

การพัฒนาขั้วไฟฟ้าจากวัสดุผสมระหว่างพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS และ
อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์

DEVELOPMENT OF ELECTRODE FROM COMPOSITES MATERIAL BETWEEN
PEDOT:PSS AND ITO-NPs



วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-NT-M-001-009

การพัฒนาขั้วไฟฟ้าจากวัสดุผสมระหว่างพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS
และอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์

DEVELOPMENT OF ELECTRODE FROM COMPOSITES MATERIAL BETWEEN
PEDOT:PSS AND ITO-NPs



ไกรศักดิ์ วัฒนรังษณัฐ
KRAISAK WATTHANARUNGSARIT

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
KMITL-2019-NT-M-001-009

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF ELECTRODE FROM COMPOSITES MATERIAL
BETWEEN PEDOT:PSS AND ITO-NPs



A THESIS SUBMITTED IN FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN NANOSCIENCE AND NANO TECHNOLOGY
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัย 2019 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลง KMITL-2019-NT-M-001-009 เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีผิดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาขั้วไฟฟ้าจากวัสดุผสมระหว่างพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS และอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์
นักศึกษา	นายไกรศักดิ์ วัฒนรังษฤษฎ์
รหัสประจำตัว	58607009
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา	นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.นวพันธ์ ชัยนิกิจ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.ศุภมาส วิรุณจิตร์

บทคัดย่อ

การเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิคการพิมพ์เป็นวิธีการที่นิยมประยุกต์ใช้สำหรับการเตรียมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บนฐานรองรับพลาสติก เนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีข้อดีคือกระบวนการผลิตสะดวกไม่ซับซ้อน ต้นทุนการผลิตต่ำ และใช้ระยะเวลาการผลิตน้อย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมน้ำหมึกนำไฟฟ้าสำหรับประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิคการพิมพ์บนฐานรองรับพลาสติก ซึ่งน้ำหมึกนำไฟฟ้าเตรียมด้วยวัสดุผสมระหว่างพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS และอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ โดยอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ที่ใช้เป็นส่วนผสมของน้ำหมึกนำไฟฟ้าได้จากการสังเคราะห์อนุภาคด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์สามารถสังเคราะห์ได้ทั้งสองโครงสร้างผลึกคือผลึกลูกบาศก์และผลึกรอมโบฮีดรอล โดยสามารถควบคุมการเกิดโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันจากค่าความเป็นกรดเบสขณะเกิดปฏิกิริยาและควบคุมขนาดอนุภาคจากอุณหภูมิการเผาโดยขนาดที่สังเคราะห์ได้มีขนาดตั้งแต่ 40 ถึง 200 นาโนเมตร จากการทดลองอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างรอมโบฮีดรอล ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 60 นาโนเมตร มีความเหมาะสมสำหรับทำเป็นน้ำหมึกนำไฟฟ้าเพื่อประยุกต์เป็นขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิคการพิมพ์มากที่สุด โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดเท่ากับ 39 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร การทะลุผ่านของแสงร้อยละ 68 ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร งานวิจัยนี้จึงเสนอทางเลือกสำหรับน้ำหมึกนำไฟฟ้าซึ่งผสมระหว่างพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS และวัสดุอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์เพื่อประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พิมพ์ได้

คำสำคัญ : น้ำหมึกนำไฟฟ้า อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ วัสดุผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Development of Electrode from Composites material between PEDOT:PSS and ITO-NPs
Student	Mr. Kraisak Watthanasarit
Student ID	58607009
Degree	Master of Science
Program	Nanoscience and Nanotechnology
Year	2018
Thesis advisor	Asst. Prof. Dr. Navaphun Kayunkid
Thesis co-advisor	Dr. Supamas Wirunchit

ABSTRACT

Electrodes based on low-temperature preparation such as ink jet printing have been famously used in plastic electronic devices. This preparation offers many advantages, including simple preparation, low manufacturing cost and short fabricating time. The aim of this work is to investigate the specific properties of composite materials between nanoparticles of indium tin oxide (ITO-NPs) and poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS) as an alternative printing electrode for plastic electronic applications. In addition, ITO-NPs was synthesized by the hydrothermal process. The products have both crystalline structures, cubic and rhombohedral structures. To obtain these crystalline structures, the hydrothermal process was controlled by pH of reaction. Moreover, the size of ITO-NPs can be varied from 40 nm to 200 nm with the increase of calcination temperature. For preparation of conductive inks, the cubic structure of ITO-NPs with the average size of 60 nm exhibits the sheet resistance as low as $39 \Omega/\text{cm}^2$ with transmittance of 68 % at 550 nm. This research demonstrates the possibility to use the composited ink from ITO-NPs and PEDOT:PSS as the printing electrode for electronic applications.

Keywords : Conductive inks, Nanoparticles of indium tin oxide, Composite materials

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นวพันธ์ ชัยนิกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ดร.ศุภมาส วิรุณจิตร และหัวหน้าห้องปฏิบัติการ Quantum and optical semiconductor research laboratory (QOS Lab) ศาสตราจารย์ ดร.จิติ หนูแก้ว รวมถึงอาจารย์ท่านอื่นในห้องปฏิบัติการ ดร.อดิเรก แรงกสิกรณ์ และ ดร.สากล ระหงษ์ ซึ่งอาจารย์ที่กล่าวมาทั้งหมดได้เมตตาถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์ทั้งทางวิชาการด้านนาโนเทคโนโลยีและคุณธรรมด้านการช่วยเหลือสังคมส่วนรวม ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ที่มอบโอกาสให้ได้รับทุนการศึกษาระดับปริญญาโทนี้ และนอกจากนี้ขอขอบคุณ Quantum and optical semiconductor research laboratory (QOS Lab) และ Functional organic synthesis laboratory ที่เอื้อเพื่ออุปกรณ์การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

นายไกรศักดิ์ วัฒนรังษฤษฎ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานงานวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตการดำเนินการ	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ซึ้วไฟฟ้าโปร่งแสง (Transparent electrode).....	4
2.2.1 ออกไซด์โปร่งไฟฟ้า.....	4
2.2.2 Metal-Based (Semi-)Transparent Electrodes	4
2.2.3 วัสดุพอลิเมอร์นำไฟฟ้า	5
2.2.4 Nanomaterials as Transparent Electrodes	5
2.2 วัสดุนาโนอินเดียมทินออกไซด์ (indium tin oxide; ITO).....	5
2.3 Poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonic acid)	6
2.4 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนด้วยกระบวนการทางเคมี.....	7
2.4.1 กระบวนการตกตะกอน (precipitation).....	7
2.4.2 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal)	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

2.5	ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์และการประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแบบโค้งงอ	16
2.6	การตรวจสอบลักษณะของผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	23
2.7	การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM).....	25
2.8	การตรวจสอบลักษณะเฉพาะด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR).....	26
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....		29
3.1	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	29
3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	29
3.3	การสังเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ด้วยกระบวนการทางเคมี	31
3.3.1	การสังเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ด้วยเทคนิคการตกตะกอนร่วม....	31
3.3.2	การสังเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล	33
3.4	การเตรียมน้ำหมึกนำไฟฟ้าจากวัสดุผสมระหว่างอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS	36
3.4.1	การเตรียมน้ำหมึกนำไฟฟ้าสำหรับประยุกต์เป็นฟิล์มบางด้วยเทคนิคการหยดเคลือบ เพื่อตรวจสอบสมมุติฐานเบื้องต้น	36
3.4.2	การเตรียมน้ำหมึกสำหรับประยุกต์เป็นฟิล์มบางด้วยเทคนิคการหยดเคลือบ เพื่อ ปรับปรุงประสิทธิภาพการนำไฟฟ้า.....	36
3.4.3	การเตรียมน้ำหมึกนำไฟฟ้าสำหรับประยุกต์ใช้ในเทคนิคการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ กระดาษ.....	37
3.5	การเตรียมขั้วไฟฟ้าจากน้ำหมึกนำไฟฟ้าด้วยเทคนิคการเตรียมฟิล์มจากสารละลาย	37
3.5.1	การเตรียมฟิล์มจากน้ำหมึกนำไฟฟ้าด้วยเทคนิคการหยดบนฐานรองรับกระจก.....	37
3.5.2	การเตรียมฟิล์มบางจากน้ำหมึกนำไฟฟ้าด้วยเทคนิคการหมุนเคลือบบนฐานรองรับ พลาสติก	38

3.5.3 การเตรียมฟิล์มบางจากน้ำหมึกนำไฟฟ้าด้วยเทคนิคการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ กระดาษ.....	39
3.6 การวิเคราะห์อนุภาคอินทรีย์อินทรีย์นอกไซด์.....	40
3.6.1 ตรวจสอบโครงสร้างผลึกและอสัณฐานของสารโดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสี เอ็กซ์เรย์ (XRD).....	40
3.6.2 ตรวจสอบรูปแบบการสั่นของโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบภายในโครงสร้างด้วย เทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FT-IR).....	40
3.6.3 ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุด้วยเทคนิควิเคราะห์การเปลี่ยนแปลง น้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetry thermal analysis: TGA).....	40
3.6.4 ตรวจสอบปริมาณความร้อนที่วัสดุดูดหรือคายด้วยหลักการวิเคราะห์สมบัติความ แตกต่างทางความร้อนของสาร (Differential thermal analysis: DTA)	40
3.6.5 ตรวจสอบขนาดอนุภาคและลักษณะโครงสร้างของสารในระดับนาโนด้วยกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูง ชนิดฟิลด์อิมิสชัน (FE-SEM).....	41
3.7 การวิเคราะห์ฟิล์มที่เตรียมได้เพื่อประยุกต์เป็นขั้วไฟฟ้า.....	41
3.7.1 ตรวจสอบการนำไฟฟ้าด้วยการวัดความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธี 4 ขั้วเชิงเส้น.....	41
3.7.1 ตรวจสอบการทะลุผ่านของแสงด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรสโคปี	41
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	42
4.1 วิเคราะห์การนำไฟฟ้าของฟิล์มที่เตรียมจากน้ำหมึกนำไฟฟ้าด้วยเทคนิคการหยด	42
4.2 วิเคราะห์ลักษณะทางพื้นผิวฟิล์มที่เตรียมจากน้ำหมึกนำไฟฟ้าด้วยเทคนิคการหยด.....	43
4.3 วิเคราะห์อนุภาคนาโนอินทรีย์อินทรีย์นอกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลที่ระยะเวลา การไฮโดรเทอร์มอลต่างกัน คือ 4, 12, 24 และ 48 ชั่วโมง.....	47
4.4 วิเคราะห์อนุภาคนาโนอินทรีย์อินทรีย์นอกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลที่ความ เข้มข้นสารตั้งต้นเพิ่มขึ้นจากเดิม 8 เท่า.....	53
4.4.1 อนุภาคนาโนอินทรีย์อินทรีย์นอกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลโดยค่าความ เป็นกรดเบสขณะเกิดปฏิกิริยาเป็น 8.....	53

4.4.2 อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลโดยค่าความ เป็นกรดเบสขณะเกิดปฏิกิริยาเป็น 12.....	54
4.5 วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์เมื่อเพิ่ม อุณหภูมิการเผาสูงขึ้นไปถึง 1,150 องศาเซลเซียส	56
4.6 วิเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการ เผาถึง 1,150 องศาเซลเซียส.....	61
4.7 วิเคราะห์การนำไฟฟ้าของฟิล์มที่เตรียมด้วยเทคนิคการหยด โดยใช้น้ำหมึกนำไฟฟ้าที่ เตรียมจากวัสดุนาโนผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ โครงสร้างผลึกต่างกัน	64
4.8 วิเคราะห์การนำไฟฟ้าของฟิล์มที่เตรียมด้วยเทคนิคการหยด โดยใช้น้ำหมึกนำไฟฟ้าที่ เตรียมจากวัสดุนาโนผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ โครงสร้างผลึกต่างกัน เมื่อเวลาผ่านไป 1 เดือน	65
4.9 วิเคราะห์การนำไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมด้วยเทคนิคการหมุนเคลือบ โดยใช้น้ำหมึกนำ ไฟฟ้าที่เตรียมจากวัสดุนาโนผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทิน ออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ บนฐานรองรับพลาสติก.....	66
4.10 การประยุกต์ใช้น้ำหมึกนำไฟฟ้าเป็นขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิคการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์กระดาษ บนฐานรองรับพลาสติก	71
4.11 ศึกษาประสิทธิภาพการนำไฟฟ้า การดูดกลืนและการทะลุผ่านแสงของน้ำหมึกนำไฟฟ้า เมื่อจำนวนชั้นการพิมพ์เพิ่มขึ้น	72
4.12 ศึกษาการนำไฟฟ้า การดูดกลืนและการทะลุผ่านแสงของน้ำหมึกนำไฟฟ้าเมื่อสัดส่วน ระหว่างอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์และ PEDOT:PSS แตกต่างกัน.....	74
4.13 ศึกษาเสถียรภาพการนำไฟฟ้าของน้ำหมึกนำไฟฟ้าเมื่อประยุกต์เป็นขั้วไฟฟ้าโค้งงอได้บน ฐานรองรับพลาสติก.....	78
บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	80

บรรณานุกรม.....Error! Bookmark not defined.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด
 ประวัติผู้เขียน.....

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของผงอินเดียมทินออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคการตกตะกอน และเทคนิคโซลโวเทอร์มอล	15
2.2 เปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคต่างกัน.....	18
4.1 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายอินเดียมทินออกไซด์ สารละลายผสม ระหว่างอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS และสารละลาย PEDOT:PSS.....	42
4.2 แสดงค่าความต้านทานความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง PEDOT:PSS เปรียบเทียบกับฟิล์มบางที่เตรียมจากวัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS เมื่อเวลาผ่านไป 1 เดือน.....	66
4.3 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าและการทะลุผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรของฟิล์มบาง ที่เตรียมจากวัสดุ PEDOT:PSS และ วัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทิน ออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์.....	69
4.4 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าและการทะลุผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรของฟิล์มบาง ที่เตรียมจากวัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึก ลูกบาศก์.....	71
4.5 ส่วนประกอบของน้ำหมักนำไฟฟ้าที่อัตราส่วนระหว่างระหว่างวัสดุนาโนอินเดียมทินออกไซด์ และ PEDOT:PSS ต่างกัน	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์.....	6
2.2 ผังการเกิดพันธะไฮโดรเจนของ PEDOT:PSS ที่กระจายตัวในน้ำ.....	7
2.3 กราฟ XRD ของอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ที่เฟสเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผา	10
2.4 แสดงภาพของอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ก. โครงสร้าง rhombohedral และ ข. โครงสร้าง cubic.....	10
2.5 ภาพ ก. ผงอินเดียมทินออกไซด์ที่เตรียมได้ ข. ผงอินเดียมทินออกไซด์ที่กระจายตัวในน้ำ.....	12
2.6 กราฟ XRD ของอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคการตกตะกอนร่วมและเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล	14
2.7 กราฟ XRD ของอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคโซลโวเทอร์มอล	15
2.8 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าและค่าคงที่แลคทิตกับปริมาณทินที่เพิ่มขึ้นในอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์	16
2.9 แสดงสมบัติไฟฟ้าของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคการพิมพ์	17
2.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการทะลุผ่านของที่มีความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรและค่าความต้านทานไฟฟ้ากับปริมาณความเข้มข้นของท่อนาโนอินเดียมทินออกไซด์	18
2.11 แสดงข้อไฟฟ้าโปร่งแสงจากพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ปลูกบนฐานรองรับโค้งงอได้	19
2.12 แสดงการทดสอบความงอได้ของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์และฟิล์มบางผสมอนุภาคท่อนาโน/ท่อคาร์บอนนาโน/PEDOT:PSS ที่ปลูกบนฐานรองรับโค้งงอได้ ก. กราฟเปรียบเทียบความต้านทานแผ่นกับมุมการงอของฐานรองรับ ข. และ ค. แสดงภาพฟิล์มบางผสมที่สามารถงอได้	20
2.13 แสดงภาพน้ำหมึกไฮบริดผสมระหว่างอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ความเป็นผลึกสูงกับสารละลายอินเดียมทินออกไซด์	21
2.14 แสดงภาพข้อไฟฟ้าโปร่งแสงงอได้ขณะทดลองให้หลอดไฟเปล่งแสง	21
2.15 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ข้อไฟฟ้าโปร่งแสงจาก PEDOT:PSS เป็นส่วนประกอบ	22
2.16 แสดงการตกกระทบและการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ตามกฎของแบรกก์.....	24

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.17 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	24
2.18 ระบบ Michelson Interferometer ใน FT-IR สเปกโตรมิเตอร์	27
3.1 แสดงภาพเครื่องปั่นเหวี่ยง	32
3.2 แสดงภาพเตาอบลมร้อน	32
3.3 แสดงภาพเตาเผา	33
3.4 แสดงภาพหม้ออัดไอน้ำหรือ autoclave	34
3.5 แผนภาพแสดงการแยกตะกอนออกจากสารละลาย	35
3.6 แสดงผังขั้นตอนการเตรียมอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์	35
3.7 แสดงขั้นตอนการเตรียมฟิล์มด้วยเทคนิคการหยด	38
3.8 แสดงผังขั้นตอนการเตรียมฟิล์มด้วยเทคนิคการหมุนเคลือบ	39
3.9 ภาพเครื่องพิมพ์กระดาษ cannon IP2770	39
4.1 กราฟเปรียบเทียบความต้านทานไฟฟ้าของ ก) ฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายอินเดียมทินออกไซด์ สารละลายผสมระหว่างอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS และ สารละลาย PEDOT:PSS ข) ฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายผสมระหว่างอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS และสารละลาย PEDOT:PSS	42
4.2 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของฟิล์มที่เตรียมจากสารละลาย PEDOT:PSS และ สารละลายอินเดียมทินออกไซด์	43
4.3 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของฟิล์มที่เตรียมจากสารละลาย PEDOT:PSS และ สารละลายผสมระหว่างอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS	44
4.4 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มที่เตรียมจาก (ก) สารละลาย อินเดียมทินออกไซด์ความเข้มข้นโดยมวลร้อยละ 10 (ข) สารละลาย PEDOT:PSS สารละลายผสม ระหว่างพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS และอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ความเข้มข้น (ค) ร้อย ละ 1 (ง) ร้อยละ 5 (จ) ร้อยละ 20 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดแรงอะตอมของฟิล์มที่เตรียมจาก	

(ฉ) สารละลายอินเดียมทินออกไซด์ความเข้มข้นโดยมวลร้อยละ10 (ซ) สารละลายPEDOT:PSS สารละลายผสมระหว่างพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS และอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ความเข้มข้น (ฅ) ร้อยละ1 (ญ) ร้อยละ5 (ฎ) ร้อยละ20 และ ภาพเฟสจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดแรงอะตอมของฟิล์มที่เตรียมจาก (ฌ) สารละลายอินเดียมทินออกไซด์ความเข้มข้นโดยมวลร้อยละ10 (ณ) สารละลายPEDOT:PSS สารละลายผสมระหว่างพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS และอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ความเข้มข้น (ด) ร้อยละ1 (ท) ร้อยละ5 (ธ) ร้อยละ20	45
4.5 แสดงค่าความขรุขระ (R_{rms}) ของแต่ละฟิล์ม โดยวัดทั้งหมด 15 ตำแหน่งทั่วฟิล์ม.....	47
4.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคที่ได้หลังกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล	48
4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส.....	49
4.8 เปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมระหว่างอินเดียมทินไฮดรอกไซด์และอินเดียมทินออกไซด์ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งทั้งสองตัวอย่างใช้ระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอลเท่ากันคือ 4 ชั่วโมง.....	50
4.9 ขนาดผลึกของอินเดียมทินออกไซด์ในทิศ (222).....	51
4.10 แสดงภาพจาก FE-SEM ของอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ที่ระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอลตั้งแต่ 4 ถึง 48 ชั่วโมง ซึ่งอุณหภูมิการเผาเท่ากันที่ 500 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และแสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์.....	52
4.11 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ที่ความเข้มข้นสารตั้งต้นเพิ่มขึ้น 8 เท่า ระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอลเป็น 4 ชั่วโมง และเผาด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง	53
4.12 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ ระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอลต่างกันตั้งแต่ 4 ถึง 48 ชั่วโมง อุณหภูมิการเผา 500 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง.....	54
4.13 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคอินเดียมทินไฮดรอกไซด์ออกไซด์ ระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอล 4 ชั่วโมง ที่ค่าความเป็นกรด-เบสขณะเกิดปฏิกิริยาต่างกัน	55
4.14 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักและพลังงานเชิงความร้อนของอนุภาคอินเดียมทินไฮดรอกไซด์ เป็นออกไซด์ ที่เงื่อนไขค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 12 <small>ไม่ลงเลขโดดให้ไว้ไปใส่ประโยชน์ได้บ้าง</small>	56
4.15 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์	57

4.16 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ ระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอล 4 ชั่วโมง โดยเปรียบเทียบกับอนุภาคที่ไม่ได้รับพลังงานความร้อนกับอนุภาคที่ได้รับความร้อนตั้งแต่ อุณหภูมิ 200 ถึง 1150 องศาเซลเซียส	58
4.17 เปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ เมื่อได้รับความ ร้อนที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส	59
4.18 แสดงภาพจาก FE-SEM ของอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ที่ระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอล 4 ชั่วโมง โดยอุณหภูมิการเผาตั้งแต่ 400 ถึง 1150 องศาเซลเซียส.....	60
4.19 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ที่ อุณหภูมิการเผาสูงถึง 1150 องศาเซลเซียส.....	61
4.20 แสดงภาพจาก FE-SEM ของอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ที่ระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอล 4 ชั่วโมง ซึ่งอุณหภูมิการเผาระหว่าง 500 ถึง 1150 องศาเซลเซียส และแสดงลักษณะการกระจาย ตัวของขนาดอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์	62
4.21 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม PEDOT:PSS เปรียบเทียบกับฟิล์มที่เตรียมจากวัสดุผสม ระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกต่างกัน	64
4.22 กราฟแสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง PEDOT:PSS เปรียบเทียบกับฟิล์มบางที่เตรียม จากวัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS เมื่อเวลาผ่านไป 1 เดือน	65
4.23 ฟิล์มบางที่เตรียมด้วยเทคนิคการหมุนเคลือบจาก ก.วัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาค นาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ ข.วัสดุ PEDOT:PSS และวัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์.....	67
4.24 ฟิล์มบางที่เตรียมด้วยเทคนิคการหมุนเคลือบจาก ก.วัสดุ PEDOT:PSS ที่ความเร็วการหมุน 2000 รอบต่อวินาที ข.วัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ ที่ความเร็วการหมุน 2000 รอบต่อวินาที ค.วัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ ที่ความเร็วการหมุน 4000 รอบต่อ วินาที.....	67
4.25 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมจากวัสดุ PEDOT:PSS และ วัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์.....	68
4.26 แสดงค่าการทะลุผ่านแสงของฟิล์มบางที่เตรียมจากวัสดุ PEDOT:PSS และ วัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์.....	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด

4.27 ลักษณะฟิล์มบางที่เตรียมจากวัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ ความเร็วรอบการหมุน ก) 2000 รอบต่อนาที ข) 4000 รอบต่อนาที.....	70
4.28 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมจากวัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์.....	70
4.29 แสดงค่าการทะลุผ่านแสงของฟิล์มบางที่เตรียมจากวัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์	71
4.30 แสดงการประยุกต์ใช้งานเป็นขั้วไฟฟ้าโค้งงอจากฐานรองรับพลาสติกที่เตรียมด้วยน้ำหมึกนำไฟฟ้าด้วยการพิมพ์จากเครื่องพิมพ์กระดาษ.....	72
4.31 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มที่เตรียมด้วยน้ำหมึกนำไฟฟ้าจากวัสดุนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงเฟสที่อุณหภูมิสูงบนฐานรองรับพลาสติกด้วยเทคนิคการพิมพ์โดยจำนวนครั้งการพิมพ์แตกต่างกัน	73
4.32 ค่าการทะลุผ่านแสงของฟิล์มที่เตรียมด้วยน้ำหมึกนำไฟฟ้าจากวัสดุนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงเฟสที่อุณหภูมิสูงบนฐานรองรับพลาสติกด้วยเทคนิคการพิมพ์โดยจำนวนครั้งการพิมพ์แตกต่างกัน	73
4.33 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าและการทะลุผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรของน้ำหมึกนำไฟฟ้าที่เตรียมเป็นฟิล์มบางซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างระหว่างวัสดุนาโนอินเดียมทินออกไซด์และ PEDOT:PSS ต่างกัน.....	74
4.34 แสดงการทะลุผ่านแสงของน้ำหมึกนำไฟฟ้าเมื่อประยุกต์เป็นขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิคการพิมพ์โดยสัดส่วนระหว่างอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์และ PEDOT:PSS ต่างกัน.....	76
4.35 กราฟการดูดกลืนแสงช่วง 190-300 นาโนเมตร ของน้ำหมึกนำไฟฟ้าเมื่อประยุกต์เป็นขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิคการพิมพ์โดยสัดส่วนระหว่างอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์และ PEDOT:PSS ต่างกัน.....	77
4.36 เปรียบเทียบการเกิดพันธะของฟิล์มที่เตรียมด้วยวัสดุ PEDOT:PSS และฟิล์มที่เตรียมด้วยน้ำหมึกนำไฟฟ้าที่อัตราส่วนระหว่างอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ต่อพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS เป็น 1 ต่อ 8	77
4.37 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในสายโซ่ PEDOT จากโครงสร้างเบนซอียดเป็นควินอยด์	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด

- 4.38 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของน้ำหมักนำไฟฟ้าที่เตรียมเป็นฟิล์มบางบนฐานรองรับพลาสติก
ด้วยวิธีการพิมพ์ เมื่อระยะเวลาผ่านไปนาน 3 เดือน..... 79
- 4.39 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของน้ำหมักนำไฟฟ้าที่เตรียมเป็นฟิล์มบางบนฐานรองรับพลาสติก
ด้วยวิธีการพิมพ์ เมื่อทดสอบการโค้งงอซ้ำถึง 1000 รอบ..... 79



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เป็นนวัตกรรมที่ได้รับการศึกษาและพัฒนากันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เป็นองค์ประกอบที่สำคัญนำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีที่ล้ำสมัย ดังตัวอย่างของเทคโนโลยีจอแสดงผล ที่เริ่มจากหลอดภาพรังสีแคโทด (Cathode Ray Tube; CRT) พัฒนาเป็นจอภาพผลึกเหลว (Liquid Crystal Display; LCD) จอภาพพลาสมา (Plasma Display Panel; PDP) และจอภาพไดโอดเปล่งแสงชนิดสารอินทรีย์ (Organic Light Emitting Diode; OLED) ตามลำดับ ยิ่งไปกว่านั้นปัจจุบันเทคโนโลยีจอแสดงผลยังคงพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้เกิดความก้าวหน้าล้ำสมัยยิ่งขึ้น ด้วยการปรับปรุงให้จอแสดงผลมีความโปร่งแสง (Transparent) และโค้งงอ (Flexible) ได้ ซึ่งเป็นที่แน่นอนว่าชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ย่อมได้รับการพัฒนาให้มีความโปร่งแสงและโค้งงอได้เช่นเดียวกัน

หนึ่งในชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญคือ “ขั้วไฟฟ้า” ทำหน้าที่รับหรือส่งผ่านประจุไฟฟ้า เพื่อให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้น ๆ ทำงานได้ ดังนั้นการพัฒนาขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง ให้มีความสามารถโค้งงอ จึงเป็นหัวใจสำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีในยุคปัจจุบัน ส่งผลให้มีกลุ่มนักวิจัยหลากหลายกลุ่มที่มุ่งเน้นศึกษาและวิจัยวัสดุที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง ดังงานวิจัยของ W. Cao และคณะ [1] ที่ได้ทำการศึกษาขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อินทรีย์ทางแสง (Transparent electrodes for organic optoelectronic devices) โดยการนำฟลูออไรด์เจือด้วยทินออกไซด์ (Fluoride doped Tin Oxide; FTO) อินเดียมทินออกไซด์ (Indium Tin Oxide; ITO) พอลิเมอร์นำไฟฟ้า (Conductive Polymer) และกราฟีน (Graphene) ประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง ซึ่งอินเดียมทินออกไซด์เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีสมบัตินำไฟฟ้าและมีความสามารถให้แสงทะลุผ่านได้ดี [2-3] แม้วัสดุอินเดียมทินออกไซด์จะมีสมบัติที่เหมาะสมแก่การนำมาประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงที่มีประสิทธิภาพสูง และสามารถเตรียมได้ด้วยกระบวนการอย่างง่าย ไม่ซับซ้อน ต้นทุนต่ำ อย่างเช่นกระบวนการเคลือบด้วยสารละลาย (Solution-Based Process) แต่การเตรียมขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงจากวัสดุอินเดียมทินออกไซด์ด้วยกระบวนการเคลือบด้วยสารละลายนั้นจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงมากกว่า 300 องศาเซลเซียสในการเผาผนึก (Sintering) [2, 4-5] เพื่อให้แต่ละอนุภาคของวัสดุอินเดียมทินออกไซด์เชื่อมต่องานเนื้อเดียวกันเหมาะแก่การนำไฟฟ้า ส่งผลให้ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงอินเดียมทินออกไซด์ยากแก่การโค้งงอ จึงไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับวัสดุฐานรองรับที่ยื่นหยุ่นโค้งงอได้อย่างพลาสติก และปัญหานี้ไม่ได้เกิดแต่เพียงกับขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงอินเดียมทินออกไซด์เพียงอย่างเดียวเท่านั้น ยังคงเกิด

กับขั้วไฟฟ้าวัสดุนาโนโปร่งแสง (Nanomaterials as Transparent Electrodes) ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าที่ได้รับความสนใจในการศึกษาเป็นอย่างสูงในช่วงหลายที่ผ่านมามาจนถึงปัจจุบัน [6]

จากเหตุที่กล่าวมาในข้างต้น งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะพัฒนาขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงจากวัสดุนาโนให้สามารถโค้งงอได้ ด้วยวัสดุผสม (Composite Materials) ระหว่างวัสดุนาโน (Nanomaterials) และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า (Conducting Polymer) ซึ่งวัสดุผสมนี้จะมีพอลิเมอร์นำไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นเสมือนสะพานให้พาหะ (Carrier) เคลื่อนที่ได้ดีขึ้นระหว่างแต่ละอนุภาคของวัสดุนาโน จึงทำให้ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงวัสดุผสมนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นโดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการเผาผลึก ยิ่งไปกว่านั้นการนำพอลิเมอร์นำไฟฟ้ามาใช้ร่วมในการสร้างขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงวัสดุผสม ยังส่งผลให้ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงวัสดุผสมสามารถโค้งงอได้โดยการเตรียมบนวัสดุฐานรองรับที่เป็นพลาสติก [7-8] ดังนั้นการศึกษา วิจัย และพัฒนาเพื่อให้เกิดขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงที่สามารถโค้งงอได้จึงเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการพัฒนาอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และยกระดับเทคโนโลยีให้ก้าวหน้าล้ำสมัย ยิ่งไปกว่านั้นยังเป็นการสร้างองค์ความรู้ใหม่เพื่อให้อุตสาหกรรมผลิตและพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้มีคุณภาพสูงขึ้น หรือมีความแตกต่างไปจากสินค้าในท้องตลาดเดิมนำไปสู่ความหลากหลายเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่ม เพื่อให้เกิดการพึ่งพาเทคโนโลยีที่เป็นของตนเองได้ และนำไปสู่การพัฒนาประเทศที่ยั่งยืนต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการเตรียมอนุภาคระดับนาโนด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล
- 1.2.2 เพื่อศึกษาและเตรียมน้ำหมึกนำไฟฟ้าที่สามารถประยุกต์เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงได้ด้วยการพิมพ์
- 1.2.3 เพื่อศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มบางด้วยกระบวนการเคลือบด้วยสารละลาย (Solution-Based Process)

1.3 สมมติฐานงานวิจัย

1.3.1 ขนาด และโครงสร้างผลึกของอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ที่ใช้เตรียมเป็นฟิล์มมีผลต่อความสามารถในการนำไฟฟ้าของฟิล์ม

1.3.2 วัสดุพอลิเมอร์นำไฟฟ้าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าของฟิล์มได้โดยปราศจากกระบวนการเผาผลึกที่อุณหภูมิสูง

1.3.3 อัตราส่วนระหว่างอินเดียมทินออกไซด์และพอลิเมอร์นำไฟฟ้าสำหรับเตรียมเป็นฟิล์มบางส่งผลต่อสมบัติการนำไฟฟ้า

1.4 ขอบเขตการดำเนินการ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาและสังเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal process) เพื่อให้ได้ขนาดและโครงสร้างผลึกตามที่ต้องการ แล้วนำอนุภาคที่สังเคราะห์เองได้เตรียมเป็นฟิล์มบางผสม (composite films) ระหว่างอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์กับพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS เพื่อประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง โดยขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการนี้สามารถประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พลาสติกได้ เนื่องจากกระบวนการเตรียมฟิล์มไม่ต้องใช้ความร้อนสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 รู้และเข้าใจกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล
- 1.5.2 รู้กระบวนการเตรียมน้ำหมึกนำไฟฟ้ารวมถึงสาเหตุที่ทำให้ได้น้ำหมึกนำไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพดี
- 1.5.3 รู้จักวิธีการเตรียมฟิล์มบางแบบต่างๆตลอดจนสามารถเลือกวิธีการเตรียมฟิล์มบางที่เหมาะสมกับการใช้งานนั้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง (Transparent electrode)

ขั้วไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบหนึ่งของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่ส่งผ่านกระแสไฟฟ้าให้อุปกรณ์นั้นทำงานได้ ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงมีสมบัติเพิ่มคือการทะลุผ่านของแสงในย่านตามองเห็นได้มากกว่า 80% จึงมีการนำขั้วโปร่งแสงมาประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์พวกออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (optoelectronics) เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cells) และไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์ (OLED) ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงจะถูกใช้กับด้านที่ต้องการให้แสงผ่าน สมบัติการทะลุผ่านของแสงในย่านตามองเห็นและการนำไฟฟ้าเป็นสองตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้รอยต่อระหว่างขั้วไฟฟ้ากับชั้นแอคทีฟยังมีอิทธิพลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ รอยต่อดังกล่าวมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องคือวัสดุที่ใช้และเทคนิคการปลูกขั้วไฟฟ้า จึงทำให้จำเป็นต้องพิจารณาสมบัติอื่นของขั้วไฟฟ้าด้วยเช่น ความขรุขระของพื้นผิว (surface roughness) สมบัติทางเคมีที่พื้นผิว (surface chemistry) ระดับพลังงาน (work function) ขั้นตอนการปลูก (processibility) และสมบัติเชิงกล (mechanical properties)

โดยทั่วไปวัสดุอินเดียมทินออกไซด์ถูกใช้เป็นตัวเลือกสำหรับทำขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงในอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์เนื่องด้วยมีสมบัติการนำไฟฟ้าได้ดี การทะลุผ่านแสงมาก รวมถึงมีความเสถียรเมื่อใช้งานจริง ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่ปกติใช้งานกันมีค่าความต้านทานเชิงแผ่น 20 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร และแสงในย่านตามองเห็นทะลุผ่านได้มากกว่า 80% แม้ว่าขั้วไฟฟ้าอินเดียมทินออกไซด์ได้รับความนิยมอย่างมากแต่ก็ยังคงมีข้อเสียในเรื่องของราคาที่แพงมาก นอกจากนี้มีวัสดุชนิดอื่นที่มีการประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง ซึ่งแบ่งเป็นกลุ่มได้ดังนี้

2.2.1 ออกไซด์โปร่งไฟฟ้า (Transparent Conductive Oxides; TCO) วัสดุจำพวกการเจือด้วยโลหะออกไซด์เป็นวัสดุที่นิยมโดยทั่วไปสำหรับใช้ทำเป็นขั้วไฟฟ้า วัสดุจะมีค่าการทะลุผ่านของแสงมากกว่า 80% เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีระดับพลังงานช่วงกว้าง (wide bandgap) การเจือด้วยธาตุสามารถทำให้เกิดช่องว่างออกซิเจน (oxygen vacancies) และช่วยเพิ่มการเคลื่อนของประจุซึ่งทำให้ฟิล์มมีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น ตัวอย่างวัสดุประเภทนี้เช่น อินเดียมทินออกไซด์ (ITO) อลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์ (Al-doped ZnO; AZO) แกลเลียมซิงค์ออกไซด์ (Ga-doped ZnO; GZO) และ ฟลูออรีนทินออกไซด์ (F-doped SnO; FTO)

2.2.2 Metal-Based (Semi-)Transparent Electrodes ชั้นฟิล์มของโลหะเช่น อะลูมิเนียมหรือเงิน ที่มีความหนาฟิล์มในระดับ 100 นาโนเมตร ส่วนใหญ่จะถูกใช้เป็นชั้นขั้วสำหรับสะท้อนแสง (reflecting electrodes) ในอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ขณะที่ฟิล์มบางโลหะที่อยู่ในระดับต่ำกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นที่มีเหตุเป็นข้อยกเว้น และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารต้นฉบับที่มีการนำมาใช้

20 นาโนเมตร (ultrathin metal layers) จะแสดงสมบัติการกึ่งทะลุผ่านแสง (semitransparent) ในย่านการมองเห็น จึงมีการใช้ ultrathin metal layers แทนชั้นไฟฟ้าอินเดียมทินออกไซด์ในห้องทดลองอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ตัวอย่างชั้นไฟฟ้าที่จำแนกอยู่ในประเภทนี้คือ ultrathin metal layers, dielectric/metal/dielectric multilayer structures และ metal grids

2.2.3 วัสดุพอลิเมอร์นำไฟฟ้า (Polymeric Transparent Conductors) เนื่องจากสมบัติการทะลุผ่านแสงได้มาก ง่ายต่อกระบวนการเตรียมด้วยสารละลายและยังประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์โค้งงอได้ดี วัสดุพอลิเมอร์นำไฟฟ้าจึงถูกเลือกใช้เป็นชั้นไฟฟ้าโปร่งแสงที่มีต้นทุนต่ำ สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าของชั้นไฟฟ้าชนิดนี้ วัสดุพอลิเมอร์นำไฟฟ้าบางตัวเช่น polyaniline, polypyrrole และ polythiophene ถูกเพิ่มประสิทธิภาพโดยการเจือทางเคมี ในชนิดของวัสดุพอลิเมอร์นำไฟฟ้าทั้งหลาย PEDOT:PSS เป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่ประสบความสำเร็จมากที่สุด ถูกใช้เป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าอย่างกว้างขวางในอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์

