

บทความวิจัย (Research Article)

การปรับปรุงการต้านทานน้ำของฟิล์มพีดอท:พีเอสเอสด้วยการเสริมชั้นฟิล์ม  
บางทองคำ

Water resistance improvement of PEDOT:PSS films by incorporating  
Au thin films

ฐิตารีย์ อริยะตัจจุโก<sup>1</sup>, สุชีวัน กรอบทอง<sup>1</sup>, ศุภเดช สุจินพรัหม<sup>1</sup>, ศศิมลทล ม่วงศรีจันทร์<sup>1</sup>,  
ยุทธนา มุลกลาง<sup>2</sup>, สาวิตรี วงศ์ฤกษ์ดี<sup>2</sup>, ชัยณรงค์ รักธรรม<sup>3</sup>, สุทธิพจน์ วงศ์ฤกษ์ดี<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิทยาศาสตร์กายภาพและวัสดุศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

<sup>2</sup> คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก อำเภอเมืองตาก จังหวัดตาก 63000

<sup>3</sup> สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ อำเภอเมือง จังหวัดอุตรดิตถ์ 53000

Thitaree Ariyatatchuko<sup>1</sup>, Sucheewan Krobthong<sup>1</sup>, Supphadate Sujinnapram<sup>1</sup>,  
Sasimonton Moungrsrijun<sup>1</sup>, Yutthana Munklang<sup>2</sup>, Sawitree Wongrerckdee<sup>2</sup>,  
Chainarong Raktham<sup>3</sup>, Sutthipoj Wongrerckdee<sup>1\*</sup>

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

<sup>2</sup> Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak, Tak 63000, Thailand

<sup>3</sup> Faculty of Education, Uttaradit Rajabhat University, Uttaradit, 53000, Thailand

\* Corresponding author

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

Received: 12/09/2024; Revised: 18/09/2024; Accepted: 21/10/2024

คำสำคัญ

พีดอท:พีเอสเอส  
ชั้นทองคำ  
มูมสัมผัส  
การต้านทานน้ำ

บทคัดย่อ

ปัญหาด้านความเสถียรของฟิล์มพีดอท:พีเอสเอสเมื่อสัมผัสกับความชื้นและออกซิเจน ส่งผลให้เกิดผลเสียต่อสมรรถนะของฟิล์ม ในงานวิจัยนี้ศึกษาการป้องกันการกัดกร่อนพื้นผิวฟิล์มพีดอท:พีเอสเอสโดยการเคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางทองคำ เมื่อศึกษาโครงสร้างผลึกพบว่าฟิล์มของฟิล์มพีดอท:พีเอสเอสและฟิล์มพีดอท:พีเอสเอสที่เคลือบด้วยชั้นทองคำก่อตัวแบบออสัณฐาน และตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันพบว่าสอดคล้องกับพีดอท:พีเอสเอส โดยประกอบด้วย C—S และ C—C ซึ่งสอดคล้องกับหมู่ฟังก์ชันของพีดอท และ S=O ซึ่งสอดคล้องกับหมู่ฟังก์ชันของพีเอสเอส เมื่อตรวจสอบการส่งผ่านแสงพบว่าฟิล์มพีดอท:พีเอสเอสที่เคลือบด้วยชั้นทองคำปรากฏสเปกตรัมการส่งผ่านแสงลดลงเล็กน้อย เนื่องจากการเคลือบชั้นทองคำบดบังการส่งผ่านแสง แต่เมื่อทดสอบมูมสัมผัสกลับพบว่ามูมสัมผัสของฟิล์มพีดอท:พีเอสเอส

ที่เคลือบด้วยชั้นทองคำสูงค่าสูงกว่าฟิล์มพีดอท:พีเอสเอส อยู่ระหว่างร้อยละ 83.39-106.48 เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่เตรียมด้วยอัตราเร็วการเคลือบผิวแบบหมุนเหวี่ยงเท่ากัน ดังนั้น การเคลือบพื้นผิวด้วยชั้นทองคำจึงช่วยเพิ่มการต้านทานน้ำของฟิล์มบางพีดอท:พีเอสเอสที่เคลือบด้วยทองคำ

