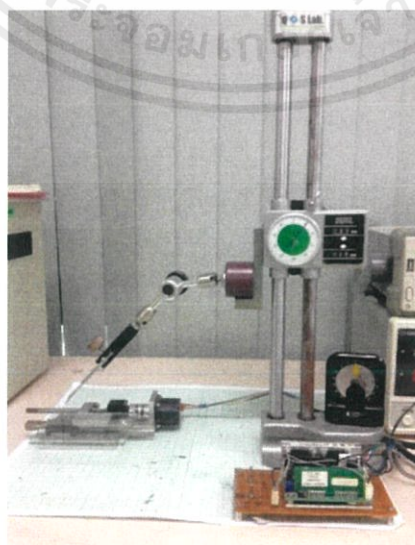
รูปที่ 3.25 การเคลือบฟิล์มด้วยวิธี Spin coating

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ (Spin coating + ไม่ได้ทำ Plasma)

จำนวนรอบต่อวินาที	500/30
จำนวนรอบต่อวินาที	500/60
จำนวนสาร PEDOS-PSS(แบบ A) ที่ Drop ลงบนชิ้นงาน	120 ไมโครลิตร

ตอนที่ 4 (Rapid convective deposition + Plasma)

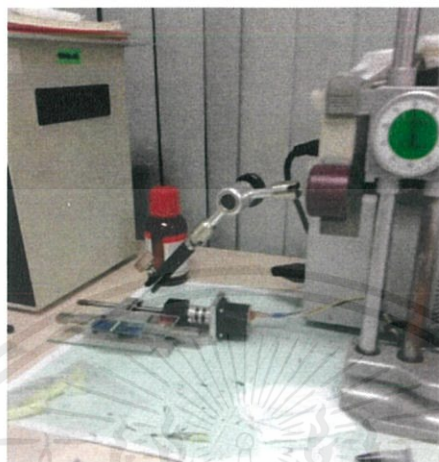
- 1) นำชิ้นงานที่ทำพลาสมาเสร็จแล้วไปวางบนฐานเครื่องเคลือบฟิล์มบางแบบการนำพาการระเหย ดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 นำชิ้นงานวางบนฐานเครื่องเคลือบฟิล์มบางแบบการนำพาการระเหย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) ทำการ Drop สาร ITO, CNTs และ PEDOT-PSS ด้วย Micropipette ช่วง 20-200 ไมโครลิตร ลงบนชิ้นงาน จากนั้นทำการเปิดเครื่องแล้วทำการปาดได้ทันที ดังรูปที่ 3.27 โดยมีการควบคุมพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.4 และ 3.5



รูปที่ 3.27 แสดงการทำปาดเคลือบ

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ (Rapid convective deposition + Plasma)

เวลาที่ใช้ทำพลาสมา	10 นาที
เวลาที่วางชิ้นงานบน Hot plate	1 นาที
จำนวนสาร ITO ที่ Drop ลงบนชิ้นงาน	80 ไมโครลิตร
จำนวนสาร PEDOS-PSS ที่ Drop ลงบนชิ้นงาน	40 ไมโครลิตร

ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ช่วงที่สอง (Rapid convective deposition + Plasma)

เวลาที่ใช้ทำพลาสมา	15 นาที
เวลาที่วางชิ้นงานบน Hot plate	1 นาที
จำนวนสาร ITO ที่ Drop ลงบนชิ้นงาน	80 ไมโครลิตร
จำนวนสาร PEDOS-PSS ที่ Drop ลงบนชิ้นงาน	40 ไมโครลิตร

#### 3.4.4 ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) การทดสอบทางไฟฟ้า ด้วยเครื่อง four-point probe มีขั้นตอนดังนี้
  - 1.1 วางชิ้นงาน ณ จุดวัด กดเข็มวัดทั้ง 4 ลงสัมผัสกับชิ้นงาน
  - 1.2 กำหนดค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับชิ้นงาน โดยกำหนดช่วงตั้งแต่ -0.5 ถึง 0.5 มิลลิแอมป์
  - 1.3 จ่ายกระแสไฟให้กับชิ้นงาน พร้อมทั้งวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น
  - 1.4 หาค่าความต้านจากอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้า
  - 1.5 คำนวณค่าสภาพต้านทานตามสมการ

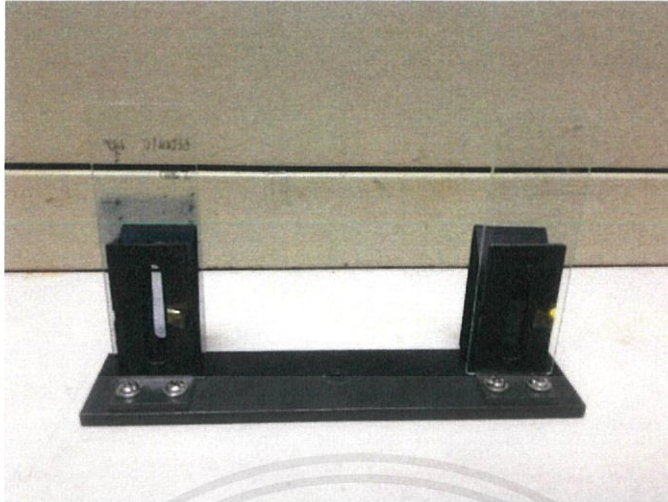
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.28 เครื่องมือวัดค่าความต้านทาน

- 2) การทดสอบทางแสง โดยใช้เครื่องวัดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ด้วยแสงช่วง UV – Visible (UV/VIS Spectrophotometer) กำหนดช่วงที่วัดค่าการทะลุผ่านของแสง ตั้งแต่ 300-800 nm และวัดค่าเป็นเปอร์เซ็นต์การทะลุผ่านของแสง (% T)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.29 แสดงช่องสำหรับใส่เป็นชิ้นงาน และ glass side



รูปที่ 3.30 เครื่องวัดสเปกตรัมของแสง (UV-Vis Spectrophotometer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ในการทดลองโครงงานวิจัย เรื่องการพัฒนาขั้วไฟฟ้าจากวัสดุผสมระหว่างพอลิเมอร์กับวัสดุนาโน โดยศึกษาความเป็นไปได้ของการเตรียมชั้นสารผสมระหว่างวัสดุนาโน กับพอลิเมอร์นำไฟฟ้า Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) /poly(styrene sulfonic acid) หรือ PEDOT-PSS ร่วมกับอนุภาคนาโน ITO-NPs คาร์บอนนาโนทิวป์ (CNTs) เพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าที่โปร่งแสง และสมบัติการนำไฟฟ้าโดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง ได้แก่ การทดลองเพื่อหาวิธีปลูกฟิล์มของขั้วไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพดีที่สุด และการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนในสารผสมระหว่างวัสดุนาโน กับพอลิเมอร์ที่มีความโปร่งแสง สมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีที่สุด และสมบัติในการโค้งงอ

#### 4.1 ผลการทดลองเพื่อหาวิธีปลูกฟิล์มของขั้วไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพดีที่สุด

ในการหาวิธีปลูกฟิล์มของขั้วไฟฟ้า เตรียมสารที่จะใช้ในการปลูกฟิล์มของขั้วไฟฟ้าในรูปของสารละลาย จากนั้นเตรียมด้วยวิธีต่างๆ ดังนี้ การหยดเคลือบ (drop cast method) การหมุนปั่น (spin coating) และการปาดเคลือบ

##### 4.1.1 การหยดเคลือบ (drop cast method)

**ตอนที่ 1** ทำการหยดเคลือบ (drop cast method)





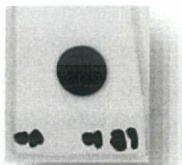



รูปที่ 4.1 แสดงการหยดสารลงบน glass side



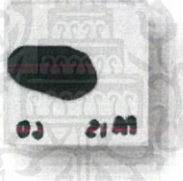
หยดสารละลาย PEDOT-PSS และ ITO-NPs ลงบน glass side โดยการควบคุมพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.1 และ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ PEDOT-PSS ที่ Drop ลงบนชิ้นงานของการหยดเคลือบ (drop cast method)

จำนวนสาร PEDOT-PSS ที่ Drop ลงบนชิ้นงาน ( $\mu\text{l}$ )	เวลาที่วางชิ้นงานบน Hot plate (นาทีก)	ภาพประกอบการทดลอง
20	5	
	10	
	15	
40	5	
	10	
	15	



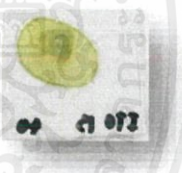
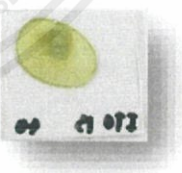

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนสาร PEDOT-PSS ที่ Drop ลงบน ชี้นงาน ( $\mu\text{L}$ )	เวลาที่วางขึ้นงานบน Hot plate (นาที)	ภาพประกอบการทดลอง
60	5	
	10	
	15	

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ ITO-NPs ที่ Drop ลงบนขึ้นงานของการหยดเคลือบ (drop cast method)

จำนวนสาร ITO-NPS ที่ Drop ลงบนขึ้นงาน ( $\mu\text{L}$ )	เวลาที่วางขึ้นงานบน Hot plate (นาที)	ภาพประกอบการทดลอง
20	5	
	10	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนสาร ITO-NPS ที่ Drop ลงบนชิ้นงาน ( $\mu\text{L}$ )	เวลาที่วางชิ้นงานบน Hot plate (นาที)	ภาพประกอบการทดลอง
20	15	
40	5	
	10	
	15	
60	5	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนสาร ITO-NPS ที่ Drop ลงบนชิ้นงาน ( $\mu\text{l}$ )	เวลาที่วางชิ้นงานบน Hot plate (นาที)	ภาพประกอบการทดลอง
60	10	
	15	

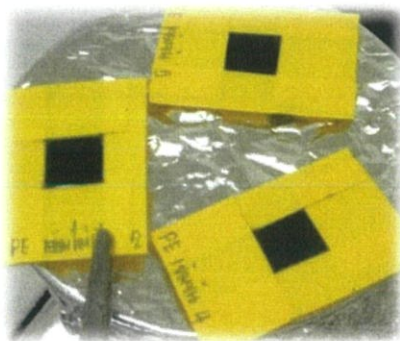
#### วิเคราะห์ผลและสรุปผลการทดลองตอนที่ 1

ในการทำการหยดเคลือบ (drop cast method) โดยหยดสารละลาย PEDOT-PSS และ ITO-NPs ลงบน glass side โดยการควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ โดยกำหนดให้ใช้ปริมาตรสารละลาย PEDOT-PSS และ ITO-NPs ที่ Drop ลงบนชิ้นงาน คือ 20, 40, 60  $\mu\text{l}$  และ กำหนดเวลาที่วางชิ้นงานบน Hot plate คือ 5, 10, 15 นาที เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์มแบบทำการการหยดเคลือบ (drop cast method)

จากการทดลองตอนที่ 1 พบว่า ลักษณะของฟิล์มที่ได้ ปริมาตรที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม คือ 40  $\mu\text{l}$  และ ความร้อนที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม คือ 80  $^{\circ}\text{C}/10 \text{ min}$  เพราะพื้นที่ผิวของฟิล์มที่ได้มีความกว้างไม่มากพอที่จะวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้ากับเครื่อง 4 point probe ได้

ปัญหาที่พบ คือ การฟอร์มตัวของฟิล์ม ไม่กระจายตัวและ บางครั้งก็เกิดการไหลออกนอก glass slide ยากต่อการควบคุมรูปแบบของพื้นที่ผิวของฟิล์ม นอกจากนี้ พื้นที่ผิวที่ได้มีรูปร่างไม่แน่นอน เกิดปัญหาในการวัดค่าความต้านทานจากเครื่อง 4 point probe

#### ตอนที่ 2 ทำการหยดเคลือบ (drop cast method)แบบมี mask



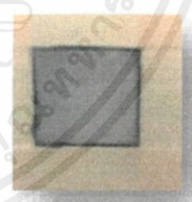


รูปที่ 4.2 แสดงการหยดเคลือบ (drop cast method) แบบมี mask

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

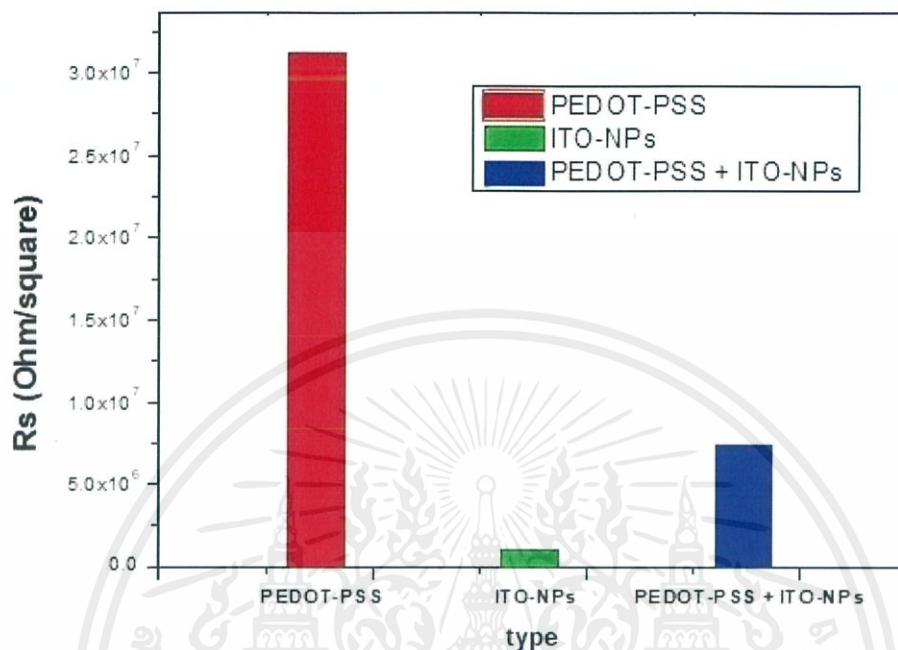
หยดสารละลาย PEDOT-PSS และ ITO-NPs ลงบน glass side ที่มีการแกะ mask โดยการควบคุมพารามิเตอร์ปริมาณที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม 40  $\mu\text{l}$  และความร้อนที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม ที่ 80  $^{\circ}\text{C}/10$  นาที ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ ITO-NPs ที่ Drop ลงบนชิ้นงานของการหยดเคลือบ (drop cast method) แบบมี mask

สารที่ใช้ในการ Drop	ค่าความต้านทานเฉลี่ย ทางไฟฟ้า ; $R_s$ (Ohm/sq.)	ภาพประกอบการทดลอง
PEDOT-PSS	$3.12 \times 10^7$	
ITO-NPs	$1.078 \times 10^6$	
PEDOT-PSS+ ITO-NPs	$7.332 \times 10^6$	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานเฉลี่ย ทางไฟฟ้า ;  $R_s$  (Ohm/sq.) กับ สารที่ใช้ ในการ Drop คือ PEDOT-PSS, ITO-NPs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าความต้านทานของสาร PEDOT-PSS, ITO-NPs และ PEDOT-PSS+ITO-NPs ทำการปิดเคลือบ แบบมี mask

จากกราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานของแต่ละสารทำการปิดเคลือบ แบบมี mask พบว่าค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่วัดได้ เรียงจากค่าความต้านทานน้อยไปหาความต้านทานมาก คือ ITO-NPs, PEDOT-PSS และ PEDOT-PSS + ITO-NPs ตามลำดับ

#### วิเคราะห์ผลและสรุปผลการทดลองตอนที่ 2

ในการทำการหยดเคลือบ (drop cast method) แบบมี mask เพื่อจำกัดพื้นที่สารละลายให้อยู่ในกรอบ และหยดสารละลาย PEDOS-PSS และ ITO-NPs ลงบน glass side ที่มีการแกะ mask โดยการควบคุมพารามิเตอร์ปริมาณที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม  $40 \mu\text{l}$  และความร้อนที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม ที่  $80 \text{ }^{\circ}\text{C}/10$  นาที เปรียบเทียบค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของแต่ละสารทำการหยดเคลือบแบบมี mask