2.2.4 Nanomaterials as Transparent Electrodes วัสดุในขนาดระดับนาโนเมตรถูกศึกษากันอย่างกว้างขวางตั้งแต่อดีตเมื่อ 20 ปีก่อน ในเรื่องของการพยายามควบคุมการสังเคราะห์ รวมถึงการประยุกต์ไปใช้งานต่างๆที่ได้รับความสนใจขณะนั้น วัสดุนาโนบางชนิดถูกใช้เป็นชั้นไฟฟ้าโปร่งแสงเช่น ท่อคาร์บอนนาโน (CNTs) กราฟีน (graphene) และ ท่อนาโนโลหะ (metal NWs) ด้วยสมบัติออปโตอิเล็กทรอนิกส์(นำไฟฟ้าและโปร่งแสง)ที่น่าสนใจของวัสดุประเภทนี้ รวมถึงสามารถเตรียมด้วยกระบวนการจากสารละลาย (solution-processed) และทำในอุตสาหกรรมการผลิตระดับใหญ่ได้ ทำให้วัสดุดังกล่าวได้รับความสนใจใช้ทำเป็นชั้นไฟฟ้าโปร่งแสง[1]

2.2 วัสดุนาโนอินเดียมทินออกไซด์ (indium tin oxide; ITO)

วัสดุนาโนอินเดียมทินออกไซด์ (indium tin oxide; ITO) เกิดจากการผสมกันทางเคมีระหว่างอินเดียมออกไซด์ (In_2O_3) และทินออกไซด์ (SnO_2) มีสูตรทางเคมีคือ $\text{In}_2\text{O}_3:\text{SnO}_2$ วัสดุนี้นี้เป็นการเจือทินออกไซด์ลงในอินเดียมออกไซด์ ทำให้เกิดช่องว่างออกซิเจน (oxygen vacancy) ขึ้น ส่งผลให้วัสดุนำไฟฟ้าได้ อัตราการเจือ โดยทั่วไปอยู่ที่ 8-10% อนุภาคอินเดียมทินออกไซด์อาจเป็นสีเหลือง สีเหลืองอมเขียว สีเทาอมเหลือง สีเทา หรือสีน้ำเงินก็ได้ แสดงดังรูปที่ 2.1 ไม่ละลายในน้ำ จุดหลอมเหลวอยู่ที่ 1910 องศาเซลเซียส นอกจากนี้การเตรียมเป็นฟิล์มบางเลยโดยไม่ต้องเตรียมเป็นอนุภาคก่อนของอินเดียมทินออกไซด์สามารถเตรียมได้หลายวิธีทั้งการเคลือบด้วยสปัตเตอร์ริง (sputtering) การเคลือบด้วยวิธีการระเหย (evaporation) หรือ การเคลือบโดยไอเชิงเคมี (Chemical Vapor Deposition) ฟิล์มที่เตรียมได้จะมีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีและสามารถยอมให้แสงย่านการมองเห็นทะลุผ่านได้ การนำไปใช้งานทั่วไปใช้เคลือบบนกระจกหรือพลาสติกสำหรับใช้เป็น ส่วนประกอบสำคัญในอุปกรณ์เช่น แผงสัมผัส (touch panels) แผ่นเรืองแสงอิเล็กทรอนิกส์

(electroluminescent), จอภาพผลึกเหลว (LCDs), จอแสดงผลพลาสมา (plasma displays) จอแบน (flat panel displays) จอคอมพิวเตอร์แบบสัมผัส (touch computer screens), โทรศัพท์มือถือ (cell phones) และเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น [9, 10]

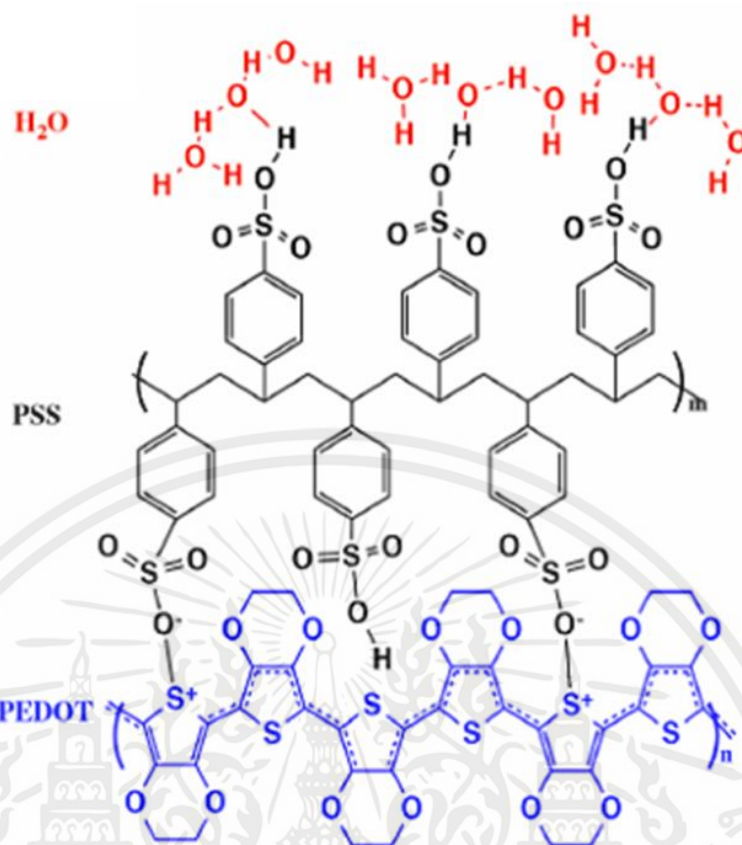


รูปที่ 2.1 ลักษณะอนุภาคอินทรีย์ออกไซด์

2.3 Poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonic acid)

Poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonic acid) ชื่อตัวย่อคือ PEDOT:PSS เป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดทีฟพอลิเมอไรเซชัน (oxidative polymerization) ของมอนอเมอร์ EDOT (3,4-ethylenedioxythiophene) ในตำแหน่งหนึ่งของพอลิเมอร์ PSS (polystyrene sulfonic acid) โดยหมู่ฟังก์ชันของ PSS ทำหน้าที่เป็นตัวรับประจุบวกจาก EDOT ทำให้เกิด PEDOT สายโซ่สั้นที่ถูกละลายด้วย PSS สำหรับวัสดุ PEDOT:PSS ที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปมีประจุบวก (hole) ประมาณ 1 ประจุบวกต่อ 3 หน่วยมอนอเมอร์ จึงทำให้วัสดุสามารถนำไฟฟ้าได้โดยเกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุบวกไปตามสายโซ่หลัก ทั้งยังมีลักษณะโปร่งแสง มีความยืดหยุ่นดังแสดงในรูป 2.2 จึงถูกมักใช้ในกระบวนการผลิตที่ต้นทุนต่ำเช่นเทคโนโลยีการพิมพ์ การประยุกต์ใช้สามารถเป็นส่วนประกอบของ จอแสดงผล จอสัมผัส ไดโอดเปล่งแสงอินทรีย์ และเซลล์แสงอาทิตย์ [11, 12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ผังการเกิดพันธะไฮโดรเจนของ PEDOT:PSS ที่กระจายตัวในน้ำ [13]

2.4 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนด้วยกระบวนการทางเคมี

2.4.1 กระบวนการตกตะกอน (precipitation)

การตกตะกอนเป็นเทคนิคเชิงเคมีแบบเปียกประเภทหนึ่ง ถูกนำมาใช้ในการเตรียมสารประกอบของเกลืออนินทรีย์ชนิดต่างๆได้อย่างมากมาย การตกตะกอนเป็นการทำให้โมเลกุลหรือไอออนที่ละลายอยู่ในสารละลายแยกตัวออกมาจากสารละลาย โดยอาศัยการเติมสารเคมีที่เหมาะสมที่เรียกว่าพรีซิพิแทนท์ (precipitant) อย่างช้าๆในปริมาณที่เหมาะสม หรือมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความดัน เพื่อลดขีดความสามารถในการละลายของระบบลง ทำให้ระบบมีการตกตะกอนเกิดขึ้นได้

การตกตะกอนประกอบไปด้วยกลไกสำคัญคือ การเกิดนิวเคลียส (nucleation) และการเติบโต (growth) โมเลกุลหรือไอออนของสารแปลกปลอมที่ปะปนอยู่ในสารละลายโดยการเกาะแนบอยู่กับพื้นผิวบางส่วนของอนุภาคอะตอม สามารถที่จะทำให้กลไกการเติบโตของระบบเปลี่ยนแปลงไป

ได้เสมอ นอกจากนี้การเติบโตของตะกอนตามแนวแกนของผลึกด้วยอัตราการเติบโตที่แตกต่างกันก็ยังเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ตะกอนที่ได้ มีรูปเป็นแบบแอนไอโซทรอปี (anisotropy)

สารละลายที่มีระดับของความอิ่มตัวแบบยิ่งยวดเพิ่มสูงขึ้น อาจจะมีอัตราการเกิดนิวเคลียสเพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลทำให้ตะกอนที่ได้มีขนาดของอนุภาคเล็กลง หรืออาจจะทำให้ไอออนทั้งหมดเกิดการตกตะกอนอย่างรวดเร็ว การเติมตัวช่วยเร่งการตกตะกอนลงไปในสารละลายด้วยปริมาณที่มากเกินไป อาจจะทำให้ตะกอนที่เกิดขึ้นละลายกลับคืนสู่สารละลายได้อีกในขณะที่ทำการเติมตัวช่วยเร่งการตกตะกอนนั้นจะต้องคอยกวนสารละลายอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้การตกตะกอนเป็นไปอย่างช้าๆและทั่วถึง จึงทำให้ตะกอนที่ได้มีขนาดโตและง่ายต่อการกรอง แต่ถ้าการตกตะกอนเกิดเร็วจนเกินไปก็อาจจะทำให้มีโมเลกุล หรือไอออนของสารแปลกปลอมปะปนเข้าไปในเนื้อของตะกอนแบบถาวรได้ ซึ่งจะทำให้ตะกอนที่ได้ไม่บริสุทธิ์ บางครั้งจึงจำเป็นต้องมีการเพิ่มขึ้นตอนของการย่อยตะกอนเข้าไปอีก (digestion) ซึ่งสามารถทำได้โดยการให้ความร้อนแก่สารละลาย เพื่อให้พวกตะกอนที่มีขนาดเล็กละลายกลับคืนสู่สารละลายแล้วค่อยเกิดการตกตะกอนขึ้นมาใหม่ด้วยขนาดที่ใหญ่กว่าเดิม

การควบคุมการตกตะกอนสามารถทำได้ด้วยการควบคุมอัตราการผสมกันและอุณหภูมิของสารละลาย นอกจากนี้ยังมีตัวแปรที่สำคัญอื่นๆอีกได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลาย ค่าความเป็นกรดเบส (pH) อัตราการผสมกันและการกวนสารละลายให้เข้ากัน ในการตกตะกอนนั้นจำเป็นต้องมีการทิ้งสารละลายเอาไว้ช่วงระยะเวลาหนึ่ง เพื่อให้การตกตะกอนเป็นไปอย่างสมบูรณ์ ซึ่งในบางกรณีก็ใช้เวลาเพียง 5 นาที แต่ในบางกรณีก็อาจจะต้องใช้เวลานานกว่า 24 ชั่วโมง ทั้งนี้แล้วแต่ชนิดของปฏิกิริยา หลังจากทำการตกตะกอนแล้วบางทีก็ต้องมีกระบวนการย่อยตะกอน การล้างตะกอน หรือในบางกรณีต้องมีการทำให้เกิดการตกตะกอนซ้ำอีกครั้งแล้วจึงนำไปผ่านการกรองต่อไป

เมื่อแคทไอออนในสารละลายมีขนาดที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน และมีความคล้ายคลึงกันทางเคมี การตกตะกอนของเกลือที่มีแคทไอออนอยู่ในสารละลายของแข็ง (solid solution) ก็อาจจะเกิดขึ้น ซึ่งเรียกว่าการตกตะกอนร่วม (co-precipitation) ในการตกตะกอนที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันนั้น ความเข้มข้นของไอออนในเกลือจะต่างไปจากในสารละลาย และอาจทำให้องค์ประกอบของการตกตะกอนร่วมนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงไปในระหว่างที่กำลังมีการตกตะกอนได้ พวกที่มีโครงสร้างเหมือนกันแต่สามารถละลายได้น้อยกว่า มักจะมากระจุกตัวอยู่ในสารประกอบของเกลือ

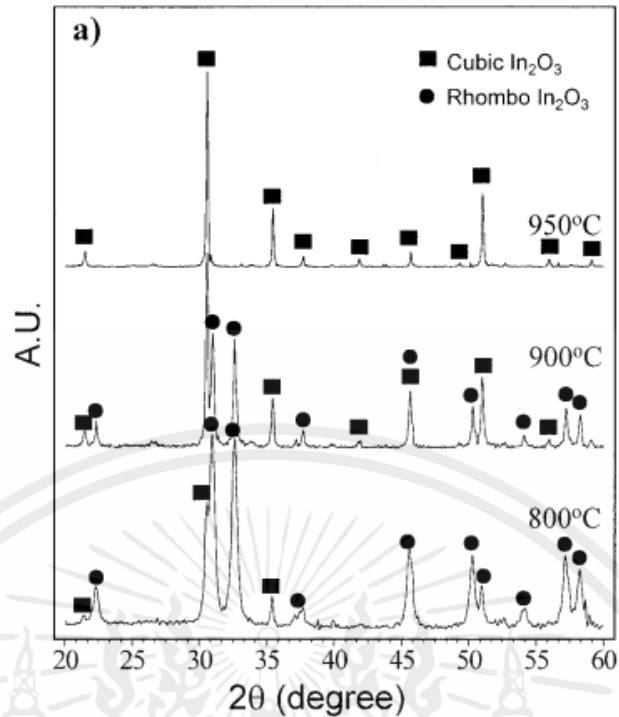
ปัญหาพื้นฐานในการตกตะกอนร่วมก็คือตัวทำปฏิกิริยาที่ต่างชนิดกัน ในสารละลายมีอัตราการแยกสารละลายด้วยน้ำแตกต่างกัน ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดการแยกห่างออกจากกันของสารที่ตกตะกอนไปกองอยู่ด้านใดด้านหนึ่ง ดังนั้นจึงต้องพยายามหาเงื่อนไขที่เหมาะสม เพื่อให้การตกตะกอนมีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน ปกติแล้วเทคนิคการตกตะกอนร่วมจะทำให้เกิดตะกอนผสมที่มีความใกล้เคียงกันและหลายๆกรณีก็ต้องมีการนำของผสมที่ได้ไปเผาแคลไซน์เพื่อให้ได้

องค์ประกอบทางเคมีและเฟสที่มีความเป็นผลึกตามที่ต้องการ แต่ก็ต้องระวังปัญหาเรื่องความจำเป็นต้องใช้การบดย่อยเพิ่มเติม ซึ่งมักจะก่อให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนของสิ่งแปลกปลอม

เทคนิคการตกตะกอนร่วมนั้นเริ่มจากการผสมสารละลายของพวกโลหะที่เป็นเกลือซึ่งมักจะอยู่ในรูปของไนเตรท กับสารช่วยให้เกิดการตกตะกอน (precipitation agent) ซึ่งเป็นพวกที่มีความสามารถในการละลาย (solubility) ต่ำเป็นสมบัติสำคัญ ในระหว่างที่ทำการตกตะกอนร่วมนั้น ลักษณะของการตกตะกอนที่อาจเป็นไปได้มีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ การตกตะกอนร่วมแท้ (True coprecipitation) ซึ่งเป็นการตกตะกอนของสารผสมระหว่างโลหะสารตั้งต้นที่มีปริมาณสัมพันธ์เคมี (Chemical stoichiometry) จำเพาะ และการตกตะกอนร่วมที่มีการจับก้อนในเวลาเดียวกัน (Simultaneous precipitation and coaggregation) ซึ่งเป็นการตกตะกอนที่เกิดจากการจับก้อนกันของกระจุกตะกอนที่เกิดจากอนุภาคต่างพวกกัน เช่นการจับก้อนของพวกคอลลอยด์ที่ไม่เสถียรกับพวกที่จับก้อนแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (hetero-coagulate) แล้วเกิดเป็นตะกอนตกลงมา ส่วนการตกตะกอนแบบใดจะเกิดขึ้นได้บ้างนั้นก็ขึ้นอยู่กับพฤติกรรมทางอุณหพลวัตของสารละลายซึ่งจะเป็นตัวกำหนดการก่อเกิดของเฟสที่เป็นของแข็งต่อไป และยังถ้าสามารถตรวจสอบชนิดของสารเชิงซ้อนที่ประกอบด้วยโลหะหลายชนิดผสมกันอยู่ที่เกิดขึ้นในระหว่างทำการตกตะกอนได้ การทำนายชนิดของตะกอนที่จะได้ก็จะมีความสะดวกมากยิ่งขึ้น[14]

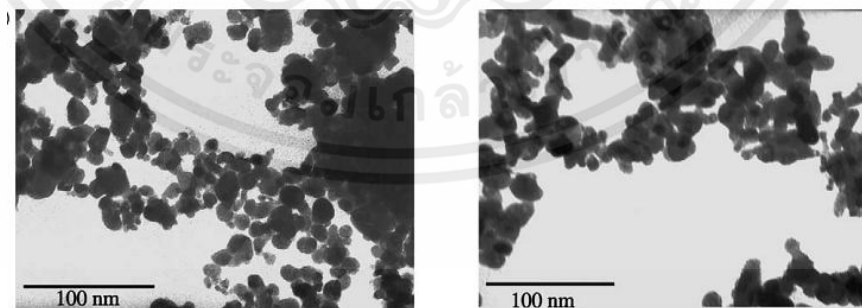
ในปี ค.ศ. 2002 Bong-Chull Kim และคณะ ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมโดยควบคุมระยะเวลาการตกตะกอน (Aging time) ของสารละลายตั้งแต่ 0 ถึง 48 ชั่วโมง จากนั้นนำผงตะกอนที่สังเคราะห์มาทำการเผาแคลไซน์ (Calcine) ที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าอนุภาคผงนาโนอินเดียมทินออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ก่อนทำการเผาแคลไซน์จะมีโครงสร้างผลึกผสมกันอยู่ระหว่างโครงสร้างผลึกแบบ cubic และ rhombohedral แต่เมื่อทำการเผาแคลไซน์แล้วนั้น อนุภาคผงนาโนอินเดียมทินออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ rhombohedral จะเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างผลึกแบบ cubic ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และเป็นโดยสมบูรณ์เป็นโครงสร้างผลึกแบบ cubic ทั้งหมดที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส [15] ดังแสดงในรูป 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 กราฟ XRD ของอนุภาคอินเดียมทिनออกไซด์ที่เฟสเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผา

และต่อมาในปี ค.ศ. 2003 Bong-Chull Kim และคณะ ยังคงทำการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทिनออกไซด์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมอย่างต่อเนื่อง โดยการควบคุมค่า pH ของสารละลาย และระยะเวลาหลังเกิดการตกตะกอนร่วม เพื่อให้ได้อนุภาคนาโนอินเดียมทिनออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน 2 แบบ คือ cubic และ rhombohedral โดยขนาดอนุภาคของผลึกทั้ง 2 แบบมีขนาดที่ใกล้เคียงกันที่ประมาณ 15 นาโนเมตร และเมื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาพบว่า โครงสร้างผลึกแบบ rhombohedral จะมีลักษณะทางสัณฐานวิทยาเป็นทรงกลม แต่โครงสร้างผลึกแบบ cubic จะมีลักษณะทางสัณฐานวิทยาเป็นเหลี่ยมเป็นมุม[16] ดังแสดงในรูปที่ 2.4



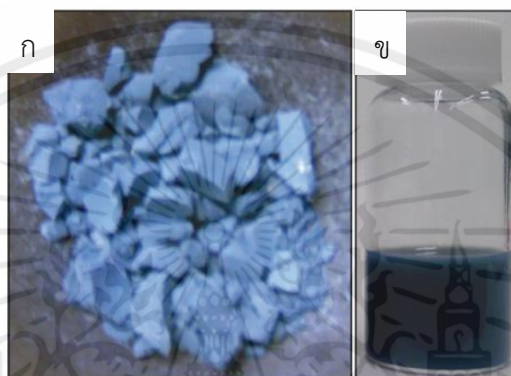
รูปที่ 2.4 แสดงภาพของอนุภาคอินเดียมทिनออกไซด์ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เอกสารนี้เป็น ก.โครงสร้าง rhombohedral และ ข.โครงสร้าง cubic นั้น ไม่น่าสนใจให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปี ค.ศ. 2004 Ki Young Kim และ Seung Bin Park ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ด้วยเทคนิคการตกตะกอนร่วมของอินเดียมคลอไรด์และทินคลอไรด์ โดยควบคุมค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของสารละลาย อุณหภูมิออกซิเดชัน (thermal oxidation temperature) และ ปริมาณดีบุก (Sn) ที่เจือลงไป ขนาดอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มีขนาดประมาณ 20 - 30 นาโนเมตร และยังพบว่าปริมาณดีบุกที่เจือลงไปตั้งแต่ 3.18 ถึง 21.11 at.% จะส่งผลให้ขนาดอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ลดลง ยิ่งไปกว่านั้นในการศึกษาครั้งนี้ยังพบอีกกว่าขนาดของอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ที่มีขนาดใหญ่จะส่งผลให้ความต้านทานไฟฟ้าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิออกซิเดชันช่วง 400 ถึง 700 องศาเซลเซียส [17]

Ja Eun Song และคณะ ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมและเทคนิค thermal degradation ในปี ค.ศ. 2005 โดยทำการตกตะกอนร่วมที่อุณหภูมิห้องจากนั้น นำผงที่เตรียมได้ไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส อนุภาคที่ได้มีโครงสร้างผลึกแบบ cubic สำหรับการเตรียมด้วยเทคนิค thermal degradation ซึ่งเป็นการเตรียมในสารละลายจำพวกแอลกอฮอล์ อนุภาคที่ได้ก่อนนำไปเผาแคลไซน์มีโครงสร้างผลึกเป็นอินเดียมออกไซด์ไฮดรอกไซด์ (InOOH) และอินเดียมไฮดรอกไซด์ (In(OH)_3) และเมื่อนำไปผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส จะได้อนุภาคอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกแบบ rhombohedral การเปลี่ยนแปลงเฟส (phase transition) ของอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์จะถูกวิเคราะห์ด้วยวัดการเปลี่ยนแปลงพลังงาน (การดูดหรือคายพลังงาน) ของสารตัวอย่าง (diffractational scanning calorimeter; DSC) และวัดค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction; XRD) ตามลำดับ [18]

ปี ค.ศ. 2006 Shitao Li และคณะ ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ด้วยเทคนิคการตกตะกอนร่วมที่อุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาต่างกัน เพื่อให้ได้สารประกอบอินเดียมทินไฮดรอกไซด์ จากนั้นนำผงของสารประกอบอินเดียมทินไฮดรอกไซด์ที่เตรียมได้มาทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างกันภายใต้สภาวะของแก๊สอาร์กอนที่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส พบว่าอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ที่เตรียมได้มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่หลากหลายมีทั้งรูปร่างทรงกลม (spherical) และทรงกระบอก (rod) และยังได้ทำการวิเคราะห์น้ำหนักและพลังงานความร้อนที่เปลี่ยนแปลง (TG/DTA) วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) และลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) พบว่ามีการการเปลี่ยนแปลงเฟสจากอินเดียมทินไฮดรอกไซด์ไปเป็นอินเดียมทินออกไซด์ทั้งโครงสร้างผลึกแบบ cubic และ rhombohedral ที่อุณหภูมิแคลไซน์ 600 องศาเซลเซียส และยิ่งไปกว่านั้นยังพบอีกว่าเมื่อมีการให้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์สูงขึ้นจะส่งผลให้ขนาดของผงผลึกอินเดียมทินไฮดรอกไซด์ใหญ่ขึ้นตามลำดับ [19]

และในปี ค.ศ. Jhon L. Cuya Huaman ได้ทำการสังเคราะห์ผงอินเดียมทินออกไซด์ครั้งละปริมาณมากด้วยเทคนิคการตกตะกอนร่วม สารตั้งต้นใช้เป็นอินเดียมคลอไรด์และทินคลอไรด์ซึ่งศึกษาภายใต้ตัวแปรดังนี้ ตัวทำละลายแอลกอฮอล์ต่างชนิดกัน ความเข้มข้นกรดที่ใช้ต่างกัน และอุณหภูมิระหว่างปฏิกิริยา (reaction temperature) จากตัวทำละลายทั้งหมดที่ใช้ ตัวทำละลาย 2-octanol ช่วยให้สังเคราะห์ผงอินเดียมทินออกไซด์ได้ปริมาณมากที่สุด นอกจากนี้ผงที่ได้สามารถละลายในน้ำได้ดี มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 5 นาโนเมตร และมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำถึง 1.3 โอห์มตารางเซนติเมตร [20] ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ภาพ ก. ผงอินเดียมทินออกไซด์ที่เตรียมได้ ข. ผงอินเดียมทินออกไซด์ที่กระจายตัวในน้ำ

2.4.2 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal)

การเตรียมอนุภาคนาโนด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล ซึ่งเทคนิคนี้เกี่ยวข้องกับการให้ความร้อนแก่ตัวทำปฏิกิริยาพวกเกลือของโลหะออกไซด์ ไฮดรอกไซด์ หรือผลึกต่างๆที่อยู่ในรูปของสารละลาย หรือสารแขวนลอย ด้วยอุณหภูมิและความดันที่สูงขึ้น ซึ่งการตกตะกอนภายใต้สภาวะดังกล่าวนี้จะทำให้เกิดผงที่ปราศจากน้ำ (anhydrous powders) ที่มีลักษณะเฉพาะค่อนข้างโดดเด่นเป็นพิเศษ นอกจากนี้ผงที่ได้ยังมีขนาดอนุภาคเล็กมากโดยทั่วไปจะมีขนาดประมาณ 10-12 นาโนเมตร มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้อย ส่วนใหญ่เป็นอนุภาคของผลึกเชิงเดี่ยว มีความบริสุทธิ์สูง และมีความเป็นเนื้อเดียวกันทางเคมีดี

เทคนิคไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) มีความแตกต่างไปจากเทคนิคการตกตะกอนตรงที่ต้องมีการใช้อุณหภูมิและความดันสูงในการเกิดปฏิกิริยา อุณหภูมิที่ใช้งานมักจะใกล้เคียงกับบริเวณจุดเดือดกับอุณหภูมิวิกฤตของน้ำ (374 องศาเซลเซียส) และความดันที่ใช้จะอยู่ในช่วงประมาณถึง 20 เมกะพาสคัล จึงต้องเตรียมในหม้อนึ่งอัดไอ (autoclave) ทำด้วยเหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงทนทาน และสามารถทนอุณหภูมิได้สูงตามต้องการ โดยปกติแล้วจะมีการบุผนังภายในของหม้อนึ่งอัดได้วยพวกพลาสติก เช่น เทฟลอน (Teflon) อีกทีเพื่อลดปัญหาเรื่องการกัดกร่อนของผนังหม้อจาก

สารละลาย นอกจากนี้ยังมีเทคนิคอื่นๆที่ใช้กระบวนการเตรียมแบบไฮโดรเทอร์มอลด้วย เช่นการปลูกผลึกแบบไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal crystallization) ซึ่งในกรณีนี้วัสดุตั้งต้นที่ไม่ค่อยมีการจัดเรียงของอะตอมอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งจะเกิดการตกผลึกภายใต้สภาวะของการทำไฮโดรเทอร์มอลได้เป็นผลึกที่มีขนาดอนุภาคเล็กละเอียด กระบวนการสำคัญที่เกิดขึ้นในระหว่างที่มีการตกตะกอนแบบไฮโดรเทอร์มอลคือ การละลายและการตกตะกอน

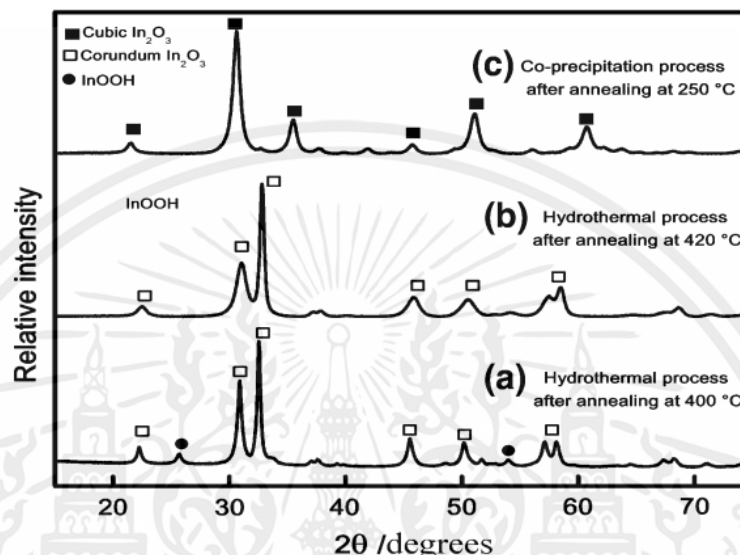
การเตรียมผงด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลถูกนำมาใช้ในระดับห้องปฏิบัติการสำหรับการเตรียมสารประกอบของออกไซด์อย่างง่าย ออกไซด์ที่มีการเจือสารอื่นและพวกสารประกอบของออกไซด์เชิงซ้อนมากมายหลายชนิด สำหรับการนำไปใช้ในการผลิตระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่นั้นยังไม่ค่อยเป็นที่แพร่หลายนัก ถึงแม้ว่าวิธีนี้จะทำให้ได้ผงที่มีลักษณะเฉพาะตรงตามความต้องการอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามการทำให้ผงตะกอนแห้งสนิทก่อนจะทำให้มีการรวมตัวกันอาจจะไปหน่วงอัตราการเผาซินเตอร์ที่มีผลต่อการเชื่อมประสานกันของอนุภาคที่บริเวณจุดสัมผัส ซึ่งมีผลต่อการทำให้อนุภาคเกิดการเชื่อมติดกันอย่างหนาแน่น จนกลายเป็นกระจุกของอนุภาคที่แข็งแกร่งได้ การเตรียมอนุภาคด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลเป็นเทคนิคที่อยู่ระหว่างการเตรียมอนุภาคจากปฏิกิริยาแบบสถานะของแข็งกับเทคนิคเชิงเคมีแบบพิเศษ ที่ต้องพิจารณาถึงความสมดุลระหว่างค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้นกับความเป็นเนื้อเดียวกันที่ดีขึ้น สารผสมของพวกที่เป็นผงของออกไซด์หรือเจล อาจจะเป็นสารประกอบที่มีพวกผลึกไฮดรอกไซด์ผสมกันอยู่ เมื่อมีการให้ความร้อนประมาณ 180-700 องศาเซลเซียส ภายใต้แรงดันขนาดประมาณ 1-100 เมกะพาสคัล

การเตรียมผงด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลจะอาศัยการเกิดผลึกของสารเคมีภายในน้ำที่ร้อนภายใต้แรงดันสูง ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้กันโดยทั่วไปจะอยู่ที่ประมาณ 100 ถึง 300 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันที่อาจสูงถึง 15 เมกะพาสคัล ผงบริสุทธิ์และมีขนาดอนุภาคเล็กหลายชนิดสามารถเตรียมขึ้นมาได้ โดยสภาวะที่อาจจะเป็นแบบที่เกิดการออกซิเดชันหรือรีดักชันก็ได้ และที่สำคัญผงที่ได้จะเป็นผลึกเชิงเดี่ยวขนาดเล็กที่ไม่จำเป็นต้องมีการเผาหรือการบดย่อยอีกต่อไป

โดยปกติแล้วสารละลายที่สูญเสียส่วนที่เป็นของเหลวเนื่องจากมีการระเหยออกไปจะเกิดการอิ่มตัวยิ่งยวด (supersaturation) จากนั้นจะมีการเกิดนิวเคลียส และการเติบโตตามมา ในกรณีที่อัตราการเกิดนิวเคลียสเป็นไปอย่างรวดเร็วแต่ในขณะอัตราการเติบโตเป็นไปอย่างช้าๆ ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นอนุภาคขนาดเล็กละเอียด ด้วยเหตุนี้จึงเกิดมีแนวคิดที่จะพยายามทำให้สารละลายเกิดมีการอิ่มตัวยิ่งยวดแบบฉับพลัน จะได้มีการเกิดนิวเคลียสเป็นจำนวนมากภายในช่วงเวลาสั้น ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นก็สามารทำได้โดยการพยายามกระจายสารละลายออกจากกันจนเป็นละอองเล็กๆที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากๆ ทำให้ส่วนที่เป็นของเหลวในแต่ละหยดสามารถเกิดการระเหยไปได้อย่างรวดเร็ว[14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่พิมพ์ในหนังสือพิมพ์ซึ่งมีเนื้อหาที่คล้ายกันนี้ มีข้อมูลเกี่ยวกับวิธีการดำเนินการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ในปี ค.ศ. 2010 A. Solieman และคณะ ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบหกเหลี่ยมด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 250 องศา

เซลเซียส ความดัน 40 บาร์ เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง โดยใช้อินเดียมคลอไรด์และทินคลอไรด์เป็นสารตั้งต้น หลังผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลจะเกิดตะกอนมีลักษณะสีขาวซึ่งเป็นสารอินเดียมออกไซด์ไฮดรอกไซด์ (InOOH) ผงอินเดียมออกไซด์ไฮดรอกไซด์นี้จะถูกนำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส จะได้เป็นผงสีเทาของอินเดียมทินออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ rhombohedral ซึ่งมีขนาดอนุภาคประมาณ 32 นาโนเมตร [21] ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กราฟ XRD ของอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคการตกตะกอนร่วมและเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล

และในปีเดียวกันนี้ Takafumi Sasaki และคณะ ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบ cubic ให้มีความเป็นผลึกสูงโดยผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลโดยงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของชนิดตัวทำละลายที่แตกต่างกัน ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีผลต่อขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์พบว่าเอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol) เป็นตัวทำละลายที่เหมาะสมให้ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ถูกควบคุมได้ตั้งแต่ 15 ถึง 43 นาโนเมตรด้วยการเปลี่ยนความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผลการวิเคราะห์ผลึกด้วย HRTEM และ FT แสดงถึงอนุภาคมีโครงสร้างความ เป็นผลึกเดี่ยวและโตในระนาบ (200) นอกจากนี้อนุภาคที่ใหญ่ขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลงซึ่งเป็นผลจากการที่อนุภาคเกิดการชิดติดกัน [22]

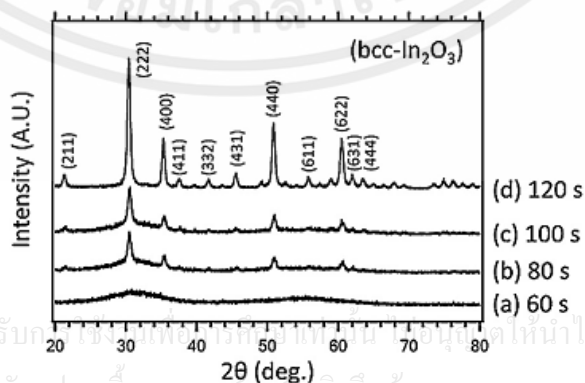
นอกจากนี้ยังมีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ผ่านกระบวนการอื่นอีก เช่น กระบวนการโซลโวเทอร์มอล (Solvothermal process) ซึ่งเป็นกระบวนการสังเคราะห์ที่คล้ายคลึงกับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ต่างกันเพียงชนิดของตัวทำละลายที่ใช้เท่านั้น ดังเช่นงานวิจัยของ

Jin-Seok Lee และ Sung-Churl Choi ในปี ค.ศ. 2005 ได้ทำการสังเคราะห์ผงอินเดียมทินออกไซด์ระดับนาโนเมตรให้มีความเป็นผลึกสูงด้วยกระบวนการโซลโวเทอร์มอล (solvothermal process) จากการผสมสารละลายระหว่างอินเดียมไนเตรตและทินคลอไรด์ การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของอนุภาคที่สังเคราะห์ด้วยวิธีนี้ถูกศึกษาภายใต้ตัวแปรต่างๆ คือ ตัวทำละลาย อุณหภูมิและความดันที่ระบบทำงาน ผลจากการศึกษาพบว่าผงอินเดียมทินออกไซด์สีฟ้าระดับนาโนเมตรสามารถสังเคราะห์ได้เมื่อเปลี่ยนตัวทำละลายจากน้ำเป็นสารละลายออร์แกนิก ขนาดของอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ใหญ่ขึ้นเมื่อความหนืดของตัวทำละลายเพิ่มมากขึ้น มากกว่านั้นรูปร่างของอนุภาคมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมากขึ้นเมื่อตัวทำละลายเหนียวขึ้นซึ่งเป็นผลจากการโตของผลึกเกิดไวขึ้นที่ทิศทาง [1,0,0] [23] ดังแสดงในตารางที่ 2.1

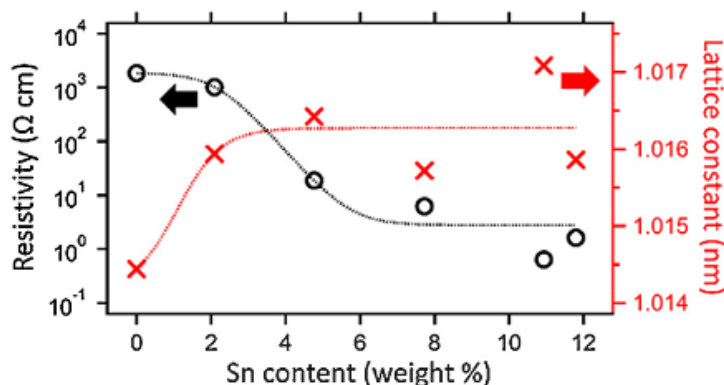
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของผงอินเดียมทินออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคการตกตะกอนและเทคนิคโซลโวเทอร์มอล

Process	Solvent	Temperature (°C)	Crystallite size (nm)	Powder color
Calcination	None	600	15.24	Yellow
	EtOH	250	10.86	
Solvothermal	EG	250	19.12	Blue
	PEG	250	25.02	

