

การศึกษาและพัฒนาระบบการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตสำหรับการประยุกต์ใช้  
งานด้านอุปกรณ์ตรวจวัด

STUDY AND DEVELOPMENT OF ELECTROSTATIC SPRAY DEPOSITION SYSTEM  
FOR SENSOR APPLICATION



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY AND DEVELOPMENT OF ELECTROSTATIC SPRAY DEPOSITION  
SYSTEM FOR SENSOR APPLICATION



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING  
IN NANOMATERIAL ENGINEERING  
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี  
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาและการพัฒนาพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตสำหรับการประยุกต์ใช้  
ด้านอุปกรณ์ตรวจวัด

Special Project STUDY AND DEVELOPMENT OF ELECTROSTATIC SPRAY

Title DEPOSITION FOR SENSOR APPLICATION

นักศึกษา นางสาววิญญพันธ์ ใฝ่จันทร์

รหัสประจำตัว 57110042

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน

ปีการศึกษา 2560

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ทุติยาภรณ์ ทิวาวงศ์

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิชชุ เพชรภา	
ผศ.ดร.กรรช อ่อนละออ	
ผศ.ดร.ทุติยาภรณ์ ทิวาวงศ์	

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การศึกษาและสร้างระบบการพันเคลือบฟิล์มบางด้วยไฟฟ้าสถิตสำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้านาโน
นักศึกษา	นางสาววิญาพันธ์ ไผจันทร์
รหัสนักศึกษา	57110042
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.หุติยาภรณ์ ทิวาวงศ์

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาหลักการสำหรับออกแบบระบบเครื่องพันไฟฟ้าสถิต แบบเลื่อนฐานรองในแนวแกน X และ Y ใช้สำหรับการเคลือบฟิล์ม เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการทำงานของฟิล์ม โดยการสร้างระบบการเลื่อนฐานรองขึ้นมาพร้อมประกอบเข้ากับระบบพันเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตที่มีอยู่ จากนั้นนำสารอนุภาคนาโนซึ่งคือออกไซด์ผสมกับเอททาลีนไกลคอลพันเคลือบลงบนฐานรองต่างชนิดกัน 3 ชนิดคือ กระจก กระดาษและอลูมิเนียม แล้วหาเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มที่ดีที่สุดของวงการสเปร์ย์เมื่อฐานเลื่อนหยุดนิ่ง จากนั้นหาลักษณะการกระจายตัวของการพันเคลือบขนาดใหญ่ และในขณะที่ทำงานอย่างต่อเนื่อง ทำยสุดท้ายจากเงื่อนไขที่เหมาะสมจะนำไปพันเคลือบสารอนุภาคนาโนซึ่งคือออกไซด์ลงบนอินเตอร์ดิจิตแบบกระดาษสำหรับประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดขั้นต่อไป

Special project	STUDY AND DEVELOPMENT OF ELECTROSTATIC SPRAY DEPOSITION SYSTEM FOR SENSOR APPLICATION
Student	Ms.Wiyapan faichan
Student ID	57110042
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nano Material Engineering
Year	2016
Special project advisor	Asst. Prof. Dr. Thutiyaporn Thiwawong

## Abstract

This special project is a study of the principles of electrostatic spray system design. X and Y slides are used for film coating. To increase the working area of the film. By creating a secondary sliding system, it is equipped with an electrostatic coating system. Then, the nano-zinc oxide particles mixed with ethanol-coated glaze onto the base of three different types of paper, glass and aluminum. Then find out the conditions for the best film of the spray industry when the base stationary slide. Then, look at the distribution of large coatings. And while working continuously. Finally, from the optimum conditions, the nanoscale oxide nanoparticles are applied onto the paper interface for further application.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ศุภยาภรณ์ ทิวาวงศ์ ผู้ที่ได้ให้โอกาส ความรู้ แนวคิด คำแนะนำ ตลอดจนถึงงบประมาณที่ใช้ในการทำโครงการ ขอขอบคุณสมาชิกห้องปฏิบัติการ มี นายโพธิญาณ สองแก้ว, นายกษิตศ จันทร์แสงศรี , นายจิรพัฒน์ กฤษฎาเรืองชัย และสมาชิกคนอื่นในห้องปฏิบัติการ Electronics and Control for Nanodevice Research Laboratory (ECSN Lab) ที่คอยช่วยเหลือและให้ความรู้ในด้านทฤษฎีต่างๆ ให้เทคนิคต่างๆในการทำงาน เช่นวิธีการใช้ 3D Printing , Arduino เป็นต้นและ ให้แนวคิดในการทำโครงการพิเศษของข้าพเจ้าให้เป็นไปตามแผนที่วางไว้ตลอดช่วงเวลาที่ผ่านมา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ บิดา มารดา พี่น้อง อาจารย์ทุกคน ที่เป็นกำลังใจให้อบรมสั่งสอนทั้งความรู้และการใช้ชีวิต รวมไปถึงคำแนะนำดีๆต่างๆ จึงทำให้โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จไปได้ด้วยดี

วิญญานันท์ ไผ่จันทร์

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญรูป.....	vi
สารบัญตาราง.....	ix
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	2
1.5รายละเอียดของงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับซิงค์ออกไซด์.....	4
2.1.1 ซิงค์ออกไซด์.....	4
2.1.2 รูปแบบการใช้งานซิงค์ออกไซด์.....	4
2.1.3 สมบัติของซิงค์ออกไซด์.....	5
2.1.4 การนำซิงค์ออกไซด์มาประยุกต์ใช้งาน.....	6
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมฟิล์มบางด้วยระบบการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต.....	7
2.2.1 การเตรียมฟิล์มบาง.....	7
2.2.2 การเตรียมฟิล์มบางด้วยการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต.....	9
2.2.3 แรงที่มีผลกระทบต่อการทำกับสารที่พ่นออกมาการเตรียมฟิล์มโดย กระบวนการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต.....	14
2.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการเตรียมฟิล์มโดยกระบวนการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	14
2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับหลักการเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์ม.....	14

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	14
2.3.2 การศึกษาสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด.....	15
2.3.3 การศึกษาองค์ประกอบของสารด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR).....	16
2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการนำฟิล์มบางไปประยุกต์เพื่อนำไปใช้เป็นเซนเซอร์.....	17
2.4.1 ความชื้น (Humidity Sensor).....	17
2.4.2 เซนเซอร์ความชื้น (Humidity Sensor).....	18
2.4.3 ระบบการตรวจวัดความชื้น.....	18
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	19
3.1 การเตรียมเครื่องพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต.....	20
3.1.1 องค์ประกอบของระบบเครื่องพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	21
3.1.1.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูง (High Voltage power supply).....	21
3.1.1.2 หลอดบรรจุสารและหัวเข็ม (Syringe and Nozzle).....	21
3.1.1.3 ระบบควบคุมอัตราการไหล (Syringe Pump).....	22
3.1.1.4 แทนวางแบบปรับระดับได้.....	22
3.1.1.5 อะคริลิกและอลูมิเนียม.....	23
3.1.1.6 ห้องสำหรับการพ่นสาร (Chamber).....	24
3.2 การพัฒนาระบบพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต.....	24
3.2.1 ระบบควบคุมการทำงานของ (Arduino board).....	24
3.2.2 มอเตอร์แบบสแต็ป.....	25
3.2.3 โปรแกรมควบคุม.....	25
3.3 การเตรียมฟิล์มด้วยไฟฟ้าสถิต.....	26
3.3.1 เงื่อนไขการหาระยะห่างระหว่างหัวเข็มกับฐานที่เหมาะสมเพื่อทำสารพ่น ออกมาเป็นละอองฝอย.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3.2 เงื่อนไขการกระจายตัวของสารเมื่อเลื่อนแกน XกับY.....	27
3.4 การตรวจสอบสมบัติของฟิล์ม.....	27
3.4.1การตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์.....	33
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	29
4.1 ทดลองใช้เครื่องพ่นแบบไฟฟ้าสถิตแบบเลื่อนฐานในแนวแกน X และ Y.....	29
4.2 ผลการทดลองการหาระยะห่างระหว่างหัวเข็มกับฐานเพื่อทำสารพ่นออกมาเป็น ละอองฝอย(โดยไม่เลื่อนฐาน).....	35
4.3 ผลการทดลองการกระจายตัวของสารเมื่อเลื่อนแกนในแนวแกน XกับY.....	37
4.4 ผลการวัดกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด(SEM) เมื่อเลื่อนฐานใน แนวแกน Xและ Y ที่ substrateต่างกัน.....	48
4.5 ผลการตรวจสอบการตอบสนองต่อความชื้น.....	47
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	51
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	51
5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นและการแก้ไขในการใช้งาน.....	51
5.2 แนวทางในการพัฒนาระบบพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตและระบบฐานเลื่อน ในแนวแกนXและY.....	51
บรรณานุกรม.....	52
ประวัติผู้เขียน.....	54

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะโดยทั่วไปของซิงค์ออกไซด์.....	5
2.2 โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์แบบ Wurtzite (a) และ Sphalerite (b).....	6
2.3 ไดอะแกรมการใช้วัสดุ การนำส่งและการทับถม.....	7
2.4 ไดอะแกรมการปลูกฟิล์มบางด้วยวิธีการ deposition.....	8
2.5 รูปแบบ (โหมด)การพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตในแบบต่างๆ.....	12
2.6 รูปแบบการทำงานของเครื่องพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	13
2.7 ไดอะแกรมการทำงานของเครื่องเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์.....	15
2.8 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากในระนาบ.....	16
2.9 แสดงการเลี้ยวเบนแบบเสริม และการเลี้ยวเบนแบบหักล้างกัน ในระนาบ.....	16
2.10 กราฟที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	18
2.11 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด.....	19
2.12 ผลจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมตัวอย่าง.....	20
2.13 รูปแสดงหลักการทำงานของ Fourier Transform Infrared Spectroscopy.....	21
2.14 รูปที่แสดงถึงค่าการ Absorption และหมู่ฟังก์ชันที่ตรงกัน.....	22
2.15 ตัวอย่างการใช้วัสดุพลาโซโมนิก.....	23
2.16 แสดงหลักการ Contact-separation ในแนวตั้งของ nanogenerator triboelectric.....	24
2.17 แสดงหลักการ Lateral sliding mode of triboelectric.....	24
2.18 แสดงหลักการ Single-electrode mode of triboelectric.....	25
2.19 แสดงกลไกของไพโรอิเล็กทริกส์บนเบสที่เป็นวัสดุผสม.....	26
3.1 แผนผังการดำเนินงานขั้นที่ 1.....	27
3.2 แผนผังการดำเนินการขั้นที่ 2.....	28
3.3 ระบบการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต.....	28
3.4 (ก) แหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูง และ (ข) แหล่งจ่ายไฟฟ้า.....	29
3.5 ตัวอย่างหลอดบรรจุสาร (ก) และหัวเข็ม (ข) ที่ใช้พ่น.....	29
3.7 ตัวอย่าง Syringe Pump.....	30

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.8 ตัวอย่างแท่นวางปรับได้.....	30
3.9 อลูมิเนียมและอะคริลิกที่ประกอบเสร็จแล้ว.....	31
3.10 ตัวอย่าง Chamber ใช้สำหรับพ่น.....	32
3.11 ตัวอย่าง ARDUINO board ที่ใช้ควบคุม.....	32
3.12 ตัวอย่าง Stepping driver (ก) และ Stepping motor (ข).....	33
3.13 ตัวอย่างโปรแกรม arduino สำหรับเขียนโค้ด.....	34
3.14 ตัวอย่างเครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ รุ่น bruker d8 discover.....	35
3.15 ตัวอย่างเครื่อง JEOL JEM 6340.....	35
3.16 ตัวอย่าง Fourier Transform Spectrum Perkin elmer spectrum two.....	36



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงพารามิเตอร์และเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบาง(เพื่อหาความสมมาตรของวงสเปร์ย์ ในลักษณะหยุดนิ่ง).....	26
2.2 แสดงพารามิเตอร์และเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบาง(เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัว ของการพ่นเคลือบขนาดใหญ่).....	27
2.3 แสดงพารามิเตอร์และเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบาง(เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัว ของการพ่นเคลือบขนาดใหญ่ในกรณีพ่นเคลือบอย่างต่อเนื่อง).....	27
4.1 ตารางอัตราส่วนแนวตั้งฉากกับแนวราบของเส้นผ่านศูนย์กลางสเปร์ย์ที่ระยะ 40-80 มิลลิเมตร โดยใช้ศักย์ไฟฟ้าที่ 10 kV.....	35





# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันวิวัฒนาการด้านวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม มีการใช้ฟิล์มบางเข้ามาเป็นส่วนหนึ่งของอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ โดยฟิล์มบางจะเคลือบสารหรืออนุภาคบางชนิด เพื่อเพิ่มสมบัติที่ต้องการให้ชิ้นงานมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งการเตรียมฟิล์มบางก็มีหลากหลายวิธีด้วยกัน เช่น การเตรียมฟิล์มด้วยการหยดสารลงบนฐานรองรับ(Drop), การใช้ radio frequency magnetron sputtering หรือ การใช้ ink-jet printing technology วิธีการที่กล่าวมาทั้งหมด มีความซับซ้อนและใช้เวลาที่นานในการใช้งาน จึงสนใจในการระบบการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต(Electrostatic spray deposition: ESD) ในการเพิ่มพื้นที่ในเคลือบสารลงบนฟิล์ม

การพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นระบบที่น่าสนใจอย่างมากเพราะในทางด้านวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรมจะใช้ระบบนี้ในการนำมาพัฒนาวัสดุในระดับนาโน ระบบการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตจะมีแบบแห้งเดียว(หัวเดียว) สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพของฟิล์มหรือชิ้นงาน ทำได้โดยการเพิ่มพื้นที่ของฟิล์มและชิ้นงาน โดยระบบการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต สามารถทำในระบบสภาวะปกติและด้วยราคาที่ไม่แพง ติดตั้งได้ง่าย จึงเหมาะแก่การนำมาพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ

ฟิล์มที่ได้จากการทำด้วยระบบการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลายส่วนมากจะนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เช่นงานวิจัยของ Ganesh Kumar Mani และคณะ ได้ทำการวิจัยระบบการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตกับตัว Zinc oxide ทำเป็นทำเป็นเซนเซอร์ที่มีการตอบสนองที่ดี [1]การใช้ระบบนี้เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของชิ้นงาน เพิ่มพื้นที่ในการทำชิ้นงาน และเพิ่มสมบัติของชิ้นงานมากขึ้นเพราะเราสามารถเตรียมสารได้มากขึ้น โดยจะเอาไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมทางด้านวิทยาศาสตร์ หรือทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่นทำเป็น อุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้า หรืออุปกรณ์ตรวจวัดค่าต่างๆ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาและสร้างระบบการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตที่มีการพัฒนาการพ่นเคลือบขนาดใหญ่ (Large area)
- 1.2.2 ศึกษาผลกระทบจากการเตรียมฟิล์มด้วยการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตจากเงื่อนไขต่างๆ
- 1.2.3. เพื่อศึกษาแนวทางการนำการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตไปประยุกต์ในการใช้งานด้านอุปกรณ์ตรวจวัด

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ทำการศึกษาและสร้างระบบการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต ที่มีการเคลือบขนาดใหญ่และทำการเตรียมฟิล์มบางด้วยอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์โดยใช้เงื่อนไขต่างๆ จากนั้นจะนำฟิล์มบางที่เราได้ ไปศึกษาทางด้านพื้นผิวด้วย กล้องจุลทรรศน์แบบเลื่อนกราด(Scanning electron microscope) สุดท้ายนำเงื่อนไขที่เหมาะสมไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัด

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

- 1.4.1 มีความรู้และความเข้าใจในการสร้างระบบการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต
- 1.4.2 มีความรู้ความเข้าใจจากการตรวจสอบหาสมบัติต่างๆที่เกิดขึ้น จากเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัด เช่น การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด (SEM) ในการตรวจวัดพื้นผิว
- 1.4.4 สามารถนำฟิล์มบางที่ได้จากระบบการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัด

## 1.5 รายละเอียดงานวิจัย

บทที่ 1 จะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ ขอบเขตงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับในงานวิจัย

บทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งเป็นทฤษฎีเบื้องต้นที่เราศึกษา โดยจะประกอบไปด้วย ทฤษฎีของระบบการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับอนุภาคนาโนและการนำประยุกต์ใช้เกี่ยวกับแหล่งกำเนิดพลังงาน และเซนเซอร์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินงานวิจัยศึกษาพัฒนาการสร้างระบบการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต และย้รวมถึงวิธีการในการตรวจสอบฟิล์มบางที่เราจะได้จากการพ่นดังกล่าวด้วย

บทที่ 4 จะกล่าวถึงผลการทดลองที่ได้จากการสร้างระบบระบบการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตและทำการตรวจสอบคุณสมบัติด้วยเครื่องมือวัดต่างๆ พร้อมกับจะกล่าวถึงการนำไปประยุกต์ใช้ทำอุปกรณ์ตรวจวัด

บทที่ 5 จะกล่าวถึงการสรุปผลการทดลองดำเนินการงานวิจัยและข้อเสนอแนะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีโดยเริ่มทฤษฎีพื้นฐานของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าซึ่งเป็นสารหลักที่จะนำมาประยุกต์ทำเป็นอุปกรณ์ตรวจวัด และจะกล่าวถึงพอลิเมอร์ต่างๆ สมบัติพื้นฐานโดยทั่วไปทางโครงสร้างพื้นผิวและสมบัติการนำไฟฟ้า

นอกจากนี้จะกล่าวถึงวิธีการเตรียมฟิล์มด้วยระบบการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต(Electro static spray deposition : ESD) แบบหลายแหล่งจากนั้นจะกล่าวถึงเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ฟิล์ม สุดท้ายจะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานของอุปกรณ์ตรวจวัด โดยจะบอกถึงสมบัติต่างๆทั่วไปที่สำคัญ

#### 2.1. ซิงค์ออกไซด์(Zinc Oxide)

##### 2.1.1. ซิงค์ออกไซด์

ซิงค์ออกไซด์ หรือ สังกะสีออกไซด์ คือ สารประกอบอนินทรีย์ มีสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ ZnO มีลักษณะทางกายภาพคือ เป็นผงสีขาว ไม่ละลายน้ำ ใช้ผสมในผลิตภัณฑ์หลายๆอย่าง เช่น ยาง พลาสติก เซรามิก แก้ว โดยในธรรมชาติเราจะพบในรูปของซินไซต์(Zincite) โดยส่วนใหญ่จะจากการสังเคราะห์ขึ้นมา

##### 2.1.2. รูปแบบการใช้ซิงค์ออกไซด์

โดยซิงค์ออกไซด์ ที่ใช้งานในชีวิตประจำวันที่มีหลายรูปแบบ โดยส่วนมากใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุต่างๆ เป็นส่วนผสมยา

