

บทความวิจัย (Research Article)

ผลของการเติมเมทานอลต่อสมบัติเชิงโครงสร้าง สมบัติทางแสง และสมบัติทาง
ไฟฟ้าของฟิล์ม พีดอท:พีเอสเอส

Effects of Methanol Addition on the Structural, Optical, and
Electrical Properties of PEDOT:PSS Films

ทิพย์วรรณ รุ่งสว่าง¹, สุชีวัน กรอบทอง¹, สุทธิพนธ์ วงศ์ฤกษ์ดี^{1*}, สุภาพ ชูพันธ์²,
คณิต มานะธนะ³, นภัส แก้วตระกูลชัย⁴, อภิลักษณ์ เอียดเอื้อ⁵

¹ ภาควิชาวิทยาศาสตร์กายภาพและวัสดุศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

² ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ 50200

³ สาขาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัดนครราชสีมา 30000

⁴ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลผลิตทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

⁵ วิทยาลัยเทคโนโลยีและนวัตกรรมวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

Tipawan Rungsawang¹, Suchewan Krobthong¹, Sutthipoj Wongrerkdee^{1*},
Supab Choopun², Kanit Manatura³, Napat Kaewtrakulchai⁴, Apiluck Eiad-Ua⁵

¹ Department of Physical and Material Sciences, Faculty of Liberal Arts and Science, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom, 73140, Thailand

² Department of Physics and Materials Science, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiangmai 50200, Thailand

³ Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

⁴ Kasetsart Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

⁵ College of Materials Innovation and Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

* Corresponding author

E-mail address: sutthipoj.s@ku.ac.th

Received: 28/02/2025; Revised: 08/03/2025; Accepted: 02/04/2025

คำสำคัญ	บทคัดย่อ
พีดอท:พีเอสเอส	พีดอท:พีเอสเอส เป็นวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งแสงที่มีศักยภาพสูงในการประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์
เมทานอล	อิเล็กทรอนิกส์และเซลล์แสงอาทิตย์ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของเมทานอลต่อ
อมอร์ฟัส	สมบัติเชิงโครงสร้าง สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มพีดอท:พีเอสเอสที่มีการ
สมบัติทางไฟฟ้า	เติมเมทานอลในอัตราส่วน 1:1, 1:2, 1:4 และ 1:8 โดยทำการเคลือบพีดอท:พีเอสเอสที่มี
ความต้านทานแผ่น	การเติมเมทานอลบนกระจกนำไฟฟ้าชนิดตีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน จากนั้นตรวจสอบ
	ลักษณะเฉพาะของฟิล์มด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน พูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดส
	เปกโตรสโคปี สเปกโตรสโคปีอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิล และวิธีการวัดโพรบ 4 จุด เพื่อศึกษา

โครงสร้างผลึก หมู่ฟังก์ชัน การส่งผ่านแสง และความต้านทานแผ่น ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์พบว่าฟิล์มพีดอท:พีเอสเอส ไม่ปรากฏพีคโครงสร้างผลึกที่ชัดเจน ซึ่งบ่งชี้ว่าโครงสร้างของพีดอท:พีเอสเอส ยังคงเป็นอมอร์ฟัส และหมู่ฟังก์ชันแสดงสัญญาณการสั่นของพันธะทางเคมีที่สำคัญที่สอดคล้องกับพีดอทและพีเอสเอส เช่น C-H, C=O, C-C, C-S และ SO_4^{2-} ในขณะที่การส่งผ่านแสงเฉลี่ยในย่านแสงขาวมีค่าใกล้เคียงกันที่ประมาณ 75% ในทุกอัตราส่วน แสดงว่าการเติมเมทานอลไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงโครงสร้างและสมบัติทางแสงอย่างมีนัยสำคัญ แต่กลับพบว่าความต้านทานแผ่นรวมลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าต่ำสุดที่ $6.69 \pm 0.04 \text{ } \Omega/\text{sq}$ เมื่ออัตราส่วน พีดอท:พีเอสเอสต่อเมทานอลเท่ากับ 1:4 ดังนั้นการควบคุมอัตราส่วนเมทานอลที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญในการปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มพีดอท:พีเอสเอส