และในปี ค.ศ. 2016 Bonggeun Shong และคณะ ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบ cubic ขนาดประมาณ 20 นาโนเมตร ด้วยเทคนิคโซลโวเทอร์มอลโดยใช้เวลาการเกิดปฏิกิริยาเพียงสองนาทีก่อนที่สมบัติทางไฟฟ้าและลักษณะโครงสร้างถูกวิเคราะห์เปรียบเทียบกันเมื่อปริมาณดีบุกที่เจือแตกต่างกัน อุณหภูมิที่ใช้ในการเปลี่ยนเฟสเป็นอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้าง cubic อยู่ที่ 250 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย [24] ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และ 2.8



รูปที่ 2.7 กราฟ XRD ของอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคโซลโวเทอร์มอล



รูปที่ 2.8 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าและค่าคงที่แลตทิซที่แปรผันกับปริมาณทินที่เพิ่มขึ้นในอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์

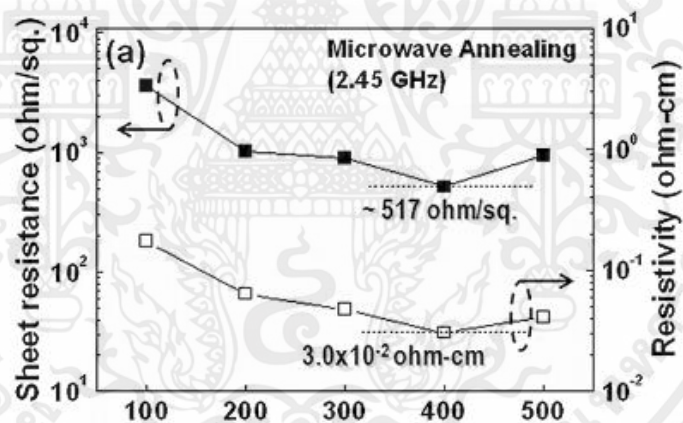
2.5 พิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์และการประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแบบโค้งงอ

ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้าที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีทั้งการนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าเดี่ยวๆ และแบบผสม (Composite) กับวัสดุนำไฟฟ้าชนิดอื่น เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพและความสามารถในการโค้งงอของขั้วไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งาน ดังในปี ค.ศ. 2010 Jin-A. Jeong และคณะ ได้เตรียมขั้วไฟฟ้าอินเดียมทินออกไซด์ด้วยเทคนิคการพิมพ์เพื่อใช้เป็นขั้วในเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการใช้หมึกอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ที่เตรียมเองพิมพ์เป็นขั้วไฟฟ้าและดำเนินการหลอมที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เทคนิคการพิมพ์นี้สามารถทำลวดลายขั้วไฟฟ้าโดยไม่ต้องอาศัยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ซึ่งขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้มีค่าการทะลุผ่านของแสงสูงถึงร้อยละ 84.14 และค่าความต้านทานแผ่น 202.7 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร การประยุกต์ฟิล์มบางเป็นขั้วไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์ เซลล์ที่ได้มีค่าแรงดันไฟฟ้าที่วงจรเปิด 0.57 โวลท์ กระแสไฟฟ้าที่วงจรปิด 8.47 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานร้อยละ 2.13 เป็นสาเหตุให้งานวิจัยนี้มีความน่าสนใจเพราะการเตรียมฟิล์มบางด้วยเทคนิคนี้ต้นทุนและระยะเวลาการผลิตลดลง นอกจากนี้ยังประยุกต์ใช้งานได้จริง เป็นทางเลือกหนึ่งที่จะใช้งานแทนการปลูกฟิล์มด้วยระบบการระเหยเป็นไอ [25]

ต่อมา ในปี ค.ศ. 2011 László Körösi และคณะ เตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์และควบคุมความหนาอย่างดีด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบ (dip-coating method) อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ที่ใช้ทำฟิล์มบางถูกสังเคราะห์ด้วยเทคนิคโซลเจล (sol-gel technique) โดยใช้สารละลายเอทิลอินเดียมทริคลอไรด์ (InCl_3) ทินโพรคลอไรด์ (SnCl_4) และแอมโมเนีย (NH_3) เพื่อให้ได้สารละลายอินเดียมทินออกไซด์ที่เสถียรภาพสำหรับทำฟิล์มบาง จึงใช้การละลายอินเดียมทินไฮดรอกไซด์ในตัวทำละลายเอทานอลและปรับปรุงประสิทธิภาพสารละลายโดยการเติม Polyvinylpyrrolidone (PVP)

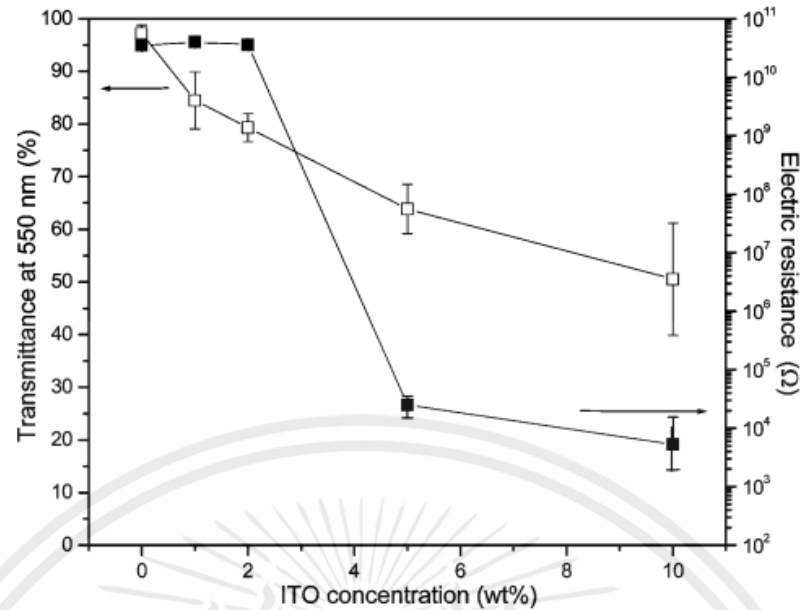
หลังจากนำฟิล์มบางที่เตรียมผ่านการเผา (calcinations) ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ฟิล์มบางอินเดียมทินไฮดรอกไซด์เปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์อย่างสมบูรณ์โดยได้โครงสร้างผลึกทั้งแบบลูกบาศก์ (cubic) และ ромโบฮีดรอล (rhombohedral) จึงทำการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้า ทางแสง และโครงสร้างต่อไป [5]

และในปีเดียวกัน Myun-sung Hwang และคณะ ได้เตรียมฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ด้วยเทคนิคการพิมพ์จากน้ำหมึกอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ สมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของฟิล์มถูกศึกษาภายใต้ตัวแปรอุณหภูมิการหลอมที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งการหลอมเป็นการหลอมด้วยไมโครเวฟจากการทดลองพบค่า sheet resistance และ สภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity) ลดลงเมื่ออุณหภูมิการหลอมด้วยไมโครเวฟเพิ่มขึ้น ฟิล์มบางหลอมด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีค่าความต้านทานเชิงแผ่นเป็น 517 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร ความหนาฟิล์มประมาณ 580 นาโนเมตร ในขณะที่ค่าการทะลุผ่านของแสงยังคงสูงอยู่ที่ประมาณ 87% ซึ่งอุณหภูมิการหลอมที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลกับการทะลุผ่านของแสง นอกจากนี้งานวิจัยพยายามปรับปรุงประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางโดยการพิมพ์ Ag-grid ระหว่างชั้นของฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ ทำให้ได้ค่า sheet resistance ลดลงเหลือเพียง 3.4 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร [26] ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงสมบัติไฟฟ้าของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคการพิมพ์

ปี ค.ศ. 2012 Elen Poliani S. Arlindo และคณะ เตรียมฟิล์มบางวัสดุนาโนผสม (nanocomposite films) ระหว่างท่อนาโนอินเดียมทินออกไซด์และวัสดุพอลิเมอร์ PMMA สมบัติทางไฟฟ้า ทางแสง และลักษณะทางสัณฐานวิทยา ของฟิล์มบางถูกศึกษาเมื่อปริมาณความเข้มข้นของท่อนาโนอินเดียมทินออกไซด์เปลี่ยนแปลงไป จากร้อยละ 1 ถึง 10 โดยมวล ผลการทดลองปรากฏว่าปริมาณท่อนาโนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้การทะลุผ่านของแสงลดลงมีค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 55 แต่ค่าความต้านทานไฟฟ้ากลับลดลงอย่างชัดเจน สำหรับผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) สามารถอธิบายสาเหตุของการนำไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น นอกจากนี้งานวิจัยยังจำลองการคำนวณ (computational simulation) ของโครงนาโน 1 มิติ (1D) [3] ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการทะลุผ่านของที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรและค่าความต้านทานไฟฟ้ากับปริมาณความเข้มข้นของท่อนาโนอินเดียมทินออกไซด์

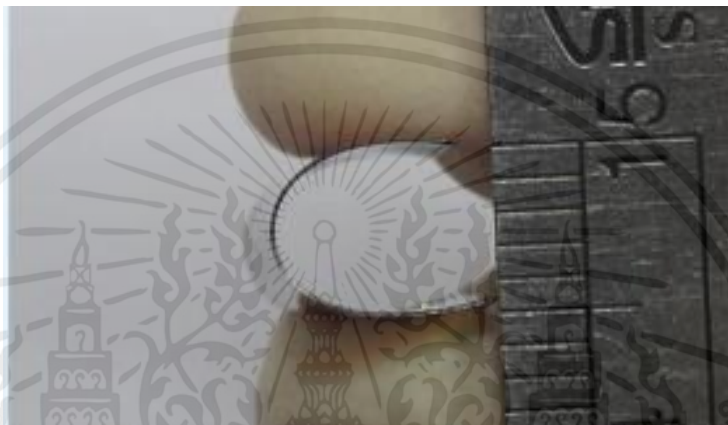
ในปี ค.ศ. 2013 Zhangxian Chen และคณะ ได้เสนอเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางจากสารละลาย (solution process) ด้วยข้อดีที่สามารถลดต้นทุนการผลิตแต่สามารถประยุกต์ใช้งานได้ตามเดิม โดยงานวิจัยนี้ได้เตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยเทคนิคที่ง่าย แต่ได้ความสม่ำเสมอของฟิล์มสูง (high uniformity) สามารถผลิตซ้ำได้ (reproducibility) และควบคุมขนาดได้ตามต้องการ (scalability) ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่เตรียมได้มีค่าการทะลุผ่านของแสงมากถึงร้อยละ 90 มีสภาพต้านทานไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ (resistivity; $\rho \sim 7.2 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$) เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นที่ใช้เทคนิคการเตรียมฟิล์มต่างๆ นอกจากนี้ฟิล์มบางยังมีค่าความต้านทานแผ่นต่ำถึง 30 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ทำเป็นขั้วไฟฟ้าได้ [4] ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคต่างกัน

no.	ρ ($10^{-4} \Omega\text{-cm}$)	R_s (Ω)	t (nm)	T (%) at 550 nm	Φ_H ($10^{-2} \Omega^{-1}$)	process
1	45.9	379	121	~88	0.073	spin coating
2	4.23	29.4	144			dip coating
	~55	~573	96	~96	0.116	
3	3.2	21	150			dip coating
4	5.8	64	90	~87	0.386	dip coating
5	2.5	42	60	~85	0.469	dip coating
6	2.1	7.1	295	~78	1.171	dip coating
7	5.7	100	57	~70	0.028	dip coating
8	0.52	356	146	93	0.136	spin coating
9	2.2	22	100	~92 ^c	1.974	sputtering
10	7.2	30	241	90.2	1.191	spin coating

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม อีกด้วย มิให้คัดลอกเนื้อเรื่องและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีใช้

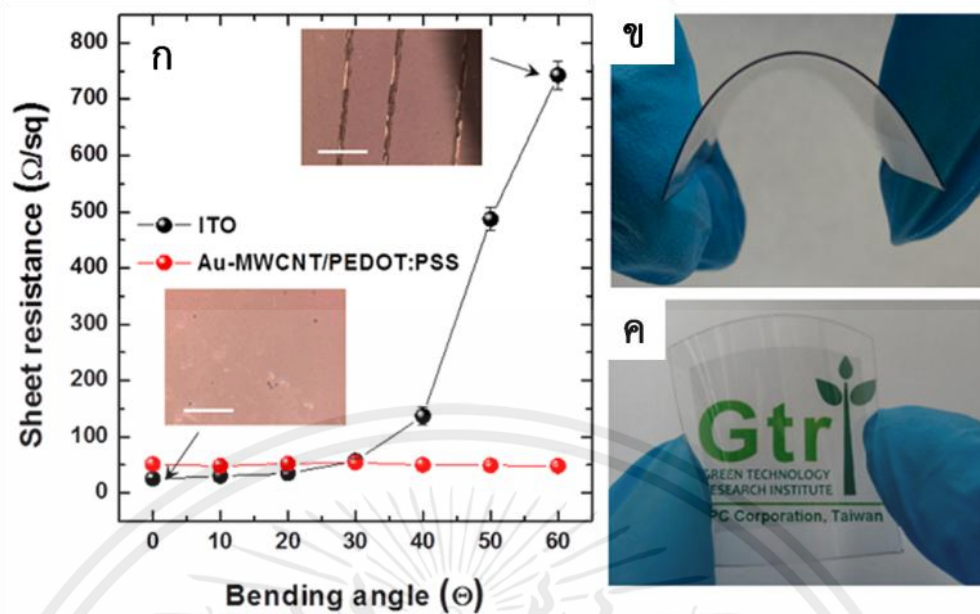
ต่อมาในปี 2015 Kuan Sun และคณะ เตรียมฟิล์มบางที่มีสมบัติการนำไฟฟ้าได้ดีและการทะลุผ่านของแสงได้มากจากพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS เพื่อประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงงอได้ในเซลล์แสงอาทิตย์ ฟิล์มบาง PEDOT:PSS ถูกเตรียมบนฐานรองรับกระจกและฐานรองรับที่งอได้ PET โดยมีการเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าด้วยกรด methanesulfonic เซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมได้มีประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 11 เมื่อเตรียมบนฐานรองรับกระจก และร้อยละ 8 เมื่อเตรียมบนฐานรองรับ PET เพื่อประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์แบบโค้งงอ ซึ่งงอได้รัศมีประมาณ 2 มิลลิเมตร [27] ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงจากพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS plugged บนฐานรองรับโค้งงอได้

ในปี ค.ศ. 2015 นี้ยังมีงานวิจัยของ Er-Chieh Cho และคณะ ที่ได้ทำการสังเคราะห์วัสดุนาโนผสมระหว่างท่อคาร์บอน (MWCNTs) และอนุภาคทองคำนาโน โดยอนุภาคทองคำนาโนมีขนาดเฉลี่ยที่ 4.3 นาโนเมตร และฝังตัวบริเวณผนังของท่อคาร์บอน วัสดุผสมดังกล่าวผ่านการพลาสมาด้วยคลื่นไมโครเวฟ (microwave plasma) ส่งผลให้อนุภาคทองคำนาโนที่ฝังตัวอยู่บริเวณผนังท่อคาร์บอนเกิดการหลอมแล้วรวมตัวกันขนาดใหญ่ขึ้นถึง 34 นาโนเมตร อนุภาคทองคำนาโนที่รวมตัวกันนั้นประพฤติตัวเป็นทางเชื่อมที่นำไฟฟ้าได้ระหว่างท่อคาร์บอน ดังนั้นวัสดุผสมที่ได้มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำมาก เมื่อนำวัสดุผสมระหว่างท่อคาร์บอนและอนุภาคทองคำนาโนไปกระจายตัวในพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ทำให้งานวิจัยนี้สามารถเตรียมวัสดุนาโนจากสารละลายซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ทำเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงโค้งงอได้ ผลของการนำวัสดุดังกล่าวใช้เตรียมเป็นฟิล์มบางคือมีค่า ความต้านทานแผ่น 51 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร และ ค่าการทะลุผ่านของแสงเป็นร้อยละ 86.2 งานวิจัยนี้จึงนำฟิล์มบางนี้เตรียมเป็นขั้วไฟฟ้าในอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์

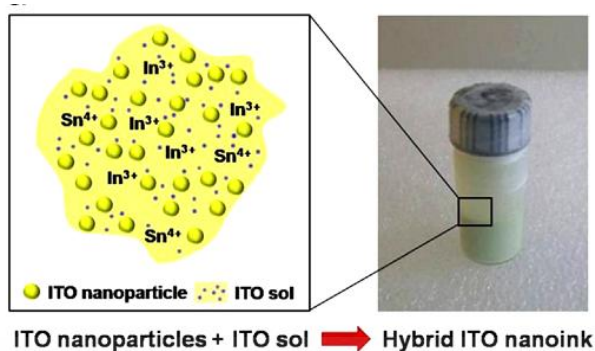
เอกสารนี้เป็นแบบงอได้และเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้กับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอินเดียมทินออกไซด์
ไม่ว่ากรณีใด โดยทั่วไป [6] ดังแสดงในรูป 2.12 เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แสดงการทดสอบความงอได้ของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์และฟิล์มบางผสมอนุภาคทองคำนาโน/ท่อคาร์บอนนาโน/PEDOT:PSS ที่ปลูกบนฐานรองรับโค้งงอได้ ก.กราฟเปรียบเทียบความต้านทานแผ่นกับมุมการงอของฐานรองรับ ข. และ ค. แสดงภาพฟิล์มบางผสมที่สามารถงอได้

นอกจากนี้ Bon-Ryul Koo และ Hyo-Jin Ahn ยังได้ทำการเตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์จากน้ำหมึกไฮบริด มีส่วนผสมระหว่างอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ความเป็นผลึกสูง (high-crystalline ITO nanoparticles) กับสารละลายอินเดียมทินออกไซด์ (ITO sols) การเตรียมฟิล์มบางนี้ใช้เทคนิคการปั่นเหวี่ยง (spin-coating) และการหลอมโดยใช้อุณหภูมิต่ำด้วยไมโครเวฟ ในการเตรียมน้ำหมึกไฮบริดที่ประสิทธิภาพดีที่สุด ได้ศึกษาอัตราส่วนน้ำหนักของอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ต่อสารละลายอินเดียมทินออกไซด์ต่างกัน 4 เงื่อนไข คือ 0 0.06 0.12 และ 0.24 พบว่าที่อัตราส่วน 0.24 ให้ค่า sheet resistance ต่ำสุด (ประมาณ 131.3 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร) มีการทะลุผ่านของแสงได้มาก (ร้อยละ 87.2) รวมถึงมีค่า figure of merit ที่ดี (ประมาณ $19.3 \times 10^{-4} \Omega^{-1}$) เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มบางตัวอย่างอื่น การปรับปรุงประสิทธิภาพนี้เกิดจากการทำอนุภาคในฟิล์มบางให้หนาแน่นชิดกันมากขึ้น โดยสารละลายอินเดียมทินออกไซด์ทำหน้าที่เชื่อมอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์เข้าด้วยกัน ทำให้ฟิล์มบางมีประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าและการทะลุผ่านของแสงดี ซึ่งการเตรียมฟิล์มบางจากน้ำหมึกนาโนไฮบริดนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ทำขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงแบบยืดหยุ่นในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสงได้ [2] ดังแสดงในรูป 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 แสดงภาพน้ำหมึกไฮบริดผสมระหว่างอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ความเป็นผลึกสูงกับสารละลายอินเดียมทินออกไซด์

และในปี ค.ศ. 2015 นี้ยังมีกลุ่มวิจัยของ Hongkyu Kang และคณะ ที่สนใจในเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์แบบพิมพ์และโค้งงอได้ (flexible and printable electronics) จึงเสนองานวิจัยการทำขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงงอได้ด้วยการผสมระหว่างวัสดุสองชนิดคือพอลิเมอร์และโลหะ ทำให้ได้ขั้วไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง รัศมีการงอได้น้อยกว่า 1 มิลลิเมตร การทะลุผ่านของแสงในย่านตามองเห็นมากกว่าร้อยละ 95 ที่สำคัญค่าความต้านทานแผ่นน้อยกว่า 10 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร คุณสมบัติที่พัฒนาขึ้นเป็นผลจากการปรับปรุงพื้นผิวฐานรองรับพลาสติกด้วยสารจำพวกเอมีน (amine-containing) นอกจากนี้ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงงอได้ที่เตรียมเมื่อประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ได้มีประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 10 [28] ดังแสดงในรูปที่ 2.14



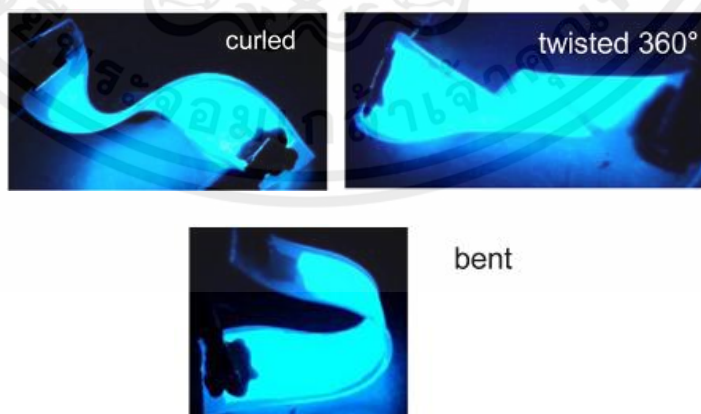
รูปที่ 2.14 แสดงภาพขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงงอได้ขณะทดลองให้หลอดไฟเปล่งแสง

ต่อมาในปี ค.ศ. 2016 Hae-In Shin และคณะได้เตรียมฟิล์มบางจากน้ำหมึกอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ (ITO nanoparticle ink) บนฐานรองรับกระจก แล้วใช้การหลอม (annealing) ด้วยเลเซอร์ ซึ่งประยุกต์ฟิล์มบางที่ได้เป็นขั้วไฟฟ้าบวกในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ (organic solar cells; OSCs) ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า ทางแสง และทางโครงสร้าง ที่อัตราเร็วเลเซอร์ตั้งแต่ 4 ถึง 14 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่าขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้มีสมบัติที่น่าพอใจคือค่าความต้านทานแผ่น 56.79 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร และค่าการทะลุผ่านของแสงร้อยละ 85.77 ทั้งนี้การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคสามารถอธิบายถึงกลไกการนำไฟฟ้าได้อีกด้วย นอกจากนี้ฟิล์มบางยังถูกนำไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าบวกในเซลล์แสงอาทิตย์ มีค่าแรงดันไฟฟ้าที่วงจรถัด (V_{oc}) 0.59 โวลต์ กระแสไฟฟ้าที่วงจรถัด

ปิด (I_{sc}) 9.02 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (PCE) 2.81% [29]

ในปีเดียวกัน S. Ghanizadeh และคณะ ได้ศึกษาการกระจายตัวในน้ำของอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ที่แตกต่างกันเมื่อใช้สารต่างกันสามชนิดคือ PEG 400 Tween 80 และ β -alanine พบว่าทั้ง PEG 400 และ β -alanine ให้การกระจายตัวของอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ที่เสถียรโดยตรวจสอบจากเครื่องหาค่าศักย์ซีต้าและขนาดอนุภาคในระดับนาโนเมตร จึงใช้สารละลายดังกล่าวเตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบและการปั่นเหวี่ยง ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ดังกล่าวถูกให้ความร้อนเพื่อปรับปรุงสมบัติการเชื่อมต่อของอนุภาคซึ่งส่งผลต่อการนำไฟฟ้าและการทะลุผ่านของแสง โดยศึกษาการให้ความร้อนต่างกันสองแบบคือแบบที่นิยมใช้ทั่วไป และแบบไมโครเวฟ ผลคือทุกฟิล์มบางให้ค่าเฉลี่ยการทะลุผ่านของแสงในย่านตามองเห็นมากกว่าร้อยละ 80 หลังให้ความร้อนแก่ฟิล์ม และการเติม PEG 400 ร้อยละ 2 โดยมวล สามารถลดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าลงได้ นอกจากนี้การศึกษาลักษณะทางพื้นผิวยืนยันได้ว่าการเติม dispersant ช่วยปรับปรุงความสม่ำเสมอของฟิล์มและการเชื่อมต่อของอนุภาคภายในฟิล์มบาง [30]

และในปี ค.ศ. 2017 Mei Ying Teo และคณะ สนใจศึกษาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่นได้ (stretchable electronics) ด้วยสองสมบัติสำคัญที่ต้องมีคือ ความยืดหยุ่นเชิงกลสูงและการนำไฟฟ้าดี งานวิจัยนี้จึงเสนอการผสมเข้าด้วยกันของวัสดุสองชนิดที่มีคุณสมบัติดังกล่าว คือวัสดุพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS และ ionic liquid ผลคือได้วัสดุที่มีค่าการนำไฟฟ้ามากกว่า 1000 S cm^{-1} ที่ค่าความเครียด (tensile strains) มากกว่าร้อยละ 50 ด้วยฟิล์มบางที่เตรียมได้มีสมบัติการทะลุผ่านของแสงและการนำไฟฟ้าที่ดี ดังนั้นจึงประยุกต์ทำเป็นขั้วไฟฟ้าในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบกระแสสลับ (alternating current electroluminescent) [31] ดังแสดงในรูป 2.15



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.15 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบกระแสสลับที่ใช้ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงจาก PEDOT:PSS เป็นส่วนประกอบ

2.6 การตรวจสอบลักษณะของผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer; XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิด จะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากัน ทำให้ Pattern ของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับ Pattern การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ได้ ซึ่งจะทำให้เราทราบว่า ในตัวอย่างนั้นๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ก็คือ ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่าง เพื่อหาปริมาณ หรือ หาดังประกอบตัวอย่าง ที่เป็น Amorphous ได้ เนื่องจากสารตัวอย่างกลุ่มนี้ จะไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แต่เราสามารถให้ XRD คำนวณหา ปริมาณของส่วนที่เป็น Amorphous ในตัวอย่าง ว่ามีสัดส่วนกี่ % ได้ โดยเป็นการเปรียบเทียบกับปริมาณของสารมาตรฐานที่ทราบค่าแน่นอน

รังสีเอ็กซ์ (x-ray) เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งในสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงแล้ววิ่งชนเป้าซึ่งทำด้วยโลหะหนัก ผลของการชนก่อให้เกิดรังสีเอ็กซ์ 2 ชนิดคือ รังสีเอ็กซ์ต่อเนื่อง (continuous x-ray) กับรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว (characteristic x-ray) รังสีเอ็กซ์จะเกิดการเลี้ยวเบน(diffraction) เมื่อผ่านช่องว่างระหว่างอะตอมในผลึก เมื่อคลื่นผ่านโครงสร้างผลึกจะเกิดการแทรกสอด (interference) ทั้งแบบเสริมและหักล้างกัน วิลเลียม เฮนรี แบริก (William Henry Bragg) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในโครงสร้างผลึกไว้ว่ารังสีเอ็กซ์จะแทรกสอดกันแบบเสริมมากที่สุดเมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยความแตกต่างของทางเดินคลื่น (path different) เป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ แสดงดังรูป 2.16 เรียกกฎนี้ว่า กฎของแบรกก์ (Bragg's law) ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2.1 ตามลำดับ

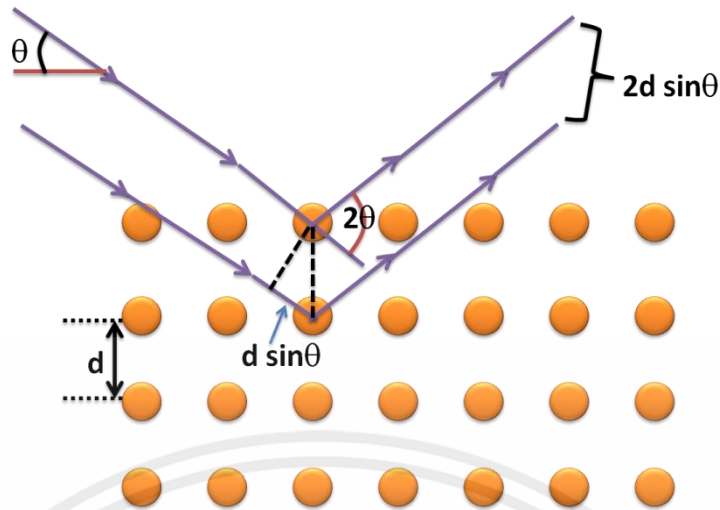
$$N\lambda = 2d_{hkl} \sin\theta \quad (2.1)$$

เมื่อ N คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ...

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ

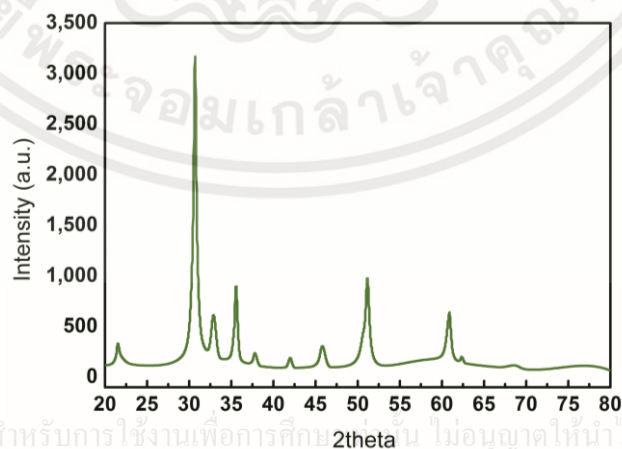
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง θ คือ มุมสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอ็กซ์ซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ



รูปที่ 2.16 แสดงการตกกระทบและการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ตามกฎของแบรกก์

ระนาบต่างๆ ของผลึกไม่ได้ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนเสมอไป ระนาบใดที่รังสีเอ็กซ์ ตกกระทบ แล้วกระเจิงออกมาอย่างสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่า ระนาบ ของแบรกก์ และมุมที่รังสี สะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่า มุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็น สองเท่า ๆ ของมุมสะท้อน ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบน และมุมเลี้ยวเบนต่างๆ จะถูกตรวจหา ด้วย ระบบวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction : XRD)

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มและมุมเลี้ยวเบนที่ได้เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนของ รังสีเอ็กซ์ (รูปที่ 2.17) ซึ่งจะมีลักษณะเฉพาะตัวสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกัน จากการ เลี้ยวเบนแล้วแทรกสอดกันแบบเสริมความเข้มของรังสีเอ็กซ์ก็จะมีค่ามากซึ่งจะสังเกตได้จากยอดใน รูปแบบการเลี้ยวเบนและยอดเหล่านี้จะปรากฏที่มุมเลี้ยวเบนเดิมเสมอสำหรับธาตุ หรือสารประกอบ ชนิดเดียวกัน[32]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา 2theta ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.17 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จะสามารถหาค่าตัวแปรซึ่งแสดงถึงสมบัติ ความเป็นผลึกได้ ดังนี้ คือ

1. ค่าคงตัวแลตทิซ หาได้จากสมการ 2.2

$$a = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (2.2)$$

เมื่อ a คือ ค่าคงตัวแลตทิซ
 λ_x คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์
 θ คือ มุมของการเลี้ยวเบน

2. ขนาดของเม็ดผลึก (grain size) สามารถหาค่าขนาดของเม็ดผลึกได้ตามสมการ 2.3

$$D = \frac{K \lambda_x}{\beta_{2\theta} \cos \theta} \quad (2.3)$$

เมื่อ D คือ ขนาดของเม็ดผลึก
 K คือ ค่าคงตัวซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเม็ดผลึก ($0.89 \leq K \leq 0.94$)
 θ คือ มุมของการเลี้ยวเบน
 $\beta_{2\theta}$ คือ ค่าครึ่งหนึ่งของความกว้างสูงสุดของยอดการเลี้ยวเบน (Full Width at Half-Maximum of the diffraction peak; FWHM)
 λ_x คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

2.7 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

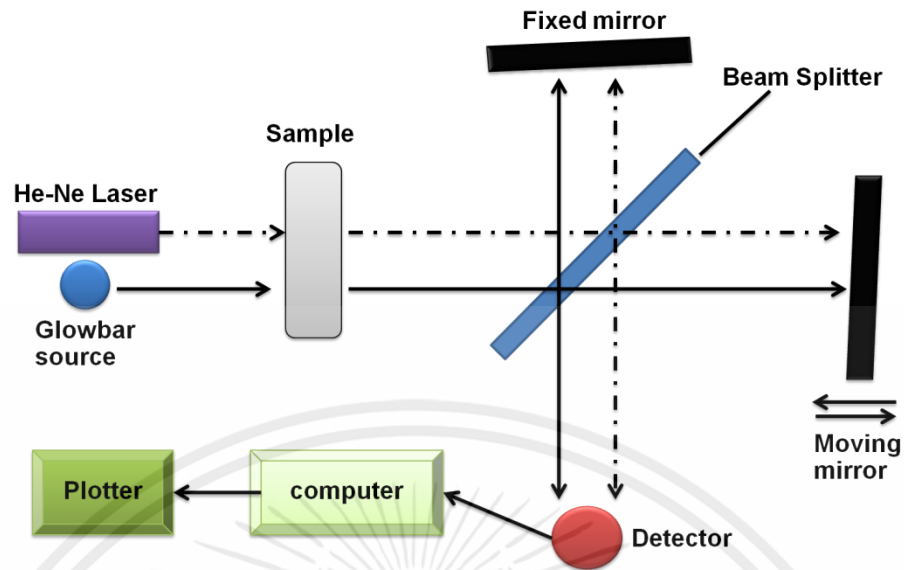
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของสารตัวอย่าง โดยตรวจสอบได้จาก การบังคับลำอิเล็กตรอนให้กวาดไปบนพื้นผิวแล้วแสดงผลบนจอหลอดรังสีแคโทด (Cathode Ray Tube : CRT) มีลักษณะของภาพเป็นภาพขาวดำ มีกำลังขยาย 10 ถึง 300,000 เท่า ขึ้นอยู่กับชนิดของสารตัวอย่าง หลักการทำงาน คือ อันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับสาร

ตัวอย่างทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) และจับสัญญาณโดยตัวตรวจจับสัญญาณ นำสัญญาณที่ได้ไปขยายและสร้างภาพบนจอ CRT การทำงานของกล้อง SEM เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนเรียกว่า แคนโอด เนื่องจากเป็นขั้วลบ ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอน จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยความต่างศักย์สูงในช่วง 1 ถึง 40 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ พร้อมทั้งบีบกลุ่มอิเล็กตรอนให้เป็นลำอิเล็กตรอนโดยระบบของเลนส์อิเล็กตรอน (electron lens) ซึ่งมี 2 ชนิด คือ เลนส์คอนเดนเซอร์ (condenser lens) และเลนส์วัตถุ (objective lens) ทำหน้าที่โฟกัสภาพ ขณะเดียวกันลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนผิวสารตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็ก (scanning coil) บนระนาบ x-y สิ่งสำคัญของการทำงานคือการเลือกสัญญาณจากอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับอะตอมของสารตัวอย่างมาสร้างเป็นภาพ ความต่างจากผลของอันตรกิริยาต่อชนิดของสารตัวอย่างขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของธาตุในเนื้อสารตัวอย่างและกระบวนการวัดสัญญาณด้วยตัวตรวจจับสัญญาณแบบต่างๆ[32]

2.8 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR)

FT-IR spectrometer (Fourier Transform Infrared Spectrometer) เป็นเครื่องมือที่พัฒนามาจากเครื่อง IR spectrometer ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของสารโดยการวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (Infrared Radiation) ซึ่งการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด ของสารทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานในการสั่นของโมเลกุล มีหลักการทำงานและการวิเคราะห์คือ รังสีอินฟราเรดจากแหล่งกำเนิด (IR source) จะถูกฉายไปยัง Interferometer ซึ่งตัวที่นิยมใช้คือ Michelson Interferometer ประกอบไปด้วย ตัวแยกลำรังสี (Beam Splitter) กระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ (Moving mirror) และกระจกที่ตรึงอยู่กับที่ (Fixed Mirror) โดยกระจกทั้งสองตั้งฉากกันที่ตัวแยกลำรังสีแสง ลำรังสีครึ่งหนึ่งจะทะลุผ่านไปยังกระจกที่ตรึงอยู่กับที่ส่วนอีกครึ่งหนึ่งจะสะท้อนไปยังกระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ จากนั้นลำรังสีก็จะสะท้อนจากกระจกกลับมารวมกันที่ตัวแยกลำรังสีเกิดการแทรกสอดขึ้น ลำรังสีจะผ่านไปยังตัวอย่างและในที่สุดก็จะตกลงบนเครื่องตรวจวัด ดังแสดงในรูป 2.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 ระบบ Michelson Interferometer ใน FT-IR สเปกโตรมิเตอร์

รังสีอินฟราเรดเป็นช่วงหนึ่งของสเปกตรัมของการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีเลขคลื่นประมาณ 12,800 ถึง 10 cm^{-1} หรือความยาวคลื่นจาก 0.78-1,000 ไมโครเมตร โดยรังสีอินฟราเรดแบ่งออกเป็น 3 ช่วงคือ

- 1) รังสีช่วงอินฟราเรดใกล้ (Near IR Region) มีช่วงเลขคลื่น 12,800 ถึง 4000 cm^{-1} เป็นช่วงที่อยู่ใกล้กับวิสิเบิล พบว่าแถบการดูดกลืนที่ค่อนข้างต่ำ มีประโยชน์ในการวิเคราะห์หาปริมาณของกลุ่มหมู่ฟังก์ชัน และศึกษาโครงสร้างโมเลกุล
- 2) รังสีอินฟราเรดกลาง (Middle IR region) มีช่วงเลขคลื่น 4000 ถึง 200 cm^{-1} โดยช่วงนี้แบ่งออกเป็น Group frequency region มีเลขคลื่นอยู่ระหว่าง 4000 ถึง 1300 cm^{-1} สเปกตรัมที่ได้ในช่วงนี้ส่วนใหญ่ได้จากพวกหมู่ฟังก์ชัน แต่ไม่ทำให้โครงสร้างของโมเลกุลที่สมบูรณ์ และอีกช่วงคือ Finger print region มีเลขคลื่นอยู่ระหว่าง 1300 ถึง 200 cm^{-1} สเปกตรัมที่ได้ส่วนใหญ่เกิดจากโครงสร้างของโมเลกุลที่สมบูรณ์ ดังนั้นสเปกตรัมที่ได้จึงค่อนข้างยุ่งยาก การวิเคราะห์จึงต้องใช้วิธีการเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของสารที่ทราบโครงสร้างแล้ว
- 3) รังสีช่วงอินฟราเรดไกล (Far IR region) มีช่วงเลขคลื่น 200 ถึง 10 cm^{-1} ช่วงนี้มักไม่ค่อยใช้ในการวิเคราะห์เนื่องจากสเปกตรัมมักเกิดการสั่นของโครงสร้างหรือเกิดการหมุนของโมเลกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงเลขคลื่นที่ใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์นั้นเป็นรังสีช่วงอินฟราเรดกลาง คือ 4000 ถึง 400 cm^{-1} กระบวนการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด โมเลกุลของสารจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้ต้องมี