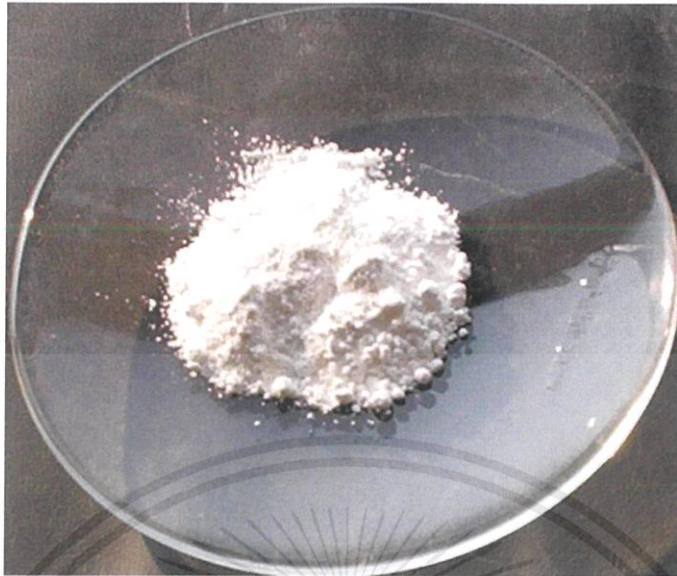
2.1.2.1 ด้านอุตสาหกรรม นำมาใช้ในการผลิตยางรถยนต์เพื่อยืดอายุการใช้งานของยางนำมาทำสีทาบ้าน เพื่อปรับปรุงความไวต่อแสง ยืดอายุการเคลือบ ป้องกันUV ทนต่อลม ฟ้า อากาศ และฆ่าเชื้อรา หรือใช้ในเซรามิก ผสมในแก้วเพื่อลดเวลาการหลอมผลิต ลดความหนืด เพิ่มความต้านทานสารเคมีบางชนิด ลดประสิทธิภาพการขยายตัว ลดการแตกร้าว

2.1.2.2 ด้านเครื่องสำอาง ใช้เพื่อทำให้การติดทนดีขึ้น ป้องกันแสงแดด UV

2.1.2.3 ด้านเคมีใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตสารเคมี

2.1.2.4 ด้านการเกษตรและสิ่งแวดล้อม ใช้ในการกำจัดของเสียต่างๆ ในรูปของของแข็งเพื่อกำจัดน้ำเสีย กำจัดแก๊สพิษโดยเป็นตัวดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## รูปที่ 2.1 ลักษณะโดยทั่วไปของซิงค์ออกไซด์

### 2.1.3 สมบัติของซิงค์ออกไซด์

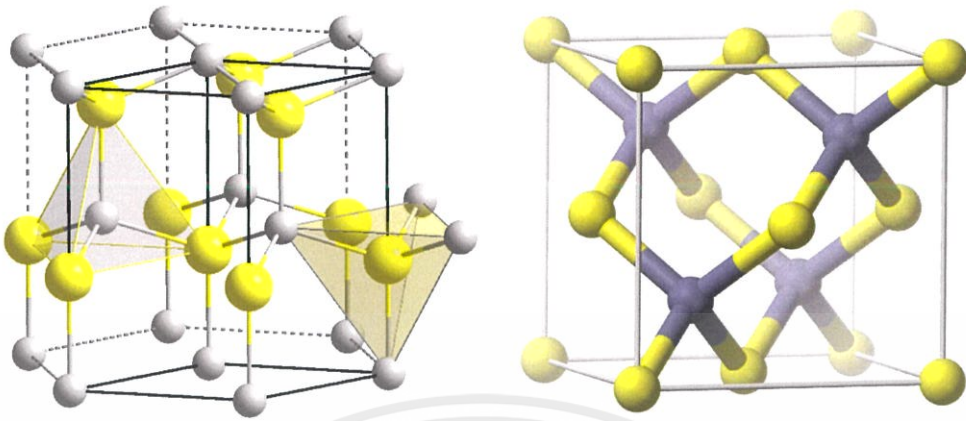
2.1.3.1 สมบัติทางความร้อนได้ดีด้วยค่าดัชนีหักเห (high refractive index) ที่สูงประมาณ 1.95-2.10 จะสะท้อนแสงได้ดีทำให้ทนความร้อนมีความเสถียรทางอุณหภูมิที่ดี

2.1.3.2 สมบัติทางแสง เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างของแถบพลังงานถึง 3.37eV ซิงค์ออกไซด์มีราคาถูกกว่ามากโดยปัจจุบันนิยมนำมาใช้สำหรับการนำไปใช้เป็นเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานในช่วงของแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ดี เช่น LEDs, laser diodes หรือ photodetectors เป็นต้น

2.1.3.3 คุณสมบัติการนำไฟฟ้า ซิงค์ออกไซด์มีลักษณะสมบัติที่สามารถถูกเหนี่ยวนำให้มีลักษณะเป็น ferromagnetic ได้ดีโดยการเจือด้วยธาตุที่มีสมบัติเป็นแม่เหล็ก เช่น เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล เป็นต้น หรือ เจือด้วยธาตุที่ไม่มีสมบัติเป็นแม่เหล็ก เช่น ไททาเนียม วานาเดียม เป็นต้น ซึ่งสามารถนำมาใช้งานในเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ได้หลายชนิด นอกจากนี้การเจือด้วยธาตุต่างๆ ยังทำให้ซิงค์ออกไซด์มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้นได้ เช่น การเจือด้วยลิเทียม จะส่งผลให้ซิงค์ออกไซด์มีค่าต้านทานสูง

2.1.3.4 การเป็นสารเร่งปฏิกิริยา (photocatalyst) เป็นลักษณะเฉพาะของซิงค์ออกไซด์ในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสง ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในเวลาอันสั้น ซึ่งมาจากคุณสมบัติของการสารเป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ของซิงค์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์แบบ Wurtzite (a) และ Sphalerite (b)

#### 2.1.4. การนำซิงค์ออกไซด์มาประยุกต์ใช้งาน

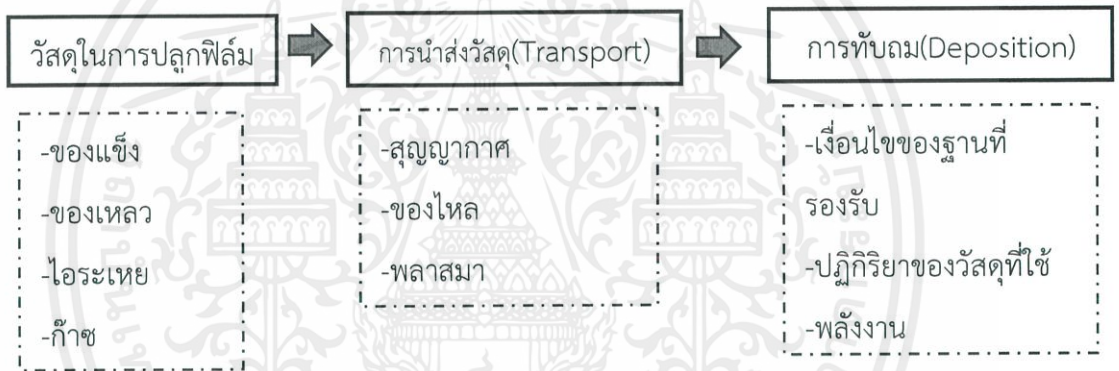
เนื่องด้วยซิงค์ออกไซด์นั้นสังเคราะห์ได้ง่าย ราคาถูก จึงถูกนิยมนำไปทำเป็นตัวผสมในวัสดุเครื่องใช้ในชีวิตประจำวันต่างๆ เพื่อยืดอายุการใช้งาน ป้องกันแสงอาทิตย์ กำจัดเชื้อราหรือนำไปทำเป็นเซนเซอร์ต่างๆ โดยเซนเซอร์ทำงานด้วยการแปลงสัญญาณจากปฏิกิริยาเคมีเป็นสัญญาณไฟฟ้า และนำไปตรวจวัด บันทึกได้ มักจะนำมาทำเป็นเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้นในสภาพแวดล้อมต่างๆ

นอกจากนี้ยังมีตัวอย่างงานวิจัยที่นำซิงค์ออกไซด์ไปประยุกต์ในการสร้างเป็นเบสในการทำเซนเซอร์วัดความชื้น ในรูปแบบต่างๆ

## 2.2.ระบบการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต

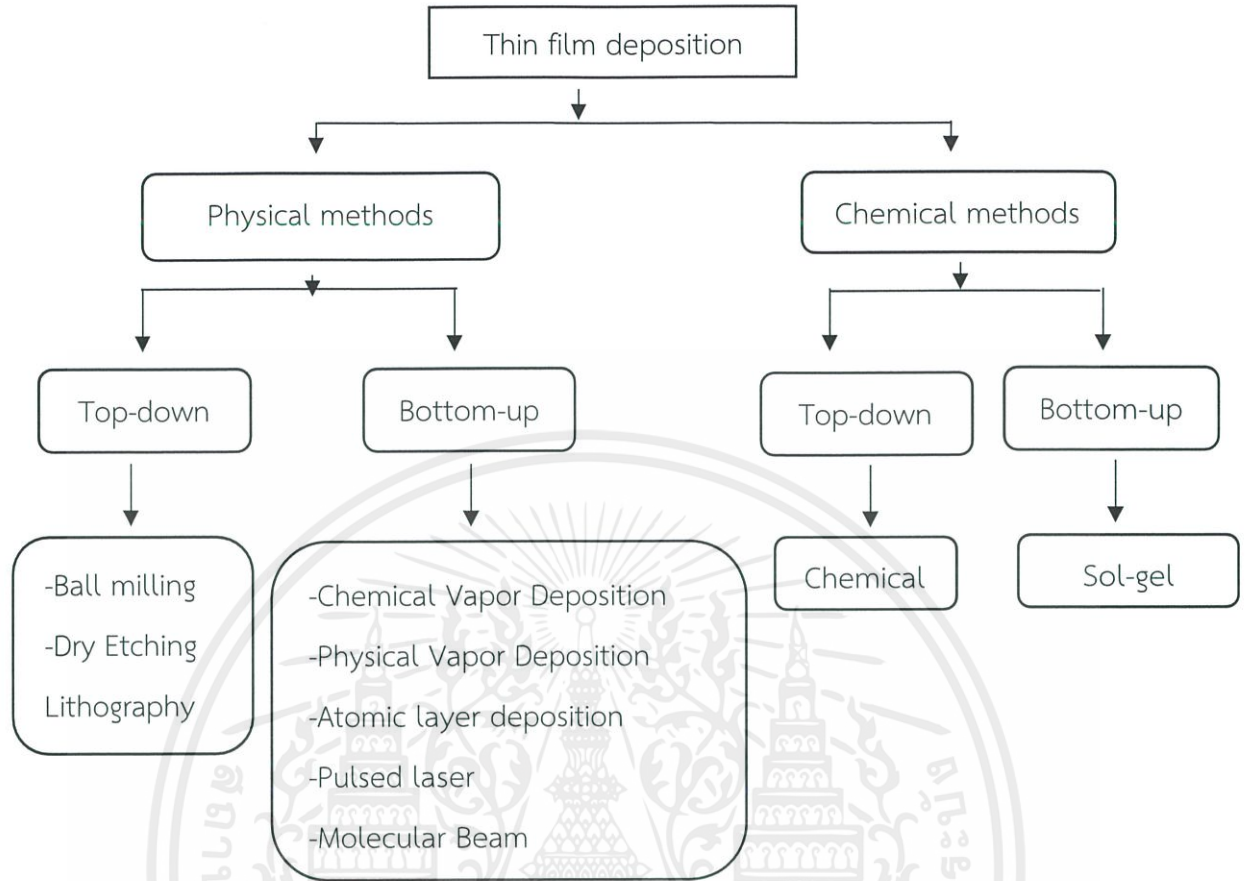
### 2.2.1 การเตรียมฟิล์มบาง

ในขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางนั้นมีหลายวิธี โดยแบ่งชนิดตามการเปลี่ยนสถานะของสารที่ต้องการจะปลูกฟิล์ม หรือ ใช้การเคลือบสารนั้น จะพิจารณาจากวัสดุ (source) มี 3 สถานะคือ ของแข็ง ของเหลวและก๊าซ หรือเป็นไอระเหย แล้วจากนั้นก็จึงพิจารณาในเรื่องของการนำส่งวัสดุไปยังฐานรอง (transport) ในสภาวะต่างๆ ที่เป็นทั้ง ของไหล(fluid) สุญญากาศ (vacuum) และพลาสมา (plasma) ซึ่งการนำส่งนั้นก็จะมี โดย เทคนิคการ deposition ในการผลิตฟิล์มบางมีอยู่ ด้วยกันหลายวิธี ดังเช่น เทคนิคการเคลือบสารด้วยการระเหยของแข็ง (Physical Vapor Deposition), เทคนิคการเคลือบสารด้วยปฏิกิริยาเคมีของไอ ระเหยก๊าซ (Chemical vapor deposition)



รูปที่ 2.3 ไตอะแกรมการใช้วัสดุ การนำส่งและการทับถม

การเตรียมฟิล์มบางด้วยวัสดุที่เป็นของแข็ง เพื่อใช้ในการปรับแต่งสมบัติด้านหน้าพื้นผิวฟิล์มที่จะนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป เช่น เครื่องมือวัดทางวิทยาศาสตร์ และเครื่องมือที่ใช้ในทางด้านอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยกระบวนการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตนั้น คือ กระบวนการที่ใช้เพื่อเตรียมฟิล์มของสารต่างๆ ลงบนแผ่นฐานรองรับ ด้วยแรงทางไฟฟ้า (electrical force) โดยในปัจจุบันนี้ กระบวนการใช้ระบบพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตถูกนำมาใช้สำหรับ การเตรียมฟิล์มทางด้านนาโนเทคโนโลยีและนาโนอิเล็กทรอนิกส์กันอย่างแพร่หลาย



รูปที่ 2.4 ไดอะแกรมการปลูกฟิล์มบางด้วยวิธีการ deposition

กระบวนการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสติกเป็นเครื่องมือที่สามารถเตรียมชั้น และฟิล์มบางได้อย่างมีประสิทธิภาพ สูงเพราะสามารถเตรียมฟิล์มได้อย่างที่ต้องการและอย่างสมบูรณ์ เทคนิคการพ่นด้วยไฟฟ้าสติก สามารถที่จะทำให้เกิดละอองหยดเล็กๆ ในระดับไมโครเมตร และในระดับเล็กกว่าไมโครเมตร โดยในกระบวนการแรงทางไฟฟ้าสติกจะทำให้เกิดการแพร่กระจายละอองหยดเล็กๆ อย่างสม่ำเสมอระหว่างช่องว่างของหัวเข็มกับฐานรองรับ ซึ่งกระบวนการนี้จะสามารถควบคุมได้ง่ายโดยการปรับ อัตราการไหลของสาร และปรับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ทำการให้กับหัวเข็มนอกจากนี้เมื่อเทียบต้นทุนใน กระบวนการสร้างฟิล์มบาง กระบวนการพ่นด้วยไฟฟ้าจะราคาถูกกว่ากระบวนการที่สร้างฟิล์มด้วย วิธีการระเหยเป็นไอทางเคมีและทางกายภาพ หรือกระบวนการพ่นด้วยพลาสมาซึ่งต้องใช้ระบบ สูญญากาศสูงในระบบด้วย ในส่วนความหนาฟิล์มสามารถควบคุมได้โดยการปรับความเข้มข้นและ อัตราการไหลของสารละลายที่นำมาใช้การพ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2 การเตรียมฟิล์มบางโดยการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต

การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต เป็นกระบวนการที่สามารถทำให้ของเหลวแตกตัว หยดของเหลว(droplet) ที่ได้จาก กระบวนการนี้จะมีความเป็นประจุสูงซึ่งเป็นไปตามกฎของเรเลย์ (Rayleigh limit) มีขนาดเล็กมาก ซึ่งอยู่ในระดับ 10 นาโนเมตร ความเป็นประจุและขนาดของหยดเล็กๆ โดยจะสามารถควบคุมได้โดย จากสนามไฟฟ้าที่ให้ ประสิทธิภาพของประจุที่เกิดจากการปลุกด้วยการพ่นเคลือบจะมีประสิทธิภาพความเป็นประจุที่ดีกว่าแบบหยดที่ไม่มี ประจุ กระบวนการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตได้มีการนำมาใช้ประยุกต์อย่างมากมายในกระบวนการอุตสาหกรรมและอุตสาหกรรมเครื่องมือทางด้านวิทยาศาสตร์ ซึ่งจะเห็นว่ากระบวนการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตนี้สามารถนำมาใช้ประยุกต์กับเทคโนโลยีด้านวัสดุศาสตร์ ทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องมือระดับไมโคร และเทคโนโลยีในระดับนาโน

ในปี 1912 Smoluchowski ได้เสนอถึงทฤษฎีของการเกิดประจุขึ้นเองตามธรรมชาติ โดยประจุของหยดของของเหลว จะขึ้นอยู่กับจำนวนของไอออนบวกและไอออนลบที่อยู่ในปริมาตรของ ของเหลว ในหลอด ในทางตรงกันข้ามประจุที่เกิดจากการให้ไฟฟ้าจากภายนอกเข้าไปในระหว่าง กระบวนการทำให้เกิดเป็นประจุอย่างชัดเจน และมีประสิทธิภาพดีกว่าการเกิดขึ้นเองโดย ธรรมชาติ ซึ่งกระบวนการที่กล่าวมานี้เรียกว่า การเหนี่ยวนำให้เกิดประจุซึ่ง ลอร์ด เคลวิน(Lord Kelvin's)ได้ยกตัวอย่างและอธิบายไว้จากการทำเครื่องหยดน้ำ ในปี ค.ศ.1876 โดย ลอร์ด เคลวิน ได้ อธิบายว่าประจุที่เกิดขึ้น จะเกิดจากการหยดของหยดน้ำจากปลายเข็ม 2 หัว ที่เค้ทำการให้ความต่าง ศักย์ไฟฟ้าเข้าไป 10 kV และในปี 1915 Zeleny ทำการวิจัยการเกิดละอองด้วยไฟฟ้า(Electrospray) ของสารละลายเอทานอล ด้วยการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 1-5 kV การเกิดละอองดังกล่าวมีปัจจัยที่สำคัญ คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า อัตราการไหลของของเหลว สมบัติของของเหลวและระยะห่างระหว่างปลายหลอดแก้วถึงแผ่นแพลท(Ground plate) กระบวนการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นวิธีการที่ทำให้ ของเหลวแตกตัวเป็นหยดเล็กๆ ด้วยแรงทางไฟฟ้า (electrical force) หรือ เรียกว่าแรงทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) หัวเข็มที่ทำให้แตกตัวเป็นไอออนนี้จะทำจากหลอดโลหะซึ่งมีปลายเข็มที่เล็กมาก ซึ่งเมื่อทำการให้กระแสไฟฟ้าแรงสูงเข้าไป จะเกิดการกดด้านข้าง(shear stress) บนพื้นผิวของของเหลว เนื่องจากเกิดสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นทำให้เกิดการยึดตัวของของเหลวที่ปลายเข็ม และเจ็ท ออกมา จากนั้นจะมีการแตกสลายตัวของของเหลวกลายเป็นหยดเล็กๆกระจัดกระจายออกมาโดยหยดเล็กๆ ที่ได้จากกระบวนการพ่นนี้จะมีขนาดเล็กมากๆ ซึ่งมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร ข้อดีของการวิธีการนี้ คือ ละอองหยดจะมีความเป็นประจุสูงมากซึ่งเป็นไปตามกฎ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเรเลย์ (Rayleigh limit) ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับประจุของหยดที่ตกลงมา ซึ่งประจุพวกนี้จะสามารถเอาชนะแรงตึงของพื้นผิวแล้วทำให้เกิดแตกตัวของอะตอมในที่สุด

