

การเตรียมแกรฟีน/พอลิ(3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน):พอลิสไตรีนซัลโฟนิกแอซิดนำไฟฟ้า



นางสาวบรรณพรพรรณ เอียดแก้ว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF CONDUCTIVE GRAPHENE/
POLY(3,4-ETHYLENEDIOXYTHIOPHENE):POLY(STYRENE SULFONIC ACID)

Miss Bantarawan Aeadkaw



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Petrochemistry and Polymer Science
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2015
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมแกรไฟีน/พอลิ(3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน):พอลิไธรีนซัลโฟนิคแอซิดนำไฟฟ้า
โดย	นางสาวบรรณทรรณ เอียดแก้ว
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวรรณ พันธุมนาวิน
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวงนิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวรรณ พันธุมนาวิน)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาภรณ์ นพคุณดิลกรัตน์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.สมบุญ สหสิทธิวัฒน์)

บรรณทรวรรณ เอียดแก้ว : การเตรียมแกรฟีน/พอลิ(3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน):พอลิสไตรีนซัลโฟนิค แอซิด นำไฟฟ้า (PREPARATION OF CONDUCTIVE GRAPHENE/POLY(3,4-ETHYLENEDIOXYTHIOPHENE):POLY(STYRENE SULFONIC ACID)) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.วรวรรณ พันธุมนาวิน, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง, 105 หน้า.

พอลิ(3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน):พอลิสไตรีนซัลโฟนิคแอซิด/แกรฟีนนำไฟฟ้า สำหรับการประยุกต์ใช้ในการทำหมึกนำไฟฟ้า เตรียมได้จากวิธีการอินซิทูพอลิเมอไรเซชัน โดยแกรฟีนถูกทำให้กระจายตัวได้ดีในสารละลายของพอลิสไตรีนซัลโฟนิคแอซิดและโซเดียมโตนเดซิลซัลเฟต การสังเคราะห์พอลิเมอร์ทำได้โดยการเติม 3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีนมอนอเมอร์ เข้าไปในสารละลายที่มีแกรฟีนกระจายตัวอยู่ โดยปริมาณของแกรฟีน, โซเดียมโตนเดซิลซัลเฟตและเอทิลีนโกลคอลลูกปรับให้เหมาะสมเพื่อให้มีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงขึ้น ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิ(3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน):พอลิสไตรีนซัลโฟนิคแอซิด/แกรฟีน/โซเดียมโตนเดซิลซัลเฟตที่เติมโซเดียมโตนเดซิลซัลเฟต 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากฟิล์มพอลิ(3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน):พอลิสไตรีนซัลโฟนิคแอซิด ที่ไม่เติมแกรฟีนและไม่เติมโซเดียมโตนเดซิลซัลเฟตจาก 18.72 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตรเป็นประมาณ 60.12 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิ(3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน):พอลิสไตรีนซัลโฟนิคแอซิด/แกรฟีน/โซเดียมโตนเดซิลซัลเฟต/เอทิลีนโกลคอลล ที่เติมเอทิลีนโกลคอลล 28.57 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุดอยู่ที่ 1030.49 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ศึกษาผลของการเติมโซเดียมโตนเดซิลซัลเฟตและเอทิลีนโกลคอลลที่มีต่อลักษณะสัณฐานวิทยาและความสามารถในการนำไฟฟ้า สำหรับสารละลายพอลิ(3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน):พอลิสไตรีนซัลโฟนิคแอซิดที่มีแกรฟีนกระจายตัวอยู่ถูกเตรียมด้วยโซเดียมโตนเดซิลซัลเฟตและเอทิลีนโกลคอลลที่ความเข้มข้นแตกต่างกันทำให้ได้ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่มีลักษณะสัณฐานวิทยาและมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่หลากหลายแตกต่างกันไป ในงานวิจัยนี้ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด, จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านและจุลทรรศน์แรงอะตอม

สาขาวิชา ปีโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5572023123 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS: CONDUCTIVE POLYMER / GRAPHENE / PEDOT:PSS

BANTARAWAN AADKAW: PREPARATION OF CONDUCTIVE GRAPHENE/POLY(3,4-ETHYLENEDIOXYTHIOPHENE):POLY(STYRENE SULFONIC ACID). ADVISOR: ASST. PROF. WORAWAN BHANTHUMNAVIN, Ph. D. , CO- ADVISOR: ASST. PROF. BOONCHOAT PAOSAWATYANYONG, Ph.D., 105 pp.

Conductive poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonic acid)/graphene (PEDOT:PSS/graphene) dispersed solutions have been prepared by *in situ* polymerization with their potential applications as conductive ink. Graphene was dispersed in a solution of poly(styrene sulfonic acid) (PSS) and sodium dodecyl sulfate (SDS). The polymerization was directly carried out by addition of 3,4-ethylenedioxythiophene (EDOT) monomer to the dispersed solution of graphene. The content of graphene and the concentrations of sodium dodecyl sulfate and ethylene glycol (EG) were optimized and varied to give the highest electrical conductivity. At optimal conditions, The PEDOT:PSS/graphene/SDS composite films, SDS 2.0 wt.% have been found to enhance the electrical conductivity of pristine PEDOT:PSS films from 18.72 S/cm up to approximately 60.12 S/cm, compared with the highest electrical conductivity for the PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG composite films, EG 28.57 wt.% of 1030.49 S/cm. The effects of the additives on the morphology, the dispersion and the electrical conductivity of the PEDOT:PSS/graphene composite films have been investigated. The PEDOT:PSS/graphene dispersed solutions were prepared with different concentrations of SDS and EG to induce variations on the morphology and the electrical properties of the PEDOT:PSS/graphene composite films. The morphology studies were investigated by scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM) and atomic force microscopy (AFM).

Field of Study: Petrochemistry and
Polymer Science

Academic Year: 2015

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จขึ้นได้เนื่องด้วยความกรุณาเป็นอย่างยิ่งจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวรรณ พันธุนาวิน และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณที่ให้ความรู้ ความใส่ใจ คำแนะนำตรวจทาน ไปจนถึงแนวทางในการแก้ปัญหาสำหรับงานวิจัยในทุกขั้นตอน ตลอดจนความช่วยเหลือด้านต่างๆจนกระทั่งงานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและขอขอบคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบและเครื่องมือวิเคราะห์ รวมถึงบุคลากรทุกท่านที่ ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ

ขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาภรณ์ นพคุณดิถรัตน์ และ ดร.สมบุญ สหสิทธิวัฒน์ ที่ให้ความกรุณาเป็นอย่างยิ่งใน การเป็นคณะกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงการให้คำแนะนำต่างๆ ตลอดจนข้อคิดที่เป็นประโยชน์ เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องและทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ท้ายที่สุดขอขอบคุณบิดา มารดา ผู้อยู่เบื้องหลังความสำเร็จ ที่คอยให้การสนับสนุน คอยให้กำลังใจและเอาใจใส่ รวมถึงสมาชิกห้องปฏิบัติการพลาสมาและผู้มีอุปการะคุณท่านอื่นๆที่ไม่ได้กล่าวนามในที่นี้ที่มีส่วนทำให้งานวิจัยสำเร็จได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	4
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 การแบ่งประเภทของวัสดุตามความสามารถในการนำไฟฟ้า	5
2.1.1 โครงสร้างแถบพลังงานในของแข็ง	6
2.2 พอลิเมอร์นำไฟฟ้า.....	9
2.2.1 π -Conjugated liner polymers.....	10
2.2.2 Narrow band-gap polymers	11
2.2.3 π -Conjugated liner oligomers	11
2.2.4 Nonconjugated polymers containing pendant π -electron systems.....	12
2.2.5 กลไกการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า.....	12
2.2.6 การกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุ (doping)	16

2.2.7 พอลิ(3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน) (poly(3,4-ethylenedioxythiophene), PEDOT) และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
2.2.7.1 พอลิ(3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน):พอลิสไตรีนซัลโฟนิคแอซิด (poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonic acid), PEDOT:PSS)	21
2.3 แกรฟีน (graphene).....	27
2.3.1 โครงสร้างของแกรฟีน	28
2.3.2 การสังเคราะห์แกรฟีน	28
2.3.2.1 Mechanical cleavage method.....	28
2.3.2.2 Chemical exfoliation	29
2.3.2.2 Mechanical exfoliation	29
2.3.2.2 Chemical Vapor Deposition, CVD	29
2.3.3 การประยุกต์ใช้งานแกรฟีน	31
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	32
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	33
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	33
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานและวิธีการทดลอง.....	34
3.3.1 การเตรียมพอลิ(3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน):พอลิสไตรีนซัลโฟนิคแอซิด (PEDOT:PSS)	34
3.3.2 การเตรียมพอลิ(3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน):พอลิสไตรีนซัลโฟนิคแอซิด/แกรฟีน/โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (PEDOT:PSS/graphene/SDS).....	34
3.3.2.1 การเตรียม PEDOT:PSS/graphene/SDS ด้วยวิธี mixing.....	35
3.3.2.2 การเตรียม PEDOT:PSS/graphene/SDS ด้วยวิธี in situ	36

3.3.3 การเตรียมพอลิ(3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน):พอลิไสไตรนซัลโฟนิกแอซิด/แกรฟีน/ โซเดียมโตะเดซิลซัลเฟต/เอทิลีนไกลคอล (PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG).....	37
3.4 การตรวจสอบสมบัติต่างๆ	39
3.4.1 ศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคแอทเทนนูเอเทดโททัลรีเฟล็กชันฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy, ATR-FTIR)	39
3.4.2 ศึกษาสัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีน	40
3.4.2.1 เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM).....	40
3.4.2.2 เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy, TEM)	40
3.4.2.3 เทคนิคจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy, AFM).....	40
3.4.3 ศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้า	41
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	44
4.1 การเตรียมพอลิ(3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน):พอลิไสไตรนซัลโฟนิกแอซิด/แกรฟีน/ โซเดียมโตะเดซิลซัลเฟต (PEDOT:PSS/graphene/SDS)	44
4.1.1 การปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของแกรฟีน.....	45
4.1.2 การปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของโซเดียมโตะเดซิลซัลเฟต.....	46
4.1.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคแอทเทนนูเอเทดโททัลรีเฟล็กชันฟูเรียร์ทรานส์ ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy, ATR-FTIR).....	46
4.1.4 การศึกษาสัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนในฟิล์มวัสดุเชิง ประกอบ	50
4.1.4.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบด้วยเทคนิคจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)	51

4.1.4.2 การศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ	54
4.1.4.2.1 เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy, TEM)	54
4.1.4.2.2 เทคนิคจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy, AFM).....	57
4.1.5 ผลของวิธีการเตรียมที่มีต่อการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนและความสามารถในการนำไฟฟ้า.....	61
4.1.6 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมโตนเดซิลซัลเฟตที่มีต่อการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนและความสามารถในการนำไฟฟ้า.....	64
4.2 การเตรียมพอลิ(3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอเฟน):พอลิไสไตรีนซัลโฟนิคแอซิด/แกรฟีน/โซเดียมโตนเดซิลซัลเฟตที่ผสมเอทิลีนไกลคอล (PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG)	66
4.2.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคแอทเทนนูเอตโททัลรีเฟลคชันฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy, ATR-FTIR).....	67
4.2.2 ผลของเอทิลีนไกลคอลที่มีต่อความสามารถในการนำไฟฟ้า.....	69
4.3 ผลของการปรับปรุงความสามารถในการนำไฟฟ้าด้วยโซเดียมโตนเดซิลซัลเฟตและเอทิลีนไกลคอล.....	74
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	77
5.1 สรุปผลการทดลอง	77
5.2 ข้อเสนอแนะ	78
รายการอ้างอิง	79
ภาคผนวก.....	85
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	105

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่า band gap และ conductivity ของพอลิเมอร์บางชนิด	19
ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างสารโคพอลิเมอร์สำหรับ PEDOT:PSS	26
ตารางที่ 4.1 ตำแหน่งของพีคที่พบในสเปกตรัมของฟิล์ม PEDOT:PSS, ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene และ PEDOT:PSS/graphene/SDS.....	49
ตารางที่ 4.2 ตำแหน่งของพีคที่พบในสเปกตรัมของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/ SDS/EG.....	68
ตารางที่ 4.3 ค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์ม PEDOT:PSS และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/ graphene/SDS	75
ตารางที่ 4.4 ค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG	76

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุบางชนิดที่อุณหภูมิห้อง	5
รูปที่ 2.2 แถบพลังงานในวัสดุตัวนำไฟฟ้า เช่น ทองแดง	6
รูปที่ 2.3 แถบพลังงานในวัสดุตัวนำไฟฟ้า เช่น แมกนีเซียม.....	7
รูปที่ 2.4 แถบพลังงานในวัสดุที่เป็นฉนวน.....	7
รูปที่ 2.5 แถบพลังงานในวัสดุกึ่งตัวนำไฟฟ้า	8
รูปที่ 2.6 ระดับชั้นพลังงานที่อิเล็กตรอนอยู่ในวัสดุโลหะ (ก) ก่อนถูกกระตุ้นและ (ข) หลังถูกกระตุ้น.....	8
รูปที่ 2.7 ระดับชั้นพลังงานที่อิเล็กตรอนอยู่ในวัสดุฉนวนและวัสดุกึ่งตัวนำไฟฟ้า (ก) ก่อนถูกกระตุ้นและ (ข) หลังถูกกระตุ้น.....	9
รูปที่ 2.8 โครงสร้างของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า	9
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีโครงสร้างแบบ π -conjugated liner polymers	10
รูปที่ 2.10 ตัวอย่างของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีโครงสร้างแบบ narrow band-gap polymers	11
รูปที่ 2.11 ตัวอย่างของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีโครงสร้างแบบ π -conjugated liner oligomers.....	11
รูปที่ 2.12 ตัวอย่างของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีโครงสร้างแบบ nonconjugated polymers containing pendant π -electron systems	12
รูปที่ 2.13 energy gap ของวัสดุประเภทต่างๆ (ก) โลหะ (ข) ฉนวนและ (ค) วัสดุกึ่งตัวนำไฟฟ้า... 13	13
รูปที่ 2.14 กลไกการเกิด polaron, bipolaron และ double polaron ใน polythiophene	15
รูปที่ 2.15 ระดับพลังงานของ neutral, polaron และ bipolaron ใน polythiophene.....	15
รูปที่ 2.16 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนโดยผ่านกลไกแบบ hopping	16
รูปที่ 2.17 กระบวนการ doping-dedoping ในพอลิเมอร์นำไฟฟ้า.....	17
รูปที่ 2.18 โครงสร้างของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่สำคัญ.....	18
รูปที่ 2.19 โครงสร้างของ PEDOT	18

รูปที่ 2.20 โครงสร้างของ 3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน (3,4-ethylenedioxythiophene, EDOT)	20
รูปที่ 2.21 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ PEDOT โดยใช้ $FeCl_3$ เป็นตัวออกซิไดซ์	20
รูปที่ 2.22 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ PEDOT:PSS โดยใช้ $Na_2S_2O_8$ เป็นตัวออกซิไดซ์	21
รูปที่ 2.23 การแทรกกระหว่างชั้นของแกรฟีนโดย surfactant	24
รูปที่ 2.24 องค์ประกอบพื้นฐานที่ได้จากแกรฟีน (ก) บัคกิ้งบอล (ข) ท่อนาโนคาร์บอน และ (ค) แกรไฟต์	27
รูปที่ 2.25 sp^2 hybridization ของคาร์บอนอะตอมในแกรฟีน	28
รูปที่ 2.26 การสังเคราะห์ graphene oxide และ reduced graphene oxide จาก graphite	30
รูปที่ 2.27 การเปิดวงอีพอกไซด์ (epoxide) ด้วย hydrazine	30
รูปที่ 3.1 แผนภูมิลำดับขั้นตอนการเตรียม PEDOT:PSS.....	34
รูปที่ 3.2 แผนภูมิลำดับขั้นตอนการเตรียม PEDOT:PSS/graphene/SDS ด้วยวิธี mixing.....	35
รูปที่ 3.3 แผนภูมิลำดับขั้นตอนการเตรียม PEDOT:PSS/graphene/SDS ด้วยวิธี in situ.....	36
รูปที่ 3.4 แผนภูมิลำดับขั้นตอนการเตรียม PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG	37
รูปที่ 3.5 PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG ที่เตรียมได้.....	38
รูปที่ 3.6 การเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (ก) ก่อนเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงและ (ข) หลังจากการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงเสร็จสิ้นแล้ว	38
รูปที่ 3.7 फिल्मวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG ที่เตรียมได้	38
รูปที่ 3.8 เครื่องแอทเทนนูเอตโททรีเฟลกชันฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (ATR-FTIR รุ่น Nicolet iS10).....	39
รูปที่ 3.9 แสดงขนาดของฟิล์มยาว l กว้าง w หนา d	42
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลของปริมาณที่แตกต่างกันของแกรฟีน ต่อค่าความต้านทานแผ่น (sheet resistance).....	45
รูปที่ 4.2 ATR-FTIR สเปกตรัมของ SDS.....	47

รูปที่ 4.3 ATR-FTIR สเปกตรัมของฟิล์ม PEDOT:PSS.....	48
รูปที่ 4.4 ATR-FTIR สเปกตรัมของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene.....	48
รูปที่ 4.5 ATR-FTIR สเปกตรัมของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS	49
รูปที่ 4.6 โครงสร้างของ PEDOT:PSS.....	50
รูปที่ 4.7 โครงสร้างของ SDS.....	50
รูปที่ 4.8 ภาพ SEM ของฟิล์ม PEDOT:PSS.....	51
รูปที่ 4.9 ภาพ SEM ของแกรฟีน	51
รูปที่ 4.10 ภาพ SEM ของ SDS.....	51
รูปที่ 4.11 ภาพ SEM ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี mixing (ก) ไม่เติม SDS และ (ข) 2.0 %wt SDS	52
รูปที่ 4.12 ภาพ SEM ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี In situ (ก) ไม่เติม SDS, (ข) 0.5 %wt SDS, (ค) 1.0 %wt SDS, (ง) 1.5 %wt SDS และ (จ) 2.0 %wt SDS.....	53
รูปที่ 4.13 ภาพ TEM ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี mixing (ก) ไม่เติม SDS และ (ข) 2.0 %wt SDS	54
รูปที่ 4.14 ภาพ TEM ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี In situ (ก) ไม่เติม SDS, (ข) 0.5 %wt SDS, (ค) 1.0 %wt SDS, (ง) 1.5 %wt SDS และ (จ) 2.0 %wt SDS.....	56
รูปที่ 4.15 ภาพ AFM ของฟิล์ม PEDOT:PSS.....	58
รูปที่ 4.16 ภาพ AFM ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี mixing (ก) ไม่เติม SDS, (ข) 0.5 %wt SDS, (ค) 1.0 %wt SDS, (ง) 1.5 %wt SDS และ (จ) 2.0 %wt SDS.....	59
รูปที่ 4.17 ภาพ AFM ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี in situ (ก) ไม่เติม SDS, (ข) 0.5 %wt SDS, (ค) 1.0 %wt SDS, (ง) 1.5 %wt SDS และ (จ) 2.0 %wt SDS.....	60

รูปที่ 4.18	กราฟแสดงค่า Ra ที่ได้จากเทคนิค AFM ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี mixing และวิธี in situ ที่มีความเข้มข้นของ SDS แตกต่างกัน (0.5, 1.0, 1.5, 2.0 %wt).....	61
รูปที่ 4.19	ผลของวิธีการเตรียมที่มีต่อการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ .	63
รูปที่ 4.20	ผลของวิธีการเตรียมที่มีต่อความสามารถในการนำไฟฟ้าของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ	63
รูปที่ 4.21	ผลของความเข้มข้นของโซเดียมโอดีเตอซิลลอปเตที่มีต่อการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีน ในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี in situ.....	65
รูปที่ 4.22	ผลของความเข้มข้นของโซเดียมโอดีเตอซิลลอปเตที่มีต่อความสามารถในการนำไฟฟ้า และค่า Ra ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี in situ.....	66
รูปที่ 4.23	ATR-FTIR สเปกตรัมของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG.....	67
รูปที่ 4.24	กราฟเปรียบเทียบ ATR-FTIR สเปกตรัมของฟิล์ม PEDOT:PSS, ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene, PEDOT:PSS/graphene/SDS และ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG	68
รูปที่ 4.25	ผลของความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอลที่มีต่อความสามารถในการนำไฟฟ้าของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG	69
รูปที่ 4.26	การเกิดพันธะของเอทิลีนไกลคอลกับ PEDOT:PSS	70
รูปที่ 4.27	การแยกวัฏภาคของสายโซ่ PSS ออกจากสายโซ่ของ PEDOT เมื่อเติมเอทิลีนไกลคอล..	70
รูปที่ 4.28	กราฟแสดงค่า Ra ที่ได้จากเทคนิค AFM ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG ที่ความเข้มข้นของ EG แตกต่างกัน	71
รูปที่ 4.29	ภาพ AFM ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG (ก) 16.67 %wt EG, (ข) 28.57 %wt EG, (ค) 37.50 %wt EG, (ง) 44.44 %wt EG และ (จ) 50.00 %wt EG.....	72

รูปที่ 4.30 ผลของความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอลที่มีต่อความสามารถในการนำไฟฟ้า และค่า R_a ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG.....	73
รูปที่ 4.31 การแยกตัวของสายโซ่ PSS ออกจากสายโซ่ของ PEDOT เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิว ที่มีประจุลบ.....	75



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำมาจากวัสดุประเภทพอลิเมอร์นำไฟฟ้า ได้มีการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทต่างๆ เช่น อิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น (flexible electronics) และอิเล็กทรอนิกส์พิมพ์ได้ (printed electronics) ที่สามารถสร้างเป็นวงจรถานซิสเตอร์แบบฟิล์มบาง (thin film transistors) บนฐานรองรับหลากหลายแบบด้วยเทคนิคการพิมพ์โดยใช้หมึกพอลิเมอร์นำไฟฟ้า ซึ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้จะใช้เป็นส่วนประกอบของ แผ่นฟิล์มวงจรถานซิสเตอร์แบบยืดหยุ่น จอสัมผัส แผงเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น [1-5]

พอลิ(3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน) (poly (3,4-ethylenedioxythiophene), PEDOT) เป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิดหนึ่งซึ่งเป็นอนุพันธ์ของพอลิไทโอฟีน (polythiophene) โดยทั่วไปแล้ว PEDOT สามารถสังเคราะห์ได้ด้วยวิธีหลักๆ คือการทำพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเคมีไฟฟ้า (electrochemical polymerization) เป็นการใช้ไฟฟ้าออกซิไดซ์มอนอเมอร์ให้เกิดเป็น radical cations ที่จะเกิดปฏิกิริยาถูกรวมกับมอนอเมอร์ต่อเนื่องจนเป็นสายพอลิเมอร์ โดยมอนอเมอร์ก็คือ 3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน (3,4-ethylenedioxythiophene, EDOT) ส่วนอีกวิธีหนึ่งเป็นการสังเคราะห์ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมี (chemical oxidation polymerization) เป็นการใช้สารเคมีเป็นตัวออกซิไดซ์ ซึ่งข้อดีของการสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้คือ สามารถเตรียมได้ในปริมาณมาก [6] ในปี ค.ศ.1996 Kumar และ Reynolds [7] ได้สังเคราะห์ PEDOT ผ่านปฏิกิริยาเคมี โดยใช้ EDOT เป็นมอนอเมอร์และใช้ $FeCl_3$ เป็นตัวออกซิไดซ์ พบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างมอนอเมอร์ต่อตัวออกซิไดซ์มากกว่าหรือเท่ากับ 5 สามารถสังเคราะห์ PEDOT ได้ และ PEDOT ที่ได้นี้จะไม่สามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์

PEDOT เป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดี มีสมบัติทางกายภาพ และเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่าพอลิเมอร์นำไฟฟ้าตัวอื่นๆ แต่ PEDOT มีข้อจำกัดในการใช้งานคือมีความสามารถในการละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ที่ต่ำ ทำให้กระบวนการขึ้นรูปเป็นฟิล์มนั้นเกิดขึ้นได้ไม่ค่อยดีนัก [8] ข้อจำกัดเรื่องการละลายนี้สามารถแก้ไขได้โดยการใช้สารประเภทพอลิไอเล็กโทรไลต์ร่วมในการขึ้นรูปด้วยเช่น พอลิสไตรีนซัลโฟนิคแอซิด (poly(styrene sulfonic acid), PSS) ซึ่งสามารถละลายน้ำและแตกตัวเป็นพอลิไอออนที่มีประจุลบ ซึ่งช่วยทำให้ประจุบวกของสายโซ่พอลิเมอร์ของ PEDOT มีความสมดุล เกิดเป็น PEDOT:PSS ที่อยู่รวมกันได้ โดยอนุภาค PEDOT กระจายตัวอยู่ในสารละลายของ PSS ทำให้กระบวนการขึ้นรูปเป็น

ฟิล์มนี้ดีขึ้น นอกจากนี้ PEDOT:PSS ยังมีความโปร่งใส (transparency) และมีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูง แต่การเติม PSS เข้าไปนี้ทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าของวัสดุลดลงจึงไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานบางประเภท [9, 10] ตัวอย่างในรายงานของ Jonas และ Morrison ในปี ค.ศ.1997 [11] ซึ่งได้สังเคราะห์ PEDOT ในสารละลายพอลิเอทิลีนไทรโพลด์ของ PSS โดยใช้ potassium persulfate ($K_2S_2O_8$) เป็นตัวออกซิไดซ์ และให้ปฏิกิริยาดำเนินไปที่อุณหภูมิห้อง พบว่าเกิด PEDOT:PSS ที่กระจายตัวอยู่ในสารละลายซึ่งมีสีน้ำเงินเข้ม สามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ แต่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ลดลง

โดยทั่วไปแนวทางในการปรับปรุงความสามารถในการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS สามารถทำได้โดยการผสมสารเติมแต่งที่มีสมบัติการนำไฟฟ้า [12-14] เช่น ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (multi-wall carbon nanotube, MWCNT) ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (single wall carbon nanotube, SWCNT) [12] และแกรฟีน (graphene) [13, 14] เป็นต้น แต่สารเติมแต่งเหล่านี้มีข้อจำกัดเรื่องของการกระจายตัวใน PEDOT:PSS [12, 13] อีกแนวทางหนึ่งในการปรับปรุงความสามารถในการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS คือ การผสมสารโดปทุติยภูมิ (secondary dopant) [10, 15-23] ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่นิยม เนื่องจากสามารถเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS ได้หลายเท่าและเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยาก สารโดปทุติยภูมิมักมีด้วยกันหลายชนิด เช่น ethylene glycol (EG) [17-20], dimethyl sulfoxide (DMSO) [21-23], dimethylformamide (DMF) [22] และ tetrahydrofuran (THF) [22] เป็นต้น

ในปี ค.ศ. 2011 Kishi และคณะ [12] ได้เตรียมฟิล์มที่เกิดจากการผสม PEDOT:PSS กับท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (SWCNT) โดยนำสารที่ผสมแล้วไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (spin coating) และวัดค่าความต้านทานแผ่น (sheet resistance) พบว่าค่าความต้านทานแผ่นลดลง แสดงให้เห็นว่าการผสมท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (SWCNT) สามารถปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS ให้ดีขึ้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำแกรฟีนซึ่งเป็นอีกรูปหนึ่งของคาร์บอน เช่นเดียวกับท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (SWCNT) มาใช้เป็นสารเติมแต่ง โดยแกรฟีนเป็นวัสดุนำไฟฟ้าที่ประกอบด้วยชั้นของคาร์บอนอะตอมที่หนาเพียง 1 ชั้น มีลักษณะเป็นแผ่นที่มีโครงสร้าง 2 มิติเหมือนตาข่ายรูปหกเหลี่ยมคล้ายรังผึ้ง (hexagonal configuration) โดยมีความหนาเท่ากับความหนาของคาร์บอนเพียงอะตอมเดียว หรือประมาณ 0.34 นาโนเมตร และมีระยะห่างระหว่างอะตอมคาร์บอน 0.142 นาโนเมตร แกรฟีนมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่สูง และมีสัดส่วนพื้นที่ต่อน้ำหนักเท่ากับ $2,630 \text{ m}^2/\text{g}$ ซึ่งมากกว่าท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (SWCNT) ถึงสองเท่า [13, 14]