KEYWORDS

PEDOT:PSS
Methanol
Amorphous
Electrical property
resistance
Sheet resistance

ABSTRACT

PEDOT:PSS is a highly potential transparent conductive material for applications in electronic devices and solar cells. This study aims to investigate the effects of methanol on the structural, optical, and electrical properties of PEDOT:PSS films by adding methanol at ratios of 1:1, 1:2, 1:4, and 1:8. The PEDOT:PSS films with methanol addition were coated onto fluorine-doped tin oxide (FTO) conductive glass, and their characteristics were examined using X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), ultraviolet-visible (UV-Vis) spectroscopy, and a four-point probe method to analyze crystal structure, functional groups, optical transmittance, and sheet resistance, respectively. The results revealed that the PEDOT:PSS films exhibited no distinct crystallographic peaks, indicating that the structure remained amorphous. The functional group analysis confirmed the presence of key vibrational signals corresponding to C-H, C=O, C-C, C-S, and SO_4^{2-} , which are characteristic of PEDOT and PSS. Meanwhile, the average optical transmittance in the visible light range remained approximately 75% across all methanol ratios, suggesting that methanol incorporation did not significantly alter the structural and optical properties. However, the total sheet resistance was significantly reduced, with a minimum value of $6.69 \pm 0.04 \text{ } \Omega/\text{sq}$ at a PEDOT:PSS-to-methanol ratio of 1:4. Therefore, optimizing the methanol ratio is a crucial factor in enhancing the electrical properties of PEDOT:PSS films.

1. บทนำ

ฟิล์มพีดอท:พีเอสเอส (PEDOT:PSS) เป็นวัสดุพอลิเมอร์นำไฟฟ้าโปร่งแสงที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานวิจัยด้านวัสดุนำไฟฟ้าและฟิล์มบาง เนื่องจากมีสมบัติโดดเด่นด้านการนำไฟฟ้าสูง มีความโปร่งแสง มีความยืดหยุ่นเชิงกล และสามารถเคลือบลงบนพื้นผิวแผ่นรองรับต่าง ๆ ได้ง่ายด้วยกระบวนการเคลือบที่หลากหลาย (Krobthong et al., 2023; Mounsrijun et al., 2023)

ด้วยสมบัติเหล่านี้ทำให้ PEDOT:PSS เป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานสำหรับอุปกรณ์ที่หลากหลาย (Wongrerkdee et al., 2021; Yun and Im, 2024) เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells), อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น (Flexible electronics), จอแสดงผลโปร่งแสง (Transparent displays), ไบโอเซ็นเซอร์ (Biosensors), ฉนวนกันความร้อน (Thermal insulators) รวมทั้งอุปกรณ์เก็บพลังงาน เช่น ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (Supercapacitors) และแบตเตอรี่แบบบาง (Thin-Film Batteries) อย่างไรก็ตาม แม้ว่า PEDOT:PSS จะมีค่าการนำไฟฟ้าที่ดีและสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย แต่ค่าการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS ดั้งเดิมที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ยังคงต่ำกว่าความต้องการสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพสูง เนื่องจาก โครงสร้างพอลิเมอร์ของ PEDOT:PSS ที่มีลักษณะเป็นเครือข่ายของ PEDOT ที่ถูกห่อหุ้มด้วยสายโซ่ของ PSS ซึ่งเป็น โพลิเมอร์ที่มีประจุลบและมีสมบัติเป็นฉนวน ทำให้ประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าโดยรวมของฟิล์ม PEDOT:PSS ลดลง อีกทั้งโครงสร้างภายในของ PEDOT:PSS มักจะมีการจัดเรียงตัวของโซ่พอลิเมอร์แบบไม่เป็นระเบียบ (Amorphous) ซึ่งส่งผลให้พาหะนำไฟฟ้า (Charge Carriers) มีการเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบและไม่มีประสิทธิภาพ

การปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าของ PEDOT:PSS ด้วยสารช่วยกระจายตัวเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น เมทานอล (Methanol), เอทานอล (Ethanol), ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (Dimethyl Sulfoxide: DMSO), เอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol: EG), โพรพิลีนไกลคอล (Propylene Glycol: PG) และกรดซัลฟริก (Sulfuric acid) (Dong and Portale, 2020; Lu et al., 2019; Shi et al., 2021) ซึ่งช่วยปรับปรุงโครงสร้างของ PEDOT:PSS ได้โดยส่งผลต่อการลดปริมาณ PSS ซึ่งมีความเป็นฉนวน และกระตุ้นให้เกิดการจัดเรียงตัวของสายโซ่ PEDOT ให้เอื้ออำนวยต่อการนำไฟฟ้า นอกจากนี้การใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ยังสามารถช่วยในการปรับแต่งความหนาของฟิล์มและปรับปรุงความสามารถในการเคลือบฟิล์มให้สม่ำเสมอยิ่งขึ้น การเติม Methanol ลงใน PEDOT:PSS มีความน่าสนใจเนื่องจาก Methanol เป็นตัวทำละลายที่สามารถละลาย PSS ได้บางส่วน ทำให้เกิดการแยกตัวของ PEDOT และ PSS และอาจนำไปสู่การเรียงตัวของโซ่ PEDOT ที่ดีขึ้นและเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์ม PEDOT:PSS นอกจากนี้ Methanol ยังมีจุดเดือดต่ำ ทำให้สามารถระเหยออกไปได้ง่ายในกระบวนการเคลือบ ส่งผลให้ได้ฟิล์มที่มีความสม่ำเสมอและมีสมบัติทางแสงที่ดี แม้ว่าการเติม Methanol จะสามารถช่วยเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS ได้ แต่ยังคงจำเป็นต้องมีการศึกษาผลกระทบ ต่อโครงสร้าง สมบัติทางแสง และค่าความต้านทานของฟิล์ม เพื่อวิเคราะห์เงื่อนไขการเตรียมฟิล์มให้มีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษาผลของ Methanol ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันต่อสมบัติเชิงโครงสร้าง สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้าของ PEDOT:PSS เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์โปร่งแสงในอนาคต

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของ Methanol ต่อสมบัติเชิงโครงสร้าง สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม PEDOT:PSS ที่เคลือบบนกระจกนำไฟฟ้าชนิดทินุกออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน (F-doped SnO_2 : FTO) และวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะ ด้วยเทคนิค XRD, FTIR, UV-Vis และ 4 Point Probe เพื่อประเมินผลกระทบของอัตราส่วน Methanol ที่มีต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์ม PEDOT:PSS ซึ่งจะช่วยในการปรับปรุงประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าของฟิล์ม PEDOT:PSS

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

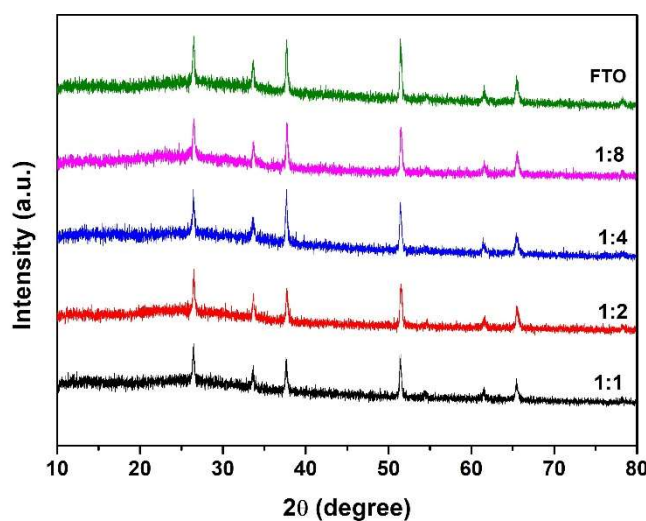
เตรียมแผ่นกระจกนำไฟฟ้า FTO ขนาด $2 \times 2.5 \text{ cm}^2$ และนำไปล้างด้วยอะซิโตน เอทานอล และน้ำปราศจากไอออน อย่างละ 20 นาที ตามลำดับ โดยใช้เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic cleaners) จากนั้นเป่าด้วยลมร้อนให้แห้งและนำไปอบด้วยแสงยูวี เป็นเวลา 20 นาที และเก็บไว้ใช้เป็นแผ่นรองรับ เตรียม PEDOT:PSS และ Methanol ด้วยปริมาตรรวม 1 mL ในขวดสีชา โดยใช้เงื่อนไขอัตราส่วน PEDOT:PSS ต่อ Methanol เป็น 1:1, 1:2, 1:4 และ 1:8 จากนั้นนำไปกวนให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนสาร (Magnetic stirrers) ที่ระดับความเร็ว 4000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นนำสารละลายผสมของ PEDOT:PSS กับ Methanol ไปเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า FTO ด้วยเครื่องเคลือบผิวแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coater) โดยหยดสารละลายผสม ปริมาตร 200 μL ที่ความเร็ว 4000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 40 วินาที และนำไปให้ความร้อนด้วยที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 20 นาที

ศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง PEDOT:PSS โดยใช้เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) โดยวัดมุมตั้งแต่ 10° ถึง 80° และสร้างกราฟเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐาน (Joint Committee on Powder Diffraction Standard: JCPDs)

เพื่อวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบน ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FTIR) ในโหมดการส่งผ่าน (Transmittance) ทำการวัดในช่วงเลขคลื่น $4000 - 500 \text{ cm}^{-1}$ และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างเลขคลื่นและค่าการส่งผ่านแสง เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชันของวัสดุ การศึกษาการส่งผ่านแสง (Transmittance) ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิล (UV-Vis) ในช่วงความยาวคลื่น $250 - 800 \text{ nm}$ และวัดความต้านทานแผ่น (Sheet resistance) ด้วยเทคนิคโพรบ 4 จุด (Four-point probe)

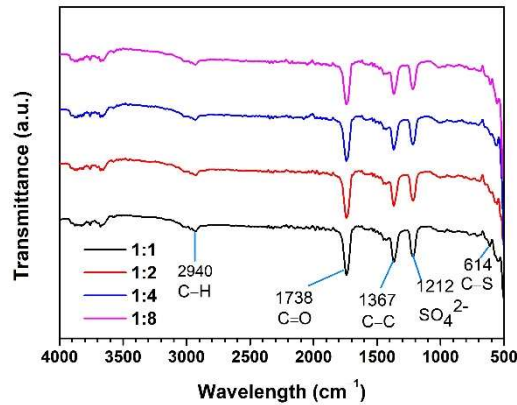
3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

การศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์ม PEDOT:PSS ที่มีการเติม Methanol ในอัตราส่วน 1:1, 1:2, 1:4 และ 1:8 ที่เคลือบบนกระจกนำไฟฟ้า FTO แสดงดังภาพที่ 1 ผลการทดสอบพบว่า พิก XRD ที่ปรากฏเด่นชัดเป็นพิกของโครงสร้างผลึก FTO ซึ่งเป็นผลมาจาก SnO_2 ซึ่งสอดคล้องกับ JCPDs card no. 41-1445 (Asl and Rozati, 2019; Kong et al., 2017) ที่เป็นองค์ประกอบหลักของ FTO แต่ไม่ปรากฏพิกของโครงสร้างผลึก PEDOT:PSS อย่างเด่นชัดในสเปกตรัม XRD ซึ่งอาจเป็นผลมาจากลักษณะโครงสร้างของ PEDOT:PSS ที่เป็นอมอร์ฟัส (Amorphous) (ฐิตารีย์ และคณะ, 2567; Sujinnapram et al., 2023) เนื่องจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่ไม่เป็นระเบียบส่งผลให้ไม่มีระยะระหว่างระนาบผลึกที่แน่นอน ทำให้การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ไม่สามารถเกิดเป็นพิกที่ชัดเจนเหมือนวัสดุผลึกทั่วไป นอกจากนี้ ฟิล์ม PEDOT:PSS ยังอาจมีขนาดผลึกที่เล็กมากจนเกินขีดจำกัดของเครื่อง XRD ในการตรวจจับสัญญาณการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้อย่างชัดเจน แม้ว่าการเติม Methanol ใน PEDOT:PSS อาจส่งผลต่อระดับของการจัดเรียงตัวของโซ่พอลิเมอร์ และอาจช่วยเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าโดยปรับโครงสร้างของ PEDOT:PSS ให้มีลักษณะกึ่งผลึก (Semi-crystalline) ได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามจากผลการวิเคราะห์ด้วย XRD บ่งชี้ว่าโครงสร้างของ PEDOT:PSS ยังคงเป็นอมอร์ฟัส