การเคลื่อนที่ของหยดประจุสามารถควบคุมได้ง่ายโดยสนามไฟฟ้า การปลุกด้วยการพ่นหรืออนุภาคที่ตกลงมาจะมีประสิทธิภาพมากกว่าที่ไม่มีประจุ เครื่องมือระบบการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตจะสามารถทำได้ง่าย ใช้งานได้ง่าย และถูก แต่ก็มีข้อบกพร่องที่สำคัญ คือ วิธีการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตนี้จะ ถูกจำกัดในการใช้ทางด้านอุตสาหกรรม ซึ่งจะใช้ได้ชั่วขณะหนึ่ง ซึ่งวิธีการแก้ปัญหานี้ ได้มีการนำหัว แบบหลายหัว (multi-nozzle) หรือ หัวแบบสลิต (slit-nozzle) มาใช้ในระบบ เครื่องระบบการพ่นที่มี โรตารี หรือมี หัวฉีดแบบนิวเมติก ที่มีกราวด์และขั้วบวกของไฟฟ้าแรงสูง จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของ ขั้วทั้งสองทำให้เกิดการแตกตัวเป็นประจุจำนวนมาก อย่างไรก็ตามประจุที่เกิดตามกระบวนการนี้จะมี ขนาดเล็กกว่าของเรเลย์ (Rayleigh limit)

โดยมีข้อที่สำคัญอย่างมากในการแบ่งลักษณะระบบการพ่นก็คือ โหมดในการพ่นสเปรย์ ซึ่งมีอยู่หลายโหมดด้วยกันที่นำมากล่าวถึงตามรายงายวิจัยต่างๆ แต่จะสามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ

2.2.2.1 ในกลุ่มแรกจะเป็นลักษณะของการแตกตัวเป็นหยด หลุดออกอย่างกระจัดกระจายมาของ ของเหลวที่บริเวณปลายเข็ม ซึ่งส่วนที่หลุดออกมาจะมีลักษณะหยดที่ใหญ่ หยดขนาดเล็กและลักษณะของหยดที่กำลังยึดตัวอยู่ในขณะนั้นๆ

2.2.2.2 ส่วนในกลุ่มที่สองจะเป็นลักษณะของการแตกตัวเป็นฝอยๆ จากของเหลวที่ยึดออกมา ซึ่ง จะเกิดการแตกสลายตัวกลายเป็นหยดเล็กๆ เนื่องจากความไม่เสถียรของ และจากการสังเกตจะพบว่าการเป็นฝอยหยดเล็กๆ จะมีความราบเรียบและความสมบูรณ์มาก และบางครั้งจะเห็นรัศมีของการเป็นฝอยเกิดขึ้นบนบริเวณปลายเข็มเกิดขึ้นหยดของเหลวเกิดจากการปลดปล่อยในโหมด liquid jet และจากปรากฏการณ์ดังกล่าว จะสามารถอธิบายไปสู่การแตกตัวแบบการพ่น(Electrostatic spray) ได้ต่อไป โดยในปี 2003 Duft และคณะวิจัย มีการศึกษาถึงผลของขนาดหยดของเหลว (ethylene glycol droplet) โดยมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไข ทำให้ได้ขนาดหยดของของเหลวจาก 58 ไมโครเมตรลดลงถึง 24 ไมโครเมตร

สำหรับระบบการพ่นด้วยไฟฟ้ามีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ การนำไฟฟ้าของหลอด Capillary นำไฟฟ้า ที่เกิดจากการให้ศักย์ไฟฟ้าที่มีขนาดสูงและแผ่นกราวด์ โดยของเหลวจะถูกส่งผ่านมายังหลอด Capillary และเกิดการแตกตัวโดยสนามไฟฟ้าภายนอก Capillary Cloupeau and Prunet-Foch อธิบายถึงความแตกต่างในโหมดการพ่นของโหมดต่างๆ ได้โดยปัจจัยทาง geometry(ตัวอย่างเช่น ระยะทางระหว่างหลอด (Capillary) และ ระหว่าง plate หรือวรัศมีของหลอด(Capillary), อัตราการไหล, สมบัติ

ของของเหลว (แรงตึงผิว, การนำไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้า โดยโหมดในการพ่นแบบต่างๆ และสามารถแบ่งได้เป็น

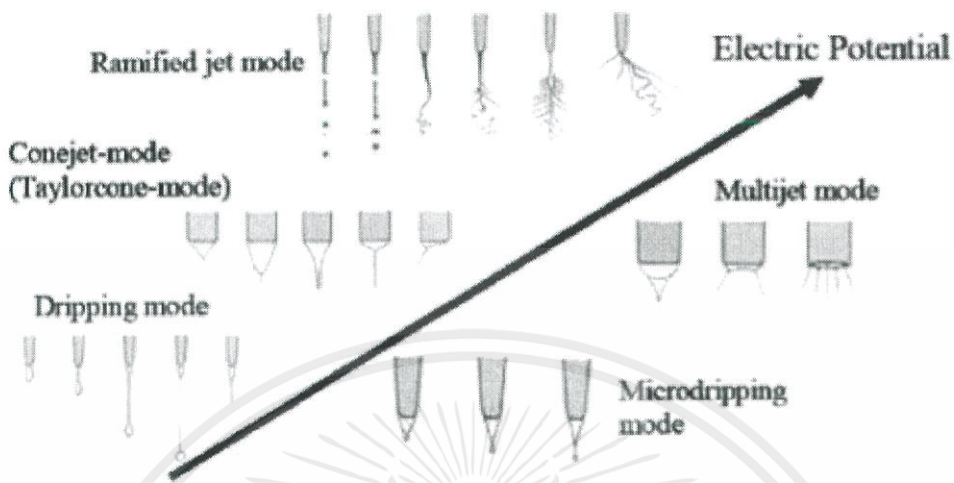
(1) Dripping mode มีลักษณะเป็นแบบหยดต่อหยด (drop by drop) ลักษณะดังกล่าวเกิดจากการเพิ่มศักย์ไฟฟ้า จากศูนย์ จนกระทั่งของเหลวไหลลงและเกิดเป็นหยดของเหลวที่มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าปลายหลอด capillary

(2) Micro dripping mode มีลักษณะเป็นหยดของเหลวที่มีขนาดเล็กกว่าใน Dripping mode โดยลักษณะที่ปลายหลอด และหยดของเหลวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าปลาย หลอด capillary

(3) Cone jet mode (Taylorcone-mode) มีลักษณะหยด คือมีรูปร่างเป็นโคน(cone) ที่ปลาย capillary มีลำของเหลว(jet) ต่อจาก cone และปลายของ jet จะเกิดเป็นละอองฝอย เนื่องจากไฟฟ้า (Electrospray) โดยลักษณะของละอองฝอยที่เกิดจาก cone jet mode นี้มีการกระจายตัวของละอองที่สม่ำเสมอ เป็นการแตกตัวที่สมบูรณ์

(4) Multijet mode มีลักษณะของละอองฝอยที่เกิดจากการเร่งด้วยสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูง และเกิดละอองฝอยที่ปลายของหลอดcapillary

(5) Ramified jet mode มีลักษณะของ jet ที่เกิดจาก jet ออกมา ส่วนของลำของเหลว มีลักษณะที่แตกต่างจาก cone jet ตรงที่ตำแหน่งในการเกิดละอองฝอย การพ่นแบบ Cone jet mode ในการเตรียมฟิล์มบางโดยการพ่น จะใช้ในโหมดของ Cone jet mode ในการทำให้ ของเหลวแตกตัวลงบนฐานรองรับในปี 1952 Vonnegut และ Neubauer ได้ทำการทดลองการพ่น ด้วยไฟฟ้า โดยไฟฟ้า กระแสตรงและกระแสสลับ และทำให้เกิดการพ่นในโหมดต่างๆ ในที่นี้มีทั้ง Dripping mode และCone jet mode Like Zeleny พบว่าเป็นการยากที่จะทำให้เกิดการพ่นแบบ Cone jet mode บนน้ำไม่บริสุทธิ์ เนื่องจากค่าการนำไฟฟ้าที่มีค่าสูง แต่มีประสบความสำเร็จใน การพ่นสารละลายจำพวกแอลกอฮอล์ น้ำมันหล่อลื่น และน้ำบริสุทธิ์ ซึ่งเป็นผลมาจากค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำและค่าของแรงตึงผิวตัวอย่างสมบัติที่สำคัญของของเหลวที่สามารถทำให้เกิด Cone jet mode



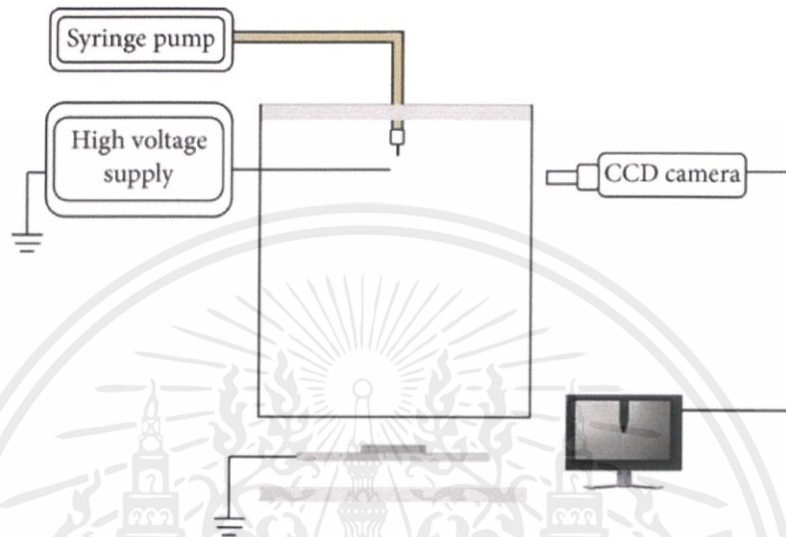
รูปที่ 2.5 รูปแบบ(โหมด)การพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตในแบบต่างๆ [4]

สำหรับการพัฒนาการพ่นแบบ Cone jet มีส่วนที่สำคัญได้แก่ การปรับปรุงรูปร่างของ cone, การทำให้ของเหลวแตกตัวจากปลาย cone และ การส่งผ่านละอองของเหลวลงบนแผ่นเพลท ทฤษฎี conejet อธิบายได้โดย Taylor (1964) โดยอธิบายรูปร่างของ cone มีมุมอยู่ที่  $49.3^\circ$  หรือที่ เรียกว่า Taylor-cone ในปี Smith (1986) สังเกตได้ว่า cone เกิดได้จากศักย์ไฟฟ้า, รัศมีของ หลอด capillary การนำและความหนืดของของเหลว นอกจากนี้ได้มีการวิจัยและพัฒนาทฤษฎีของสนามไฟฟ้าที่ผลกับแรงดึงดูด ความดันภายในของเหลวที่มีรูปร่างแบบ cone ในปี 1999 แสดงให้เห็นถึงโมเดลในการคำนวณรูปร่างของ cone และ jet ได้สำเร็จ โดยสามารถอธิบายได้ถึงสนามไฟฟ้า ภายในและภายนอก cone รวมถึงความหนาแน่นประจุที่พื้นผิวของ cone ในท้ายที่สุดสามารถประมาณ ค่าความเร็วของเหลวที่พื้นผิวของ cone ได้ จากที่กล่าวข้างต้นกระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ระบบหลักๆ ของการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางจะมีอยู่ 2 ระบบหลักๆ คือ

(1.) ระบบแบบหัวเข็มธรรมดาซึ่งจะทำการพ่นละอองออกมายังฐานรองรับโดยตรงความต่างศักย์แรงสูงจะถูกป้อนเข้าไปให้ที่ระหว่างหัวเข็มกับฐานรองรับซึ่งฐานรองรับจะวางอยู่บนขั้วไฟฟ้าซึ่งทำหน้าที่เป็นกราวด์ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2.) ระบบแบบหัวเข็มที่สามารถกรองได้ ซึ่งในระบบจะสามารถแยกทำได้อย่างอิสระต่อกัน จากฐานรองรับ ที่บริเวณหัวเข็มจะทำการให้ความต่างศักย์ขณะที่ตัวกรองและฐานรองรับจะเป็น กราวด์ในระบบ



รูปที่ 2.6 รูปแบบการทำงานของเครื่องพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต [4]

ข้อเสียของระบบแรก คือ ระบบจะมีหัวเพียงตำแหน่งเดียวที่บริเวณฐานรองรับ โดยจะไม่สามารถให้กระแสผ่านไปยังฐานรองรับได้โดยตรง เพราะจะทำให้มีการเสียหายเกิดขึ้นที่ฐานรองรับ ในขณะที่ระบบที่สองจะมีตัวกรองเป็นหัวด้วย นอกเหนือจากที่บริเวณฐานรองรับแล้วอย่างไรก็ตาม ข้อเสียของระบบที่สองนี้ก็คือ มีการแยกจำนวนของละอองหยดเล็กๆ ด้วยหัวตัวกรองและยังต้องมีการ ใช้อย่าง เฉพาะและระมัดระวังเพื่อที่จะทำการขัดขวางละอองบางส่วนที่จะตกลงไปยังฐานรองรับ โดย ระบบนี้ได้มีการใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งในระบบนี้ก็สามารถที่จะทำให้เกิดหยดละอองเล็กๆ เร่งตกลงมา ด้วยสนามไฟฟ้า และลงมายังแผ่นฐานรองรับในที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3 แรงที่มีผลต่อการกระทำกับสารที่พ่นออกมา

2.2.3.1 แรงโน้มถ่วง (Gravimetric force)

2.2.3.2 แรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) ที่พาสารจากหัวเข็มไปยังฐานรองรับ

2.2.3.3. แรงผลักแบบคูลอมบ์ (Coulombic force) แรงคูลอมบ์ซึ่งพยายามที่จะผลักประจุ

ใกล้เคียงภายในสารละลายที่ถูกพ่นออกมา ซึ่งจะทำให้เกิดการกระจายของสารที่ฉีดออกมาระหว่างที่พุ่งไปสู่ฐานรองรับ

2.2.3.4. แรงวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic forces) ซึ่งจะพยายามปกป้องกระแสของพอลิเมอร์ไม่ให้ ถูกขยายออก

2.2.3.5. แรงตึงผิว (Surface tensions) ซึ่งจะกระทำกับแรงขยายออกของผิวสารละลายพอลิเมอร์

2.2.3.6. แรงแบบลาก (Drag forces) จากการเสียดสีระหว่างประจุของสารละลายพอลิเมอร์กับอากาศ

### 2.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการเตรียมฟิล์มโดยกระบวนการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

2.2.4.1. น้ำหนักโมเลกุล การกระจายของน้ำหนักโมเลกุล และโครงสร้างของสาร

2.2.4.2. สมบัติของสารละลาย (ความหนืด, การนำไฟฟ้าและแรงตึงผิว)

2.2.4.3. ศักย์ไฟฟ้า อัตราการไหล และความเข้มข้น

2.2.4.4. ระยะห่างระหว่างปลายหัวเข็มกับแผ่นฐานรองรับ

2.2.4.5. อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วของอากาศ

2.2.4.6. การเคลื่อนที่ของแผ่นฐานรองรับ

## 2.3 หลักการเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์ม

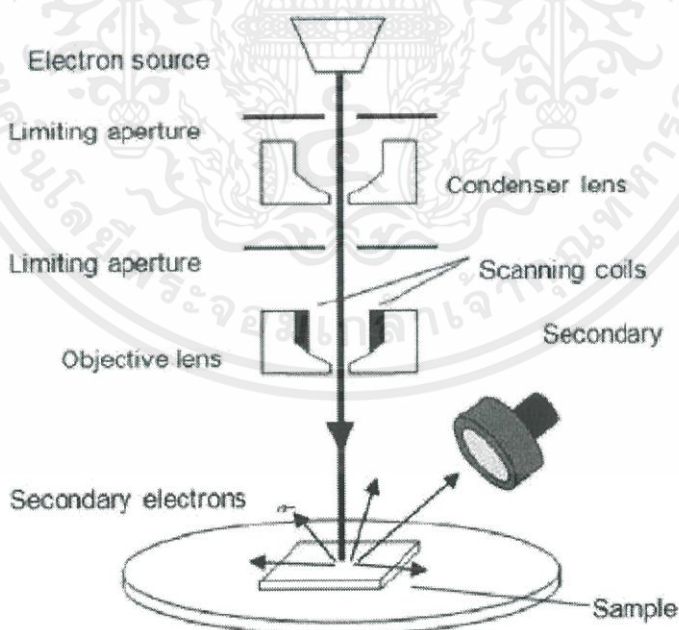
### 2.3.1 การศึกษาสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด ซึ่ง สามารถอธิบายการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดได้ดังนี้แหล่งกำเนิดของ อิเล็กตรอน (Electron gun) ซึ่งเป็นขั้วแคโทดมีอยู่ 3 ชนิดคือทังสเตน, Lanthanum Hexaboride(LaB6), และ Field emission ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจาก Filament และเร่งกลุ่ม อิเล็กตรอนด้วยสนามไฟฟ้าในช่วง 1 - 40 kV และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลุ่มอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะถูกบีบให้เป็นลำอิเล็กตรอน โดย Condenser lens และปรับโฟกัสโดย Objective lens และถ้าต้องการให้ลำอิเล็กตรอนกวาดไปทั่วผิวของตัวอย่างก็สามารถควบคุมได้โดยใช้ Scanning coils ซึ่งจะกวาดบน ระนาบ x-y ทำให้เกิดสัญญาณขึ้นมาแล้วหัววัด (Detector) จะวัดสัญญาณที่เกิดขึ้นและถูกแปลง เป็นข้อมูลที่ต้องการโดยชุดระบบทางอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อลำอิเล็กตรอนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิด อิเล็กตรอนโฟกัสลงบนผิวของตัวอย่างจะทำให้เกิดอันตรกิริยากันระหว่างอิเล็กตรอนที่ถูกยิงลงมา และอะตอมของตัวอย่างอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนที่ถูกยิงลงมากับอะตอมของตัวอย่างสามารถ แบ่งได้ 2 แบบตามลักษณะการชนคือแบบยืดหยุ่น (Elastic) และแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic) ซึ่งทั้ง สองลักษณะจะให้สัญญาณที่จะนำมาใช้งานแตกต่างกัน

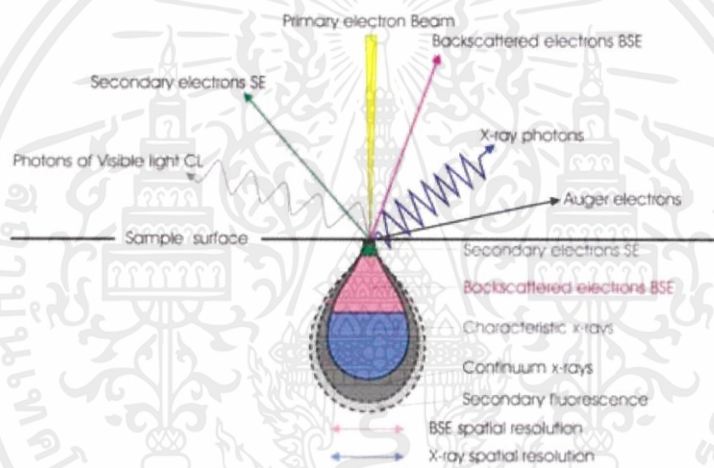
2.3.1.1 การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering) เมื่อกลุ่มอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งเป็นอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron) ตกกระทบลงบนตัวอย่างทาง ให้อิเล็กตรอนปฐมภูมิกระเจิงออกมาและมีการสูญเสียพลังงานบางส่วนซึ่งน้อย มากให้กับอะตอมของตัวอย่างอิเล็กตรอนที่กระเจิงออกมาเราเรียกว่า Backscatter electron ซึ่ง สามารถนำสัญญาณดังกล่าวมาสร้างเป็นสัญญาณภาพบนจอ CRT ได้