ในปี ค.ศ. 2011 Alvi และคณะ [14] ได้เตรียมอนุภาคนำไฟฟ้าของ PEDOT โดยผสมอนุภาคแกรฟีน ในอัตราส่วนของแกรฟีนต่อมอนอเมอร์เป็น 1:1 โดยน้ำหนัก และใช้ ammonium

persulfate ($(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$) ร่วมกับ iron (III) chloride (FeCl_3) เป็นสารออกซิไดซ์ พบว่าอนุภาคนำไฟฟ้าผสมของแกรฟีนกับ PEDOT มีประสิทธิภาพทางเคมีไฟฟ้า (electrochemical performance) และมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น สำหรับการผสมอนุภาคแกรฟีนใน PEDOT:PSS นั้น พบว่าการเติมแกรฟีนสามารถปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าให้เพิ่มขึ้นได้เช่นกัน โดยในปี ค.ศ. 2008 Hong และคณะ [13] ได้เตรียมฟิล์มที่เกิดจากการผสมอนุภาคแกรฟีน 1 %wt ใน PEDOT:PSS แล้วนำสารผสมนี้ไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มบนแผ่นรองรับที่เป็น indium tin oxide (ITO) พบว่าได้ฟิล์มบางที่มีความโปร่งแสงและมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูง จากงานวิจัยนี้ที่มีการผสมอนุภาคแกรฟีนใน PEDOT:PSS แม้มีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงแต่ก็มีจำกัดในเรื่องของการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะผสมอนุภาคแกรฟีนลงไปในช่วงตอนของการสังเคราะห์ PEDOT:PSS และทำการเติมสารลดแรงตึงผิวเพื่อช่วยให้การกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนดีขึ้น

ในปี ค.ศ. 2009 Fan และคณะ [24] ได้ศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวชนิดต่างๆ ที่มีต่อความสามารถในการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS พบว่า สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (anionic surfactant) ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (nonionic surfactant) และสารลดแรงตึงผิวมีประจุบวก (cationic surfactant) นั้นไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าการนำไฟฟ้า และเมื่อเพิ่มปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (sodium dodecyl sulfate, SDS) ใน PEDOT:PSS พบว่าค่าการนำไฟฟ้าจะเพิ่มมากขึ้นจนถึงจุดๆ หนึ่ง ต่อมาในปี ค.ศ.2013 Sukchol และคณะ [25] ได้ศึกษาผลของขั้นตอนการเติมสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ SDS ที่มีต่อความสามารถในการนำไฟฟ้าของสารละลาย PEDOT:PSS พบว่า การเติม SDS ในขั้นตอนการสังเคราะห์ PEDOT:PSS ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าการเติม SDS หลังจากการสังเคราะห์ PEDOT:PSS จากงานวิจัยของ Fan และคณะ [24] และงานวิจัยของ Sukchol และคณะ [25] จะเห็นได้ว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบในปริมาณที่เหมาะสม และการเติมสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบในขั้นตอนการสังเคราะห์ PEDOT:PSS ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น

นอกจากนี้แนวทางในการปรับปรุงความสามารถในการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS อีกแนวทางหนึ่งคือ การเติมสารโดปทุติยภูมิ (secondary dopant) ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ในปี ค.ศ. 2005 Ashizawa และคณะ [15] ได้ศึกษาผลของตัวทำละลายชนิดต่างๆ ได้แก่ น้ำ, ethylene glycol, ethanol, isopropanol และ acetonitrile ที่มีต่อความสามารถในการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS พบว่า ethylene glycol ให้ค่าความต้านทานแผ่น (sheet resistance) น้อยที่สุดและมีค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุดที่ 20 %wt โดยความสามารถในการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นประมาณ 230 เท่า

จากข้อมูลเบื้องต้นดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะเตรียม PEDOT:PSS โดยการผสมอนุภาคแกรฟีนและ SDS ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ เข้าไปในขั้นตอนการสังเคราะห์ PEDOT:PSS หลังจากนั้นทำการผสมกับ ethylene glycol ซึ่งเป็นสารโพลียออล โดยคาดหวังว่าอนุภาคแกรฟีนและสารโพลียออลจะช่วยเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าให้แก่ PEDOT:PSS และสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ จะช่วยให้การกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนดีขึ้น และเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าเมื่อเติมในปริมาณที่เหมาะสม ทำให้ได้ PEDOT:PSS ที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เตรียมพอลิ(3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน):พอลิสไตรีนซัลโฟนิคแอซิดที่มีการเติมแกรฟีนเข้าไปในขั้นตอนการสังเคราะห์พอลิเมอร์และเพิ่มการกระจายตัวของแกรฟีนด้วยโซเดียมโตนเตซิลลเฟตแล้วเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าด้วยเอทิลีนไกลคอล

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

โครงการวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก

1.3.1 เตรียม PEDOT:PSS

เตรียม PEDOT:PSS โดยใช้ 3,4-ethylenedioxythiophene (EDOT) เป็นมอนอเมอร์ ใช้ ammonium persulfate ($(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$) และ iron (III) sulfate ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) เป็น oxidizing agent

1.3.2 เตรียม PEDOT:PSS/graphene/SDS

เตรียม PEDOT:PSS โดยใช้ EDOT เป็นมอนอเมอร์ ใช้ $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ และ $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ เป็น oxidizing agent

ผสมแกรฟีนที่ 0.5 %wt ของ EDOT มอนอเมอร์ และสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบซึ่งในที่นี้คือ SDS ในสัดส่วนที่แตกต่างกันดังนี้ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 %wt

1.3.3 ปรับปรุงความสามารถในการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS/graphene/SDS ด้วยสารโพลียออลซึ่งในที่นี้คือเอทิลีนไกลคอล ในสัดส่วนแตกต่างกันดังนี้ 16.67, 28.57, 37.50, 44.44 และ 50.00 %wt

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้

ได้พอลิ(3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน):พอลิสไตรีนซัลโฟนิคแอซิด/แกรฟีนนำไฟฟ้าที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

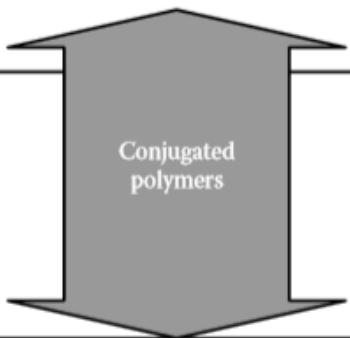
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การแบ่งประเภทของวัสดุตามความสามารถในการนำไฟฟ้า

วัสดุของแข็งชนิดต่างๆ มีสมบัติการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกันมาก มีช่วงของค่าสภาพการนำไฟฟ้า (conductivity) ที่กว้าง ดังนั้นวิธีการแบ่งชนิดของวัสดุวิธีหนึ่งคือ แบ่งตามความสามารถในการนำไฟฟ้า สำหรับการนำไฟฟ้าของวัสดุนั้น เกิดจากการไหลของตัวพาประจุ (charge carriers) ที่มีอยู่ในเนื้อวัสดุนั้นๆ ตัวพาประจุในวัสดุได้แก่ อิเล็กตรอน เช่นในวัสดุจำพวกโลหะ, โพซิทีฟโฮล (positive holes) เช่นในวัสดุกึ่งตัวนำ (semiconductor materials) และอนุภาคที่มีประจุ (ions) เช่นในวัสดุเซรามิก ซึ่งการแบ่งชนิดของวัสดุตามความสามารถในการนำไฟฟ้านั้น สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ สารตัวนำไฟฟ้า (conductor) สารกึ่งตัวนำไฟฟ้า (semiconductor) และสารที่เป็นฉนวน (insulator) [26] โดยสารแต่ละประเภทยุ่จะมีค่าสภาพการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.1

	Conductivity (S/cm)	Materials
Metallic conductors	10^6	Copper
		Iron
	10^4	Graphite
	10^2	Bismuth
Semi-conductors	10^0	Indium/Antimony
	10^{-2}	Gallium/Arsenic
		Germanium
	10^{-4}	Silicon
	10^{-6}	
	10^{-8}	
Isolators	10^{-10}	Glass
	10^{-12}	
	10^{-14}	Diamond
		Sulfur
	10^{-16}	Polyethylene
		Polystyrene
	Teflon®	
	10^{-20}	Quartz



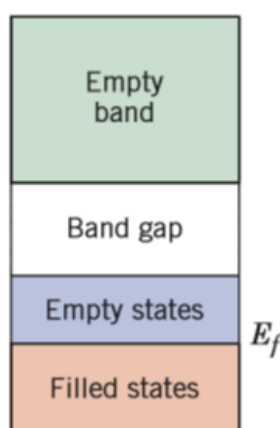
รูปที่ 2.1 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุบางชนิดที่อุณหภูมิห้อง [27]

2.1.1 โครงสร้างแถบพลังงานในของแข็ง

สมบัติด้านการนำไฟฟ้าของวัสดุขึ้นขึ้นอยู่กับช่องว่างระหว่างแถบวาเลนซ์ (valence band) และแถบนำไฟฟ้า (conduction band) ที่อิเล็กตรอนสามารถเปลี่ยนระดับชั้นได้ เรียกว่า แถบต้องห้าม (band gap) กล่าวคือวัสดุตัวนำไฟฟ้าจะไม่มีแถบต้องห้าม จึงทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้ดี ดังนั้นจึงนำไฟฟ้าได้ดีที่สุด วัสดุสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าจะมีแถบต้องห้ามที่มีค่าน้อยกว่า วัสดุที่เป็นฉนวน ดังนั้นพลังงานจากภายนอกที่มีค่ามากอาจจะทำให้อิเล็กตรอนเกิดการข้าม แถบต้องห้ามแล้วเกิดการนำไฟฟ้าขึ้นได้ วัสดุที่เป็นฉนวนจะมีแถบต้องห้ามที่มีค่าสูงที่สุด ดังนั้นเมื่อได้รับพลังงานในรูปแบบต่างๆ จึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอน ไม่สามารถนำไฟฟ้าได้

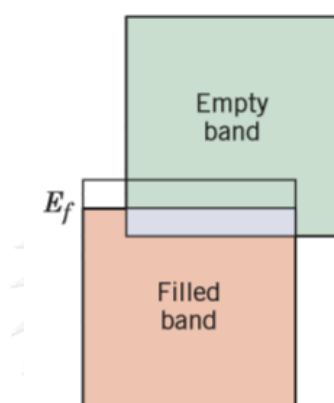
แถบพลังงานของวัสดุของแข็งประเภทต่างๆ ที่อุณหภูมิ 0 K ซึ่งโครงสร้างของ แถบอิเล็กตรอนจะมีได้ 4 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.2, 2.3, 2.4 และ 2.5

โครงสร้างของแถบอิเล็กตรอนแบบแรก ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เป็นแถบพลังงานที่พบใน วัสดุประเภทโลหะบางชนิด ที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเพียงตัวเดียวในชั้นพลังงานย่อย (subshell) s เช่น ทองแดง โดยในชั้น valence band จะแบ่งออกเป็น ระดับชั้นพลังงานที่มีอิเล็กตรอนอยู่ (filled state) และระดับชั้นพลังงานที่ว่าง (empty state) ซึ่ง valence band นี้จะถูกบรรจุเพียง บางส่วน สามารถนำไฟฟ้าได้ดี เพราะอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่จาก filled state ไปยัง empty state ที่อยู่ภายในชั้น valence band เดียวกัน อิเล็กตรอนไม่ได้เคลื่อนที่ขึ้นไปสู่ชั้น conduction band การเคลื่อนที่นี้จะไม่ผ่าน band gap ดังนั้นเมื่อได้รับพลังงานเพียงเล็กน้อยก็สามารถนำไฟฟ้า ได้



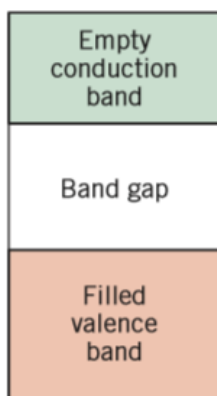
รูปที่ 2.2 แถบพลังงานในวัสดุตัวนำไฟฟ้า เช่น ทองแดง [26]

โครงสร้างของแถบอิเล็กตรอนแบบที่สอง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เป็นแถบพลังงานที่พบในวัสดุประเภทโลหะบางชนิด ที่มีการซ้อนทับ (overlap) กันระหว่างแถบการนำที่ไม่มีอิเล็กตรอน (empty conduction band) กับแถบวาเลนซ์ที่มีอิเล็กตรอนอยู่เต็ม (filled valance band) เช่น แมกนีเซียม อะตอมของแมกนีเซียมมีอิเล็กตรอน 3s อยู่ 2 ตัวเกิดการซ้อนทับ (overlap) กันระหว่างแถบ 3s และ 3p ทำให้อิเล็กตรอนสามารถข้ามจากแถบวาเลนซ์ที่มีอิเล็กตรอนอยู่เต็ม (filled valance band) ไปยังแถบการนำที่ไม่มีอิเล็กตรอน (empty conduction band) ได้เลยโดยไม่ต้องใช้พลังงานสูง โดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนนี้จะไม่ผ่าน band gap



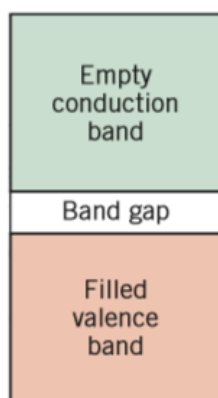
รูปที่ 2.3 แถบพลังงานในวัสดุตัวนำไฟฟ้า เช่น แมกนีเซียม [26]

โครงสร้างของแถบอิเล็กตรอนแบบที่สาม ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เป็นแถบพลังงานที่พบในวัสดุที่เป็นฉนวน ซึ่งแถบวาเลนซ์ที่มีอิเล็กตรอนอยู่เต็ม (filled valance band) จะถูกกันห่างจากแถบการนำที่ไม่มีอิเล็กตรอน (empty conduction band) โดย band gap นี้จะค่อนข้างกว้างซึ่งมากกว่า 2 eV และกว้างกว่าวัสดุกึ่งตัวนำไฟฟ้า



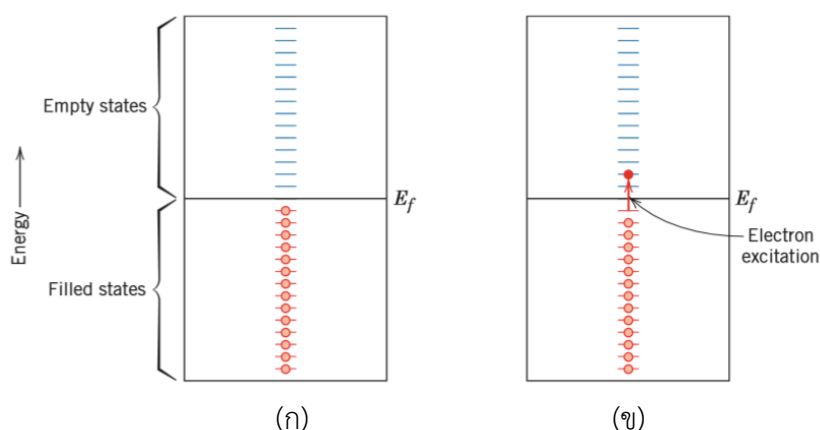
รูปที่ 2.4 แถบพลังงานในวัสดุที่เป็นฉนวน [26]

โครงสร้างของแถบอิเล็กตรอนแบบที่สี่ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เป็นแถบพลังงานที่พบในวัสดุกึ่งตัวนำไฟฟ้า ซึ่งแถบวาเลนซ์ที่มีอิเล็กตรอนอยู่เต็ม (filled valance band) จะถูกกั้นห่างจากแถบการนำที่ไม่มีอิเล็กตรอน (empty conduction band) โดย band gap นี้จะค่อนข้างแคบซึ่งน้อยกว่า 2 eV และแคบกว่าวัสดุที่เป็นฉนวน



รูปที่ 2.5 แถบพลังงานในวัสดุกึ่งตัวนำไฟฟ้า [26]

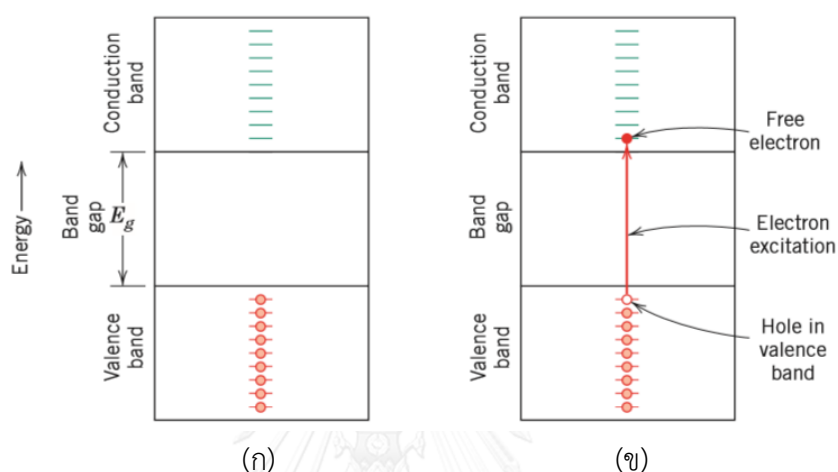
สำหรับวัสดุโลหะที่มีโครงสร้างของแถบอิเล็กตรอนทั้งแบบแรกและแบบที่สอง (รูปที่ 2.2 และ 2.3) จะมีชั้นพลังงานที่ว่าง (empty state) อยู่ติดกับระดับชั้นพลังงานสูงสุดของอิเล็กตรอน (filled state) เสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยทั่วไปพลังงานจากสนามไฟฟ้าจะเพียงพอที่จะกระตุ้นอิเล็กตรอนเป็นจำนวนมากให้เลื่อนระดับชั้นพลังงานและทำให้เกิดการนำไฟฟ้าของวัสดุ



รูปที่ 2.6 ระดับชั้นพลังงานที่อิเล็กตรอนอยู่ในวัสดุโลหะ

(ก) ก่อนถูกกระตุ้นและ (ข) หลังถูกกระตุ้น [26]

สำหรับวัสดุฉนวนและวัสดุกึ่งตัวนำไฟฟ้า (รูปที่ 2.4 และ 2.5) นั้นไม่มีระดับชั้นพลังงานที่ว่างอยู่ใกล้หรืออยู่ติดกับระดับชั้นพลังงานสูงสุดที่มีอิเล็กตรอนแบบวัสดุโลหะ การที่อิเล็กตรอนจะเป็นอิเล็กตรอนอิสระได้นั้น อิเล็กตรอนจะต้องกระโดดข้ามแถบต้องห้ามไปยังระดับชั้นพลังงานต่ำสุดในแถบนำไฟฟ้า ซึ่งการกระโดดนี้เกิดขึ้นได้หากมีการกระตุ้นด้วยพลังงานที่มีค่าประมาณเท่ากับค่าพลังงานของแถบต้องห้าม (band gap energy, E_g) ดังแสดงในรูปที่ 2.7

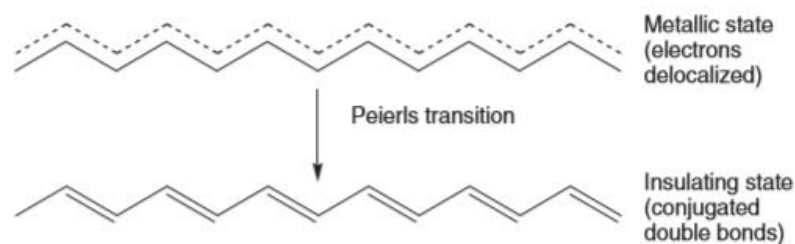


รูปที่ 2.7 ระดับชั้นพลังงานที่อิเล็กตรอนอยู่ในวัสดุฉนวนและวัสดุกึ่งตัวนำไฟฟ้า

(ก) ก่อนถูกกระตุ้นและ (ข) หลังถูกกระตุ้น [26]

2.2 พอลิเมอร์นำไฟฟ้า

พอลิเมอร์นำไฟฟ้า (conducting polymer) คือพอลิเมอร์ที่มีระบบ π -conjugation อยู่ในโครงสร้างโมเลกุล ซึ่งสายโซ่จะประกอบไปด้วยพันธะเดี่ยวสลับกับพันธะคู่ ทำให้มีการซ้อนเหลื่อมกัน (overlap) ของ p -orbital ในแต่ละอะตอม ส่งผลให้เกิดการดีโลคาไลเซชัน (delocalization) ของอิเล็กตรอนรอบโมเลกุล ดังแสดงในรูปที่ 2.8



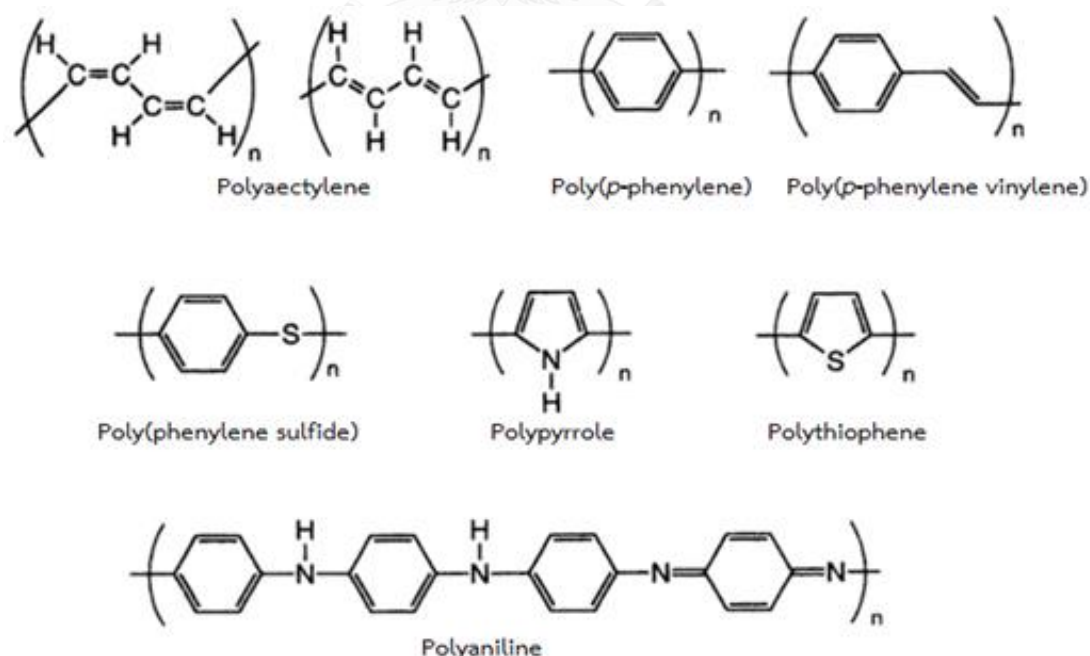
รูปที่ 2.8 โครงสร้างของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า [28]

ในปี ค.ศ. 2000 The Royal Swedish Academy of Sciences ได้มอบรางวัล Nobel Prize ในสาขาเคมีให้กับนักวิทยาศาสตร์ 3 ท่านคือ ศาสตราจารย์ อัลัน เจ ฮีเกอร์ (Alan J. Heeger) ศาสตราจารย์ อัลัน จี แมคไดอาร์มิด (Alan G. MacDiarmid) และศาสตราจารย์ ฮิเดกิ ชิรากาวา (Hideki Shirakawa) ในเรื่องการค้นคว้าและพัฒนาพอลิเมอร์นำไฟฟ้า นับเป็นจุดเริ่มต้นให้นักวิทยาศาสตร์อีกหลายท่านเข้ามาสนใจในวัสดุประเภทพอลิเมอร์นำไฟฟ้าและนำไปประยุกต์ใช้งานในลักษณะที่หลากหลายมากขึ้น ซึ่งสามารถแบ่งพอลิเมอร์นำไฟฟ้าตามลักษณะของโครงสร้างออกเป็น 4 กลุ่มดังนี้ [29]

2.2.1 π -Conjugated liner polymers

พอลิเมอร์นำไฟฟ้าในกลุ่ม π -conjugated liner polymers เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างโซ่ตรงแบบพายคอนจูเกต เช่น polyacetylene, poly(*p*-phenylene), poly(*p*-phenylene vinylene), poly(phenylene sulfide), polypyrrole, polythiophene และ polyaniline เป็นต้น

พอลิเมอร์ในกลุ่มนี้จัดว่ามีความน่าสนใจอย่างยิ่ง เนื่องจากเมื่อพอลิเมอร์ในกลุ่มนี้ได้ผ่านกระบวนการกระตุ้น (doping) ให้เกิดพาหะนำประจุแล้วจะมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่สูง ตัวอย่างของพอลิเมอร์ในกลุ่มนี้แสดงในรูปที่ 2.9

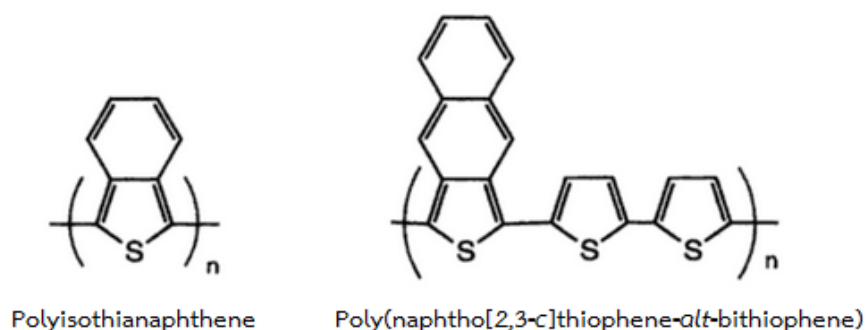


รูปที่ 2.9 ตัวอย่างของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีโครงสร้างแบบ π -conjugated liner polymers [29]

2.2.2 Narrow band-gap polymers

พอลิเมอร์นำไฟฟ้าในกลุ่ม narrow band-gap polymers นั้นถูกออกแบบและสังเคราะห์ โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่มีแถบต้องห้ามที่แคบลงจนกระทั่งมีสมบัติเป็นสารประเภทพอลิเมอร์กึ่งตัวนำไฟฟ้าเนื้อแท้ (intrinsic polymeric semiconductors) ซึ่งสามารถนำไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการกระตุ้น (doping)

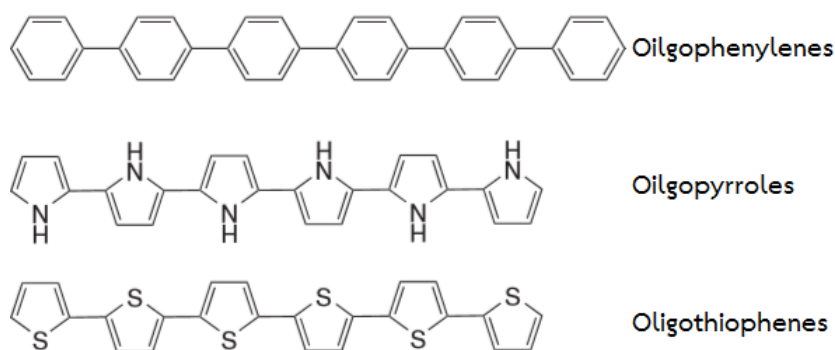
ตัวอย่างของพอลิเมอร์ในกลุ่มนี้แสดงในรูปที่ 2.10 เช่น polyisothianaphthene ซึ่งมี band gap ประมาณ 1.0 eV และ poly(naphtho[2,3-c]thiophene-*alt*-bithiophene) ซึ่งมี band gap ประมาณ 0.65 eV



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีโครงสร้างแบบ narrow band-gap polymers [29]

2.2.3 π -Conjugated liner oligomers

พอลิเมอร์นำไฟฟ้าในกลุ่ม π -conjugated liner oligomers เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างโซ่ตรงแบบพายคอนจูเกต ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีหน่วยซ้ำ (repeating unit) ในแต่ละโมเลกุลเป็นจำนวนน้อย ตัวอย่างของพอลิเมอร์ในกลุ่มนี้แสดงในรูปที่ 2.11 เช่น oligophenylenes, oligopyrroles และ oligothiophenes เป็นต้น