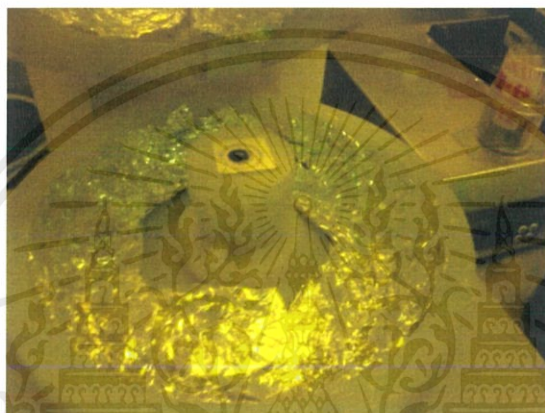
จากการทดลองตอนที่ 2 พบว่าฟิล์มบางมีพื้นที่ผิวมากพอที่จะวัดค่าความต้านทานของแต่ละสารทำการปิดเคลือบ แบบมี mask โดยค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่วัดได้ เรียงจากค่าความต้านทานน้อยไปหาความต้านทานมาก คือ ITO-NPs, PEDOT-PSS และ PEDOT-PSS+ITO-NPs ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัญหาที่พบ คือ ชิ้นงานที่ได้สารละลายจะแห้งจากบริเวณขอบไปตรงกลางฟิล์ม เกิดพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอ เมื่อนำไปวัดสภาพความต้านทานจากเครื่อง 4 point probe ความสม่ำเสมอของพื้นผิวฟิล์มยังไม่ดี ทำให้เกิดค่าของสภาพความต้านทานสูง

#### 4.1.2 การ spin coating

##### ตอนที่ 3 การทดลองทำ spin coating



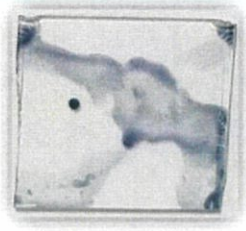
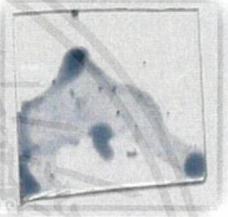
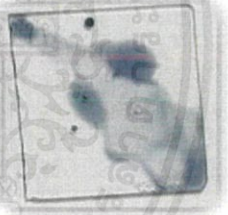
รูปที่ 4.4 แสดงการทดลองทำ spin coating

หยดสารละลาย PEDOT-PSS ลงบน glass side โดยการควบคุมพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ PEDOT-PSS ที่ Drop ลงบนชิ้นงานทำ spin coating

จำนวนสาร PEDOT-PSS ที่ Drop ลงบนชิ้นงาน ( $\mu\text{L}$ )	จำนวนรอบต่อวินาที	ภาพประกอบการทดลอง
120	500/30	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนสาร PEDOT-PSS ที่ Drop ลงบนชิ้นงาน ( $\mu$ l)	จำนวนรอบต่อวินาที	ภาพประกอบการทดลอง
	500/60	
120	1000/30	
	1000/60	

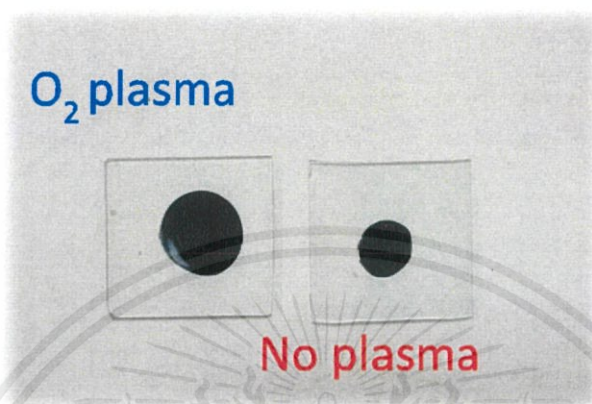
### วิเคราะห์ผลและสรุปผลการทดลองตอนที่ 3

ในการทำ spin coating โดยหยดสารละลาย PEDOT-PSS ลงบน glass slide พบว่า ลักษณะของฟิล์มที่ได้ ปริมาตรที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม คือ 120  $\mu$ l และ กำหนดจำนวนรอบต่อวินาทีที่ 500/30, 500/60, 1000/30 และ 1000/60 ตามลำดับ แต่เพราะพื้นที่ผิวของฟิล์มที่ได้มีความกว้างมากพอที่จะวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้ากับเครื่อง 4 point probe ได้

ปัญหาที่พบ คือ เป็นการสิ้นเปลืองสารละลาย มีการฟอร์มตัวของฟิล์ม กระจายตัวมาก นอกจากนี้ปริมาณที่มากเกินไปของสารละลายมีการไหลออกนอก glass slide ยากต่อการควบคุมรูปแบบของฟิล์ม และพื้นที่ผิวที่ได้มีรูปร่างไม่แน่นอน

### 4.1.3 การ plasma O<sub>2</sub> + ปาดเคลือบ

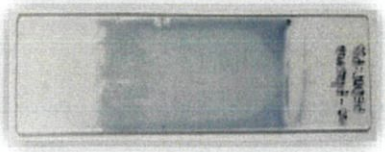
#### ตอนที่ 4 การทดลองทำ plasma O<sub>2</sub> + ปาดเคลือบ



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบก่อนและหลังทำ plasma O<sub>2</sub>

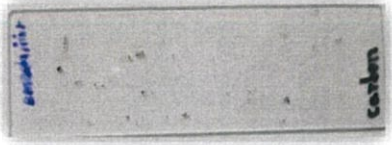

หยดสารละลาย PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs ลงบน glass side โดยการควบคุมพารามิเตอร์ปริมาณที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม 120  $\mu$ l, ความร้อนที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม ที่ 80  $^{\circ}$ C/10 นาที, ค่า power supply 18.00 V, high level 10.00 V, low level 0.00 V และค่าความถี่ 1,000 Hz ดังตารางที่ 4.5, 4.6 และ 4.7

ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ PEDOT-PSS ที่ Drop ลงบนชิ้นงานของ plasma O<sub>2</sub> + ปาดเคลือบ

plasma O <sub>2</sub>	ค่าความต้านทานเฉลี่ย ทางไฟฟ้า ; R <sub>s</sub> (Ohm/sq.)	ภาพประกอบการทดลอง
✓ (15 นาที)	$3.19 \times 10^5$	
x	$3.08 \times 10^5$	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์ CNTs ที่ Drop ลงบนชิ้นงานของ plasma O<sub>2</sub> + ปาดเคลือบ

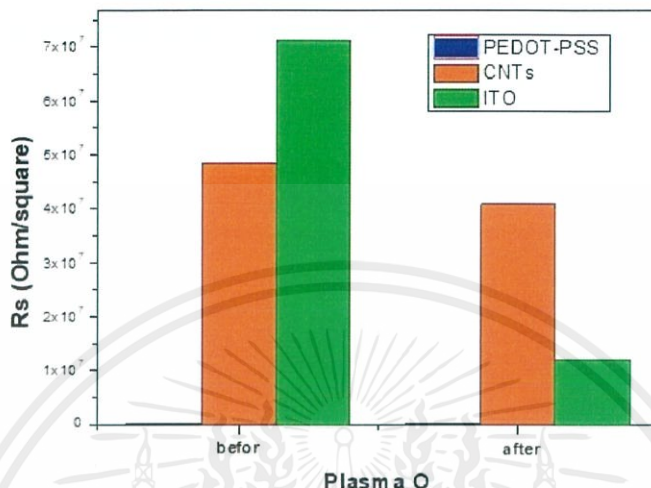
plasma O <sub>2</sub>	ค่าความต้านทานเฉลี่ย ทางไฟฟ้า ; R <sub>s</sub> (Ohm/sq.)	ภาพประกอบการทดลอง
✓ (15 นาที)	$4.08 \times 10^7$	
x	$4.83 \times 10^7$	

ตารางที่ 4.7 พารามิเตอร์ ITO nanoparticles ที่ Drop ลงบนชิ้นงาน

plasma O <sub>2</sub>	ค่าความต้านทานเฉลี่ย ทางไฟฟ้า ; R <sub>s</sub> (Ohm/sq.)	ภาพประกอบการทดลอง
✓ (15 นาที)	$7.12 \times 10^5$	
x	$1.19 \times 10^6$	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานเฉลี่ย ทางไฟฟ้า ;  $R_s$  (Ohm/sq.) กับ สารที่ใช้ในการ Drop คือ PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs ด้วยวิธีการทดลองทำ plasma  $O_2$  + หยอดเคลือบ



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าความต้านทานของสาร PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs ทำการทดลองด้วยวิธีการปาดเคลือบ + plasma  $O_2$

จากกราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานของแต่ละสารทำการทดลองทำปาดเคลือบ + plasma  $O_2$  พบว่าค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่วัดได้ ก่อนทำการ plasma  $O_2$  มีค่าความต้านทานมากกว่า หลังการทำ plasma  $O_2$

#### วิเคราะห์ผลและสรุปผลการทดลองตอนที่ 4

ในการทดลองทำปาดเคลือบ + plasma  $O_2$  หยอดสารละลาย PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs ลงบน glass side ทั้งแบบก่อนทำการ plasma  $O_2$  และหลังทำการ plasma  $O_2$  เป็นเวลา 15 นาที โดยการควบคุมพารามิเตอร์ปริมาตรที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม 20  $\mu$ l, ความร้อนที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม ที่ 80  $^{\circ}$ C/10 นาที, ค่า power supply 18.00 V, high level 10.00 V, low level 0.00 V และค่าความถี่ 1,000 Hz

จากการทดลองพบว่า ก่อนและหลังทำ plasma  $O_2$  ค่าความต้านทานเฉลี่ยทางไฟฟ้า ของ PEDOT-PSS และ CNTs ไม่แตกต่างกันมากเปรียบเทียบค่าความต้านทานของแต่ละสารทำการทดลองทำปาดเคลือบ + plasma  $O_2$  พบว่าค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่วัดได้ ก่อนทำการ plasma  $O_2$  มีค่าความต้านทานมากกว่าหลังการทำ plasma  $O_2$  นอกจากนี้ หลังทำ plasma  $O_2$  พื้นที่ผิวที่ได้มีรูปร่างที่เรียกว่า ไม่ทำ plasma  $O_2$  และเป็นวิธีการที่ทำให้ได้ฟิล์มบางที่มีพื้นที่ผิวเรียบมากที่สุด



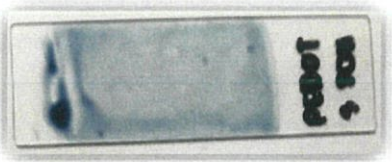
## 4.2 ทดลองเพื่อหาอัตราส่วนในสารผสมระหว่างวัสดุนาโน กับพอลิเมอร์ที่มีความโปร่งแสง และสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีที่สุด

### 4.2.1 การเปรียบเทียบชั้นในการปลูกฟิล์มบาง

#### ตอนที่ 1 การเปรียบเทียบชั้นในการปลูกฟิล์มบางของละลาย PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs

หยดสารละลาย PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs ลงบน glass side ที่ทำ plasma O<sub>2</sub> โดยการควบคุมพารามิเตอร์ปริมาณที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม 20  $\mu$ l, ความร้อนที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม ที่ 80 °C/10 นาที, ค่า power supply 18.00 V, high level 10.00 V, low level 0.00 V และค่าความถี่ 1,000 Hz ดังตารางที่ 4.8, 4.9 และ 4.10





#### ตารางที่ 4.8 พารามิเตอร์ PEDOT-PSS ที่ Drop ลงบนชิ้นงานในการเปรียบเทียบชั้น

จำนวนรอบที่ทำการปาดเคลือบ	ค่าความต้านทานเฉลี่ย ทางไฟฟ้า ; R <sub>s</sub> (Ohm/sq.)	ค่าเปอร์เซ็นต์การทะลุผ่านของแสง ;%T ที่ 550 nm	ภาพประกอบการทดลอง
1	$5.01 \times 10^5$	81.7	
2	$4.52 \times 10^5$	83.2	
3	$1.30 \times 10^5$	81.3	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

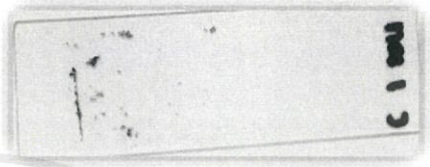



จำนวนรอบที่ทำ การปาดเคลือบ	ค่าความต้านทาน เฉลี่ย ทางไฟฟ้า ; $R_s$ (Ohm/sq.)	ค่าเปอร์เซ็นต์การ ทะลุผ่านของแสง ;%T ที่ 550 nm	ภาพประกอบการทดลอง
4	$1.67 \times 10^5$	75.0	

ตารางที่ 4.9 พารามิเตอร์ ITO-NPs ที่ Drop ลงบนชิ้นงานในการเปรียบเทียบชั้น

จำนวนรอบที่ทำ การปาดเคลือบ	ค่าความต้านทาน เฉลี่ย ทางไฟฟ้า ; $R_s$ (Ohm/sq.)	ค่าเปอร์เซ็นต์การ ทะลุผ่านของแสง ;%T ที่ 550 nm	ภาพประกอบการทดลอง
1	$7.69 \times 10^6$	85.6	
2	$3.96 \times 10^6$	84.5	
3	$7.77 \times 10^6$	84.7	
4	$3.19 \times 10^6$	97.1	

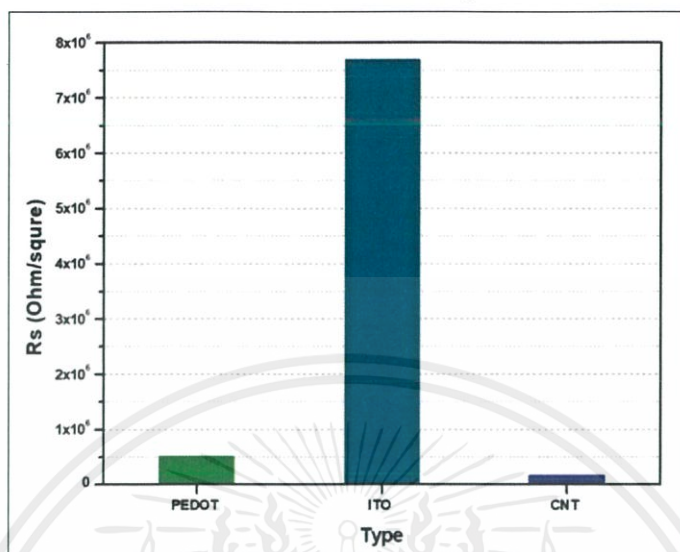
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 พารามิเตอร์ CNTs ที่ Drop ลงบนชิ้นงานในการเปรียบเทียบชั้น

จำนวนรอบที่ทำการปาดเคลือบ	ค่าความต้านทานเฉลี่ย ทางไฟฟ้า ; $R_s$ (Ohm/sq.)	ค่าเปอร์เซ็นต์การทะลุผ่านของแสง ; %T ที่ 550 nm	ภาพประกอบการทดลอง
1	$1.66 \times 10^5$	99.2	
2	$1.45 \times 10^5$	99.8	
3	$6.51 \times 10^6$	99.5	
4	$1.66 \times 10^5$	98.3	