รูปที่ 2.11 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.2. การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering) กลุ่มของอิเล็กตรอนปฐมภูมิเมื่อชนกับอะตอมของตัวอย่างแล้วจะเกิดการถ่ายเทพลังงานจลน์และเกิดอันตรกิริยากับอะตอมของตัวอย่างทำให้เกิดสัญญาณต่างๆซึ่งเป็นสัญญาณที่Detector สามารถวัดได้ ได้แก่อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electrons), Auger electrons , Characteristics X-ray, Continuous X-ray และ Fluorescence X-ray เป็นต้น อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) เกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นโคจร (Shell) ต่างๆ ของอะตอมตัวอย่างถ้าพลังงานที่ให้มากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในชั้นโคจรกับนิวเคลียส ของอะตอมตัวอย่างจะทำให้อิเล็กตรอนในชั้นโคจรหลุดออกมา เราเรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาว่า อิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งสามารถนำไปใช้ศึกษาลักษณะผิวหน้าของตัวอย่างได้



รูปที่ 2.12 ผลจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมตัวอย่าง [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการนำฟิล์มบางไปประยุกต์เพื่อนำไปใช้เป็นเซนเซอร์

### 2.4.1 ความชื้น (Humidity Sensor)

ความชื้น (humidity) หมายถึง ปริมาณน้ำที่ปรากฏอยู่ในสถานะของแก๊สในอากาศหรือในแก๊สชนิดอื่น รูปแบบการวัดความชื้นที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) ความชื้นสัมบูรณ์ (absolute humidity) และอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (dew point temperature) โดยความชื้นสัมพัทธ์ เป็นหน่วยการวัดที่นิยมใช้กันมากที่สุด ความหมายของความชื้นสัมพัทธ์คือ อัตราส่วนของความดันไอน้ำขณะนั้น ต่อความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิเฉพาะโดยทั่วไปแสดง ในรูปของเปอร์เซ็นต์ดังสมการที่ 2.2

$$RH(\%) = P_w/P_s \times 100 \quad (2.2)$$

โดยที่ RH(%) คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (%)

$P_w$  คือ ความดันไอน้ำบางส่วน (mbar)

$P_s$  คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว (mbar)

ความชื้นสัมบูรณ์ (absolute humidity) คือ อัตราส่วนมวลของไอน้ำต่อปริมาตรของอากาศ หรือแก๊ส อาจเปรียบได้ว่าเป็นความหนาแน่น หรือความเข้มข้นของไอน้ำในอากาศ

### 2.4.2 เซนเซอร์ความชื้น (Humidity Sensor)

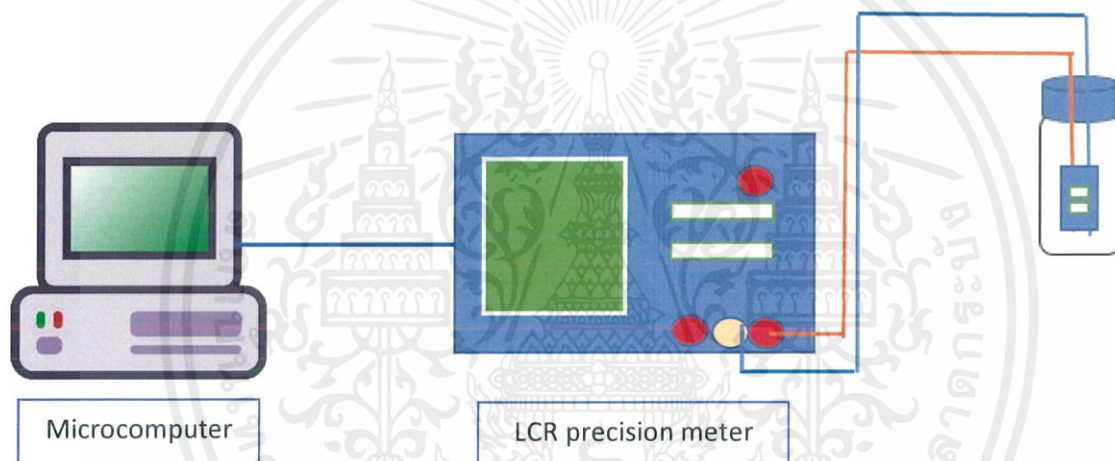
เซนเซอร์ความชื้น คือ อุปกรณ์ตัวตรวจวัดปริมาณไอน้ำในบรรยากาศและสามารถบอก ปริมาณความชื้นในบรรยากาศขณะนั้นได้อยู่ในรูปของความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) โดย เซนเซอร์วัดความชื้นที่ตีสามารถใช้ในทางด้านต่างๆ ได้อย่างกว้าง จะต้องมีความไวสูงในช่วงพิสัยอุณหภูมิและความชื้นกว้าง ให้ค่าความชื้นที่แน่นอน มีฮิสเทอรีซิสน้อย ทนทาน มีการชดเชยผลของ อุณหภูมิ ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นเร็ว ทนทานต่อสิ่งปนเปื้อน มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน เชื่อมต่อกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้ง่าย โครงสร้างไม่ซับซ้อน และมีราคาถูก

เซนเซอร์วัดความชื้นหลากหลายชนิดได้รับการพัฒนา เพื่อให้เหมาะกับประเภทของการใช้ งาน ซึ่งมีหลักการทำงานแตกต่างกันออกไป เช่น ใช้วัสดุไวความชื้น ใช้ไซโครมิเตอร์ (Psychomotor) แบบกระเปาะเปียก-แห้ง ใช้การวัดจุดน้ำค้าง ใช้การวัดอินฟราเรด (Brion, 1986) การ พิจารณาเลือกใช้งานอาจ

เลือกจาก ขนาด น้ำหนัก ราคา ประสิทธิภาพ หรือการบำรุงรักษา ซึ่ง หลักการตรวจวัดความชื้นแต่ละวิธีก็มีข้อดีข้อเสียต่างกัน

### 2.4.3 ระบบการตรวจวัดความชื้น

ในการทดลอง และจากงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาพบว่าระบบการวัดความชื้นที่ใช้ทั่วไป มีอยู่ 2 ระบบหลักคือ ระบบที่ใช้ Mass flow โดยจะทำการปล่อยความชื้นเข้าไปที่ระบบวัดซึ่งพบว่าระบบวิธีการนี้จะค่อนข้างยุ่งยากและซับซ้อน ส่วนอีกระบบหนึ่งเป็นลักษณะ ระบบที่นิยมใช้เป็นอย่างมากคือ ระบบแบบวัดกับความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ที่ได้จากการผสมสารละลายเกลืออนิอัมตัวเป็นวิธีที่ง่าย ราคาถูก และเป็นที่ยอมรับอยู่ในปัจจุบัน



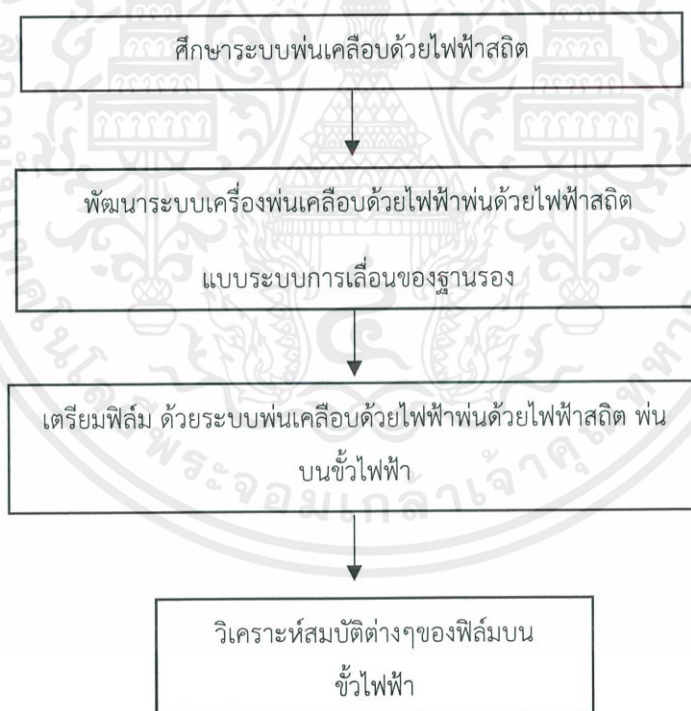
รูปที่ 2.13 ระบบการวัดเซนเซอร์ความชื้นแบบวัดกับขวดความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ที่ได้จากการผสมสารละลายเกลืออนิอัมตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

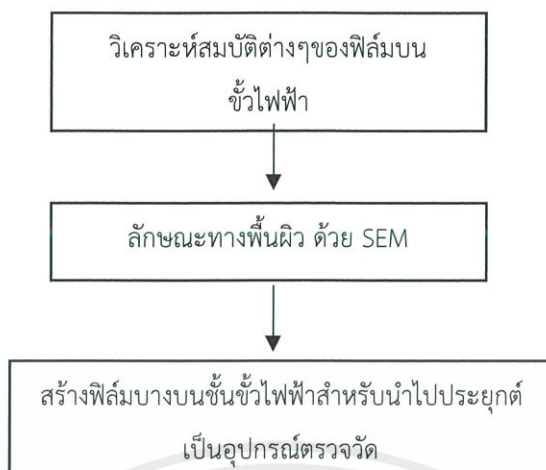
### ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

หลังจากได้ศึกษาหลักการของวิธีการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต (Electro static spray deposition: ESD ) นำมาเตรียมเป็นฟิล์มบางเพื่อทำอุปกรณ์ตรวจจับ โดยบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการสร้างและออกแบบระบบวิธีการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าแบบเลื่อนฐานรอง รวมทั้งการเตรียมด้วยระบบดังกล่าวด้วยสารอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ จากนั้นฟิล์มที่ได้ไปตรวจสอบสมบัติด้วยเทคนิคต่างๆ สมบัติที่ต้องการตรวจสอบได้แก่ ลักษณะทางพื้นผิว และองค์ประกอบของสาร เมื่อตรวจสอบสมบัติจนได้เงื่อนไขที่เหมาะสมจึงจะนำฟิล์มไปประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับต่อไป ต่อไปจะเป็นการอธิบายขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยได้ตามรูป 3.1 และ 3.2



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงานขั้นที่ 1

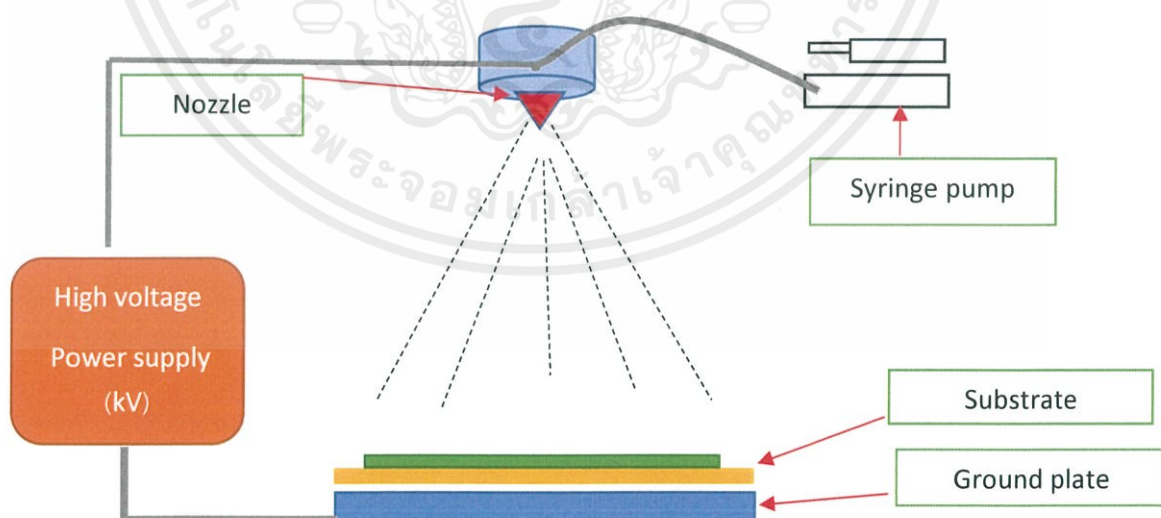
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แผนผังการดำเนินการขั้นที่ 2

### 3.1 ระบบการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต

โดยในงานวิจัยนี้จะทำการเตรียมเครื่องพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตเพื่อนำไปใช้เตรียมฟิล์มบางพอลิเมอร์นำไฟฟ้า เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการทำเป็นเป็นอุปกรณ์ตรวจวัด โดยการศึกษาทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับเครื่องพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตพบว่า ส่วนประกอบสำคัญจะมี เครื่องกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูง หัวเข็มกราวด์เพลทหรือหลอดบรรจุสาร และสุดท้าย ห้องที่ใช้สำหรับพ่น (Chamber)



รูปที่ 3.3 ระบบการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.1 องค์ประกอบของระบบเครื่องพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

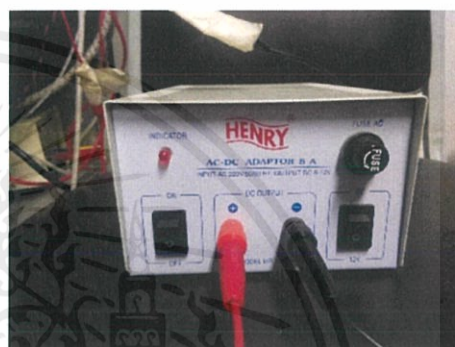
โดยองค์ประกอบของระบบประกอบไปด้วย

#### 3.1.1.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูง (High Voltage power supply, HV (kV))

ในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูงคงที่ (x2 กิโลโวลต์) โดยสามารถปรับค่าได้ 1-20 กิโลโวลต์



(ก)



(ข)

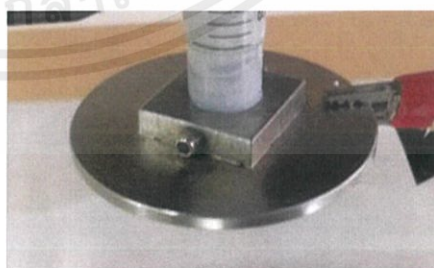
รูปที่ 3.4 (ก) แหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูง และ (ข) แหล่งจ่ายไฟฟ้า

#### 3.1.1.2 หลอดบรรจุสารและหัวเข็ม (Syringe and Nozzle)

หลอดบรรจุสารที่ใช้ในการทดลองขนาด 3 มิลลิลิตร และหัวเข็มใช้ในการพ่นละอองฝอยเคลือบขนาด 0.3x13 มิลลิเมตร



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.5 ตัวอย่างหลอดบรรจุสาร(ก) และ(ข) หัวเข็มที่ใช้พ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.1.3 ระบบควบคุมอัตราการไหล (Syringe Pump)

ในการวิจัยใช้ Syringe Pump model NE-1050 11 โวลต์ 0.75 A เพื่อบรรจุสารเข้าหลอดบรรจุ



รูปที่ 3.7 ตัวอย่าง Syringe Pump

### 3.1.1.4 แท่นวางแบบปรับระดับได้

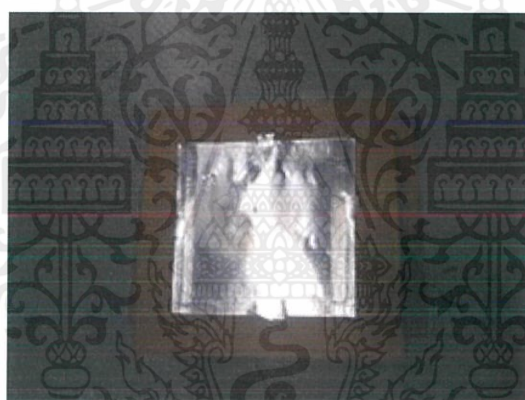
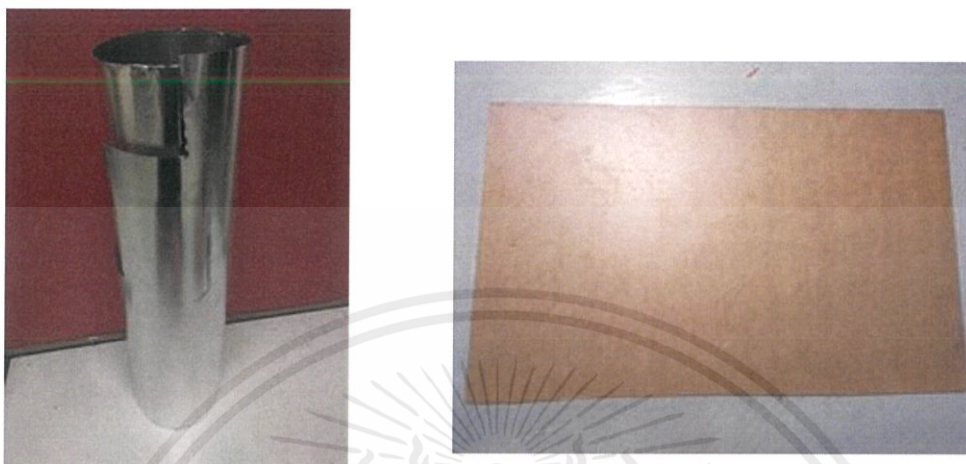
เป็นแท่นวางไว้ใช้วาง Substrate เวลาพ่นเคลือบสาร



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างแท่นวางปรับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.5 อะคริลิกตัดขนาด 30X40 cm. ติดกับอลูมิเนียมขนาด 15X15 cm.