**KEYWORDS**

PEDOT:PSS  
 Au layer  
 Contact angle  
 Water resistance

**ABSTRACT**

The instability of PEDOT:PSS films under moisture and oxygen environments affects their performance. This study presents the improvement of PEDOT:PSS film surface corrosion resistance through the deposition of an Au layer. Structural analysis revealed that both the uncoated and the Au-coated PEDOT:PSS (PEDOT:PSS/Au) films exhibited an amorphous morphology. The functional groups in PEDOT:PSS were identified, including C-S and C-C, which are characteristic of PEDOT, and S=O, which corresponds to the functional groups of PSS. Transmission measurements indicated a small decrease in transmittance for the PEDOT:PSS/Au films, attributing the obscuration by the Au layer. The contact angle (CA) analysis demonstrated that the PEDOT:PSS/Au films exhibited higher CA values ranging from 83.39% to 106.48% in comparison with those of the pristine PEDOT:PSS films prepared at the same speed. Consequently, the deposition of an Au layer significantly improves the water resistance of the PEDOT:PSS/Au films.

**1. บทนำ**

พอลิเมอร์นำไฟฟ้ามีโครงสร้างทางเคมีแบบ  $\pi$ -conjugated polymer ที่มีสายโซ่ประกอบด้วยพันธะเดี่ยวสลับกับพันธะคู่ มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดี การทำให้พอลิเมอร์สามารถนำไฟฟ้าได้มักนิยมทำการเจือด้วยสารบางประเภทซึ่งการเจือจะทำให้พอลิเมอร์ที่เป็นฉนวนไฟฟ้าหรือเป็นสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้นจากเดิมหลายเท่า โดยการเจือเหล่านี้จะอาศัยปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation - Reduction Reaction) หรือปฏิกิริยาการเติมโปรตอน (Protonation) ซึ่งการใช้กระบวนการเจือแบบใดจะขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ โดยพีดอท:พีเอสเอส (PEDOT:PSS) (Punla et al., 2020; Krobthong et al., 2023; Janthajam et al., 2024) เป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่มีความน่าสนใจเป็นพิเศษเนื่องจากการกระจายตัวในน้ำได้ดี มีความนำไฟฟ้าสูง และมีความโปร่งแสงในระดับที่เหมาะสมเมื่อเตรียมเป็นฟิล์ม

อย่างไรก็ตาม PEDOT:PSS มีปัญหาด้านความเสถียรเมื่อสัมผัสกับความชื้นและออกซิเจน เนื่องจาก PEDOT:PSS ประกอบด้วยโครงสร้างหลักสองส่วนคือ PEDOT ซึ่งเป็นส่วนที่นำไฟฟ้า และ PSS ซึ่งเป็นสารที่ช่วยทำให้ PEDOT:PSS ละลายน้ำได้ และทำหน้าที่เป็นตัวจับยึด ทำให้โครงสร้าง PEDOT:PSS สามารถเตรียมเป็นฟิล์มที่มีการนำไฟฟ้าและความโปร่งใสสูง แต่เมื่อ PEDOT:PSS สัมผัสกับความชื้นและออกซิเจน ฟิล์ม PEDOT:PSS อาจเกิดการกัดกร่อนขึ้น เนื่องจากความชื้นและออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับ PEDOT:PSS ส่งผลให้เกิดการออกซิเดชันในโครงสร้างพอลิเมอร์ PEDOT:PSS ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลและส่งผลให้เกิดผลเสียต่อโครงสร้าง รวมทั้งคุณสมบัติต่าง ๆ ของ PEDOT:PSS