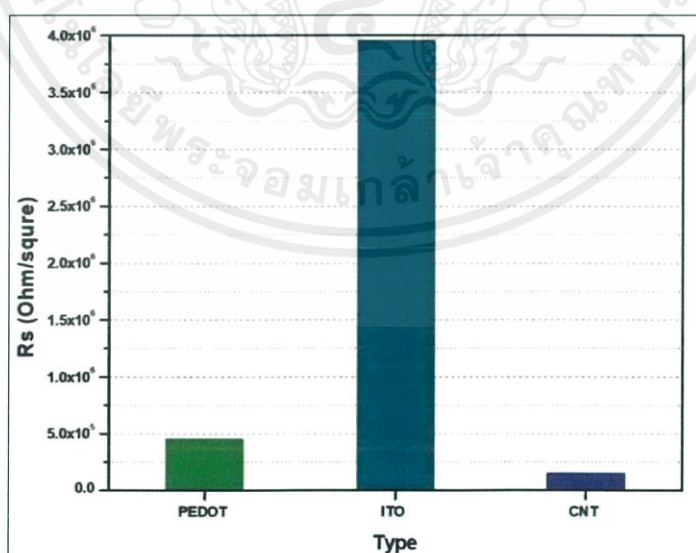
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานเฉลี่ย ทางไฟฟ้า ;  $R_s$  (Ohm/sq.) กับ สารละลาย PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs ที่ใช้ในการ Drop



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานแบบปาดเคลือบ 1 รอบ ของสาร PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs

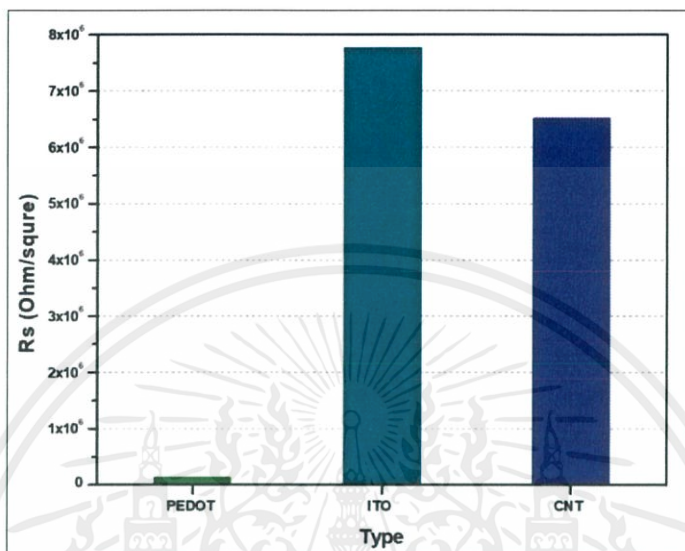
จากกราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานแบบปาดเคลือบ 1 รอบของแต่ละสาร พบว่าค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่วัดได้ เรียงจากค่าความต้านทานน้อยไปหาค่าความต้านทานมาก คือ CNTs, PEDOT-PSS และ ITO-NPs ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานแบบปาดเคลือบ 2 รอบ ของสาร PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs

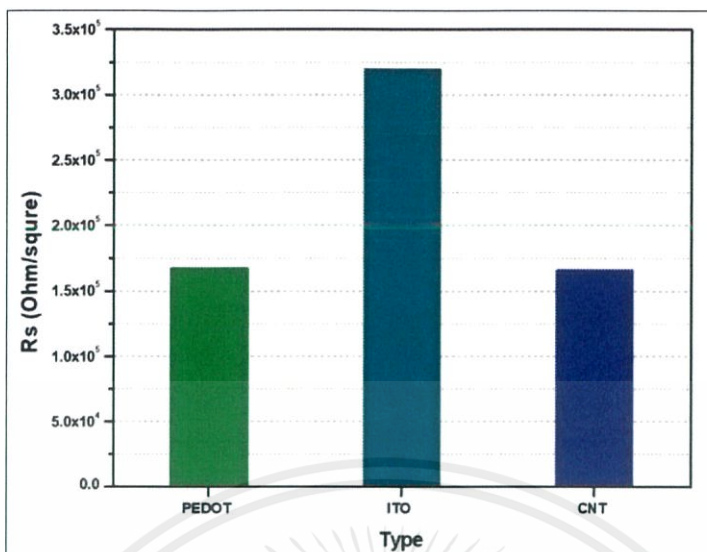
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานแบบปาดเคลือบ 2 รอบของแต่ละสาร พบว่าค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่วัดได้ เรียงจากค่าความต้านทานน้อยไปหาความต้านทานมาก คือ CNTs, PEDOT-PSS และ ITO-NPs ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานแบบปาดเคลือบ 3 รอบ ของสาร PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs

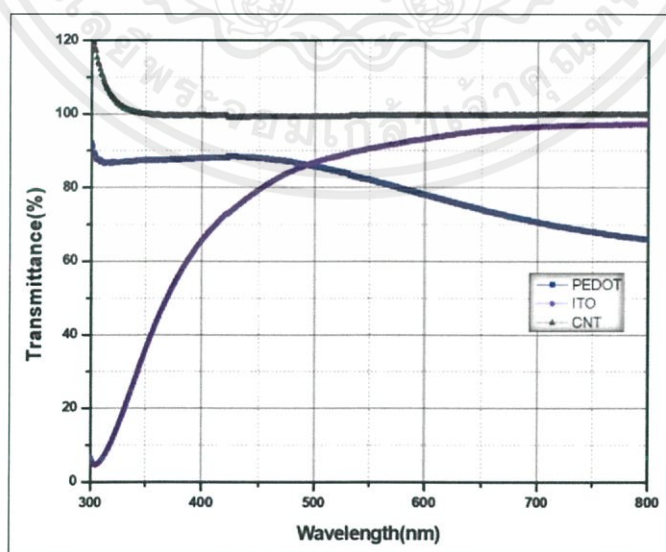
จากกราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานแบบปาดเคลือบ 3 รอบของแต่ละสาร พบว่าค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่วัดได้ เรียงจากค่าความต้านทานน้อยไปหาความต้านทานมาก คือ PEDOT-PSS, CNTs และ ITO-NPs ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานแบบปาดเคลือบ 4 รอบ ของสาร PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs

จากกราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานแบบปาดเคลือบ 4 รอบของแต่ละสาร พบว่าค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่วัดได้ เรียงจากค่าความต้านทานน้อยไปหาค่าความต้านทานมาก คือ CNTs, PEDOT-PSS และ ITO-NPs ตามลำดับ

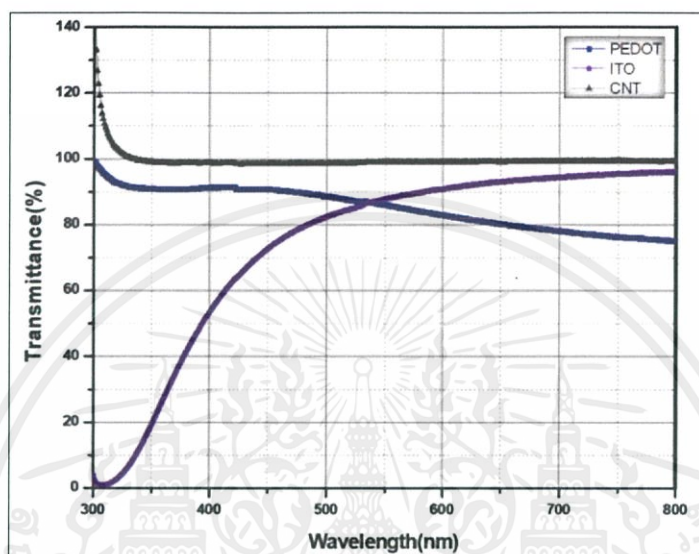
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กับ ค่าเปอร์เซ็นต์การทะลุผ่านของแสง ; %T สารละลาย PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs ที่ใช้ในการ Drop



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบการทะลุผ่านของแสงแบบปาดเคลือบ 1 รอบ ของสาร PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs

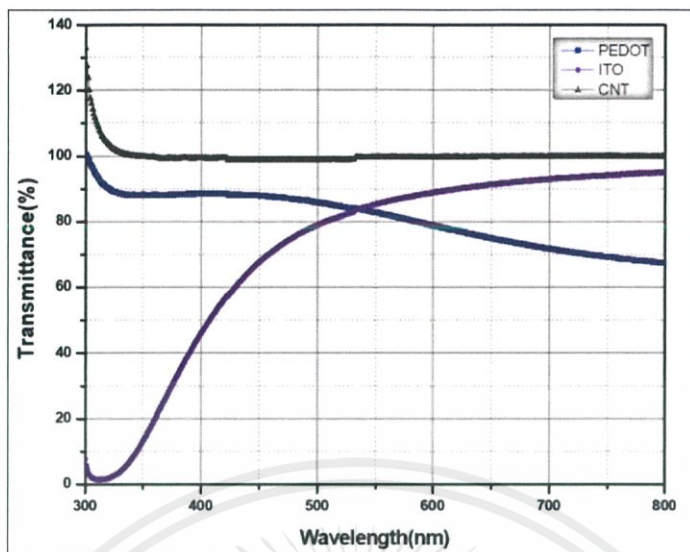
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟเปรียบเทียบการทะลุผ่านของแสงแบบปาดเคลือบ 1 รอบของแต่ละสาร พบว่าค่าความการทะลุผ่านของแสงที่วัดได้ เรียงจากค่าทะลุผ่านแสงน้อยไปหาค่าทะลุผ่านแสงมาก คือ PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs ตามลำดับ



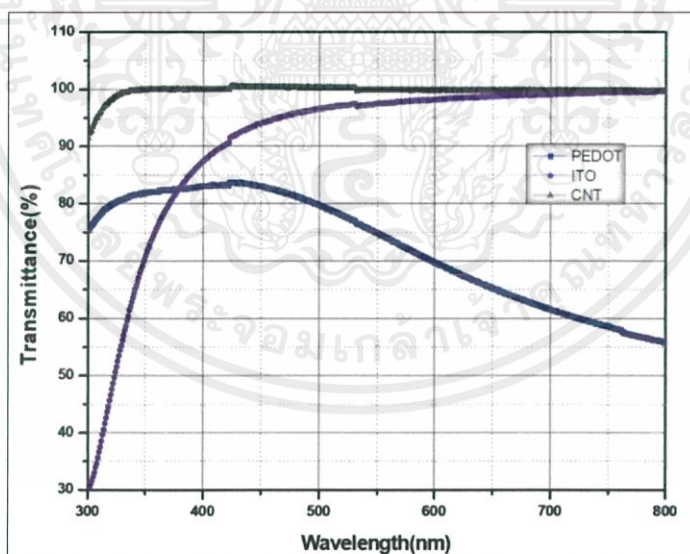
รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบการทะลุผ่านของแสงแบบปาดเคลือบ 2 รอบ ของสาร PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs

จากกราฟเปรียบเทียบการทะลุผ่านของแสงแบบปาดเคลือบ 2 รอบ ของแต่ละสาร พบว่าค่าความการทะลุผ่านของแสงที่วัดได้ เรียงจากค่าทะลุผ่านแสงน้อยไปหาค่าทะลุผ่านแสงมาก คือ PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบการทะลุผ่านของแสงแบบปาดเคลือบ 3 รอบ ของสาร PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs

จากกราฟเปรียบเทียบการทะลุผ่านของแสงแบบปาดเคลือบ 3 รอบของแต่ละสาร พบว่าค่าความการทะลุผ่านของแสงที่วัดได้ เรียงจากค่าทะลุผ่านแสงน้อยไปหาค่าทะลุผ่านแสงมาก คือ PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs ตามลำดับ



รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบการทะลุผ่านของแสงแบบปาดเคลือบ 4 รอบ ของสาร PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs

จากกราฟเปรียบเทียบการทะลุผ่านของแสงแบบปาดเคลือบ 4 รอบของแต่ละสาร พบว่าค่าความการทะลุผ่านของแสงที่วัดได้ เรียงจากค่าทะลุผ่านแสงน้อยไปหาค่าทะลุผ่านแสงมาก คือ PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### วิเคราะห์ผลและสรุปผลการทดลองตอนที่ 1

ในการทดลองด้วยวิธีปาดเคลือบโดยการเปรียบเทียบชั้นในการปลูกฟิล์มบาง หยดสารละลาย PEDOT-PSS , ITO-NPs และ CNTs ลงบน glass side ที่ทำ plasma O<sub>2</sub> โดยการควบคุมพารามิเตอร์ ปริมาณที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม 20  $\mu$ l, ความร้อนที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม ที่ 80 °C/10 นาที ค่า power supply 18.00 V, high level 10.00 V, low level 0.00 V และ ค่าความถี่ 1,000 Hz

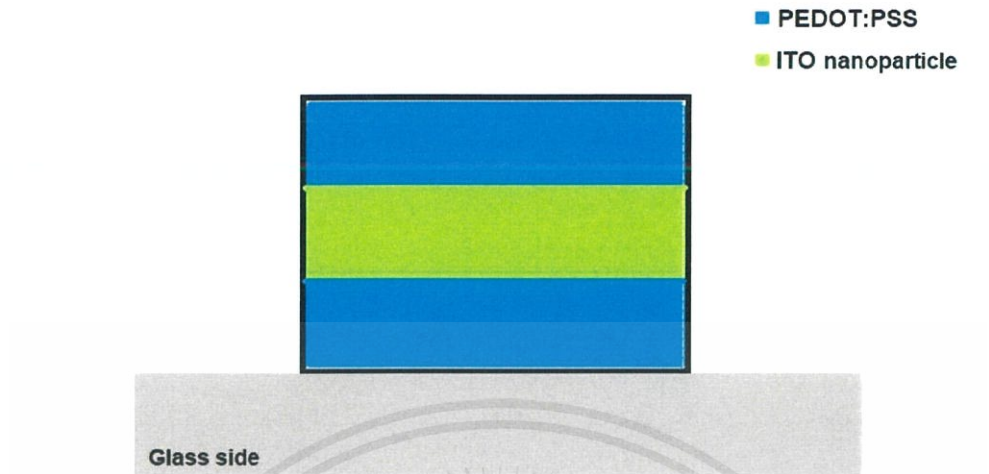
จากกราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานแบบปาดเคลือบ 1, 2 และ 4 รอบของแต่ละสาร พบว่าค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่วัดได้ เรียงจากค่าความต้านทานทางไฟฟ้าน้อย ไปหาความต้านทานมาก คือ CNTs, PEDOT-PSS และ ITO-NPs ตามลำดับ ส่วนการเปรียบเทียบความต้านทานทางไฟฟ้าแบบปาดเคลือบ 3 รอบ มีค่าของแต่ละสาร เรียงจากค่าความต้านทานทางไฟฟ้าน้อยไปหา ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า คือ PEDOT-PSS, CNTs และ ITO-NPs ตามลำดับ

จากกราฟเปรียบเทียบการทะลุผ่านของแสงแบบปาดเคลือบ 1, 2, 3 และ 4 รอบ ของแต่ละสาร พบว่าค่าความการทะลุผ่านของแสงที่วัดได้ เรียงจากค่าทะลุผ่านแสงน้อยไปหาค่าทะลุผ่านแสงมาก คือ CNTs, ITO-NPs และ PEDOT-PSS ตามลำดับ

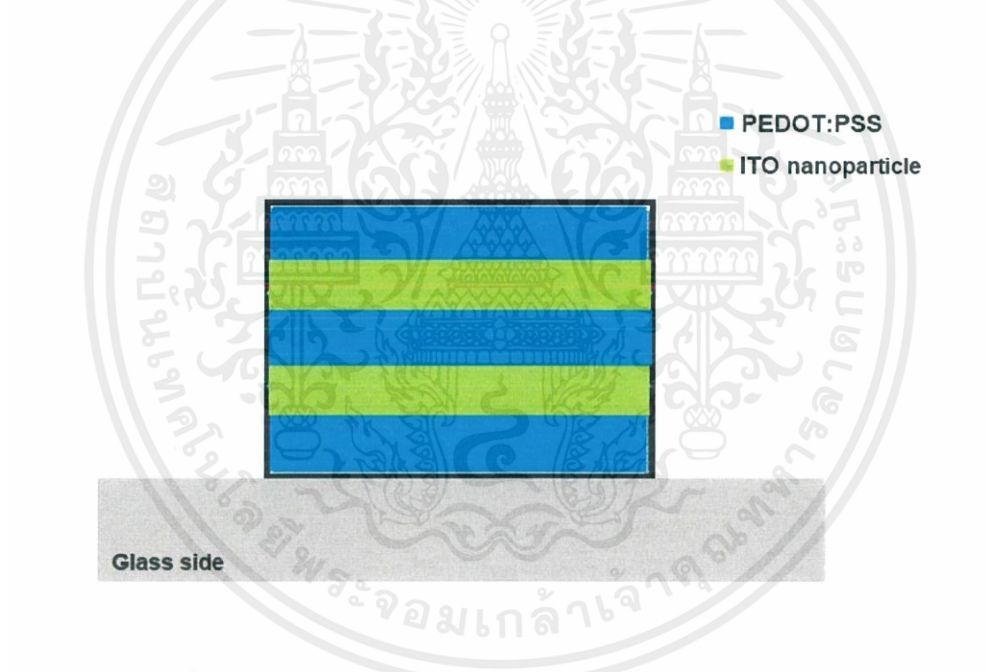
### **4.2.2 การเปรียบเทียบอัตราส่วนในการปลูกฟิล์มบางของละลาย PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs**