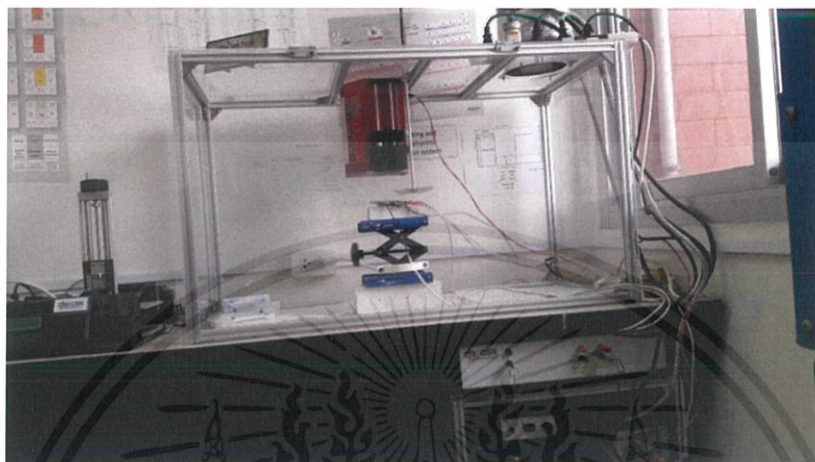


รูปที่ 3.9 อลูมิเนียมและอะคริลิกที่ประกอบเสร็จแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.1.6 ห้องสำหรับการพ่นสาร (Chamber)

ในงานวิจัยนี้ ใช้ห้องสำหรับพ่นเคลือบทำจากอะคริลิก ต่อกับ อลูมิเนียม



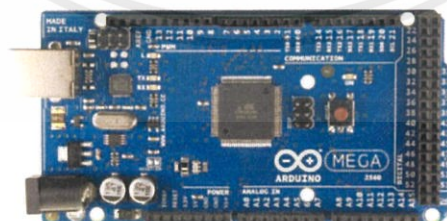
รูปที่ 3.10 ตัวอย่าง Chamber ใช้สำหรับพ่น

## 3.2 การพัฒนาระบบพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต

โดยระบบเครื่องพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต จะเริ่มตั้งแต่การศึกษาระบบและหลักการใช้งาน ซึ่งจะมีกล่าวในบทที่ 2 จากนั้นจึงเริ่มทำการพัฒนาระบบที่มีอยู่เดิม โดยการพัฒนาการเคลื่อนของฐานรองเพื่อให้มีการพ่นเคลือบในขนาดและพื้นที่ ที่ใหญ่ขึ้น เพื่อเทียบกับระบบเดิมที่ไม่มีการเพิ่มฐาน

### 3.2.1 ระบบควบคุมการทำงานของ (Arduino board)

ในโครงการนี้ใช้บอร์ด ARDUINO รุ่น MEGA (สีฟ้า) ในการควบคุม Stepping driver และทำให้ Stepping-motor ทำงาน



รูปที่ 3.11 ตัวอย่าง ARDUINO board ที่ใช้ควบคุม

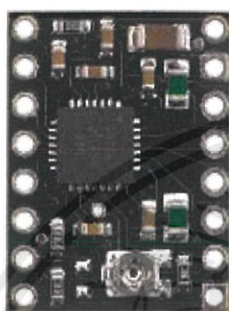
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 มอเตอร์แบบสเต็ป (Stepping motor) และ ชุดขับมอเตอร์ (Stepping driver)

ในการวิจัยนี้ใช้ตัว Stepping motor รุ่น A4988 และใช้ Stepping motor รุ่นโมเดล PK543-A

DC 0.75A 1.7Ω

A4988



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.12 ตัวอย่าง Stepping driver (ก) และ Stepping motor (ข)

### 3.3.3 โปรแกรมควบคุม (Arduino code)

ในงานวิจัยนี้เราได้ใช้โปรแกรม arduino 1.85 ในการรัน code เพื่อให้มอเตอร์ทำงาน ในการ  
เลื่อนฐานรอง



รูปที่ 3.13 ตัวอย่างโปรแกรม arduino สำหรับเขียนโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การเตรียมฟิล์มอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยไฟฟ้าสถิต

ในการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ สร้างเงื่อนไขการทดลอง 2 เงื่อนไข คือเงื่อนไขแรกการหาค่าศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมเพื่อให้สารพ่นออกมาเป็นละอองฝอย และเงื่อนไขที่ 2 คือ การดูการกระจายตัวของสารโดยการปรับความห่างระหว่างหัวเข็มกับฐานรองรับ และจะทำการเลื่อนแกน ซ้ายขวา เพื่อดูทิศทางการพ่นเพื่อดูการกระจายตัวของสาร

#### 3.3.1 เงื่อนไขการหาระยะห่างระหว่างหัวเข็มกับฐานที่เหมาะสมเพื่อทำสารพ่นออกมาเป็นละอองฝอยที่ดีที่สุด

นำซิงค์ออกไซด์ 4 g. มาละลายใน ethylene glycol 200 ml. จากนั้นนำมาใส่ในหลอดบรรจุสาร ทำการต่อแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ขั้วบวกต่อเข้ากับปลายเข็มและขั้วลบจะต่อเข้ากับฐานรองอลูมิเนียมหรือแผ่นกระจกใส จากนั้นทำการพ่นเคลือบลงบนฐานรองรับที่ระยะห่างต่างๆกันดังนี้ 40,50,60,70 และ 80 มิลลิเมตร ในเวลา 5 นาที ที่ rate=0.2 ml./hr. โดยจะทำการปรับฐานเลื่อนจนกว่าสารที่พ่นออกไปจะเกิดการแตกตัวออกมาเป็นละอองฝอยที่ในระยะต่างๆได้ตามต้องการ หรือเป็นวงที่ดีที่สุด

#### 3.3.2 เงื่อนไขการกระจายตัวของสารเมื่อเลื่อนแกน XกับY

นำซิงค์ออกไซด์ 4 g. มาละลายใน ethylene glycol 200 ml. จากนั้นนำมาใส่ในหลอดบรรจุสาร ทำการต่อแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ขั้วบวกต่อเข้ากับปลายเข็มและขั้วลบจะต่อเข้ากับฐานรองอลูมิเนียมหรือแผ่นกระจกใส จากนั้นทำการพ่นเคลือบลงบนฐานรองรับที่ระยะห่างที่ดีที่สุดจากเงื่อนไขแรก เริ่มทำการเลื่อนฐานไปกลับในแนวแกน X และ Y 1 รอบ และ 2 รอบตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 แสดงพารามิเตอร์และเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบาง(เพื่อหาความสมมาตรของวงสเปร์ย์ ในลักษณะหยุดนิ่ง)

พารามิเตอร์ในการเตรียมฟิล์ม	เงื่อนไขในการเตรียม
ศักย์ไฟฟ้า	10กิโลโวลต์
ระยะห่างระหว่างเข็มกับฐาน	40,50,60,70,80 มิลลิเมตร ในเวลา 10 นาที
ระยะแนวแกน X และ Y (ไป-กลับ)	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงพารามิเตอร์และเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบาง(เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัวของ การพ่นเคลือบขนาดใหญ่)

พารามิเตอร์ในการเตรียมฟิล์ม	เงื่อนไขในการเตรียม
ศักย์ไฟฟ้า	10กิโลโวลต์
ระยะห่างระหว่างเข็มกับฐาน	40 มิลลิเมตร
ระยะแนวแกน X และ Y (ไป-กลับ)	1รอบ และ 2 รอบ(2และ4 ชั้น)

ตารางที่ 2.3 แสดงพารามิเตอร์และเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบาง(เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัวของ การพ่นเคลือบขนาดใหญ่ในกรณีพ่นเคลือบอย่างต่อเนื่อง)

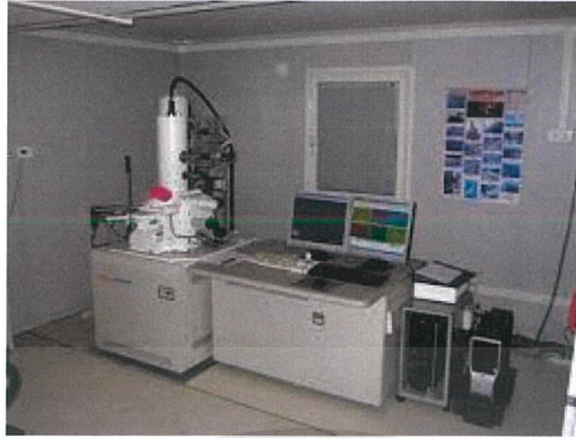
พารามิเตอร์ในการเตรียมฟิล์ม	เงื่อนไขในการเตรียม
ศักย์ไฟฟ้า	10กิโลโวลต์
ระยะห่างระหว่างเข็มกับฐาน	40 มิลลิเมตร
ระยะแนวแกน X และ Y (ไป-กลับ)	2รอบ, 4รอบ, 6รอบ และ 8รอบ

### 3.4 การตรวจสอบสมบัติของฟิล์ม

#### 3.4.1 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด ใช้ในการส่องดูลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างโดยให้การ บังคับลำ อิเล็กตรอนให้กวาดไปบนพื้นผิวแล้วแสดงผลบนจอคอมพิวเตอร์ มีลักษณะภาพเป็นภาพ ขาวดำ มีกำลังขยาย 10 - 300,000 เท่า ขึ้นกับชนิดของตัวอย่าง โดยกล้องที่ใช้คือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบเลือนกราดรุ่น JEOL JEM 6340 โดยมีหลักการคือ อันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับตัวอย่างนั้น ทำให้ เกิดเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ จากนั้นเครื่องจะรับสัญญาณแล้วแปลงนำไปสร้างเป็นภาพแสดงออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 ตัวอย่างเครื่อง JEOL JEM 6340 [13]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

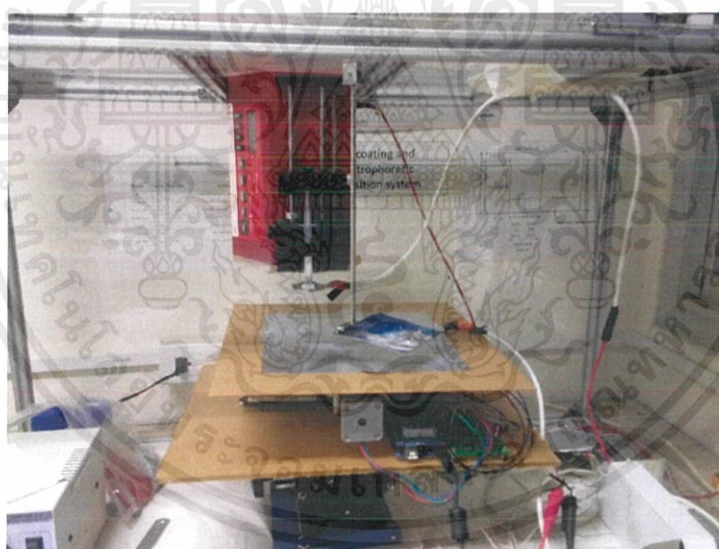
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปราย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการดำเนินงานวิเคราะห์และการแก้ปัญหาจากการทำงานของเครื่องพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตแบบเลื่อนฐานได้เพื่อดูการทำงานของเครื่อง และผลการดำเนินการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการดังกล่าวด้วยการวิเคราะห์สมบัติฟิล์มซึ่งค่ออกไซด์ตามเงื่อนไขในบทที่ 3 จากนั้นจะกล่าวถึงการนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัด

#### 4.1 ทดลองใช้เครื่องพ่นไฟฟ้าสถิตแบบเลื่อนฐานในแนวแกน X และ Y

##### 4.1.1 วางฐานเลื่อนได้ลงบนแท่นเลื่อนปรับระดับ



รูปที่ 4.1 ฐานที่วางบนแท่นเลื่อนปรับระดับแล้ว

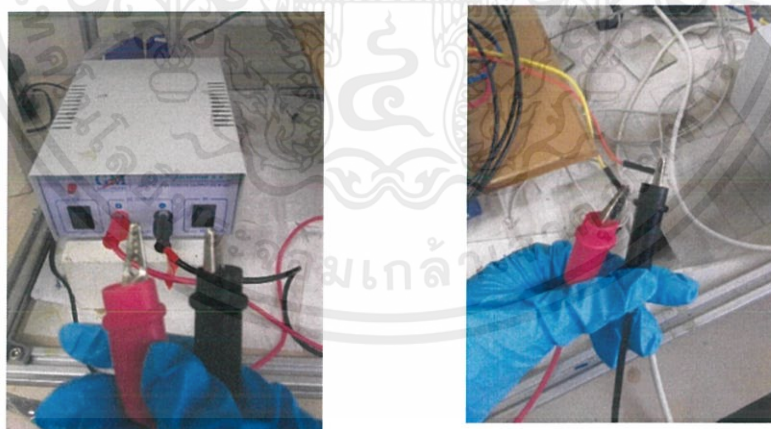
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 เปิดพัดลมและ pump เพื่อไว้ดูดอากาศ



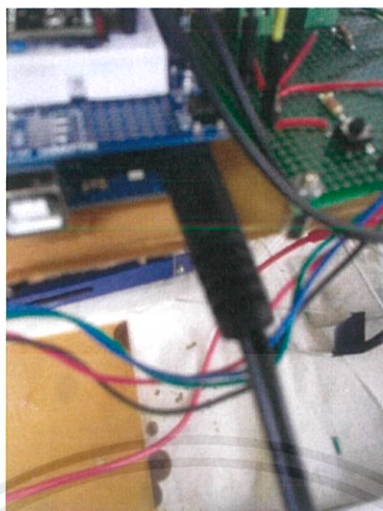
รูปที่ 4.2 Pump ดูดอากาศ และพัดลม

4.1.3 ติดตั้งสายไฟจากเครื่องจ่ายไฟ 12 V กับบอร์ด(ขั้วบวกหนีบสีเหลือง ขั้วลบหนีบสีส้ม) เพื่อต่อ Adapter เพื่อจ่ายไฟ 12V. เข้าบอร์ด Arduino ทำให้ฐานเลื่อน



รูปที่ 4.3 เครื่องจ่ายไฟ 12 V ต่อสายนำหัวไปหนีบที่สายสีส้มกับสายสีเหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 Adapter จ่ายไฟ 12V. เข้าบอร์ด Arduino

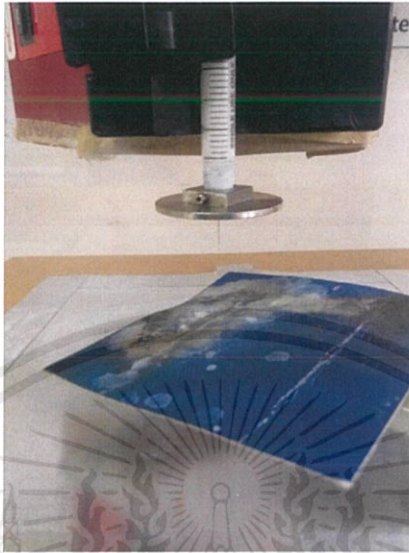
4.1.4 เตรียมหลอดบรรจุสารและหัวเข็มแบบสแตนเลส ใส่ไว้ในเครื่อง Syringe Pump บรรจุสารให้พร้อม



รูปที่ 4.5 หลอดบรรจุสารที่ติดตั้งบนเครื่อง Syringe Pump

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.5 เลื่อนชัตเตอร์ลงมาปิดทุกครั้งที่ทำกรฟ่นเคลือบเพื่อกันไม่ให้สารหยดลงบนฐาน



รูปที่ 4.6 ชัตเตอร์สีฟ้าที่นำมาปิดกันสาร

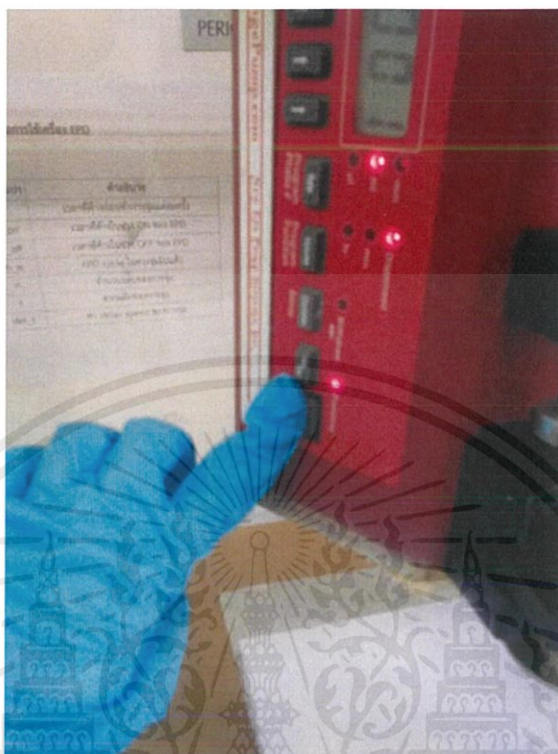
#### 4.1.6 นำสายไฟ High Voltage ต่อเข้ากับฐานและเข็ม (สายสีแดงหนีบกับหัวเข็ม สายสีดำหนีบกับฐาน)



รูปที่ 4.7 (a) ขั้วบวกหนีบหัวเข็มสแตนเลส และ (b) ขั้วลบหนีบฐานอะลูมิเนียม

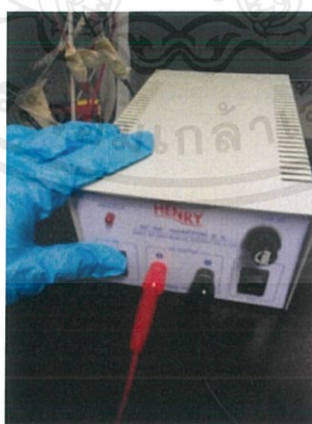
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.7 นำ substrate ที่ต้องการมาวาง เปิด Syringe Pump นำชุดเตอร์มาขึ้นทุกครั้ง



รูปที่ 4.8 กดปุ่มเพื่อเปิด Syringe Pump ที่ rate = 0.2 mL/hr.

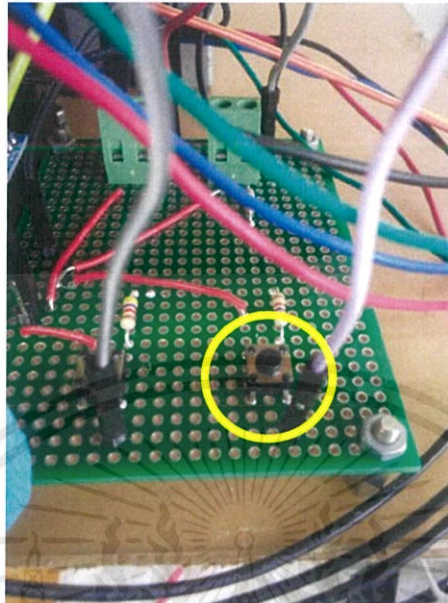
#### 4.1.8 เปิด High Voltage



รูปที่ 4.9 กดปุ่มเปิด High Voltage

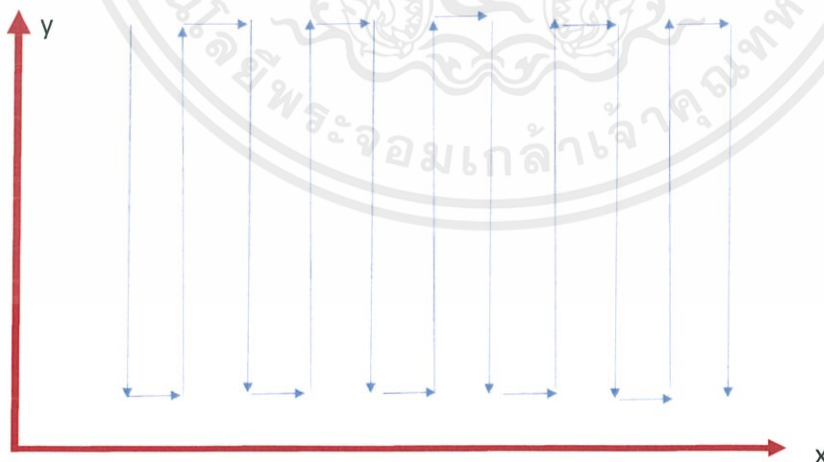
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.9 กดปุ่มซ้ายสุดที่บอร์ดเขียวเพื่อทำการเลื่อนระบบฐานรอง รอเป็นเวลา 40 นาที (1 รอบ)



รูปที่ 4.10 กดปุ่มเปิด High Voltage ตามวงกลมสีเหลือง

จากผลการทดลองนี้ทำให้เราพบว่า ฐานที่เลื่อนไปกลับได้นั้น มีลักษณะไปในทางแกน X เป็นระยะ 5 cm. และไปในทางแกน Y เป็นระยะ 10 cm. ตามความยาวของเกลียวที่ฐานโดยจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของฐานเลื่อน(0.5 รอบไป/1 รอบ(ไป-กลับ))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2 ผลการทดลองการหาระยะห่างระหว่างหัวเข็มกับฐานที่เหมาะสมเพื่อทำสารพ่นออกมาเป็นละอองฝอย(โดยไม่เลื่อนฐาน)

ในการทดลองปรับระยะเข็มกับฐาน เป็นระยะตั้งแต่ 40,50,60,70 และ 80 มิลลิเมตร ที่แรงดันไฟฟ้า 10kV ในระยะเวลา 5 นาที เพื่อหาระยะการพ่นเคลือบที่ดีที่สุด ซึ่งในผลการทดลองจะนำระยะที่ปรับค่าแต่ละระยะมาแสดงดังรูป 4.11



รูปที่ 4.11 ภาพ A-E แสดงที่ระยะ 40,50,60,70 และ 80 มิลลิเมตรตามลำดับ

จากการกระจายตัวดังกล่าวจะทำการเก็บข้อมูลการกระจายตัวที่ทดลองพ่นเคลือบตั้งแต่ระยะ 40,50,60,70 และ 80 มิลลิเมตร ที่แรงดันไฟฟ้า 10kV ในระยะเวลา 5 นาที ข้อมูลดังกล่าวจะแสดงในตารางที่ 4.1