การปรับปรุง PEDOT:PSS ให้ทนทานต่อการกัดกร่อนเป็นปัญหาสำคัญเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์บนฐาน PEDOT:PSS เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โซลาร์เซลล์ และเซนเซอร์ เป็นต้น โดยการปรับปรุงสามารถทำได้หลายแบบ เช่น การเติมสารปรับปรุง (Additives) เป็นวิธีที่ได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวาง (Wang et al., 2017; Lingstedt et al., 2019; Khasim et al., 2020)

เช่น การเติม Poly(vinyl Alcohol) (PVA), Ethylene Glycol (EG), Dimethyl Sulfoxide (DMSO) หรือ Glycerol การเคลือบด้วยโพลีเมอร์กันน้ำ เช่น PMMA (Poly(methyl methacrylate) หรือ Teflon และการเคลือบด้วยสารอนินทรีย์ เช่น ซิลิกา หรือไททาเนียมไดออกไซด์ ในงานวิจัยนี้ศึกษาการป้องกันการกัดกร่อนพื้นผิวฟิล์ม PEDOT:PSS โดยการเคลือบด้วยชั้นทองคำ (Au) ด้วยเทคนิค ดีซี สปีตเตอร์ริง ซึ่งเป็นการเคลือบที่ใช้เวลาเวลาน้อยและมีกระบวนการไม่ซับซ้อน อีกทั้งยังลดการใช้สารเคมีที่อาจส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของฟิล์ม PEDOT:PSS

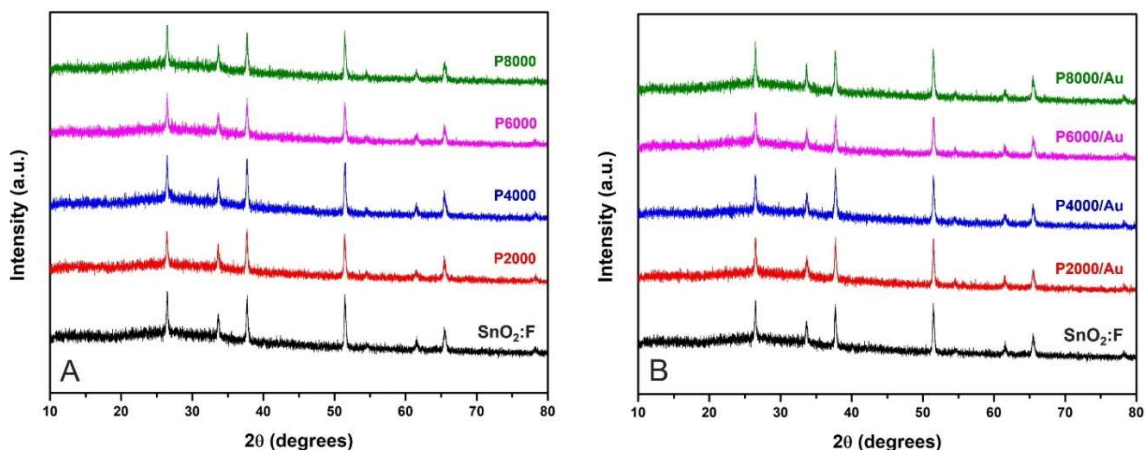
## 2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

เตรียมสารละลาย PEDOT:PSS โดยผสม PEDOT:PSS กับเมทานอล (Methanol) ในอัตราส่วน 1:2 โดยปริมาตร และนำไปผสมให้เข้ากันด้วย Magnetic stirrer เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นทำการเคลือบสารละลาย PEDOT:PSS ลงบนกระจกนำไฟฟ้าดีบุก ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน (SnO<sub>2</sub>:F) ด้วยเครื่องเคลือบผิวแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coater) เป็นเวลา 40 วินาที ด้วยความเร็ว 2000, 4000, 6000 และ 8000 รอบต่อนาที กำหนดชื่อตัวอย่างฟิล์มเป็น P2000, P4000, P6000 และ P8000 ตามลำดับ นำฟิล์มไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นนำฟิล์ม PEDOT:PSS แต่ละเงื่อนไขที่เตรียมได้ไปทำการเคลือบด้วยชั้นทองคำ (Au) โดยใช้เครื่อง Ion Sputter Coater ด้วยความหนา 5 นาโนเมตร เพื่อสร้างฟิล์มสองชั้น PEDOT:PSS/Au กำหนดชื่อตัวอย่างฟิล์มเป็น P2000/Au, P4000/Au, P6000/Au และ P8000/Au

ศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์ม PEDOT:PSS และ PEDOT:PSS/Au ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer: XRD) โดยวัดมุมตั้งแต่ 10 องศา ถึง 80 องศา ศึกษาหมู่ฟังก์ชันเคมีเชิงพื้นผิว โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR) (สุชีวัน และคณะ, 2567) ในโหมดการส่งผ่าน (Transmittance) ซึ่งทำการวัดในช่วงเลขคลื่น 4000 – 450 เซนติเมตร<sup>-1</sup> ศึกษาการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer) ในช่วงความยาวคลื่น 250 – 800 นาโนเมตร และความละเอียดของความยาวคลื่น 1 นาโนเมตร ศึกษาคุณสมบัติของหยดน้ำบนฟิล์มด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัส โดยหยดน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 50 ไมโครลิตร ลงบนผิวฟิล์มและบันทึกค่ามุมสัมผัส

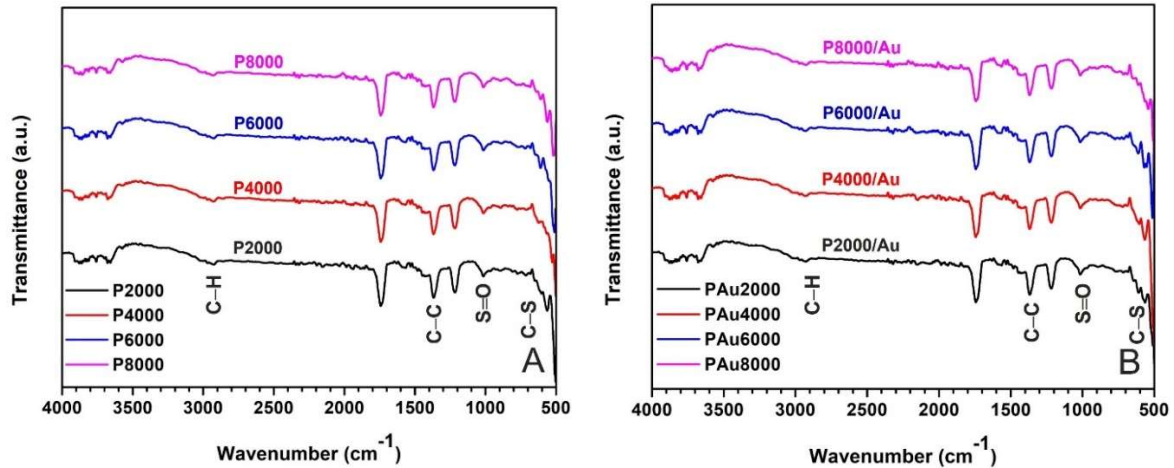
## 3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์ม PEDOT:PSS และ PEDOT:PSS/Au ด้วยเครื่อง XRD ดังภาพที่ 1 พิกัดหลักที่ตรวจพบคือ พิกัดของ SnO<sub>2</sub>:F ที่มุม 2θ ประมาณ 26.5, 33.6, 37.8, 51.5, 61.6 และ 65.6 องศา ทั้งฟิล์ม PEDOT:PSS และ PEDOT:PSS/Au โดยไม่พบพิกัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ PEDOT:PSS ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการก่อตัวของฟิล์ม PEDOT:PSS มีลักษณะแบบอสัณฐาน (Amorphous) (Sujinnapram et al., 2023) และไม่พบพิกัดของ Au ณ มุม 2θ ประมาณ 38.1 องศา (Karoutsos et al., 2012) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากฟิล์ม Au มีความบางเกินขีดจำกัดของ XRD หรืออาจถูกบดบังด้วยพิกัดที่เข้มกว่าที่มุม 37.8 องศา ซึ่งเป็นผลมาจาก SnO<sub>2</sub>:F