ตอนที่ 2 การเปรียบเทียบอัตราส่วนในการปลูกฟิล์มบางของละลาย PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs โดยปาดเคลือบ 1รอบ

หยดสารละลาย PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs ลงบน glass side ที่ทำ plasma O<sub>2</sub> โดยการควบคุมพารามิเตอร์ปริมาณที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม 20  $\mu$ l, ความร้อนที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม ที่ 80 °C/10 นาที, ค่า power supply 18.00 V, high level 10.00 V, low level 0.00 V และ ค่าความถี่ 1,000 Hz ดังตารางที่ 4.11, 4.12 และ 4.13



รูปที่ 4.15 แสดงชั้น PEDOT-PSS + ITO-NPs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 1 รอบ 1 ชั้น

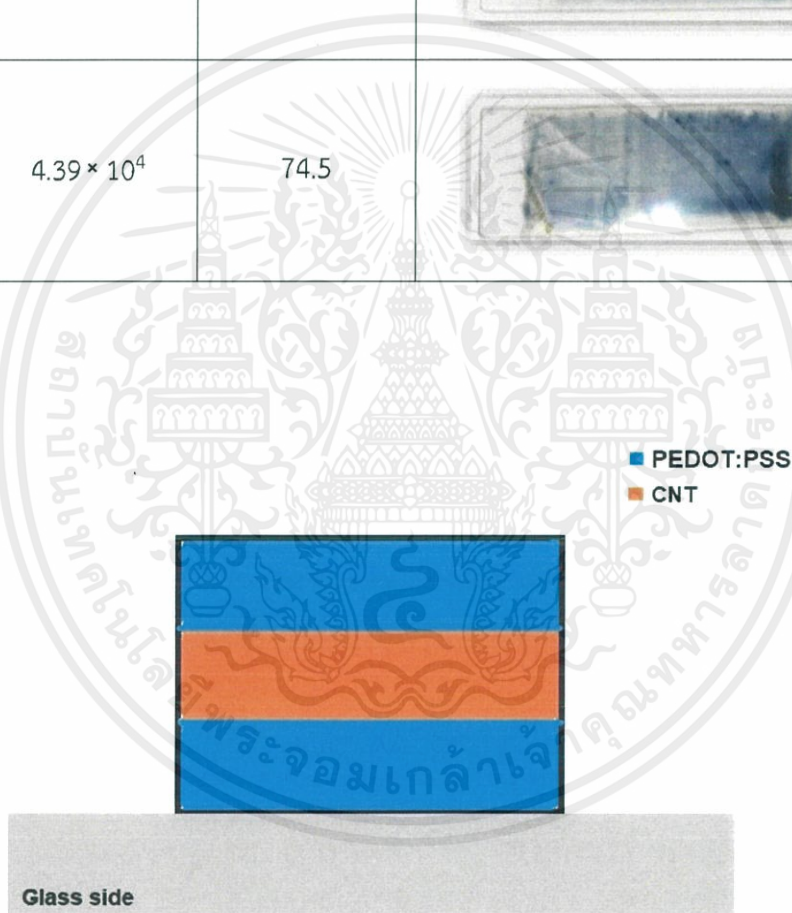


รูปที่ 4.16 แสดงชั้น PEDOT-PSS + ITO-NPs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 1 รอบ 2 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

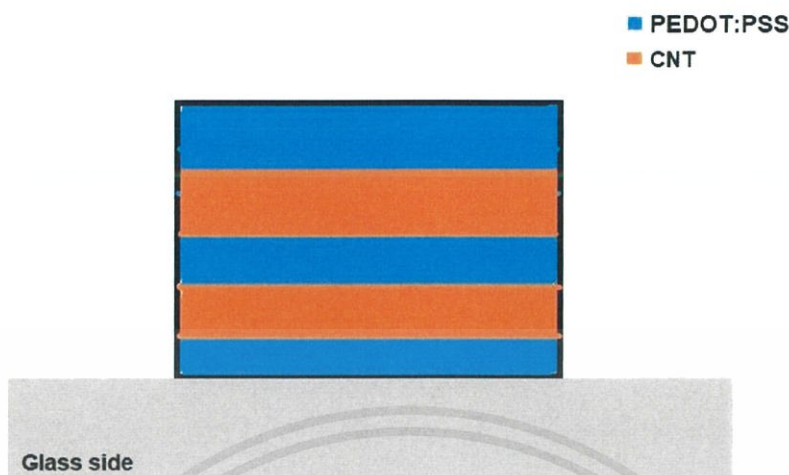
ตารางที่ 4.11 พารามิเตอร์ PEDOT-PSS + ITO-NPs ที่ Drop ลงบนชิ้นงานของปาดเคลือบ 1 รอบ

จำนวนชั้นที่ทำการปาดเคลือบ	ค่าความต้านทานเฉลี่ย ทางไฟฟ้า ; $R_s$ (Ohm/sq.)	ค่าเปอร์เซ็นต์การทะลุผ่านของแสง ; %T ที่ 550 nm	ภาพประกอบการทดลอง
1	$1.32 \times 10^5$	85.3	
2	$4.39 \times 10^4$	74.5	



รูปที่ 4.17 แสดงชั้น PEDOT-PSS + CNTs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 1 รอบ 1 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

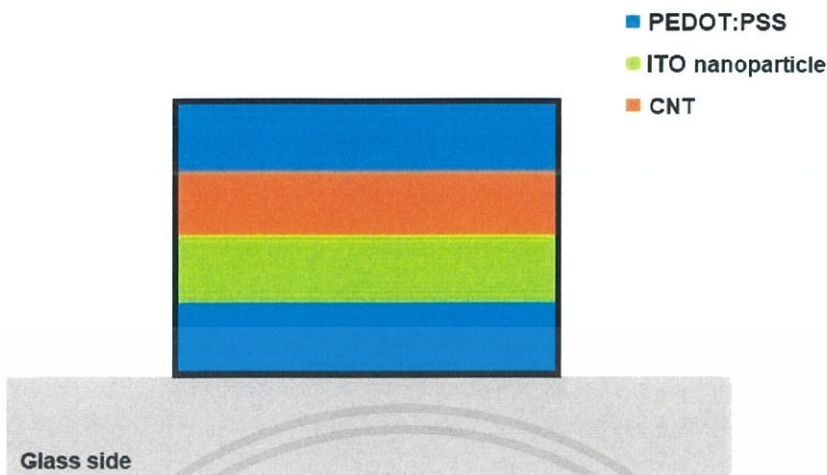


รูปที่ 4.18 แสดงชั้น PEDOT-PSS + CNTs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 1 รอบ 2 ชั้น

ตารางที่ 4.12 พารามิเตอร์ PEDOT-PSS + CNTs ที่ Drop ลงบนชิ้นงานของปาดเคลือบ 1รอบ

จำนวนชั้นที่ทำการปาดเคลือบ	ค่าความต้านทานเฉลี่ย ทางไฟฟ้า ; $R_s$ (Ohm/sq.)	ค่าเปอร์เซ็นต์การทะลุผ่านของแสง ; %T ที่ 550 nm	ภาพประกอบการทดลอง
1	7,060	79.8	
2	1,340	84.1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 4.19 แสดงชั้น PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 1 รอบ 1 ชั้น



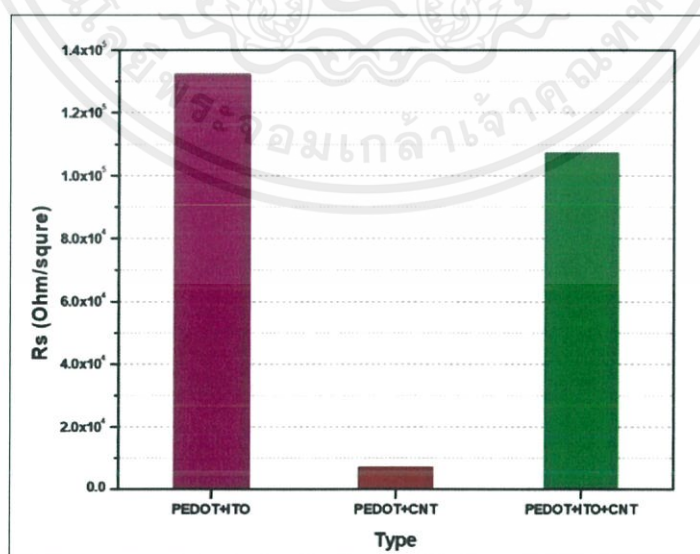
รูปที่ 4.20 แสดงชั้น PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 1 รอบ 2 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 พารามิเตอร์ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs ที่ Drop ลงบนชิ้นงานของปาดเคลือบ 1 รอบ

จำนวนชั้น ที่ทำการ ปาด เคลือบ	ค่าความต้านทาน เฉลี่ย ทางไฟฟ้า ; $R_s$ (Ohm/sq.)	ค่าเปอร์เซ็นต์การ ทะลุผ่านของแสง ; %T ที่ 550 nm	ภาพประกอบการทดลอง
1	$07.1 \times 10^5$	78.2	
2	$3.78 \times 10^4$	69.2	

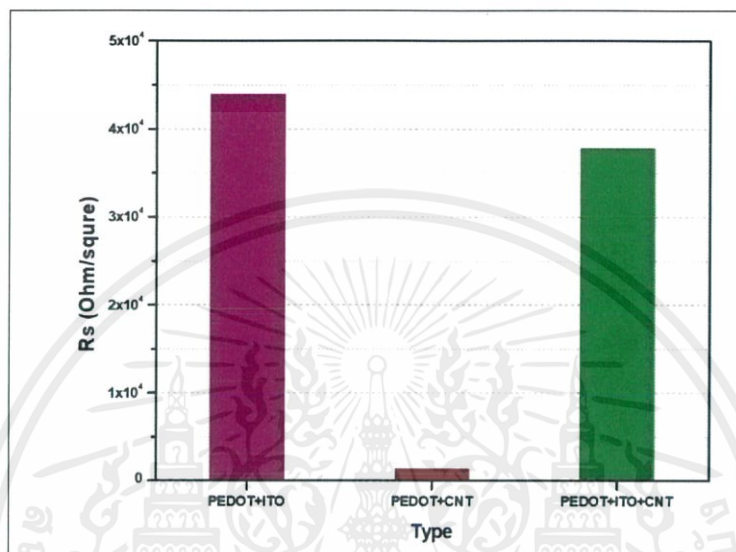
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานเฉลี่ย ทางไฟฟ้า ;  $R_s$  (Ohm/sq.) กับ สารละลาย PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs ที่ใช้ในการ Drop



รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานของสารละลาย PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs การปาดเคลือบ 1 ชั้น 1 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

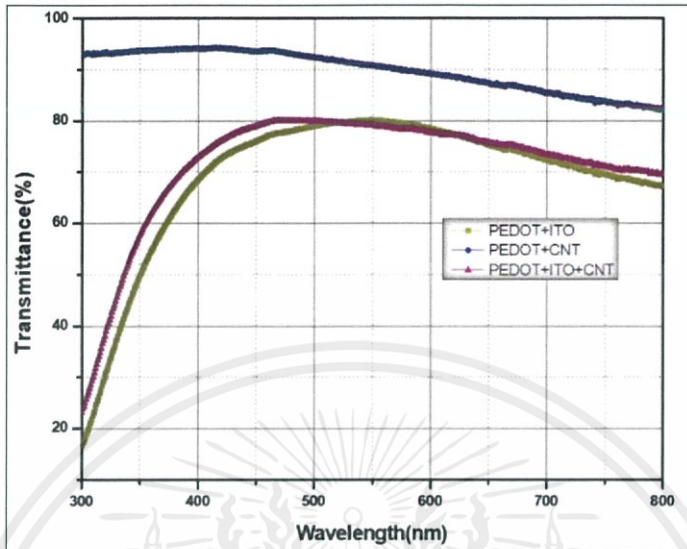
จากกราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานแบบปาดเคลือบแบบ 1 ชั้น 1 รอบของแต่ละสาร พบว่าค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่วัดได้ เรียงจากค่าความต้านทานน้อยไปหาความต้านทานมาก คือ PEDOT-PSS + CNTs, PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs ตามลำดับ



รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานของสารละลาย PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs การปาดเคลือบ 2 ชั้น 1 รอบ

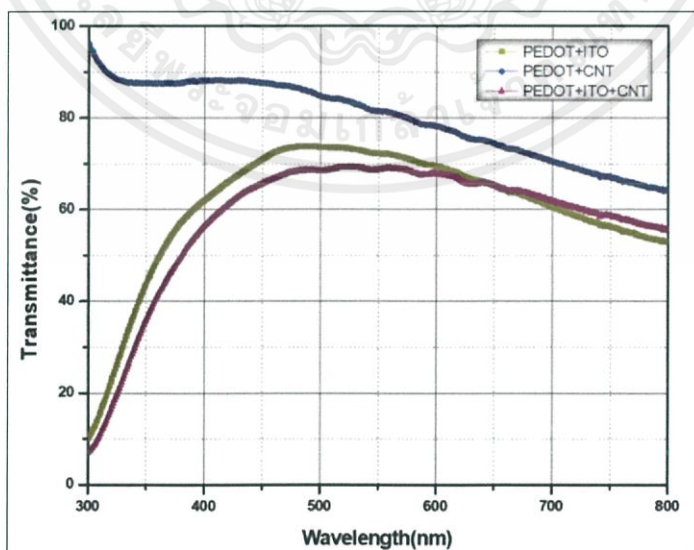
จากกราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานแบบปาดเคลือบแบบ 2 ชั้น 1 รอบของแต่ละสาร พบว่าค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่วัดได้ เรียงจากค่าความต้านทานน้อยไปหาความต้านทานมาก คือ PEDOT-PSS + CNTs, PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs ตามลำดับ

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กับ ค่าเปอร์เซ็นต์การทะลุผ่านของแสง ;%T สารละลาย PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs ที่ใช้ในการ Drop



รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบการทะลุผ่านแสงของสารละลาย PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs ที่ปาดเคลือบ 1 ชั้น 1 รอบ

จากกราฟเปรียบเทียบการทะลุผ่านของแสงแบบปาดเคลือบ 1 ชั้น 1 รอบของแต่ละสาร พบว่า ค่าความการทะลุผ่านของแสงที่วัดได้ เรียงจากค่าทะลุผ่านแสงน้อยไปหาค่าทะลุผ่านแสงมาก คือ คือ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs, PEDOT-PSS + ITO-NPs และ PEDOT-PSS + CNTs ตามลำดับ



รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบการทะลุผ่านแสงของสารละลาย PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs ที่ปาดเคลือบ 2 ชั้น 1 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟเปรียบเทียบการทะลุผ่านของแสงแบบปาดเคลือบ 2 ชั้น 1 รอบของแต่ละสาร พบว่าค่าความการทะลุผ่านของแสงที่วัดได้ เรียงจากค่าทะลุผ่านแสงน้อยไปหาค่าทะลุผ่านแสงมาก คือ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs, PEDOT-PSS + ITO-NPs และ PEDOT-PSS + CNTs ตามลำดับ