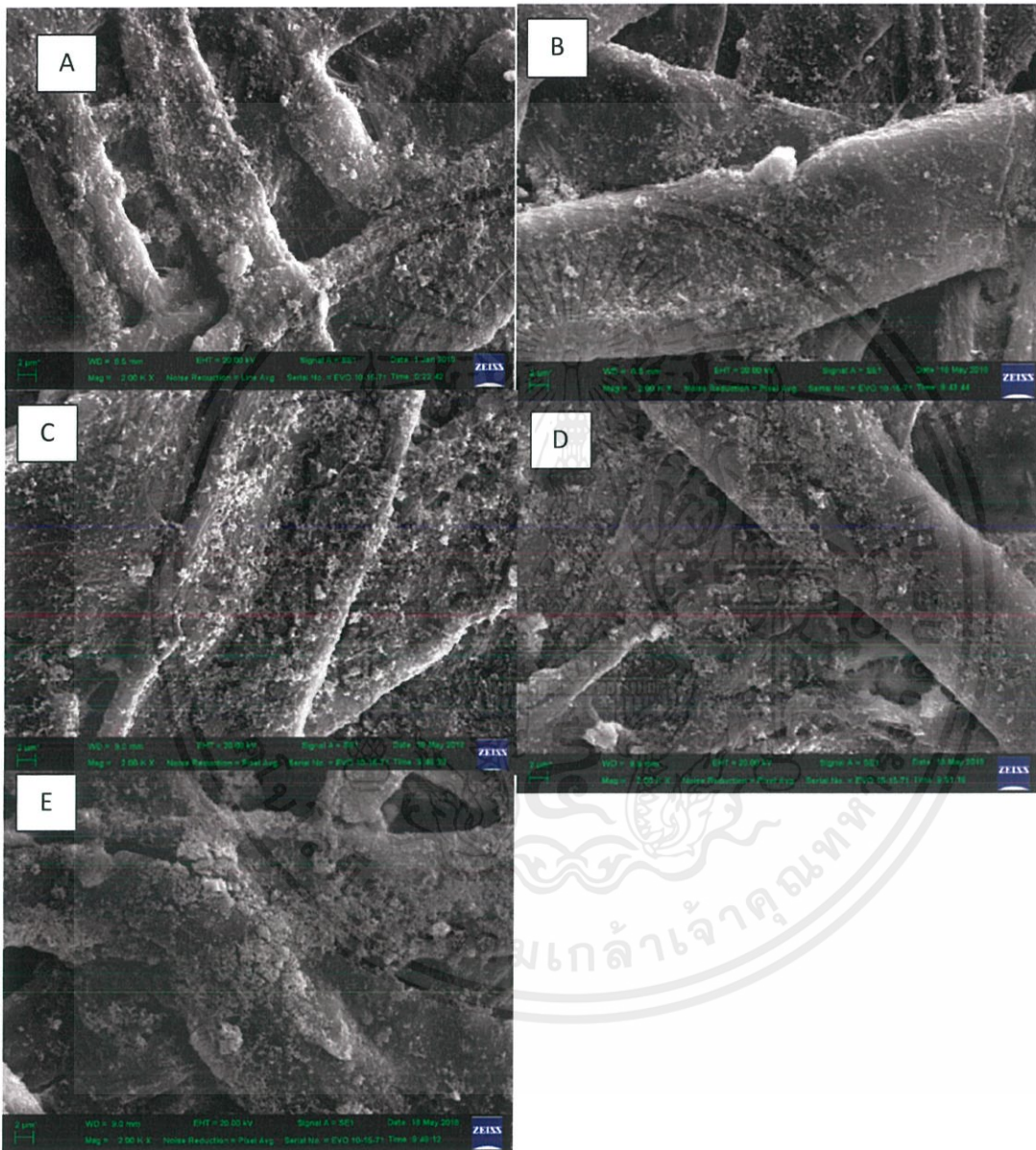
ตารางที่ 4.1 ตารางอัตราส่วนแนวตั้งฉากกับแนวราบของเส้นผ่านศูนย์กลางสเปรย์ที่ระยะ 40-80 มิลลิเมตร โดยใช้ศักย์ไฟฟ้าที่ 10 kV

ระยะ(mm.)	Diameter(cm.)	ศักย์ไฟฟ้า (kV.)	สนามไฟฟ้า(kV/cm)
40	2.5	10	0.25
50	3	10	0.2
60	5	10	0.166
70	6.5	10	0.142
80	7	10	0.125

และจากการทดลองการปรับระยะฐาน ในระยะที่ต่างๆกัน โดยนำกระดาษที่ได้ไปวัดผลการวัดกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) ในการทดลองเมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เตรียม โดยการปรับระยะทางระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับเป็น 40, 50, 60, 70 และ 80 มิลลิเมตร ตามลำดับ เพื่อศึกษาสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.12



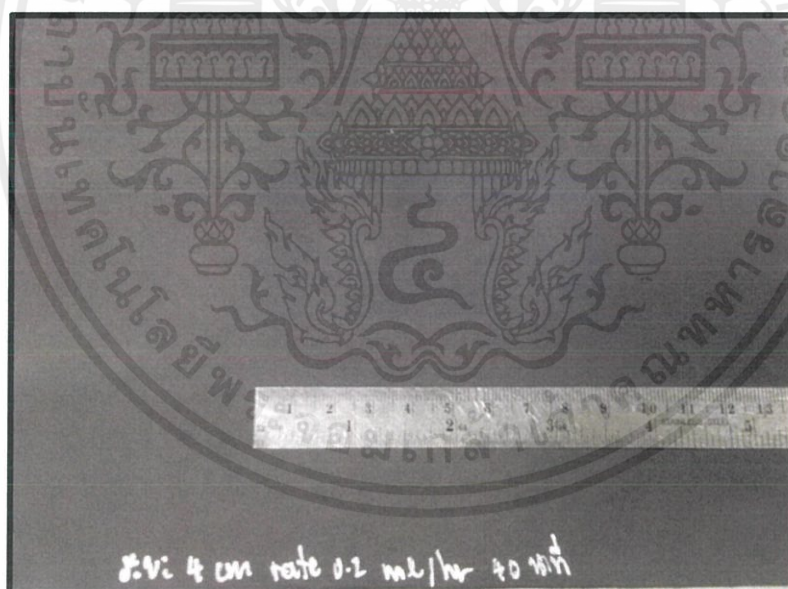
รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดในระยะการเตรียมฟิล์มต่างๆตั้งแต่ A-E เท่ากับ 40,50,60,70 และ 80 มิลลิเมตร ตามลำดับบนกระดาษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.12 พบว่ารูปถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด फिल्मจะมีลักษณะการกระจายตัวของซิงค์ออกไซด์ได้ดีที่ระยะ 40 มิลลิเมตร ซึ่งจะกระจายได้ดีกว่าระยะอื่นๆ และจากภาพ A ที่รูป 4.11 จะพบแนวโน้มของวงกลมที่มากกว่าระยะอื่นๆเช่นกัน ในขณะที่เดียวกันเมื่อเราเพิ่มระยะของเข็มและฐานรองมากขึ้น จะพบว่า การกระจายตัวจะมากขึ้น มองเห็นได้ยาก ในระยะที่ 70-80 มิลลิเมตรจะมองเห็นการฟุ้งกระจายเนื่องมาจากระยะห่างระหว่างเข็มกับฐานรองรับมากเกินไป ทำให้แรงไฟฟ้าสถิตที่จะบังคับให้สาร ฟันเคลือบลงมามีค่าลดลง ทำให้สารกระจายตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ จึงเลือกระยะที่ 40 มิลลิเมตรเพื่อทำการพ่นต่อไป

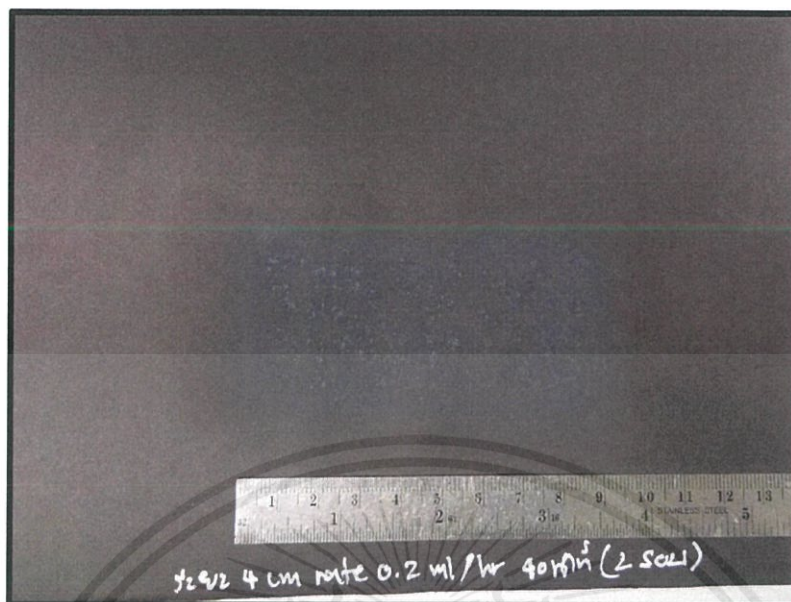
#### 4.3 ผลการทดลองการกระจายตัวของสารเมื่อเลื่อนฐานในแนวแกน X และ Y

ในการทดลองจากเงื่อนไขด้านบนทำให้ได้ระยะห่างระหว่างเข็มกับฐานที่ดีที่สุดคือที่ 40 มิลลิเมตร จากนั้นจึงทำการพ่นเคลือบในรอบที่ต่างกันเพื่อดู ลักษณะฟิล์มที่เกิดขึ้น โดยทำการพ่นเคลือบ 1 รอบ และทำการพ่นเคลือบ 2 รอบ จะแสดงผลตามรูปที่ 4.13 และ 4.14



รูปที่ 4.13 พ่นเคลือบไปกลับ 1 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



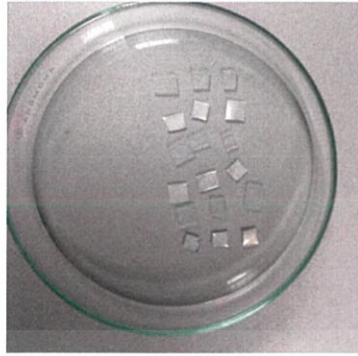
รูปที่ 4.14 ฟ้นเคลือบไปกลับ 2 รอบ

จากผลการทดลองดูระยะที่ได้จากการพ่นเคลือบ 1 รอบ ที่เวลา 40 นาทีจะได้ว่าฟิล์มที่พ่นออกมา นั้น มีความยาว 10 cm. ความกว้าง 7 cm. เช่นเดียวกับการพ่นเคลือบ 2 รอบ ต่างกันที่ความหนาและ เวลาของการพ่นเคลือบ โดยกระดาษที่ทำการพ่นนี้จะนำไปวัดกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด ต่อไปในข้อ 4.4

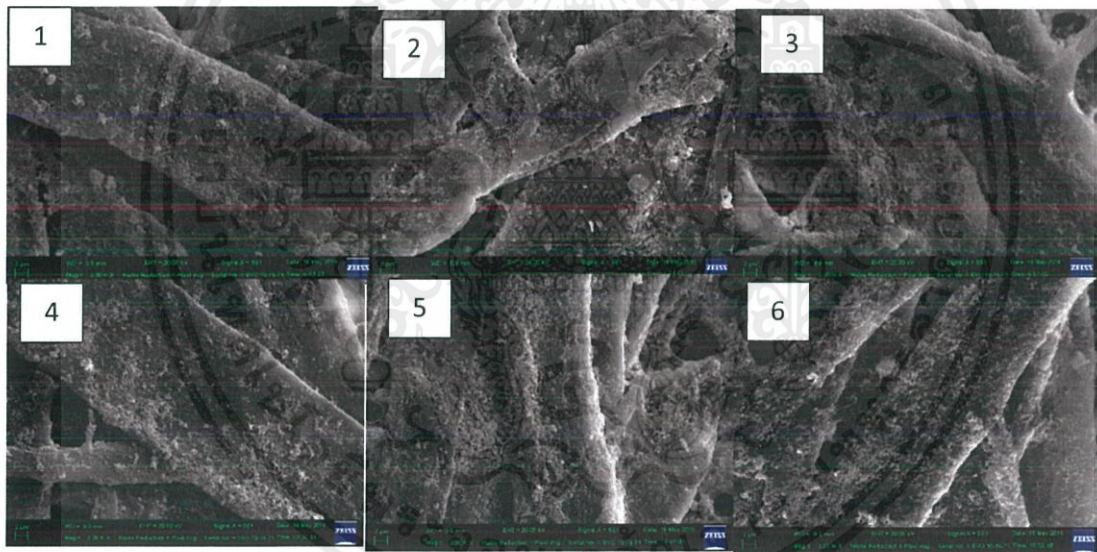
4.4 ผลการวัดกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด(SEM) เมื่อเลือนฐานในแนวแกน X และ Y ที่ฐานรองรับ ต่างกัน

ใช้เงื่อนไขเดียวกับ ข้อ 4.3 คือใช้ระยะห่างระหว่างเข็มกับฐานที่ดีที่สุดคือที่ 40 มิลลิเมตร จากนั้น จึงทำการพ่นในรอบที่ต่างกันเพื่อดู ลักษณะฟิล์มที่เกิดขึ้น โดยทำการพ่น 1 รอบ และทำการพ่น 2 รอบ โดย ฐานรองรับ มี 3 ชนิดคือ กระดาษ,กระจก(Glass) และ อลูมิเนียม ที่ขนาด 0.5 cm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

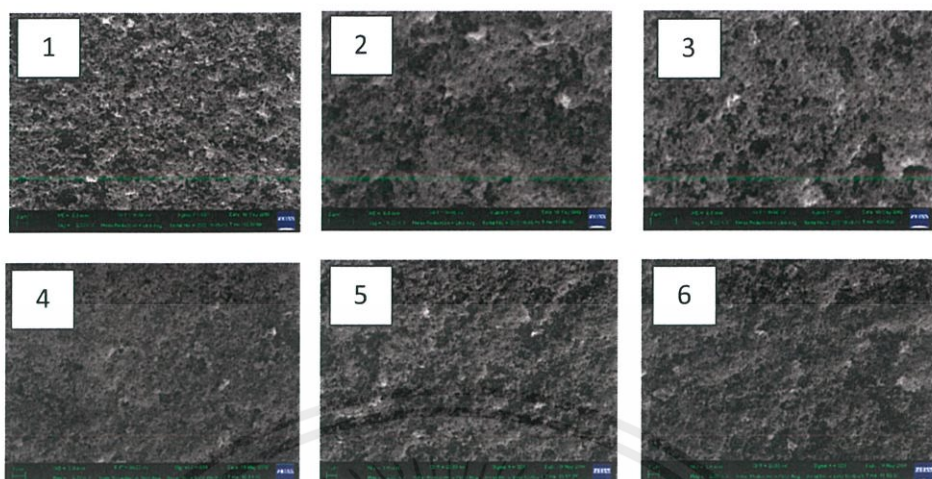


รูปที่ 4.15 ตัวอย่างกระจกและอลูมิเนียมที่ใช้พ่นในเงื่อนไข  
จากเงื่อนไขด้านบนที่เราทำการพ่นเคลือบฟิล์มลงบน substrate ที่แตกต่างกัน นำฟิล์มที่ได้ไปวัด  
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด

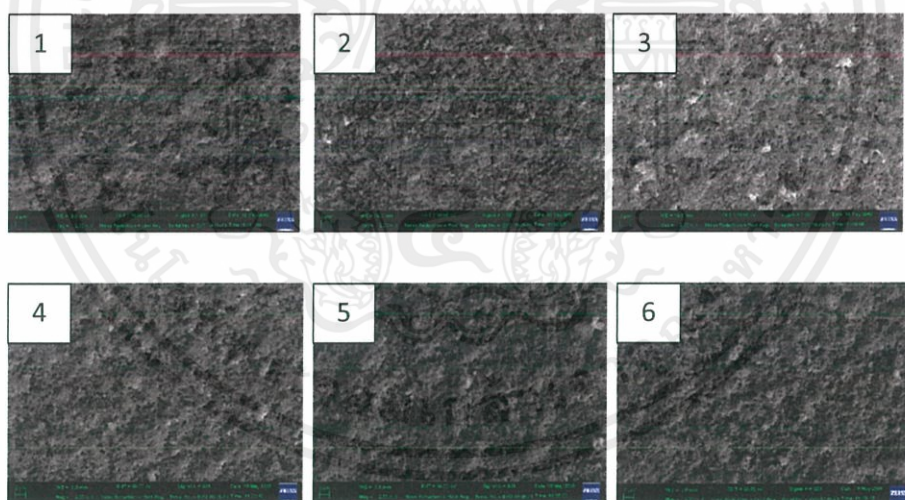


รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดบนกระดาษที่ทำการ  
พ่นเคลือบ 1 รอบ 6 ตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

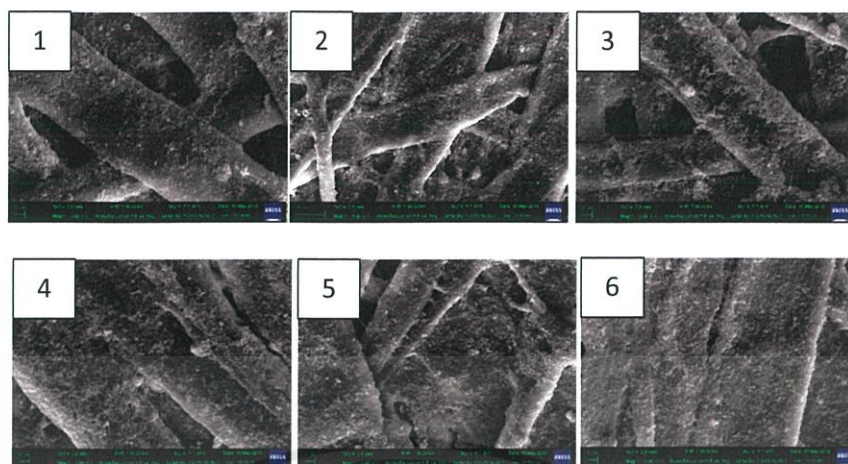


รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดบนกระจกที่ทำการพ่นเคลือบ 1 รอบ 6 ตำแหน่ง

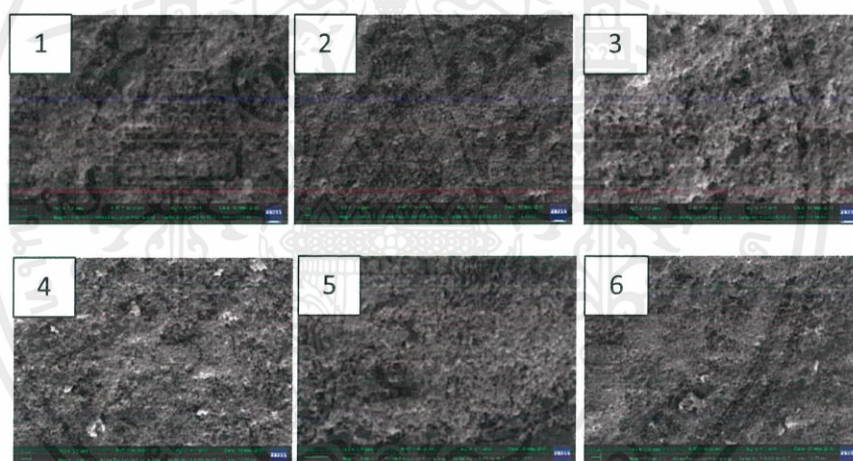


รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดบนอลูมิเนียมที่ทำการพ่นเคลือบ 1 รอบ 6 ตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