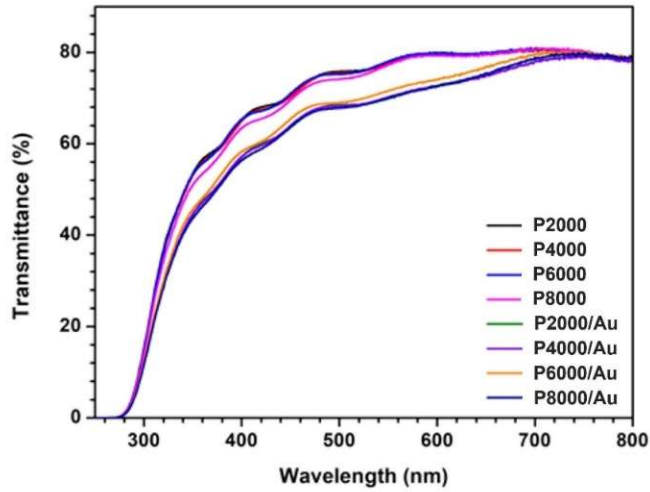
ภาพที่ 1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์ม (A) PEDOT:PSS และ (B) PEDOT:PSS/Au

ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์ม PEDOT:PSS และ PEDOT:PSS/Au โดยใช้เทคนิค FTIR ในโหมดการส่งผ่าน (Transmittance) ที่วัดในช่วงเลขคลื่น 4000 - 450 เซนติเมตร<sup>-1</sup> เพื่อเปรียบเทียบการพบการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน ดังภาพที่ 2 โดยปรากฏพีก ดังนี้ คือเลขคลื่น 679 - 719 เซนติเมตร<sup>-1</sup> และเลขคลื่น 1370 เซนติเมตร<sup>-1</sup> แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันของ C-S (Susanti et al., 2018) และ C-C ซึ่งสอดคล้องกับพันธะที่แสดงหมู่ฟังก์ชันของ PEDOT เลขคลื่นที่ 1014 เซนติเมตร<sup>-1</sup> เป็นพีกที่แสดงหมู่ฟังก์ชันของ S=O ซึ่งสอดคล้องกับพันธะที่แสดงหมู่ฟังก์ชันของ PSS (Sujinnapram et al., 2023) และเลขคลื่นช่วง 2926 - 2933 เซนติเมตร<sup>-1</sup> เป็นพีกที่แสดงหมู่ฟังก์ชันของ C-H ซึ่งสอดคล้องกับหมู่ฟังก์ชันของ Methanol