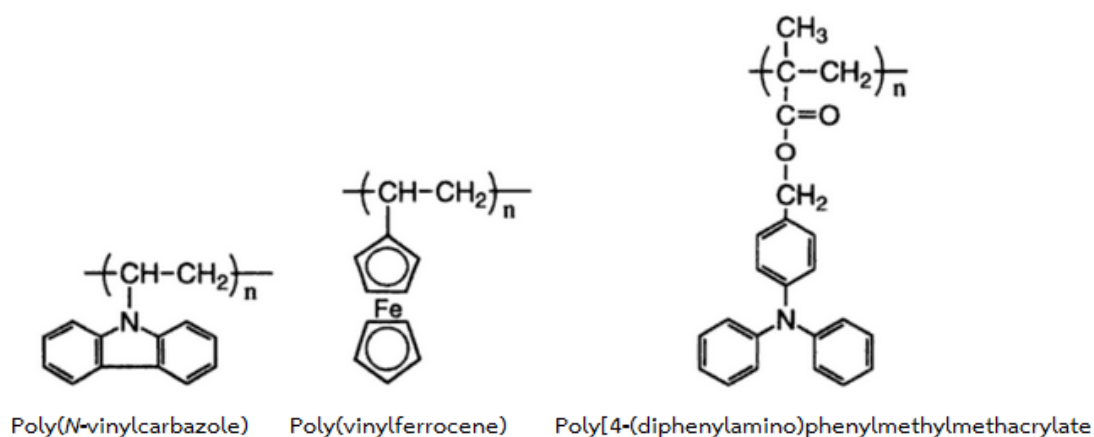


รูปที่ 2.11 ตัวอย่างของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีโครงสร้างแบบ π -conjugated liner oligomers [29]

2.2.4 Nonconjugated polymers containing pendant π -electron systems

พอลิเมอร์นำไฟฟ้าในกลุ่ม nonconjugated polymers containing pendant π -electron systems นั้นมีโครงสร้างของพอลิเมอร์หลักที่ไม่เป็นระบบคอนจูเกต แต่จะมีหมู่ข้างเคียงที่เป็นระบบคอนจูเกต ซึ่งการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ในกลุ่มนี้อาศัยการกระตุ้นให้เกิดพาหะนำประจุที่หมู่ข้างเคียง เมื่อได้รับการกระตุ้นพาหะประจุด้วยปฏิกิริยา oxidation หรือ reduction แล้วจะทำให้มีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่สูงขึ้น

ตัวอย่างของพอลิเมอร์ในกลุ่มนี้แสดงในรูปที่ 2.12 เช่น poly(*N*-vinylcarbazole), poly(vinylferrocene) และ poly[4-(diphenylamino)phenylmethacrylate] เป็นต้น



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีโครงสร้างแบบ

nonconjugated polymers containing pendant π -electron systems [29]

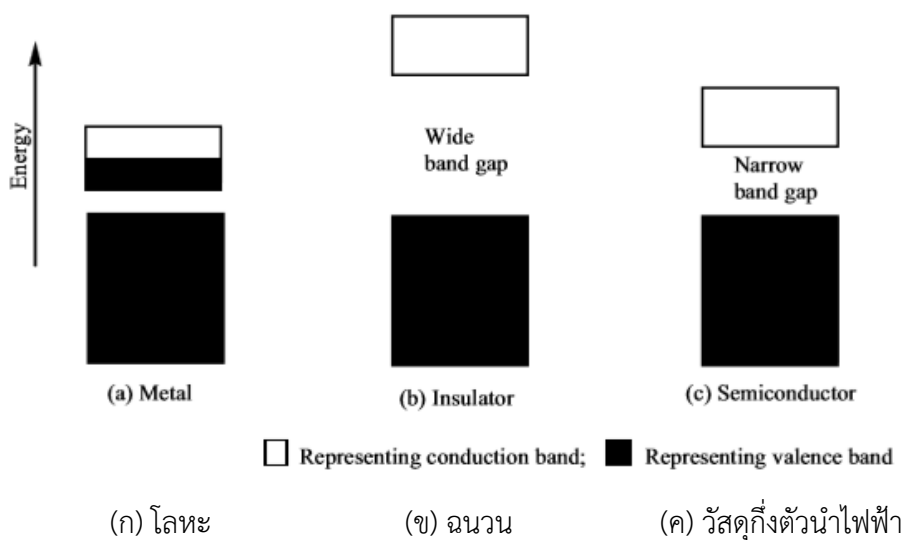
2.2.5 กลไกการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า

พอลิเมอร์นำไฟฟ้าโดยทั่วไปจะมีระบบ π -conjugation อยู่ในโครงสร้างโมเลกุล ซึ่งสายโซ่จะประกอบไปด้วยพันธะเดี่ยวสลับกับพันธะคู่ ทำให้มีการซ้อนเหลื่อมกันของ p -orbital ในแต่ละอะตอม ส่งผลทำให้เกิดการดีโลคาไลเซชันของอิเล็กตรอนรอบโมเลกุล

การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าสามารถอธิบายได้โดย band theory ซึ่งกล่าวว่าในการสร้างพันธะเคมี ออร์บิทัลอะตอมสองออร์บิทัลมารวมกันจะได้ออร์บิทัลโมเลกุลสองชนิดคือ ออร์บิทัลโมเลกุลแบบมีพันธะ (bonding molecular orbital) และออร์บิทัลโมเลกุลแบบต้านพันธะ (anti-bonding molecular orbital) โดยวัสดุที่มี sp^2 hybridized π -electron เช่นพอลิเมอร์ที่ไม่อิ่มตัว (polyenes) จะสร้างออร์บิทัลแบบมีพันธะ π (bonding π orbitals) และออร์บิทัลแบบต้านพันธะ π (antibonding π orbitals) และจะสร้างแถบพลังงานคือ ระดับชั้นพลังงานที่บรรจุ

อเล็กตรอน (occupied π bond) และระดับชั้นพลังงานที่ไม่มีอเล็กตรอนบรรจุอยู่ (empty π^* band) โดยแถบพลังงานทั้งสองนี้จะมีพลังงานที่แบ่งแยกกัน ซึ่งระดับชั้นพลังงานสูงสุดที่บรรจุอเล็กตรอน (highest occupied molecular orbital, HOMO) ที่เรียกว่า แถบวาเลนซ์ (valence band) และระดับชั้นพลังงานต่ำสุดที่ไม่มีอเล็กตรอนบรรจุอยู่ (lowest unoccupied molecular orbital, LUMO) ที่เรียกว่า แถบการนำ (conduction band) ซึ่งความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานของ valence band และ conduction band ก็คือ band gap

สำหรับพอลิเมอร์นำไฟฟ้าในกลุ่ม π -conjugated liner polymers ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างเช่น ความยาวของสายโซ่ ความเป็นระนาบ การมีหมู่แทนที่ที่มีสมบัติเป็นหมู่ให้อเล็กตรอน (electron donor) หรือหมู่รับอเล็กตรอน (electron acceptor) ล้วนแล้วแต่ส่งผลต่อ band gap ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าด้วยเช่นกัน การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าคล้ายคลึงกับการนำไฟฟ้าของวัสดุจำพวกสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า กล่าวคือที่อุณหภูมิห้องอเล็กตรอนจะใช้พลังงานจากภายนอกมากระตุ้นเพื่อที่เคลื่อนที่จาก valence band ไปยัง conduction band ดังนั้นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มี band gap กว้างจะนำไฟฟ้าได้ไม่ค่อยดีนักหรือไม่นำไฟฟ้า เนื่องจากพลังงานจากภายนอกที่อุณหภูมิห้องมีไม่เพียงพอที่จะทำให้อเล็กตรอนเคลื่อนที่ข้ามช่องว่างระหว่าง gap สำหรับวัสดุจำพวกโลหะนั้นนำไฟฟ้าได้ดีเนื่องจากเกิดการซ้อนเหลื่อมกันของ energy band ดังแสดงในรูปที่ 2.13 [30]



รูปที่ 2.13 energy gap ของวัสดุประเภทต่างๆ

(ก) โลหะ (ข) ฉนวนและ (ค) วัสดุกึ่งตัวนำไฟฟ้า [30]

การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าโดยการพาประจุไปตามสายโซ่พอลิเมอร์ สามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อพอลิเมอร์นำไฟฟ้าถูกกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุ (doping) โดยการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์กับโมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์มีประจุบวกหรือลบเกิดขึ้นพร้อมกับอนุภาคมูลอิสระ (free radical) ที่เรียกว่าโพลารอน (polaron) โดยการเกิดประจุบวกหรือประจุลบนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของสารกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุ (dopant) ว่าเป็นสารที่ให้อิเล็กตรอนหรือรับอิเล็กตรอนจากโมเลกุลของพอลิเมอร์

สำหรับ polaron ที่เป็นเรดิคัลแคทไอออน (radical cation) เกิดจากการใช้สารกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุ ที่รับอิเล็กตรอนจากโมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งก็คือเป็นการกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุบวกหรือชนิดพี (p-type doping)

สำหรับ polaron ที่เป็นเรดิคัลแอนไอออน (radical anion) เกิดจากการใช้สารกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุ ที่ให้อิเล็กตรอนกับโมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งก็คือเป็นการกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุลบหรือชนิดเอ็น (n-type doping)

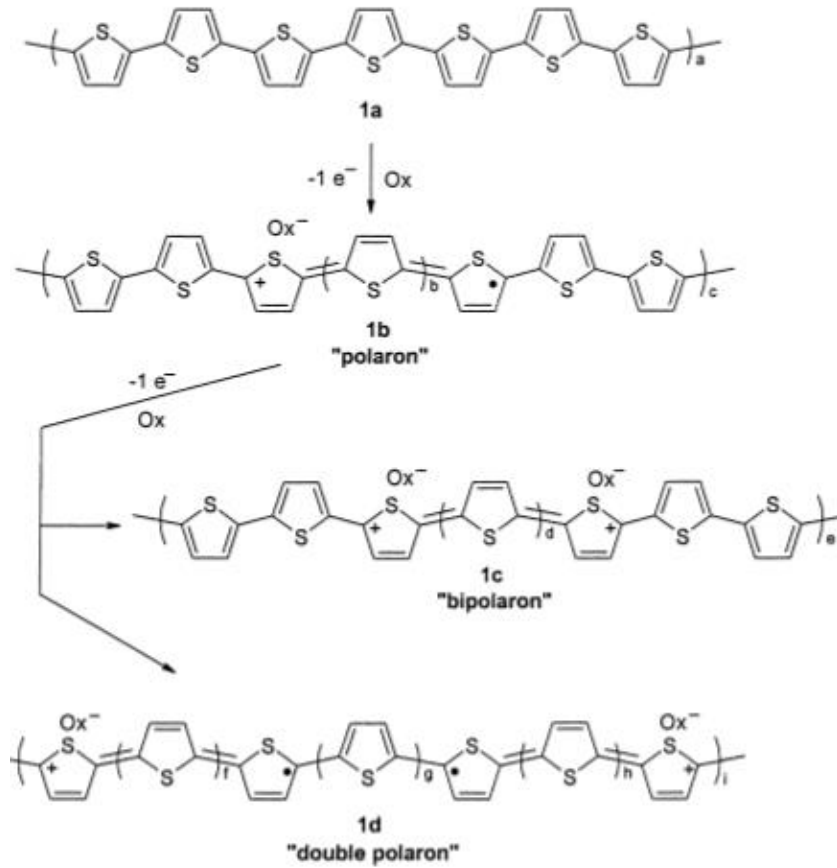
หลังจากที่พอลิเมอร์เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์จนกลายเป็น polaron แล้วถ้าโมเลกุลของพอลิเมอร์มีการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์เกิดขึ้นอีก ทำให้มีจำนวนประจุเพิ่มขึ้นบนสายโซ่พอลิเมอร์ เรียกว่าไบโพลารอน (bipolaron) ดังแสดงในรูปที่ 2.14

polaron และ bipolaron นี้เคลื่อนที่พาประจุไปตามสายโซ่ของพอลิเมอร์ ทำให้พอลิเมอร์นั้นสามารถนำไฟฟ้าได้ การเกิดเป็น bipolaron ของโมเลกุลของพอลิเมอร์นี้ มีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดีกว่าการเกิดเป็น polaron เนื่องจาก bipolaron นั้นมี band gap ที่แคบกว่า polaron ดังแสดงในรูปที่ 2.15

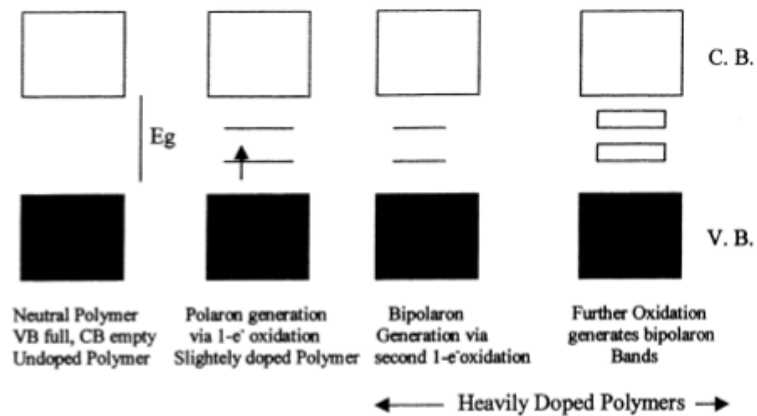
การที่โมเลกุลของพอลิเมอร์นี้เกิดเป็น polaron หรือ bipolaron ขึ้นอยู่กับปริมาณการถูกกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุ โดยถ้ามีการกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุในปริมาณน้อยจะทำให้เกิดเป็น polaron แต่ถ้ามีการกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุในปริมาณที่สูงขึ้น จะทำให้เกิดเป็น bipolaron

ความสามารถในการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้านั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 2 ประการ กล่าวคือเมื่อพิจารณาในด้านของการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในสายโซ่ (intra-molecular conductivity) โมเลกุลควรมีความเรียบในแนวระนาบ (planar) โดยปราศจากการบิดงอให้มากที่สุด เมื่อพิจารณาในด้านของการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนระหว่างสายโซ่ (Inter-molecular conductivity) แล้วจะถือว่าเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนโดยผ่านกลไกแบบ

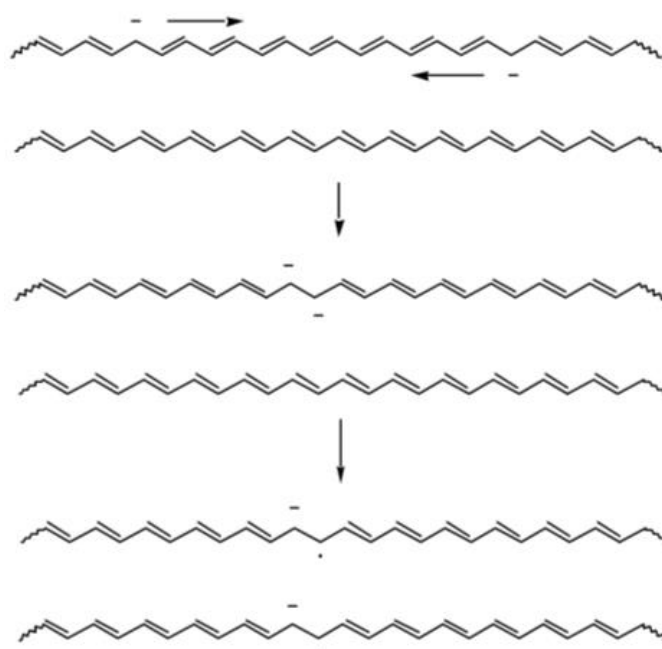
hopping ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ซึ่งกลไกดังกล่าวต้องการให้โมเลกุลอยู่ใกล้กันมากหรือมีระยะห่างระหว่างโมเลกุลน้อยเพื่อที่อิเล็กตรอนสามารถเกิด hopping ได้ ดังนั้นโครงสร้างพื้นฐานวิทยาที่เหมาะสมที่สุดจึงน่าจะเป็นแบบ stacking หรือ planar conjugated chains



รูปที่ 2.14 กลไกการเกิด polaron, bipolaron และ double polaron ใน polythiophene [31]



รูปที่ 2.15 ระดับพลังงานของ neutral, polaron และ bipolaron ใน polythiophene [32]



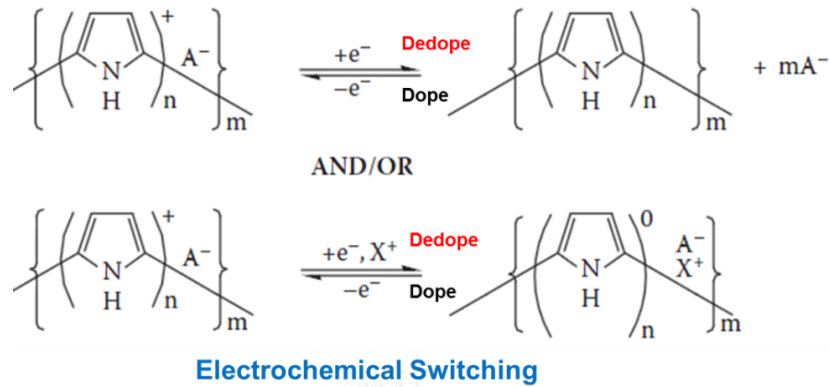
รูปที่ 2.16 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนโดยผ่านกลไกแบบ hopping [33]

2.2.6 การกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุ (doping)

โดยปกติแล้วพอลิเมอร์นำไฟฟ้าจะมีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า เมื่ออยู่ในสภาวะปกติหรือสภาวะที่เป็นกลาง พอลิเมอร์เหล่านี้จะไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ แต่เมื่อถูกกระตุ้นหรือ dope เพื่อให้เกิดโครงสร้างที่ไม่เป็นกลาง เช่นการทำให้มีประจุบวกเกิดขึ้นในโครงสร้างจะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นั้นสูงขึ้น โดยการกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุในทางเคมีหมายถึง การทำให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ โดยอาจจะเป็นปฏิกิริยารีดักชัน หรือปฏิกิริยาออกซิเดชันก็ได้ ขึ้นอยู่กับประเภทของสารที่เติมลงไปกระตุ้น โดยถ้าสารที่เติมลงไปเป็นอะตอมหรือสารที่ขาดแคลนอิเล็กตรอน เรียกสารดังกล่าวว่า p-dopant (หรือตัวออกซิไดซ์ในทางเคมี) แต่ถ้าอะตอมหรือสารที่เติมลงไปมีอิเล็กตรอนมาก เรียกสารนั้นว่า n-dopant (หรือตัวรีดิวซ์ในทางเคมี) ดังนั้นกระบวนการกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุ ด้วยสาร p-dopant จึงอาจเรียกได้ว่าเป็นกระบวนการออกซิเดชันของพอลิเมอร์ และกระบวนการกระตุ้นด้วย n-dopant จึงอาจเรียกว่าเป็นกระบวนการรีดักชันของพอลิเมอร์

กระบวนการ doping-dedoping ดังแสดงในรูปที่ 2.17 เป็นกระบวนการที่สามารถเกิดซ้ำได้ไม่จำกัด มีสมบัติเป็นสวิตช์ (switching property) คือสามารถเกิดการผันกลับ สลับไปมาได้ นอกจากนี้ในกระบวนการ doping-dedoping ซึ่งมีการเข้าออกของสารที่เติมลงไปกระตุ้นใน

โครงสร้างของพอลิเมอร์ทำให้เกิดสภาพตัวนำและฉนวนแล้ว ยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติอื่น อีกด้วย เช่น สี และปริมาตร ทำให้พอลิเมอร์นำไฟฟ้าจัดเป็นวัสดุแอกทีฟ (active materials)



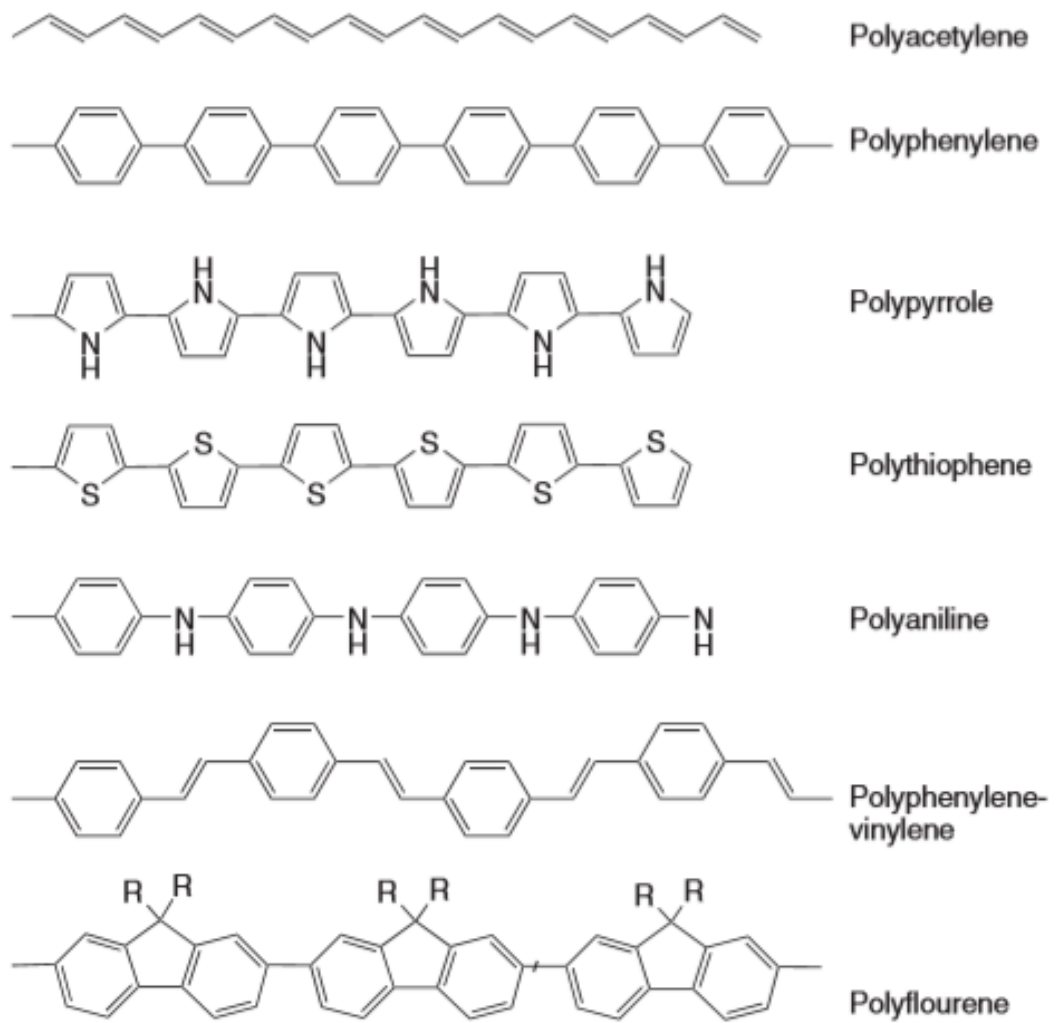
รูปที่ 2.17 กระบวนการ doping-dedoping ในพอลิเมอร์นำไฟฟ้า [34]

2.2.7 พอลิ(3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟิน) (poly(3,4-ethylenedioxythiophene), PEDOT) และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

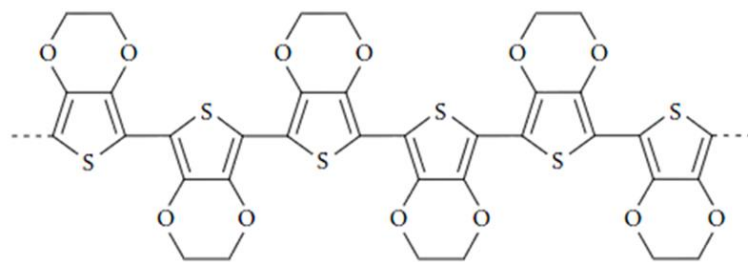
ในปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ทำมาจากวัสดุประเภทพอลิเมอร์นำไฟฟ้า ได้มีการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทต่างๆ เช่น อิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น (flexible electronics) และ อิเล็กทรอนิกส์พิมพ์ได้ (printed electronics) ที่สามารถสร้างเป็นวงจรถานซิสเตอร์แบบฟิล์มบาง (thin film transistors) บนฐานรองรับหลากหลายแบบด้วยเทคนิคการพิมพ์ใช้หมึกพอลิเมอร์นำไฟฟ้า ซึ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้จะใช้เป็นส่วนประกอบของ แผ่นฟิล์มวงจรถานซิสเตอร์แบบยืดหยุ่น จอสัมผัส แผงเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น [1-5]

พอลิเมอร์นำไฟฟ้านั้นมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ซึ่งพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีความสำคัญและนักวิจัยส่วนใหญ่ให้ความสนใจศึกษาและนำไปประยุกต์ใช้งานในลักษณะที่หลากหลายนั้น มีด้วยกันหลายชนิด เช่น polyacetylene, polyphenylene, polypyrrole, polythiophene, polyaniline, polyphenylenevinylene และ polyfluorene เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.18

นอกจากที่กล่าวมานี้ พอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่สำคัญและมึนักวิจัยส่วนใหญ่ให้ความสนใจอีกชนิดหนึ่งคือ พอลิ(3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟิน) (poly(3,4-ethylenedioxythiophene) หรือ PEDOT ซึ่งเป็นอนุพันธ์หนึ่งของพอลิไทโอฟิน ซึ่งมีการเติมหมู่ alkoxy (ether group) เข้าไปในโครงสร้างของพอลิไทโอฟิน ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น มี band gap ที่แคบลง ทำให้มีความสามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น ซึ่งโครงสร้างของ PEDOT นั้นแสดงในรูปที่ 2.19 สำหรับค่า band gap ของพอลิไทโอฟินนั้นมีค่าประมาณ 2.0 eV [30] ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และสำหรับ PEDOT นั้นมี band gap ที่ประมาณ 1.5-1.6 eV [35]



รูปที่ 2.18 โครงสร้างของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่สำคัญ [36]



รูปที่ 2.19 โครงสร้างของ PEDOT [6]

ตารางที่ 2.1 ค่า band gap และ conductivity ของพอลิเมอร์บางชนิด [30]

Polymer (date conductivity discovered)	Structure	π - π^* gap (eV)	Conductivity (S/cm)
I. Polyacetylene and analogues			
Polyacetylene (1977)		1.5	$10^3 - 1.7 \times 10^5$
Polypyrrole (1979)		3.1	$10^2 - 7.5 \times 10^3$
Polythiophene (1981)		2.0	$10 - 10^3$
II. Polyphenylene and analogues			
Poly(paraphenylene) (1979)		3.0	$10^2 - 10^3$
Poly(p-phenylene vinylene) (1979)		2.5	$3 - 5 \times 10^3$
Polyaniline (1980)		3.2	30 - 200

PEDOT เป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความเสถียรต่อสภาพแวดล้อม และมีความเสถียรต่อความร้อนที่ดี ซึ่งมีอุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายตัวสูงกว่า $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ และสลายตัวสมบูรณ์ที่อุณหภูมิสูงกว่า $390\text{ }^{\circ}\text{C}$ [35] มีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดี แต่ PEDOT ไม่ละลายในตัวทำละลายทั่วไป (insoluble) ซึ่งเป็นอุปสรรคที่สำคัญในการนำ PEDOT ไปใช้งานเหมือนกับพอลิเมอร์นำไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่ คือกระบวนการขึ้นรูปทำได้ยาก (poor processability) [8] สาเหตุที่ทำให้ PEDOT ไม่ละลายในตัวทำละลายทั่วไปนั้นเนื่องมาจากโครงสร้างหลักของสายโซ่พอลิเมอร์มีพันธะคู่หรือ π -bond อยู่มาก ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่ที่แข็งแรงมาก (π - π interaction)