ลักษณะและสภาวะที่เหมาะสมคือ รังสีนั้นต้องมีพลังงานพอเหมาะพอดีที่จะทำให้เกิดทรานซิชันและต้องเกิดการคู่ควบ (Coupling) พอดีระหว่างสนามไฟฟ้าจากการแผ่รังสีกับสารนั้น เมื่อมีการดูดกลืนพลังงานแล้วจะทำให้เกิดโมเมนต์คู่ขั้ว (Dipole Moment) ของโมเลกุลนั้นเปลี่ยนไป เมื่อใช้รังสีอินฟราเรดผ่านเข้าไปในโมเลกุลของสารแล้วเกิดปรากฏการณ์ทั้งสองจะเรียกว่าเกิด IR active แต่ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์คู่ขั้วแสดงว่าสารนั้นเป็น IR Inactive ถือว่าไม่มีการดูดกลืนแสงอินฟราเรด ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์คู่ขั้วมากจะได้ยอดการดูดกลืนอินฟราเรดสูง หากมีการเปลี่ยนแปลงน้อยจะได้ยอดการดูดกลืนอินฟราเรดต่ำ [33]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

เนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีเนื้อหาการทำน้ำหมักนำไฟฟ้าจากวัสดุนาโนผสมระหว่างวัสดุอินเดียมทินออกไซด์และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า ซึ่งในส่วนของวัสดุอินเดียมทินออกไซด์ที่ใช้เป็นส่วนผสมของน้ำหมักนำไฟฟ้ามีการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างกันสองแบบคือ เทคนิคการตกตะกอนร่วมและเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงมีเนื้อหาเป็นสองส่วนหลักคือ การเตรียมน้ำหมักนำไฟฟ้าจากวัสดุอินเดียมทินออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคการตกตะกอนร่วม และการเตรียมน้ำหมักนำไฟฟ้าจากวัสดุอินเดียมทินออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 อินเดียม (III) คลอไรด์ (Indium (III) chloride; InCl_3) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 ผลิต

โดย บริษัท Himedia Laboratories

3.1.2 ทิน (IV) คลอไรด์ (Tin (IV) chloride; SnCl_4) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 ผลิตโดยบริษัท

Aldrich

3.1.3 สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide; NH_4OH)

3.1.4 ซิลเวอร์ไนเตรต (Silver nitrate; AgNO_3)

3.1.5 สารละลาย PEDOT:PSS (PH 1000) ผลิตโดยบริษัท Heraeus Clevious

3.1.6 น้ำปลอดประจุ (DI water)

3.1.7 สารละลาย Tween 20 (Polyethylene glycol sorbitan monolaurate) ผลิตโดยบริษัท Aldrich

3.1.9 สารละลายเอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol; EG) ผลิตโดยบริษัท Aldrich

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 4 ตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

3.2.2 เตาแผ่นให้ความร้อน (Hot plate) พร้อมตัวผสมสารแบบแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)

3.2.3 ปีกเกอร์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร

- 3.2.4 ปีกเกอร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
- 3.2.5 กระบอกลอย ปริมาตร 20 มิลลิลิตร
- 3.2.6 ปีเปต ปริมาตร 10 มิลลิลิตร
- 3.2.7 ปีเปต ปริมาตร 50 ไมโครลิตร
- 3.2.8 หลอดฉีดยา ปริมาตร 3 มิลลิลิตร
- 3.2.9 เข็มฉีดยาเบอร์ 21
- 3.2.10 ซ้อนตักสาร
- 3.2.11 แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic bar)
- 3.2.12 เครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge)
- 3.2.13 หลอดใส่สารสำหรับปั่นเหวี่ยง
- 3.2.14 เตอบลุ่มร้อน
- 3.2.15 หม้อนึ่งอัตโนมัติ
- 3.2.16 เตาดู
- 3.2.17 ครกบด
- 3.2.18 ถ้วยอลูมินา (Alumina crucible) พร้อมฝาปิด
- 3.2.19 ฐานรองรับกระจก และฐานรองรับพลาสติก
- 3.2.20 เทปใส
- 3.2.21 คัตเตอร์
- 3.2.22 ไมโครปีเปต ปริมาตร 5-50 ไมโครลิตร
- 3.2.23 ไมโครปีเปต ปริมาตร 50-200 ไมโครลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ด้วยกระบวนการทางเคมี

3.3.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ด้วยเทคนิคการตกตะกอนร่วม

3.3.1.1 เตรียมสารละลายอินเดียม (III) คลอไรด์ 0.1538 โมลาร์ โดยการชั่งอินเดียม (III) คลอไรด์ 0.6804 กรัม ละลายในน้ำปลอดประจุปริมาตร 20 มิลลิลิตร แล้วกวนให้ละลายด้วยแท่งแม่เหล็กกวนสาร สารละลายที่ได้มีลักษณะสีขาวขุ่น

3.3.1.2 เตรียมสารละลายอินเดียม (III) คลอไรด์ 0.0171 โมลาร์ โดยการตวงสารละลายทิน (IV) คลอไรด์ ปริมาตร 0.04 มิลลิลิตร ละลายในน้ำปลอดประจุปริมาตร 20 มิลลิลิตร สารละลายที่ได้จะมีลักษณะใสไม่มีสี

3.3.1.3 เตรียมสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 8.86 โมลาร์

3.3.1.4 นำสารละลายอินเดียม (III) คลอไรด์ ที่เตรียมได้ในข้อ 3.3.1.1 และสารละลายทิน (IV) คลอไรด์ที่เตรียมได้ในข้อ 3.3.1.2 มาผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันในอัตราส่วน 1:1 (20 มิลลิลิตร ต่อ 20 มิลลิลิตร) แล้วกวนด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นระยะเวลา 10 นาที สารละลายที่ได้จะมีลักษณะใสไม่มีสี

3.3.1.5 นำสารละลายผสมที่เตรียมได้ในข้อ 3.3.4 มาเติมด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (ที่เตรียมได้ในข้อ 3.3.1.3) ปริมาตร 965 ไมโครลิตร ด้วยการหยดอย่างช้าๆ ขณะหยดสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์จะเกิดตะกอนสีขาวขึ้น โดยทำการปั่นกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็กกวนสารเป็นระยะเวลา 15 นาทีตั้งแต่เริ่มหยดสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ จะได้ตะกอนสีขาว

3.3.1.6 นำสารละลายที่ได้ไปแยกตะกอนออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (รูปที่ 3.1) โดยใช้ความเร็ว 6000 รอบต่อวินาที ระยะเวลา 30 นาที ทำความสะอาดตะกอนที่แยกได้ด้วยน้ำปลอดประจุแล้วปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอนอีกครั้ง ทดสอบการตกค้างของสารประกอบคลอไรด์ในของเหลวที่แยกจากตะกอนด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ถ้ามีสารประกอบคลอไรด์เหลืออยู่จะเกิดตะกอนสีขาวขุ่น ให้ทำความสะอาดตะกอนด้วยน้ำปลอดประจุแล้วปั่นเหวี่ยงจนไม่มีสารประกอบคลอไรด์เหลืออยู่

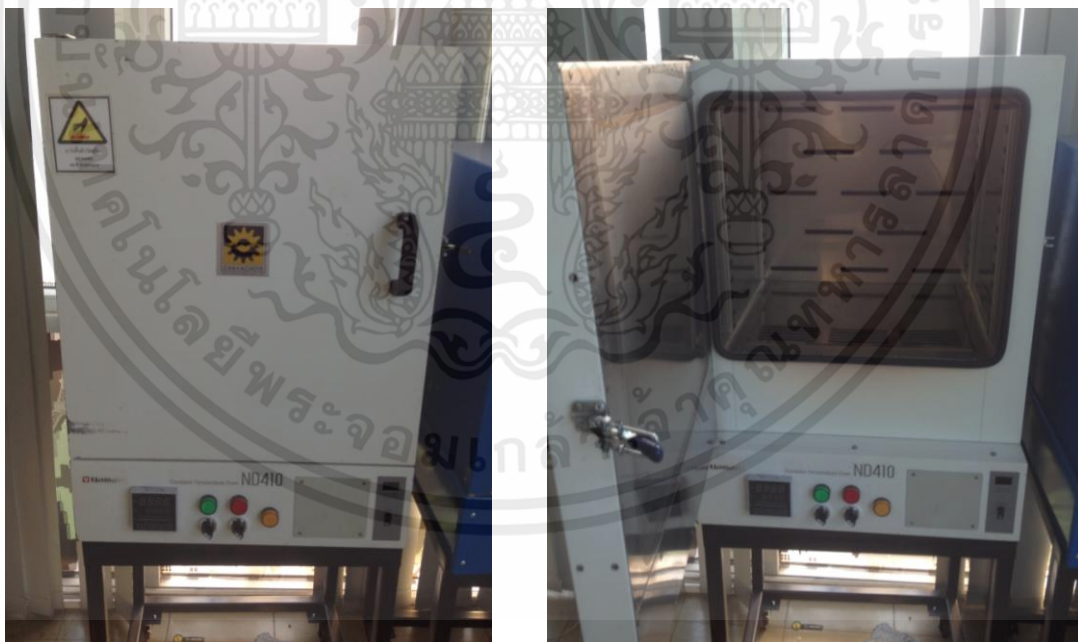
3.3.1.7 นำตะกอนที่สะอาดปราศจากสารประกอบคลอไรด์ ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ด้วยเตาอบลมร้อน (รูปที่ 3.2) เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง ได้ของแข็งสีขาว จากนั้นนำไปบดให้เป็นละเอียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 3.3.1.8 นำผงสีขาวที่ได้ผงด้วยเตาเผา (รูปที่ 3.3) ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง ได้ผงสีเหลืองคืออนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ บดอีกครั้งก่อนนำไปใช้งาน



รูปที่ 3.1 แสดงภาพเครื่องปั่นเหวี่ยง



รูปที่ 3.2 แสดงภาพเตาอบลมร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงภาพเตาเผา

3.3.2 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล

3.3.2.1 เตรียมสารละลายอินเดียม (III) คลอไรด์ 1.2304 โมลาร์ โดยการชั่งอินเดียม (III) คลอไรด์ 5.4432 กรัม ละลายในน้ำปooledประจุปริมาตร 20 มิลลิลิตร แล้วกวนให้ละลายด้วยแท่งแม่เหล็กกวนสาร สารละลายที่ได้มีลักษณะสีขาวขุ่น

3.3.2.2 เตรียมสารละลายอินเดียม (III) คลอไรด์ 0.1367 โมลาร์ โดยการตวงสารละลายทิน (IV) คลอไรด์ ปริมาตร 0.32 มิลลิลิตร ละลายในน้ำปooledประจุปริมาตร 20 มิลลิลิตร สารละลายที่ได้จะมีลักษณะใสไม่มีสี

3.3.2.3 เตรียมสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 8.86 โมลาร์

3.3.2.4 นำสารละลายอินเดียม (III) คลอไรด์ ที่เตรียมได้ในข้อ 3.3.2.1 และสารละลายทิน (IV) คลอไรด์ที่เตรียมได้ในข้อ 3.3.2.2 มาผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันในอัตราส่วน 1:1 (20 มิลลิลิตร ต่อ 20 มิลลิลิตร) แล้วกวนด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นระยะเวลา 10 นาที สารละลายที่ได้จะมีลักษณะใสไม่มีสี

3.3.2.5 นำสารละลายผสมที่เตรียมได้ในข้อ 3.3.2.4 มาเติมด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (ที่เตรียมได้ในข้อ 3.3.2.3) ปริมาตร 21.6 มิลลิลิตร ด้วยการหยดอย่างช้าๆ ขณะหยดสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์จะเกิดตะกอนสีขาวขึ้น โดยทำการปั่นกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็กกวนสารเป็นระยะเวลา 30 นาทีตั้งแต่เริ่มหยดสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ จะได้ตะกอนสีขาว

3.3.2.6 นำสารละลายที่เตรียมได้ในหัวข้อ 3.3.2.5 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ในเทฟลอนแล้วบรรจุลงในหม้อนึ่งอัดไอ (รูปที่ 3.4) หมุนปิดฝาครอบให้แน่นแล้วนำไปใส่ในเตาอบลมร้อน อุณหภูมิ

250 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง 12 ชั่วโมง 24 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง หลังจากครบกำหนดเวลาตามที่ต้องการ เอาหม้อนึ่งอัตโนมัติที่อุณหภูมิห้องอีก 3 ชั่วโมง

3.3.2.7 นำสารละลายที่ได้จากหัวข้อ 3.3.2.6 ไปแยกตะกอนออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง โดยใช้ความเร็ว 6000 รอบต่อวินาที ระยะเวลา 30 นาที ทำความสะอาดตะกอนที่แยกได้ด้วยน้ำปลอดประจุแล้วปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอนอีกครั้ง ทดสอบการตกค้างของสารประกอบคลอไรด์ในของเหลวที่แยกจากตะกอนด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ถ้ามีสารประกอบคลอไรด์เหลืออยู่จะเกิดตะกอนสีขาวขุ่น ให้ทำความสะอาดตะกอนด้วยน้ำปลอดประจุแล้วปั่นเหวี่ยงจนไม่มีสารประกอบคลอไรด์เหลืออยู่ แสดงแผนภาพดังรูปที่ 3.5

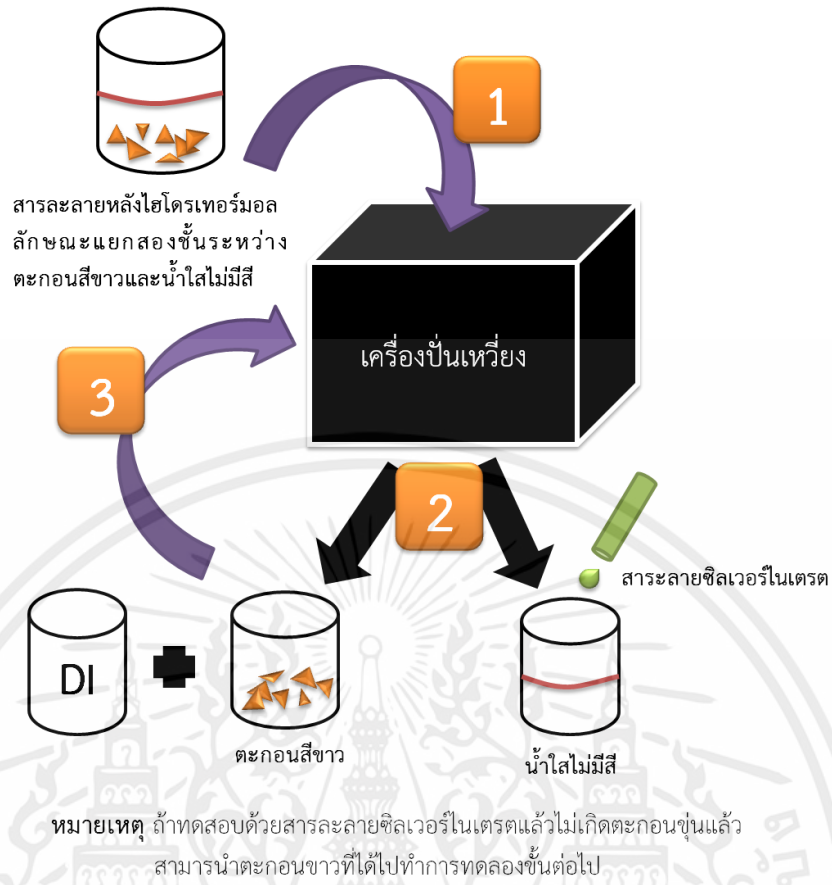
3.3.2.8 นำตะกอนที่สะอาดปราศจากสารประกอบคลอไรด์ ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสด้วยเตาอบลมร้อนเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง ได้ของแข็งสีขาวจากนั้นบดให้ละเอียด

3.3.2.9 นำผงสีขาวที่ได้เผาที่อุณหภูมิ 200 300 325 350 375 400 500 700 900 1000 และ 1150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง ได้ผงสีแตกต่างกันตามอุณหภูมิการเผา บดอีกครั้ง ก่อนนำไปวิเคราะห์และใช้งาน

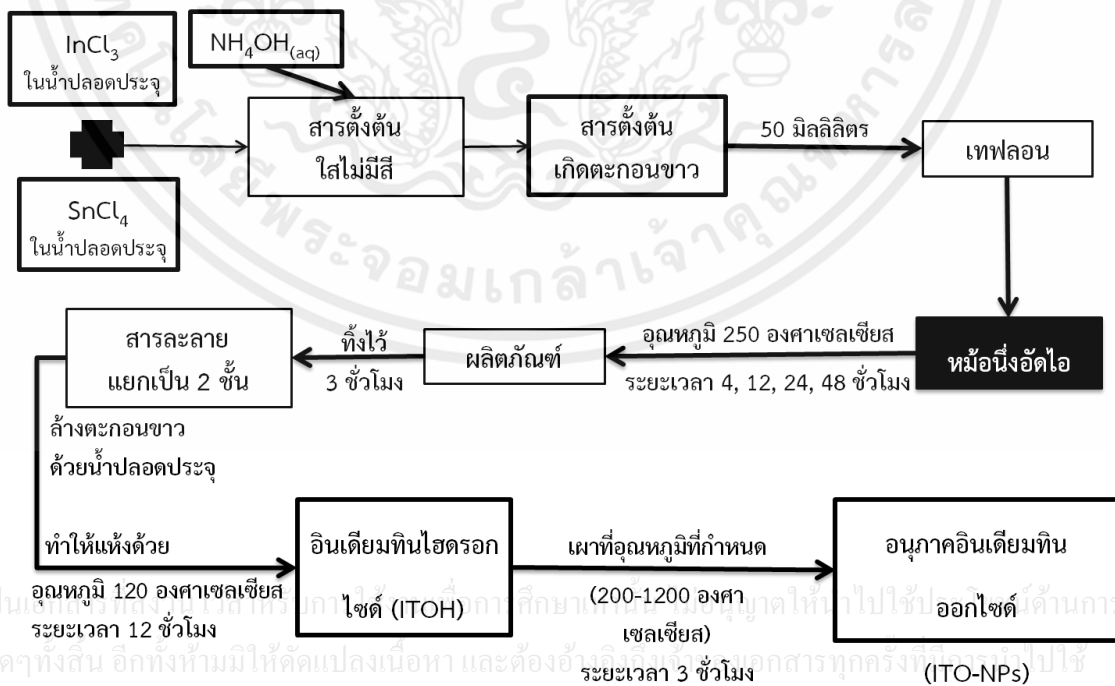


รูปที่ 3.4 แสดงภาพหม้ออัดไอน้ำหรือ autoclave

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงการแยกตะกอนออกจากสารละลาย



รูปที่ 3.6 แสดงผังขั้นตอนการเตรียมอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์

3.4 การเตรียมน้ำหมึกนำไฟฟ้าจากวัสดุผสมระหว่างอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS

3.4.1 การเตรียมน้ำหมึกนำไฟฟ้าสำหรับประยุกต์เป็นฟิล์มบางด้วยเทคนิคการหยดเคลือบ เพื่อตรวจสอบสมมุติฐานเบื้องต้น

เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการสังเคราะห์น้ำหมึกนำไฟฟ้าซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ทำเป็นขั้วไฟฟ้าได้อย่างง่ายด้วยการพิมพ์ งานวิจัยนี้เลือกวัสดุผสมระหว่างอินเดียมทินออกไซด์และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS โดยจะเริ่มศึกษาความเป็นไปได้ที่วัสดุสองตัวนี้เมื่อนำมาผสมกันแล้วจะสามารถประยุกต์เป็นขั้วไฟฟ้าได้ ดังนั้นในส่วนนี้จะอธิบายถึงการเตรียมสารละลายก่อนนำไปประยุกต์เป็นฟิล์ม โดยสารละลายที่เตรียมสามารถแบ่งเป็น 3 ชนิด ตามวัสดุที่ใช้เตรียม

3.4.1.1 สารละลายอินเดียมทินออกไซด์ เป็นการเตรียมสารละลายจากอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ โดยจะเตรียมสารละลายความเข้มข้นโดยมวลต่างกันคือ ร้อยละ 1 2 5 10 และ 20 ซึ่งตัวทำละลายเป็นน้ำปลอดประจุ โดยการชั่งอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ 10 20 50 100 และ 200 มิลลิกรัม ละลายในน้ำปลอดประจุน้ำหนัก 1 มิลลิลิตร

3.4.1.2 สารละลายผสมระหว่างอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ซึ่งสารละลายจะเตรียมจากสารละลายอินเดียมทินออกไซด์ความเข้มข้นโดยมวลต่างกัน ข้างต้นกับสารละลาย PEDOT:PSS ด้วยอัตราส่วนปริมาตร 1 ต่อ 1 ดังนั้นจะได้สารละลายผสมระหว่างอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ทั้งหมด 5 ความเข้มข้นคือ ร้อยละ 1 2 5 10 และ 20

3.4.1.3 สารละลาย PEDOT:PSS

3.4.2 การเตรียมน้ำหมึกสำหรับประยุกต์เป็นฟิล์มบางด้วยเทคนิคการหยดเคลือบ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการนำไฟฟ้า

3.4.2.1 เตรียมสารละลายอินเดียมทินออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวล ซึ่งตัวทำละลายเป็นเอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol; EG) โดยการชั่งอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ 22.35 มิลลิกรัม ละลายในตัวทำละลายเอทิลีนไกลคอล 200 ไมโครลิตร แล้วอัลตราโซนิกเป็นระยะเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 3.4.2.2 ผสมสารละลายอินเดียมทินออกไซด์ที่เตรียมได้กับสารละลาย PEDOT:PSS ด้วยอัตราส่วนปริมาตรหนึ่งต่อหนึ่ง แล้วผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน

3.4.3 การเตรียมน้ำหมึกนำไฟฟ้าสำหรับประยุกต์ใช้ในเทคนิคการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์กระดาษ

เนื่องจากการเตรียมน้ำหมึกนำไฟฟ้าที่เตรียมได้จากการทดลองก่อนหน้านี้ ไม่สามารถประยุกต์ใช้กับเทคนิคการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์กระดาษได้ ผู้ทดลองจึงทำการปรับปรุงน้ำหมึกนำไฟฟ้าด้วยการทำให้อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ไม่เกิดการรวมตัวกัน แสดงการเตรียมน้ำหมึกนำไฟฟ้าดังนี้

3.4.3.1 เตรียมสารละลายอินเดียมทินออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวล ซึ่งตัวทำละลายเป็นเอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol; EG) โดยการชั่งอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ 22.35 มิลลิกรัม ละลายในตัวทำละลายเอทิลีนไกลคอล 200 ไมโครลิตร แล้วอัลตราโซนิกเป็นระยะเวลา 30 นาที

3.4.3.2 เติมวัสดุ Tween 20 ร้อยละ 1 โดยปริมาตร ในสารละลายที่ได้จากหัวข้อ 3.4.3.1 จากนั้นทำการโซนิเคชัน เป็นระยะเวลา 30 นาที แล้วปล่อยให้สารละลายทิ้งไว้ 2 วัน สารละลายจะแยกเป็น 2 ชั้น โดยชั้นล่างมีลักษณะเป็นตะกอน ชั้นบนมีลักษณะเป็นคอลลอยด์ของอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ในตัวทำละลาย

3.4.3.3 เจือจางสารละลาย PEDOT:PSS ลดลงร้อยละ 50 ด้วยน้ำปลอดประจุ โดยการผสม PEDOT:PSS ปริมาตร 1 มิลลิตร กับน้ำปลอดประจุปริมาตร 1 มิลลิตร เข้าด้วยกัน

3.4.3.4 ผสมสารละลายอินเดียมทินออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่เตรียมได้จากหัวข้อ 3.4.3.2 กับสารละลาย PEDOT:PSS ที่ทำการเจือจางแล้ว ด้วยอัตราส่วนปริมาตรหนึ่งต่อหนึ่ง ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน

3.5 การเตรียมขั้วไฟฟ้าจากน้ำหมึกนำไฟฟ้าด้วยเทคนิคการเตรียมฟิล์มจากสารละลาย

เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการให้น้ำหมึกนำไฟฟ้าที่เตรียมได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นขั้วไฟฟ้าบนฐานรองรับโค้งงอได้ด้วยเทคนิคการพิมพ์ แต่การทดสอบการประยุกต์ใช้งานจะเริ่มการตรวจสอบอย่างง่ายด้วยการเตรียมฟิล์มด้วยเทคนิคการหยดและการหมุนเคลือบ

3.5.1 การเตรียมฟิล์มจากน้ำหมึกนำไฟฟ้าด้วยเทคนิคการหยดบนฐานรองรับกระจก

งานวิจัยนี้เลือกการเตรียมฟิล์มด้วยเทคนิคการหยดเพื่อตรวจสอบสมบัติการนำไฟฟ้าของน้ำหมึกนำไฟฟ้าอย่างง่าย เนื่องจากเทคนิคการหยดสามารถทำได้ง่ายและรวดเร็ว โดยการเตรียมด้วยเทคนิคนี้จะเตรียมบนฐานรองรับกระจก เพื่อเป็นการตรวจสอบสมบัติการนำไฟฟ้าและตัวแปรต่างๆที่

ใช้สำหรับเตรียมฟิล์ม แต่อย่างไรก็ตามฟิล์มที่ได้จะมีความหนาเกินความต้องการ โดยมีขั้นตอนการเตรียมฟิล์มด้วยเทคนิคการหยดดังนี้ แสดงดังรูปที่ 3.7

3.5.1.1 เตรียมฐานรองรับกระจกขนาด 2.5 X 2.5 ตารางเซนติเมตร ทำความสะอาดด้วยสารละลายไอโซโพรพานอล

3.5.1.2 ทำลวดลายขนาด 1 x 1 ตารางเซนติเมตรด้วยเทปใส

3.5.1.3 หยดน้ำหมึกนำไฟฟ้าปริมาตร 40 ไมโครลิตรบริเวณที่ทำลวดลาย

3.5.1.4 ให้ความร้อนแก่ฟิล์มที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที



รูปที่ 3.7 แสดงขั้นตอนการเตรียมฟิล์มด้วยเทคนิคการหยด

3.5.2 การเตรียมฟิล์มบางจากน้ำหมึกนำไฟฟ้าด้วยเทคนิคการหมุนเคลือบบนฐานรองรับพลาสติก

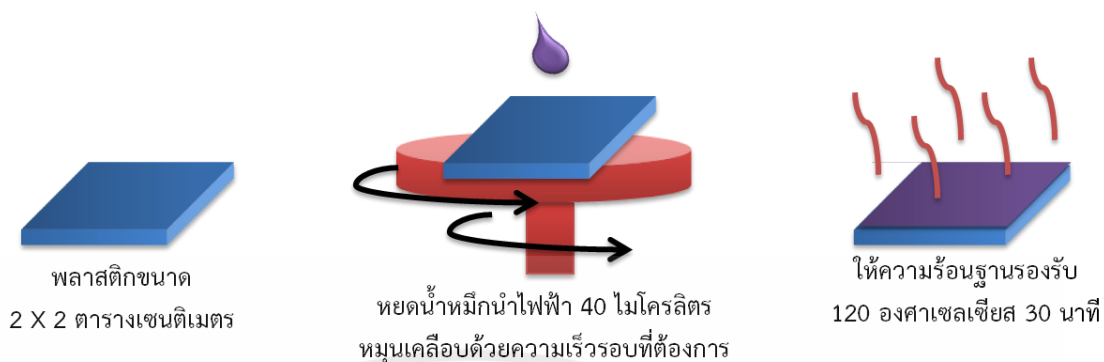
หลังตรวจสอบสมบัติการนำไฟฟ้าของน้ำหมึกนำไฟฟ้าที่เตรียมเป็นฟิล์มด้วยเทคนิคการหยด ผลการนำไฟฟ้าที่ได้มีความน่าสนใจอย่างมาก งานวิจัยนี้จึงนำน้ำหมึกนำไฟฟ้าประยุกต์เป็นฟิล์มบางด้วยเทคนิคการหมุนเคลือบ เพื่อให้ขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้มีความบางมากขึ้นซึ่งจะส่งผลให้การทะลุผ่านของแสงเพิ่มขึ้นด้วย โดยฐานรองรับที่ใช้เป็นพลาสติกใส โดยมีขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางด้วยเทคนิคการหมุนเคลือบดังนี้ แสดงดังรูปที่ 3.8

3.5.2.1 เตรียมฐานรองรับพลาสติกขนาด 2 X 2 ตารางเซนติเมตร ทำความสะอาดพื้นผิวด้วยการนำยาล้างจาน แล้วอัลตราโซนิกด้วยน้ำปลอดประจุ สารละลายไอโซโพรพานอล อย่างละ 15 นาที ตามลำดับ จากนั้นพลาสมาด้วยออกซิเจนระยะเวลา 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

3.5.2.2 กระบวนการหมุนเคลือบใช้ระบบการหมุนแบบ 2 ชั้น ชั้นแรกใช้ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ระยะเวลา 8 วินาที ชั้นสองใช้ความเร็ว 2000 และ 4000 รอบต่อนาที ระยะเวลา 30 วินาที โดยใช้ปริมาณสารในกระบวนการหยดเท่ากับ 40 ไมโครลิตร

3.5.2.3 ให้ความร้อนแกฟิล์มที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 15 นาที



รูปที่ 3.8 แสดงผังขั้นตอนการเตรียมฟิล์มด้วยเทคนิคการหมุนเคลือบ

3.5.3 การเตรียมฟิล์มบางจากน้ำหมึกนำไฟฟ้าด้วยเทคนิคการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์กระดาษ

เนื่องจากน้ำหมึกนำไฟฟ้าที่เตรียมได้จากหัวข้อ 3.4.3 สามารถประยุกต์เตรียมเป็นฟิล์มด้วยการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์กระดาษได้ โดยใช้เครื่องพิมพ์ cannon IP2770 (รูปที่ 3.9) ซึ่งทำการปรับแต่งตลับหมึก ให้สามารถใส่น้ำหมึกที่เตรียมเองเพื่อพิมพ์ได้



รูปที่ 3.9 ภาพเครื่องพิมพ์กระดาษ cannon IP2770

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การวิเคราะห์อนุภาคอินทรีย์อินทรีย์ไฮดรอกไซด์

3.6.1 ตรวจสอบโครงสร้างผลึกและออสัญฐานของสารโดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

อนุภาคที่สังเคราะห์ได้จากเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลทั้งอินทรีย์อินทรีย์ไฮดรอกไซด์และอินทรีย์อินทรีย์ไฮดรอกไซด์จะถูกวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ตรวจสอบด้วยรูปแบบ θ - 2θ สแกนจาก 20 ถึง 80 องศา ขนาดผลึก (crystal size) ของอนุภาคคำนวณจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ตามสมการของ Scherrer นอกจากนี้รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน เพื่อยืนยันชนิดของอนุภาคที่สังเคราะห์ รวมถึงศึกษาความสัมพันธ์ของระยะเวลาการไฮโดรเทอร์มอลและอุณหภูมิการเผาอนุภาคอินทรีย์อินทรีย์ไฮดรอกไซด์ว่ามีความสัมพันธ์อย่างไรกับโครงสร้างผลึกและขนาดผลึก

3.6.2 ตรวจสอบรูปแบบการสั่นของโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบภายในโครงสร้างด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FT-IR)

เป็นการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารโดยอาศัยการสั่นของโมเลกุล งานวิจัยนี้จะยืนยันการเปลี่ยนแปลงเฟสจากอนุภาคอินทรีย์อินทรีย์ไฮดรอกไซด์เป็นอนุภาคอินทรีย์อินทรีย์ไฮดรอกไซด์ด้วยเทคนิคนี้ ซึ่งจะวัดในช่วงเลขคลื่น 4000 ถึง 400 cm^{-1} ต่อเซนติเมตร โดยเทคนิคนี้สามารถตรวจสอบการเกิดเป็นอินทรีย์อินทรีย์ไฮดรอกไซด์ในเบื้องต้นได้โดยไม่ต้องวัดด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

3.6.3 ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุด้วยเทคนิควิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetry thermal analysis: TGA)

เป็นการตรวจน้ำหนักของวัสดุอินทรีย์อินทรีย์ไฮดรอกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับความร้อนจากอุณหภูมิห้องจนถึง 1200 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ข้อมูลในการร่วมวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสและโครงสร้างผลึกของอนุภาคอินทรีย์อินทรีย์ไฮดรอกไซด์ที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล

3.6.4 ตรวจสอบปริมาณความร้อนที่วัสดุดูดหรือคายด้วยหลักการวิเคราะห์สมบัติความแตกต่างทางความร้อนของสาร (Differential thermal analysis: DTA)

เป็นการตรวจสอบการดูดพลังงานความร้อนเพื่อสลายพันธะหรือการคายพลังงานความร้อนเพื่อสร้างพันธะของอนุภาคอินทรีย์อินทรีย์ไฮดรอกไซด์หรืออนุภาคนาโนอินทรีย์อินทรีย์ไฮดรอกไซด์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีภายใต้การเพิ่มอุณหภูมิ และศึกษาการเปลี่ยนแปลงของวัสดุภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยใช้อนุภาคอินทรีย์อินทรีย์ไฮดรอกไซด์ศึกษาในช่วงอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส

3.6.5 ตรวจสอบขนาดอนุภาคและลักษณะโครงสร้างของสารในระดับนาโนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูง ชนิดฟิลด์อิมิสชัน (FE-SEM)

เป็นการตรวจสอบวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว ขนาด รูปร่างของอนุภาคนาโนด้วยอาศัยลำอิเล็กตรอน ทำให้สามารถเห็นลักษณะของอนุภาคในระดับนาโนเมตรได้ งานวิจัยนี้จะวิเคราะห์ขนาดอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ โดยเลือกอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ที่ใช้ระยะเวลาการไฮโดรเทอร์มอลต่างกันตั้งแต่ 4 ถึง 48 ชั่วโมง รวมถึงอุณหภูมิการเผาที่เพิ่มขึ้น เพื่อศึกษาระยะเวลาที่เปลี่ยนไปมีความสัมพันธ์กับลักษณะอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์อย่างไร

3.7 การวิเคราะห์ฟิล์มที่เตรียมได้เพื่อประยุกต์เป็นขั้วไฟฟ้า

3.7.1 ตรวจสอบประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าด้วยการวัดความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธี 4 ขั้วเชิงเส้น

เป็นการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มที่ได้รับการยอมรับ ค่าที่ได้มีหน่วยเป็นโอห์มต่อตารางเซนติเมตรซึ่งสามารถคำนวณเป็นค่าความต้านทานจำเพาะได้เมื่อรู้ความหนาของฟิล์ม โดยงานวิจัยนี้จะวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีนี้ซึ่งแต่ละฟิล์มจะวัดทั้งหมด 5 ครั้งที่ตำแหน่งต่างกัน เพื่อหาค่าเฉลี่ยความต้านทานไฟฟ้าที่ได้

3.7.1 ตรวจสอบการทะลุผ่านของแสงด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรสโคปี

เป็นการหาค่าการทะลุผ่านแสงของฟิล์มในช่วงความยาวคลื่น 290 ถึง 900 นาโนเมตร

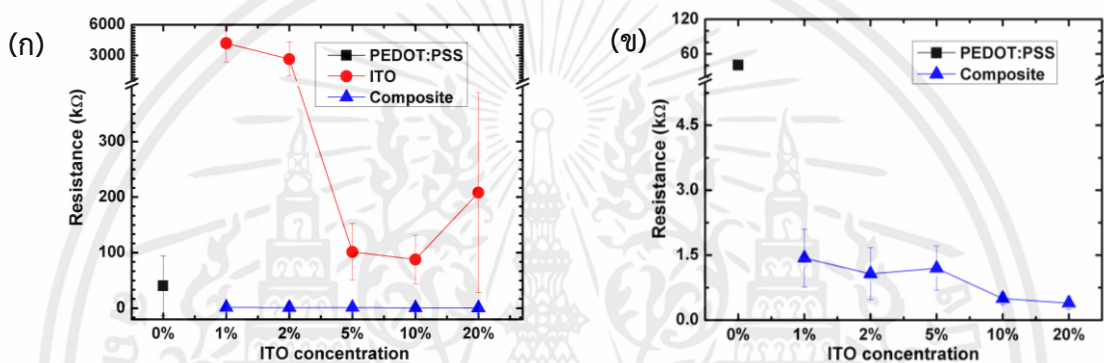
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 วิเคราะห์การนำไฟฟ้าของฟิล์มที่เตรียมจากน้ำหมึกนำไฟฟ้าด้วยเทคนิคการหยด

ฟิล์มที่เตรียมจากน้ำหมึกนำไฟฟ้าด้วยเทคนิคการหยดจะถูกตรวจสอบสมบัติการนำไฟฟ้าอย่างง่ายด้วยเทคนิคการวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 จุด เพื่อตรวจสอบสมมุติฐานว่าพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ผสมกับอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าของฟิล์มได้ แสดงผลความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มดังรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบความต้านทานไฟฟ้าของ ก). ฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายอินเดียมทินออกไซด์ สารละลายผสมระหว่างอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS และสารละลาย PEDOT:PSS ข). ฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายผสมระหว่างอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS และสารละลาย PEDOT:PSS

ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายอินเดียมทินออกไซด์ สารละลายผสมระหว่างอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS และสารละลาย PEDOT:PSS