ภาพที่ 2 รูปแบบสเปกตรัม FTIR ของฟิล์ม (A) PEDOT:PSS และ (B) PEDOT:PSS/Au

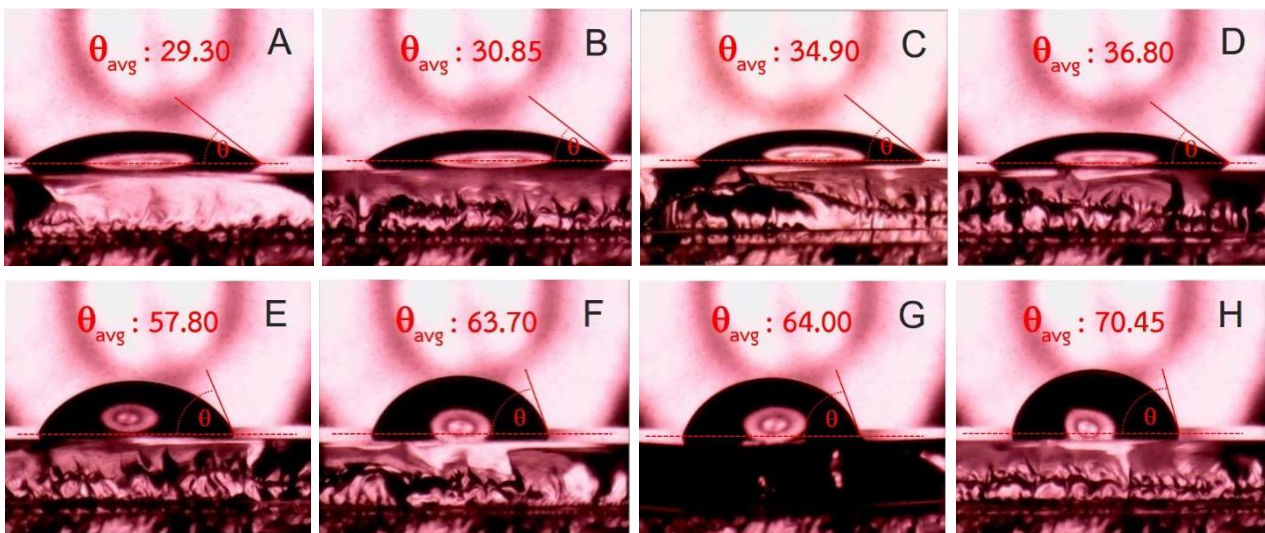
เมื่อตรวจสอบการส่งผ่านแสงของฟิล์ม PEDOT:PSS และ PEDOT:PSS/Au ด้วย UV-Vis Spectrophotometer โดยทำการวัดค่าการส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 250 - 800 นาโนเมตร แสดงดังภาพที่ 3 ซึ่งพบว่าสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์ม PEDOT:PSS/Au มีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์ม PEDOT:PSS สอดคล้องกับค่าเฉลี่ยการส่งผ่านแสงในย่านแสงขาวในช่วงความยาวคลื่น 400 - 700 นาโนเมตร (Phattum et al., 2019; Moungsrijun and Wongrekdee, 2022) ดังตารางที่ 1 เนื่องจากการเคลือบชั้น Au ส่งผลให้เกิดการบดบังการส่งผ่านแสงของฟิล์ม PEDOT:PSS/Au เมื่อทดสอบมุมสัมผัส ( $\theta$ ) ระหว่างพื้นผิวฟิล์มและหยดน้ำ ดังภาพที่ 4 พร้อมวัดค่ามุมสัมผัสเฉลี่ย ( $\theta_{avg}$ ) (ตารางที่ 1) พบว่ามุมสัมผัสของฟิล์ม PEDOT:PSS และ PEDOT:PSS/Au มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราเร็วในการหมุนเหวี่ยงเพิ่มขึ้นจาก 2,000 รอบต่ออนาที ไปเป็น 8,000 รอบต่ออนาที ซึ่งอาจเป็นผลมาจากชั้นฟิล์ม PEDOT:PSS บางลงในกระบวนการเคลือบผิวแบบหมุนเหวี่ยงด้วยอัตราเร็วในการหมุนเหวี่ยงสูงส่งผลให้โมเลกุล PEDOT:PSS มีปริมาณลดลงส่งผลต่อการยึดเกาะของน้ำลดลง และเมื่อพิจารณาฟิล์ม PEDOT:PSS/Au พบว่ามีค่ามุมสัมผัสสูงกว่าฟิล์ม PEDOT:PSS ประมาณสองเท่า โดยมุมสัมผัสของตัวอย่าง P2000/Au, P4000/Au, P6000/Au และ P8000/Au มีมุมสัมผัสเพิ่มขึ้นร้อยละ 97.27, 106.48, 83.39 และ 91.44 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับฟิล์มที่เตรียมด้วยอัตราเร็วในการหมุนเหวี่ยงเท่ากันที่ไม่มีการเคลือบด้วย Au แสดงให้เห็นว่าการเคลือบด้วย Au ส่งผลให้มุมสัมผัสเพิ่มขึ้น ดังนั้นการเคลือบพื้นผิวด้วยชั้น Au ส่งผลให้การดูดซับน้ำที่พื้นผิวของฟิล์มลดลง ซึ่งส่งผลให้ฟิล์ม PEDOT:PSS/Au มีการยึดเกาะกับหยดน้ำได้น้อยกว่า PEDOT:PSS และอาจส่งผลให้ฟิล์ม PEDOT:PSS/Au เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากการทำปฏิกิริยากับน้ำลดลงอันจะทำให้ฟิล์ม PEDOT:PSS/Au มีเสถียรภาพมากขึ้น (Wongrekdee et al., 2021) เมื่อนำไปใช้ในสภาวะที่มีความชื้น เช่น เซนเซอร์ตรวจจับก๊าซ หน้าจอสัมผัส เซลล์แสงอาทิตย์ และอุปกรณ์สวมใส่อัจฉริยะ อย่างไรก็ตามการนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ นั้นอาจต้องพิจารณาสมบัติของฟิล์มที่เหมาะสม เช่น การส่งผ่านแสง หรือความหนาของชั้น Au หรือโลหะอื่น ๆ รวมทั้งชนิดของแผ่นรองรับที่เหมาะสม เป็นต้น