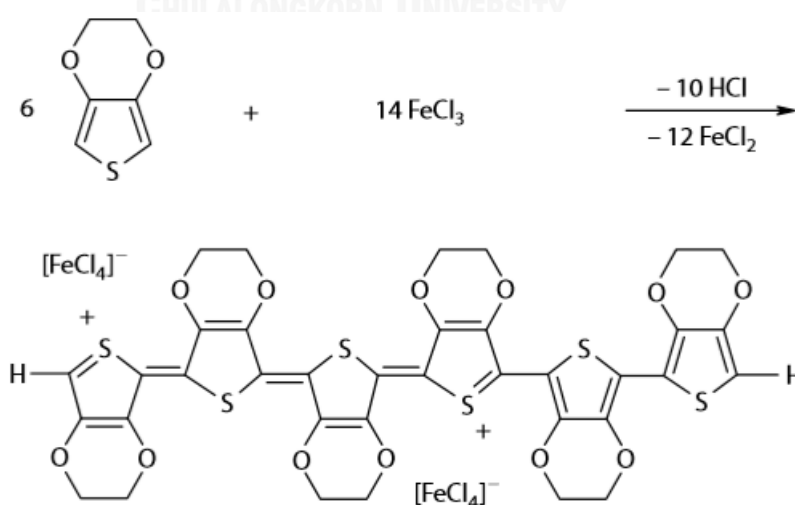
โดยทั่วไปแล้ว PEDOT สามารถสังเคราะห์ได้ด้วยวิธีหลักๆ คือการทำพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเคมีไฟฟ้า (electrochemical polymerization) เป็นการใช้ไฟฟ้าออกซิไดซ์มอนอเมอร์ให้เกิดเป็น radical cations ที่เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่กับมอนอเมอร์ต่อเนื่องจนเป็นสายพอลิเมอร์ ซึ่งพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นนี้จะเคลือบอยู่ที่ผิวของขั้วอิเล็กโทรด ส่วนอีกวิธีหนึ่งเป็นการสังเคราะห์ผ่าน

ปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมี (chemical oxidation polymerization) เป็นการใส่สารเคมีเป็นตัวออกซิไดซ์ ซึ่ง oxidizing agent นั้นมีอยู่หลายกลุ่ม แต่ที่นิยมใช้และให้ค่าการนำไฟฟ้าที่สูงเป็นสารในกลุ่มของเปอร์ซัลเฟต เช่น แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (ammonium persulfate, $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$), โซเดียมเปอร์ซัลเฟต (sodium persulfate, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$) เป็นต้น โดยมีมอนอเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ PEDOT คือ 3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน (3,4-ethylenedioxythiophene, EDOT) ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ซึ่งข้อดีของการสังเคราะห์ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมีคือ สามารถเตรียมสารได้ในปริมาณมาก [6]



รูปที่ 2.20 โครงสร้างของ 3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน (3,4-ethylenedioxythiophene, EDOT) [27]

ในปี ค.ศ.1996 Kumar และ Reynolds [7] ได้สังเคราะห์ PEDOT ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมี โดยใช้ EDOT เป็นมอนอเมอร์และใช้ iron (III) chloride (FeCl_3) เป็นตัวออกซิไดซ์ พบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างมอนอเมอร์ต่อตัวออกซิไดซ์มากกว่าหรือเท่ากับ 5 สามารถสังเคราะห์ PEDOT ได้ และ PEDOT ที่ได้นี้จะไม่สามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ ซึ่งปฏิกิริยาการสังเคราะห์ PEDOT โดยใช้ FeCl_3 เป็นตัวออกซิไดซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.21

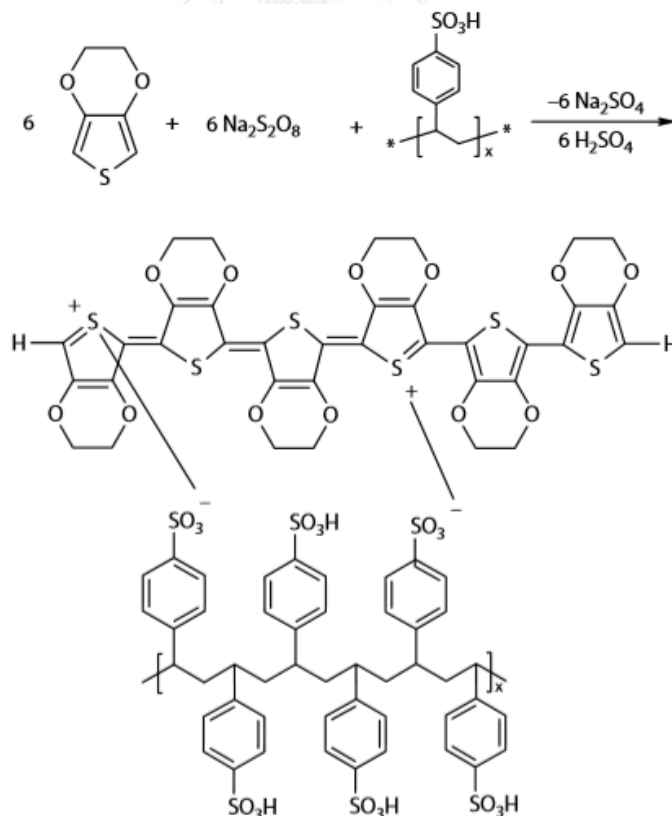


รูปที่ 2.21 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ PEDOT โดยใช้ FeCl_3 เป็นตัวออกซิไดซ์ [6]

2.2.7.1 พอลิ(3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน):พอลิสไตรีนซัลโฟนิคแอซิด (poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonic acid), PEDOT:PSS)

แม้ว่า PEDOT จะเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดี มีสมบัติทางกายภาพและเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่าพอลิเมอร์นำไฟฟ้าตัวอื่นๆ แต่ PEDOT ไม่ละลายในตัวทำละลายทั่วไป ซึ่งเป็นอุปสรรคที่สำคัญในการนำ PEDOT ไปใช้งานเหมือนกับพอลิเมอร์นำไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่คือกระบวนการขึ้นรูปทำได้ยาก (poor processability) [8]

ข้อจำกัดเรื่องการละลายนี้สามารถแก้ไขได้โดยการใช้สารประเภทพอลิอิเล็กโทรไลต์เช่น พอลิสไตรีนซัลโฟนิคแอซิด (poly(styrene sulfonic acid), PSS) ซึ่งสามารถละลายน้ำและแตกตัวเป็นพอลิไอออนที่มีประจุลบ ซึ่งไปช่วยทำให้ประจุบวกของสายโซ่พอลิเมอร์ของ PEDOT มีความสมดุล เกิดเป็น PEDOT:PSS ที่อยู่รวมกันได้ โดยอนุภาคของ PEDOT กระจายตัวอยู่ในสารละลายของ PSS ทำให้กระบวนการขึ้นรูปเป็นฟิล์มนั้นสามารถทำได้ดีขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาการสังเคราะห์ PEDOT:PSS โดยใช้ sodium persulfate ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$) เป็นตัวออกซิไดซ์ แสดงในรูปแบบที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ PEDOT:PSS โดยใช้ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ เป็นตัวออกซิไดซ์ [6]

PEDOT:PSS นอกจากจะสามารถใช้งานในรูปแบบของสารละลายสามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ดีแล้วยังมีความโปร่งใส (transparency) และมีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูง แต่การเติม PSS ทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าของวัสดุลดลง ทำให้ไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานบางประเภท [9, 10] ตัวอย่างในรายงานของ Jonas และ Morrison ในปี ค.ศ. 1997 [11] ซึ่งได้สังเคราะห์ PEDOT ในสารละลายพอลิเอ็กโซโทรไลต์ของ PSS โดยใช้ potassium persulfate ($K_2S_2O_8$) เป็นตัวออกซิไดซ์ และให้ปฏิกิริยาดำเนินไปที่อุณหภูมิห้อง พบว่าเกิดเป็น PEDOT:PSS ที่มีอนุภาค PEDOT กระจายตัวอยู่ในสารละลายของ PSS ซึ่งสารที่ได้นี้เป็นของเหลวที่มีสีน้ำเงินเข้มสามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ แต่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ลดลง

จะเห็นได้ว่า PEDOT เป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่นักวิจัยหลายท่านให้ความสนใจและศึกษากัน เนื่องจากมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่สูง แต่ PEDOT มีข้อจำกัดเรื่องการละลายในตัวทำละลาย ส่งผลให้กระบวนการขึ้นรูปทำได้ยาก จากข้อจำกัดนี้จึงสังเคราะห์ PEDOT:PSS เพื่อช่วยแก้ปัญหาเรื่องกระบวนการขึ้นรูป แต่ PSS ก็ทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าลดลง ด้วยสาเหตุนี้ นักวิจัยหลายท่านจึงสนใจศึกษาถึงแนวทางในการเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าให้แก่ PEDOT:PSS

โดยทั่วไปแนวทางในการปรับปรุงความสามารถในการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS สามารถทำได้โดยการผสมสารเติมแต่งที่มีสมบัติการนำไฟฟ้า [12-14] เช่น ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (multi-wall carbon nanotube, MWCNT) ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (single wall carbon nanotube, SWCNT) [12] และแกรฟีน (graphene) [13, 14] เป็นต้น แต่สารเติมแต่งเหล่านี้มีข้อจำกัดเรื่องของการกระจายตัวใน PEDOT:PSS [12, 13]

อีกแนวทางหนึ่งในการปรับปรุงความสามารถในการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS คือ การผสมสารโดปทุติยภูมิ (secondary dopant) [10, 15-23] ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมเนื่องจากสามารถเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS ได้หลายเท่าและเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยาก สารโดปทุติยภูมิมีด้วยกันหลายชนิด เช่น ethylene glycol (EG) [17-20], dimethyl sulfoxide (DMSO) [21-23], dimethylformamide (DMF) [22] และ tetrahydrofuran (THF) [22] เป็นต้น แต่สารโดปทุติยภูมิเหล่านี้ก็มีข้อจำกัดเรื่องของความเสถียรเช่นกัน

ในปี ค.ศ. 2011 Kishi และคณะ [12] ได้เตรียมฟิล์มที่เกิดจากการผสม PEDOT:PSS กับท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (SWCNT) โดยนำสารที่ผสมแล้วไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (spin coating) และวัดค่าความต้านทานแผ่น (sheet

resistance) พบว่าค่าความต้านทานแผ่นลดลง แสดงให้เห็นว่าการผสมท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (SWCNT) สามารถปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS ให้ดีขึ้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำแกรฟีนซึ่งเป็นอัญรูปหนึ่งของคาร์บอน เช่นเดียวกับท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (SWCNT) มาใช้เป็นสารเติมแต่ง โดยแกรฟีนเป็นวัสดุนำไฟฟ้าที่ประกอบด้วยชั้นของคาร์บอนอะตอมที่หนาเพียง 1 ชั้น มีลักษณะเป็นแผ่นที่มีโครงสร้าง 2 มิติเหมือนตาข่ายรูปหกเหลี่ยมคล้ายรังผึ้ง (hexagonal configuration) โดยมีความหนาเท่ากับความหนาของคาร์บอนเพียงอะตอมเดียว หรือประมาณ 0.34 นาโนเมตร และมีระยะห่างระหว่างอะตอมคาร์บอน 0.142 นาโนเมตร แกรฟีนมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่สูง และมีสัดส่วนพื้นที่ต่อน้ำหนักเท่ากับ $2,630 \text{ m}^2/\text{g}$ ซึ่งมากกว่าท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (SWCNT) ถึงสองเท่า [13, 14] (รายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับแกรฟีนจะอธิบายในหัวข้อ 2.3)

ในปี ค.ศ. 2011 Alvi และคณะ [14] ได้เตรียมอนุภาคนำไฟฟ้าของ PEDOT โดยผสมอนุภาคแกรฟีน ในอัตราส่วนของแกรฟีนต่อมอนอเมอร์เป็น 1:1 โดยน้ำหนัก และใช้ ammonium persulfate ($(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$) ร่วมกับ iron (III) chloride (FeCl_3) เป็นสารออกซิไดซ์ พบว่าอนุภาคนำไฟฟ้าผสมของแกรฟีนกับ PEDOT มีประสิทธิภาพทางเคมีไฟฟ้า (electrochemical performance) และมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น

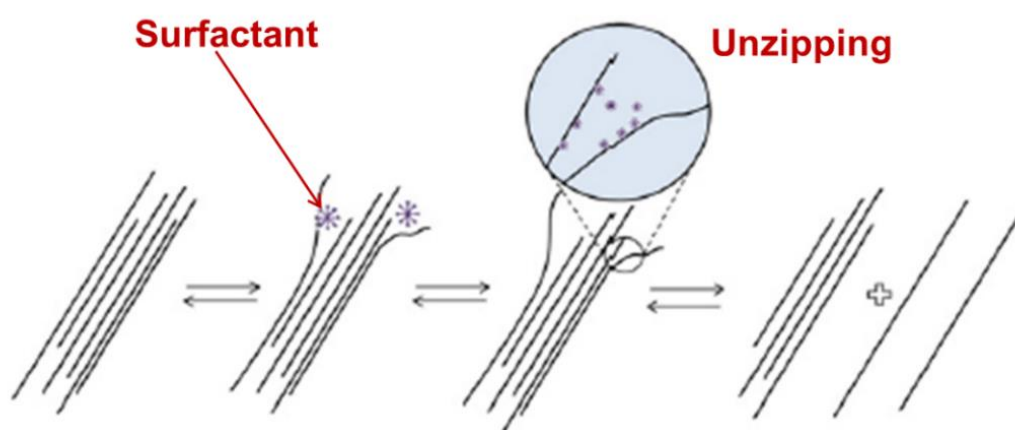
สำหรับการผสมอนุภาคแกรฟีนใน PEDOT:PSS นั้นพบว่าแกรฟีนสามารถปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าให้เพิ่มขึ้นได้เช่นกัน โดยในปี ค.ศ. 2008 Hong และคณะ [13] ได้เตรียมฟิล์มที่เกิดจากการผสมอนุภาคแกรฟีน 1 %wt ใน PEDOT:PSS แล้วนำสารผสมนี้ไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มบนแผ่นรองรับที่เป็น indium tin oxide (ITO) พบว่าได้ฟิล์มบางที่มีความโปร่งแสงและมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูง จากงานวิจัยนี้ที่มีการผสมอนุภาคแกรฟีนใน PEDOT:PSS แม้มีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงแต่ก็มีจำกัดในเรื่องของการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีน

จากที่ได้กล่าวไปเบื้องต้นว่า แนวทางในการปรับปรุงความสามารถในการนำไฟฟ้านั้น สามารถทำได้โดยการเติมแกรฟีน แต่แกรฟีนมีข้อจำกัดเรื่องการกระจายตัว จากข้อจำกัดนี้นักวิจัยได้ศึกษาถึงแนวทางที่จะทำให้การกระจายตัวของแกรฟีนนั้นดีขึ้น

โดยแนวทางแรกเป็นการปรับปรุงพื้นผิวของแกรฟีน ด้วยวิธีการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันเข้าไป ซึ่งจะทำให้การกระจายตัวของแกรฟีนดีขึ้น แต่ก็ทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าลดลงเช่นกัน เช่น graphene oxide (GO), reduced graphene oxide (rGO) [37]

อีกแนวทางหนึ่งเป็นการใช้ตัวกลางช่วยในเรื่องการกระจายตัวของแกรฟีน ซึ่งวิธีนี้แกรฟีนไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ไม่มีการเติมหมู่ฟังก์ชัน ทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าของ

แกรฟีนไม่ลดลง แต่วิธีนี้ก็ยังมีข้อจำกัดเรื่องชนิดของการใช้ตัวกลางช่วยในการกระจายตัวของแกรฟีน สำหรับตัวกลางที่เป็นน้ำ สามารถใช้สารประเภท SDS และ PSS เป็นตัวช่วยให้เกิดการกระจายที่ดีได้ โดยใช้ร่วมกับการ sonicate โดย SDS ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (anionic surfactant) เมื่อละลายน้ำแล้วจะเข้าไปแทรกระหว่างชั้นของแกรฟีน ทำให้เกิดการแยกออกของชั้นแกรฟีน ดังแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 การแทรกระหว่างชั้นของแกรฟีนโดย surfactant [38]

โดยในงานวิจัยนี้ มีการใช้ SDS เพื่อช่วยเพิ่มการกระจายตัวของแกรฟีน และนอกจากนี้ ยังมี PSS ที่ใช้ในการสังเคราะห์ PEDOT:PSS ที่อาจไปช่วยเรื่องการกระจายตัวของแกรฟีนด้วยเช่นกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะผสมอนุภาคแกรฟีนลงไปในช่วงตอนของการสังเคราะห์ PEDOT:PSS และเติมสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ ซึ่งในที่นี้คือ SDS เพื่อช่วยให้การกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนดีขึ้น

ในปี ค.ศ. 2009 Fan และคณะ [24] ได้ศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวชนิดต่างๆ ที่มีต่อความสามารถในการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS พบว่า สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น มากกว่าสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ และสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก นั้นไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าการนำไฟฟ้า และเมื่อเพิ่มปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ใน PEDOT:PSS พบว่าค่าการนำไฟฟ้าจะเพิ่มมากขึ้นจนถึงจุดๆหนึ่ง ต่อมาในปี ค.ศ.2013 Sukchol และคณะ [25] ได้ศึกษาผลของขั้นตอนการเติมสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ที่มีต่อความสามารถในการนำไฟฟ้าของสารละลาย PEDOT:PSS พบว่า การเติม SDS ในขั้นตอนการสังเคราะห์ PEDOT:PSS ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าการเติม SDS หลังจากการสังเคราะห์ PEDOT:PSS จากงานวิจัยของ Fan และคณะ [24] และงานวิจัยของ

Sukchol และคณะ [25] จะเห็นได้ว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบในปริมาณที่เหมาะสม และการเติมสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบในขั้นตอนการสังเคราะห์ PEDOT:PSS ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้แนวทางในการปรับปรุงความสามารถในการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS อีกแนวทางหนึ่งคือ การเติมสารโดปทุติยภูมิ (secondary dopant) ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งสารในกลุ่มนี้ไม่มีความสามารถในการนำไฟฟ้า แต่สารกลุ่มนี้สามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าให้แก่ PEDOT:PSS ได้ เช่นสารในกลุ่ม polyol, organic solvent, anionic surfactant และ Ionic liquid บางชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.2 สารกลุ่มนี้สามารถเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS ได้หลายเท่าและเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยาก แต่ก็มีข้อจำกัดเรื่องของความเสถียรเช่นกัน

ในปี ค.ศ. 2005 Ashizawa และคณะ [15] ทำการศึกษาผลของตัวทำละลายชนิดต่างๆ ได้แก่ น้ำ, ethylene glycol, ethanol, isopropanol และ acetonitrile ที่มีต่อความสามารถในการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS โดยพบว่า ethylene glycol ให้ค่าความต้านทานแผ่น (sheet resistance) น้อยที่สุดและมีค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุดที่ 20 %wt โดยความสามารถในการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นประมาณ 230 เท่า

จากข้อมูลเบื้องต้นดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะเตรียม PEDOT:PSS โดยการผสมอนุภาคแกรฟีนและ SDS ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ เข้าไปในขั้นตอนการสังเคราะห์ PEDOT:PSS หลังจากนั้นจะทำการผสมกับ ethylene glycol ซึ่งเป็นสารโดปทุติยภูมิ โดยคาดหวังว่า อนุภาคแกรฟีนและสารโดปทุติยภูมิจะช่วยเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าให้แก่ PEDOT:PSS และสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ จะช่วยให้การกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนดีขึ้น และเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าเมื่อเติมในปริมาณที่เหมาะสม ทำให้ได้ PEDOT:PSS ที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

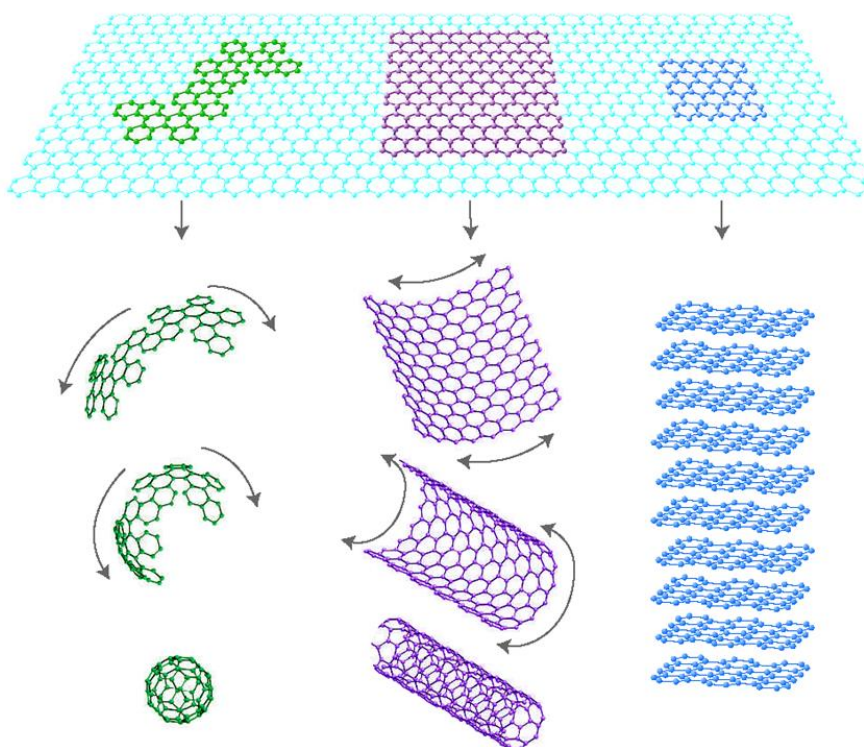
ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างสารโद्यุติยภูมิสำหรับ PEDOT:PSS [10]

Substance	Example	Conductivity Enhancement Factor (Maximum of Different Values)
Polyols	Glycerol	5
	Ethylene glycol	500
	Sorbitol	45
	<i>meso</i> -Erythritol	100
Alcohols with a second polar group	2-Nitroethanol	100
	Methoxyphenol	50
Hydroxylated ethers	Diethylene glycol	5
Ethers	Tetrahydrofuran	5
Amides	<i>N,N</i> -Dimethylformamide	40
	<i>N,N</i> -Dimethylacetamide	100
	<i>N</i> -Methylpyrrolidone	100
Anionic surfactant	Dodecylbenzosulfonate	500
Ionic liquids	1-Butyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate	10

2.3 แกรฟีน (graphene)

คาร์บอนเป็นธาตุที่มีอยู่มากมายบนโลกและเป็นองค์ประกอบในสสารต่างๆ อีกมากมาย โครงสร้างของคาร์บอนที่เกิดขึ้นตามธรรมชาตินั้นมีหลายรูปแบบ อย่างไรก็ตามวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเพียงอย่างเดียวนั้นมีเพียงไม่กี่ชนิด เรียกว่าวัสดุประเภทนี้ว่า อัลลอยด์ของคาร์บอน (allotropes of carbon) เช่น เพชร แกรไฟต์ แกรฟีน บัคกี้บอลและท่อนาโนคาร์บอน

แกรฟีนเป็นวัสดุนาโนที่ถูกค้นพบและรายงานครั้งแรกในปี 2004 โดย Geim และ Novoselov ต่อมาทั้งคู่ก็ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ประจำปี 2010 แกรฟีนเป็นวัสดุ 2 มิติซึ่งประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนที่เรียงตัวกันเป็นหกเหลี่ยมคล้ายรังผึ้ง กราฟีนจัดเป็นองค์ประกอบพื้นฐานของวัสดุคาร์บอนหลายชนิดเช่น แกรไฟต์ บัคกี้บอลและท่อนาโนคาร์บอน เมื่อรูปร่างของแกรฟีนเปลี่ยนไปเป็นทรงกลมเรียกโครงสร้างนี้ว่าบัคกี้บอลซึ่งมีโครงสร้างแบบ 0 มิติ เมื่อแกรฟีนถูกม้วนเป็นแท่งทรงกระบอกเรียกโครงสร้างนี้ว่าท่อนาโนคาร์บอนซึ่งมีโครงสร้างแบบ 1 มิติ หากนำแกรฟีนมาซ้อนกันตั้งแต่ 10 ชั้นขึ้นไปเรียกโครงสร้างนี้ว่าแกรไฟต์ซึ่งมีโครงสร้างแบบ 3 มิติ ซึ่งโครงสร้างของบัคกี้บอล, ท่อนาโนคาร์บอนและแกรไฟต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.24

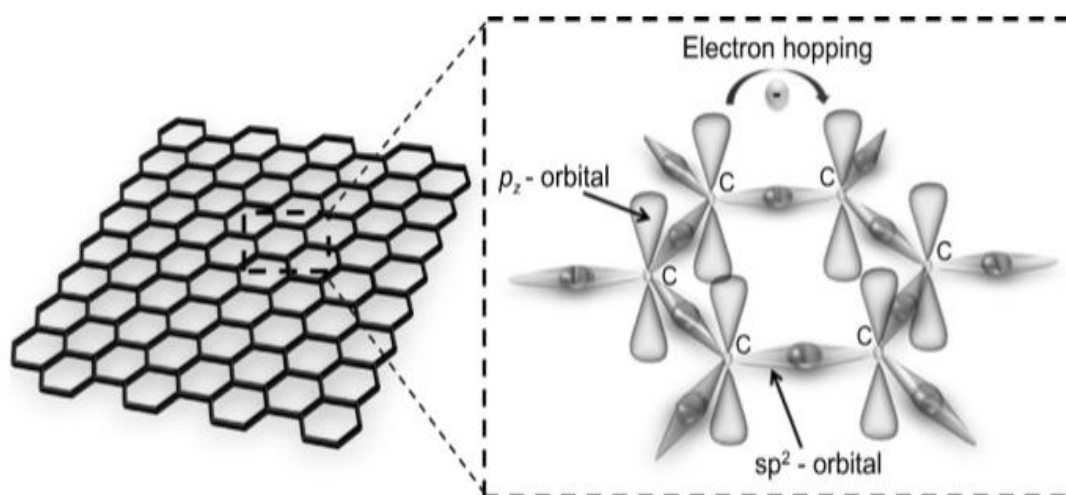


รูปที่ 2.24 องค์ประกอบพื้นฐานที่ได้จากแกรฟีน

(ก) บัคกี้บอล (ข) ท่อนาโนคาร์บอนและ (ค) แกรไฟต์ [39]

2.3.1 โครงสร้างของแกรฟีน

แกรฟีนเป็นวัสดุนำไฟฟ้าที่ประกอบด้วยชั้นของคาร์บอนอะตอมที่หนาเพียง 1 ชั้น มีลักษณะเป็นแผ่นที่มีโครงสร้าง 2 มิติเหมือนตาข่ายรูปหกเหลี่ยมคล้ายรังผึ้ง (hexagonal configuration) อะตอมของคาร์บอนเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮบริดไดซ์เอสพีสอง (sp^2 hybridized bond) ดังแสดงในรูปที่ 2.25 โดยมีความหนาเท่ากับความหนาของคาร์บอนเพียงอะตอมเดียว หรือประมาณ 0.34 นาโนเมตร และมีระยะห่างระหว่างอะตอมคาร์บอน 0.142 นาโนเมตร แกรฟีนมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่สูง และมีสัดส่วนพื้นที่ต่อน้ำหนักเท่ากับ $2,630 \text{ m}^2/\text{g}$ ซึ่งมากกว่าท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (SWCNT) ถึงสองเท่า [13, 14]



รูปที่ 2.25 sp^2 hybridization ของคาร์บอนอะตอมในแกรฟีน [40]

2.3.2 การสังเคราะห์แกรฟีน

การสังเคราะห์แกรฟีน สามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันดังนี้

2.3.2.1 Mechanical cleavage method

เป็นวิธีแรกในการสร้างแกรฟีนชั้นเดียวขึ้นเป็นครั้งแรก โดยใช้สก็อตเทปในการแยกแกรไฟต์ออกเป็นชั้นๆ จนได้แผ่นแกรฟีนบางๆ วิธีนี้สามารถสร้างแกรฟีนที่มีความบริสุทธิ์ได้แกรฟีนที่มีคุณภาพสูงที่สุด แต่อย่างไรก็ตามแกรฟีนที่สร้างด้วยวิธีนี้ยังคงมีพื้นที่ขนาดเล็กและยังไม่สามารถสร้างแกรฟีนในปริมาณมากได้ ซึ่งเป็นเรื่องยากที่จะนำแกรฟีนไปประยุกต์ใช้งานในระดับอุตสาหกรรม