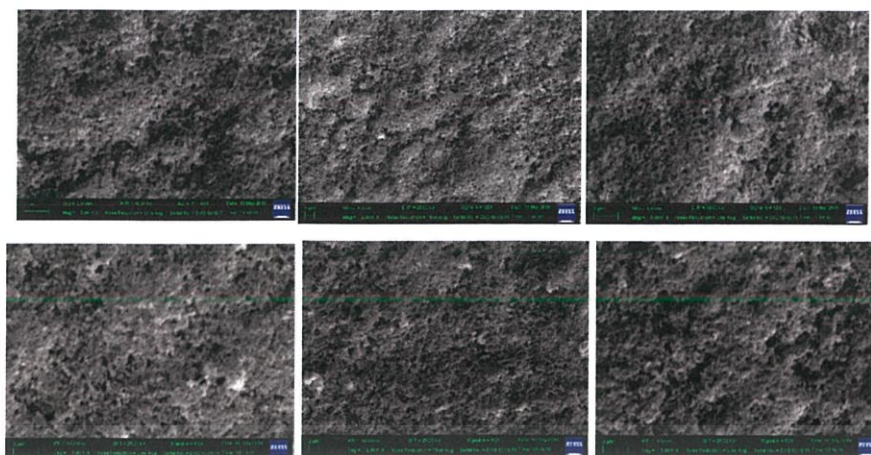


รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดบนกระดาษที่ทำการ  
 วนเคลือบ 2 รอบ 6 ตำแหน่ง

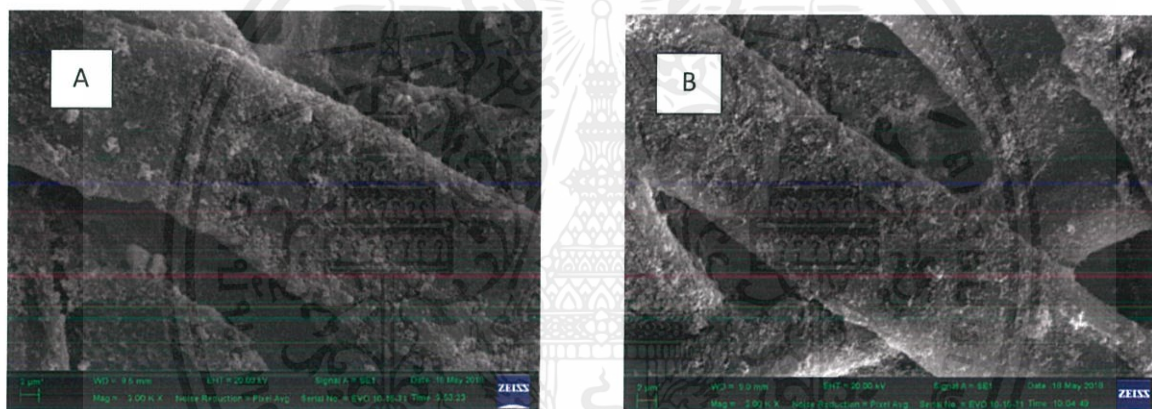


รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดบนกระดาษที่ทำการ  
 วนเคลือบ 2 รอบ 6 ตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



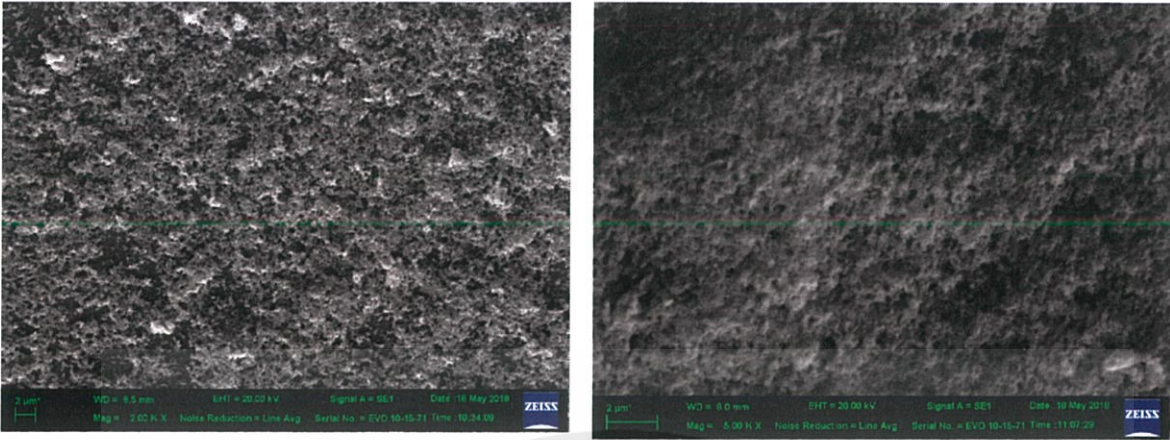
รูปที่ 4.21 ภาพถ่ายพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดบนลูมิเนียมที่ทำการฟั่นเคลือบ 2 รอบ 6 ตำแหน่ง



รูปที่ 4.22 ภาพถ่ายพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดในระหว่างการเตรียมฟิล์ม A คือฟั่นเคลือบที่ 1 รอบ B คือฟั่นเคลือบ 2 รอบ ในระยะ  $d = 4$  cm Rate = 0.2 ml/hr บนกระดาษ

จากภาพที่ 4.22 คือภาพจากการใช้กระดาษเป็นฐานรองรับฟั่นเคลือบ 1 รอบ เป็นเวลา 40 นาที Rate = 0.2 ml. มีการกระจายตัวของซิงค์ออกไซด์เป็นจำนวนมาก มีการเกาะกลุ่มกันของซิงค์ออกไซด์ในรูปที่ A-D ในการฟั่นเคลือบ 1 รอบ เมื่อเทียบกับการฟั่น 2 รอบ Rate = 0.2 ml./hr จะมีการเกาะกลุ่มของซิงค์ที่มากกว่า 1 รอบ ถ้าดูจากฟิล์มจะเห็นได้ว่าตัวกระดาษมีความเปื่อยที่เกิดจากระยะเวลาในการฟั่นเคลือบเป็นเวลานาน

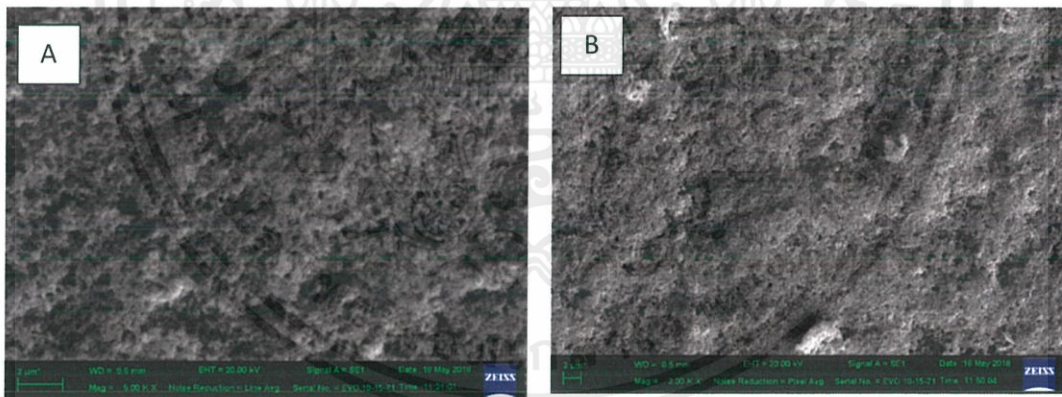
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 ภาพถ่ายพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดในระหว่างการเตรียม

ฟิล์ม A คือพ่นเคลือบ 1 รอบ B คือพ่นเคลือบ 2 รอบ ในระยะ  $d = 4$  cm Rate = 0.2 mL/hr บนกระจก

จากภาพถ่ายรูปที่ 4.23 เป็นการพ่นเคลือบ 1 รอบ บนกระจก ที่ Rate = 0.2 mL/hr จะมีการรวมตัวกันของซิงค์ออกไซด์น้อยกว่ารูป B โดยใช้อัตราในการพ่นเคลือบเท่ากัน แต่พ่นเคลือบ 1 รอบ เพราะพื้นผิวกระจกมีความลื่นมากกว่ากระดาษจึงทำให้ของเหลวมารวมตัวกันมากกว่าการจัดเรียงตัวตัวจึงดีกว่า

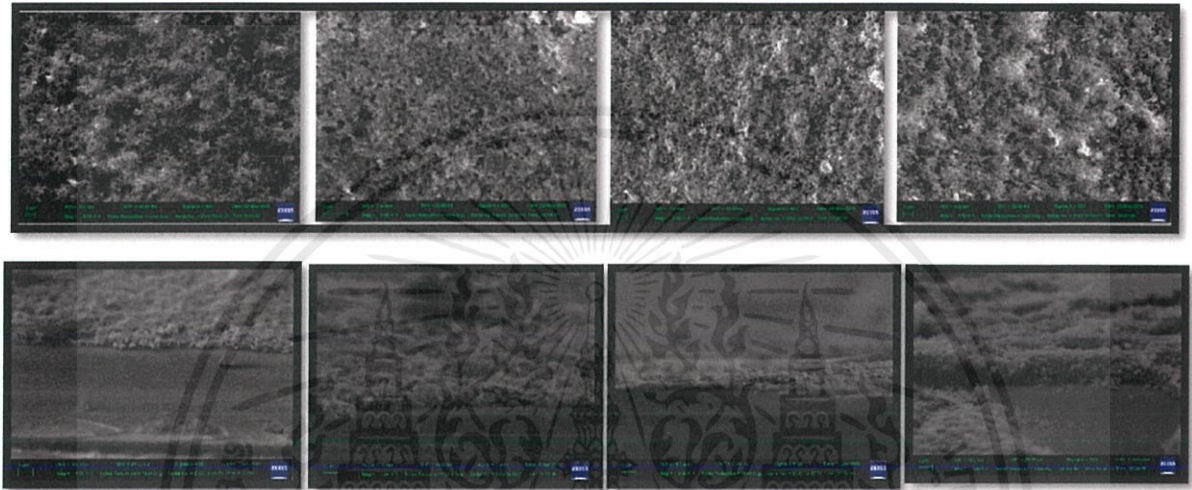


รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด ในระหว่างการเตรียม

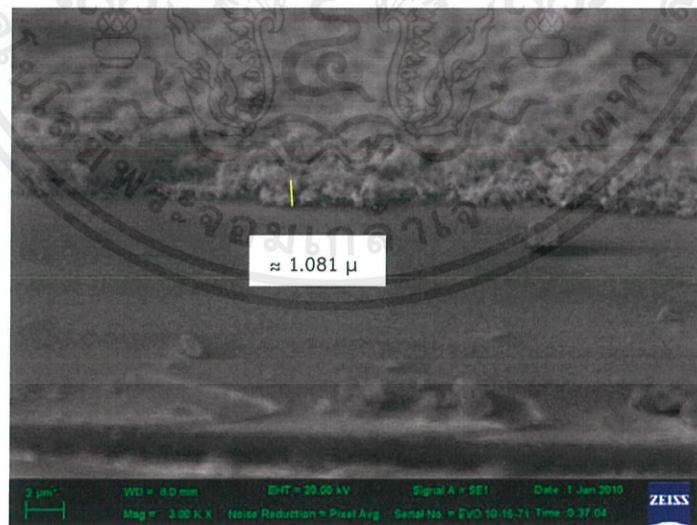
ฟิล์ม A คือพ่นเคลือบ 1 รอบ B คือพ่นเคลือบ 2 รอบ ในระยะ  $d = 4$  cm Rate = 0.2 mL/hr บนอลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพถ่ายจะพบว่า การจัดเรียงตัวของฟิล์มที่ภาพ B ดีกว่าภาพ A เพราะตัวอนุภาคนีเยมมีพื้นที่ผิวดีกว่ากระจกที่มีความลื่นจึงทำให้ของเหลวเกาะได้ดีกว่า จากใช้เงื่อนไขเดียวกับ ข้อ 4.3 คือใช้ระยะห่างระหว่างเข็มกับฐานที่ต่ำที่สุดคือที่ 40 มิลลิเมตร จากนั้นจึงทำการปั่นเคลือบในรอบที่ต่างกันเพื่อดู ลักษณะฟิล์มที่เกิดขึ้น(ความหนา) หรือภาพตัดขวาง โดยทำการปั่น 2 รอบ 3 รอบ 4 รอบ และ 8 รอบโดยฐานรองรับ คือ กระจก

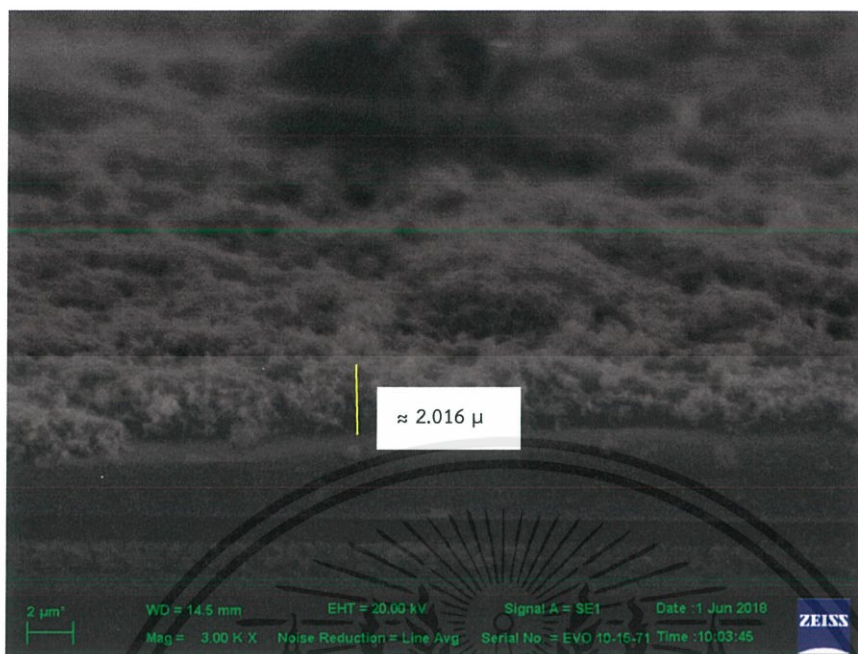


รูปที่ 4.25 ภาพถ่ายพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดแสดงถึงพื้นผิวและชั้นฟิล์มในระยะเวลาการปั่นเคลือบที่ต่างกัน



รูปที่ 4.26 ภาพตัดขวางของฟิล์มที่ปั่นเคลือบ 2 รอบมีความหนาของชั้นฟิล์มเท่ากับ 1.081 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

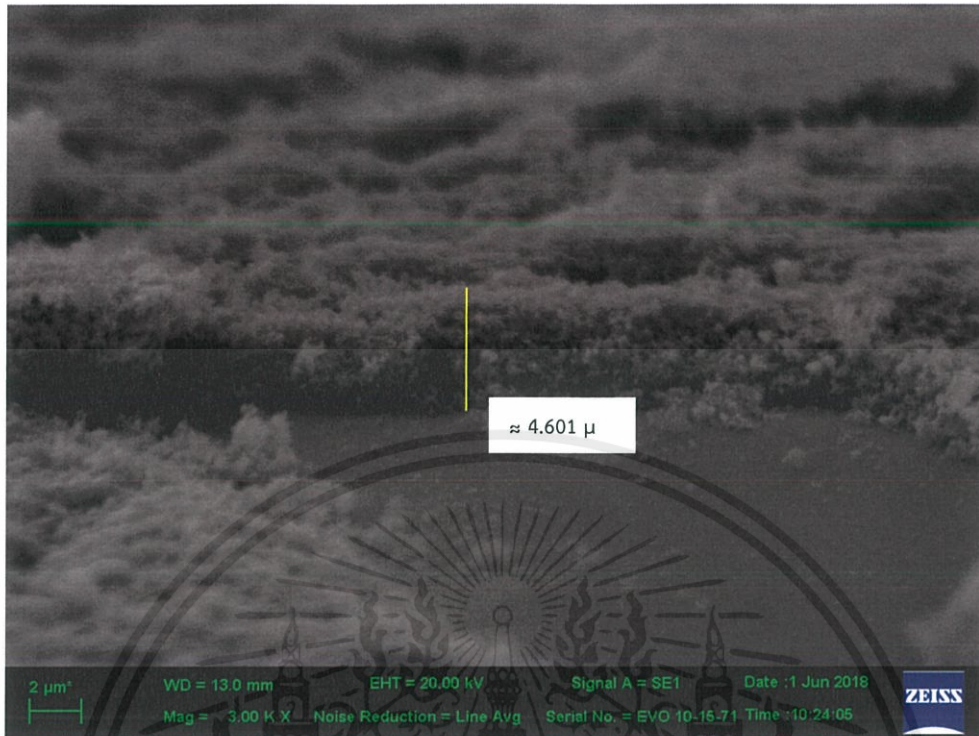


รูปที่ 4.27 ภาพตัดขวางของฟิล์มที่พันเคลือบ 4 รอบมีความหนาของชั้นฟิล์มเท่ากับ 2.016 ไมครอน



รูปที่ 4.28 ภาพตัดขวางของฟิล์มที่พันเคลือบ 6 รอบมีความหนาของชั้นฟิล์มเท่ากับ 3.168 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

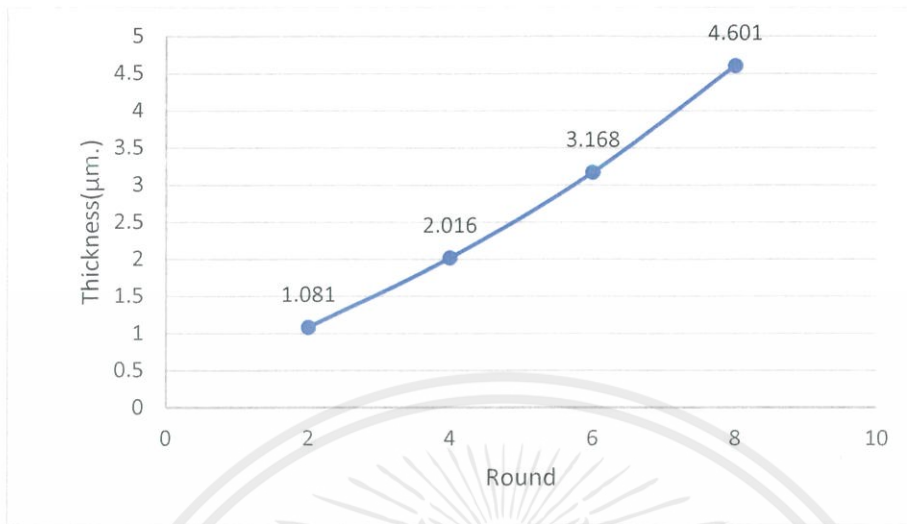


รูปที่ 4.29 ภาพตัดขวางของฟิล์มที่พันเคลือบ 8 รอบมีความหนาของชั้นฟิล์มเท่ากับ 4.601 ไมครอน

จากรูปที่ 4.26-4.29 นั้นเราจะพบว่าว่ารูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดฟิล์มที่เคลือบบนกระจกที่เราได้นั้นจะมีความเป็นรูพรุนและความหนาของชั้นฟิล์มที่ได้แตกต่างกันตามลำดับโดยที่ 4 รอบจะมีชั้นฟิล์มที่พันเคลือบได้ต่ำที่สุดที่ 1.081 ไมครอน โดยที่ 8 รอบ (รูปที่ 4.29) นั้นจะมีความเป็นรูพรุนมากที่สุด และยังมีความหนามากที่สุดที่ 4.601 ไมครอน เนื้อฟิล์มที่ได้มีการทับถมกัน มีการกระจายตัวได้ดี ทำให้เนื้อฟิล์มเป็นรูปแบบมากขึ้น(uniform)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