ภาพที่ 3 รูปแบบสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์ม PEDOT:PSS และ PEDOT:PSS/Au

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยการส่งผ่านแสงและมุมสัมผัสของฟิล์ม

ฟิล์ม	ค่าการส่งผ่านแสง (%)	มุมสัมผัส (องศา)
P2000	76.24 ± 4.31	29.30 ± 0.71
P4000	76.08 ± 4.44	30.85 ± 0.49
P6000	76.25 ± 4.50	34.90 ± 0.28
P8000	75.39 ± 4.97	36.80 ± 0.28
P2000/Au	69.65 ± 5.31	57.80 ± 0.42
P4000/Au	69.66 ± 5.29	63.70 ± 0.71
P6000/Au	71.01 ± 5.57	64.00 ± 0.56
P8000/Au	69.54 ± 5.70	70.45 ± 0.49



ภาพที่ 4 ภาพหยดน้ำ DI บนแผ่นฟิล์มตัวอย่าง (A) P2000, (B) P4000, (C) P6000, (D) P8000, (E) P2000/Au, (F) P4000/Au, (G) P6000/Au และ (H) P8000/Au

#### 4. บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์ม PEDOT:PSS และ PEDOT:PSS/Au บนแผ่นรองรับนำไฟฟ้าชนิดดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนด้วยวิธีการเคลือบผิวแบบหมุนเหวี่ยง เมื่อศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบเพียงพีคของดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน แต่เมื่อศึกษาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มโดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม สเปกโทรสโคปี พบการสั่นของหมู่ฟังก์ชันที่สอดคล้องกับ PEDOT และ PSS ทำให้สามารถยืนยันโครงสร้างของฟิล์ม PEDOT:PSS ได้ การศึกษาค่าการส่งผ่านแสงโดยใช้เทคนิคอัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิล สเปกโทรสโคปี พบว่าค่าการส่งผ่านแสงมีแนวโน้มลดลงในฟิล์ม PEDOT:PSS/Au เมื่อเทียบกับฟิล์ม PEDOT:PSS ซึ่งเป็นผลมาจากชั้นฟิล์มทองคำ เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของฟิล์มพบว่ามีความไวต่อแสงเพิ่มขึ้นตามความเร็วในการเคลือบผิวแบบหมุนเหวี่ยง ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อเคลือบทับด้วยทองคำให้เป็นฟิล์ม PEDOT:PSS/Au จึงส่งผลให้คุณสมบัติการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน แสดงถึงสมบัติการดูดกลืนแสงที่ดียิ่งขึ้น

#### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ศูนย์วิจัย ส่งเสริม และถ่ายทอดเทคโนโลยี คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน สำหรับความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี และศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม สำหรับความอนุเคราะห์ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

#### เอกสารอ้างอิง

- สุชีวัน กรอบทอง, ศุภเดช สุจินพรัหม, ศติมลลล ม่วงศรีจันทร์, และสุทธิพนัง วงศ์ฤกษ์ดี. (2567). การสังเคราะห์ฟิล์มดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีสำหรับ การประยุกต์เชิงโฟโตนิกส์. *คทา : ศิลปศาสตร์ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 1(1), 12-22.
- Janthajam, N., Hsu, S.H., & Boonrung, S. (2024). Study of Electrochromic Properties of PEDOT:PSS for Tunable Filter Optics with Lithium Salt Electrolyte. *Science and Innovation of Advanced Materials*, 4(1), 67003.
- Karoutsos, V., Toudas, M., Delimitis, A., Grammatikopoulos, S., & Pouloupoulos, P. (2012). Microstructural evolution in nanostructured gold films. *Thin Solid Films*, 520(11), 4074-4079. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2012.01.010>
- Khasim, S., Pasha, A., Badi, N., Lakshmi, M., & Mishra, Y.K. (2020). High performance flexible supercapacitors based on secondary doped PEDOT–PSS–graphene nanocomposite films for large area solid state devices. *RSC Advances*, 10(18), 10526-10539. <https://doi.org/10.1039/D0RA01116A>
- Krobthong, S., Wongrerkeedee, S., Wongrerkeedee, S., Lohawet, K., Kaewprajak, A., & Kumnorkaew, P. (2023). Modification of PEDOT:PSS films using ZnI<sub>2</sub> 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>
- Lingstedt, L.V., Ghittorelli, M., Lu, H., Koutsouras, D.A., Marszalek, T., Torricelli, F., Craciun, N.I., Gkoupidenis, P., & Blom, P.W.M. (2019). Effect of DMSO Solvent Treatments on the Performance of PEDOT:PSS Based Organic Electrochemical Transistors. *Advanced Electronic Materials*, 5(3), 1800804. <https://doi.org/10.1002/aelm.201800804>
- Moungsrijun, S., & Wongrerkeedee, 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.

- Phattum, S., Pimpang, P., Wongrerkdee, S., Lohawet, K., Kaewprajak, A., Kumnorkaew, P., Sujinnapram, S., Moungrsrijun, S., Krobthong, S., & Wongrerkdee, S. (2019). Interfacial improvement of hole transporting layer using graphene quantum dots for efficiency enhancement of organic photovoltaics. *Interdisciplinary Research Review*, 14(6), 57-61. <https://doi.org/10.14456/jtir.2019.59>
- Punla, R., Intaniwet, A., Choopun, S., & Ruankham, P. (2020). Using Cu<sub>2</sub>O CuO and PEDOT: PSS hole transporting double layers for develop perovskite solar cells. *Life Sciences and Environment Journal*, 21(2), 374–384.
- Sujinnapram, S., Wongrerkdee, S., Lohawet, K., Krobthong, S., Moungrsrijun, 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>
- Susanti, E., Wulandari, P., & Herman. (2018). Effect of localized surface plasmon resonance from incorporated gold nanoparticles in PEDOT:PSS hole transport layer for hybrid solar cell applications. *Journal of Physics Conference Series*, 1080, 012010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1080/1/012010>
- Wang, X., Feng, G.Y., & Ge, M.G. (2017). Influence of ethylene glycol vapor annealing on structure and property of wet-spun PVA/PEDOT:PSS blend fiber. *Journal of Materials Science*, 52(12), 6917–6927. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-0756-8>
- 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>