### วิเคราะห์ผลและสรุปผลการทดลองตอนที่ 2

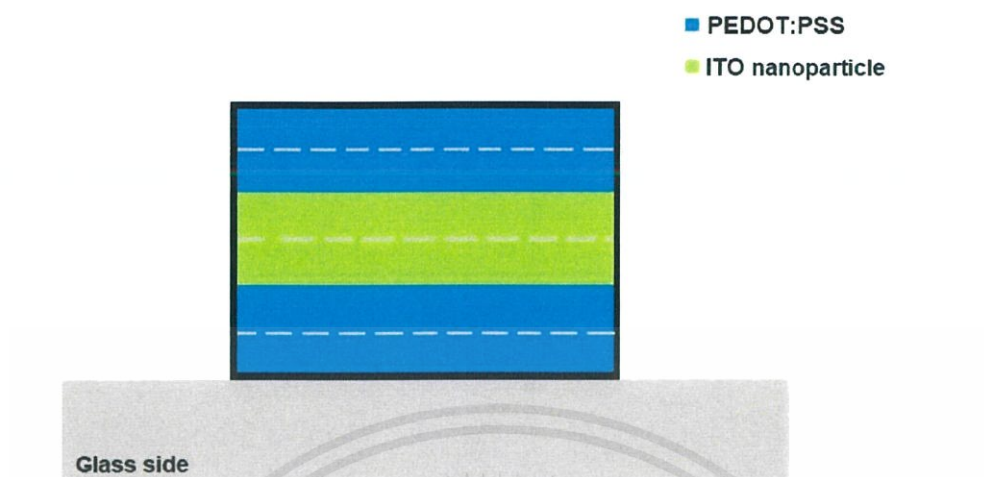
ในการทดลองการเปรียบเทียบชั้นในการปลูกฟิล์มบางของละลาย PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs โดยปาดเคลือบ 1 รอบ แบบ 1 ชั้น และ 2 ชั้น โดยหยดสารละลาย PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs ลงบน glass side ที่ทำ plasma O<sub>2</sub> โดยการควบคุมพารามิเตอร์ปริมาณที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม 20  $\mu$ l, ความร้อนที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม ที่ 80 °C/10 นาที, ค่า power supply 18.00 V, high level 10.00 V, low level 0.00 V และค่าความถี่ 1,000 Hz

จากการทดลองกราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานแบบปาดเคลือบแบบ 1 ชั้น 1 รอบ และแบบ 2 ชั้น 1 รอบของแต่ละสาร พบว่าค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่วัดได้ เรียงจากค่าความต้านทานน้อยไปหาค่าความต้านทานมาก คือ PEDOT-PSS + CNTs, PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มค่าความต้านทานทางไฟฟ้าไปในทางเดียวกัน

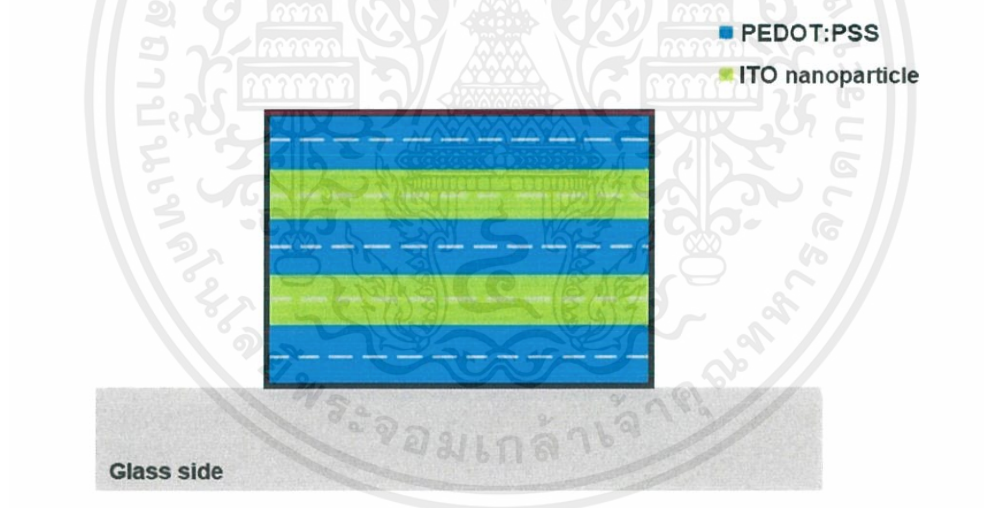
จากกราฟเปรียบเทียบการทะลุผ่านของแสงแบบปาดเคลือบ 1 ชั้น 1 รอบ และ 2 ชั้น 1 รอบของแต่ละสาร พบว่าค่าการทะลุผ่านของแสงที่วัดได้ เรียงจากค่าทะลุผ่านแสงน้อยไปหาค่าทะลุผ่านแสงมาก คือ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs, PEDOT-PSS + ITO-NPs และ PEDOT-PSS + CNTs ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มค่าการทะลุผ่านของแสงไปในทางเดียวกัน

**ตอนที่ 3** การเปรียบเทียบชั้นในการปลูกฟิล์มบางของละลาย PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs โดยปาดเคลือบ 2 รอบ

หยดสารละลาย PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs ลงบน glass side ที่ทำ plasma O<sub>2</sub> โดยการควบคุมพารามิเตอร์ปริมาณที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม 20  $\mu$ l, ความร้อนที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม ที่ 80 °C/10 นาที, ค่า power supply 18.00 V, high level 10.00 V, low level 0.00 V และค่าความถี่ 1,000 Hz ดังตารางที่ 4.14, 4.15 และ 4.16



รูปที่ 4.25 แสดงชั้น PEDOT-PSS + ITO-NPs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 2 รอบ 1 ชั้น

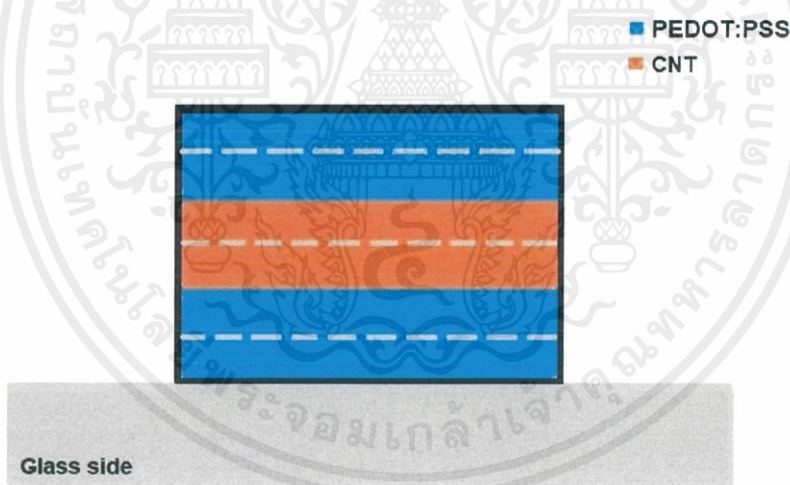


รูปที่ 4.26 แสดงชั้น PEDOT-PSS + ITO-NPs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 2 รอบ 2 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

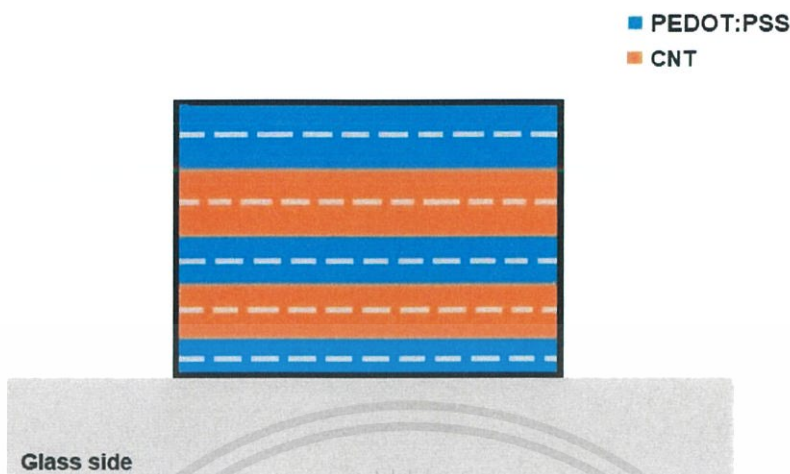
ตารางที่ 4.14 พารามิเตอร์ PEDOT-PSS + ITO-NPs ที่ Drop ลงบนชิ้นงานของปาดเคลือบ 2 รอบ

จำนวนชั้น ที่ทำกร ปาด เคลือบ	ค่าความต้านทาน เฉลี่ย ทางไฟฟ้า ; $R_s$ (Ohm/sq.)	ค่าเปอร์เซ็นต์การ ทะลุผ่านของแสง ; %T ที่ 550 nm	ภาพประกอบการทดลอง
1	$2.54 \times 10^4$	47.8	
2	1,900	8.9	



รูปที่ 4.27 แสดงชั้น PEDOT-PSS + CNTs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 2 รอบ 1 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

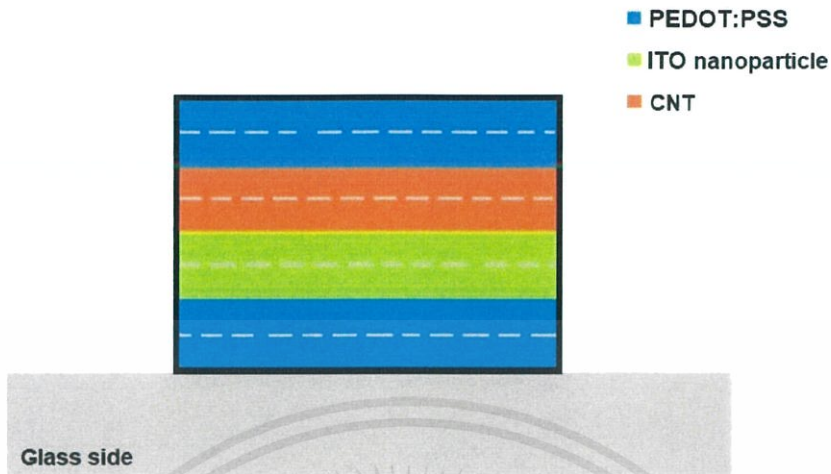


รูปที่ 4.28 แสดงชั้น PEDOT-PSS + CNTs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 2 รอบ 2 ชั้น

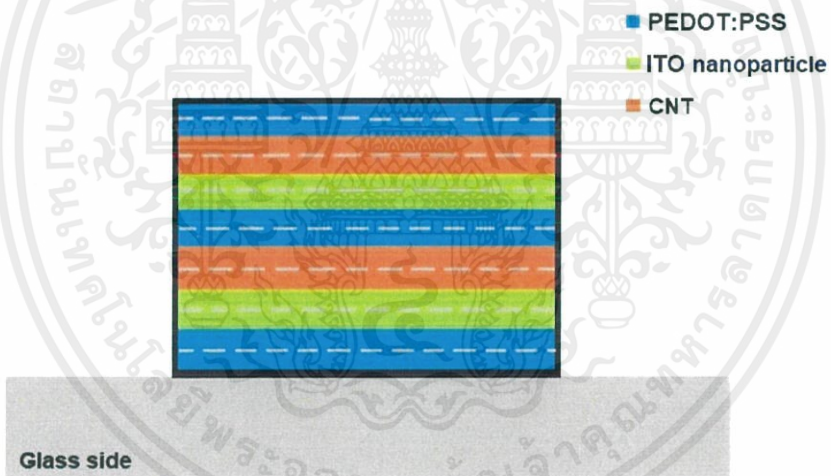
ตารางที่ 4.15 พารามิเตอร์ PEDOT-PSS + CNTs ที่ Drop ลงบนชิ้นงานของปาดเคลือบ 2 รอบ

จำนวนชั้น ที่ทำกร ปาด เคลือบ	ค่าความต้านทาน เฉลี่ย ทางไฟฟ้า ; $R_s$ (Ohm/sq.)	ค่าเปอร์เซ็นต์การ ทะลุผ่านของแสง ; %T ที่ 550 nm	ภาพประกอบการทดลอง
1	$3.52 \times 10^4$	64.3	
2	6,610	21.4	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 แสดงชั้น PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 2 รอบ 1 ชั้น



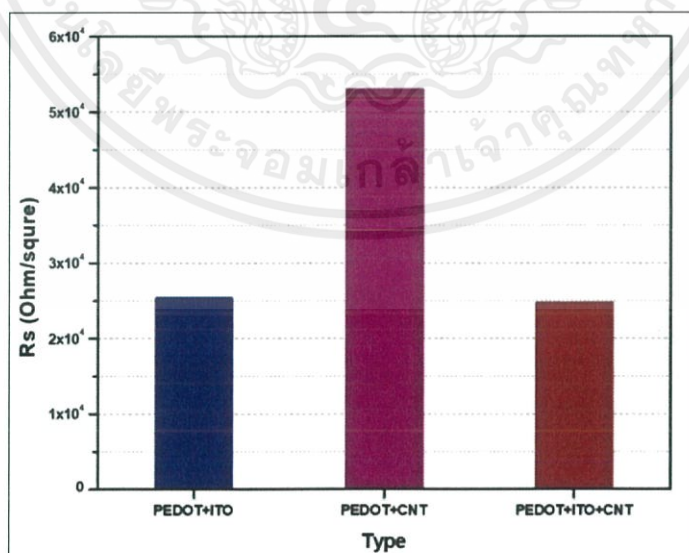
รูปที่ 4.30 แสดงชั้น PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 2 รอบ 2 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 พารามิเตอร์ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs ที่ Drop ลงบนชิ้นงานของปาดเคลือบ 2 รอบ

จำนวนชั้น ที่ทำการ ปาด เคลือบ	ค่าความต้านทาน เฉลี่ย ทางไฟฟ้า ; $R_s$ (Ohm/sq.)	ค่าเปอร์เซ็นต์การ ทะลุผ่านของแสง ; %T ที่ 550 nm	ภาพประกอบการทดลอง
1	$2.84 \times 10^4$	42.8	
2	$1.32 \times 10^4$	41.4	

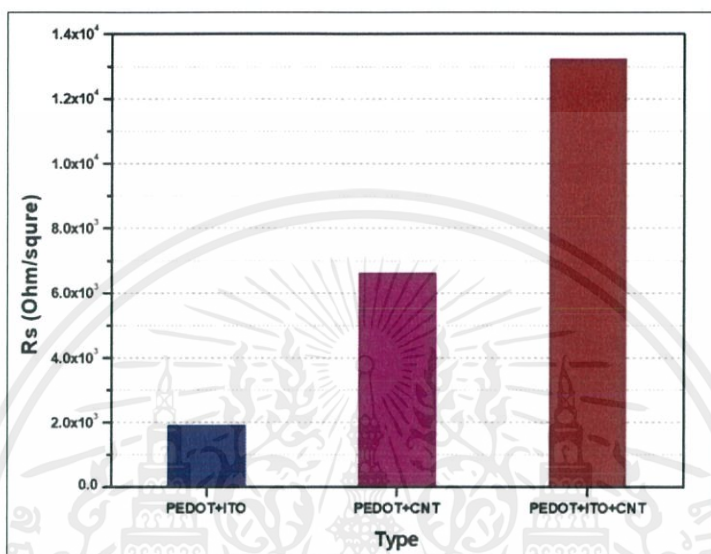
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานเฉลี่ย ทางไฟฟ้า ;  $R_s$  (Ohm/sq.) กับ สารละลาย PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs ที่ใช้ในการ Drop



รูปที่ 4.31 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานของสารละลาย PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs การปาดเคลือบ 1 ชั้น 2 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