2.3.2.2 Chemical exfoliation

เป็นวิธีการใช้สารเคมีในการแยกแกรไฟต์ออกเป็นชั้นบางๆ วิธีการนี้สามารถสร้างแกรไฟต์ออกไซด์ (graphene oxide, GO) ซึ่งมีการปรับปรุงพื้นผิวของแกรไฟต์ โดยการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันเข้าไป โดยนำแกรไฟต์มาทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งวิธีที่ได้รับความนิยมและให้ผลดีคือ วิธีของ Hummers method ทำให้ได้แกรไฟต์ที่มีความชอบน้ำมากขึ้น ซึ่งหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นมานี้จะช่วยให้การกระจายตัวของแกรไฟต์ในของเหลวที่มีขั้วดีขึ้น ซึ่งเกิดหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจนอยู่ที่ระนาบและที่ขอบ สำหรับหมู่ฟังก์ชันที่ระนาบคือ หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl) และหมู่อีพอกซี (epoxy) สำหรับหมู่ฟังก์ชันที่ขอบคือ หมู่คาร์บอนิล (carbonyl) และคาร์บอกซิล (carboxyl) วิธีการนี้สามารถสร้างแกรไฟต์ออกไซด์ในปริมาณมากได้ แต่ไม่สามารถสร้างให้มีจำนวนชั้นน้อยๆ หรือบางๆ ทำให้แกรไฟต์ออกไซด์ที่ได้นั้นมีความโปร่งแสงน้อย ความสามารถในการนำไฟฟ้าลดลง แต่สามารถกระจายตัวได้ดีในของเหลวที่มีขั้ว

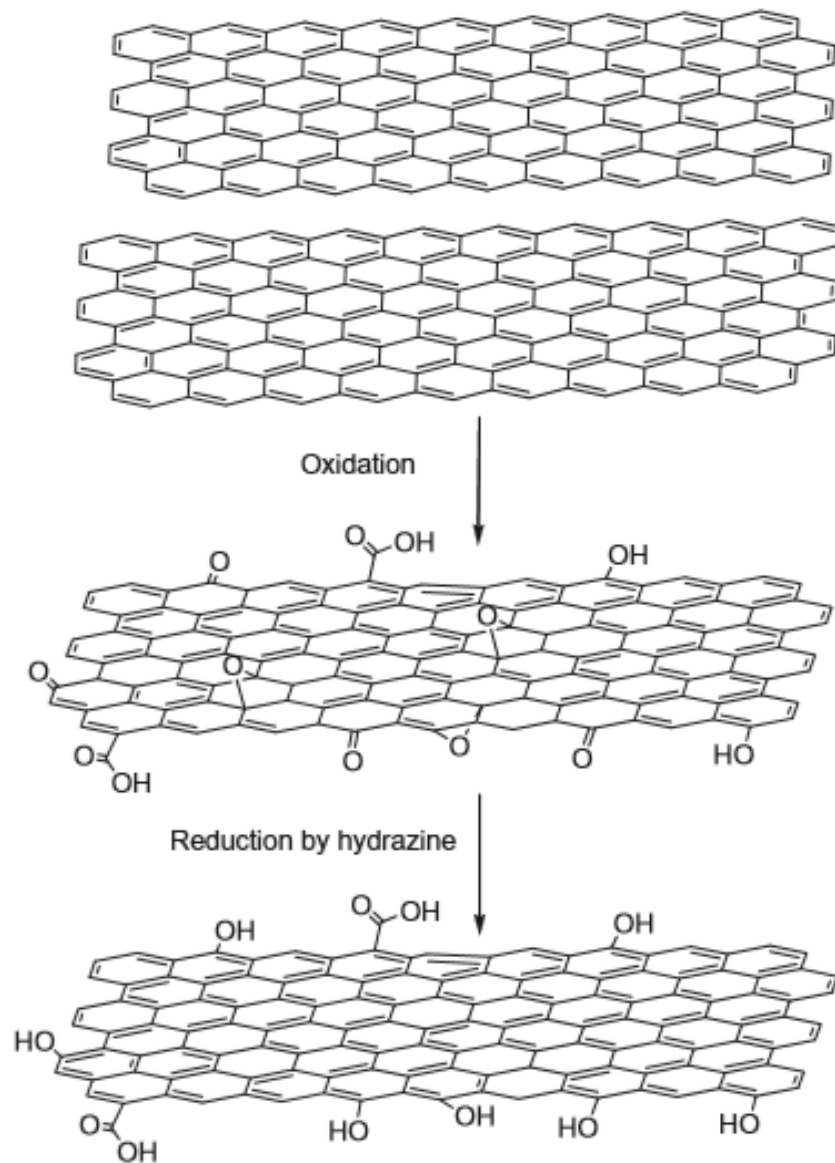
นอกจากนี้แล้วยังสามารถสร้าง reduced graphene oxide (rGO) เป็นการนำแกรไฟต์ออกไซด์มาเติมตัวรีดิวซ์ ซึ่งตัวรีดิวซ์ที่นิยมคือ hydrazine ทำให้เกิดการเปิดวงอีพอกไซด์ (epoxide) ทำให้หมู่ฟังก์ชันของออกซิเจนมีจำนวนลดลง ดังนั้นจึงมีความสามารถในการนำไฟฟ้ามากขึ้นซึ่งมากกว่าแกรไฟต์ออกไซด์แต่ก็ยังน้อยกว่าแกรไฟต์ และยังมีความชอบน้ำลดลงโดยความชอบน้ำของ reduced graphene oxide น้อยกว่าแกรไฟต์ออกไซด์แต่มากกว่าแกรไฟต์ ทำให้ reduced graphene oxide กระจายตัวในของเหลวที่มีขั้วได้ดีกว่าแกรไฟต์แต่น้อยกว่าแกรไฟต์ออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.26 และ 2.27

2.3.2.2 Mechanical exfoliation

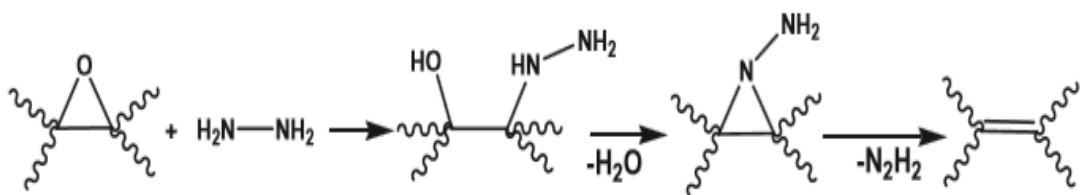
เป็นการสังเคราะห์แกรไฟต์ด้วยวิธีการลอกเชิงกล เป็นการแยกแกรไฟต์ออกเป็นชั้นๆ โดยอาศัยกระบวนการ sonicate แกรไฟต์ในตัวทำละลาย เช่น dimethylformamide (DMF) ในเครื่อง ultrasonicator หรือเครื่อง shear mixer วิธีการนี้สามารถสร้าง graphene flake ที่บางมีคุณภาพสูงและสามารถเพิ่มปริมาณการผลิตได้อีกด้วย แต่แกรไฟต์ที่สังเคราะห์ได้จะมีขนาดเล็กเมื่อนำมาสร้างเป็นฟิล์มจะมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ลดลง

2.3.2.2 Chemical Vapor Deposition, CVD

เป็นการสังเคราะห์แกรไฟต์จากการเคลือบผิวด้วยไอเคมีบนฐานรองรับทำให้เกิดฟิล์มบาง เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมเพราะสามารถสังเคราะห์แกรไฟต์ที่มีขนาดใหญ่ มีคุณภาพสูง และมีความโปร่งแสงมาก สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ได้ การสังเคราะห์แกรไฟต์ด้วยวิธี CVD ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้จะเป็นโลหะ เช่น นิเกิลและทองแดง เป็นต้น



รูปที่ 2.26 การสังเคราะห์ graphene oxide และ reduced graphene oxide จาก graphite [37]



รูปที่ 2.27 การเปิดวงอีพอกไซด์ (epoxide) ด้วย hydrazine [37]

2.3.3 การประยุกต์ใช้งานแกรฟีน

ในปัจจุบันแกรฟีนได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในการผสมกับพอลิเมอร์ เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้าของพอลิเมอร์ให้ดีขึ้น พอลิเมอร์ที่นิยมนำมาผสมกับแกรฟีน ได้แก่ epoxy, polystyrene (PS), polyaniline (PANI), polyurethane (PU), polyvinylidene fluoride (PVDF), polycarbonate (PC), polyethylene terephthalate (PET), polyvinyl alcohol (PVA) และ poly(3,4-ethylenedioxythiophene (PEDOT) เป็นต้น งานวิจัยส่วนใหญ่จะศึกษาถึงวิธีการผสมที่ต่างกันอย่างสิ้นเชิงและยังศึกษาถึงสัดส่วนของแกรฟีนที่เหมาะสมสำหรับพอลิเมอร์แต่ละชนิดเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลหรือสมบัติทางไฟฟ้าของพอลิเมอร์ให้ดีขึ้น จากสมบัติที่โดดเด่นหลายประการของแกรฟีน เช่น การนำไฟฟ้าที่ดี มีความโปร่งใส มีความยืดหยุ่นสูง เป็นต้น ทำให้แกรฟีนเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น เซนเซอร์ แบตเตอรี่ ขั้วนำไฟฟ้าโปร่งใส อุปกรณ์ปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิชชัน (field emission device) และหมึกนำไฟฟ้า เป็นต้น



บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียม PEDOT:PSS ที่ผสมแกรฟีนโดยคาดหวังว่าแกรฟีนจะช่วยเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้า มีการเติมสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบซึ่งในที่นี้คือ SDS โดยคาดหวังว่า SDS จะไปเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนและถ้าอนุภาคแกรฟีนกระจายตัวดี อนุภาคไม่เกาะกลุ่มกันเองหรือเกาะกลุ่มกันน้อยลง ก็จะมีโอกาสที่อนุภาคแกรฟีนนั้นจะกระจายไปทั่วชิ้นงานเกิดการเชื่อมโยงกันของอนุภาคแกรฟีน ส่งผลทำให้การถ่ายเทประจุดีขึ้น และส่งผลให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าดีขึ้นด้วยเช่นกัน

สำหรับการทดสอบสมมติฐานที่คาดว่าไว้ว่า SDS จะไปเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีน และอาจจะช่วยเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าได้นั้น ได้ออกแบบการทดลองเปรียบเทียบถึงวิธีการที่จะผสมแกรฟีนใน PEDOT:PSS โดยวิธีแรกคือแบบ in situ เป็นการเติมแกรฟีนเข้าไปในขั้นตอนการสังเคราะห์ PEDOT:PSS และวิธีที่สองคือแบบ mixing เป็นการเติมแกรฟีนเข้าไปหลังจากสังเคราะห์ PEDOT:PSS เสร็จสิ้นแล้ว ถ้า SDS ทำให้อนุภาคของแกรฟีนกระจายตัวได้ดีขึ้นจริง ไม่ว่าจะเป็นการเติมแกรฟีนเข้าไปในระหว่างการสังเคราะห์ หรือหลังการสังเคราะห์ PEDOT:PSS ก็ควรที่จะมีการกระจายตัวและมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น นอกจากนี้ยังศึกษาถึงผลของปริมาณของ SDS ด้วยเช่นกัน

เมื่อได้วิธีการเตรียมและปริมาณที่เหมาะสมของแกรฟีนและ SDS แล้วจึงเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าอีกครั้งด้วยสารโดปทุติยภูมิซึ่งในที่นี้คือเอทิลีนไกลคอล การปรับปรุงความสามารถในการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS ด้วยการผสมแกรฟีน มีข้อดีอยู่ที่ตัวแกรฟีนเองมีความสามารถในการนำไฟฟ้า และมีความเสถียรต่อสภาพแวดล้อมสูง แต่แกรฟีนก็มีข้อจำกัดเรื่องการกระจายตัว งานวิจัยนี้จึงเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS อีกครั้งด้วยการผสมเอทิลีนไกลคอล เนื่องจากสามารถเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS ได้หลายเท่าและเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยาก สามารถผสมเข้ากับ PEDOT:PSS ได้ดี แต่ก็ยังมีข้อจำกัดเรื่องของความเสถียรเช่นกัน เป็นสาเหตุให้งานวิจัยนี้ใช้ทั้งแกรฟีนและเอทิลีนไกลคอลในการปรับปรุงความสามารถในการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS

ในงานวิจัยนี้แบ่งการดำเนินงานออกเป็น 3 ส่วน โดยส่วนแรก (หัวข้อ 3.3.1) เป็นการเตรียม PEDOT:PSS ส่วนที่สอง (หัวข้อ 3.3.2) เป็นการเตรียม PEDOT:PSS/graphene/SDS และส่วนที่ 3 (หัวข้อ 3.3.3) เป็นการเตรียม PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG ซึ่งเป็นการนำสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดที่สุดจากส่วนที่สอง มาปรับปรุงความสามารถในการนำไฟฟ้าด้วย EG

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน (3,4-ethylenedioxythiophene, EDOT) AR grade จากบริษัท Aldrich
- พอลิสไตรีนซัลโฟนิคแอซิด (poly(styrene sulfonic acid), PSS) AR grade จากบริษัท Aldrich
- แกรฟีน xGnP graphene nanoplatelets H grade จากบริษัท XG sciences
- แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (ammonium persulfate, $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$) AR grade จากบริษัท Aldrich
- ไอร์ออน (III) ซัลเฟต (iron (III) sulfate, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) AR grade จากบริษัท Aldrich
- โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (sodium dodecyl sulfate, SDS) AR grade จากบริษัท Aldrich
- เอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol, EG) AR grade จากบริษัท Aldrich
- น้ำปราศจากไอออน (deionized water)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

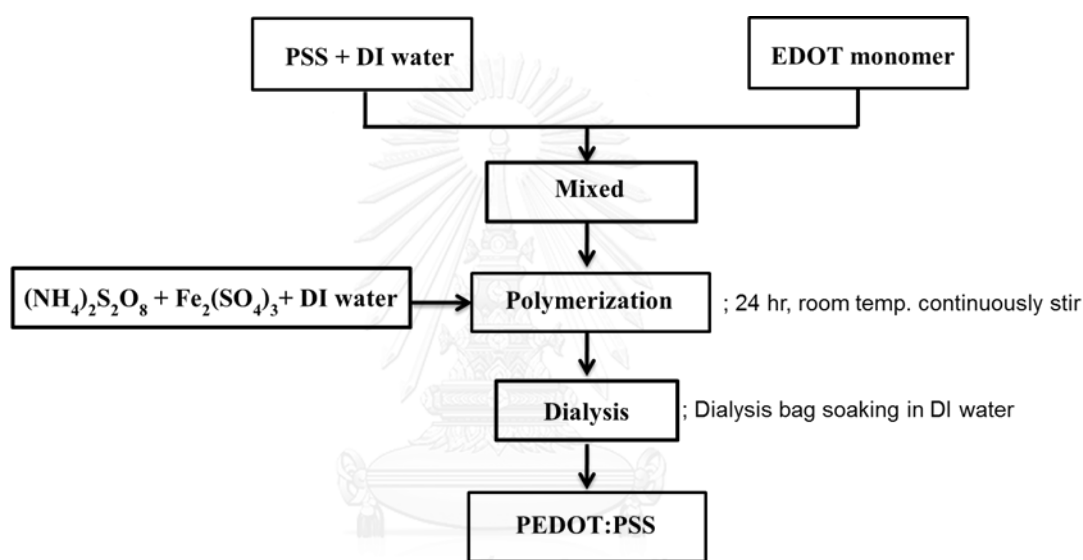
- กระจกสไลด์ สำหรับการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง
 - ขนาด 2.5x2.5 cm สำหรับเตรียมตัวอย่างในการวัดค่าการนำไฟฟ้า
 - ขนาด 1.0x1.0 cm สำหรับเตรียมตัวอย่างในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM, SEM
- กระบอกฉีดยา (syringe) ขนาด 1 mL ของบริษัท Nipro ประเทศไทย สำหรับเตรียมตัวอย่างในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM
- เข็มฉีดยาโลหะ (needle) เบอร์ 27 ขนาด 0.4 x 25 mm ของบริษัท Nipro ประเทศไทย สำหรับเตรียมตัวอย่างในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM
- copper grid สำหรับเตรียมตัวอย่างในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM
- conductive silver paint จากบริษัท SPI Supplies, USA
- dialysis membrane รุ่น Cellu Sep T4 MWCO: 12,000 – 14,000 จากบริษัท MFPI, USA
- เครื่องผสมสารโดยใช้แม่เหล็กหมุนกวน (magnetic stirrer)
- เครื่องเขย่าสารโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูง (ultrasonic sonicator) รุ่น XUBA3 จากบริษัท Grant Instruments
- ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ รุ่น UT70A modern digital multi-purpose meters จากบริษัท Uni-Trend Technology

- เครื่องเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (spin coater) รุ่น model WS-650-23 จากบริษัท Laurell Technologies Corporation

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานและวิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมพอลิ(3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน):พอลิสไตรีนซัลโฟนิคแอซิด (PEDOT:PSS)

การเตรียม PEDOT:PSS มีแผนภูมิลำดับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภูมิลำดับขั้นตอนการเตรียม PEDOT:PSS

การเตรียม PEDOT:PSS นั้นใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ EDOT monomer ต่อ PSS เท่ากับ 1 ต่อ 2.5 โดยให้สารละลายของ PSS มีความเข้มข้นอยู่ที่ 13.5 %wt และอัตราส่วนโดยโมลของ EDOT monomer ต่อ (NH₄)₂S₂O₈ ต่อ Fe₂(SO₄)₃ เท่ากับ 1 ต่อ 1.1 ต่อ 0.06 ตามลำดับ โดยเมื่อทำการสังเคราะห์ PEDOT:PSS เสร็จสิ้นแล้วทำการกำจัดไอออนโดยการแช่ใน dialysis membrane เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้สารที่เป็นของเหลวมีสีน้ำเงินเข้ม

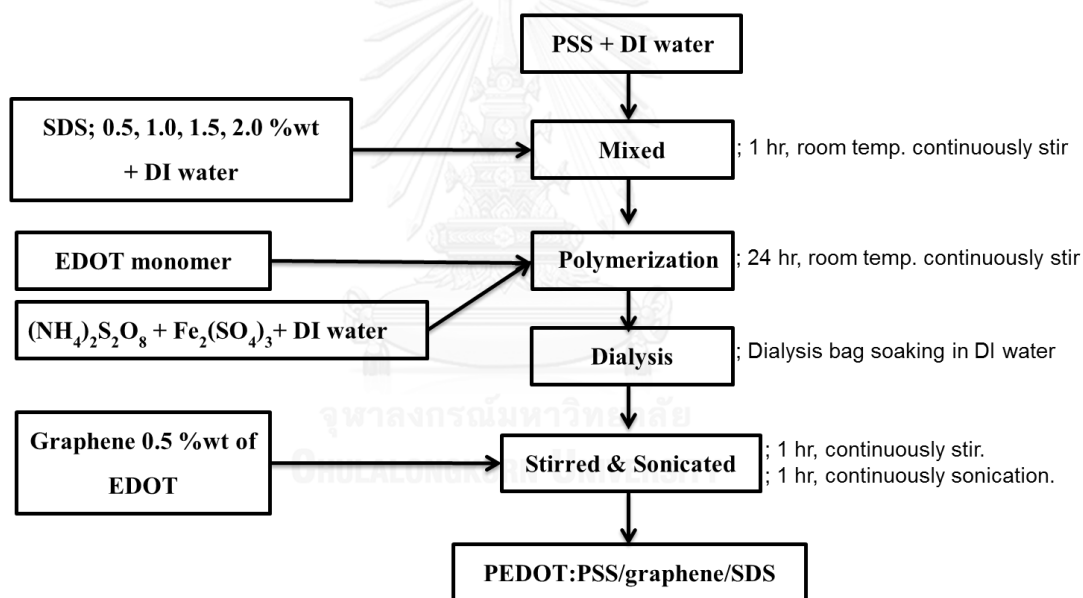
3.3.2 การเตรียมพอลิ(3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน):พอลิสไตรีนซัลโฟนิคแอซิด/แกรฟีน/โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (PEDOT:PSS/graphene/SDS)

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียม PEDOT:PSS ที่ผสมแกรฟีนโดยคาดหวังว่าแกรฟีนจะช่วยเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้า มีการเติม SDS โดยคาดหวังว่า SDS จะไปเพิ่มการกระจายตัวของ

อนุภาคแกรฟีนและถ้าอนุภาคแกรฟีนกระจายตัวดี ก็จะส่งผลให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าดีขึ้นด้วยเช่นกัน สำหรับการทดสอบสมมติฐานที่คาดว่า SDS จะไปเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนและอาจจะช่วยเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าได้นั้น ได้ออกแบบการทดลองเปรียบเทียบถึงวิธีการที่จะผสมแกรฟีนใน PEDOT:PSS โดยวิธีแรกคือแบบ in situ เป็นการเติมแกรฟีนเข้าไปในขั้นตอนการสังเคราะห์ PEDOT:PSS โดยตรง และวิธีที่สองคือแบบ mixing เป็นการเติมแกรฟีนเข้าไปหลังจากสังเคราะห์ PEDOT:PSS เสร็จสิ้นแล้ว นอกจากนี้ยังศึกษาถึงผลของปริมาณของ SDS ด้วยเช่นกัน

3.3.2.1 การเตรียม PEDOT:PSS/graphene/SDS ด้วยวิธี mixing

การเตรียม PEDOT:PSS/graphene/SDS ด้วยวิธี mixing มีแผนภูมิลำดับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังแสดงในรูปที่ 3.2



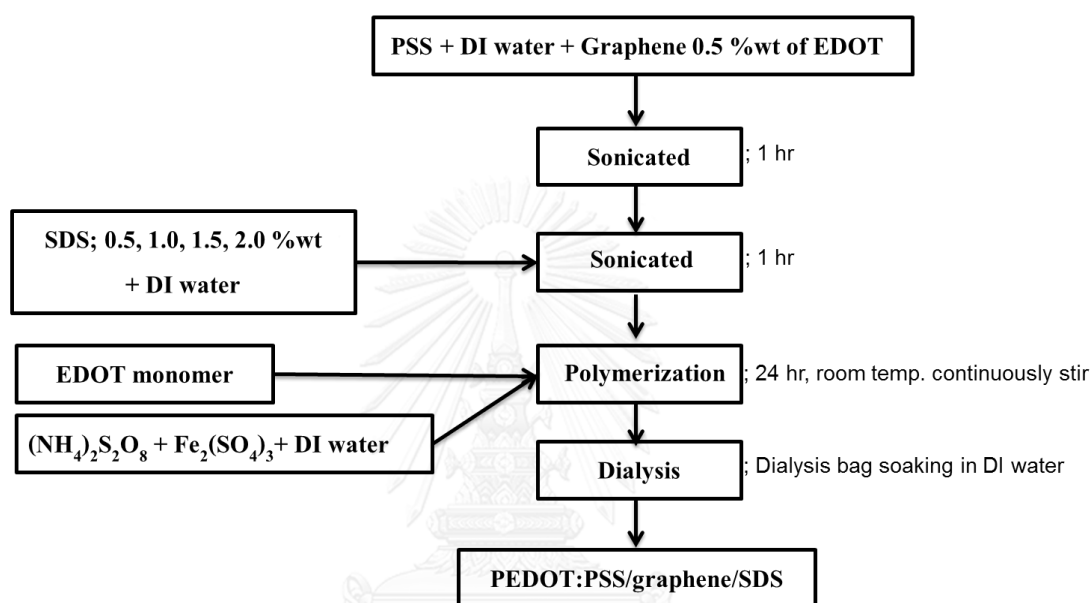
รูปที่ 3.2 แผนภูมิลำดับขั้นตอนการเตรียม PEDOT:PSS/graphene/SDS ด้วยวิธี mixing

การเตรียม PEDOT:PSS/graphene/SDS ด้วยวิธี mixing นั้น ใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ EDOT monomer ต่อ PSS เท่ากับ 1 ต่อ 2.5 และอัตราส่วนโดยโมลของ EDOT monomer ต่อ $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ ต่อ $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ เท่ากับ 1 ต่อ 1.1 ต่อ 0.06 ตามลำดับ ใช้ปริมาณของสารเท่ากับการสังเคราะห์ PEDOT:PSS ในข้อ 3.3.1 แต่มีการเติมแกรฟีนที่ 0.5 %wt ของ EDOT monomer หลังจากสังเคราะห์ PEDOT:PSS เสร็จสิ้นแล้ว และเติม SDS ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ดังนี้ คือ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 %wt โดยเมื่อทำการสังเคราะห์ PEDOT:PSS/graphene/SDS เสร็จ

สิ้นแล้วทำการกำจัดไอออนโดยการแช่ใน dialysis membrane เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้สารที่เป็นของเหลวมีสีน้ำเงินเข้ม

3.3.2.2 การเตรียม PEDOT:PSS/graphene/SDS ด้วยวิธี in situ

การเตรียม PEDOT:PSS/graphene/SDS ด้วยวิธี in situ มีแผนภูมิลำดับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนภูมิลำดับขั้นตอนการเตรียม PEDOT:PSS/graphene/SDS ด้วยวิธี in situ

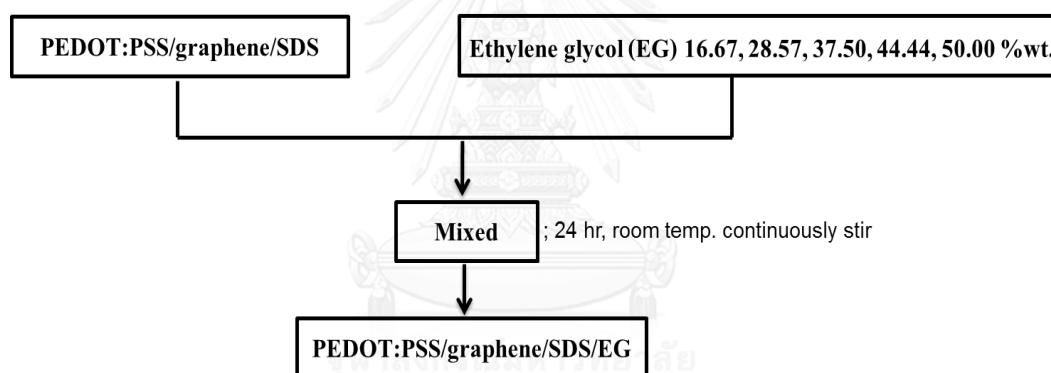
การเตรียม PEDOT:PSS/graphene/SDS ด้วยวิธี in situ นั้น ใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ EDOT monomer ต่อ PSS เท่ากับ 1 ต่อ 2.5 และอัตราส่วนโดยโมลของ EDOT monomer ต่อ $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ ต่อ $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ เท่ากับ 1 ต่อ 1.1 ต่อ 0.06 ตามลำดับ ใช้ปริมาณของสารเท่ากับการสังเคราะห์ PEDOT:PSS ในข้อ 3.3.1 แต่มีการเติมแกรฟีนที่ 0.5 %wt ของ EDOT monomer ในขั้นตอนการสังเคราะห์ PEDOT:PSS และเติม SDS ในขั้นตอนการสังเคราะห์ PEDOT:PSS ด้วยเช่นกัน โดย SDS มีความเข้มข้นแตกต่างกันดังนี้คือ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 %wt เมื่อทำการสังเคราะห์ PEDOT:PSS/graphene/SDS เสร็จสิ้นแล้วทำการกำจัดไอออนโดยการแช่ใน dialysis membrane เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้สารที่เป็นของเหลวมีสีน้ำเงินเข้ม

เมื่อได้วิธีการเตรียม PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เหมาะสมและปริมาณที่เหมาะสมของแกรฟีนและ SDS แล้วจึงเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าอีกครั้งด้วยสารโบทุติยภูมิ ซึ่งในที่นี้คือเอทิลีนไกลคอล ซึ่งอธิบายไว้ในหัวข้อ 3.3.3

3.3.3 การเตรียมพอลิ(3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน):พอลิสไตรีนซัลโฟนิคแอซิด/แกรฟีน/โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต/เอทิลีนไกลคอล (PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG)

การปรับปรุงความสามารถในการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS ด้วยการผสมแกรฟีน มีข้อดีอยู่ที่ตัวแกรฟีนเองมีความสามารถในการนำไฟฟ้า และมีความเสถียรต่อสภาพแวดล้อมสูง แต่แกรฟีนก็มีข้อจำกัดเรื่องการกระจายตัว งานวิจัยนี้จึงเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS อีกครั้งด้วยการผสมเอทิลีนไกลคอล เนื่องจากสามารถเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS ได้หลายเท่าและเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยาก สามารถผสมเข้ากับ PEDOT:PSS ได้ดี แต่ก็ยังมีข้อจำกัดเรื่องของความเสถียรเช่นกัน เป็นสาเหตุให้งานวิจัยนี้ใช้ทั้งแกรฟีนและเอทิลีนไกลคอลในการปรับปรุงความสามารถในการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS