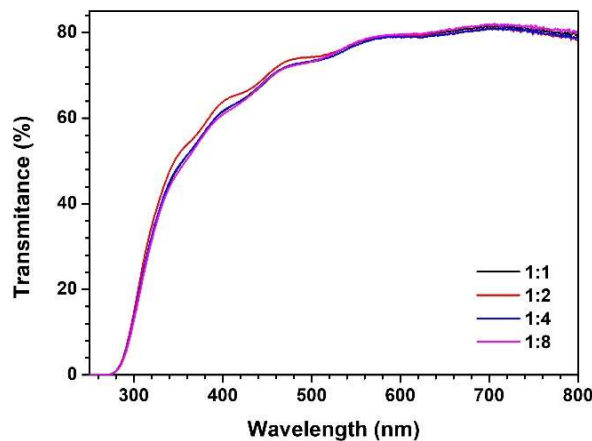
ภาพที่ 1 การเลี้ยวเบน XRD ของฟิล์ม FTO และฟิล์ม PEDOT:PSS ที่มีการเติม Methanol ในอัตราส่วน 1:1, 1:2, 1:4 และ 1:8

ภาพที่ 2 แสดงสเปกตรัม FTIR ในโหมดการส่งผ่าน (Transmittance) ที่วัดในช่วงเลขคลื่น $4000 - 500 \text{ cm}^{-1}$ ของฟิล์ม PEDOT:PSS เพื่อศึกษาหมู่ฟังก์ชันพบพิกการสั่นที่สำคัญประกอบด้วยพิกที่ตำแหน่งเลขคลื่น (Wavenumber) 2940 cm^{-1} ซึ่งสัมพันธ์กับการสั่นของพันธะ C-H ในสายโซ่พอลิเมอร์ พิกที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1738 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นของพันธะ C=O พิกที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1367 cm^{-1} สอดคล้องกับพันธะ C-C ในโครงสร้างของ PEDOT พิกที่ตำแหน่งเลขคลื่น 614 cm^{-1} บ่งชี้ถึงการสั่นของพันธะ C-S ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของ PEDOT และพิกที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1212 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับหมู่ SO_4^{2-} ของ PSS (Sakunpongpitiporn et al., 2019) ที่ทำให้ PEDOT:PSS มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี โดยจากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันแสดงให้เห็นว่ามีฟิล์ม PEDOT:PSS เคลือบอยู่บนกระจกนำไฟฟ้า FTO



ภาพที่ 2 สเปกตรัม FTIR ของฟิล์ม PEDOT:PSS ที่ผสมด้วย Methanol ในอัตราส่วน 1:1, 1:2, 1:4 และ 1:8

ภาพที่ 3 แสดงค่าการส่งผ่านแสง (Transmittance) ในช่วงความยาวคลื่น 250 - 800 นาโนเมตร ของฟิล์ม PEDOT:PSS ที่ผสมกับ Methanol ในอัตราส่วน 1:1, 1:2, 1:4 และ 1:8 ที่เคลือบบนกระจกนำไฟฟ้า FTO พบว่า Transmittance ของฟิล์มมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละอัตราส่วน และเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ย Transmittance ในย่านแสงขาว (ความยาวคลื่น 400- 700 nm) พบว่า Transmittance ของฟิล์ม PEDOT:PSS ที่ผสมกับ Methanol ในอัตราส่วน 1:1, 1:2, 1:4 และ 1:8 มีค่าร้อยละ 75.23 ± 0.31 , 75.61 ± 0.16 , 74.86 ± 0.24 และ 75.28 ± 0.09 ตามลำดับ เนื่องจากการเติม Methanol ด้วยอัตราส่วนอิมิตัวที่เหมาะสมจะส่งผลให้ PEDOT:PSS มีการเรียงตัวดีขึ้นซึ่งจะช่วยเพิ่ม Transmittance (อัตราส่วน 1:2) แต่เมื่อมีการเติม Methanol ในปริมาณที่มากเกินไปกว่าจุดอิมิตัว (1:4 และ 1:8) จึงไม่ส่งผลต่อโครงสร้างของฟิล์มอย่างชัดเจน ส่งผลให้ค่า Transmittance ที่ได้อยู่แล้วไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ (Wang et al., 2015) แม้ว่าการเติม Methanol จะช่วยเพิ่มการส่งผ่านแสงของฟิล์ม PEDOT:PSS แต่จากผลการทดลองกลับพบว่าทุกอัตราส่วนมีค่าเฉลี่ย Transmittance ใกล้เคียงกันแสดงว่าการเติม Methanol ใน PEDOT:PSS ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางแสงของฟิล์มเพียงเล็กน้อยในย่านแสงขาว และเนื่องจากค่าเฉลี่ย Transmittance มีค่าสูงในย่านแสงขาวจึงอาจมีความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ทางแสง