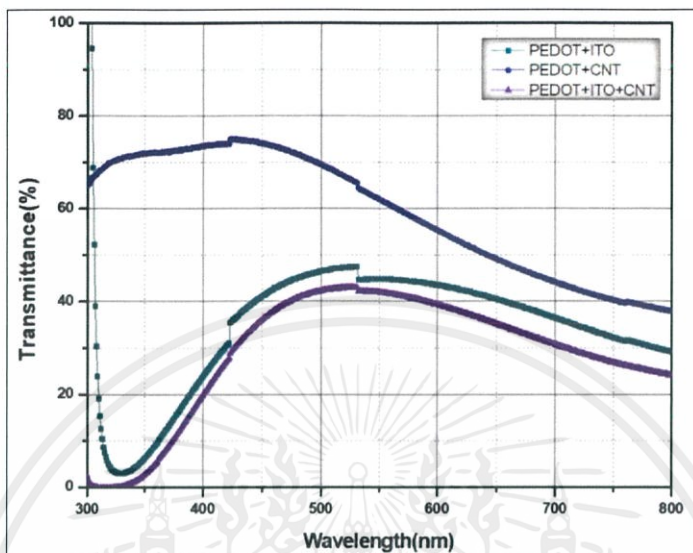
จากกราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานแบบปาดเคลือบแบบ 1 ชั้น 2 รอบของแต่ละสาร พบว่าค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่วัดได้ เรียงจากค่าความต้านทานทางไฟฟ้าน้อยไปหาความต้านทานทางไฟฟ้ามาก คือ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs, PEDOT-PSS + ITO-NPs และ PEDOT-PSS + CNTs ตามลำดับ



รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานของสารละลาย PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs การปาดเคลือบ 2 ชั้น 2 รอบ

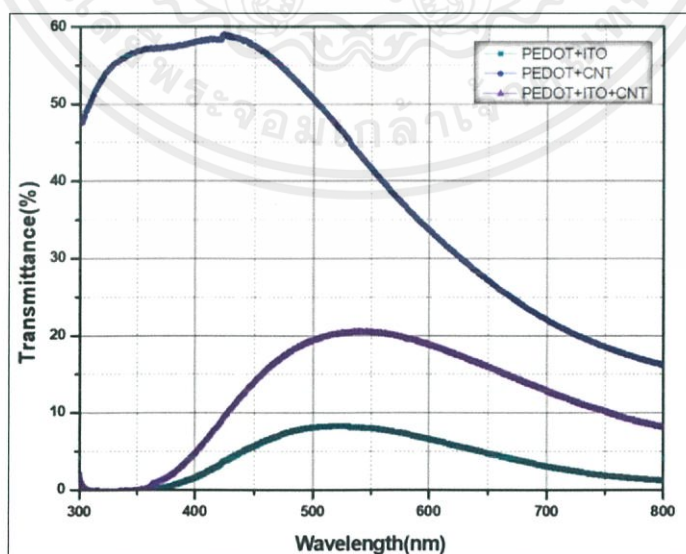
จากกราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานแบบปาดเคลือบแบบ 2 ชั้น 2 รอบของแต่ละสาร พบว่าค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่วัดได้ เรียงจากค่าความต้านทานน้อยไปหาความต้านทานมาก คือ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs, PEDOT-PSS + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs ตามลำดับ

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กับ ค่าเปอร์เซ็นต์การทะลุผ่านของแสง ;%T สารละลาย PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs ที่ใช้ในการ Drop



รูปที่ 4.33 เปรียบเทียบการทะลุผ่านแสงของสารละลาย PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs ที่ปาดเคลือบ 1 ชั้น 2 รอบ

จากกราฟเปรียบเทียบการทะลุผ่านของแสงแบบปาดเคลือบ 1 ชั้น 2 รอบของแต่ละสาร พบว่า ค่าความการทะลุผ่านของแสงที่วัดได้ เรียงจากค่าทะลุผ่านแสงน้อยไปหาค่าทะลุผ่านแสงมาก คือ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs, PEDOT-PSS + ITO-NPs และ PEDOT-PSS + CNTs ตามลำดับ



รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบการทะลุผ่านแสงของสารละลาย PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs ที่ปาดเคลือบ 2 ชั้น 2 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟเปรียบเทียบการทะลุผ่านของแสงแบบปาดเคลือบ 2 ชั้น 2 รอบของแต่ละสาร พบว่าค่าความการทะลุผ่านของแสงที่วัดได้ เรียงจากค่าทะลุผ่านแสงน้อยไปหาค่าทะลุผ่านแสงมาก คือ PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs และ PEDOT-PSS + CNTs ตามลำดับ

### วิเคราะห์ผลและสรุปผลการทดลองตอนที่ 3

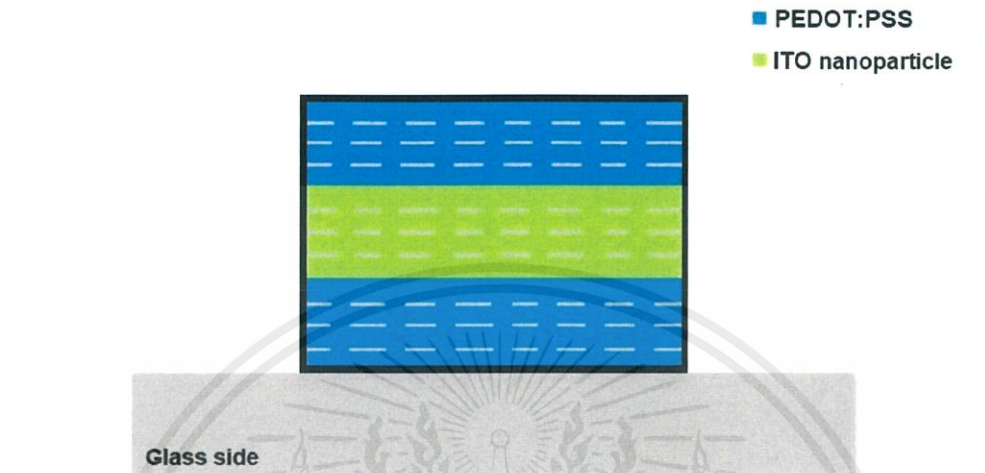
ในการทดลองโดยการเปรียบเทียบชั้นในการปลูกฟิล์มบางของละลาย PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs โดยปาดเคลือบ 2 รอบ โดยทำการหยดสารละลาย PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs ลงบน glass side ที่ทำ plasma O<sub>2</sub> โดยการควบคุมพารามิเตอร์ปริมาณที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม 20  $\mu$ l, ความร้อนที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม ที่ 80 °C/10 นาที, ค่า power supply 18.00 V, high level 10.00 V, low level 0.00 V และค่าความถี่ 1,000 Hz

จากผลการทดลองกราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานแบบปาดเคลือบแบบ 1 ชั้น 2 รอบของแต่ละสาร พบว่าค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่วัดได้ เรียงจากค่าความต้านทานทางไฟฟ้าน้อยไปหาค่าความต้านทานทางไฟฟ้ามาก คือ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs, PEDOT-PSS + ITO-NPs และ PEDOT-PSS + CNTs ตามลำดับส่วนแบบ 2 ชั้น 2 รอบ ของแต่ละสาร พบว่าค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่วัดได้ เรียงจากค่าความต้านทานน้อยไปหาค่าความต้านทานมาก คือ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs, PEDOT-PSS + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs ตามลำดับ

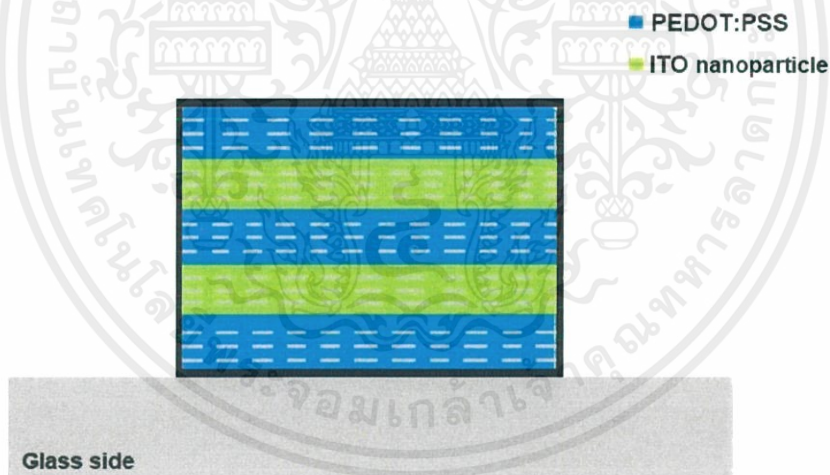
จากการทดลองกราฟเปรียบเทียบการทะลุผ่านของแสงแบบปาดเคลือบ 1 ชั้น 2 รอบของแต่ละสาร พบว่าค่าความการทะลุผ่านของแสงที่วัดได้ เรียงจากค่าทะลุผ่านแสงน้อยไปหาค่าทะลุผ่านแสงมาก คือ คือ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs, PEDOT-PSS + ITO-NPs และ PEDOT-PSS + CNTs ตามลำดับ แบบ 2 ชั้น 2 รอบของแต่ละสาร พบว่าค่าความการทะลุผ่านของแสงที่วัดได้ เรียงจากค่าทะลุผ่านแสงน้อยไปหาค่าทะลุผ่านแสงมาก คือ คือ PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs และ PEDOT-PSS + CNTs ตามลำดับ

**ตอนที่ 4** การเปรียบเทียบชั้นในการปลูกฟิล์มบางของละลาย PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs โดยปาดเคลือบ 4 รอบ

หยดสารละลาย PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs ลงบน glass side ที่ทำ plasma O<sub>2</sub> โดยการควบคุมพารามิเตอร์ปริมาณที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม 20  $\mu$ l, ความร้อนที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม ที่ 80 °C/10 นาที, ค่า power supply 18.00 V, high level 10.00 V, low level 0.00 V และค่าความถี่ 1,000 Hz ดังตารางที่ 4.18, 4.19 และ 4.20 ดังนี้



รูปที่ 4.35 แสดงชั้น PEDOT:PSS + ITO-NPs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 4รอบ 1ชั้น

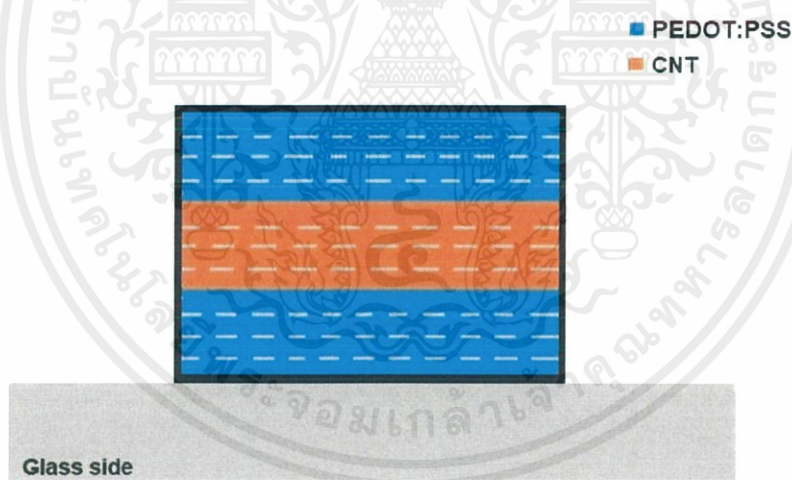


รูปที่ 4.36 แสดงชั้น PEDOT:PSS + ITO-NPs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 4รอบ 2ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

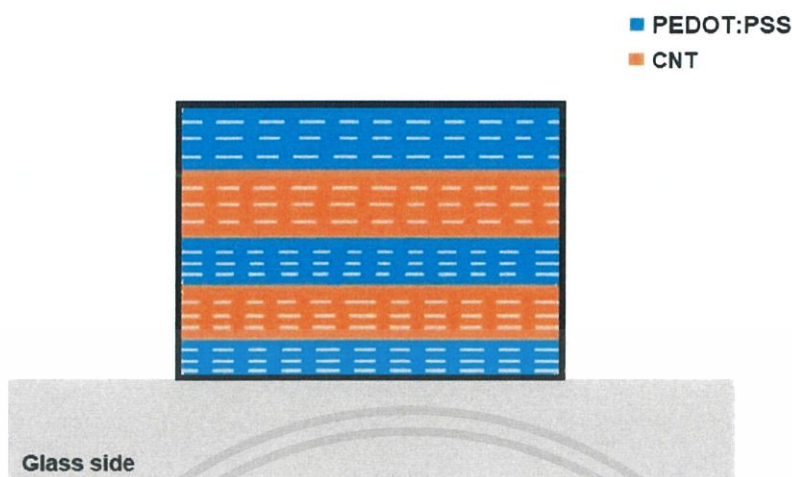
ตารางที่ 4.17 พารามิเตอร์ PEDOT-PSS + ITO-NPs ที่ Drop ลงบนชิ้นงานของปาดเคลือบ 4 รอบ

จำนวนชั้น ที่ทำกร ปาด เคลือบ	ค่าความต้านทาน เฉลี่ย ทางไฟฟ้า ; $R_s$ (Ohm/sq.)	ค่าเปอร์เซ็นต์การ ทะลุผ่านของแสง ; %T ที่ 550 nm	ภาพประกอบการทดลอง
1	$1.86 \times 10^4$	11.2	
2	$2.54 \times 10^4$	15.8	



รูปที่ 4.37 แสดงชั้น PEDOT-PSS + CNTs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 4 รอบ 1 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

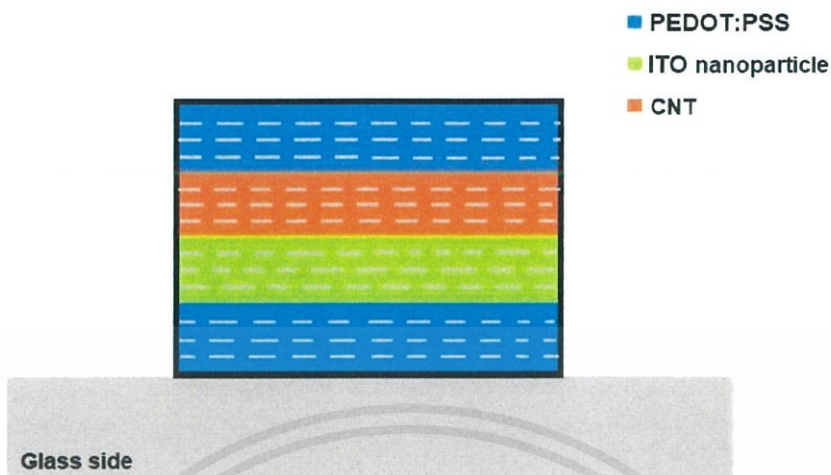


รูปที่ 4.38 แสดงชั้น PEDOT-PSS + CNTs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 4 รอบ 2 ชั้น

ตารางที่ 4.18 พารามิเตอร์ PEDOT-PSS + CNTs ที่ Drop ลงบนชิ้นงานของปาดเคลือบ 4 รอบ

จำนวนชั้น ที่ทำกร ปาด เคลือบ	ค่าความต้านทาน เฉลี่ย ทางไฟฟ้า ; $R_s$ (Ohm/sq.)	ค่าเปอร์เซ็นต์การ ทะลุผ่านของแสง ; %T ที่ 550 nm	ภาพประกอบการทดลอง
1	340	60.2	
2	$1.79 \times 10^4$	4.8	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.39 แสดงชั้น PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 4รอบ 1ชั้น