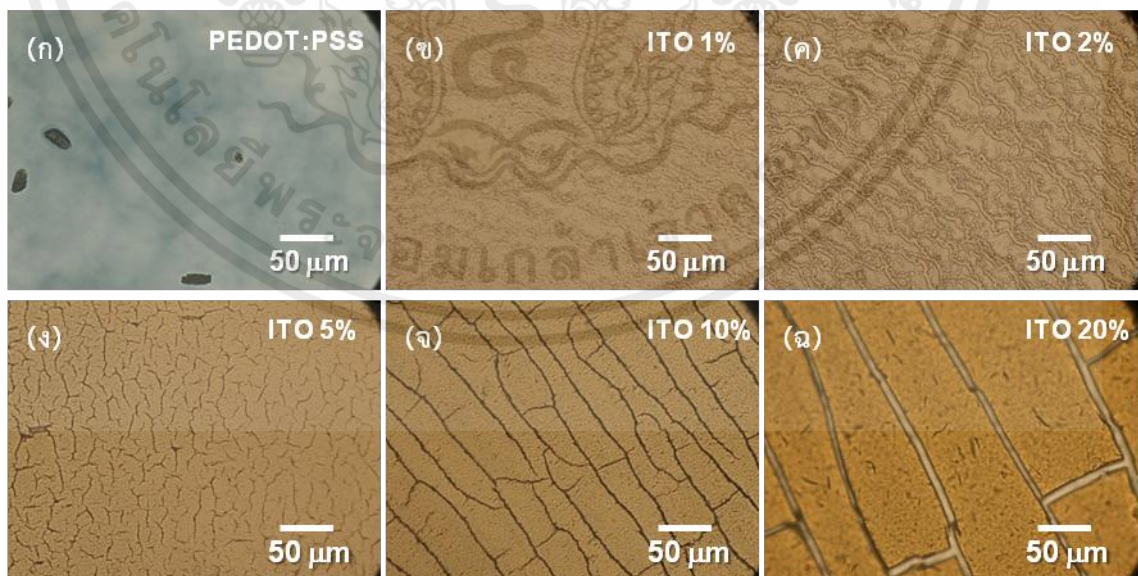
Films	PEDOT:PSS	ITO 1%	ITO 2%	ITO 5%	ITO 10%	ITO 20%
Resistance (kΩ)	40.3	4,185	2,645	101	87.6	208
SD	53.5	1,816	1,673	51	44	180

Films	com. 1%	com. 2%	com. 5%	com. 10%	com. 20%
Resistance (kΩ)	1.43	1.07	1.2	0.50	0.39
SD	0.67	0.6	0.51	0.13	0.14

จากรูปที่ 4.1 ก. ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายอินเดียมทินออกไซด์มีแนวโน้มลดลงจาก 4,185 ถึง 86 กิโลโอมห์ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์จากร้อยละ 1 ถึง ร้อยละ 10 อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความเข้มข้นมากถึงร้อยละ 20 ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 208 กิโลโอมห์ ถึงแม้ว่าการเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มลดลง แต่ค่าที่ได้ยังคงไม่เพียงพอต่อการนำไปประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้านอกจากนี้ฟิล์มที่เตรียมจากสารละลาย PEDOT:PSS มีค่าความต้านทานไฟฟ้า 40 กิโลโอมห์ แต่เมื่อนำสารละลายอินเดียมทินออกไซด์ผสมกับสารละลาย PEDOT:PSS แล้วเตรียมเป็นฟิล์ม พบว่าฟิล์มมีการลดลงของความต้านทานไฟฟ้าอย่างมาก โดยมีแนวโน้มการลดลงจาก 1.43 ถึง 0.39 กิโลโอมห์ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ถึงร้อยละ 20 พบการลดลงของความต้านทานไฟฟ้าอย่างมากของฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายผสมระหว่างอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS คาดว่าเกิดจากการเพิ่มขึ้นของทางเดินอิเล็กทรอนิกส์ (conducting pathway) ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์และ PEDOT:PSS โดยอธิบายด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและกล้องจุลทรรศน์ชนิดแรงอะตอม

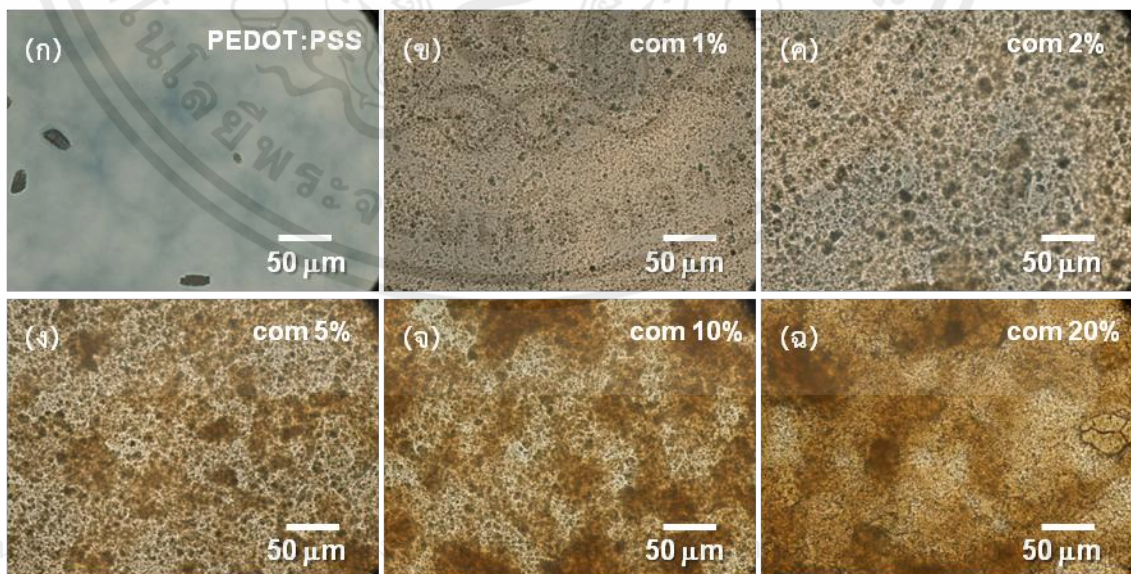
4.2 วิเคราะห์ลักษณะทางพื้นผิวฟิล์มที่เตรียมจากน้ำหมึกนำไฟฟ้าด้วยเทคนิคการหยด

เพื่ออธิบายการนำไฟฟ้าของฟิล์มที่เพิ่มขึ้น ฟิล์มถูกวิเคราะห์ลักษณะทางพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและกล้องจุลทรรศน์ชนิดแรงอะตอม



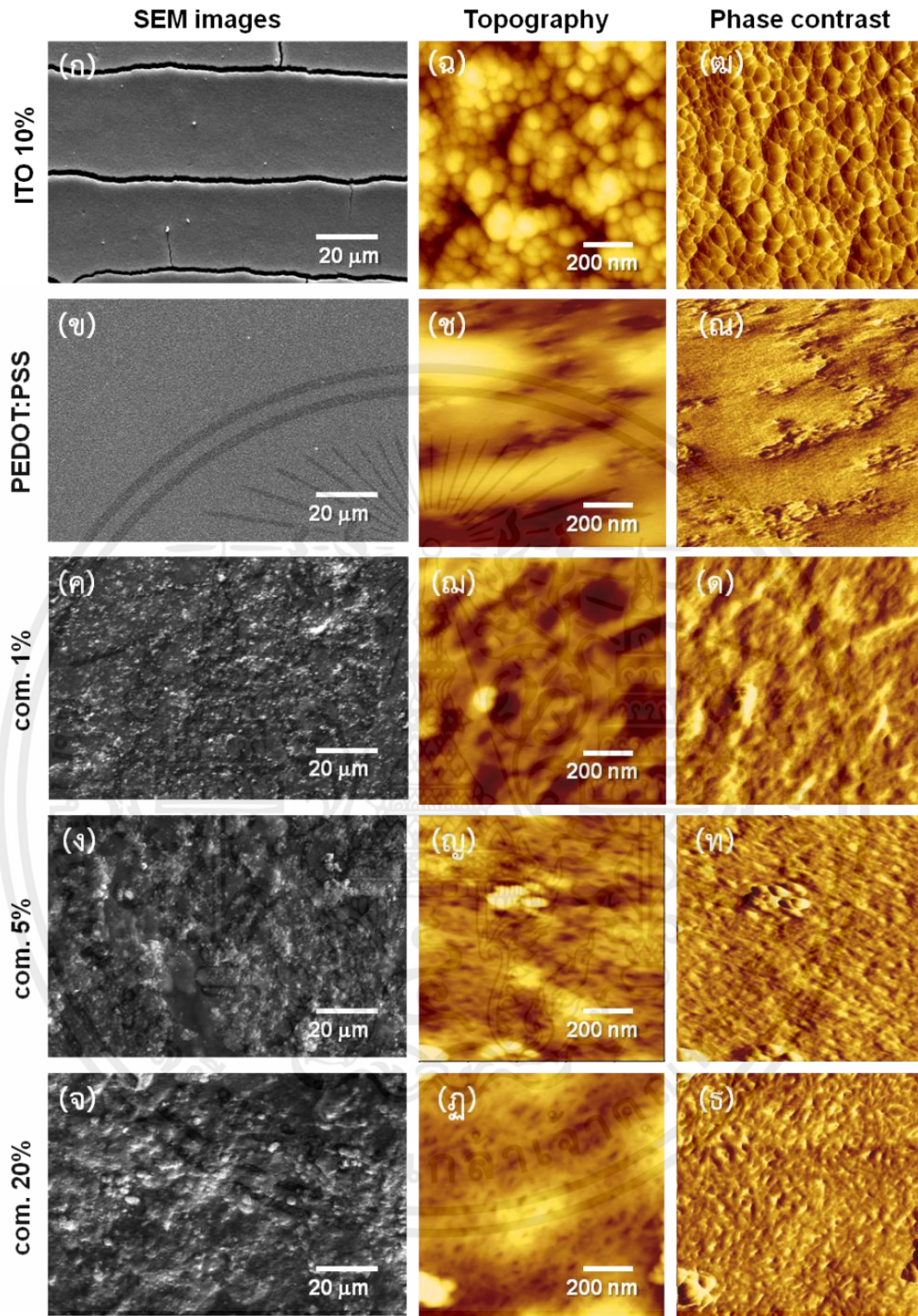
รูปที่ 4.2 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของฟิล์มที่เตรียมจากสารละลาย PEDOT:PSS และสารละลายอินเดียมทินออกไซด์

จากรูปที่ 4.2 (ก) แสดงภาพของฟิล์มที่เตรียมจากสารละลาย PEDOT:PSS สังเกตพบว่าลักษณะฟิล์มมีความต่อเนื่องตลอดทั้งฟิล์มและมีกลุ่มก้อนของ PEDOT:PSS เป็นบางตำแหน่งซึ่งเกิดจากการใช้สารละลาย PEDOT:PSS โดยไม่ผ่านตัวกรอง สำหรับฟิล์มบางที่เตรียมจากสารละลายอินเดียมทินออกไซด์ความเข้มข้นโดยมวลร้อยละ 1 2 5 10 และ 20 แสดงดังรูปที่ 4.2 (ข) ถึง 4.2 (ฉ) ตามลำดับ พบว่าขณะความเข้มข้นของอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 20 ลักษณะทางพื้นผิวของฟิล์มมีแนวโน้มเฟสของอินเดียมทินออกไซด์ต่อเนื่องกันมากขึ้น นั่นส่งผลให้ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มลดลง อย่างไรก็ตามที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 เฟสของอินเดียมทินออกไซด์มีการรวมตัวกันมากเกินไปจนเกิดรอยแยกระหว่างเฟสอย่างชัดเจน ส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มเพิ่มขึ้นอีกครั้ง สำหรับฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายผสมระหว่างอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS โดยความเข้มข้นของอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์เพิ่มขึ้นร้อยละ 1 2 5 10 และ 20 แสดงดังรูปที่ 4.3 (ข) ถึง 4.3 (ฉ) ตามลำดับ สังเกตพบว่าฟิล์มที่เตรียมสารละลายผสมมีลักษณะพื้นผิวแตกต่างกับฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายอินเดียมทินออกไซด์ โดยฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายผสมมีเฟสผสมกัน 2 เฟส สามารถแยกออกได้ด้วยสี เฟสสีน้ำเงินเป็น PEDOT:PSS ส่วนเฟสสีน้ำตาลดำเป็นกลุ่มของอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ ฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายผสมความเข้มข้นของอินเดียมทินออกไซด์น้อยกว่าร้อยละ 5 พื้นผิวฟิล์มมีเฟสของอินเดียมทินออกไซด์ขนาดเล็กแสดงดังรูป 4.3 (ข) และ 4.3 (ค) อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความเข้มข้นอินเดียมทินออกไซด์ถึงร้อยละ 20 แสดงดังรูป 4.3 (ง), 4.3 (จ) และ 4.3 (ฉ) เฟสของอินเดียมทินออกไซด์มีขนาดใหญ่แล้วต่อเนื่องกันมากขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของขนาดเฟสอินเดียมทินออกไซด์และการต่อเนื่องกันของเฟสส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลง นอกจากเหตุผลดังกล่าวการเคลื่อนที่ของประจุระหว่างวัสดุ PEDOT:PSS และอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ยังส่งผลทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มลดลง



เอกสารนี้เป็น

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 4.3 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของฟิล์มที่เตรียมจากสารละลาย PEDOT:PSS และสารละลายผสมระหว่างอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS



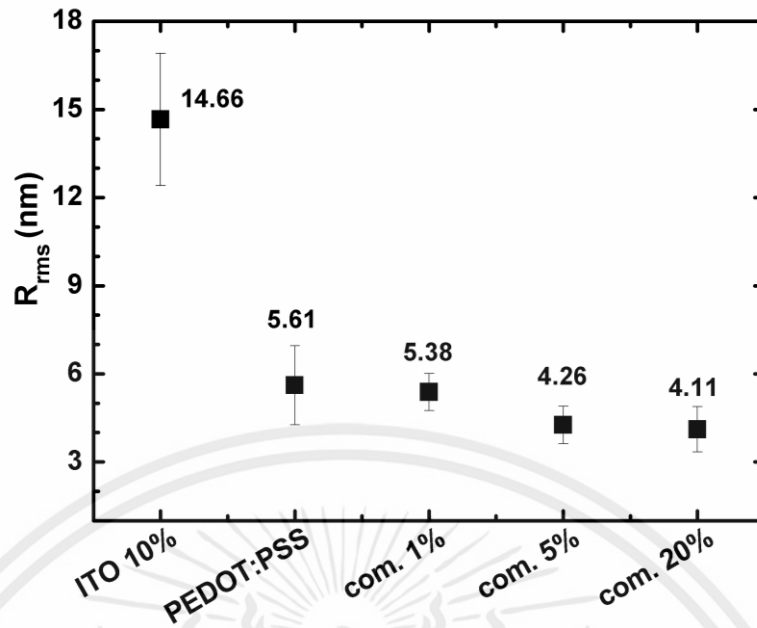
รูปที่ 4.4 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มที่เตรียมจาก (ก)

สารละลายอินเดียมทินออกไซด์ความเข้มข้นโดยมวลร้อยละ 10 (ข) สารละลาย PEDOT:PSS สารละลายผสมระหว่างพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS และอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ความเข้มข้น (ค) ร้อยละ 1 (ง) ร้อยละ 5 (จ) ร้อยละ 20 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดแรงอะตอมของฟิล์มที่เตรียมจาก (ฉ) สารละลายอินเดียมทินออกไซด์ความเข้มข้นโดยมวลร้อยละ 10 (ช) สารละลาย PEDOT:PSS

สารละลายผสมระหว่างพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS และอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ความเข้มข้น (ณ) ร้อยละ1 (ญ) ร้อยละ5 (ฎ) ร้อยละ20 และ ภาพเฟสจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดแรงอะตอมของฟิล์มที่เตรียมจาก (ฅ) สารละลายอินเดียมทินออกไซด์ความเข้มข้นโดยมวลร้อยละ10 (ณ) สารละลาย PEDOT:PSS สารละลายผสมระหว่างพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS และอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ความเข้มข้น (ด) ร้อยละ1 (ท) ร้อยละ5 (ธ) ร้อยละ20

ลักษณะพื้นผิวที่สังเกตจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและกล้องจุลทรรศน์ชนิดแรงอะตอมของฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายอินเดียมทินออกไซด์ความเข้มข้นโดยมวลร้อยละ 10 แตกต่างกับฟิล์มที่เตรียมจากสารละลาย PEDOT:PSS โดยฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายอินเดียมทินออกไซด์ความเข้มข้นโดยมวลร้อยละ10 มีการรวมกันระหว่างอนุภาคแต่อย่างไรก็ตามยังคงเกิดรอยต่อระหว่างกลุ่มอนุภาคอยู่ส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง ขณะที่ฟิล์มที่เตรียมจากสารละลาย PEDOT:PSS มีลักษณะพื้นผิวต่อเนื่องเป็นเนื้อเดียวกันโดยมีกลุ่มของ PEDOT:PSS กระจายอยู่ทั่วฟิล์ม ที่น่าสนใจคือฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายผสมระหว่างอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS มีลักษณะพื้นผิวแตกต่างกับฟิล์มทั้งสองชนิดดังกล่าวคือฟิล์มวัสดุผสมที่ความเข้มข้นอินเดียมทินออกไซด์ต่ำเกิดการรวมตัวกันของอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์เป็นกลุ่มอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ที่มีขนาดเล็กอยู่แยกออกจากกันโดยกระจายตัวอยู่กับวัสดุ PEDOT:PSS แต่เมื่อความเข้มข้นอินเดียมทินออกไซด์เพิ่มขึ้นกลุ่มอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์จะมีขนาดใหญ่ขึ้นจนบางตำแหน่งเกิดการเชื่อมติดกัน ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและผลความต้านทานไฟฟ้า นอกจากนี้ภาพของฟิล์มวัสดุผสมที่พบกลุ่มก้อนอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์กระจายตัวอยู่ใน PEDOT:PSS ยังยืนยันสนับสนุนพื้นฐานเรื่องการเคลื่อนที่ของประจุระหว่างอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์กับวัสดุ PEDOT:PSS ทำให้ประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าของฟิล์มวัสดุผสมดีขึ้น หนึ่งตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าคือความขรุขระ ซึ่งการลดลงของความขรุขระทางพื้นผิวมีแนวโน้มทำให้การนำไฟฟ้าดีขึ้น[1] แสดงค่าความขรุขระ (R_{rms}) ที่วัดได้จากกล้องจุลทรรศน์ชนิดแรงอะตอมดังรูปที่ 4.5 พบว่าความขรุขระของฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายผสมระหว่างอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS มีแนวโน้มลดลงจาก 5.38 ถึง 4.11 นาโนเมตร เมื่อความเข้มข้นอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ1 ถึงร้อยละ20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



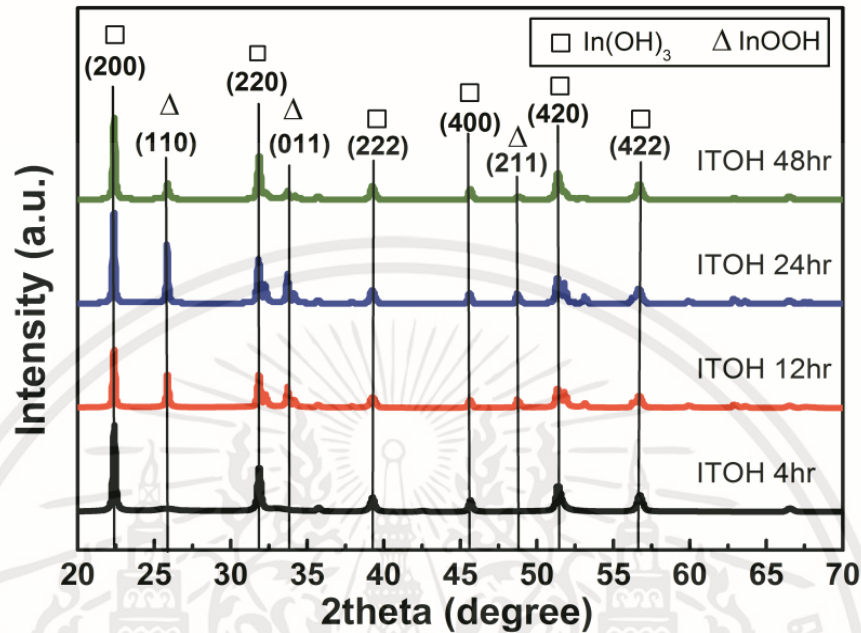
รูปที่ 4.5 แสดงค่าความขรุขระ (R_{rms}) ของแต่ละฟิล์ม โดยวัดทั้งหมด 15 ตำแหน่งทั่วฟิล์ม

จากผลการทดลองข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าการประยุกต์ทำน้ำหมึกนำไฟฟ้ามีโอกาสทำได้ โดยการใช้วัสดุผสมระหว่างอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS แต่อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานไฟฟ้าของน้ำหมึกนำไฟฟ้าที่เตรียมเป็นฟิล์ม ยังคงมีค่ามากเกินไป สำหรับประยุกต์ใช้งานเป็นขั้วไฟฟ้า ผู้ทดลองจึงตั้งสมมติฐานว่าหนึ่งในปัจจัยที่สามารถปรับปรุง ประสิทธิภาพของน้ำหมึกนำไฟฟ้าได้คืออนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ที่มีขนาดและโครงสร้างผลึก แตกต่างกัน ดังนั้นผู้ทดลองจึงทำการเปลี่ยนวิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ จาก วิธีการตกตะกอนร่วมเป็นวิธีการไฮโดรเทอร์มอล ซึ่งเป็นวิธีการที่สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโน อินเดียมทินออกไซด์ให้ได้โครงสร้างผลึกและขนาดได้ตามต้องการ โดยการเปลี่ยนตัวแปรต้นต่างๆ เช่น ระยะเวลาการไฮโดรเทอร์มอล ค่าความเป็นกรดเบสขณะเกิดปฏิกิริยา อุณหภูมิการเผา เป็นต้น ในส่วนต่อไปจึงกล่าวถึงการวิเคราะห์ผลการดำเนินงานวิจัยการสังเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินไฮ ดรอกไซด์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล ซึ่งใช้ระยะเวลาการไฮโดรเทอร์มอลตั้งแต่ 4 ถึง 48 ชั่วโมง ค่า ความเป็นกรดเบสขณะเกิดปฏิกิริยา และอุณหภูมิที่ใช้เผาอนุภาคตั้งแต่ 200 ถึง 1200 องศาเซลเซียส โดยวิเคราะห์ขนาดและโครงสร้างของผลึกด้วยเทคนิคต่างๆ

4.3 วิเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลที่ ระยะเวลาการไฮโดรเทอร์มอลต่างกัน คือ 4 12 24 และ 48 ชั่วโมง

อนุภาคที่ได้จากการล้างตะกอนด้วยน้ำปลอดประจุแล้วผ่านการทำให้แห้งนั้น อนุภาคจะมีสี ขาว เป็นผลผลิตที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล เพื่อยืนยันว่าอนุภาคดังกล่าวเป็นอนุภาคนาโน อินเดียมทินออกไซด์ จึงนำไปตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยตรวจสอบ

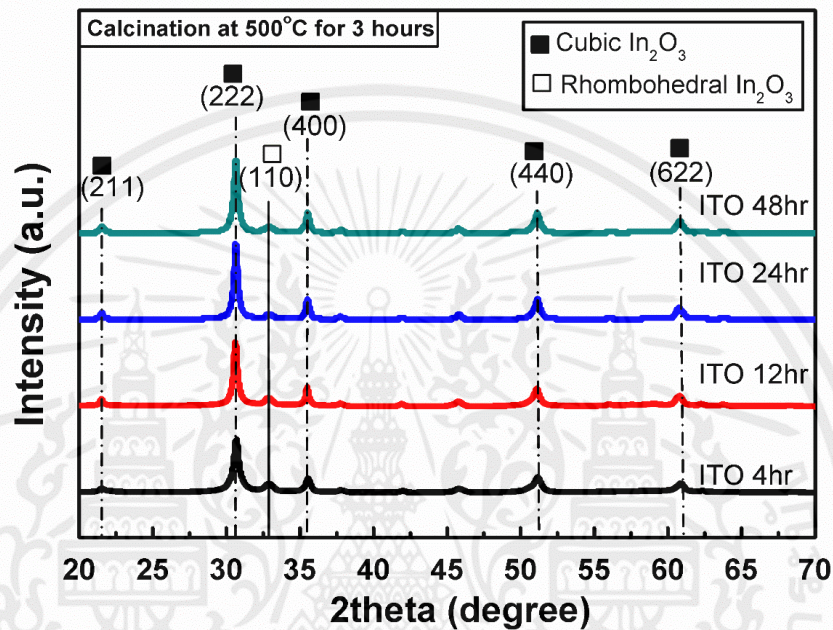
อนุภาคที่สังเคราะห์ได้จากเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล เงื่อนไขระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอลต่างกันทั้ง 4 เงื่อนไข คือ 4, 12, 24 และ 48 ชั่วโมง แสดงผลการวัดดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคที่ได้หลังกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

จากรูปที่ 4.6 พบยอดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์หลายตำแหน่ง แต่ทุกยอดการดูดกลืนนั้นเกิดจากการดูดกลืนของอินเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{In}(\text{OH})_3$) และอินเดียมออกซีไฮดรอกไซด์ (InOOH) [15, 34] ซึ่งเป็นยอดการดูดกลืนของอนุภาคอินเดียมทินไฮดรอกไซด์ (ITOH) ซึ่งอนุภาคนี้สามารถเปลี่ยนแปลงเป็นอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ได้ด้วยการเผาที่อุณหภูมิสูง ผลของการสังเคราะห์อนุภาคอินเดียมทินไฮดรอกไซด์ที่ได้นี้ทำให้สามารถยืนยันได้ว่า การสังเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล ไม่สามารถทำให้สำเร็จได้ด้วยขั้นตอนเดียว แต่จำเป็นต้องผ่านการเผาอีกครั้ง อย่างไรก็ตามระยะเวลาการไฮโดรเทอร์มอลมีผลต่อโครงสร้างของอินเดียมไฮดรอกไซด์และอินเดียมออกซีไฮดรอกไซด์ในอินเดียมไฮดรอกไซด์ โดยอินเดียมออกซีไฮดรอกไซด์เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณการดูดกลืนที่ (110) และ (011) ซึ่งจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอลเป็น 24 ชั่วโมงแล้วลดลงอีกครั้งที่ 48 ชั่วโมง ผลดังกล่าวสามารถอธิบายจากการเกิดตะกอนเฟสของอินเดียมไฮดรอกไซด์เปลี่ยนแปลงเป็นเฟสอินเดียมออกซีไฮดรอกไซด์เมื่อระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอลเพิ่มขึ้น แล้วเมื่อเพิ่มระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอลต่อไปอีกจะทำให้เกิดเปลี่ยนแปลงเฟสอีกครั้ง (re-transformation) จากอินเดียมออกซีไฮดรอกไซด์เป็นอินเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเฟสสามารถเกิดกลับไปกลับมาได้ตลอดเวลาเมื่อยังคงให้พลังงานแก่ระบบต่อไปภายใน 48 ชั่วโมง

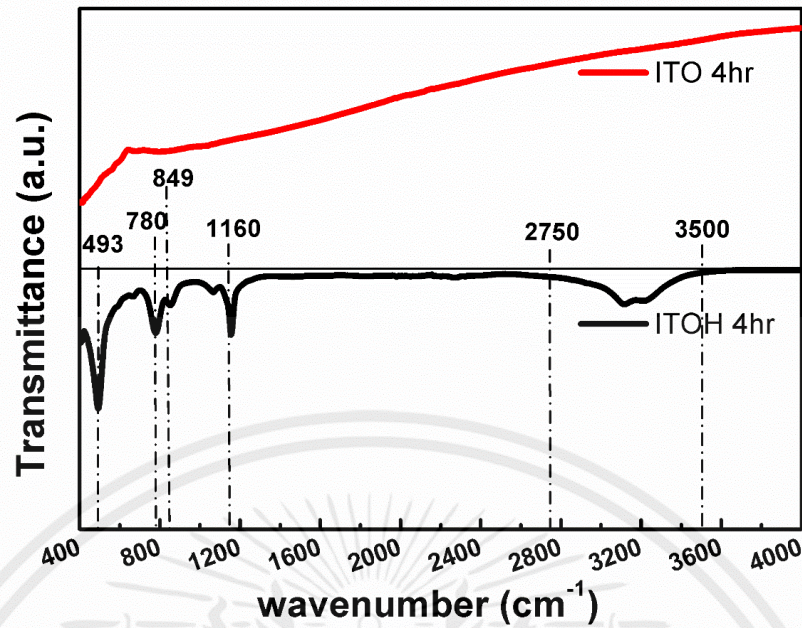
เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ตามต้องการ จึงจำเป็นต้องเผาอนุภาคอินเดียมทินไฮดรอกไซด์เพื่อให้ไฮดรอกไซด์เกิดออกซิเดชันเปลี่ยนแปลงเป็นออกไซด์ โดยงานวิจัยนี้เลือกเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ในสภาวะอากาศปกติ ผลที่ได้คืออนุภาคอินเดียมทินไฮดรอกไซด์เปลี่ยนแปลงเป็นอินเดียมทินออกไซด์ แสดงในรูป 4.7



รูปที่ 4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

หลังจากการเผาที่ 500 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 3 ชั่วโมง อนุภาคจะเปลี่ยนจากสีขาวเป็นสีเหลือง เมื่อนำอนุภาคนั้นตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จะพบรูปแบบการดูดกลืนตำแหน่งใหม่ มีตำแหน่งการดูดกลืนสำคัญที่ตำแหน่ง 30.6 35.5 และ 51.1 องศา ซึ่งสอดคล้องกับระนาบ (222) (400) และ (440) ตามลำดับ โดยทั้งสามเป็นระนาบของอินเดียมออกไซด์ (In_2O_3) โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ (cubic structure) ที่พบได้ในอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ มากกว่านั้นตำแหน่ง 32.9 องศา ยังพบระนาบ (110) ซึ่งเป็นระนาบของอินเดียมออกไซด์ (In_2O_3) โครงสร้างผลึก ромโบฮีดรอล (Rhombohedral structure) โดยสองโครงสร้างผลึกทั้งโครงสร้างลูกบาศก์และ ромโบฮีดรอลเป็นโครงสร้างผลึกของอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ [15, 18, 34] สำหรับผลของระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอลที่มีต่ออนุภาคอินเดียมทินไฮดรอกไซด์นั้น ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงเป็นอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์แต่อย่างไร

ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

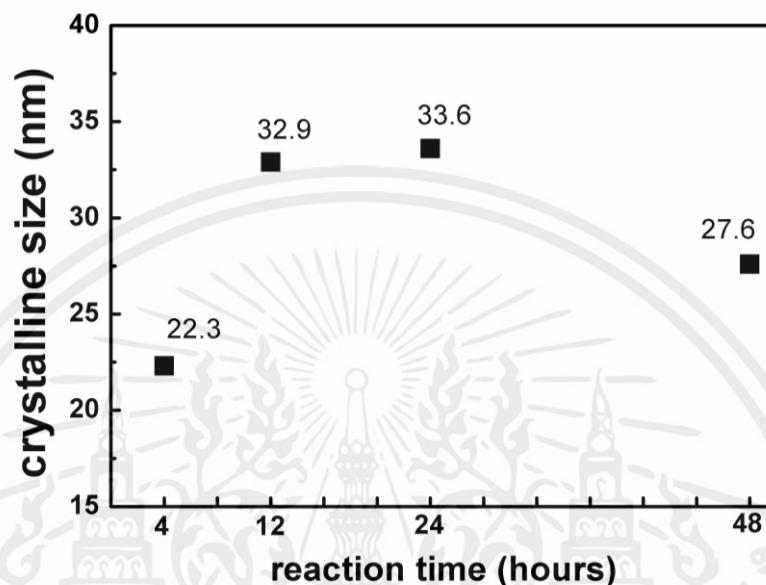


รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมระหว่างอินเดียมทินไฮดรอกไซด์และอินเดียมทินออกไซด์ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งทั้งสองตัวอย่างใช้ระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอลเท่ากันคือ 4 ชั่วโมง

นอกจากนี้สามารถยืนยันการเปลี่ยนแปลงจากอินเดียมทินไฮดรอกไซด์เป็นอินเดียมออกไซด์ได้จากการตรวจสอบการการสั่นของโมเลกุลด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี โดยทำการตรวจสอบทั้งอนุภาคอินเดียมทินไฮดรอกไซด์และอินเดียมทินออกไซด์ที่ระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอลเท่ากัน คือ 4 ชั่วโมงแสดงผลการวัดดังรูปที่ 4.8 พบว่าก่อนเผาที่ 500 องศาเซลเซียสเกิดการสเปกตรัมดูดกลืนที่เลขคลื่น 493 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นพันธะของอินเดียมกับออกซิเจน (vibration of In-O), ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 780 cm^{-1} และ 849 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นในโมเลกุลอินเดียมกับไฮดรอกไซด์ (vibration modes in In-OH), ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1160 cm^{-1} สอดคล้องกับการงอของไฮดรอกไซด์ (OH bending mode) และที่ช่วง 2750-3500 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นขยายออกของพันธะไฮดรอกไซด์ (OH stretching vibrations) [34] เมื่อผ่านการให้อุณหภูมิสูงถึง 500 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ไม่ปรากฏยอดการดูดกลืนที่สัมพันธ์กับการสั่นของกลุ่มไฮดรอกซิล (vibration of hydroxyl species) นั้นแสดงว่าอนุภาคอินเดียมทินไฮดรอกไซด์เปลี่ยนแปลงเป็นอินเดียมทินออกไซด์ทั้งหมด

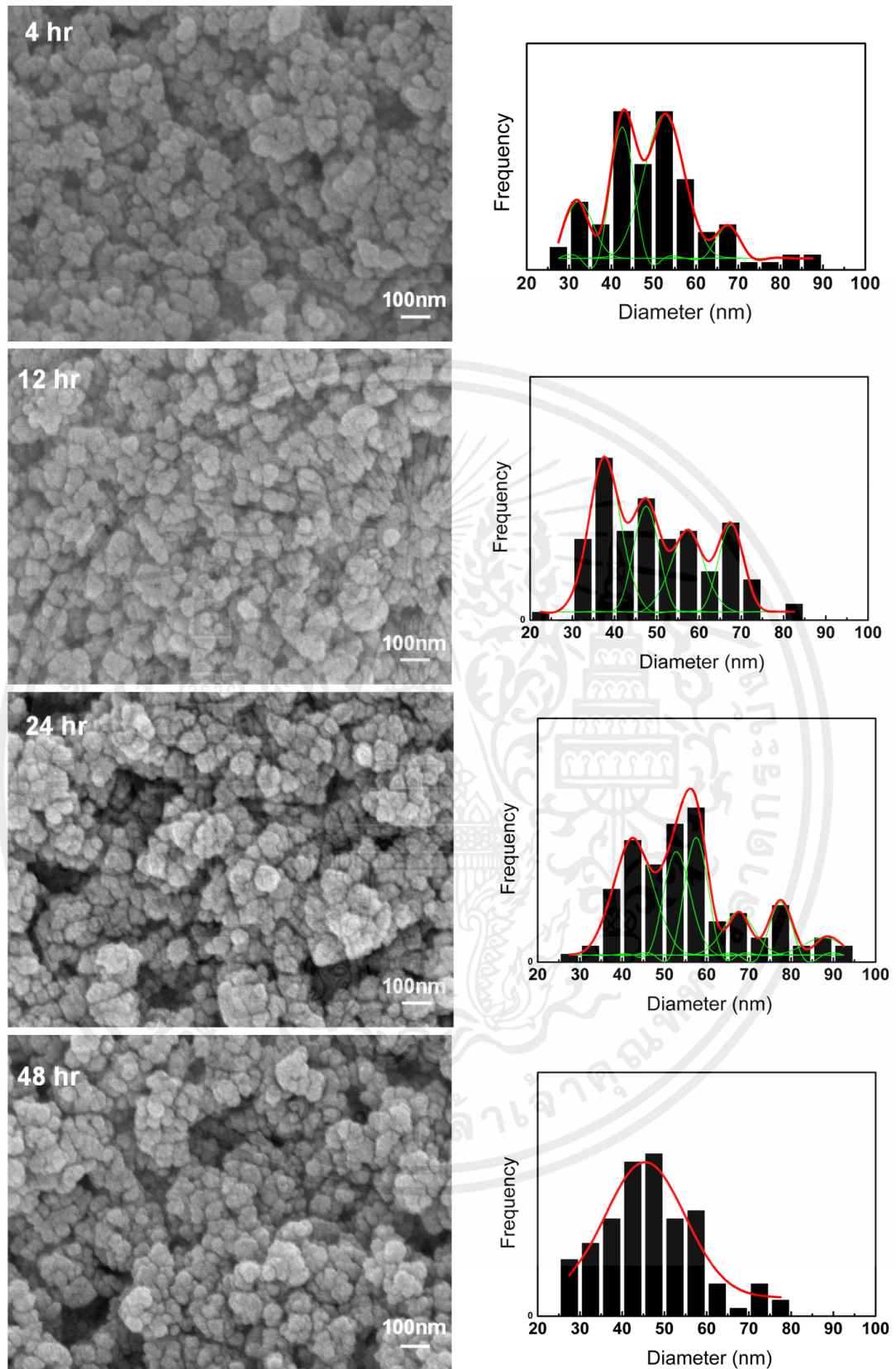
แม้ว่าระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอลจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงเฟสเป็นอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ แต่กลับส่งผลต่อขนาดผลึกของอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ จากการคำนวณขนาดอนุภาคด้วยสมการของเดอบอย-เชอร์เรอ (Debye-Scherrer equation) ที่ระนาบ (222) ของอินเดียมออกไซด์โครงสร้างลูกบาศก์ แสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่าขนาดผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 22.3 ถึง 33.6 นาโนเมตรเมื่อระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอลเพิ่มจาก 4 ชั่วโมง เป็น 24 ชั่วโมง แล้วลดลงอีกครั้งเหลือ 27.6

นาโนเมตร ที่ระยะเวลา 48 ชั่วโมง ซึ่งผลดังกล่าวเกิดจากขณะที่ตะกอนในสารละลายยังคงถูกให้พลังงานต่อไป ตะกอนมีโอกาสที่จะละลายกลับคืนสู่สารละลาย (dissolution) แล้วค่อยเกิดการตกตะกอนขึ้นใหม่โดยมีขนาดเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม [35] ตะกอนที่ได้ใหม่จึงส่งผลต่อขนาดของอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง



รูปที่ 4.9 ขนาดผลึกของอินเดียมทินออกไซด์ในทิส (222)

นอกจากระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอลจะส่งผลกับขนาดอนุภาคผลึกของอินเดียมทินออกไซด์แล้ว ยังส่งผลต่อลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ด้วย แสดงดังรูปที่ 4.10 การไฮโดรเทอร์มอลด้วยระยะเวลา 4 ชั่วโมง ขนาดอนุภาคที่ได้จะพบตั้งแต่ 25 ถึง 90 นาโนเมตร แต่ส่วนใหญ่จะพบอนุภาคขนาดประมาณ 40 และ 50 นาโนเมตร เมื่อเพิ่มระยะเวลาการไฮโดรเทอร์มอลเป็น 12 ชั่วโมง ขนาดอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์จะอยู่ในช่วง 20 ถึง 85 นาโนเมตร ซึ่งส่วนใหญ่จะพบทั้งขนาด 40 50 60 และ 70 นาโนเมตร จากนั้นที่ระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอลเพิ่มเป็น 24 ชั่วโมง จะพบขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 25 ถึง 95 นาโนเมตร โดยอนุภาคส่วนใหญ่มีขนาด 40 50 และ 60 นาโนเมตร นอกจากนี้เมื่อระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอลเป็น 48 ชั่วโมง พบขนาดอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์อยู่ในช่วง 25 ถึง 80 นาโนเมตร และมีขนาดอนุภาคส่วนใหญ่ที่ 40 ถึง 50 นาโนเมตร จากการศึกษาขนาดการกระจายตัวของอนุภาคจะสังเกตเห็นว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาการไฮโดรเทอร์มอล ขนาดอนุภาคมีขนาดเปลี่ยนแปลงไปมีทั้งขนาดใหญ่ขึ้นและเล็กลง อย่างไรก็ตามขนาดดังกล่าวจะเล็กไม่เกินกว่า 20 นาโนเมตร และใหญ่ไม่เกิน 95 นาโนเมตร ดังนั้นการสังเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลด้วยระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอลต่างกัน ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคเกินระดับนาโนเมตรคือมีการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ในช่วงไม่เกิน 100 นาโนเมตร



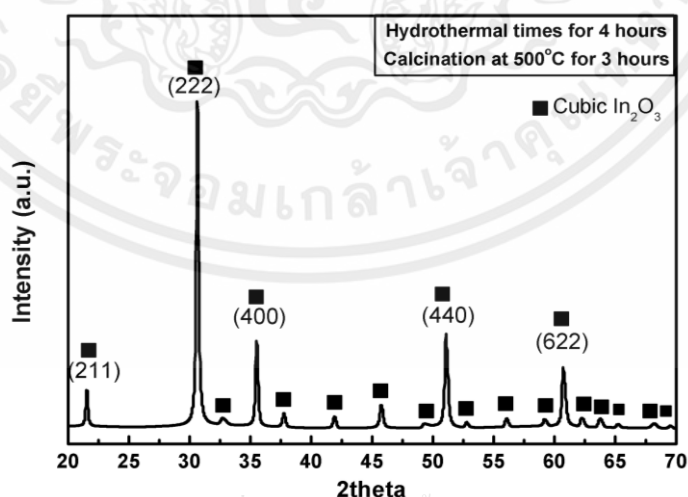
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 4.10 แสดงภาพจาก FE-SEM ของอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ที่ระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอลตั้งแต่ 4 ถึง 48 ชั่วโมง ซึ่งอุณหภูมิการเผาเท่ากับที่ 500 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และแสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์

4.4 วิเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลที่ความเข้มข้นสารตั้งต้นเพิ่มขึ้นจากเดิม 8 เท่า

เนื่องจากการสังเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลที่ความเข้มข้นสารตั้งต้นเดิม สามารถสังเคราะห์อนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ได้ตามต้องการแต่ปริมาณที่ได้กลับน้อยมาก ไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้เพื่อทำงานวิจัยต่อยอด ผู้วิจัยจึงเพิ่มปริมาณความเข้มข้นสารตั้งต้นจากความเข้มข้นอินเดียมคลอไรด์ 153.80 มิลลิโมลาร์ และทินคลอไรด์ 17.08 มิลลิโมลาร์ เป็น 8 เท่าของความเข้มข้นเดิมโดยใช้ตัวทำละลายปริมาณเท่าเดิมคือปริมาณ 20 มิลลิลิตรต่อสารหนึ่งชนิด หรือเพิ่มปริมาณเนื้อสารเคมีจากเดิมนั้นเอง จากนั้นทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล ซึ่งเปลี่ยนตัวแปรควบคุมคือความเข้มข้นสารตั้งต้นใหม่โดยเพิ่มขึ้นจากเดิมเป็น 8 เท่า และศึกษาตัวแปรต้นคือปริมาณเบสที่ใช้หรือค่าความเป็นกรด-เบสขณะเกิดปฏิกิริยาโดยศึกษาช่วง pH8 ถึง pH12

4.4.1 อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลโดยค่าความเป็นกรด-เบสขณะเกิดปฏิกิริยาเป็น 8

เมื่อทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โดยเพิ่มปริมาณสารตั้งต้นแต่ตัวทำละลายเท่าเดิม ผู้วิจัยสนใจในอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ที่จะสังเคราะห์ได้ ว่าสามารถได้โครงสร้างผลึกลูกบาศก์เหมือนเดิมและได้ปริมาณผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้นหรือไม่ จึงสังเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลโดยเลือกใช้ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเป็น 4 ชั่วโมง ซึ่งใช้เวลาน้อยที่สุดเพื่อให้ได้อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ แล้วตรวจสอบโครงสร้างผลึกและเอกลักษณ์ของสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แสดงดังรูปที่ 4.11



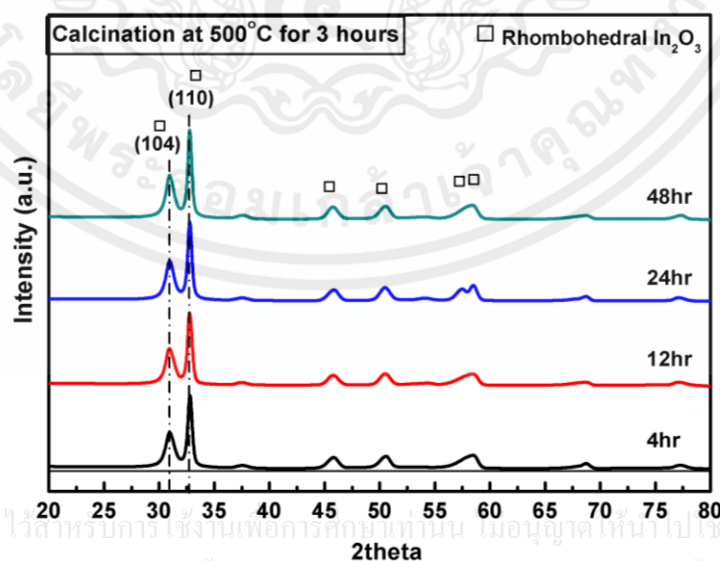
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 4.11 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ที่ความเข้มข้นสารตั้งต้นเพิ่มขึ้น 8 เท่า ระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอลเป็น 4 ชั่วโมง และเผาด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.11 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้จากการเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้น พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ซึ่งสังเกตได้จากตำแหน่งการเลี้ยวเบนสำคัญที่ 21.5 30.6 35.5 51.1 และ 60.7 องศา ซึ่งแสดงถึงระนาบ (211) (222) (400) (440) และ (622) ตามลำดับ ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นสารตั้งต้นไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์แต่ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้มีปริมาณเพิ่มขึ้น

4.4.2 อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลโดยค่าความเป็นกรดเบสขณะเกิดปฏิกิริยาเป็น 12

จากการสังเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลโดยเพิ่มความเข้มข้นสารตั้งต้น ส่งผลให้ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์มากขึ้นโดยโครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ไม่เปลี่ยนแปลงคือได้โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ อย่างไรก็ตามสำหรับอินเดียมทินออกไซด์มีโครงสร้างผลึกที่รู้จักกันโดยทั่วไป 2 ระบบคือ โครงสร้างผลึกลูกบาศก์และโครงสร้างผลึกรอมโบเอ็ดรอล ผู้วิจัยมีความสนใจหาตัวแปรที่จะส่งผลให้การสังเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์เกิดเป็นโครงสร้างผลึกรอมโบเอ็ดรอล จึงศึกษาภายใต้เงื่อนไขการเพิ่มปริมาณเบสที่ใช้สำหรับทำให้ระบบเกิดปฏิกิริยา โดยจะเพิ่มปริมาณเป็นสองเท่าของเบสที่ใช้ให้ระบบเกิดปฏิกิริยาโดยสมบูรณ์ ซึ่งวัดค่าความเป็นกรดเบสขณะเกิดปฏิกิริยาได้เป็น 12 นอกจากนี้ยังศึกษาระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาตั้งแต่ 4 ถึง 48 ชั่วโมง ส่งผลอย่างไรต่อการเกิดอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แสดงดังรูปที่ 4.12



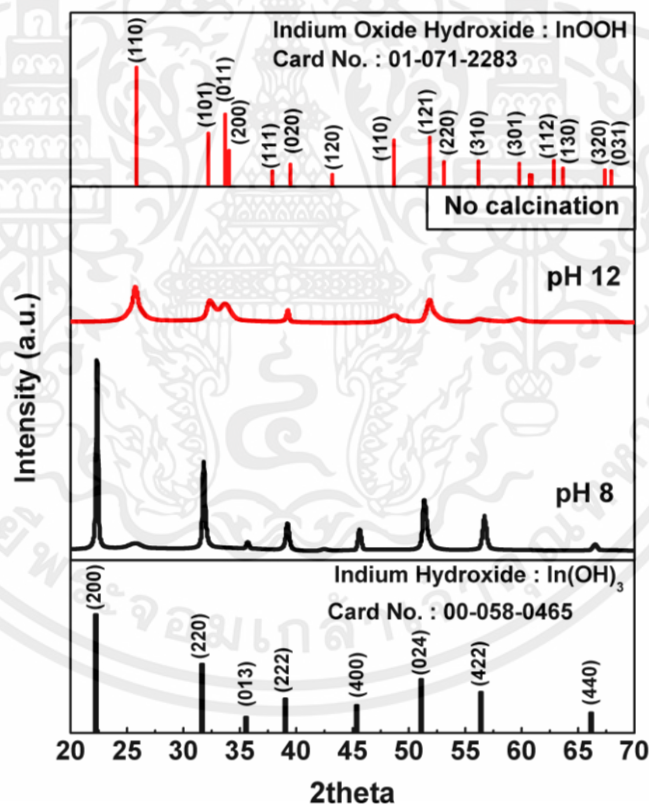
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.12 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ ระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอลต่างกันตั้งแต่ 4 ถึง 48 ชั่วโมง อุณหภูมิการเผา 500 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง

ผลที่ได้คือรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ไม่ปรากฏตำแหน่งการเลี้ยวเบนของอินเดียมออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ ที่ตำแหน่งการเลี้ยวเบน 21.5 30.6 35.5 51.1 และ 60.7 องศา แต่พบตำแหน่งการเลี้ยวเบนสำคัญเป็น 31 และ 32.8 องศา ซึ่งเป็นการเลี้ยวเบนในระนาบ (104) และ (110) ตามลำดับ ของอินเดียมออกไซด์โครงสร้างผลึกออร์โธโรมโบอิดรอล นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในกรณีการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา พบว่าระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาไม่ส่งผลอย่างชัดเจนต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกและขนาดผลึกทั้งในระนาบ (104) และ (110) ดังนั้นหนึ่งในตัวแปรที่ส่งผลให้ได้อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกต่างกันคือค่าความเป็นกรดเบสขณะเกิดปฏิกิริยาหรือปริมาณเบสที่ใช้ทำปฏิกิริยา

อินเดียมทินไฮดรอกไซด์ ($\text{InSn}(\text{OH})_7$) เป็นเฟสก่อนที่จะเกิดการเปลี่ยนเป็นอินเดียมทินออกไซด์ (InSnO_7) หลังผ่านการเผา รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคนาโนอินเดียมทินไฮดรอกไซด์ที่เงื่อนไขค่าความเป็นกรดเบสขณะเกิดปฏิกิริยาต่างกันจึงถูกศึกษาเพื่ออธิบายการเกิดโครงสร้างผลึกที่ต่างกันทั้งผลึกลูกบาศก์และผลึกออร์โธโรมโบอิดรอล แสดงดังรูปที่ 4.13



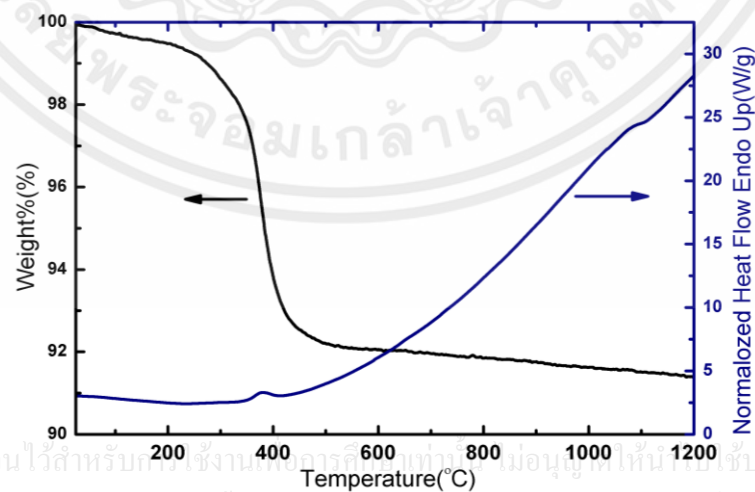
รูปที่ 4.13 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคนาโนอินเดียมทินไฮดรอกไซด์ออกไซด์ ระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอล 4 ชั่วโมง ที่ค่าความเป็นกรด-เบสขณะเกิดปฏิกิริยาต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น สำหรับเงื่อนไขการใช้เบสในการเกิดปฏิกิริยาพอดีสามารถวัดค่าความเป็นกรดเบสได้ 8 ในขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มปริมาณเบสเป็นสองเท่า ค่าความเป็นกรด-เบสจะเพิ่มเป็น 12 ซึ่งส่งผลให้

โครงสร้างผลึกของอนุภาคอินเดียมทินไฮดรอกไซด์เปลี่ยนแปลงไป ที่ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 8 ปรากฏตำแหน่งการเลี้ยวเบนของอินเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{In}(\text{OH})_3$) แต่เมื่อค่าความเป็นกรดเบสเพิ่มเป็น 12 ตำแหน่งการเลี้ยวเบนของอินเดียมไฮดรอกไซด์หายไปทั้งหมดและพบตำแหน่งการเลี้ยวเบนของอินเดียมออกซีไฮดรอกไซด์ (InOOH) โดยสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น[1] ซึ่งพบว่าอนุภาคอินเดียมทินไฮดรอกไซด์ที่ตำแหน่งการเลี้ยวเบนของเฟสอินเดียมไฮดรอกไซด์ ส่งผลต่อการเกิดเป็นอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ แต่สำหรับตำแหน่งการเลี้ยวเบนของเฟสอินเดียมออกซีไฮดรอกไซด์จะส่งผลต่อการเกิดเป็นอนุภาคอินเดียมออกไซด์โครงสร้างรวมโบฮีตรอล ดังนั้นการใช้ปริมาณเบสเกินกว่าปริมาณที่ต้องใช้สำหรับเกิดปฏิกิริยาพอดีมากถึงสองเท่า จะส่งผลให้ค่าความเป็นกรดเบสขณะเกิดปฏิกิริยาและโครงสร้างผลึกของอนุภาคอินเดียมทินไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์เปลี่ยนแปลงไป อย่างไรก็ตามระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์

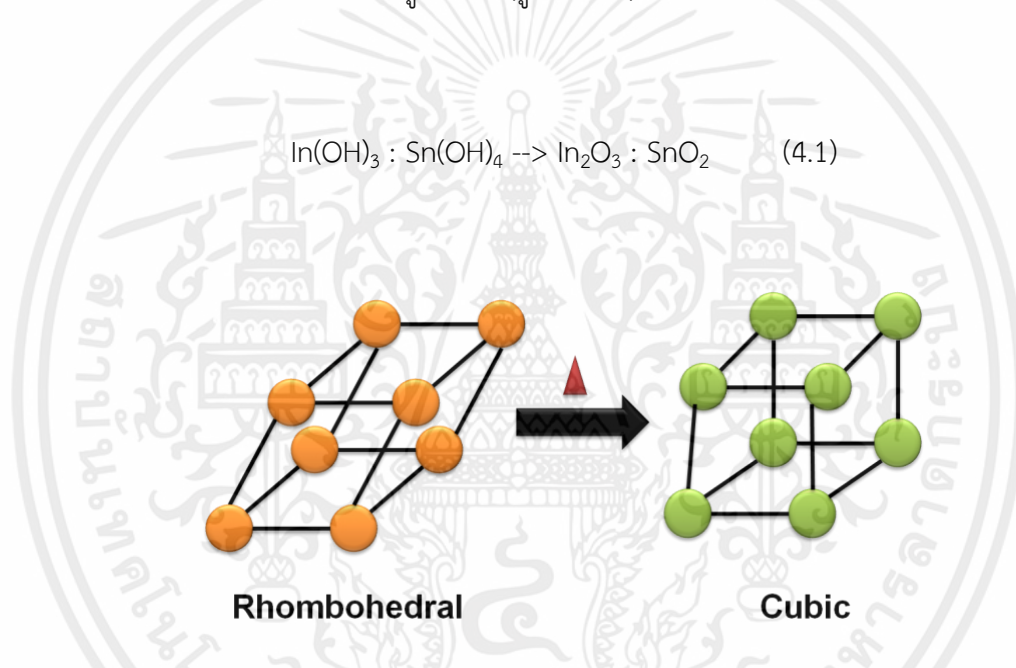
4.5 วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาสูงขึ้นไปถึง 1150 องศาเซลเซียส

จากการสังเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล โดยใช้ปริมาณเบสมากกว่าปริมาณที่ต้องการให้เกิดปฏิกิริยาพอดี ส่งผลให้อนุภาคที่ได้มีโครงสร้างผลึกรวมโบฮีตรอล ผู้วิจัยจึงมีความสนใจจะทำให้อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกรวมโบฮีตรอลเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกเป็นแบบลูกบาศก์โดยใช้ความร้อน เพื่อสามารถนำอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ไปใช้งานโดยผ่านการเตรียมด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลในระบบเดียวกันแต่เลือกสังเคราะห์อนุภาคที่มีโครงสร้างผลึกต่างกันได้โดยใช้ความร้อนจากการเผา



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักและพลังงานเชิงความร้อนของอนุภาคอินเดียมทินไฮดรอกไซด์ ที่เงื่อนไขค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 12

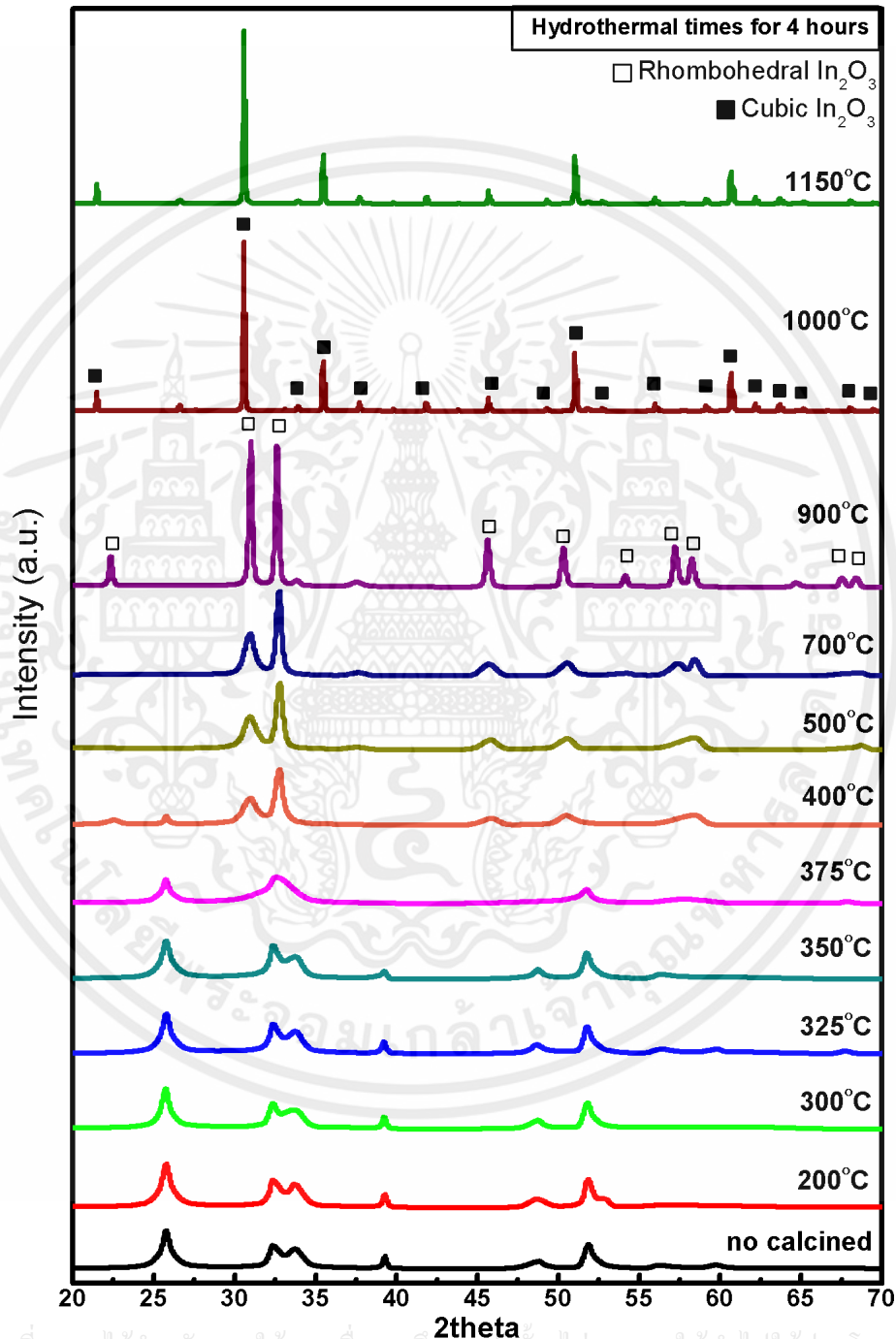
การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกรวมโบฮีตรอลจึงถูกพิจารณาด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อนและเทคนิคการวิเคราะห์ความร้อนเชิงอนุพันธ์ แสดงดังรูปที่ 4.14 พบว่าสารมีการเปลี่ยนแปลงพลังงาน 2 ช่วง โดยช่วงแรกเกิดที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียสเป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานแบบดูดความร้อนซึ่งใช้สำหรับการละลายพันธะ สันนิษฐานว่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานช่วงนี้เกิดขึ้นเพื่อเปลี่ยนแปลงเฟสจากอินเดียมทินไฮดรอกไซด์เป็นอินเดียมทินออกไซด์ (สมการที่ 4.1) โดยใช้พลังงานเพื่อละลายพันธะไฮโดรเจน สำหรับการเปลี่ยนแปลงพลังงานอีกช่วงเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 1000 องศาเซลเซียส เป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานแบบคายความร้อนซึ่งใช้สำหรับการสร้างพันธะ แต่เป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ค่อนข้างน้อย สันนิษฐานว่าส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสโครงสร้างผลึกจากผลึกรวมโบฮีตรอลเป็นผลึกลูกบาศก์ (รูปที่ 4.15)



รูปที่ 4.15 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์

จากผลการทดลองข้างต้นสามารถสนับสนุนได้ด้วยผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกรวมโบฮีตรอล โดยศึกษาตั้งแต่อนุภาคที่ไม่ผ่านการเผาถึงอนุภาคที่เผาด้วยอุณหภูมิสูงถึง 1150 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.16 จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จะพบการเปลี่ยนแปลงทั้งหมด 3 ครั้งเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 1150 องศาเซลเซียส ครั้งแรกเกิดการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส โดยเงื่อนไขการเพิ่มอุณหภูมิการเผาตั้งแต่แรกจะไม่ให้ความร้อนจนให้ความร้อนถึง 375 องศาเซลเซียส ปรากฏตำแหน่งการเลี้ยวเบนของอินเดียมออกไซด์ไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นการเลี้ยวเบนของอนุภาคอินเดียมทินไฮดรอกไซด์ แต่เมื่อให้อุณหภูมิถึง 400 องศาเซลเซียส ตำแหน่งการเลี้ยวเบนเปลี่ยนแปลงไป ปรากฏตำแหน่งการเลี้ยวเบนของอินเดียมทิน

ออกไซด์โครงสร้างผลึกโรมโบฮีดรอล รูปการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ซึ่งตั้งกล่าวสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เชิงความร้อนที่อุณหภูมิมีการดูดกลืนความร้อนเพื่อสลายพันธะ ดังนั้นพลังงานความร้อนที่ดูดกลืนในช่วง 380 องศาเซลเซียสถูกใช้สำหรับการสลายพันธะไฮโดรเจนในอนุภาคอินเดียมทินไฮดรอกไซด์ให้เกิดเป็นอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์

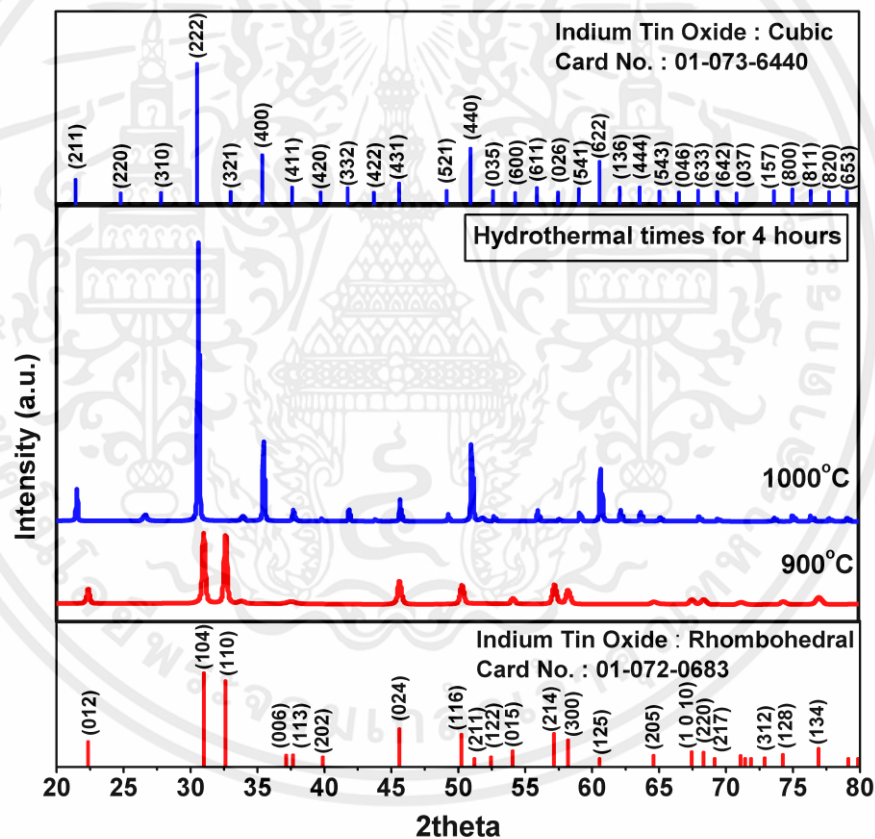


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 4.16 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ ระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอล 4 ชั่วโมง โดยเปรียบเทียบกับอนุภาคที่ไม่ได้รับพลังงานความร้อนกับอนุภาคที่ได้รับพลังงานความร้อนตั้งแต่ อุณหภูมิ 200 ถึง 1150 องศาเซลเซียส

จากนั้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส มีการเพิ่มขึ้นของความเข้มการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ซ์ทุกระนาบ โดยเฉพาะระนาบ (104) มีความเข้มการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ซ์เพิ่มขึ้นจากเดิมที่น้อยกว่าระนาบ (110) กลับสูงขึ้นจนมากกว่าระนาบ (110) จนในที่สุดเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 1000 องศาเซลเซียส อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกอโรโมโบฮีดรอลเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสเป็นโครงสร้างแบบลูกบาศก์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เชิงความร้อนที่สารมีการคายพลังงานความร้อนเพื่อสร้างพันธะในช่วง 1000 องศาเซลเซียส ดังนั้นอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกอโรโมโบฮีดรอลคายพลังงานออกเพื่อเปลี่ยนแปลงพันธะ ทำให้อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์เกิดการเปลี่ยนแปลงระบบผลึกจากรอโมโบฮีดรอลเป็นลูกบาศก์

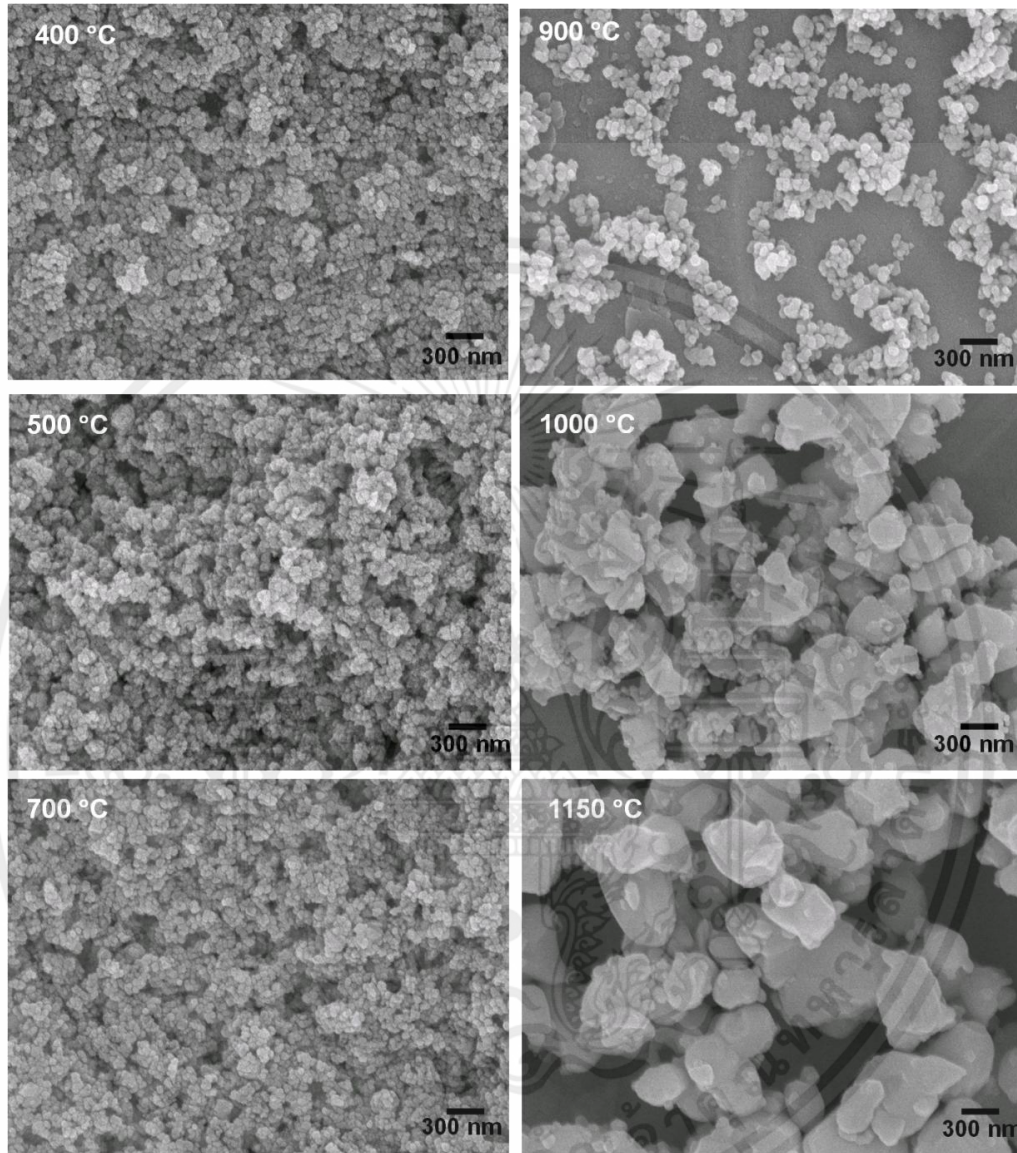
การให้พลังงานความร้อนกับอนุภาคนาโนอินเดียมทินไฮดรอกไซด์ในช่วง 900 ถึง 1000 องศาเซลเซียส อนุภาคมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกอย่างชัดเจน แสดงในรูป 4.17



รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ซ์ของอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส

นอกจากนี้ยังศึกษาลักษณะอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผา แสดงดังรูปที่ 4.18 สังเกตเห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาจาก 400 จนถึง 900 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ยังคงไม่เปลี่ยนแปลง มีลักษณะเป็นทรงกลม ขนาดน้อยกว่า 100

นาโนเมตร แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 1000 องศาเซลเซียส อนุภาคมีขนาดใหญ่ถึง 300 นาโนเมตร การที่อนุภาคมีขนาดใหญ่กว่าจะเป็นผลมาจากพลังงานความร้อนจากการเผาทำให้อนุภาคขนาดเล็กรวมกันเข้าด้วยกัน ส่งผลให้อนุภาคที่พบมีขนาดใหญ่



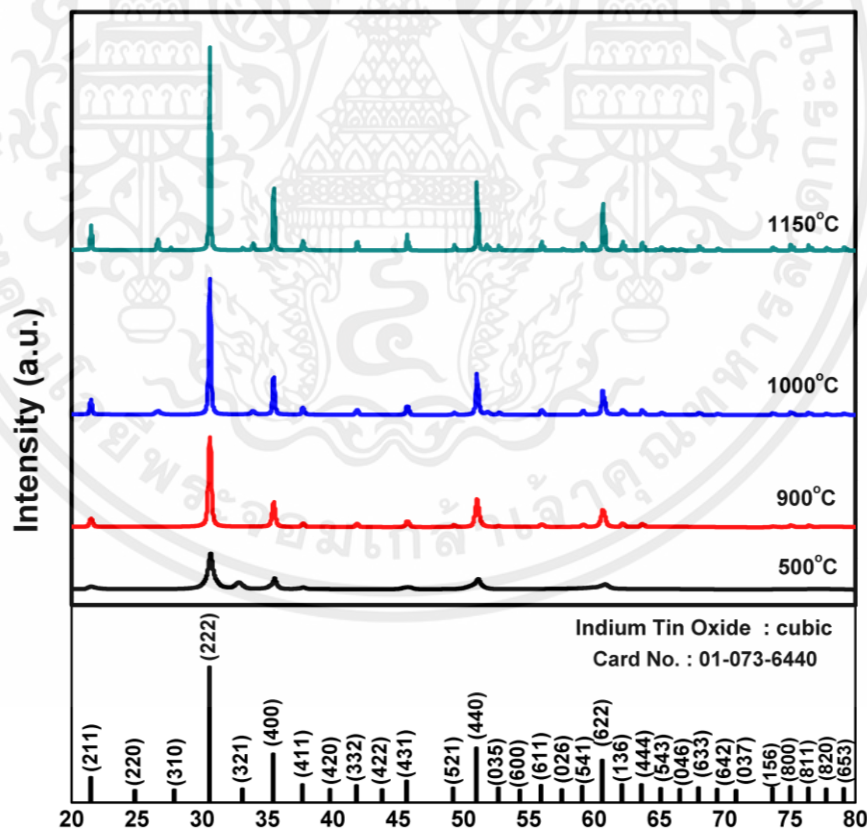
รูปที่ 4.18 แสดงภาพจาก FE-SEM ของอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ที่ระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอล 4 ชั่วโมง โดยอุณหภูมิการเผาตั้งแต่ 400 ถึง 1150 องศาเซลเซียส

ดังนั้นการสังเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์สามารถสังเคราะห์ได้ทั้งโครงสร้างผลึกลูกบาศก์และผลึกรอมโบอีตรอลโดยการควบคุมค่าความเป็นกรด-เบสขณะเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกจากผลึกรอมโบอีตรอลเป็นผลึกลูกบาศก์ได้ด้วยพลังงานความร้อน โดยผ่านการเผาภายใต้อากาศที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส แต่อย่างไรก็ตามการให้พลังงานความร้อนโดยการเผานอกจากจะส่งผลให้อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์เปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกเป็น

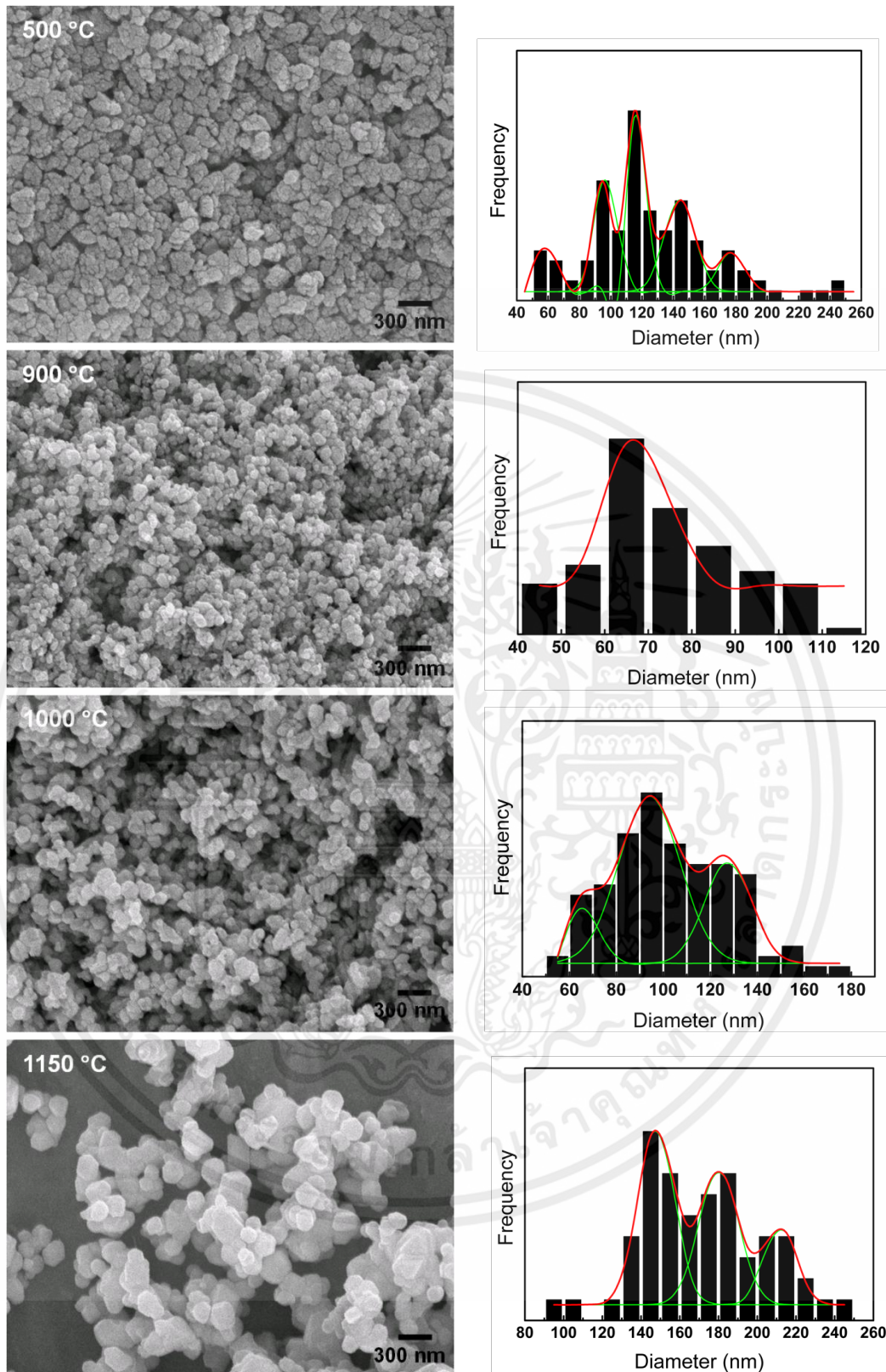
รวมโบฮีตรอลแล้ว ยังส่งผลให้อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ผลึกลูกบาศก์ที่ได้มีขนาดใหญ่เกินกว่าระดับนาโนเมตรด้วย