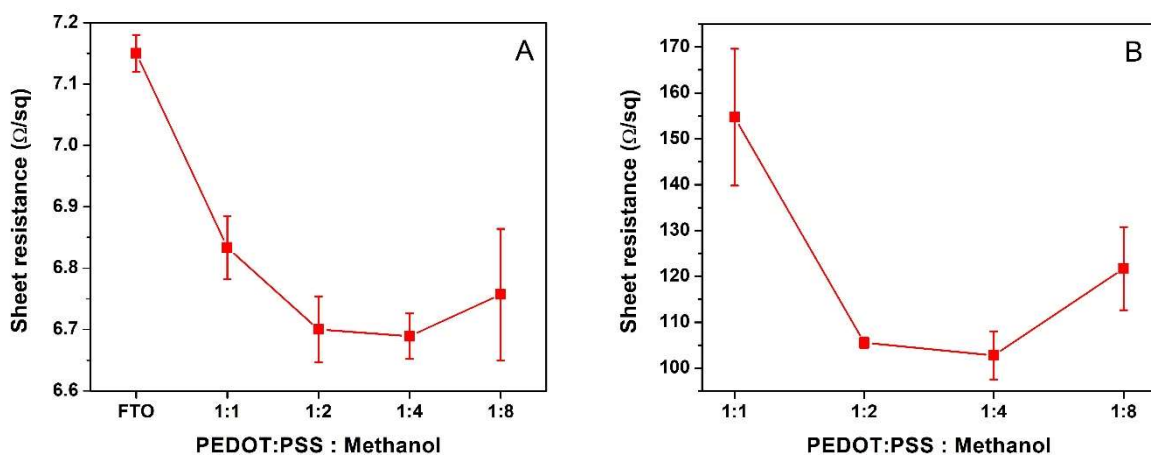


ภาพที่ 3 สเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์ม PEDOT:PSS ที่ผสมด้วย Methanol ในอัตราส่วน 1:1, 1:2, 1:4 และ 1:8

จากกราฟแสดงค่า Sheet resistance ของฟิล์ม FTO และ FTO/PEDOT:PSS ที่ผสมด้วย Methanol ในอัตราส่วน 1:1, 1:2, 1:4 และ 1:8 ดังภาพที่ 4(A) พบว่าค่า Sheet resistance ของ FTO เพียงอย่างเดียวมีค่าเฉลี่ย $7.15 \pm 0.03 \Omega/\text{sq}$ และลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเคลือบด้วยฟิล์ม PEDOT:PSS ที่ผสมด้วย Methanol โดยค่า Sheet resistance ลดลงต่ำสุดเมื่ออัตราส่วน PEDOT:PSS ต่อ Methanol เป็น 1:4 ซึ่งมีค่าเป็น $6.69 \pm 0.04 \Omega/\text{sq}$ และเมื่อวิเคราะห์ค่า Sheet resistance ของฟิล์ม PEDOT:PSS เพียงอย่างเดียวดังภาพที่ 4(B) ด้วยสมมุติฐานของฟิล์มบาง 2 ชั้นของ PEDOT:PSS เทียบกับ FTO ด้วยสมการ (1) (Moungsrijun and Wongrerkdee, 2022)