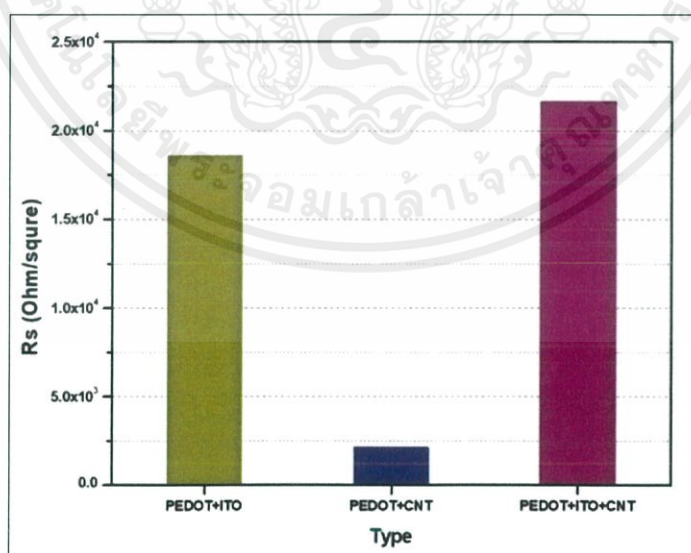
รูปที่ 4.40 แสดงชั้น PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs ของฟิล์มบางแบบปาดเคลือบ 4รอบ 2ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.19 พารามิเตอร์ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs ที่ Drop ลงบนชิ้นงานของปาดเคลือบ 4 รอบ

จำนวนชั้น ที่ทำกร ปาด เคลือบ	ค่าความต้านทาน เฉลี่ย ทางไฟฟ้า ; $R_s$ (Ohm/sq.)	ค่าเปอร์เซ็นต์การ ทะลุผ่านของแสง ; %T ที่ 550 nm	ภาพประกอบการทดลอง
1	$2.16 \times 10^4$	44.8	
2	$2.48 \times 10^4$	3.4	

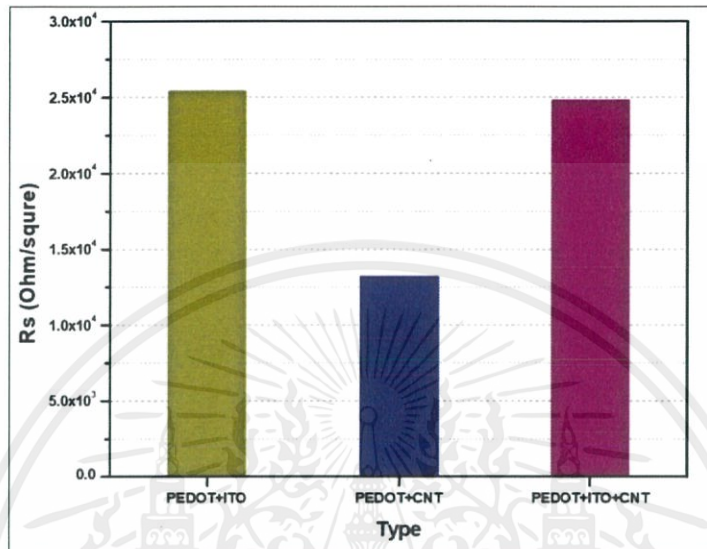
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานเฉลี่ย ทางไฟฟ้า ;  $R_s$  (Ohm/sq.) กับ สารละลาย PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs ที่ใช้ในการ Drop



รูปที่ 4.41 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานของสารละลาย PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs การปาดเคลือบ 1 ชั้น 4 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

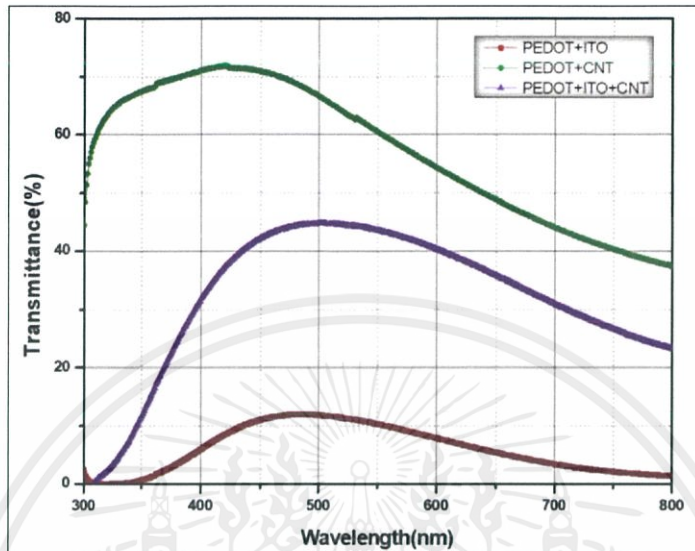
จากกราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานแบบปาดเคลือบแบบ 1 ชั้น 4 รอบของแต่ละสาร พบว่าค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่วัดได้ เรียงจากค่าความต้านทานน้อยไปหาความต้านทานมาก คือ PEDOT-PSS + CNTs, PEDOT-PSS + ITO-NPs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs ตามลำดับ



รูปที่ 4.42 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานของสารละลาย PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs การปาดเคลือบ 2 ชั้น 4 รอบ

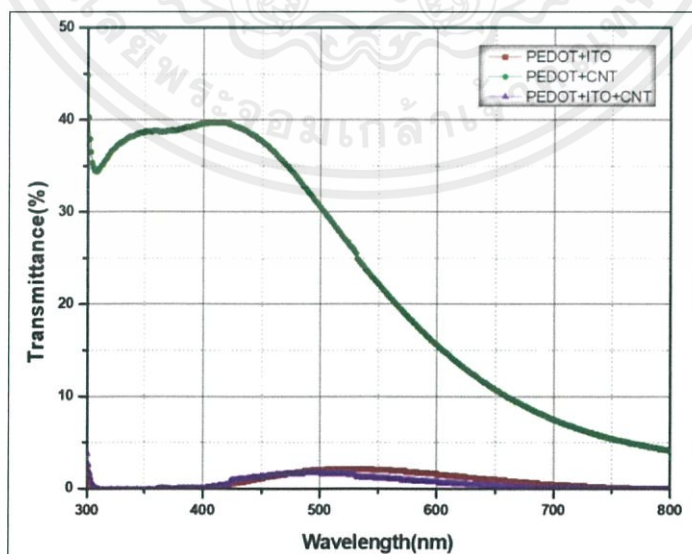
จากกราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานแบบปาดเคลือบแบบ 2 ชั้น 4 รอบของแต่ละสาร พบว่าค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่วัดได้ เรียงจากค่าความต้านทานน้อยไปหาความต้านทานมาก คือ PEDOT-PSS + CNTs, PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs ตามลำดับ

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กับ ค่าเปอร์เซ็นต์การทะลุผ่านของแสง ;%T สารละลาย PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs ที่ใช้ในการ Drop



รูปที่ 4.43 เปรียบเทียบการทะลุผ่านแสงของสารละลาย PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs ที่ปาดเคลือบ 1 ชั้น 4 รอบ

จากกราฟเปรียบเทียบการทะลุผ่านของแสงแบบปาดเคลือบ 1 ชั้น 4 รอบของแต่ละสาร พบว่า ค่าความการทะลุผ่านของแสงที่วัดได้ เรียงจากค่าทะลุผ่านแสงน้อยไปหาค่าทะลุผ่านแสงมาก คือ PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs และ PEDOT-PSS + CNTs ตามลำดับ



รูปที่ 4.44 เปรียบเทียบการทะลุผ่านแสงของสารละลาย PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs ที่ปาดเคลือบ 2 ชั้น 4 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟเปรียบเทียบการทะลุผ่านของแสงแบบปาดเคลือบ 2 ชั้น 4 รอบของแต่ละสาร พบว่าค่าความการทะลุผ่านของแสงที่วัดได้ เรียงจากค่าทะลุผ่านแสงน้อยไปหาค่าทะลุผ่านแสงมาก คือ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs, PEDOT-PSS + ITO-NPs, และ PEDOT-PSS + CNTs ตามลำดับ

#### วิเคราะห์ผลและสรุปผลการทดลองตอนที่ 4

ในการทดลองการเปรียบเทียบชั้นในการปลูกฟิล์มบางของละลาย PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs โดยปาดเคลือบ 4 รอบ ในแบบ 1 ชั้นและ 2 ชั้น หยตสารละลาย PEDOT-PSS, ITO-NPs และ CNTs ลงบน glass side ที่ทำ plasma O<sub>2</sub> โดยการควบคุมพารามิเตอร์ปริมาณที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม 20  $\mu$ l, ความร้อนที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม ที่ 80 °C/10 นาที, ค่า power supply 18.00 V, high level 10.00 V, low level 0.00V และค่าความถี่ 1,000 Hz

จากการทดลองกราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานแบบปาดเคลือบแบบ 1 ชั้น 4 รอบของแต่ละสาร พบว่าค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่วัดได้ เรียงจากค่าความต้านทานทางไฟฟ้าน้อยไปหาค่าความต้านทานทางไฟฟ้ามาก คือ PEDOT-PSS + CNTs, PEDOT-PSS + ITO-NPs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs ตามลำดับ และแบบ 2 ชั้น 4 รอบของแต่ละสาร พบว่าค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่วัดได้ เรียงจากค่าความต้านทานทางไฟฟ้าน้อยไปหาค่าความต้านทานทางไฟฟ้ามาก คือ PEDOT-PSS + CNTs, PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs และ PEDOT-PSS + ITO-NPs ตามลำดับ

จากการทดลองกราฟเปรียบเทียบการทะลุผ่านของแสงแบบปาดเคลือบ 1 ชั้น 4 รอบของแต่ละสาร พบว่าค่าความการทะลุผ่านของแสงที่วัดได้ เรียงจากค่าทะลุผ่านแสงน้อยไปหาค่าทะลุผ่านแสงมาก คือ PEDOT-PSS + ITO-NPs, PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs และ PEDOT-PSS + CNTs ตามลำดับ แบบปาดเคลือบ 2 ชั้น 4 รอบของแต่ละสาร พบว่าค่าความการทะลุผ่านของแสงที่วัดได้ เรียงจากค่าทะลุผ่านแสงน้อยไปหาค่าทะลุผ่านแสงมาก คือ PEDOT-PSS + ITO-NPs + CNTs, PEDOT-PSS + ITO-NPs, และ PEDOT-PSS + CNTs ตามลำดับ

### 4.3 ทดลองเพื่อหาสมบัติในการโค้งงอ

#### 4.3.1 การเปรียบเทียบสารเพื่อใช้ในการปลูกฟิล์มบางที่สามารถโค้งงอ

**ตอนที่ 1** การเปรียบเทียบปลูกฟิล์มบางของละลาย PEDOT-PSS และ CNTs บน kapton tape

หยตสารละลาย PEDOT-PSS และ CNTs ลงบน glass side ที่แปะ kapton tape (polyimide) ที่ทำ plasma O<sub>2</sub> โดยการควบคุมพารามิเตอร์ปริมาณที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม 20  $\mu$ l, ความร้อนที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม ที่ 80 °C/10 นาที, ค่า power supply 18.00 V, high

level 10.00 V, low level 0.00 V ค่าความถี่ 1,000 Hz, ปาดเคลือบ 4 รอบ 1 ชั้น และกำหนดระยะห่างของฟิล์มที่ 3 cm ดังตารางที่ 4.21 ดังนี้

ตารางที่ 4.20 พารามิเตอร์ ที่ Drop ลงบนชิ้นงาน

สารละลายที่ใช้	ค่าความต้านทาน ทางไฟฟ้า ; $R_s$ (Ohm)	ภาพประกอบการทดลอง
ไม่มี	over load	
PEDOT-PSS	$0.69 \times 10^6$	
PEDOT-PSS + CNT	508	

#### วิเคราะห์ผลและสรุปผลการทดลองตอนที่ 1

ในการทดลองการเปรียบเทียบชั้นในการปลูกฟิล์มบางของละลาย PEDOT-PSS และ CNTs โดยปาดเคลือบ 4 รอบ ในแบบ 1 ชั้น ลงบน glass side และ kapton tape ที่ทำ plasma  $O_2$  โดยการควบคุมพารามิเตอร์ปริมาณที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม 20  $\mu$ l, ความร้อนที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์มที่ 80 °C/10 นาที, ค่า power supply 18.00 V, high level 10.00 V, low level 0.00 V ค่าความถี่ 1,000 Hz และระยะห่างของฟิล์ม 3 เซนติเมตร

จากการทดลองเปรียบเทียบค่าความต้านทานไฟฟ้าแบบปาดเคลือบแบบ 1 ชั้น 4 รอบของแต่ละสาร พบว่าค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่วัดได้ ที่บน kapton tape ไม่สามารถวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าได้ ที่สาร PEDOT-PSS วัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ 0.69 เมกะโอห์ม และที่สาร PEDOT-PSS + CNTs วัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ 508 โอห์ม


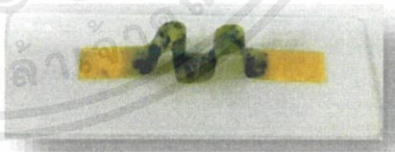
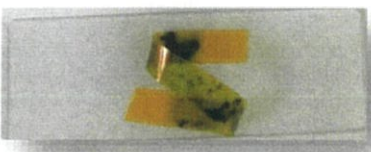
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในการทดลองตอนที่ 1 การเปรียบเทียบการปลูกฟิล์มบางของละลาย PEDOT-PSS และ CNTs บน kapton tape พบว่าปลูกฟิล์มบางด้วยสาร PEDOT-PSS + CNTs ได้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำที่สุด

**ตอนที่ 2** การเปรียบเทียบการโค้งงอของฟิล์มบางของละลาย PEDOT-PSS + CNTs บน kapton tape

หยดสารละลาย PEDOT-PSS และ CNTs ลงบน glass side ที่ทำ plasma  $O_2$  โดยการควบคุมพารามิเตอร์ปริมาณที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม 20  $\mu$ l, ความร้อนที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม ที่ 80  $^{\circ}$ C/10 นาที, ค่า power supply 18.00 V, high level 10.00 V, low level 0.00 V ค่าความถี่ 1,000 Hz, ปาดเคลือบ 4 รอบ 1 ชั้น ดังตารางที่ 4.22 ดังนี้

ตารางที่ 4.21 พารามิเตอร์ การโค้งงอ

รูปแบบการโค้งงอ	ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าก่อนโค้งงอ ; $R_s$ (Ohm)	ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าหลังโค้งงอ ; $R_s$ (Ohm)	ภาพประกอบการทดลอง
เส้นตรง	508	508	
คลื่น	879	1,065	
เกลียว	1,504	1,531	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### วิเคราะห์ผลและสรุปผลการทดลองตอนที่ 2

ในการทดลองการเปรียบเทียบชั้นในการปลูกฟิล์มบางของละลาย PEDOT-PSS และ CNTs โดยปาดเคลือบ 4 รอบ ในแบบ 1 ชั้น glass side แปะ kapton tape ที่ทำ plasma O<sub>2</sub> โดยการควบคุมพารามิเตอร์ปริมาณที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม 20  $\mu$ l, ความร้อนที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม ที่ 80 °c/10 นาที, ค่า power supply 18.00 V, high level 10.00 V, low level 0.00 V และ ค่าความถี่ 1,000 Hz

จากการทดลองเปรียบเทียบค่าความต้านทานไฟฟ้าแบบปาดเคลือบแบบ 1 ชั้น 4 รอบ ของแต่ละรูปแบบการโค้งงอ พบว่าค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่วัดได้ ที่บน kapton tape