การเตรียม PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG มีแผนภูมิลำดับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนภูมิลำดับขั้นตอนการเตรียม PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG

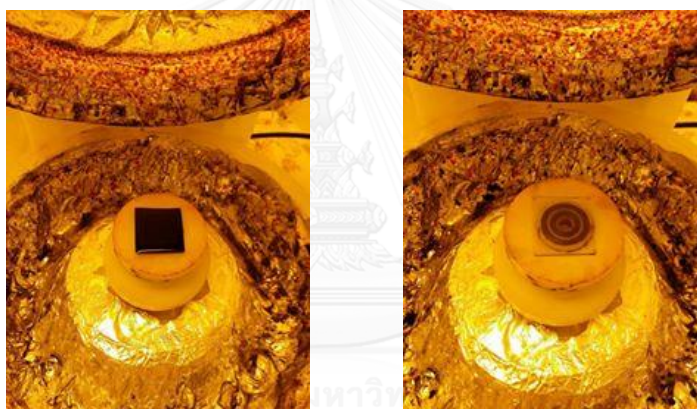
การเตรียม PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG นั้น ทำได้โดยการผสม PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่ได้จากการเตรียมในหัวข้อ 3.3.2 กับเอทิลีนไกลคอล โดยเติมเอทิลีนไกลคอลที่ความเข้มข้นแตกต่างกันดังนี้ 16.67, 28.57, 37.50, 44.44 และ 50.00 %wt จะได้สารที่เป็นของเหลวมีสีน้ำเงินเข้ม ดังแสดงในรูปที่ 3.5

สำหรับสารที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้ทุกสูตร ถูกนำไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มบนกระจกสไลด์ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง ที่สภาวะเดียวกันทุกสูตรคือ เคลือบชั้นเดียว ที่ความเร็วรอบ 1500 rpm เป็นเวลา 30 วินาที หลังจากนั้นทำให้แห้งโดยการอบที่อุณหภูมิ 115 °C เป็นเวลา 5 นาที ซึ่งขั้นตอนการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงแสดงไว้ในรูปที่ 3.6 ซึ่ง (ก) เป็นขั้นตอนการหยดสารลงบน

กระจกสไลด์ก่อนเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงและ (ข) เป็นขั้นตอนหลังจากการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงเสร็จสิ้นแล้ว



รูปที่ 3.5 PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG ที่เตรียมได้



(ก) (ข)

รูปที่ 3.6 การเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (ก) ก่อนเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงและ (ข) หลังจากการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงเสร็จสิ้นแล้ว



รูปที่ 3.7 ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG ที่เตรียมได้

3.4 การตรวจสอบสมบัติต่างๆ

3.4.1 ศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคแอทเทนนูเอตโททัลรีเฟล็กชันฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy, ATR-FTIR)

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียม PEDOT:PSS/graphene/SDS และ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG ที่มีการเติม graphene และ SDS เข้าไปในขั้นตอนการสังเคราะห์ PEDOT:PSS เมื่อสังเคราะห์ PEDOT:PSS เสร็จสิ้นแล้วจึงผสมกับเอทิลีนไกลคอล ดังนั้นการพิสูจน์เอกลักษณ์เพื่อยืนยันว่าเกิดการสังเคราะห์ของ EDOT มอนอเมอร์เป็น PEDOT และการมีอยู่ของ SDS และเอทิลีนไกลคอลจึงเป็นสิ่งสำคัญ การวิเคราะห์ทำได้โดยนำสารที่เตรียมได้ซึ่งเป็นของเหลวที่มีสีน้ำเงินเข้มไปขึ้นรูปเป็นฟิล์ม แล้วนำฟิล์มที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ATR-FTIR รุ่น Nicolet iS10 ATR-FTIR ของบริษัท Thermo Fisher Scientific โดยมีช่วงการวิเคราะห์ที่ $400\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$ ความละเอียดในการเก็บข้อมูล (resolution) ที่ 4 cm^{-1} และจำนวนรอบของการสแกนเป็น 32 รอบ โดยฟิล์มที่เตรียมมีดังต่อไปนี้

1. ฟิล์ม PEDOT:PSS
2. ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene
3. ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS
4. ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG



รูปที่ 3.8 เครื่องแอทเทนนูเอตโททัลรีเฟล็กชันฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (ATR-FTIR รุ่น Nicolet iS10)

3.4.2 ศึกษาสัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีน

3.4.2.1 เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

งานวิจัยนี้ใช้เทคนิค SEM เพื่อดูลักษณะภายนอก ดูการอยู่ร่วมกัน การเชื่อมโยงกันของอนุภาคต่างๆ บนฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีการเติมสารหลายชนิดเข้าไปในสารละลายของ PEDOT:PSS ทั้งในขั้นตอนการสังเคราะห์และหลังจากที่สังเคราะห์เสร็จสิ้นแล้ว ดังนั้นการศึกษาลักษณะการอยู่ร่วมกันของอนุภาคต่างๆ จึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากบริษัท JOEL รุ่น JSM-6480LV ทำการศึกษาที่ศักย์ไฟฟ้า 15 kV โดยตัวอย่างถูกติดด้วยกระดาษคาร์บอนลงบนสตัป (stub) ก่อนนำไปเคลือบด้วยทอง

3.4.2.2 เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy, TEM)

งานวิจัยนี้ใช้เทคนิค TEM เพื่อดูลักษณะภายในของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ ดูเงาของการซ้อนทับกันของอนุภาคแกรฟีน ผู้วิจัยคาดหวังว่าการทดสอบด้วยเทคนิค TEM จะเห็นถึงลักษณะหรือปริมาณของชั้นแกรฟีนที่ซ้อนทับหรือเกาะกัน และถ้าเป็นไปตามสมมติฐานที่ว่า SDS จะไปเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีน ก็ควรที่จะเห็นถึงจำนวนของชั้นแกรฟีนที่ซ้อนทับหรือเกาะกันในปริมาณที่น้อยลงเมื่อมีการเติม SDS โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน จากบริษัท JOEL รุ่น JEM-1400 ทำการศึกษาที่ศักย์ไฟฟ้า 120 kV โดยตัวอย่างถูกเตรียมด้วยการเคลือบบน copper grids

3.4.2.3 เทคนิคจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy, AFM)

งานวิจัยนี้ใช้เทคนิค AFM เพื่อหาค่าความขรุขระเฉลี่ย (average roughness, Ra) ซึ่งค่า Ra นี้สามารถบอกถึงลักษณะความขรุขระของพื้นผิว สามารถใช้ในการอ้างอิงถึงผลของการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีน ลักษณะหรือปริมาณของชั้นแกรฟีน และถ้าเป็นไปตามสมมติฐานที่ว่า SDS จะไปเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีน ก็ควรที่จะเห็นถึงค่า Ra ที่ลดลงเมื่อมีการเติม SDS สำหรับภาพที่ได้จากเทคนิค AFM ในงานวิจัยนี้มีขนาดพื้นที่เท่ากับ $10 \times 10 \mu\text{m}$ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมรุ่น Nanoscope IV multimode ของ Veeco Instruments, USA ใน tapping mode

3.4.3 ศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้า

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง สามารถทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์ต่อเข้าสัมผัสกับชั้นสารตัวอย่างและวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรง สำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชั้นสารตัวอย่าง มีหลักการทั่วไปคือ ผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชั้นสารตัวอย่าง แล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดบนชั้นสารนั้น ซึ่งสามารถแบ่งย่อยไปได้หลายวิธีคือ วิธีแวนเดอเพาว (Van Der Pauw method), วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น (linear four point probe method) และวิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้วเชิงเส้น (linear two point probe method)

ถ้าป้อนสนามไฟฟ้าเข้าไปในวัสดุยาว l มีพื้นที่ภาคตัดขวาง A จะเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าซึ่ง สัมพันธ์กับสนามไฟฟ้างสมการ

$$V = El \quad (1)$$

และมีการไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นโดย

$$I = nqv_d A \quad (2)$$

ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าหาได้จาก

$$J = \frac{I}{A} = nqv_d = nq \mu E \quad (3)$$

เมื่อ	n	คือ ความหนาแน่นของพาหะ
	q	คือ ขนาดประจุไฟฟ้า
	v_d	คือ อัตราเร็วของพาหะ
	μ	คือ สภาพคล่องตัว
	E	คือ สนามไฟฟ้า

และจากกฎของโอห์ม $I = \frac{V}{R}$

และ $\sigma = nq\mu$

เมื่อเทียบกับสมการ (2) และ (3) จะได้

$$\sigma = \frac{I}{RA} \quad (4)$$

และ
$$\sigma = nq\mu \quad (5)$$

สำหรับในสารกึ่งตัวนำ การนำไฟฟ้าจะเกิดจากพาหะคืออิเล็กตรอนและโฮล ดังนั้น สภาพนำไฟฟ้า เขียนได้เป็น

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p) \quad (6)$$

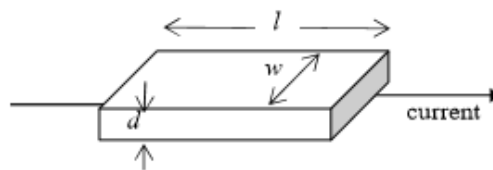
และจากความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับสภาพต้านทานไฟฟ้า $\sigma = \frac{1}{\rho}$

ดังนั้น สภาพต้านทานไฟฟ้าจึงมีค่าเป็น

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q(n\mu_n + p\mu_p)} \quad (7)$$

หรือเทียบกับสมการ (4) จะได้

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (8)$$



รูปที่ 3.9 แสดงขนาดของฟิล์มยาว l กว้าง w หนา d

เมื่อพิจารณาฟิล์มยาว l กว้าง w หนา d ตามรูปที่ 3.9 จากกฎของโอห์มและใช้สมการ (8) จะคำนวณหาความต้านทานของฟิล์มได้ดังนี้

$$R = \frac{V}{I} = \frac{\rho l}{A} = \frac{\rho l}{wd} \quad (9)$$

ในกรณีที่ฟิล์มเป็นรูปสี่เหลี่ยม ($l = w$) ดังนั้น สมการที่ (9) เขียนใหม่ได้เป็น

$$R = R_s = \frac{\rho}{d} \quad (10)$$

เมื่อ R_s คือ ความต้านทานแผ่น (sheet resistance)

ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า

แต่ถ้า $l \neq w$ จะได้ว่า

$$R_s = \frac{\rho}{d} = R \frac{w}{l} \quad (11)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{R_s \times t} \quad (12)$$

ในงานวิจัยนี้จะทำการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธี 2 ขั้วเชิงเส้น โดยจะใช้ conductive silver paint ป้ายบนตัวอย่างเพื่อทำเป็นขั้วสองเส้น แล้วทำการวัดค่าความต้านทานที่ได้ และใช้สมการที่ (11) และ (12) ในการคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่น และค่าสภาพการนำไฟฟ้า



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียม PEDOT:PSS ที่มีการเติมแกรฟีนเข้าไปในขั้นตอนการสังเคราะห์ PEDOT:PSS โดยคาดหวังว่าแกรฟีนจะช่วยเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้า และมีการเติมสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบซึ่งในที่นี้คือโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตหรือ SDS โดยคาดหวังว่า SDS จะไปเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนและอาจจะช่วยเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าได้เมื่อได้ปริมาณที่เหมาะสมของแกรฟีนและ SDS แล้วจึงเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าด้วยสารโพลีเอทิลีนไกลคอลหรือ EG

สำหรับผลการทดลองและอภิปรายผลในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยส่วนแรก (หัวข้อ 4.1) คือผลและการอภิปรายผลการทดลองของการเตรียม PEDOT:PSS/graphene/SDS ส่วนที่สอง (หัวข้อ 4.2) คือผลและการอภิปรายผลการทดลองของการเตรียม PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG ซึ่งเป็นการนำสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดจากข้อ 4.1 มาปรับปรุงความสามารถในการนำไฟฟ้าด้วย EG และส่วนที่สาม (หัวข้อ 4.3) คือผลและการอภิปรายผลการทดลองของการปรับปรุงความสามารถในการนำไฟฟ้าด้วย SDS และ EG

4.1 การเตรียมพอลิ(3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน):พอลิสไตรีนซัลโฟนิคแอซิด/แกรฟีน/โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (PEDOT:PSS/graphene/SDS)

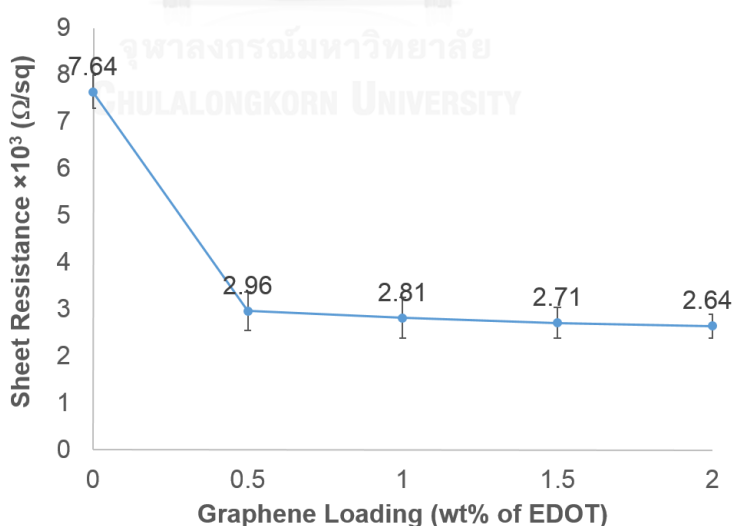
ในการเตรียมพอลิ(3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน):พอลิสไตรีนซัลโฟนิคแอซิด/แกรฟีน/โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต หรือ PEDOT:PSS/graphene/SDS ผู้วิจัยได้เริ่มจากการศึกษาหาปริมาณสัดส่วนสารที่ใช้ในการสังเคราะห์และสถานะที่ใช้ในการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (spin coating) เพื่อควบคุมให้สารทุกสูตรที่เตรียมได้นั้นสามารถเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงที่สถานะเดียวกัน ความเร็วรอบและจำนวนชั้นที่เคลือบเท่ากัน โดยที่ทุกสูตรนั้นยังมีสารเคลือบอยู่เต็มและสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น

จากการทดลองพบว่าสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ซึ่งก็คือ SDS ส่งผลต่อความหนืดของสารที่เตรียมได้ กล่าวคือเมื่อปริมาณของ SDS มากขึ้นจะส่งผลให้ความหนืดของสารลดลง ทำให้การเคลือบของสารบนแผ่นกระจกสไลด์ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งอาจส่งผลทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของการตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้าได้ ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทดลองหาปริมาณ SDS ในช่วงที่เหมาะสม พบว่าเมื่อใช้ SDS ประมาณไม่เกิน 2 %wt จะสามารถทำให้การเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงของสารที่เตรียมได้บนกระจกสไลด์ดีดสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น เมื่อได้ช่วงของปริมาณ SDS ที่เหมาะสมแล้ว ผู้วิจัยได้ศึกษาถึงปริมาณของแกรฟีนที่เหมาะสมที่จะใช้ในงานวิจัยนี้ต่อไป

4.1.1 การปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของแกรฟีน

เมื่อผู้วิจัยได้ทดลองหาปริมาณ SDS ในช่วงที่เหมาะสม พบว่าเมื่อใช้ SDS ไม่เกิน 2 %wt ซึ่งสามารถทำให้การเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงของสารที่เตรียมได้บนกระจกสไลด์ติดสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นแล้ว จึงศึกษาหาปริมาณของแกรฟีนที่เหมาะสมที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้ต่อไป โดยได้สังเคราะห์ PEDOT:PSS โดยควบคุมสภาวะในการทดลอง ให้มีขั้นตอนการเติมสารที่เหมือนกัน ปริมาณของสารเคมีที่เท่ากัน และเติมแกรฟีนเข้าไปในขั้นตอนการสังเคราะห์โดยเติมแกรฟีนในปริมาณที่แตกต่างกันดังนี้คือ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 %wt ของ 3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน (3,4-ethylenedioxythiophene, EDOT) ซึ่งเป็นมอนอเมอร์ที่ในการสังเคราะห์ PEDOT สารที่สังเคราะห์ได้เป็นของเหลวที่มีสีน้ำเงินเข้ม เมื่อนำไปเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงบนกระจกสไลด์และทำให้แห้งแล้วนำไปวัดค่าความต้านทานแผ่น (sheet resistance) เพื่อดูความสามารถในการนำไฟฟ้า โดยถ้า sheet resistance มีค่าต่ำหมายถึงมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดี

จากการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณของแกรฟีนเพิ่มขึ้นค่า sheet resistance ลดลง หมายถึงมีความสามารถในการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยในช่วงแรกที่ปริมาณของแกรฟีนเท่ากับ 0.5 %wt ของ EDOT มอนอเมอร์นั้นค่า sheet resistance ลดลงอย่างมาก และเมื่อปริมาณของแกรฟีนเพิ่มมากขึ้นค่า sheet resistance ลดลงเพียงเล็กน้อย ที่ปริมาณแกรฟีนตั้งแต่ 0.5 %wt ของ EDOT มอนอเมอร์ไปจนถึง 2.0 %wt ของ EDOT มอนอเมอร์มีค่า sheet resistance ที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลของปริมาณที่แตกต่างกันของแกรฟีน ต่อค่าความต้านทานแผ่น (sheet resistance)

ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าปริมาณแกรฟีนที่ 0.5 %wt ของ EDOT มอนอเมอร์ สามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงกันของอนุภาคแกรฟีน และเมื่อปริมาณของแกรฟีนมากขึ้นค่า sheet resistance ไม่ได้ลดลงมากนักและการเติมแกรฟีนในปริมาณที่มากเกินไปส่งผลเสียต่อการกระจายตัวอาจทำให้เกิดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคแกรฟีนได้ง่าย ด้วยสาเหตุนี้ผู้วิจัยจึงเลือกใช้แกรฟีนที่ 0.5 %wt ของ EDOT มอนอเมอร์ในงานวิจัยนี้

4.1.2 การปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียม PEDOT:PSS ที่ผสมแกรฟีน โดยคาดหวังว่าแกรฟีนจะช่วยเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าและเติมสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบซึ่งในที่นี้คือ SDS โดยคาดหวังว่า SDS จะไปเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนและอาจจะช่วยเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ สำหรับการผสมแกรฟีนนั้นงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงวิธีการเติมแกรฟีนที่เหมาะสม โดยวิธีแรกคือแบบ in situ เป็นการเติมแกรฟีนเข้าไปในขั้นตอนการสังเคราะห์ PEDOT:PSS โดยตรงและวิธีที่สองคือแบบ mixing เป็นการเติมแกรฟีนเข้าไปหลังจากสังเคราะห์ PEDOT:PSS เสร็จสิ้นแล้ว

เมื่อผู้วิจัยได้ศึกษาและทราบถึงผลของปริมาณแกรฟีนที่เหมาะสมว่าอยู่ที่ 0.5 %wt ของ EDOT มอนอเมอร์แล้วได้ศึกษาถึงผลของปริมาณ SDS ที่เหมาะสมโดยความเข้มข้นของ SDS ที่ศึกษาอยู่ที่ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 %wt ซึ่งผลของการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีน และความสามารถในการนำไฟฟ้าที่วัดได้จะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 4.1.4 และ 4.3 ตามลำดับ

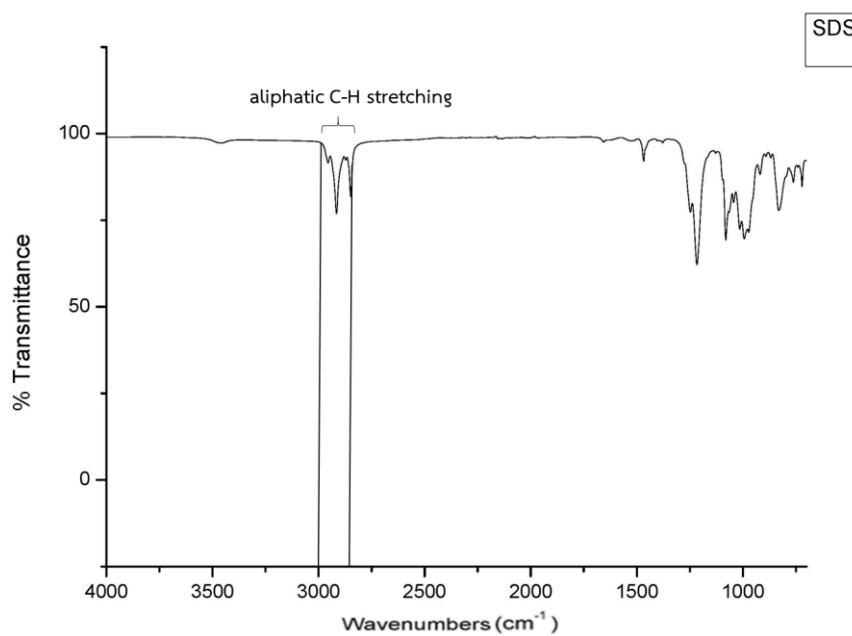
4.1.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคแอทเทนนูเอเทดโททัลรีเฟลคชันฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy, ATR-FTIR)

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียม PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่มีการเติม graphene และ SDS เข้าไปในขั้นตอนการสังเคราะห์ PEDOT:PSS ดังนั้นการพิสูจน์เอกลักษณ์เพื่อยืนยันว่าเกิดการสังเคราะห์ของ EDOT มอนอเมอร์เป็น PEDOT และการมีอยู่ของ SDS จึงเป็นสิ่งสำคัญ การวิเคราะห์ทำได้โดยนำสารที่เตรียมได้ซึ่งเป็นของเหลวที่มีสีน้ำเงินเข้มไปขึ้นรูปเป็นฟิล์ม แล้วนำฟิล์มที่ได้นี้ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ATR-FTIR โดยฟิล์มที่เตรียมมีดังต่อไปนี้

1. ฟิล์ม PEDOT:PSS ที่ไม่ผสม graphene และไม่ผสม SDS
2. ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene ที่ไม่ผสม SDS
3. ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene ที่ผสม SDS

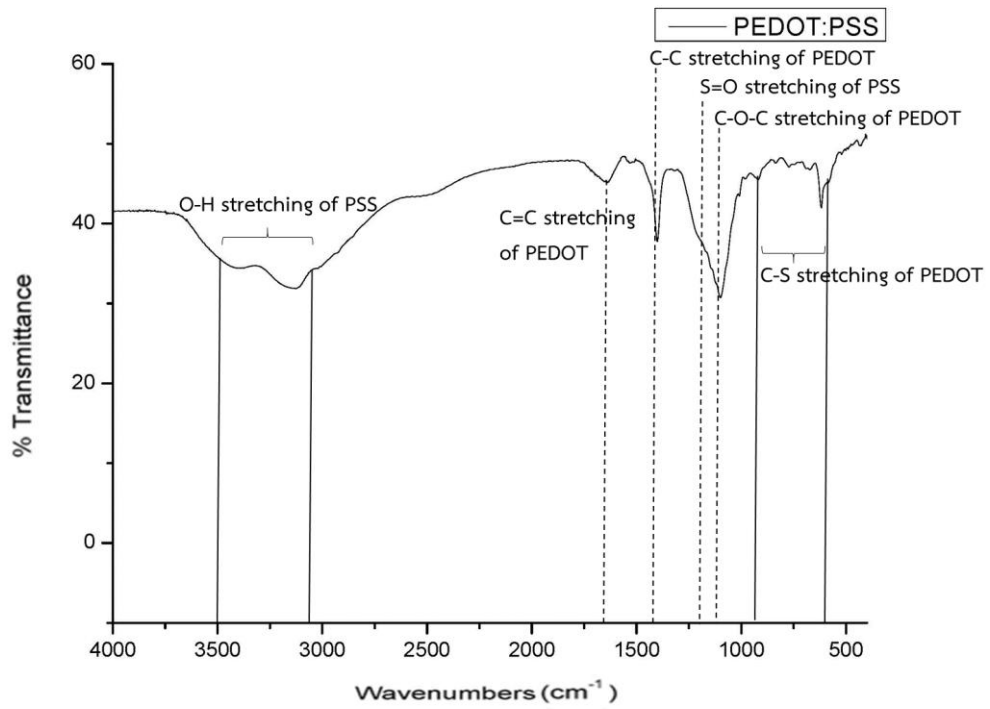
รูปที่ 4.2 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของ SDS ซึ่งพบว่า SDS มีการดูดกลืนอินฟราเรดสเปกตรัมที่เลขคลื่นประมาณ 3000 cm^{-1} ถึง 2800 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึง aliphatic C-H stretching

ในโครงสร้างของ SDS ทั้งนี้ผู้วิจัยคาดหวังว่าจะพบพีคการดูดกลืนของรังสีอินฟราเรดที่แสดงถึง aliphatic C-H stretching ของ SDS ในสูตรที่มีการเติม SDS

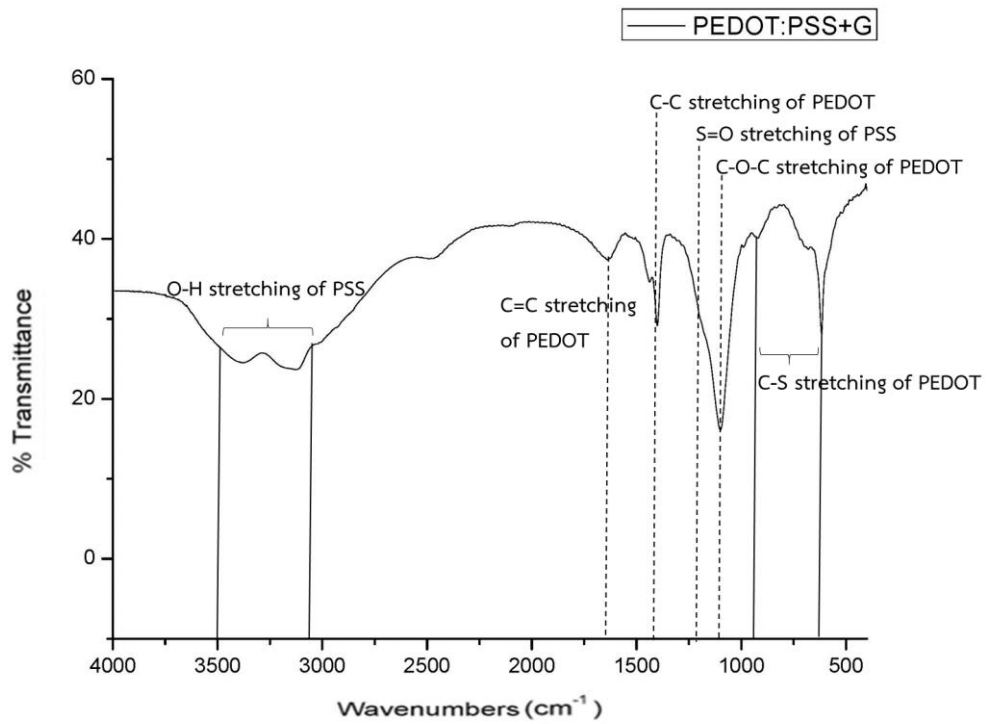


รูปที่ 4.2 ATR-FTIR สเปกตรัมของ SDS

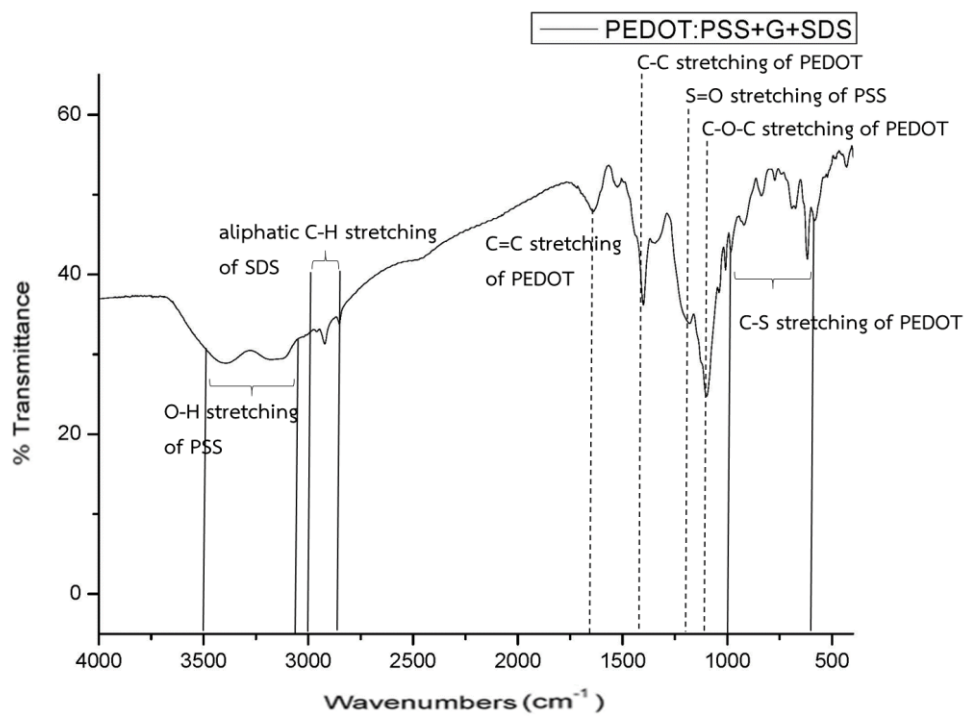
รูปที่ 4.3 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม PEDOT:PSS ที่ไม่ผสม graphene และไม่ผสม SDS, รูปที่ 4.4 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene ที่ไม่ผสม SDS และรูปที่ 4.5 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene ที่ผสม SDS พบว่ามีการดูดกลืนอินฟราเรดสเปกตรัมที่เลขคลื่นต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งเลขคลื่นที่ประมาณ 3500 cm^{-1} ถึง 3200 cm^{-1} แสดงถึง O-H stretching ในโครงสร้างของ PSS เลขคลื่นที่ประมาณ 1175 cm^{-1} , 1126 cm^{-1} และ 1040 cm^{-1} แสดงถึง S=O stretching ในโครงสร้างของ PSS [41] เลขคลื่นที่ประมาณ 1522 cm^{-1} และ 1513 cm^{-1} แสดงถึง C=C stretching ในโครงสร้างของ PEDOT [42], เลขคลื่นที่ประมาณ 1316 cm^{-1} แสดงถึง C-C stretching ในโครงสร้างของ PEDOT, เลขคลื่นที่ประมาณ 1199 cm^{-1} และ 1087 cm^{-1} แสดงถึง C-O-C stretching ในโครงสร้างของ PEDOT, เลขคลื่นที่ประมาณ 982 cm^{-1} , 839 cm^{-1} และ 689 cm^{-1} แสดงถึง C-S stretching ในโครงสร้างของ PEDOT [43] สำหรับสูตรที่มีการเติม SDS พบว่ามีการดูดกลืนอินฟราเรดสเปกตรัมที่เลขคลื่นประมาณ 3000 cm^{-1} ถึง 2800 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึง aliphatic C-H stretching ในโครงสร้างของ SDS ตามที่คาดหวังไว้