$$1/R_t = 1/R_F + 1/R_P \quad (1)$$

เมื่อตัวแปร R_t คือ Sheet resistance ของฟิล์มรวม FTO/PEDOT:PSS ตัวแปร R_F คือ Sheet resistance ของฟิล์ม FTO และตัวแปร R_P คือ Sheet resistance ของฟิล์ม PEDOT:PSS จากการคำนวณพบว่า Sheet resistance ของฟิล์ม PEDOT:PSS เพียงอย่างเดียวมีค่าต่ำสุดเป็น $102.80 \pm 5.23 \text{ } \Omega/\text{sq}$ ที่อัตราส่วน PEDOT:PSS ต่อ Methanol เป็น 1:4 สอดคล้องกับการวิเคราะห์จาก Sheet resistance ของฟิล์มรวม แสดงให้เห็นว่าการผสม Methanol ในอัตราส่วนที่เหมาะสมสามารถช่วยลดความต้านทานของฟิล์ม PEDOT:PSS ได้ อันเป็นผลมาจากการกระจายตัวของพอลิเมอร์และการเรียงตัวของโซ่พอลิเมอร์ที่ดีขึ้นทำให้เกิดโครงสร้างที่เอื้อต่อการนำไฟฟ้า อย่างไรก็ตามเมื่อมีการผสม Methanol ในอัตราส่วนที่สูงขึ้น (อัตราส่วน 1:8) ค่า Sheet resistance กลับเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจาก Methanol ที่มากเกินไปส่งผลให้โครงสร้างของฟิล์ม PEDOT:PSS บางลงหรือเกิดการแยกตัวของ PEDOT และ PSS ที่มากเกินไป ทำให้การเชื่อมต่อของโซ่พอลิเมอร์นำไฟฟ้าถูกลดทอนลง ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของ Sheet resistance ดังนั้นการผสม Methanol ในอัตราส่วนที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญต่อการปรับปรุงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม PEDOT:PSS เนื่องจาก Methanol เป็นตัวทำละลายแบบมีขั้ว (Polar solvent) ที่สามารถลดปริมาณของ PSS ที่เป็นฉนวน และช่วยในการจัดเรียงตัวของ PEDOT ที่เป็นตัวนำ ให้เกิดโครงสร้างสายโซ่พอลิเมอร์ที่เป็นระเบียบและเชื่อมโยงกันดี ซึ่งส่งผลต่อสมบัติการนำไฟฟ้าของฟิล์ม PEDOT:PSS



ภาพที่ 4 (A) Sheet resistance ของ FTO และฟิล์ม FTO/PEDOT:PSS และ (B) Sheet resistance PEDOT:PSS

4. บทสรุป

จากการศึกษาผลของการเติม Methanol ใน PEDOT:PSS ในอัตราส่วน 1:1, 1:2, 1:4 และ 1:8 และเคลือบบนกระจกนำไฟฟ้า FTO พบว่า PEDOT:PSS มีโครงสร้างผลึกแบบอมอร์ฟัส (Amorphous) และเมื่อศึกษาหุ้มฟังก์ชันพบพันธะสำคัญที่สอดคล้องกับ PEDOT และ PSS ซึ่งยืนยันว่าฟิล์ม PEDOT:PSS ถูกเคลือบอยู่บนพื้นผิว FTO อย่างสมบูรณ์ สมบัติการส่งผ่านแสงของฟิล์ม PEDOT:PSS มีค่าการส่งผ่านแสงเฉลี่ยในช่วง 400-700 nm ไม่แตกต่างกันโดยมีค่าประมาณ 75% แสดงให้เห็นว่าการเติม Methanol ไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางแสงของฟิล์มอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ Sheet resistance รวมลดลงต่ำสุดเป็น $6.69 \pm 0.04 \text{ } \Omega/\text{sq}$ สำหรับฟิล์ม PEDOT:PSS ที่ผสมด้วย Methanol ในอัตราส่วน 1:4 ซึ่งเป็นการลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับฟิล์ม FTO ($7.15 \pm 0.03 \text{ } \Omega/\text{sq}$) ในการศึกษาพบว่า การเติม Methanol ใน PEDOT:PSS ส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าเป็นสำคัญ ในขณะที่สมบัติเชิงโครงสร้างและสมบัติเชิงแสงไม่ได้เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งฟิล์ม PEDOT:PSS ที่มีความโปร่งแสงสูง และมีความต้านทานต่ำ จึงเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โปร่งแสง เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงหรือขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงในอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากคณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ศูนย์วิจัย ส่งเสริม และถ่ายทอดเทคโนโลยี คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน สำหรับความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคป