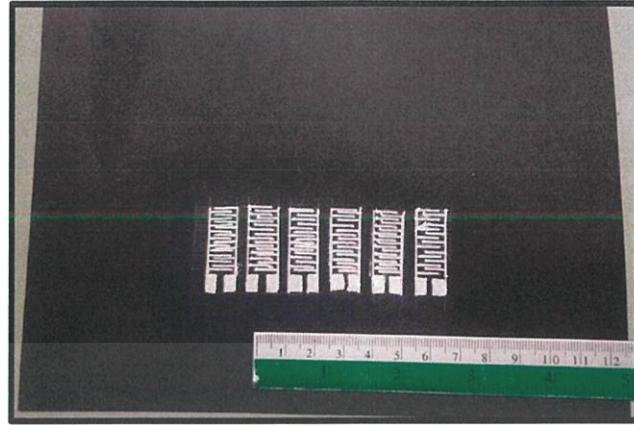
กราฟที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มและจำนวนรอบที่ปั่นเคลือบ



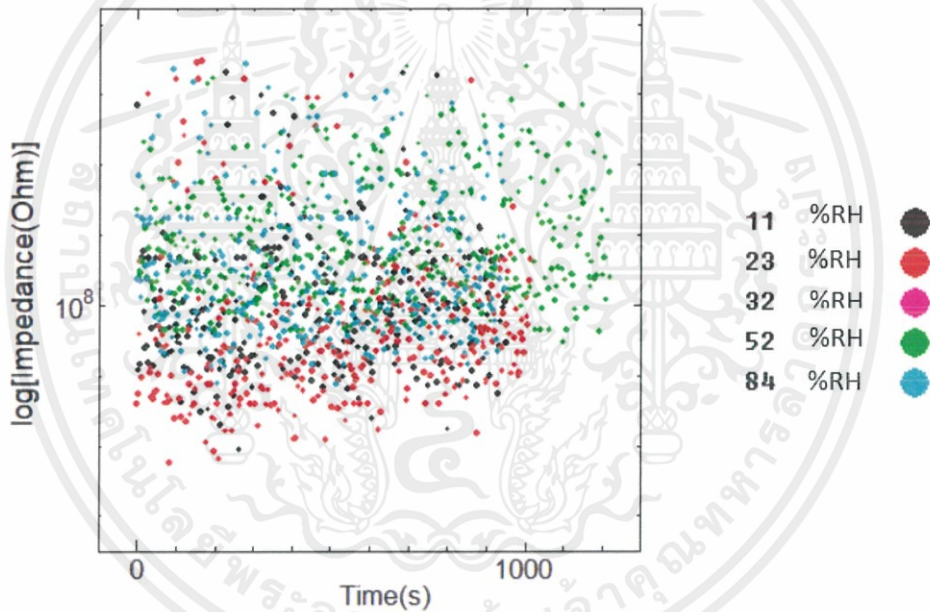
#### 4.6 ผลการตรวจสอบการตอบสนองต่อความชื้น

ใช้เงื่อนไขเดียวกับ ข้อ 4.3 คือใช้ระยะห่างระหว่างเข็มกับฐานที่ดีที่สุดคือที่ 40 มิลลิเมตร จากนั้นจึงทำการปั่นในรอบที่ต่างกันเพื่อดู ลักษณะฟิล์มที่เกิดขึ้น โดยทำการปั่นเคลือบ 2 รอบ ทำการปั่น 4 รอบ ทำการปั่นเคลือบ 6 รอบและทำการปั่นเคลือบ 8 รอบ โดย ฐานรองรับ คือ กระดาษที่วาดเป็นขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิจิต

ในการทดลองจะใช้เงื่อนไขปั่นเคลือบฟิล์มบางที่เงื่อนไขตามข้างต้น มาทำการการวัดค่าการตอบสนองต่อความชื้น โดยในการทดลอง จะวัดที่ความชื้นสัมพัทธ์เป็น 11.30%RH, 23.11%RH, 32.78%RH, 52.89%RH, 75.29%RH, 84.34%RH และ 93.58%RH ตามลำดับ โดยในการทดลองก่อนทำการวัดจะทำการจุ่มเซนเซอร์ที่ ความชื้น 11%RH เป็นเวลา 5 นาที และจากนั้นก็ให้นำอุปกรณ์ตรวจวัดไปวัดที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ โดย จะทำการวัดเป็นเวลา 1000 วินาที และเก็บค่าความสัมพันธ์ของเวลาและความต้านทานเชิงซ้อน (Impedance) ซึ่งผลการตรวจสอบการตอบสนองต่ออุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นเป็นดังต่อไปนี้

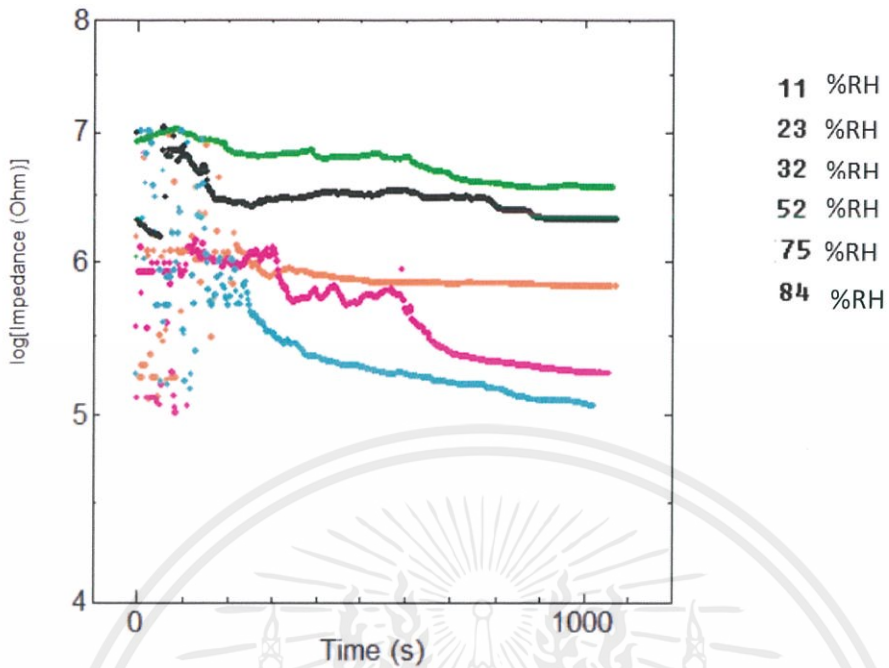


รูปที่ 4.30 ตัวอย่างขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตที่วาดบนกระดาษสำหรับการพ่นเคลือบ



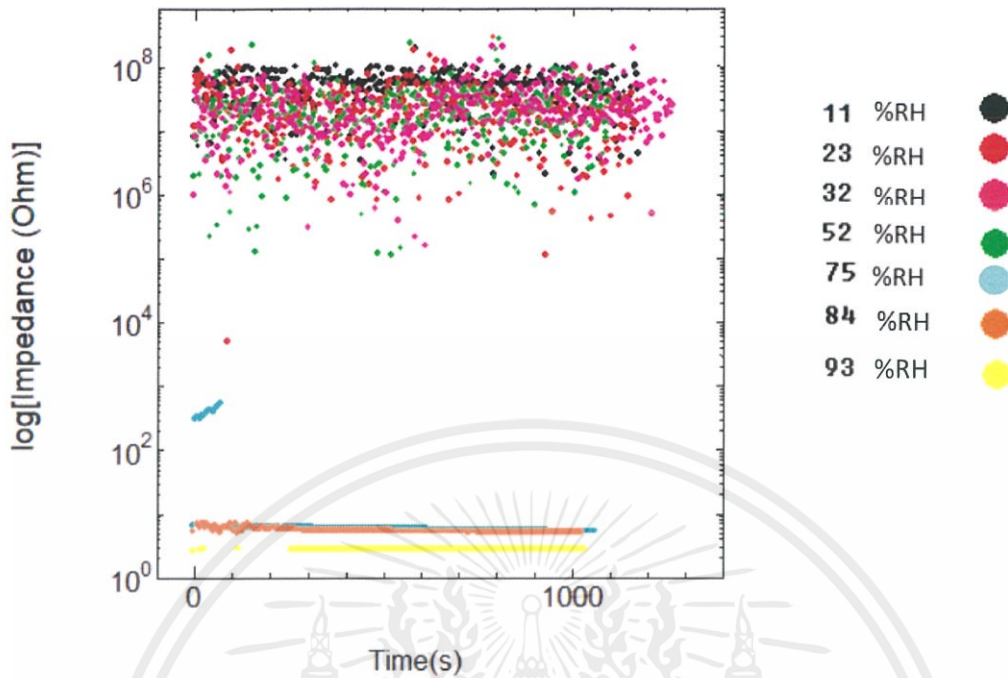
รูปที่ 4.31 การตอบสนองของเซนเซอร์ความชื้นฟิล์มที่พ่นไปกลับ 2 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

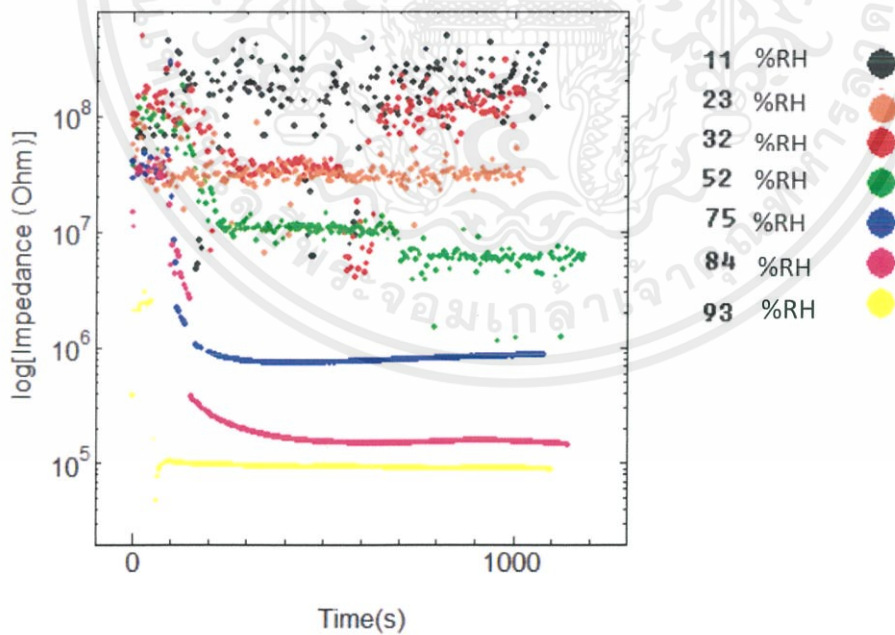


รูปที่ 4.32 การตอบสนองของเซนเซอร์ความชื้นฟิล์มที่พันไปกลับ 4 รอบ

จากรูปที่ 4.31-4.32 จะพบว่าการตอบสนองต่อความชื้นบนตัวชี้ที่ทำารพันเคลือบ 1 รอบและ 2 รอบนั้น ไม่สามารถแสดงความแตกต่างได้อย่างชัดเจน อาจเป็นเพราะรอบในการพันเคลือบน้อยไปทำให้หน้าฟิล์มที่เกิดขึ้นนั้นที่บางเกินไป จนไม่สามารถวัดการตอบสนองได้



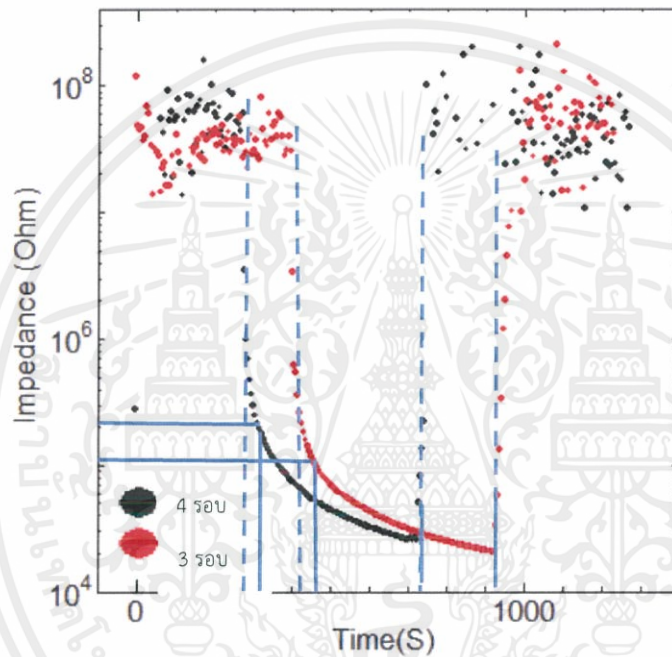
รูปที่ 4.33 การตอบสนองของเซนเซอร์ความชื้นฟิล์มที่พ่นไปกลับ 6 รอบ



รูปที่ 4.34 การตอบสนองของเซนเซอร์ความชื้นฟิล์มที่พ่นไปกลับ 8 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองข้างต้นพบว่า การตอบสนองต่อความชื้นที่ได้โดยใช้การพันเคลือบที่รอบ 8 รอบ ตามลำดับ การตอบสนองของอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นฟิล์มที่พันเคลือบ 8 รอบ มีการตอบสนองที่ดีที่สุด พบว่าเซนเซอร์มีการตอบสนองต่อความชื้นในช่วง 11%RH - 93%RH มีช่วงการตอบสนองที่ดี และจากกราฟพบว่า เมื่อ ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์มากขึ้น จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์มีค่าลดลงเนื่องจากปริมาณไอน้ำมากขึ้นทำให้ไอน้ำเกิดการเกาะตัวที่อุปกรณ์ตรวจวัดมากขึ้น



รูปที่ 4.35 การตอบสนองต่อการดูดซับและคายความชื้นของอุปกรณ์ตรวจวัดในช่วงเวลา 1200

วินาที.

ตารางที่ 4.2 คุณลักษณะเฉพาะของเซนเซอร์วัดความชื้น

จำนวนรอบ	ความชื้นที่ดูดซับ(s)	ความชื้นที่คาย(s)
3 รอบ	40	28
4 รอบ	36	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

โครงการนี้ทำขึ้นเพื่อออกพัฒนาและประกอบระบบการพันเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตแบบเลื่อนฐานได้(ในแนวแกน X และ Y) สำหรับการใช้งานในการทำฟิล์มที่มีพื้นที่การทำงานมากขึ้น พบว่าเราสามารถทำฟิล์มบางที่มีพื้นที่การทำงานมากขึ้นได้ถึง  $5 \times 10$  cm. จากงานวิจัยนี้สามารถพัฒนาระบบการพันบนฐานรองหลากหลายชนิดและสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง

การผลการทดลองทำให้ทราบว่า ควรพันเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตในระยะระหว่างเข็มกับฐาน 4 cm. เป็นวงสเปร์บมากที่สุดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 cm. และที่การพันเคลือบ 8 รอบ (16 ชั้น)เหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดได้ดีที่สุด สามารถสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นจากระบบการพันเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตโดยมีข้อดีคือสามารถประดิษฐ์ได้มากกว่าครั้งละ 1 ชั้น (โดยสามารถผลิตได้มากขึ้นอยู่กับพื้นที่การพันเคลือบ)

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อจำกัดของพื้นที่เกิดจากความยาวของเกลียวที่ใช้ในการขันมอเตอร์ดังนั้นหากต้องการได้พื้นที่ที่มากขึ้นกว่าเดิม ควรพัฒนาความยาวของเกลียวขันมอเตอรฺ(lead screw)

## บรรณานุกรม

- [1] K.-L,Wei Bai, "Preparation of oriented poly(vinylidene fluoride) thin films by a cost-effective electrostatic spray-assisted vapour deposition-based method," *Thin Solid Films*, pp. 6-9, 2000.
- [2] "enchemcom1po.wordpress.com," [Online]. Available: <https://enchemcom1po.wordpress.com/polymer%E0%B8%9E%E0%B8%AD%E0%B8%A5%E0%B8%B4%E0%B9%80%E0%B8%A1%E0%B8%AD%E0%B8%A3%E0%B9%8C/%E0%B8%8A%E0%B8%99%E0%B8%B4%E0%B8%94%E0%B8%82%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B8%9E%E0%B8%AD%E0%B8%A5%E0%B8%B4%E0%B9%80%E0%B8%A1%E0%B8%AD%E0%B>
- [3] เสมอ. ชัยรัมย์, "วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี," *พอลิอะนิลีนและอนุพันธ์นำไฟฟ้า: การสังเคราะห์ และการประยุกต์ใช้งาน*, vol. 1, no. 14, pp. 78-81, 2013.
- [4] T. Thiwawong, K. Onlaor, B. Tunhoo, Electrostatic Spray Deposited Silver Nanoparticles Thin Films for Humidity Sensor Applications, *Thai journal of physics Serie 8*, 2012.
- [5] "/fys.kuleuven.be," KU LEUVEN, [Online]. Available:<https://fys.kuleuven.be/iks/nvsf/experimental-facilities/x-ray-diffraction-2013-bruker-d8-discover>.
- [6] "serc.carleton.edu," Geochemical Instrumentation and Analysis, [Online]. Available: [https://serc.carleton.edu/research\\_education/geochemsheets/techniques/XRD.html](https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/XRD.html).

- [7] A. Mukhopadhyay, "researchgate.net," Jul 2015. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/281097535\\_fig14\\_Figure-25-schematic-diagram-of-scanning-electron-microscope-SEM](https://www.researchgate.net/figure/281097535_fig14_Figure-25-schematic-diagram-of-scanning-electron-microscope-SEM).
- [8] "gla," The University of Glasgow, [Online]. Available: <https://www.gla.ac.uk/schools/ges/researchandimpact/researchfacilities/isaac/services/scanningelectronmicroscopy/>.
- [9] P. GmbH, "commons.wikimedia," 20 May 2013. [Online]. Available: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Michelson\\_Interferometer\\_scheme.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Michelson_Interferometer_scheme.png).
- [10] Guangling Jiao, Guangli Yu, Wei Wang, Stephen Ewart, "researchgate," [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/257759958\\_tbl1\\_Table-2-Absorption-peaks-of-algal-polysaccharides-on-FTIR-spectra](https://www.researchgate.net/figure/257759958_tbl1_Table-2-Absorption-peaks-of-algal-polysaccharides-on-FTIR-spectra).
- [11] "wikipedia," [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Nanogenerator>.
- [12] "bruker.com," bruker, [Online]. Available: <https://www.bruker.com/products/x-ray-diffraction-and-elemental-analysis/x-ray-diffraction/d8-discover-family.html>.
- [13] "em.materials," University of oxford Begbroke Hirsch building , [Online]. Available: <http://www-em.materials.ox.ac.uk/instruments/scanning/jeol-jsm-6500f.html>.
- [14] "laboratory-equipment," [Online]. Available: <https://www.laboratory-equipment.com/spectrophotometers-electrophoresis/spectrum-two-ir-spectrometers-perkin-elmer.php>.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - สกุล นางสาววิญญพันธ์ ใฝ่จันทร์

วัน เดือน ปีเกิด จันทร์ที่ 9 ตุลาคม พ.ศ.2538

ที่อยู่ปัจจุบัน 99/5 หมู่ที่ 3 ถ.เอกชัย 36 แขวงบางขุนเทียน เขตจอมทอง กรุงเทพมหานคร 10150

ประวัติการศึกษา จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนมัธยมวัดสิงห์ กรุงเทพมหานคร  
 จบระดับอุดมศึกษาปริญญาตรีจากสถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหาร  
 ลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้