4.6 วิเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาถึง 1150 องศาเซลเซียส

การเตรียมอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลสามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ได้โครงสร้างผลึกทั้งสองแบบคือแบบลูกบาศก์และแบบรวมโบฮีตรอล โดยการควบคุมตัวแปรค่าความเป็นกรด-เบสและอุณหภูมิการเผา การเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสสามารถทำให้อินเดียมทินไฮดรอกไซด์เปลี่ยนเป็นอินเดียมทินออกไซด์ได้ อย่างไรก็ตามการเผาอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ที่อุณหภูมิมากกว่า 500 องศาเซลเซียสสามารถเพิ่มความเป็นผลึกได้หรือไม่ อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์จึงถูกศึกษาภายใต้การเพิ่มอุณหภูมิการเผาสูงถึง 1150 องศาเซลเซียสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แสดงดังรูปที่ 4.19



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด **รูปที่ 4.19** รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึก
ลูกบาศก์ที่อุณหภูมิการเผาสูงถึง 1150 องศาเซลเซียส



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 4.20 แสดงภาพจาก FE-SEM ของอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ที่ระยะเวลาไฮโดรเทอร์มัลไม่ว่ากรณีใด 4 ชั่วโมง ซึ่งอุณหภูมิการเผา ระหว่าง 500 ถึง 1150 องศาเซลเซียส และแสดงลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์

จากรูปที่ 4.19 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาจาก 500 องศาเซลเซียสจนถึง 1,150 องศาเซลเซียส อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ยังคงปรากฏตำแหน่งการเลี้ยวเบนเดิม แสดงว่าอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ยังคงเป็นโครงสร้างผลึกลูกบาศก์ อย่างไรก็ตามตำแหน่งการเลี้ยวเบนสำคัญที่ 21.5, 30.6, 35.5, 51.1 และ 60.7 องศา มีแนวโน้มค่าความเข้มการเลี้ยวเบนเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังศึกษาลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาตั้งแต่ 500 ถึง 1150 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.20

จากรูปที่ 4.20 พบว่าที่อุณหภูมิการเผา 500 องศาเซลเซียส อนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลมรวมตัวกันเป็นเกรนขนาดใหญ่ โดยวัดขนาดได้อยู่ในช่วง 50 ถึง 240 นาโนเมตร และมีขนาดเกรนส่วนใหญ่ที่ 80 110 และ 140 นาโนเมตร แต่สำหรับการให้อุณหภูมิสูงถึง 900 องศาเซลเซียส ไม่พบเกรนขนาดใหญ่ที่เกิดจากการรวมกันของอนุภาค แต่พบอนุภาคที่มีขนาดอยู่ในช่วง 40 ถึง 110 นาโนเมตร โดยขนาดอนุภาคส่วนใหญ่เป็น 60 นาโนเมตร เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาต่อไปจนถึง 1000 องศาเซลเซียส อนุภาคที่ได้มีแนวโน้มใหญ่ขึ้น ซึ่งจะพบขนาดอนุภาคในช่วง 50 ถึง 180 นาโนเมตร โดยจะพบขนาดอนุภาคกระจายอยู่ในช่วง 100 นาโนเมตรมากขึ้น สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิการเผาถึง 1,150 องศาเซลเซียส อนุภาคที่ได้มีขนาดใหญ่เกินระดับนาโนเมตรคือมีขนาดอยู่ในช่วง 90 ถึง 200 นาโนเมตร และพบขนาดส่วนใหญ่ที่ 140 180 และ 200 นาโนเมตร การเพิ่มขึ้นของขนาดอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์เมื่อได้รับความร้อนจากการเผา เป็นผลมาจากพลังงานความร้อนที่มากพอทำให้อนุภาคบริเวณใกล้เคียงเกิดการรวมอนุภาคกันทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น

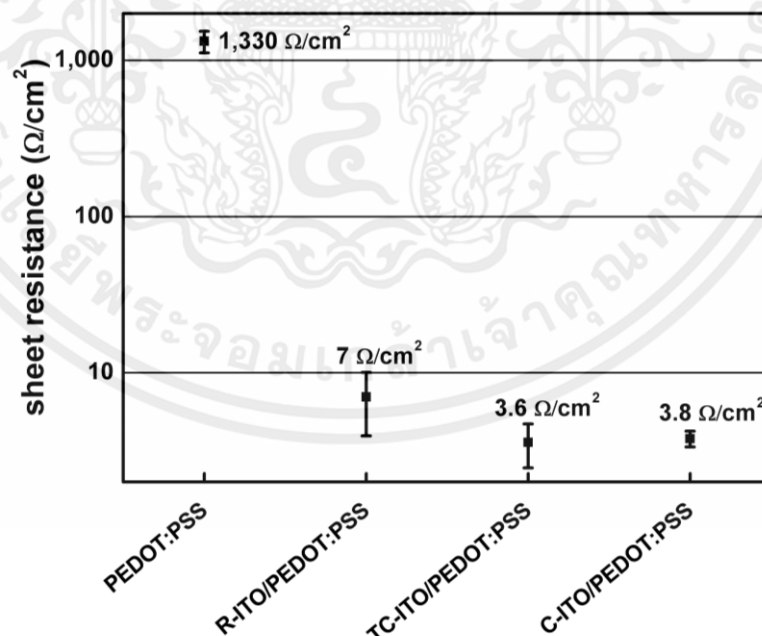
ดังนั้นการให้ความร้อนด้วยการเผาแก่อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ ไม่สามารถทำให้อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ผลึกลูกบาศก์เปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกได้ แต่พลังงานความร้อนสามารถส่งผลกับขนาดอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ โดยเมื่อให้ความร้อนเกิน 900 องศาเซลเซียสอนุภาคที่ได้จะไม่อยู่ในระดับนาโนเมตร

เมื่อสามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ได้ขนาดและโครงสร้างผลึกตามต้องการแล้ว ผู้วิจัยจึงนำอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์มาประยุกต์ทำน้ำหมักนำไฟฟ้า โดยจะนำอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกทั้งสามแบบคือ อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ (C-ITO) อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกรอมโบฮีดรอล (R-ITO) และอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ที่เปลี่ยนแปลงเฟสมาจากผลึกรอมโบฮีดรอล (TC-ITO) ซึ่งจะนำอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกทั้งสามมาเป็นส่วนผสมของน้ำหมักนำไฟฟ้าเพื่อศึกษาประสิทธิภาพที่ดีที่สุดที่สามารถเตรียมเป็นน้ำหมักนำไฟฟ้าได้ แสดงผลการทดลองการพัฒนาหมักนำไฟฟ้างวดหัวข้อต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของงานวิจัยที่ขอขึ้นทะเบียนไว้ ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 วิเคราะห์การนำไฟฟ้าของฟิล์มที่เตรียมด้วยเทคนิคการหยด โดยใช้ น้ำหมึกนำไฟฟ้าที่เตรียมจากวัสดุนาโนผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกต่างกัน

ฟิล์มถูกตรวจสอบการนำไฟฟ้าด้วยการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า โดยจะศึกษาการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกันของฟิล์มที่เตรียมจากวัสดุพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS เปรียบเทียบกับฟิล์มที่เตรียมด้วยน้ำหมึกนำไฟฟ้าจากวัสดุนาโนผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ โครงสร้างผลึกต่างกันสองแบบคือ โครงสร้างผลึกลูกบาศก์และโครงสร้างผลึกรวมโบฮีตรอล โดยอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์จะแตกต่างกันสองแบบคือ หนึ่งเป็นอนุภาคโครงสร้างผลึกลูกบาศก์หลังจากสังเคราะห์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลและสองเป็นอนุภาคโครงสร้างลูกบาศก์โดยการเปลี่ยนแปลงเฟสมาจากโครงสร้างผลึกรวมโบฮีตรอลด้วยอุณหภูมิสูง ฟิล์มที่เตรียมได้ดังกล่าวจึงแตกต่างกันทั้งหมด 4 แบบ คือ 1.ฟิล์มที่เตรียมจากสารละลาย PEDOT:PSS 2.ฟิล์มที่เตรียมจากน้ำหมึกนำไฟฟ้าของวัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS และอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกรวมโบฮีตรอล (R-ITO) 3.ฟิล์มที่เตรียมจากน้ำหมึกนำไฟฟ้าของวัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS และอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ที่เปลี่ยนแปลงเฟสมาจากผลึกรวมโบฮีตรอล (TC-ITO) 4.ฟิล์มที่เตรียมจากน้ำหมึกนำไฟฟ้าของวัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS และอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ (C-ITO) ซึ่งแสดงผลค่าความต้านทานไฟฟ้าดังรูปที่ 4.21

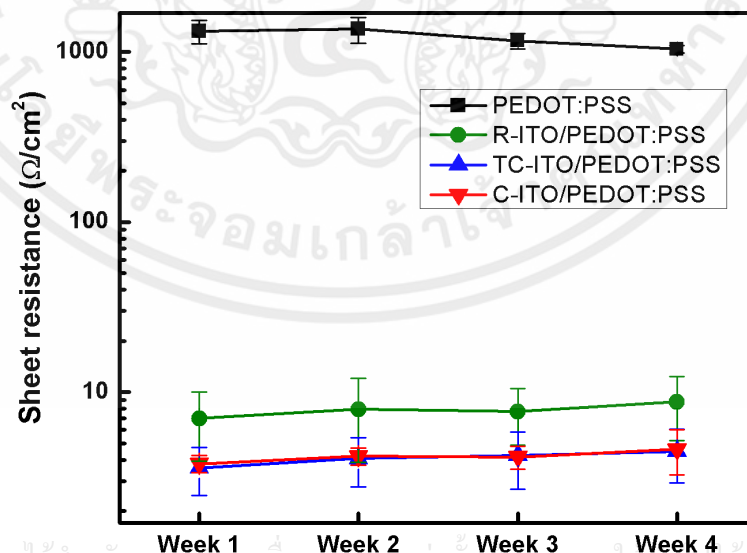


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.21 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม PEDOT:PSS เปรียบเทียบกับฟิล์มที่เตรียมจากวัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกต่างกัน

จากรูป 4.21 พิล์ม PEDOT:PSS มีค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยที่ 1330 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเปรียบเทียบกับฟิล์มวัสดุผสมจะสังเกตเห็นว่าฟิล์ม PEDOT:PSS มีค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยมากกว่า โดยฟิล์มผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ โครงสร้างผลึกรอมโบฮีดรอลมีค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยเป็น 7 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร ฟิล์มผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงเฟสมีค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยเป็น 3.6 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร และฟิล์มผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยเป็น 3.8 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร จากผลดังกล่าวฟิล์มที่เตรียมจากวัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ นำไฟฟ้าได้ดีกว่าฟิล์มบางที่เตรียมจากวัสดุ PEDOT:PSS อย่างมากถึง 100 เท่า

4.8 วิเคราะห์การนำไฟฟ้าของฟิล์มที่เตรียมด้วยเทคนิคการหยด โดยใช้ น้ำหมึกนำไฟฟ้าที่เตรียมจากวัสดุนาโนผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกต่างกัน เมื่อเวลาผ่านไป 1 เดือน

เพื่อตรวจสอบเสถียรภาพของฟิล์มที่เตรียมจากน้ำหมึกนำไฟฟ้า เวลาเป็นตัวแปรสำคัญที่งานวิจัยนี้สนใจศึกษาโดยตรวจสอบความต้านทานของฟิล์มที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดระยะเวลา 1 เดือนเปรียบเทียบกันระหว่างฟิล์มที่เตรียมจาก PEDOT:PSS และจากน้ำหมึกนำไฟฟ้าที่มีส่วนผสมของอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกแตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.22 และตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง PEDOT:PSS เปรียบเทียบกับฟิล์มบางที่เตรียมจากวัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS เมื่อเวลาผ่านไป 1 เดือน

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความต้านทานความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง PEDOT:PSS เปรียบเทียบกับฟิล์มบางที่เตรียมจากวัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS เมื่อเวลาผ่านไป 1 เดือน

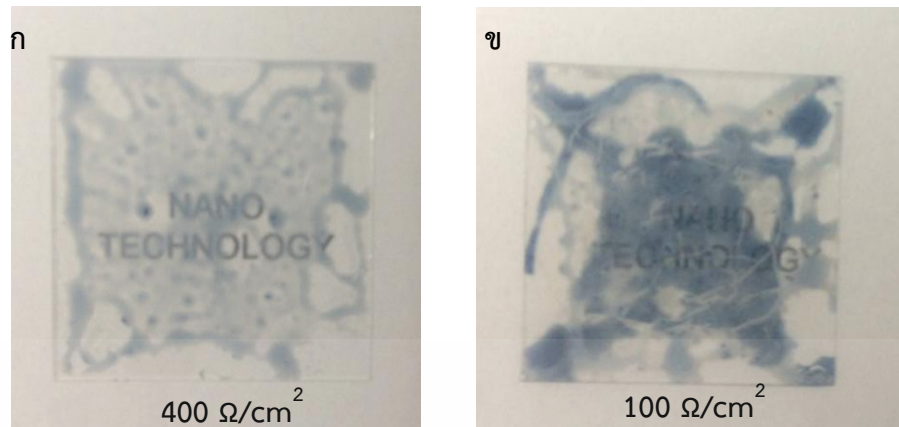
	PEDOT:PSS		R-ITO/PEDOT:PSS		TC-ITO/PEDOT:PSS		C-ITO/PEDOT:PSS	
	$R_{\text{sheet(av)}}$	$R_{\text{sheet(std)}}$	$R_{\text{sheet(av)}}$	$R_{\text{sheet(std)}}$	$R_{\text{sheet(av)}}$	$R_{\text{sheet(std)}}$	$R_{\text{sheet(av)}}$	$R_{\text{sheet(std)}}$
Week 1	1329.6	211.46	7.00	3.06	3.59	1.13	3.79	0.44
Week 2	1366.68	235.02	7.94	4.07	4.07	1.31	4.21	0.49
Week 3	1166.97	122.58	7.68	2.79	4.25	1.56	4.16	0.64
Week 4	1039.55	50.67	8.76	3.56	4.49	1.56	4.62	1.37

เมื่อระยะเวลาผ่านไป 1 เดือน ค่าความต้านทานของฟิล์มที่เตรียมจากน้ำหมึกนำไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยน้ำหมึกนำไฟฟ้าที่เตรียมจากอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกกลมโบฮีตรอลมีค่าความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปสูงสุด 1.76 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร อย่างไรก็ตามน้ำหมึกนำไฟฟ้าที่เตรียมจากอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์มีค่าความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปสูงสุดเพียง 0.9 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร ดังนั้นฟิล์มที่เตรียมได้จากน้ำหมึกนำไฟฟ้ามีเสถียรภาพแม้เวลาจะผ่านไป 1 เดือน

4.9 วิเคราะห์การนำไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมด้วยเทคนิคการหมุนเคลือบ โดยใช้ น้ำหมึกนำไฟฟ้าที่เตรียมจากวัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ บนฐานรองรับพลาสติก

ฟิล์มที่เตรียมด้วยน้ำหมึกนำไฟฟ้าจากวัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ด้วยเทคนิคการหยดเคลือบ สามารถนำไฟฟ้าได้มีค่าความต้านทานเฉลี่ยเป็น 3.8 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร แต่ลักษณะฟิล์มที่เตรียมได้มีความหนา นอกจากนีเป้าหมายของงานวิจัยนี้คือนำน้ำหมึกนำไฟฟ้าที่เตรียมได้ประยุกต์เป็นขั้วไฟฟ้าบนฐานรองรับพลาสติกด้วยเทคนิคการพิมพ์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงทดลองเตรียมน้ำหมึกนำไฟฟ้าบนฐานรองรับพลาสติกโดยใช้เทคนิคการหมุนเคลือบซึ่งทำให้ได้ฟิล์มที่มีความบางเพื่อทดสอบความเป็นไปได้สำหรับการประยุกต์เป็นขั้วไฟฟ้าบนฐานรองรับพลาสติกด้วยเทคนิคการพิมพ์ ลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้แสดงดังรูปที่ 4.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



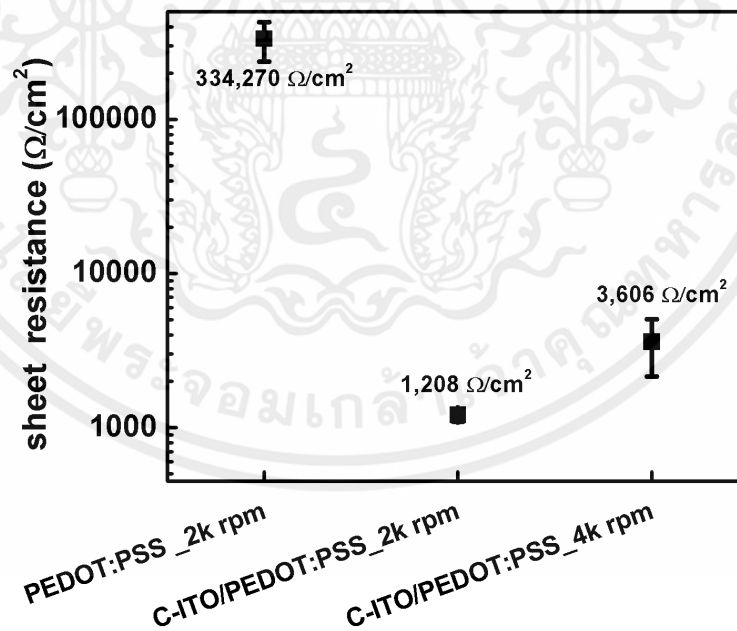
รูปที่ 4.23 फिल्मบางที่เตรียมด้วยเทคนิคการหมุนเคลือบจาก ก.วัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ ข.วัสดุ PEDOT:PSS และวัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์

การนำไฟฟ้าของฟิล์มที่เตรียมด้วยน้ำหมึกนำไฟฟ้าจากวัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ มีค่าความต้านทานไฟฟ้าประมาณ 400 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร ฟิล์มที่เตรียมจากวัสดุ PEDOT:PSS และวัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์มีค่าความต้านทานไฟฟ้าประมาณ 100 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร อย่างไรก็ตามลักษณะฟิล์มทั้งสองแบบที่เตรียมได้มีการกระจายตัวของวัสดุบนฐานรองรับไม่สม่ำเสมอซึ่งคาดว่าน่าจะเกิดจากสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวฐานรองรับ ผู้ทดลองจึงทำการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของฐานรองรับพลาสติกด้วยการทำพลาสมาออกซิเจน แสดงลักษณะของฟิล์มบางที่ได้ดังรูปที่ 4.24

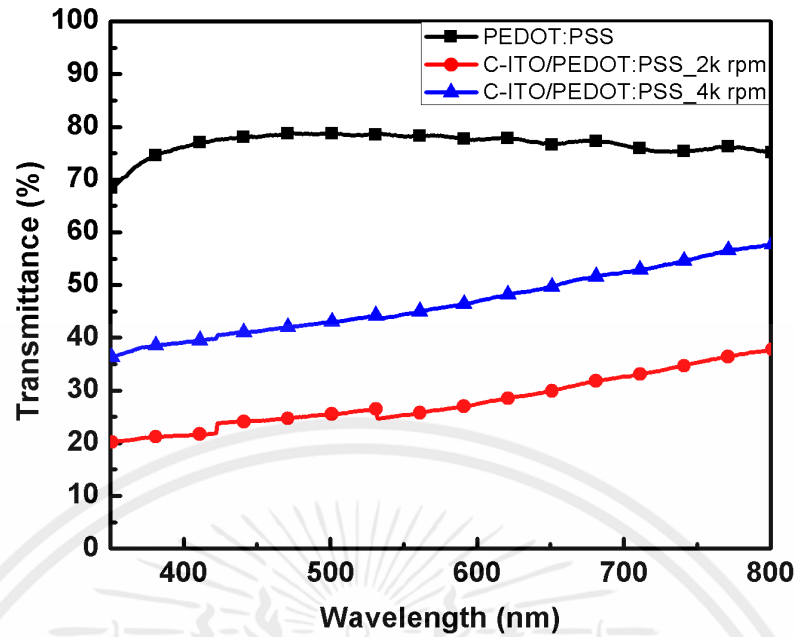


รูปที่ 4.24 फिल्मบางที่เตรียมด้วยเทคนิคการหมุนเคลือบจาก ก.วัสดุ PEDOT:PSS ที่ความเร็วการหมุน 2000 รอบต่อวินาที ข.วัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ ที่ความเร็วการหมุน 2000 รอบต่อวินาที ค.วัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ ที่ความเร็วการหมุน 4000 รอบต่อวินาที

จากการแก้ปัญหาความไม่สม่ำเสมอของฟิล์มด้วยการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวฐานรองรับพลาสติกด้วยการทำพลาสมาออกซิเจน ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีการกระจายตัวสม่ำเสมอทั่วฐานรองรับ นอกจากนี้เมื่อเพิ่มความเร็วรอบการหมุนจาก 2000 รอบต่อนาที เป็น 4000 รอบต่อนาที ของฟิล์มที่เตรียมจากวัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ ส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางเปลี่ยนแปลงไปแสดงดังรูปที่ 4.25 ฟิล์มบาง PEDOT:PSS มีค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยที่ 334270 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร ฟิล์มบางผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์มีค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยเป็น 1208 และ 3606 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร ที่ความเร็วการหมุน 2000 และ 4000 รอบต่อนาที ตามลำดับ สำหรับค่าการทะลุผ่านของแสงแสดงดังรูปที่ 4.26 พบว่าฟิล์มบาง PEDOT:PSS มีค่าการทะลุผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรร้อยละ 78 แต่ฟิล์มบางผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์มีค่าการทะลุผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรเป็นร้อยละ 25 และ 44 ที่ความเร็วการหมุน 2000 และ 4000 รอบต่อนาที ตามลำดับ ดังนั้นฟิล์มที่เตรียมจากวัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์สามารถเตรียมบนฐานรองรับพลาสติกได้ และฟิล์มที่ได้มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำ



รูปที่ 4.25 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมจากวัสดุ PEDOT:PSS และ วัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์

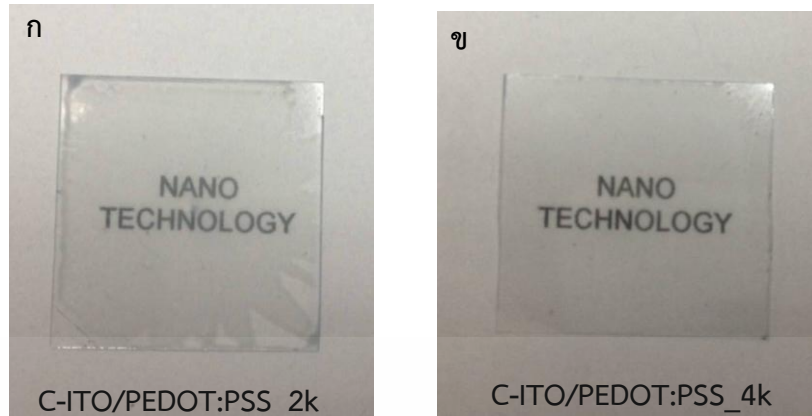


รูปที่ 4.26 แสดงค่าการทะลุผ่านแสงของฟิล์มบางที่เตรียมจากวัสดุ PEDOT:PSS และ วัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าและการทะลุผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรของฟิล์มบางที่เตรียมจากวัสดุ PEDOT:PSS และ วัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์

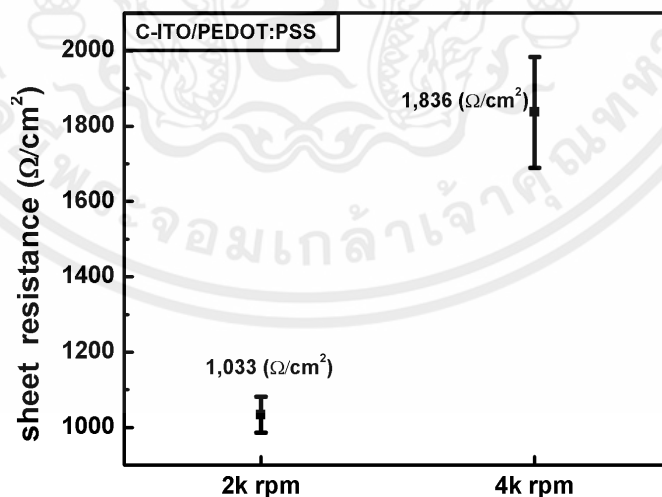
Sample	Sheet resistance (Ω/cm^2)	Transmittance(%) at 550 nm
PEDOT:PSS	334,270	78.2
C-ITO/PEDOT:PSS_2k rpm	1,208	25.3
C-ITO/PEDOT:PSS_4k rpm	3,606	44.4

อย่างไรก็ตามเมื่อสังเกตจากลักษณะของฟิล์มบาง PEDOT:PSS พบว่าฟิล์มมีลักษณะของกลุ่มก้อนสีน้ำเงินกระจายอยู่ทั่วแผ่นฟิล์ม ซึ่งเกิดจาก PEDOT:PSS ที่ใช้มีทั้งส่วนที่เป็นก้อนของ PEDOT:PSS และส่วนที่เป็นของเหลวทำให้ฟิล์มที่ได้มีความหนาไม่เท่ากันทั่วแผ่น ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้ตัวกรองก่อนนำ PEDOT:PSS ไปใช้งาน ผลที่ได้คือกลุ่มก้อนสีฟ้าที่อยู่บนฟิล์มหายไปและฟิล์มมีการกระจายตัวสม่ำเสมอแสดงลักษณะของฟิล์มที่เตรียมได้ดังรูปที่ 4.27 ผลของความต้านทานไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.28

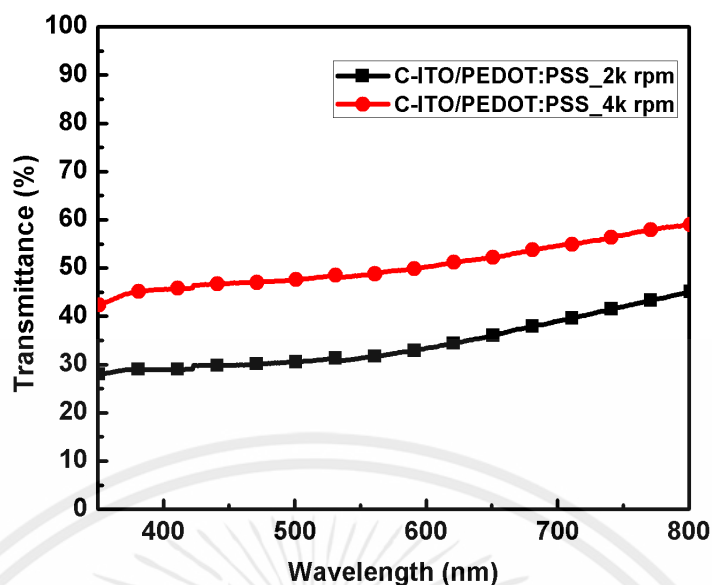


รูปที่ 4.27 ลักษณะฟิล์มบางที่เตรียมจากวัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ ความเร็วรอบการหมุน ก) 2000 รอบต่อนาที ข) 4000 รอบต่อนาที

จากรูป 4.28 ฟิล์มบางผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์มีค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยที่ 1033 และ 1836 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร ที่ความเร็วรอบการหมุน 2000 และ 4000 รอบต่อวินาที ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลความต้านทานไฟฟ้ากับฟิล์มที่เตรียมได้ก่อนหน้านี้ (รูปที่ 4.24) พบว่าฟิล์มที่เตรียมจาก PEDOT:PSS ที่ไม่มีส่วนที่เป็นก้อน ส่งผลให้ฟิล์มที่เตรียมได้มีค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลง โดยที่ความเร็วการหมุน 2000 รอบต่อนาที ความต้านทานไฟฟ้าลดลงร้อยละ 15 สำหรับที่ความเร็วการหมุน 4000 รอบต่อนาที ความต้านทานไฟฟ้าลดลงร้อยละ 49 นอกจากนี้การทะลุผ่านของแสงที่มีความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรของฟิล์มบางที่ความเร็วรอบการหมุน 2000 และ 4000 รอบต่อนาที ยังมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 31 และ 48 ตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากก้อนของ PEDOT:PSS ที่หายไปบนฟิล์ม



รูปที่ 4.28 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมจากวัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์



รูปที่ 4.29 แสดงค่าการทะลุผ่านแสงของฟิล์มบางที่เตรียมจากวัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์

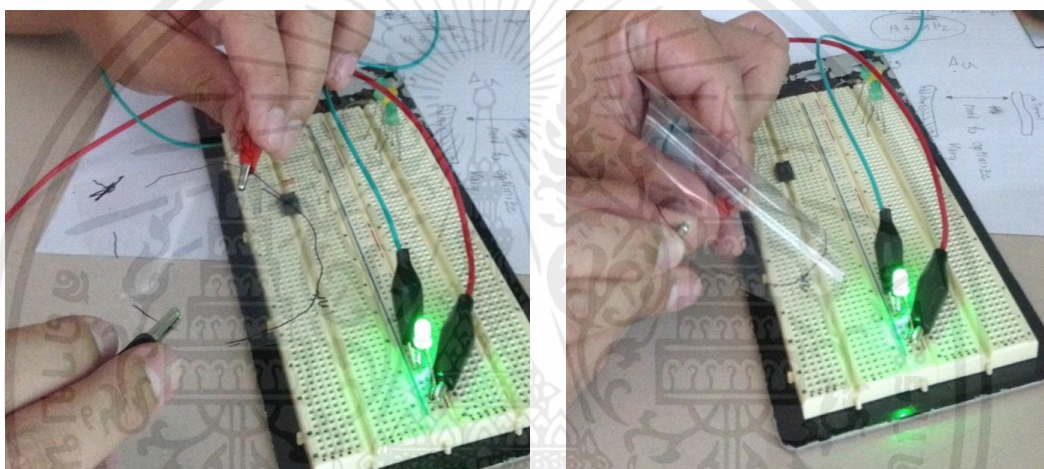
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าและการทะลุผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรของฟิล์มบางที่เตรียมจากวัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์

Sample	Sheet resistance (Ω/cm^2)	Transmittance(%) at 550 nm
C-ITO/PEDOT:PSS_2k rpm	1,033	31.3
C-ITO/PEDOT:PSS_4k rpm	1,836	48.4

4.10 การประยุกต์ใช้น้ำหมึกนำไฟฟ้าเป็นขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิคการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์กระดาษบนฐานรองรับพลาสติก

เนื่องจากการเตรียมวัสดุผสมระหว่าง PEDOT:PSS กับอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ มีความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์ใช้เป็นน้ำหมึกนำไฟฟ้าสังเกตจากผลการทดลองที่ผ่านมา เมื่อนำน้ำหมึกนำไฟฟ้าทดลองทำเป็นฟิล์มด้วยเทคนิคการหยดเคลือบและการหมุนเคลือบ พบค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดที่ 3.6 และ 1033 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ผู้ทดลองจึงนำน้ำหมึกนำไฟฟ้าดังกล่าวประยุกต์เป็นขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิคการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์กระดาษ อย่างไรก็ตามน้ำหมึกนำไฟฟ้าง่ายกว่ามีขนาดอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ที่รวมเป็นกลุ่มก้อน ทำให้เครื่องพิมพ์กระดาษ

ไม่สามารถพิมพ์น้ำหมึกนำไฟฟ้าออกมาได้ ผู้ทำการทดลองจึงปรับปรุงน้ำหมึกนำไฟฟ้าโดยแสดงขั้นตอนการเตรียมน้ำหมึกนำไฟฟ้าแบบปรับปรุงในหัวข้อที่ 3.8 สำหรับการพิมพ์น้ำหมึกนำไฟฟ้าด้วยเครื่องพิมพ์กระดาษ ปัจจัยที่ส่งผลอย่างมากต่อการพิมพ์ได้คือความหนืดของน้ำหมึก ดังนั้นจึงทดลองทำการเปลี่ยนความเข้มข้นของน้ำหมึกนำไฟฟ้าโดยการผสมด้วยน้ำปอดประจุ ซึ่งจะศึกษาการพิมพ์ได้ของน้ำหมึกนำไฟฟ้าที่ความเข้มข้นร้อยละ 50 70 และ 90 ผลที่ได้คือน้ำหมึกนำไฟฟ้าที่ความเข้มข้นร้อยละ 50 สามารถพิมพ์ได้ด้วยเครื่องพิมพ์กระดาษ โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงถึง 2605 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างมากเป็นผลมาจากปริมาณส่วนที่นำไฟฟ้าลดลงถึงร้อยละ 50 และความหนาของฟิล์มที่ลดลงอย่างมากจากการเตรียมด้วยเทคนิคการพิมพ์

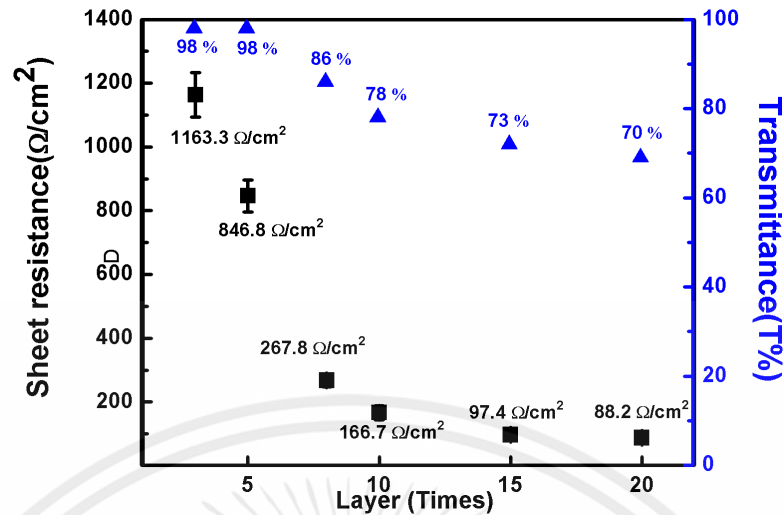


รูปที่ 4.30 แสดงการประยุกต์ใช้งานเป็นขั้วไฟฟ้าโค้งงอจากฐานรองรับพลาสติกที่เตรียมด้วยน้ำหมึกนำไฟฟ้าด้วยการพิมพ์จากเครื่องพิมพ์กระดาษ

4.11 ศึกษาประสิทธิภาพการนำไฟฟ้า การดูดกลืนและการทะลุผ่านแสงของน้ำหมึกนำไฟฟ้าเมื่อจำนวนชั้นการพิมพ์เพิ่มขึ้น

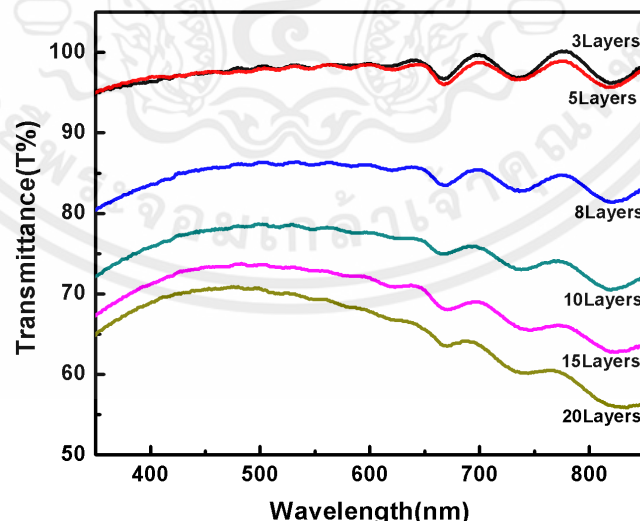
จากผลการทดลองที่ผ่านมาสามารถเตรียมน้ำหมึกนำไฟฟ้าจากวัสดุผสมระหว่างวัสดุนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงเฟสที่อุณหภูมิสูงและพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ซึ่งสามารถเตรียมเป็นฟิล์มด้วยเทคนิคการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์กระดาษได้อย่างไรก็ตามเพื่อพัฒนาให้ฟิล์มที่เตรียมจากน้ำหมึกนำไฟฟ้าสามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น ผู้ทดลองจึงศึกษาจำนวนชั้นของการพิมพ์ซ้ำ ตั้งแต่ 3 ถึง 20 ชั้น โดยสันนิษฐานว่าจำนวนชั้นที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ฟิล์มที่พิมพ์หนาขึ้นส่งผลให้ฟิล์มนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลใดๆไปยังผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต



รูปที่ 4.31 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มที่เตรียมด้วยน้ำหมักนำไฟฟ้าจากวัสดุนาโนอินเดียมทิน ออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงเฟสที่อุณหภูมิสูงบนฐานรองรับพลาสติก ด้วยเทคนิคการพิมพ์โดยจำนวนครั้งการพิมพ์แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.31 ฟิล์มที่ความหนา 3 5 8 10 15 และ 20 ชั้น มีค่าความต้านทานไฟฟ้าเป็น 1163 846 267 166 97 และ 88 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มลดลงมากที่สุดถึง 88 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร ที่ความหนา 20 ชั้น อย่างไรก็ตามการพิมพ์ถึง 20 ชั้น ทำให้การเตรียมฟิล์มใช้เวลาเตรียมนานถึง 30 นาที นอกจากนี้การทะลุผ่านแสงย่านตามองเห็นยังต่ำกว่าร้อยละ 70 ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรอีกด้วย แสดงผลดังรูปที่ 4.32