รูปที่ 4.3 ATR-FTIR สเปกตรัมของฟิล์ม PEDOT:PSS



รูปที่ 4.4 ATR-FTIR สเปกตรัมของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene

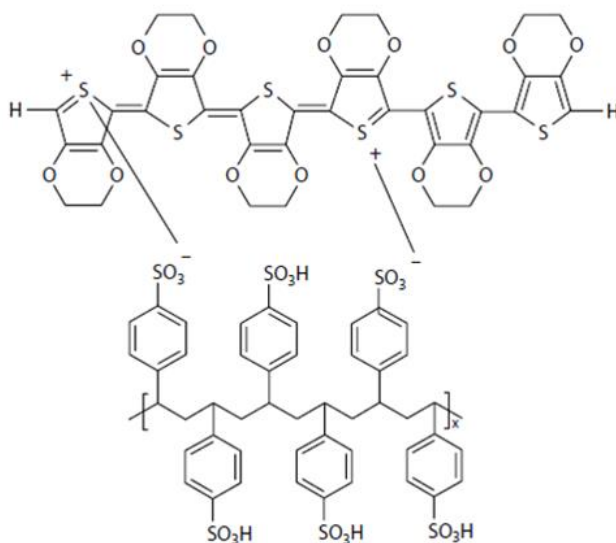


รูปที่ 4.5 ATR-FTIR สเปกตรัมของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS

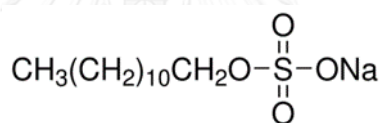
ตารางที่ 4.1 ตำแหน่งของพีคที่พบในสเปกตรัมของฟิล์ม PEDOT:PSS, ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene และ PEDOT:PSS/graphene/SDS

เลขคลื่น (cm ⁻¹)	หมู่ฟังก์ชัน
3500-3200	O-H stretching ใน PSS
1175, 1126 และ 1040	S=O stretching ใน PSS
1522 และ 1513	C=C stretching ใน PEDOT
1316	C-C stretching ใน PEDOT
1199 และ 1087	C-O-C stretching ใน PEDOT
982, 839 และ 689	C-S stretching ใน PEDOT
3000-2800	aliphatic C-H stretching ใน SDS

ผลดังกล่าว สอดคล้องกับโครงสร้างของ PEDOT:PSS และ SDS ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 โครงสร้างของ PEDOT:PSS [6]



รูปที่ 4.7 โครงสร้างของ SDS

4.1.4 การศึกษาสัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ

จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่างานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียม PEDOT:PSS ที่ผสมแกรฟีนโดยคาดหวังว่าแกรฟีนจะช่วยเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้า มีการเติมสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบซึ่งในที่นี้คือ SDS โดยคาดหวังว่า SDS ไปเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนและถ้าอนุภาคของแกรฟีนกระจายตัวดี อนุภาคไม่เกาะกลุ่มกันเองหรือเกาะกลุ่มกันน้อย ก็มีโอกาที่อนุภาคแกรฟีนนั้นจะกระจายไปทั่วชิ้นงานเกิดการเชื่อมโยงกันของอนุภาคแกรฟีน ส่งผลทำให้การถ่ายเทประจุดีขึ้น และส่งผลให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าดีขึ้นด้วยเช่นกัน

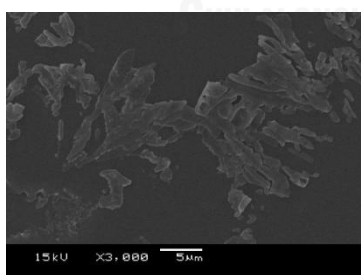
สำหรับการทดสอบสมมติฐานที่คาดไว้ว่า SDS ไปเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนและอาจช่วยเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าได้นั้น ผู้วิจัยได้ออกแบบการทดลองเพื่อเปรียบเทียบถึงวิธีการที่จะผสมแกรฟีนใน PEDOT:PSS โดยวิธีแรกคือแบบ in situ เป็นการเติมแกรฟีนเข้าไปในขั้นตอนการสังเคราะห์ PEDOT:PSS โดยตรง และวิธีที่สองคือแบบ mixing เป็นการ

เติมแกรฟีนเข้าไปหลังจากสังเคราะห์ PEDOT:PSS เสร็จสิ้นแล้ว ถ้า SDS ทำให้อนุภาคของแกรฟีนกระจายตัวได้ดีขึ้นจริง ไม่ว่าจะเป็นการเติมแกรฟีนเข้าไปในขั้นตอนการสังเคราะห์ PEDOT:PSS โดยตรง หรือหลังจากสังเคราะห์ PEDOT:PSS เสร็จสิ้นแล้ว ก็ควรที่จะมีการกระจายตัว และมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น

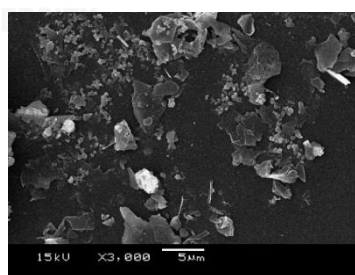
นอกจากนี้ยังศึกษาถึงผลของปริมาณของ SDS ที่มีต่อสมบัติของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบด้วยเช่นกัน แต่เนื่องจากที่เคยกล่าวไว้ข้างต้นว่า SDS ส่งผลต่อความหนืดของสารที่เตรียมได้ ปริมาณ SDS ในช่วงที่เหมาะสมที่สามารถทำให้การเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงของสารที่เตรียมได้บนกระจกสไลด์ติดสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นคือไม่เกิน 2 %wt ดังนั้นความเข้มข้นของ SDS ที่ศึกษาจึงอยู่ที่ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 %wt

4.1.4.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

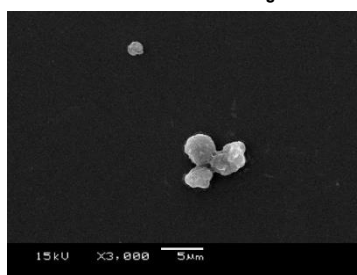
สำหรับการพิสูจน์สมมติฐานที่ว่า SDS ไปเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนนั้น งานวิจัยนี้ใช้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM เพื่อดูลักษณะภายนอก ดูการอยู่ร่วมกัน การเชื่อมโยงกันของอนุภาคต่างๆ บนฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีการเติมสารหลายชนิดเข้าไปในสารละลายของ PEDOT:PSS ทั้งในระหว่างขั้นตอนการสังเคราะห์และหลังจากที่สังเคราะห์ PEDOT:PSS เสร็จสิ้นแล้ว ดังนั้นการศึกษาลักษณะการอยู่ร่วมกันของอนุภาคต่างๆ จึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PEDOT:PSS, แกรฟีนและ SDS ที่ยังไม่ได้ผสมกันจากเทคนิค SEM แสดงดังรูปที่ 4.8, 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 ภาพ SEM ของฟิล์ม PEDOT:PSS

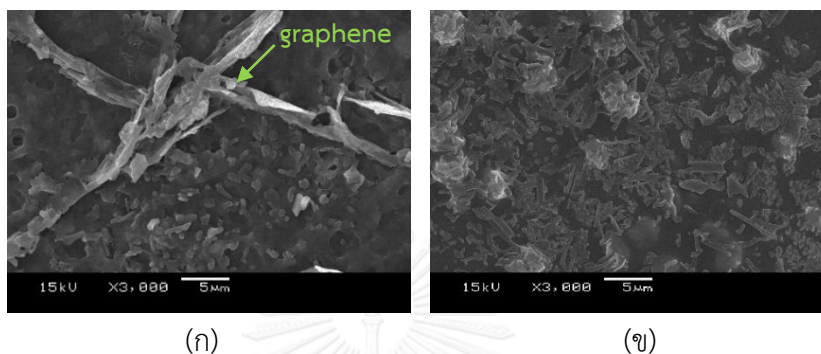


รูปที่ 4.9 ภาพ SEM ของแกรฟีน



รูปที่ 4.10 ภาพ SEM ของ SDS

รูปที่ 4.11 แสดงภาพ SEM ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี mixing พบว่าสูตรที่ไม่เติม SDS (รูปที่ 4.11, ก) เห็นการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคแกรฟีนและพอลิเมอร์เป็นกลุ่มขนาดใหญ่ชัดเจน และสูตรที่เติม SDS ที่ 2.0 %wt (รูปที่ 4.11, ข) เห็นการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคแกรฟีนและพอลิเมอร์เป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดเล็กกว่าสูตรที่ไม่เติม SDS

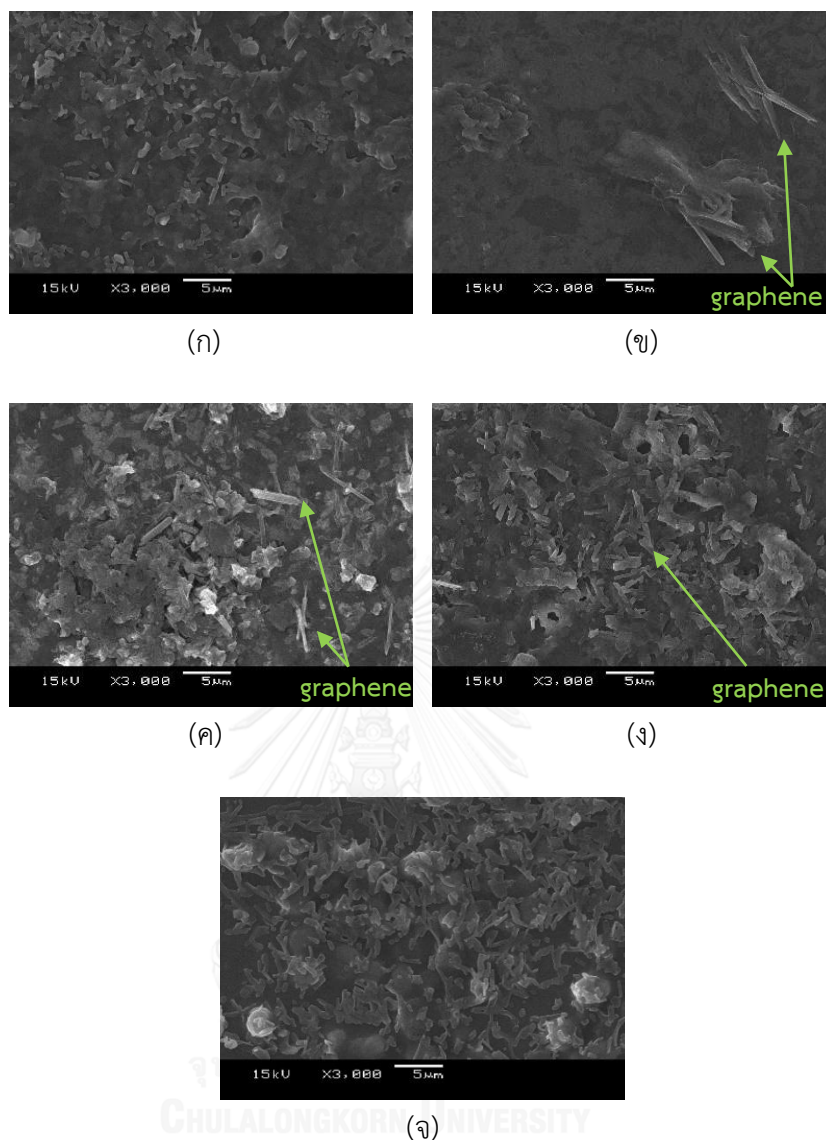


รูปที่ 4.11 ภาพ SEM ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี mixing (ก) ไม่เติม SDS และ (ข) 2.0 %wt SDS

รูปที่ 4.12 แสดงภาพ SEM ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี in situ พบว่าสูตรที่ไม่เติม SDS (รูปที่ 4.12, ก) มองไม่เห็นการเกาะกลุ่มที่ชัดเจนของอนุภาคแกรฟีนและพอลิเมอร์ อาจเป็นเพราะในงานวิจัยนี้มีการเติมแกรฟีนในปริมาณที่น้อยและเป็นการเตรียมด้วยวิธี in situ อาจทำให้อนุภาคแกรฟีนกระจายตัวกันออกไปและเกิดการซ้อนทับกันของ PEDOT:PSS บนชั้นของแกรฟีน

ภาพ SEM ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี in situ สูตรที่เติม SDS ที่ 0.5 %wt (รูปที่ 4.12, ข), สูตรที่เติม SDS ที่ 1.0 %wt (รูปที่ 4.12, ค) และสูตรที่เติม SDS ที่ 1.5 %wt (รูปที่ 4.12, ง) เห็นการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคแกรฟีนและพอลิเมอร์ แต่มีขนาดเล็กกว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี mixing

ภาพ SEM ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี in situ สูตรที่เติม SDS ที่ 2.0 %wt (รูปที่ 4.12, จ) เห็นการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคแกรฟีนและพอลิเมอร์เป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดเล็ก เช่นเดียวกับกับกรณีที่เตรียมด้วยวิธี mixing สูตรที่ใช้ SDS 2.0 %wt เท่ากัน (รูปที่ 4.11, ข) ซึ่งกลุ่มเล็กๆ นี้ อาจเกิดจากอนุภาคของแกรฟีนและพอลิเมอร์ที่เข้าไปอยู่ในไมเซลล์ (micelle) ของ SDS ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (anionic surfactant)



รูปที่ 4.12 ภาพ SEM ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี In situ (ก) ไม่เติม SDS, (ข) 0.5 %wt SDS, (ค) 1.0 %wt SDS, (ง) 1.5 %wt SDS และ (จ) 2.0 %wt SDS

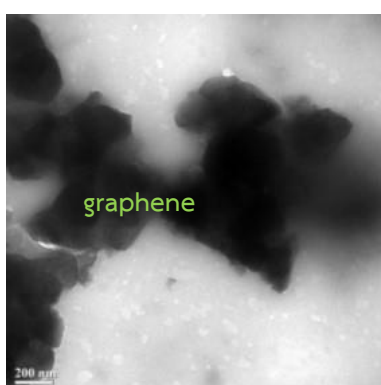
จะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM นั้นสามารถบอกได้เพียงลักษณะภายนอกและการอยู่ร่วมกันของสารต่างๆ การเชื่อมโยงกันของอนุภาคต่างๆ บนฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ ซึ่งฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี mixing มีการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคแกรไฟีนและพอลิเมอร์เป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่ชัดเจนกว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี in situ

4.1.4.2 การศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ

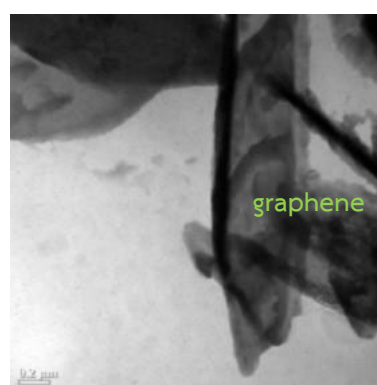
4.1.4.2.1 เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy, TEM)

สำหรับการพิสูจน์สมมติฐานที่ว่า SDS ไปเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนนั้นงานวิจัยนี้ใช้เทคนิค TEM เพื่อดูลักษณะภายในของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ ดูเงาของการซ้อนทับกันของอนุภาคแกรฟีน ผู้วิจัยคาดหวังว่าการทดสอบด้วยเทคนิค TEM จะทำให้เห็นถึงลักษณะหรือปริมาณของชั้นแกรฟีนที่ซ้อนทับหรือเกาะกัน และถ้าเป็นไปตามสมมติฐานที่ว่า SDS ไปเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีน ก็ควรที่จะเห็นถึงจำนวนของชั้นแกรฟีนที่ซ้อนทับหรือเกาะกันในปริมาณที่น้อยลงเมื่อมีการเติม SDS ซึ่งภาพที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM แสดงไว้ในรูปที่ 4.13 และ 4.14

รูปที่ 4.13 แสดงภาพ TEM ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี mixing พบว่าสูตรที่ไม่เติม SDS (รูปที่ 4.13, ก) เห็นการจับกลุ่มก้อนที่หนา มีสีเข้มที่สุดเมื่อเทียบกับทุกสูตรที่เตรียมได้ ซึ่งน่าจะเกิดจากการซ้อนทับกันหลายชั้นของอนุภาคแกรฟีน สูตรที่เติม SDS ที่ 2.0 %wt (รูปที่ 4.13, ข) เห็นการจับกลุ่มก้อนที่หนา มีสีเข้ม มีการซ้อนทับกันของอนุภาคแกรฟีนเช่นเดียวกัน แต่ก็น้อยกว่ากรณีที่ไม่เติม SDS และการซ้อนทับกันของอนุภาคแกรฟีนนี้มีหลายชั้นมากกว่ากรณีที่เตรียมด้วยวิธี in situ เมื่อใช้ SDS ที่ 2.0 %wt เท่ากัน (รูปที่ 4.14, จ) จะเห็นได้ว่าถึงแม้เติม SDS ในปริมาณที่เท่ากันแต่ปริมาณการซ้อนทับกันของอนุภาคแกรฟีนนั้นแตกต่างกันค่อนข้างมาก แสดงให้เห็นว่าการเตรียมด้วยวิธี in situ ทำให้อนุภาคของแกรฟีนกระจายตัวได้ดีกว่าการเตรียมด้วยวิธี mixing ซึ่งผลของวิธีการเตรียมที่มีต่อการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนอธิบายเพิ่มในหัวข้อ 4.1.5



(ก)



(ข)

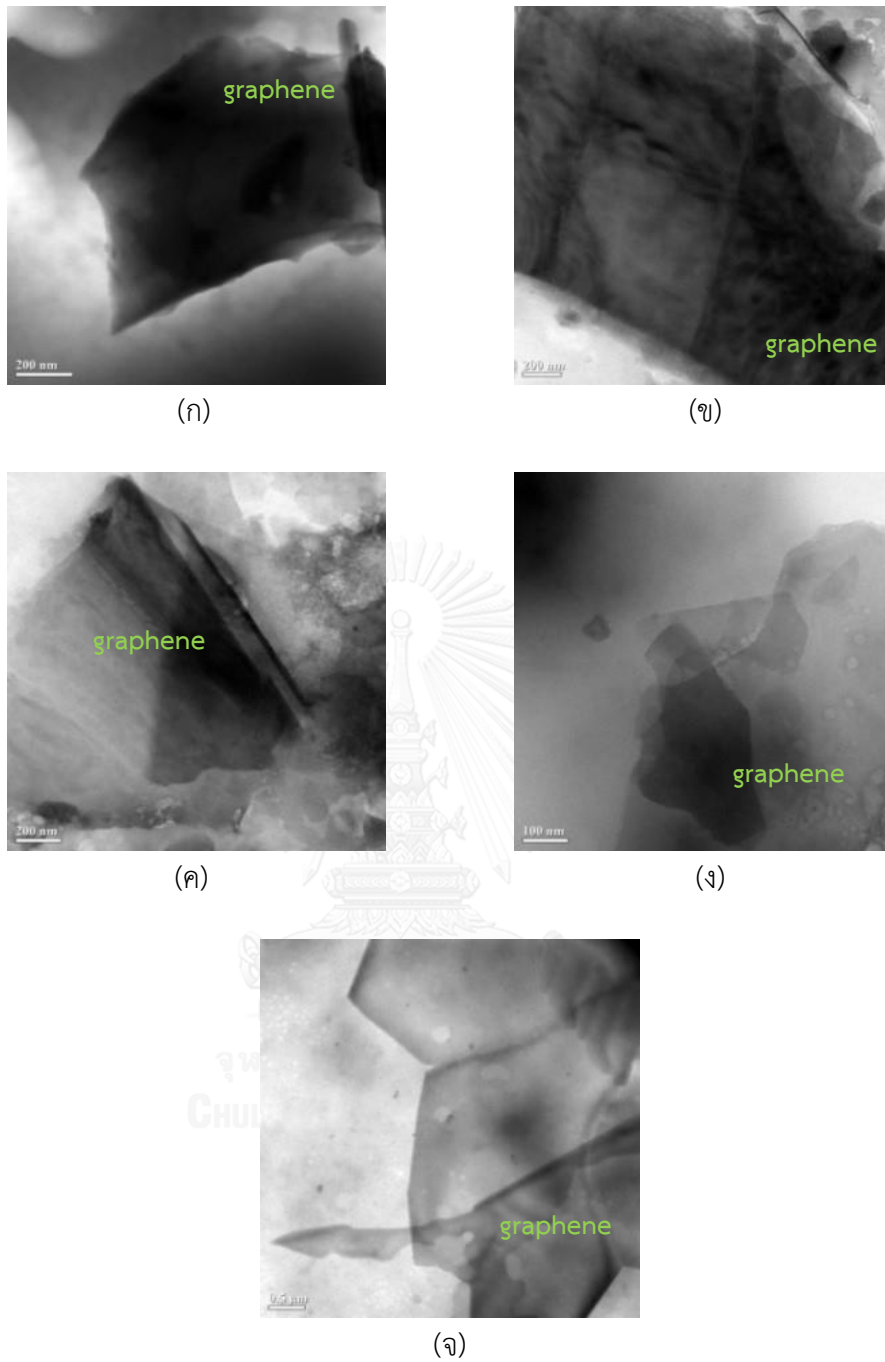
รูปที่ 4.13 ภาพ TEM ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี mixing (ก) ไม่เติม SDS และ (ข) 2.0 %wt SDS

รูปที่ 4.14 แสดงภาพ TEM ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี in situ พบว่าสูตรที่ไม่เติม SDS (รูปที่ 4.14, ก) เห็นการจับกลุ่มก้อนที่หนาหมีสีเข้มที่สุดเมื่อเทียบกับสูตรอื่นๆ ที่เตรียมด้วยวิธีเดียวกัน แต่การจับกลุ่มก้อนซ้อนทับกันของอนุภาคแกรฟีนนี้ก็ยังมีน้อยกว่ากรณีที่เตรียมด้วยวิธี mixing เมื่อไม่เติม SDS เหมือนกัน (รูปที่ 4.13, ก)

ภาพ TEM ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี in situ สูตรที่เติม SDS ที่ 0.5 %wt (รูปที่ 4.14, ข) และ 1.0 %wt (รูปที่ 4.14, ค) เห็นการซ้อนทับกันของอนุภาคแกรฟีนที่ไม่ต่างกันมากนัก ภาพ TEM ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี in situ สูตรที่เติม SDS ที่ 1.5 %wt (รูปที่ 4.14, ง) และ 2.0 %wt (รูปที่ 4.14, จ) เห็นการซ้อนทับกันของอนุภาคแกรฟีนที่ไม่ต่างกันมากนักเช่นเดียวกัน

เมื่อเปรียบเทียบภาพ TEM ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี in situ สูตรที่ไม่เติม SDS และสูตรที่เติม SDS ที่ 2.0 %wt เห็นความแตกต่างของการซ้อนทับกันของอนุภาคแกรฟีนที่ค่อนข้างชัดเจน เห็นได้ว่าเมื่อปริมาณของ SDS เพิ่มขึ้น การซ้อนทับกันของอนุภาคแกรฟีนมีแนวโน้มลดลง ซึ่งก็เป็นไปตามสมมติฐานที่ว่า SDS จะไปเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีน

จะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น จะเห็นเพียงลักษณะภายนอกกว่ามีการอยู่ร่วมกัน มีการเชื่อมโยงกันของอนุภาคต่างๆ โดยฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี in situ มีการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคแกรฟีนและพอลิเมอร์เป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดเล็กกว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี mixing ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM ที่สามารถบอกถึงลักษณะภายในว่ามีการซ้อนทับกันของอนุภาคแกรฟีนมากน้อยเพียงใด โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM เห็นได้ว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี in situ มีการจับกลุ่มก้อนซ้อนทับกันของอนุภาคแกรฟีนน้อยกว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี mixing และการจับกลุ่มก้อนซ้อนทับกันของอนุภาคแกรฟีนนี้มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของ SDS เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.14 ภาพ TEM ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี In situ (ก) ไม่เติม SDS, (ข) 0.5 %wt SDS, (ค) 1.0 %wt SDS, (ง) 1.5 %wt SDS และ (จ) 2.0 %wt SDS

4.1.4.2.2 เทคนิคจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy, AFM)

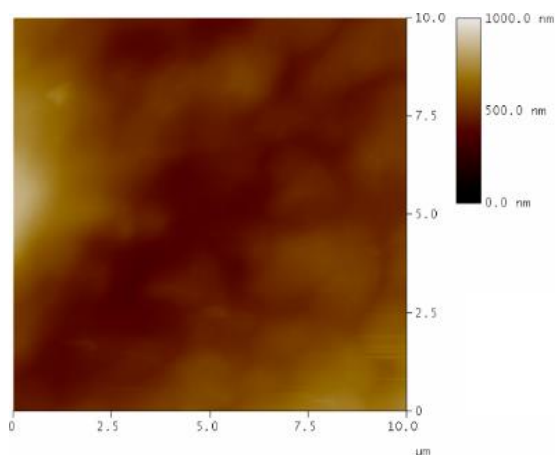
งานวิจัยนี้ใช้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM สำหรับการพิสูจน์สมมติฐานที่ว่า SDS ไปเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีน เพื่อหาค่าความขรุขระเฉลี่ย (average roughness, Ra) ซึ่งค่า Ra นี้ได้จากการคำนวณของโปรแกรมที่มาจากเครื่อง โดยใช้ความแตกต่างของความสูง ระยะทาง และการกระจัดจากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่ง ใช้ขนาดของมุมของจุดต่างๆ บนชิ้นงาน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ความแตกต่างกันของจุด 3 จุดบนชิ้นงาน