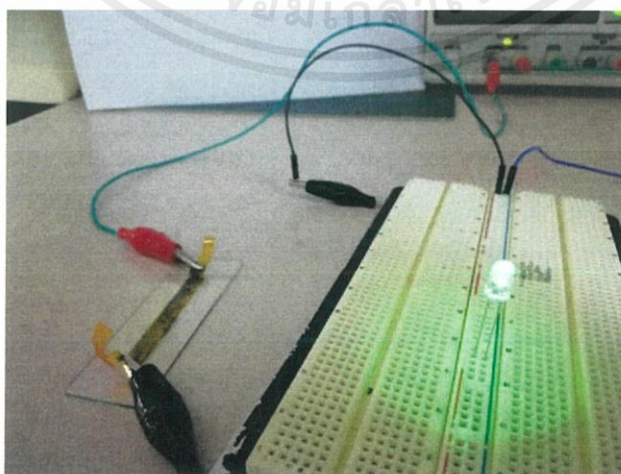
- แบบเส้นตรง วัดค่าความต้านทานไฟฟ้าก่อนและหลัง คือ 508 โอห์ม
- แบบเส้นคลื่นวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าก่อนและหลัง คือ 879, 1,065 โอห์ม เพิ่มขึ้น 186 โอห์ม คิดเป็น 21 %
- แบบเส้นเกลียววัดค่าความต้านทานไฟฟ้าก่อนและหลังคือ 1,504, 1,531โอห์ม เพิ่มขึ้น 27โอห์ม คิดเป็น 1.7 %

ดังนั้นในการทดลองตอนที่ 2 การเปรียบเทียบการโค้งงอของฟิล์มบางของละลาย PEDOT-PSS + CNTs บน kapton tape พบว่าปลูกฟิล์มบางด้วยสาร PEDOT-PSS + CNTs โค้งงอแบบเส้นเกลียวได้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นต่ำที่สุด

### ตอนที่ 3 การประยุกต์สร้างขั้วไฟฟ้าแบบโค้งงอ

ทดลองต่อกับหลอด LED โดยให้ความต่างศักย์ 3.0 โวลต์ และกระแสไฟฟ้า 0.5 แอมแปร์

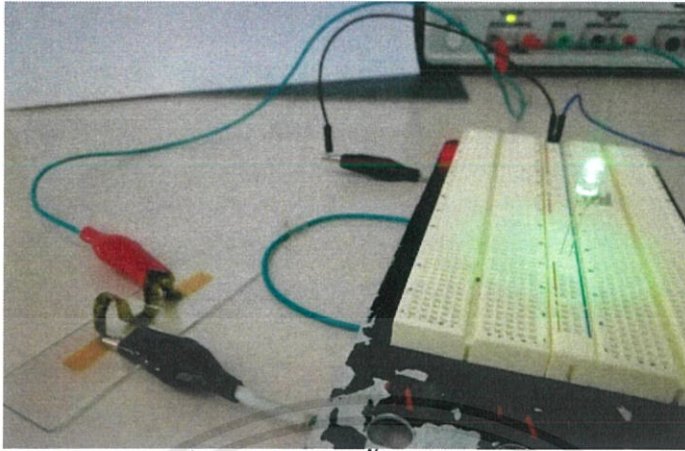
- แบบเส้นตรง



รูปที่ 4.45 ประยุกต์ขั้วไฟฟ้าแบบเส้นตรง

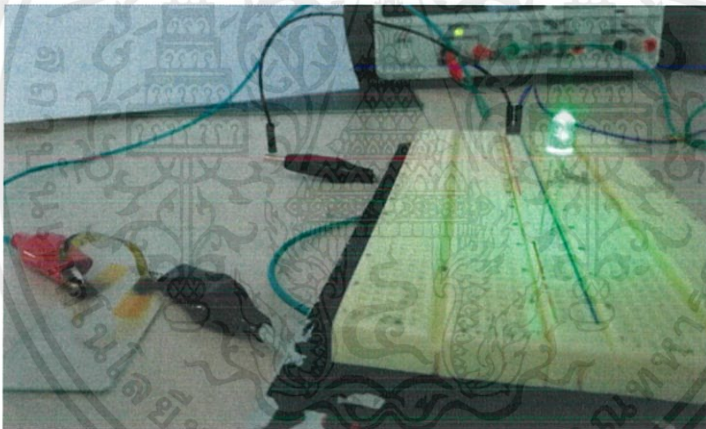
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แบบคลื่น



รูปที่ 4.46 ประยุกต์ขั้วไฟฟ้าแบบคลื่น

- แบบเกลียว



รูปที่ 4.47 ประยุกต์ขั้วไฟฟ้าแบบเกลียว

### วิเคราะห์ผลและสรุปผลการทดลองตอนที่ 3

จากการทดลองการประยุกต์สร้างขั้วไฟฟ้าแบบโค้งงอต่อกับหลอด LED โดยให้ความต่างศักย์ 3.0 โวลต์ และกระแสไฟฟ้า 0.5 แอมแปร์ เปรียบเทียบค่าความต้านทานไฟฟ้าแบบปาดเคลือบแบบ 1 ชั้น 4 รอบของแต่ละรูปแบบการโค้งงอ แบบเส้นตรง แบบเส้นคลื่น แบบเส้นเกลียว พบว่าสามารถต่อหลอด LED สว่าง

ดังนั้นในการทดลองตอนที่ 3 การเปรียบเทียบการโค้งงอของรูปแบบการโค้งงอ แบบเส้นตรง แบบเส้นคลื่น แบบเส้นเกลียว นั้น สามารถประยุกต์ใช้งานได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง และ ข้อเสนอแนะ

#### 5.1 บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการสร้างและพัฒนาฟิล์มบางจากวัสดุผสมระหว่าง พอลิเมอร์ และ วัสดุนาโน เพื่อประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้วัสดุนาโนของอินเดียมทินออกไซด์ (indium tin oxide nanoparticles ; ITO-NPs) และ ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotubes; CNTs) เป็นสารเติมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าของ Poly (3,4-ethylenedioxythiophene) /poly(styrene sulfonic acid) หรือ PEDOT-PSS ซึ่งเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้า โดยฟิล์มบางที่เตรียมได้จะถูกพิจารณาสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสงเพื่อให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง วิธีการเตรียมฟิล์มบางที่ใช้ในการทดลองนี้คือวิธีการเคลือบปาดจากสารละลาย ซึ่งเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย มีกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน ใช้สารปริมาณน้อย แต่สามารถเตรียมฟิล์มบางได้พื้นที่มาก เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มบางจึงได้ทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของสารเติมแต่ง โดยพบว่าฟิล์มบางที่ได้สมบัติทางไฟฟ้าดีที่สุด คือ การปาดเคลือบแบบ 4 รอบ 1 ชั้น โดยใช้สารผสมระหว่าง PEDOT-PSS กับ CNTs โดยวัดความต้านทานไฟฟ้าเชิงแผ่น (sheet resistance) ด้วยเครื่องวัดความต้านทานแบบเข็มวัดสี่จุด (four-point probes) ได้ 340 Ohm/sq ในขณะที่ค่าการทะลุผ่านของแสงซึ่งวัดโดยเครื่อง UV-visible spectroscope มีค่า 60.2 %

เพื่อแสดงให้เห็นว่าการเตรียมฟิล์มบางที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถประยุกต์สร้างเป็นขั้วไฟฟ้าที่สามารถโค้งงอได้ จึงได้ทำการปลูกฟิล์มบางสารผสมระหว่าง PEDOT-PSS กับ CNTs ลงบน kapton tape ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชนิด พอลิอิมิด (polyimide) ซึ่งสมบัติตามธรรมชาติของพอลิเมอร์ชนิดนี้จะไม่นำไฟฟ้า พบว่าเมื่อทำการเคลือบสารผสมระหว่าง PEDOT-PSS กับ CNTs ลงบน kapton tape จะทำให้ tape สามารถนำไฟฟ้าขึ้นมาได้ นอกจากนี้เมื่อทำการโค้งงอแผ่น tape หลายแบบ ทั้งแบบคลื่น แบบเกลียว พบว่าค่าความต้านทานของเทปที่เคลือบด้วยสารผสมระหว่าง PEDOT-PSS กับ CNTs มีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบระหว่างก่อนและหลังการโค้งงอ และเมื่อนำมาต่อกับอุปกรณ์ LED พบว่าสว่างจึงสรุปว่าใช้งานได้จริง

จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางแสง รวมทั้งการแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการโค้งงอของฟิล์มบางสารผสมที่เตรียมจากสารผสมระหว่าง PEDOT-PSS กับ CNTs ทำให้มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการนำวัสดุนาโนไปประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรมนาโนอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งการศึกษานี้ถือเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญสำหรับ ในการประยุกต์ใช้งานขั้วไฟฟ้าทางเลือกจากวัสดุผสม

ระหว่างสารพอลิเมอร์นำไฟฟ้าได้ และวัสดุนาโนในงานด้าน optoelectronics อย่างแพร่หลายในอนาคต

## 5.2 ปัญหา/แนวทางแก้ไข

**5.2.1 ปัญหา** ในทำการปาดเคลือบ (drop cast method) การฟอร์มตัวของฟิล์ม ไม่กระจายตัว และมีการไหลออกนอก glass slide ยากต่อการควบคุมรูปแบบของพื้นที่ผิวของฟิล์ม พื้นที่ผิวที่ได้มีรูปร่างไม่แน่นอน เกิดปัญหาในการวัดค่าความต้านทานจากเครื่อง 4 point probe

**การแก้ไขปัญหา** การทำปาดเคลือบ (drop cast method) เพิ่มการแปะ mask ลงไปในชิ้นงานเพื่อ จำกัดขอบเขตของสารละลายที่หยดลงบน glass slide

**5.2.2 ปัญหา** การเปลี่ยนแปลงสารละลาย ลักษณะหยดค่อนข้างกลมของสารละลาย ซึ่งมีความเป็น hydrophobic สูง ทำให้สารละลายที่หยดลงบน glass side ไม่กระจายตัว

**การแก้ไขปัญหา** ใช้การทำพลาสมาด้วย  $O_2$  เพื่อเพิ่มความเป็น hydrophilic ให้กับ glass side ทำให้สารละลายกระจายตัวได้กว้างมากขึ้น และช่วยให้สารละลายเกาะติดกับ glass side ได้ดียิ่งขึ้น ช่วยลดการเปลี่ยนแปลงของสารละลาย

**5.2.3 ปัญหา** เมื่อนำไปให้ความร้อนด้วย hot plate เกิดเป็นคราบรอบๆขอบพื้นที่ผิวที่ได้มีรูปร่างไม่แน่นอน

**การแก้ไขปัญหา** เปลี่ยนวิธีการเตรียมฟิล์มบาง เป็นวิธีปาดเคลือบทำให้ไม่เกิดขอบของสารละลาย และนอกจากนั้นยังได้พื้นที่ผิวที่เรียบที่สุด

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

**5.3.1** ศึกษาเรื่องลักษณะของพื้นที่ผิวของฟิล์มบางที่เตรียม เช่น ความขรุขระ รวมทั้งการฟอร์มตัวระหว่าง PEDOT-PSS กับ CNTs หรือ ITO-NPs

**5.3.2** ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าที่จำเป็นต่อการใช้งานเป็นขั้วไฟฟ้า เช่น ค่าฟังก์ชันงาน (work function) ของฟิล์มบางที่เตรียมได้ รวมทั้งอายุการใช้งานด้วย

**5.3.3** ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้วัสดุชนิดอื่นๆ เช่น วัสดุของโลหะ หรือ เส้นลวดนาโนของโลหะ เพื่อใช้เป็นสารเติมแต่งในการเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า

**5.3.4** ประยุกต์ใช้ฟิล์มบางที่เตรียมจากสารผสมระหว่าง PEDOT-PSS กับ CNTs หรือ ITO-NPs เป็นขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง เช่น ไดโอดเปล่งแสง หรือ ตัวตรวจจับแสง เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] ศุภเดช สุจินพรัหมและคณะ .(2015), Effect of O<sub>2</sub>/Ar Ratio on Optical Properties of Indium Tin Oxide Thin Films Deposited by DC Magnetron Sputtering, *repositO-NPstry*, pp. 296 – 301
- [2] Ernst, A., Makowski, O., Kowalewska, B., Miecznikowski, K. & Kulesza, P.J. (2007). Hybrid bioelectrocatalyst for hydrogen peroxide reduction: Immobilization of enzyme within organic–inorganic film of structured Prussian Blue and PEDOT. *Bioelectrochemistry*, 71, 23-28
- [3] สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (Solartec). (2548). โครงการวิจัยและพัฒนากระจกเคลือบผิวโปร่งแสงนำไฟฟ้า. หน้า 1-2
- [4] Tam, P.D. & Hieu, N.V. (2011). Conducting polymer film-based immunosensors using carbon nanotube/antibodies doped polypyrrole. *Applied Surface Science*, 257,9817-9824.
- [5] Mohammadi, S., Abdizadeh, H. and Golobostanfard, M.R. 2013. Opto-electronic properties of molybdenum doped indium tin oxide nanostructured thin films prepared via sol-gel spin coating. *Ceramics International* 39 (6) 6953-6961.
- [6] Pinheiro, C., Parola, A.J., Pina, F., Fonseca, J. and Freire, C. 2008. Electrocolorimetry of Electrochromic Materials on Flexible ITO-NPS Electrodes. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 92: 980-985.
- [7] Gong, K., Yan, Y., Zhang, M., Su, L., Xiong, S., & Mao, L. (2005). Electrochemistry and electroanalytical applications of carbon nanotubes: A review. *Analytical Sciences*, 21, 1383-1393.
- [8] MacDiarmid, A.G. 2001. “Synthetic metals: A novel role for organic polymers (nobel lecture)” *Angew. Chem. Int. Ed.* 40, 2581.
- [9] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC). (2547). โพลีเมอร์เปล่งแสง. กรุงเทพฯ: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค).
- [10] Hao, L., Diao, X., Xu, H., Gu, B. and Wang, T. 2008. Thickness Dependence of Structural, Electrical and Optical Properties of Indium Tin Oxide (ITO-NPS) Films Deposited on PET Substrates. *Applied Surface Science*. 254: 3504-3508.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11]Pinheiro, C., Parola, A.J., Pina, F., Fonseca, J. and Freire, C. 2008. Electrocolorimetry of Electrochromic Materials on Flexible ITO-NPS Electrodes. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 92: 980-985.
- [12]Hoshi, Y., Kato, H.-O. and Funatsu, K. 2003. Structure and Electrical Properties of ITO-NPS Thin Films Deposited at High Rate by Facing Target Sputtering. *Thin Solid Films*. 445: 245-250.
- [13]Aiempnakit, K., Rakkwamsuk, P. and Dumrongrattana, S. 2009. Influence of Continuous and Discontinuous Depositions on Properties of ITO-NPS Films Prepared by DC Magnetron Sputtering. *Modern Physics Letters B*. 23 (26): 3157-3170.
- [14]Chiang, C.K.; Fincher, C.R., Jr.; Park, Y.W.; Heeger, A.J.; Shirakawa, H.; Louis, E.J.; Gau, S.C.; MacDiarmid, A.G. 1977. "Electrical conductivity in doped polyacetylene" *Phys. Rev. Lett.* 39, 1098.
- [15]Freund, M.S.; Deore, B. 2007. *Self-doped conducting polymers*. Weinheim: John Wiley & Sons
- [16]Heeger, A.J. 2001. "Semiconducting and metallic polymers: The fourth generation of polymeric materials (nobel lecture)" *Angew. Chem. Int. Ed.* 40, 2591

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวจินนภา ดวงพาลี
วัน เดือน ปีเกิด	22 พฤษภาคม 2536
ภูมิลำเนาเดิม	119 หมู่ 5 ตำบลตาลเสี้ยน อำเภอกุฉินชัย จังหวัดอุตรธานี 41250
ประวัติการศึกษา	
มัธยมศึกษา	โรงเรียนภูมิพิชญ จังหวัดอุตรธานี
ปริญญาตรี	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวธัชชา บุญเรืองศักดิ์
วัน เดือน ปีเกิด	2 ธันวาคม 2538
ภูมิลำเนาเดิม	12 หมู่ 1 ตำบลน้ำร้อน อำเภอนองม่วงไข่ จังหวัดแพร่ 54170
ประวัติการศึกษา	
ประถมศึกษา	โรงเรียนเทพพิทักษ์วิทยา จังหวัดแพร่
มัธยมศึกษา	โรงเรียนนารีรัตน์จังหวัดแพร่ จังหวัดแพร่
ปริญญาตรี	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้