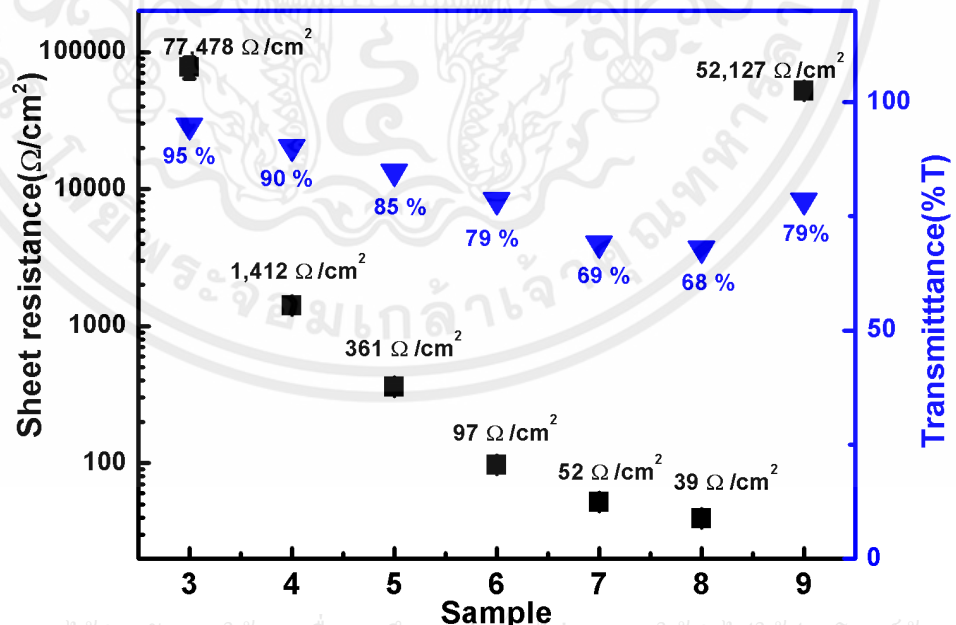
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 4.32 ค่าการทะลุผ่านแสงของฟิล์มที่เตรียมด้วยน้ำหมักนำไฟฟ้าจากวัสดุนาโนอินเดียมทิน ออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงเฟสที่อุณหภูมิสูงบนฐานรองรับพลาสติก ด้วยเทคนิคการพิมพ์โดยจำนวนครั้งการพิมพ์แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.32 พิล์มที่จำนวนชั้นการพิมพ์น้อยกว่า 10 ชั้น มีค่าการทะลุผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร มากกว่าร้อยละ 80 ซึ่งเหมาะสมสำหรับประยุกต์เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงได้ แต่อย่างไรก็ตามความต้านทานไฟฟ้ายังมีค่ามากเกินไปดังนั้นเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของน้ำหมึกนำไฟฟ้าผู้ทดลองจึงทำการศึกษาสัดส่วนที่เปลี่ยนแปลงไปภายในวัสดุผสมซึ่งแสดงผลการศึกษาในหัวข้อต่อไป

4.12 ศึกษาการนำไฟฟ้า การดูดกลืนและการทะลุผ่านแสงของน้ำหมึกนำไฟฟ้าเมื่อสัดส่วนระหว่างอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์และ PEDOT:PSS แตกต่างกัน

เนื่องจากสามารถพิมพ์น้ำหมึกนำไฟฟ้าด้วยเครื่องพิมพ์กระดาษบนฐานรองรับพลาสติกโดยใช้น้ำหมึกนำไฟฟ้าที่มีส่วนผสมของวัสดุผสมระหว่างวัสดุอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงเฟสที่อุณหภูมิสูงและพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของน้ำหมึกนำไฟฟ้า ผู้ทดลองสมมติฐานว่าปัจจัยการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของปริมาณอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ในน้ำหมึกนำไฟฟ้าส่งผลให้ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มเปลี่ยนแปลงไป ผู้ทดลองจึงทำศึกษาน้ำหมึกนำไฟฟ้าที่มีสัดส่วนระหว่างวัสดุอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์และ PEDOT:PSS ต่างกัน แสดงดังตารางที่ 4.5 จากนั้นนำน้ำหมึกนำไฟฟ้าที่เตรียมด้วยสัดส่วนแตกต่างกันเตรียมเป็นฟิล์มบางด้วยเทคนิคการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์กระดาษเพื่อศึกษาการนำไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.33 และศึกษาการทะลุผ่านแสงแสดงดังรูปที่ 4.34



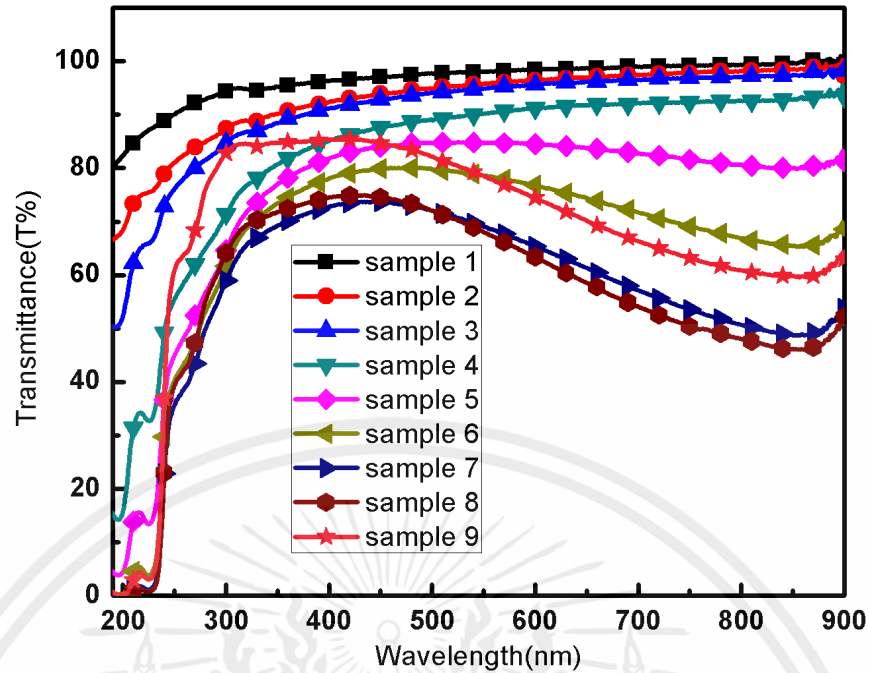
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.33 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าและการทะลุผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรของน้ำหมึกนำไฟฟ้าที่เตรียมเป็นฟิล์มบางซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างระหว่างวัสดุอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์และ PEDOT:PSS ต่างกัน

ตารางที่ 4.5 ส่วนประกอบของน้ำหมักนำไฟฟ้าที่อัตราส่วนระหว่างระหว่างวัสดุนาโนอินเดียมทินออกไซด์และ PEDOT:PSS ต่างกัน

ตัวอย่าง	สัดส่วนสำหรับเตรียมเป็นน้ำหมักนำไฟฟ้า		
	อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ที่กระจายตัวอยู่ในสารละลายเอทิลีนไกลคอล	PEDOT:PSS	คิดเป็นอัตราส่วน
Sample 1	600 ไมโครลิตร	0 ไมโครลิตร	1 : 0
Sample 2	560 ไมโครลิตร	70 ไมโครลิตร	8 : 1
Sample 3	480 ไมโครลิตร	120 ไมโครลิตร	4 : 1
Sample 4	400 ไมโครลิตร	200 ไมโครลิตร	2 : 1
Sample 5	300 ไมโครลิตร	300 ไมโครลิตร	1 : 1
Sample 6	200 ไมโครลิตร	400 ไมโครลิตร	1 : 2
Sample 7	120 ไมโครลิตร	480 ไมโครลิตร	1 : 4
Sample 8	70 ไมโครลิตร	560 ไมโครลิตร	1 : 8
Sample 9	0 ไมโครลิตร	600 ไมโครลิตร	0 : 1

จากรูปที่ 4.33 น้ำหมักนำไฟฟ้าที่เตรียมด้วยอัตราส่วนระหว่างอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์และ PEDOT:PSS เป็น 1:1 มีค่าความต้านทานไฟฟ้าเป็น 361 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร ค่าการทะลุผ่านของแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรเป็นร้อยละ 85 เมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ ค่าความต้านทานของน้ำหมักนำไฟฟ้าและการทะลุผ่านแสงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อลดปริมาณอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ลง ค่าความต้านทานของน้ำหมักนำไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดที่ 39 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร ค่าการทะลุผ่านของแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรเป็นร้อยละ 68 แสดงค่าการทะลุผ่านแสงของฟิล์มดังกล่าวดังรูปที่ 4.34

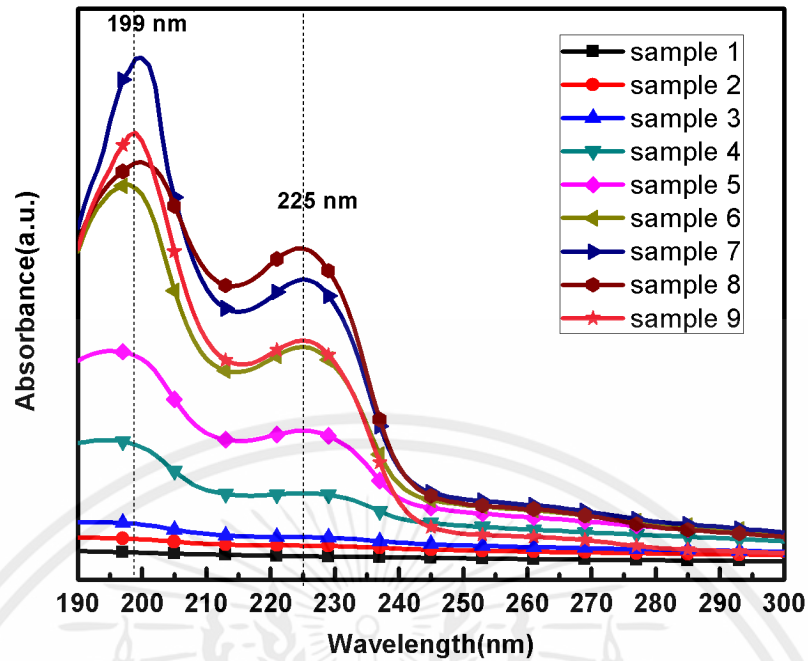
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



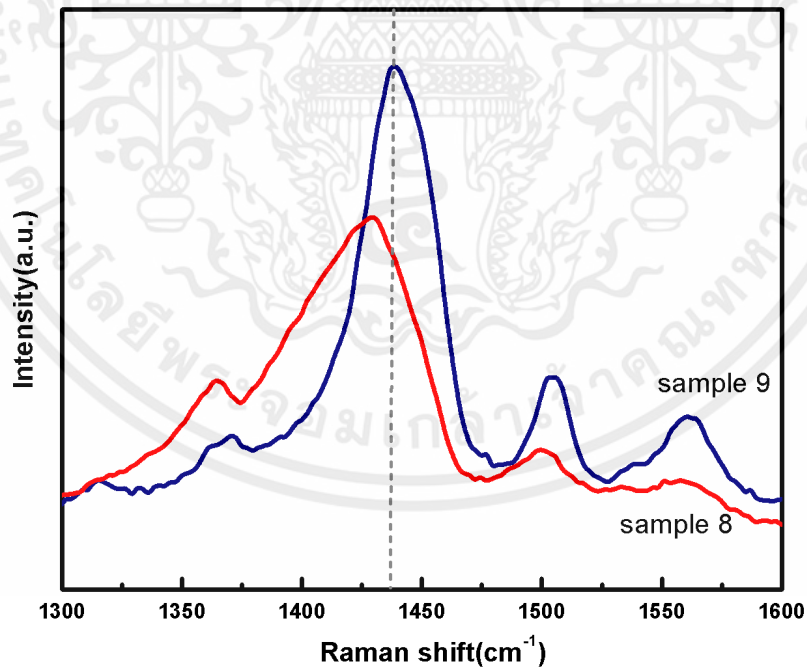
รูปที่ 4.34 แสดงการทะลุผ่านแสงของน้ำหมึกนำไฟฟ้าเมื่อประยุกต์เป็นขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิคการพิมพ์ โดยสัดส่วนระหว่างอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์และ PEDOT:PSS แตกต่างกัน

จากสมมติฐานเริ่มแรกที่ผู้ทดลองตั้งไว้คือเมื่อเตรียมน้ำหมึกนำไฟฟ้าจากวัสดุผสมระหว่างอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS สามารถช่วยให้ฟิล์มที่เตรียมจากน้ำหมึกนำไฟฟ้า นำไฟฟ้าได้ด้วยการเคลื่อนที่ของประจุระหว่างอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS โดยสามารถนำไฟฟ้าได้ดีที่สุดที่อัตราส่วนระหว่างอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ต่อพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS เป็น 1 ต่อ 8 อย่างไรก็ตามเพื่อทำความเข้าใจเพิ่มเติมถึงสาเหตุการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าของฟิล์ม ผู้ทดลองจึงทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคยูวีวิสสเปคโตรสโกปีและรามานสเปคโตรสโกปี

จากรูปที่ 4.35 การดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 199 และ 225 นาโนเมตร แสดงถึงการมีอยู่ของวงอะโรมาติก PSS [36] ซึ่งการมีอยู่ของ PSS ที่มากส่งผลให้ฟิล์มมีความต้านทานไฟฟ้ามากด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มที่เตรียมจาก PEDOT:PSS (sample 9) และน้ำหมึกนำไฟฟ้าที่อัตราส่วนระหว่างอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ต่อพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS เป็น 1 ต่อ 8 (sample 8) พบว่าปริมาณที่มากกว่าของ PSS บนฟิล์มที่เตรียมจากน้ำหมึกนำไฟฟ้ากลับไม่ส่งผลให้ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มมากกว่าฟิล์มที่เตรียมจาก PEDOT:PSS ผลการทดลองนี้จึงสนับสนุนสมมติฐานการเคลื่อนที่ได้ดีขึ้นของประจุเมื่อเคลื่อนที่ผ่านระหว่างอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS นอกจากนี้ผู้ทดลองยังศึกษาลักษณะการผสมกันระหว่างวัสดุอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ทั้งการเกิดพันธะระหว่างสองวัสดุและลักษณะทางกายภาพด้วยเทคนิครามานสเปคโตรสโกปีและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตามลำดับ

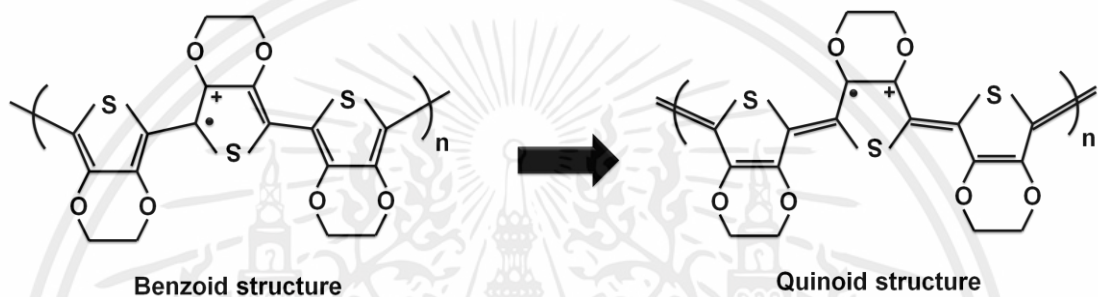


รูปที่ 4.35 กราฟการดูดกลืนแสงช่วง 190-300 นาโนเมตร ของน้ำหมึกนำไฟฟ้าเมื่อประยุกต์เป็นขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิคการพิมพ์โดยสั้ส่วนระหว่างอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์และ PEDOT:PSS แตกต่างกัน



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 4.36 เปรียบเทียบการเกิดพันธะของฟิล์มที่เตรียมด้วยวัสดุ PEDOT:PSS และฟิล์มที่เตรียมด้วยน้ำหมึกนำไฟฟ้าที่อัตราส่วนระหว่างอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ต่อพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS เป็น 1 ต่อ 8

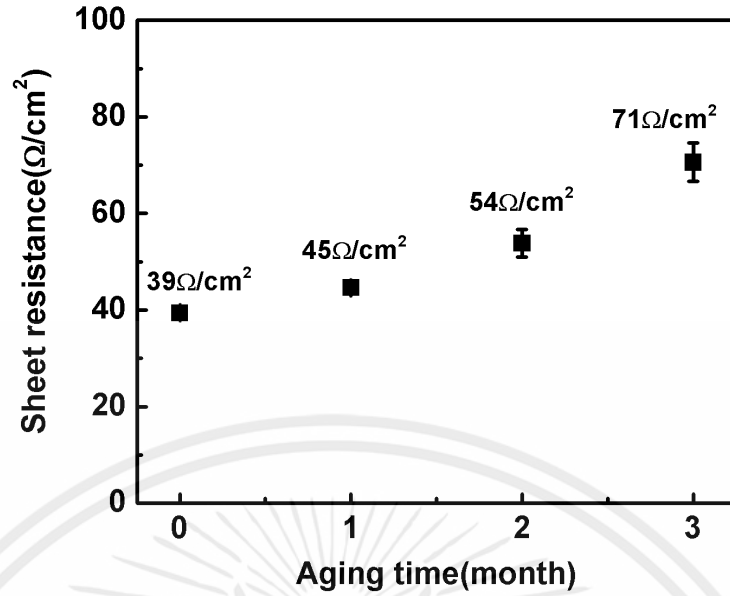
จากรูปที่ 4.36 การดูดช่วง 1400 ถึง 1500 เลขคลื่น เป็นลักษณะการสั่นยืดหดแบบสมมาตร ระหว่างพันธะคู่ของอัลฟาคาร์บอนและเบต้าคาร์บอนในวงแหวนอะโรมาติกไทโอฟีนบนสายโซ่ PEDOT [37] พบว่าเมื่อเตรียมพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS เป็นน้ำหมักนำไฟฟ้าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงยอดการดูดกลืนจากเลขคลื่น 1437 เป็น 1430 ซึ่งอธิบายได้ว่าการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในสายโซ่ PEDOT จากโครงสร้างเบนซอยด์ (benzoid structure) เป็นควินอยด์ (quinoid structure) ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS ดีขึ้น[37] การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างดังกล่าวภายในสายโซ่ PEDOT เป็นผลมาจากสารละลายไดเอทิลีนไกลคอล [38] ซึ่งเป็นหนึ่งในส่วนผสมของน้ำหมักนำไฟฟ้า



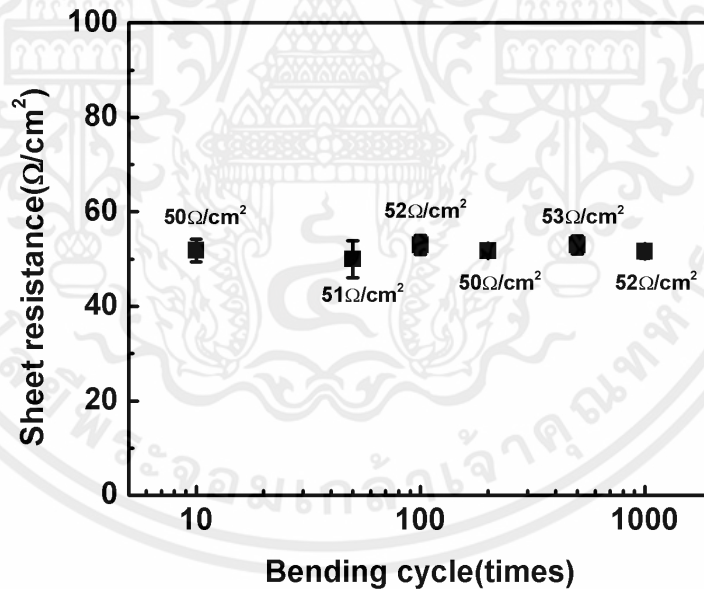
รูปที่ 4.37 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในสายโซ่ PEDOT จากโครงสร้างเบนซอยด์ เป็นควินอยด์

4.13 ศึกษาเสถียรภาพการนำไฟฟ้าของน้ำหมักนำไฟฟ้าเมื่อประยุกต์เป็นขั้วไฟฟ้าโค้งงอได้บนฐานรองรับพลาสติก

ขั้วไฟฟ้าโค้งงอที่ถูกเตรียมจากน้ำหมักนำไฟฟ้าด้วยเทคนิคการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์กระดาษถูกนำมาศึกษาเสถียรภาพการนำไฟฟ้าเมื่อระยะเวลาผ่านไป 3 เดือน โดยวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.38 พบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปหนึ่งเดือน ขั้วไฟฟ้าโค้งงอมีค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงไปจาก 39 โอห์มต่อตารางเซนติเมตรเป็น 45 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร นอกจากนี้เมื่อระยะเวลาผ่านไป 2 และ 3 เดือน ขั้วไฟฟ้ามีค่าความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงเป็น 54 และ 71 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ การที่ค่าความต้านทานไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปน่าจะเป็นสาเหตุมาจากวัสดุพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงทางความชื้น นอกจากการตรวจสอบเสถียรภาพเมื่อระยะเวลาผ่านไปแล้ว ผู้วิจัยยังทำการตรวจสอบความสามารถในการโค้งงอได้ของขั้วไฟฟ้า โดยการงอ-ตรงซ้ำกันเป็นจำนวน 1000 รอบ แสดงดังรูปที่ 4.39 พบว่าแม้จะผ่านการโค้งงอซ้ำถึง 1000 รอบ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้ายังคงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 4.38 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของน้ำหมึกนำไฟฟ้าที่เตรียมเป็นฟิล์มบางบนฐานรองรับพลาสติกด้วยวิธีการพิมพ์ เมื่อระยะเวลาผ่านไปนาน 3 เดือน



รูปที่ 4.39 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของน้ำหมึกนำไฟฟ้าที่เตรียมเป็นฟิล์มบางบนฐานรองรับพลาสติกด้วยวิธีการพิมพ์ เมื่อทดสอบการโค้งงอซ้ำถึง 1000 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้เกี่ยวข้องกับการเตรียมน้ำหมึกนำไฟฟ้าจากวัสดุผสมระหว่างอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS เพื่อประยุกต์นำหมึกนำไฟฟ้าที่เตรียมได้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงบนฐานรองรับพลาสติกโดยเทคนิคการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์กระดาษ อันดับแรกวิทยานิพนธ์นี้ศึกษาความเป็นไปได้ของการเตรียมน้ำหมึกนำไฟฟ้าจากวัสดุผสมดังกล่าว โดยเตรียมเป็นขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิคการหยดบนฐานรองรับกระจก ผลการตรวจสอบเบื้องต้นพบว่าพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS เมื่อเตรียมเป็นฟิล์มด้วยเทคนิคการหยดบนฐานรองรับกระจก มีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงถึง 40 กิโลโอห์ม แต่เมื่อเตรียมเป็นวัสดุผสมกับอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ พบว่าฟิล์มวัสดุผสมที่ความเข้มข้นของอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ร้อยละ 20 โดยมวล มีค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลงเหลือเพียง 390 โอห์ม การลดลงของความต้านทานไฟฟ้าอย่างมากของฟิล์มที่เตรียมจากวัสดุผสมระหว่างอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS ผู้วิจัยตั้งสมมติฐานว่าเกิดจากการเพิ่มขึ้นของทางเดินอิเล็กตรอน ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์และ PEDOT:PSS นอกจากนี้ยังเป็นผลมาจากระดับพลังงานเฟอร์มิของวัสดุทั้งสองที่มีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ส่งผ่านระหว่างกันได้ง่าย จึงส่งผลให้เมื่อผสมสองวัสดุเข้าด้วยกันแล้วค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลง อย่างไรก็ตามแม้ค่าความต้านทานไฟฟ้าจะลดลงแต่ยังคงมีค่ามากสำหรับการประยุกต์เป็นขั้วไฟฟ้า ผู้วิจัยจึงทำการปรับปรุงประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าโดยการศึกษาขนาดและโครงสร้างผลึกของอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ส่งผลกระทบต่อกรนำไฟฟ้าของน้ำหมึกนำไฟฟ้าผสมระหว่างอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS

การสังเคราะห์อนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ให้ได้ขนาดและโครงสร้างแตกต่างกัน ผู้วิจัยเลือกใช้การสังเคราะห์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล พบว่าระยะเวลาการไฮโดรเทอร์มอลที่เปลี่ยนแปลงไปตั้งแต่ 4 ถึง 48 ชั่วโมง ส่งผลต่อขนาดอนุภาคและลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ โดยส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคในช่วง 20 ถึง 95 นาโนเมตร นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดเบสขณะเกิดปฏิกิริยา ส่งผลให้อนุภาคอินเดียมทินออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มีโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน โดยค่าความเป็นกรดเบสขณะเกิดปฏิกิริยาเป็น 8 ส่งผลให้สังเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ได้โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ และการสังเคราะห์อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ที่ค่าความเป็นกรดเบสขณะเกิดปฏิกิริยาเป็น 12 จะได้อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ได้โครงสร้างผลึกออร์โธโรมบอยด์รอล นอกจากนี้การเผาอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกออร์โธโรมบอยด์รอลที่อุณหภูมิสูงถึง 1000 องศาเซลเซียส สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์จากผลึกออร์โธโรมบอยด์รอลเป็นผลึกลูกบาศก์ได้ สำหรับขนาดอนุภาคนาโน

อินเดียมทินออกไซด์สามารถเพิ่มขนาดได้ด้วยอุณหภูมิการเผา พบว่าการเผาอุณหภูมิตั้งแต่ 500 ถึง 1150 องศาเซลเซียส สามารถเพิ่มขนาดอนุภาคได้ตั้งแต่ 20 ถึง 250 นาโนเมตร

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของน้ำหมึกนำไฟฟ้า ผู้วิจัยศึกษาการนำไฟฟ้าของน้ำหมึกนำไฟฟ้าที่เตรียมด้วยส่วนผสมของอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกแตกต่างกันเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS พบว่าขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยเทคนิคการหยดเคลือบจากน้ำหมึกนำไฟฟ้าวัสดุผสมระหว่างอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกด้วยความร้อนสูงให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยเป็น 3.6 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร อย่างไรก็ตามเมื่อประยุกต์น้ำหมึกนำไฟฟ้างกล่าวเป็นขั้วไฟฟ้าบนฐานรองรับพลาสติกด้วยเทคนิคการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์กระดาษไม่สามารถทำได้ เนื่องจากความหนืดที่มากเกินไปของน้ำหมึกนำไฟฟ้า ผู้วิจัยแก้ไขปัญหาโดยการเจือจางน้ำหมึกนำไฟฟ้าด้วยน้ำปลอดประจุด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 1 จึงทำให้สามารถพิมพ์น้ำหมึกนำไฟฟ้าได้ด้วยเทคนิคการพิมพ์ ซึ่งได้ค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงมากถึง 2605 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร ผู้วิจัยจึงทำการเพิ่มประสิทธิภาพของน้ำหมึกนำไฟฟ้าโดยการทดลองพิมพ์ซ้ำตั้งแต่ 3 ถึง 20 รอบ พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลงจาก 1,163 ถึง 88.2 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังศึกษาสัดส่วนที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกด้วยความร้อนสูงและพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS พบว่าที่สัดส่วนอนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์ต่อพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS เป็น 1 ต่อ 8 ให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ย 39 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร และค่าการทะลุผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร เป็นร้อยละ 68 สำหรับความเสถียรภาพเมื่อระยะเวลาผ่านไปสามเดือน ค่าความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปจาก 39 เป็น 71 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร อย่างไรก็ตามเมื่อทดสอบการโค้งงอซ้ำกันถึง 1000 รอบ โดยโค้งงอบนวัตถุทรงกลมขนาดรัศมี 1 เซนติเมตร ค่าความต้านทานไฟฟ้านั้นยังคงไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นขั้วไฟฟ้าโค้งงอได้ที่เตรียมจากน้ำหมึกนำไฟฟ้าวัสดุผสมระหว่างพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS และ อนุภาคนาโนอินเดียมทินออกไซด์เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง สำหรับการนำไฟฟ้าในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] W. Cao, J. Li, H. Chen, J. Xue, “Transparent electrodes for organic optoelectronic devices: a review”, *Journal of Photonics for Energy*, vol. 4, pp. 040990-1 – 040990-28, 2014.
- [2] B. R. Koo, H. J. Ahn, “Effect of hybrid nanoinks on solution-based Sn-doped In_2O_3 films under low-temperature microwave annealing”, *Ceramics International*, vol. 42, pp. 509–517, 2016.
- [3] E. P. S. Arlindo, J. A. Lucindo, C. M. O. Bastos, P. D. Emmel, M. O. Orlandi, “Electrical and optical properties of conductive and transparent ITO@PMMA nanocomposites”, *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 116, pp. 12946–12952, 2012.
- [4] Z. Chen, W. Li, R. Li, Y. Zhang, G. Xu, H. Cheng, “Fabrication of highly transparent and conductive indium–tin oxide thin films with a high figure of merit via solution processing”, *Langmuir*, vol. 29, pp. 13836–13842, 2013.
- [5] L. Körösi, S. Papp, I. Dékány, “Preparation of transparent conductive indium tin oxide thinfilms from nanocrystalline indium tin hydroxide by dip-coating method”, *Thin Solid Films*, vol. 519, pp. 3113–3118, 2011.
- [6] E. C. Cho, C. P. Li, J. H. Huang, K. C. Lee, J. H. Huang, “Three-dimensional conductive nanocomposites based on multiwalled carbon nanotube networks and PEDOT:PSS as a flexible transparent electrode for optoelectronics”, *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 7, pp. 11668–11676, 2015.
- [7] C. Hsu, C. Wu, C. Chuang, “Synthesis and characterization of nano silver-modified graphene/PEDOT:PSS for highly conductive and transparent nanocomposite films”, *J Polym Res*, vol. 22, pp.200, 2015.
- [8] B.C. Kim, J.Y. Kim, D.D. Lee, J.O. Lim and J.S. Huh, “Effect of crystal structures on gas sensing properties of nanocrystalline ITO thick films”, *Sensors and Actuators B*, vol. 89, pp. 180–186, 2003.
- [9] Z. Ma, Z. Li, K. Liu, C. Ye, and V. J. Sorger, “Indium-Tin-Oxide for High-performance Electro-optic Modulation”, *Nanophotonics*, vol. 4, pp. 198–213, 2015.
- [10] National Toxicology Program, “Chemical Information Profile for Indium Tin Oxide”, U.S. Department of Health and Human Services, 2009.
- [11] R. P. Lubianez, S. Kirchmeyer and D. Gaiser, “Advances in PEDOT:PSS Conductive Polymer Dispersions”
Retrieved from [http:// www.aimcal.org/uploads/4/6/6/9/46695933/lubianez.pdf](http://www.aimcal.org/uploads/4/6/6/9/46695933/lubianez.pdf)
- [12] Heraeus Precious Metals GmbH & Co KG, “ITO Alternative: solution deposited Clevios™PEDOT:PSS for transparent conductive applications”, 2012

Retrieved from <https://www.heraeus.com>

- [13] Jian Zhou, Dalaver H. Anjum, Long Chen, Xuezu Xu, Isaac Aguilar Ventura, Long Jiang and Gilles Lubineau, “Temperature-dependent microstructure of PEDOT/PSS films: insights from morphological, mechanical and electrical analyses”, *Journal of Materials Chemistry C*, vol. 2, pp. 9903-9910 , 2014.
- [14] ดร.สุพล อนันตา. เอกสารประกอบการสอน เรื่อง กระบวนการประดิษฐ์สำหรับเซรามิกขั้นสูง. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [15] B.C. Kim, S.M. Kim, J.H. Lee and J.J. Kim, “Effect of Phase Transformation on the Densification of Coprecipitated Nanocrystalline Indium Tin Oxide Powders”, *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 85, pp. 2083–2088, 2002.
- [16] B.C. Kim, J.Y. Kim, D.D. Lee, J.O. Lim and J.S. Huh, “Effect of crystal structures on gas sensing properties of nanocrystalline ITO thick films”, *Sensors and Actuators B*, vol. 89, pp. 180–186, 2003.
- [17] K.Y. Kim and S.B. Park, “Preparation and property control of nano-sized indium tin oxide particle”, *Materials Chemistry and Physics*, vol. 86, pp. 210-221, 2004.
- [18] J.E. Song, D.K. Lee, H.W. Kim, Y. Kim, and Y.S. Kang, “Preparation and characterization of monodispersed indium–tin oxide nanoparticles”, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 257–258, pp. 539–542, 2005.
- [19] S. Li, X. Qiao, J. Chen, H. Wang, F. Jia, and X. Qiu, “Effects of temperature on indium tin oxide particles synthesized by co-precipitation”, *Journal of Crystal Growth*, vol. 289, pp. 151–156, 2006.
- [20] J. L. C. Huaman, K. Tanoue, H.i Miyamura, T. Matsumoto and B. Jeyadevan, “Large-scale synthesis of ITO nanoparticles in an alcohol system assisted by acids”, *New J. Chem.*, vol. 38, pp. 3421–3428, 2014.
- [21] A. Solieman, S. Alamri and M. Aegerter, “Synthesis of corundum structure ITO nanocrystals by hydrothermal process at low pressure and low temperature”, *J Nanopart Res*, vol. 12, pp. , 2381–2385, 2010.
- [22] T. Sasaki, Y. Endo, M. Nakaya, K. Kanie, A. Nagatomi, K. Tanoue, R. Nakamura and A. Muramatsu, “One-step solvothermal synthesis of cubic-shaped ITO nanoparticles precisely controlled in size and shape and their electrical resistivity”, *Journal of Materials Chemistry*, vol. 20, pp. 8153–8157, 2010.
- [23] J.S. Lee and S.C. Choi, “Solvent effect on synthesis of indium tin oxide nanopowders by a solvothermal process”, *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 25, pp. 3307–3314, 2005.

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นกรณีที่ได้รับอนุญาตให้เผยแพร่และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [24] B. Shong, N. Shin, Y.H. Lee, K.H. Ahn, and Y.W. Lee, “Synthesis of indium tin oxide(ITO) nanoparticles in supercritical methanol”, *The Journal of Supercritical Fluids*, vol. 113, pp. 39–43, 2016.
- [25] Z. Ma, Z. Li, K. Liu, C. Ye, and V. J. Sorger, “Indium-Tin-Oxide for High-performance Electro-optic Modulation”, *Nanophotonics*, vol. 4, pp. 198–213, 2015.
- [26] M.S. Hwang, B.Y. Jeong, J. moon, S.K. Chun and J. Kim, “Inkjet-printing of indium tin oxide (ITO) films for transparent conducting electrodes”, *Materials Science and Engineering B*, vol. 176, pp. 1128–1131, 2011.
- [27] K. Sun, P. Li, Y. Xia, J. Chang and J. Ouyang, “Transparent Conductive Oxide-Free Perovskite Solar Cells with PEDOT:PSS as Transparent Electrode”, *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 7, pp. 15314–15320, 2015.
- [28] H. Kang, S. Jung, S. Jeong, G. Kim, and K. Lee, “Polymer-metal hybrid transparent electrodes for flexible electronics”, *Nature Communications*, 2015.
- [29] H.I. Shin, K.H. Kim, T.W. Kim and H.K. Kim, “Fiber laser annealing of brush-painted ITO nanoparticles for use as transparent anode for organic solar cells”, *Ceramics International*, vol. 42, pp. 13983–13989, 2016.
- [30] S. Ghanizadeh, T.A. Nirmal Peiris, D.S.Y. Jayathilake, D.A. Hutt, K.G.U. Wijayantha, D.J. Southee, P.P. Conway, P. Marchand, J.A. Darr, I.P. Parkin and C.J. Carmalt, “Dispersion and microwave processing of nano-sized ITO powder for the fabrication of transparent conductive oxides”, *Ceramics International*, vol. 42, pp. 18296–18302, 2016.
- [31] M.Y. Teo, N. Kim, S. Kee, B.S. Kim, G. Kim, S. Hong, S. Jung and K. Lee, “Highly Stretchable and Highly Conductive PEDOT:PSS/Ionic Liquid Composite Transparent Electrodes for Solution-Processed Stretchable Electronics”, *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 9, pp. , 819–826, 2017.
- [32] รศ. ดร.จิติ หนูแก้ว. 2553. นาโนอิเล็กทรอนิกส์: ฟิสิกส์และเทคโนโลยี. ครั้งที่1. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [33] แม้น อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม. “หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ: Principles and Techniques of Instrumental Analysis.” กรุงเทพมหานคร, (2534).
- [34] L. Körösi, S. Papp and I. Dékány, “Preparation of transparent conductive indium tin oxide thinfilms from nanocrystalline indium tin hydroxide by dip-coating method”, *Thin Solid Films*, vol. 519, pp. 3113–3118, 2011.
- [35] J.-F. Huang, Y. Huang, L.-Y. Cao and J.-P. Wu, “Influence of hydrothermal reaction time on phases, morphologies and optical properties of Sm₂O₃ thin films”, *Materials Research Innovations*, vol. 11, pp. 173-176, 2007.

- [36] D. Alemu, H. Wei, K. Ho, C. Chu, “Highly conductive PEDOT:PSS electrode by simple film treatment with methanol for ITO-free polymer solar cells”, *Energy and environmental science*, vol. 5, pp. 9662-9671, 2012.
- [37] T. Chou, S. Chen, Y. Chiang, Y. Lin, C. Chao, “Highly conductive PEDOT:PSS films by post-treatment with dimethyl sulfoxide for ITO-free liquid crystal display”, *Journal of Materials Chemistry C*, vol. 3, pp. 3760-3766, 2015.
- [38] T. Zhou, G. Lubineau, “Improving electrical conductivity in polycarbonate nanocomposites using highly conductive PEDOT/PSS coated MWCNTs”, *Applied Materials & Interfaces*, vol. 5, pp. 6189-6200, 2013.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายไกรศักดิ์ วัฒนรังสฤษดิ์ เกิดวันศุกร์ที่ 3 เดือนกรกฎาคม พ.ศ.2535 โดยนายณรงค์ วัฒนรังสฤษดิ์เป็นบิดา และนางอนงค์ ถิ่นแฝงเป็นมารดา ที่อยู่ตามภูมิลำเนา 125/15 ซ.11 ถ.บึงสีไฟ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.พิจิตร 66000 บิดาและมารดาส่งให้ศึกษาเล่าเรียนจึงสามารถจบการศึกษาระดับอนุบาลศึกษาและประถมศึกษาที่โรงเรียนอนุบาลพิจิตร จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายที่โรงเรียนพิจิตรพิทยาคม ในปี2554 ศึกษาต่อระดับอุดมศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีในปี2558 จากนั้นศึกษาต่อหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี ที่วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้