เอกสารอ้างอิง

- ฐิตารีย์ อริยะตัญญูโก, สุชีวัน กรอบทอง, ศุภเดช สุจินพรัหม, ศศิมลลล ม่วงศรีจันทร์, ยุทธนา มูลกลาง, สาวิตรี วงศ์ฤกษ์ดี, ชัยณรงค์ รักธรรม, และสุทธิพจน์ วงศ์ฤกษ์ดี. (2567). การปรับปรุงการต้านทานน้ำของฟิล์มพีดอท:พีเอสเอสด้วยการเสริมชั้นฟิล์มบางทองคำ. *ศวท : ศิลปศาสตร์ วิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี*, 1(3), 9-15.
- Asl, H.Z., & Rozati, S.M. (2019). High-quality spray-deposited fluorine-doped tin oxide: effect of film thickness on structural, morphological, electrical, and optical properties. *Applied Physics A*, 125(10), 689. <https://doi.org/10.1007/s00339-019-2943-8>
- Dong, J., & Portale, G. (2020). Role of the Processing Solvent on the Electrical Conductivity of PEDOT:PSS. *Advanced Materials Interfaces*, 7(18), 2000641. <https://doi.org/10.1002/admi.202000641>
- Kong, Y., Sun, H., Fan, W., Wang, L., Zhao, H., Zhao, X., & Yuan, S. (2017). Enhanced photoelectrochemical performance of tungsten oxide film by bifunctional Au nanoparticles. *RSC Advances*, 7(25), 15201-15210. <https://doi.org/10.1039/C7RA01426K>
- Krobthong, S., Wongrerkdee, S., Wongrerkdee, S., Lohawet, K., Kaewprajak, A., & Kumnorkaew, P. (2023). Modification of PEDOT:PSS films using ZnI₂ additive for power conversion efficiency enhancement of organic solar cells. *Express Polymer Letters*, 17(4), 449-456. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2023.32>
- Lu, B., Yuk, H., Lin, S., Jian, N., Qu, K., Xu, J., & Zhao, X. (2019). Pure PEDOT:PSS hydrogels. *Nature Communications*, 10, 1043. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09003-5>
- Moungsrijun, M., Somsuk, S., Wongrerkdee, S., Lohawet, K., Sujinnapram, S., Krobthong, S., Kaewprajak, A., Kumnorkaew, P., & Wongrerkdee, S. (2023). Influence of HCl-doping on physical, optical, and electrical properties of PEDOT:PSS films. *Journal of Physics: Conference Series*, 2431, 012039. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2431/1/012039>
- Moungsrijun, S., & Wongrerkdee, S. (2022). Investigation of structural, optical, and electrical properties of ZnO thin films for electro-optical devices. *Suranaree Journal of Science and Technology*, 29(6), 030085.
- Sakunpongpitiporn, P., Phasuksom, K., Paradee, N., & Sirivat, A. (2019). Facile synthesis of highly conductive PEDOT:PSS via surfactant templates. *RSC Advances*, 9(11), 6363-6378. <https://doi.org/10.1039/C8RA08801B>
- Shi, Y., Zhou, Y., Shen, R., Liu, F., & Zhou, Y. (2021). Solution-based synthesis of PEDOT:PSS films with electrical conductivity over 6300 S/cm. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 101, 414-422. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.05.036>

- Sujinnapram, S., Wongrerkdee, S., Lohawet, K., Krobthong, S., Moungsrijun, S., Kaewprajak, A., Kumnorkaew, P., & Wongrerkdee, S. (2023). Investigation of structural, optical, and electrical properties of PEDOT:PSS/Au/PEDOT:PSS multilayer films. *Journal of Physics: Conference Series*, 2653, 012048. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2653/1/012048>
- Wang, W., Ruderer, M.A., Metwalli, E., Guo, S., Herzig, E.M., Perlich, J., & Müller-Buschbaum, P. (2015). Effect of methanol addition on the resistivity and morphology of PEDOT:PSS layers on top of carbon nanotubes for use as flexible electrodes. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7(16), 8789-8797. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b01327>
- Wongrerkdee, S., Ritruksa, M., Phattum, S., Lohawet, K., Kaewprajak, A., Kumnorkaew, P., & Wongrerkdee, S. (2021). PEDOT:PSS film preparation and characterization using convective deposition system controlled by Arduino microcontroller for organic photovoltaic application. *Engineering Journal*, 25(2), 335-341. <https://doi.org/10.4186/ej.2021.25.2.335>
- Yun, J.S., & Im, S.H. (2024). Porous PEDOT:PSS smart thermal insulators enabling energy harvesting and detection. *Journal of Materials Chemistry A*, 12(13), 7837-7846. <https://doi.org/10.1039/D4TA00287C>