สำหรับงานวิจัยนี้สามารถอธิบายผลที่ได้จากค่า Ra ได้ว่าถ้า Ra มีค่าสูงหมายถึงพื้นผิวมีความขรุขระมาก มีความแตกต่างของระดับความสูงของแต่ละกลุ่มก้อนอนุภาคที่จับตัวกันมาก แสดงว่าอนุภาคแกรฟีนจะเกาะกลุ่มกันเองและกระจายตัวออกจากกันน้อย โอกาสที่อนุภาคแกรฟีนจะกระจายไปทั่วชิ้นงานก็น้อย ทำให้มีการเชื่อมโยงกันของอนุภาคแกรฟีนที่น้อย และอาจส่งผลให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นไม่เต็มที่หรือเพิ่มขึ้นไม่มากเท่าที่สามารถจะเป็นได้เช่นกัน

ผู้วิจัยคาดหวังว่าการทดสอบด้วยเทคนิค AFM จะสามารถใช้ค่า Ra ในการอ้างอิงถึงผลของการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีน ลักษณะหรือปริมาณของชั้นแกรฟีน และถ้าเป็นไปตามสมมติฐานที่ว่า SDS จะไปเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีน ก็ควรที่จะเห็นถึงค่า Ra ที่ลดลงเมื่อมีการเติม SDS

สำหรับภาพที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM ในงานวิจัยนี้เป็นภาพ 2 มิติที่มีขนาดพื้นที่เท่ากันคือ $10 \times 10 \mu\text{m}$ สำหรับภาพที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM นั้นจะมีแถบบอกค่าความสูงอยู่มุมขวาบนของภาพ โดยมีระดับแถบสีเพื่อบอกความสูง ซึ่งสีที่อ่อนแสดงถึงระดับความสูงที่มาก และแถบสีนี้จะไล่ระดับความเข้มของสีที่เพิ่มขึ้นจากบนลงล่าง ซึ่งสีที่เข้มแสดงถึงระดับความสูงที่น้อย และสีเดียวกันจะมีระดับความสูงเท่ากัน

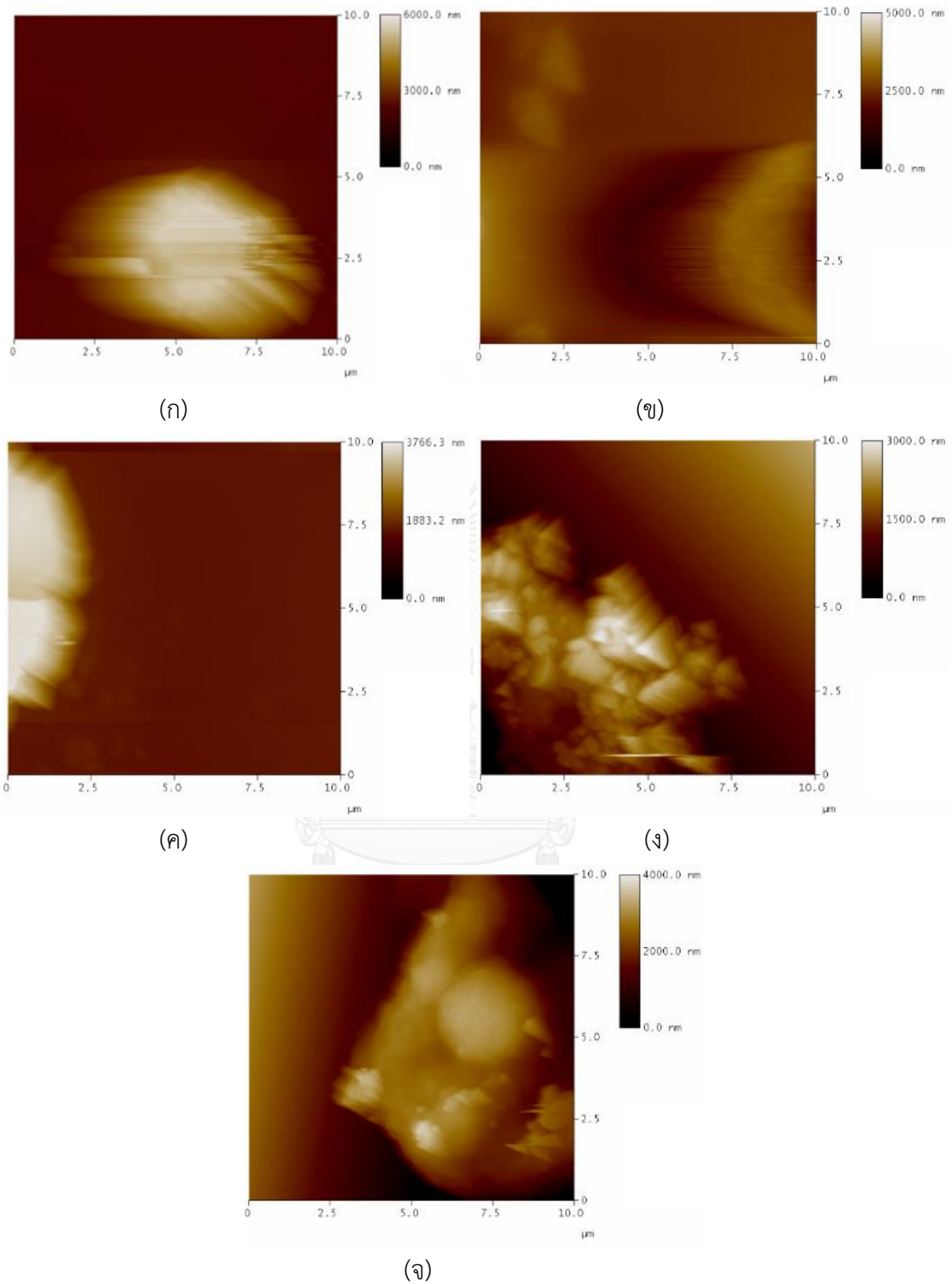
รูปที่ 4.15 แสดงภาพ AFM ของฟิล์ม PEDOT:PSS ที่ไม่ผสมแกรฟีนและไม่ผสม SDS จึงทำให้พื้นผิวของฟิล์ม PEDOT:PSS มีความขรุขระน้อยที่สุด เนื่องจากไม่มีการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคแกรฟีน โดยมีค่าความขรุขระเฉลี่ยหรือค่า Ra เท่ากับ 10.23 nm



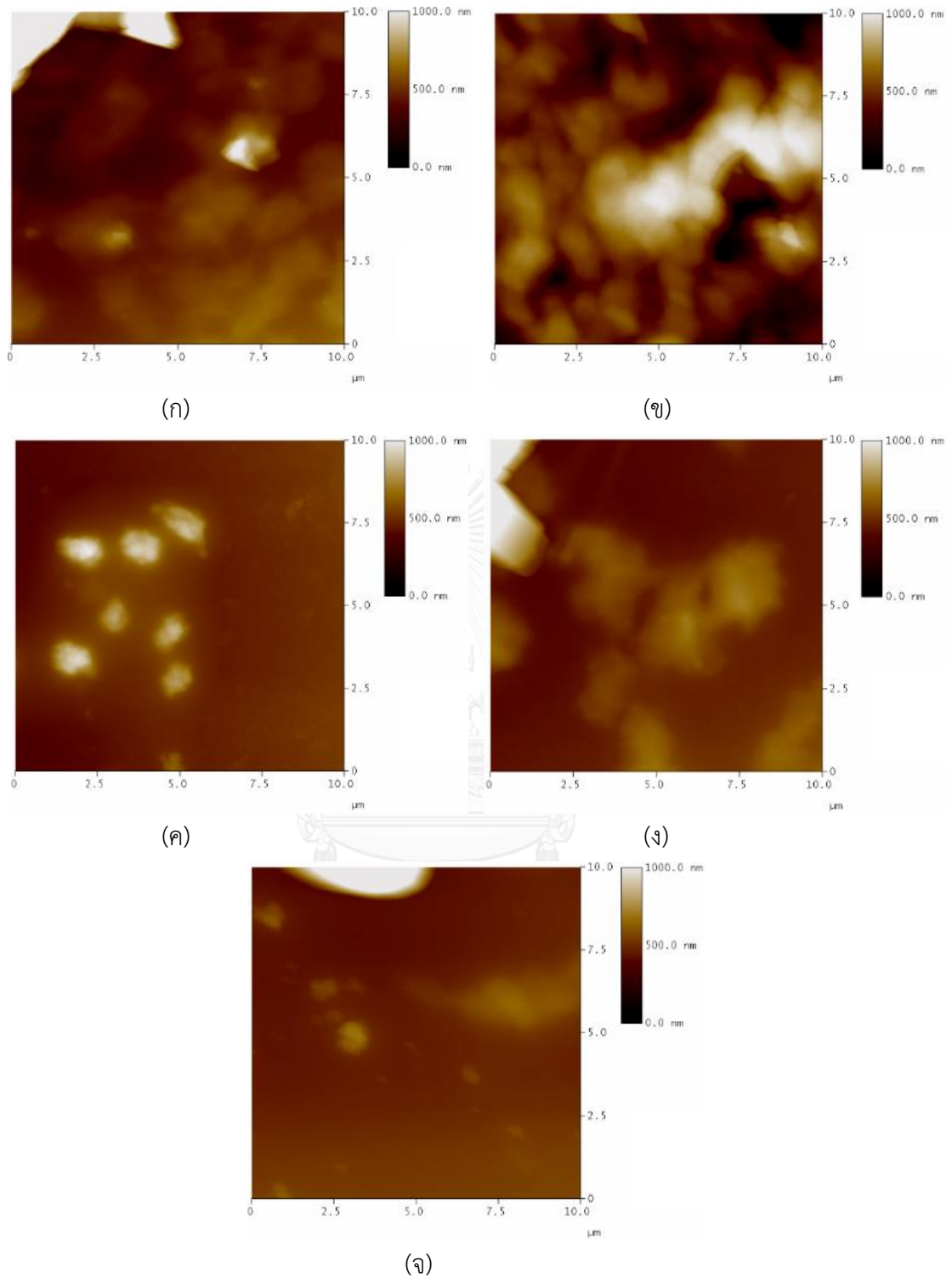
รูปที่ 4.15 ภาพ AFM ของฟิล์ม PEDOT:PSS

รูปที่ 4.16 แสดงภาพ AFM ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี mixing พบว่า สูตรที่ไม่เติม SDS (รูปที่ 4.16, ก) จะมีความแตกต่างกันของความสูงมากที่สุดมีค่า Ra สูงที่สุด แสดงว่ามีความขรุขระมากที่สุด มีการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนน้อยที่สุด โดยมีค่า Ra เท่ากับ 351.83 nm สูตรที่เติม SDS ที่ 0.5 %wt (รูปที่ 4.16, ข) มีค่า Ra เท่ากับ 301.59 nm สูตรที่เติม SDS ที่ 1.0 %wt (รูปที่ 4.16, ค) มีค่า Ra เท่ากับ 290.77 nm สูตรที่เติม SDS ที่ 1.5 %wt (รูปที่ 4.16, ง) มีค่า Ra เท่ากับ 168.43 nm สูตรที่เติม SDS ที่ 2.0 %wt (รูปที่ 4.16, จ) มีความแตกต่างกันของความสูงน้อยที่สุดมีค่า Ra ต่ำที่สุด แสดงว่ามีความขรุขระน้อยที่สุด มีการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนมากที่สุด โดยมีค่า Ra เท่ากับ 157.19 nm เห็นได้ว่าเมื่อปริมาณของ SDS เพิ่มขึ้นค่า Ra ลดลงมีความขรุขระน้อยลง มีการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนมากขึ้น

รูปที่ 4.17 แสดงภาพ AFM ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี in situ พบว่าสูตรที่ไม่เติม SDS (รูปที่ 4.17, ก) จะมีความแตกต่างกันของความสูงมากที่สุดมีค่า Ra สูงที่สุด แสดงว่ามีความขรุขระมากที่สุด มีการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนน้อยที่สุด โดยมีค่า Ra เท่ากับ 96.30 nm สูตรที่เติม SDS ที่ 0.5 %wt (รูปที่ 4.17, ข) มีค่า Ra เท่ากับ 69.80 nm สูตรที่เติม SDS ที่ 1.0 %wt (รูปที่ 4.17, ค) มีค่า Ra เท่ากับ 46.86 nm สูตรที่เติม SDS ที่ 1.5 %wt (รูปที่ 4.17, ง) มีค่า Ra เท่ากับ 31.30 nm สูตรที่เติม SDS ที่ 2.0 %wt (รูปที่ 4.17, จ) จะมีความแตกต่างกันของความสูงน้อยที่สุดมีค่า Ra ต่ำที่สุด แสดงว่ามีความขรุขระน้อยที่สุด มีการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนมากที่สุด โดยมีค่า Ra เท่ากับ 18.11 nm จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณของ SDS เพิ่มขึ้นค่า Ra ลดลง มีความขรุขระน้อยลง มีการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนมากขึ้น

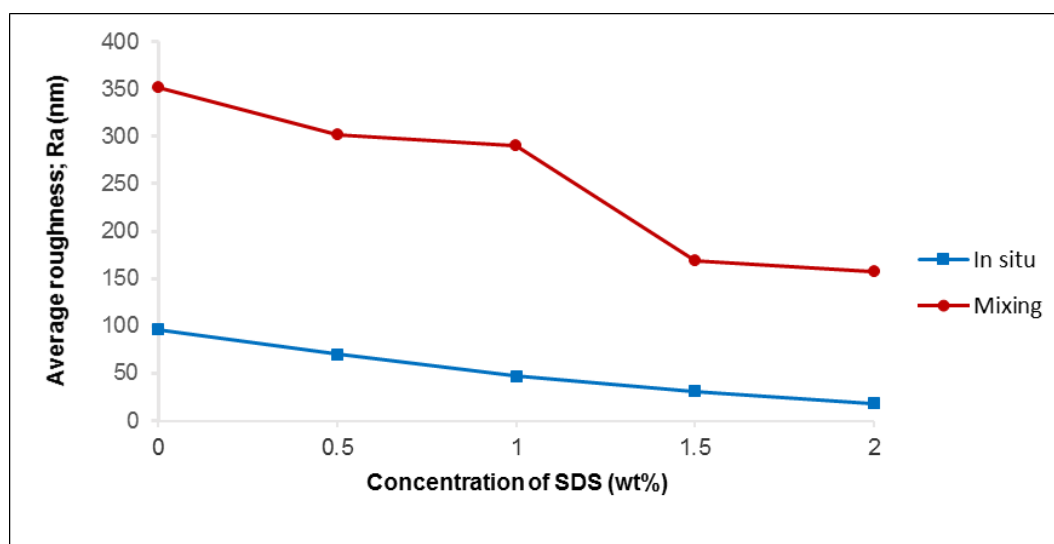


รูปที่ 4.16 ภาพ AFM ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี mixing (ก) ไม่เติม SDS, (ข) 0.5 %wt SDS, (ค) 1.0 %wt SDS, (ง) 1.5 %wt SDS และ (จ) 2.0 %wt SDS



รูปที่ 4.17 ภาพ AFM ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี in situ (ก) ไม่เติม SDS, (ข) 0.5 %wt SDS, (ค) 1.0 %wt SDS, (ง) 1.5 %wt SDS และ (จ) 2.0 %wt SDS

รูปที่ 4.18 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่า ความขรุขระเฉลี่ยหรือค่า Ra ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี mixing และวิธี in situ ที่ความเข้มข้นของ SDS แตกต่างกันคือ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 %wt พบว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นของ SDS เท่ากันฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธี mixing มีค่า Ra สูงกว่า มีความขรุขระมากกว่า มีการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนน้อยกว่า ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธี in situ และเมื่อความเข้มข้นของ SDS มากขึ้นทั้งฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธี mixing และวิธี in situ มีค่า Ra ลดลง มีความขรุขระน้อยลง มีการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนมากขึ้น ซึ่งก็เป็นไปตามสมมติฐานที่ว่า SDS ไปเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีน



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่า Ra ที่ได้จากเทคนิค AFM ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี mixing และวิธี in situ ที่มีความเข้มข้นของ SDS แตกต่างกัน (0.5, 1.0, 1.5, 2.0 %wt)

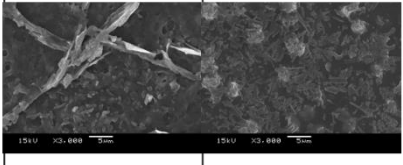
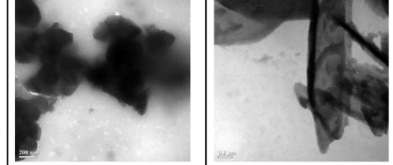
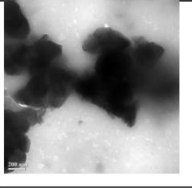
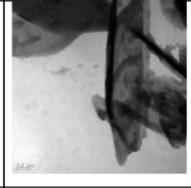
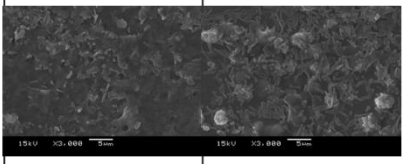
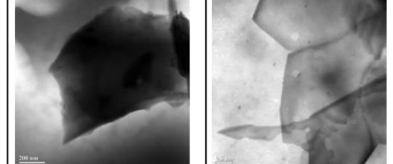

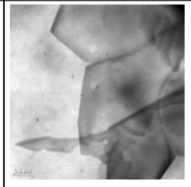
4.1.5 ผลของวิธีการเตรียมที่มีต่อการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนและความสามารถในการนำไฟฟ้า

จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่างานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียม PEDOT:PSS ที่ผสมแกรฟีนเพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้า แต่แกรฟีนมีข้อจำกัดเรื่องการกระจายตัวจึงเติม SDS โดยคาดหวังว่า SDS ไปเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนและถ้าอนุภาคแกรฟีนกระจายตัวดี อนุภาคไม่เกาะกลุ่มกันเองหรือเกาะกลุ่มกันน้อยลง ก็มีโอกาที่อนุภาคแกรฟีนนั้นกระจายไปทั่วชิ้นงานเกิดการเชื่อมโยงกันของอนุภาคแกรฟีน ส่งผลทำให้การถ่ายเทประจุดีขึ้น และส่งผลให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าดีขึ้นด้วยเช่นกัน

สำหรับการทดสอบสมมติฐานที่คาดไว้ว่า SDS ไปเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนและอาจช่วยเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าได้นั้น ผู้วิจัยได้ออกแบบการทดลองเพื่อเปรียบเทียบถึงวิธีการที่จะผสมแกรฟีนใน PEDOT:PSS โดยวิธีแรกคือแบบ in situ เป็นการเติมแกรฟีนเข้าไปในขั้นตอนการสังเคราะห์ PEDOT:PSS โดยตรง และวิธีที่สองคือแบบ mixing เป็นการเติมแกรฟีนเข้าไปหลังจากสังเคราะห์ PEDOT:PSS เสร็จสิ้นแล้ว ถ้า SDS ทำให้อนุภาคของแกรฟีนกระจายตัวได้ดีขึ้นจริงไม่ว่าจะเป็นการเติมแกรฟีนเข้าไปในขั้นตอนการสังเคราะห์ PEDOT:PSS โดยตรง หรือหลังจากสังเคราะห์ PEDOT:PSS เสร็จสิ้นแล้ว ก็ควรที่จะมีการกระจายตัวและมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น

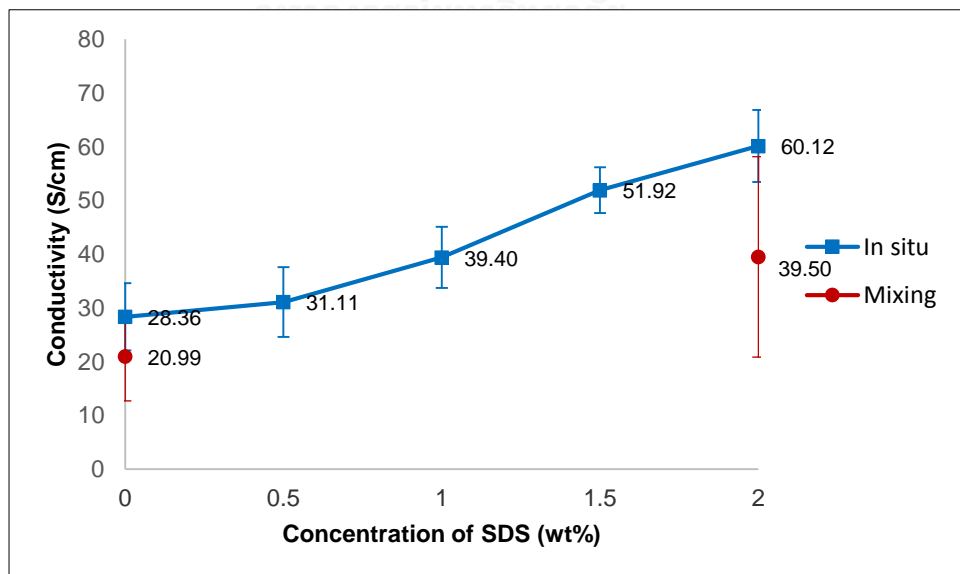
สำหรับการพิสูจน์สมมติฐานที่ว่า SDS ไปเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีน ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ทำให้เห็นถึงลักษณะภายนอกกว่ามีการอยู่ร่วมกัน มีการเชื่อมโยงกันของอนุภาคต่างๆบนฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM สามารถบอกถึงลักษณะภายในว่ามีการซ้อนทับกันของอนุภาคแกรฟีนมากน้อยเพียงใด ถ้าเป็นไปตามสมมติฐานก็ควรที่จะเห็นถึงจำนวนของชั้นแกรฟีนที่ซ้อนทับหรือเกาะกันในปริมาณที่น้อยลงเมื่อมีการเติม SDS และผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM ใช้ค่า Ra เพื่อบอกถึงการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนถ้า Ra มีค่าต่ำหมายถึงพื้นผิวมีความขรุขระน้อย อนุภาคแกรฟีนกระจายตัวดี ถ้าเป็นไปตามสมมติฐานก็ควรที่จะเห็นถึงค่า Ra ที่ลดลงเมื่อมีการเติม SDS

รูปที่ 4.19 แสดงผลของวิธีการเตรียมที่มีต่อการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งได้จากผลของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM พบว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี mixing เห็นการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคแกรฟีนและพอลิเมอร์เป็นกลุ่มขนาดใหญ่ชัดเจนมากกว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี in situ เมื่อใช้ความเข้มข้นของ SDS เท่ากัน เมื่อดูลักษณะภายในว่ามีการซ้อนทับกันของอนุภาคแกรฟีนมากน้อยเพียงใด จากผลของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM พบว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี mixing เห็นการซ้อนทับกันของอนุภาคแกรฟีนที่มีการจับกลุ่มก้อนที่หนาและสีเข้มมากกว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี in situ เมื่อใช้ความเข้มข้นของ SDS เท่ากัน แสดงให้เห็นว่าการเตรียมด้วยวิธี in situ ทำให้อนุภาคแกรฟีนเกาะกลุ่มซ้อนทับกันเองน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับค่าความขรุขระเฉลี่ยหรือค่า Ra ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM ที่พบว่า ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี in situ มีค่า Ra ต่ำกว่า แสดงว่ามีการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนมากกว่า ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี mixing เมื่อใช้ความเข้มข้นของ SDS เท่ากัน

	SEM		TEM		AFM (Ra)	
	No SDS	2.0 % SDS	No SDS	2.0 % SDS	No SDS	2.0 % SDS
Mixing					351.83 nm	157.19 nm
In situ					96.30 nm	18.11 nm

รูปที่ 4.19 ผลของวิธีการเตรียมที่มีต่อการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ

รูปที่ 4.20 แสดงผลของวิธีการเตรียมที่มีต่อความสามารถในการนำไฟฟ้าของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ (รายละเอียดเกี่ยวกับค่าการนำไฟฟ้าได้อธิบายเพิ่มเติมในหัวข้อที่ 4.3) พบว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี mixing มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำกว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี in situ เมื่อใช้ความเข้มข้นของ SDS เท่ากัน และเมื่อความเข้มข้นของ SDS เพิ่มขึ้นความสามารถในการนำไฟฟ้าของทั้งฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี mixing และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี in situ ก็เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.20 ผลของวิธีการเตรียมที่มีต่อความสามารถในการนำไฟฟ้าของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเตรียมด้วยวิธี in situ ทำให้อนุภาคแกรฟีนกระจายตัวดี อนุภาคไม่เกาะกลุ่มกันเองหรือเกาะกลุ่มกันน้อย อนุภาคแกรฟีนนั้นจะกระจายไปทั่วชิ้นงานเกิดการเชื่อมโยงกันของอนุภาคแกรฟีน ส่งผลทำให้การถ่ายเทประจุดีขึ้น และส่งผลให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าดีขึ้น เนื่องจาก SDS ไปเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีน SDS ทำให้อนุภาคของแกรฟีนกระจายตัวได้ดีขึ้นจริง ไม่ว่าจะเป็นการเติมแกรฟีนเข้าไปในขั้นตอนการสังเคราะห์ PEDOT:PSS โดยตรง หรือหลังจากสังเคราะห์ PEDOT:PSS เสร็จสิ้นแล้ว จึงมีการกระจายตัวและมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น

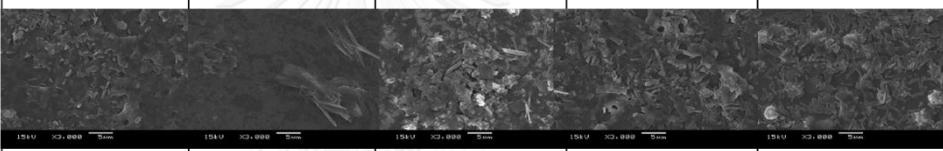
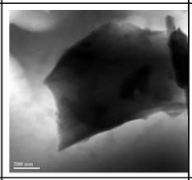
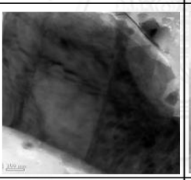
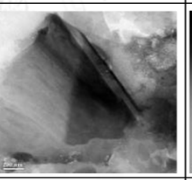
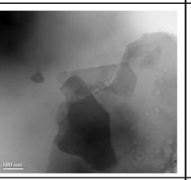
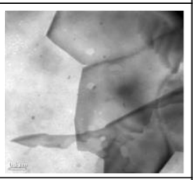
4.1.6 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมโตะเตซิลลัลเฟตที่มีต่อการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนและความสามารถในการนำไฟฟ้า

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียม PEDOT:PSS ที่ผสมแกรฟีนเพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าแต่แกรฟีนมีข้อจำกัดเรื่องการกระจายตัว จึงเติม SDS โดยคาดหวังว่า SDS ไปเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนและถ้าอนุภาคแกรฟีนกระจายตัวดี อนุภาคไม่เกาะกลุ่มกันเองหรือเกาะกลุ่มกันน้อยลง ก็มีโอกาที่อนุภาคแกรฟีนนั้นกระจายไปทั่วชิ้นงานเกิดการเชื่อมโยงกันของอนุภาคแกรฟีน ส่งผลทำให้การถ่ายเทประจุดีขึ้น และส่งผลให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าดีขึ้นด้วยเช่นกัน

จากที่ได้ทดสอบสมมติฐานเบื้องต้นไปแล้วในหัวข้อ 4.1.5 และพบว่า SDS สามารถเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนได้จริง และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี in situ มีการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนและมีความสามารถในการนำไฟฟ้าสูงกว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี mixing เมื่อใช้ความเข้มข้นของ SDS เท่ากัน งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การเตรียมด้วยวิธี in situ และศึกษาผลของความเข้มข้นของ SDS ที่มีต่อการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนและความสามารถในการนำไฟฟ้าต่อไป แต่เนื่องจากที่เคยกล่าวไว้ข้างต้นว่า SDS ส่งผลต่อความหนืดของสารที่เตรียมได้ปริมาณ SDS ในช่วงที่เหมาะสมที่สามารถทำให้การเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงของสารที่เตรียมได้บนกระจกสไลด์ติดสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นคือไม่เกิน 2 %wt ดังนั้นความเข้มข้นของ SDS ที่ศึกษาจึงอยู่ที่ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 %wt

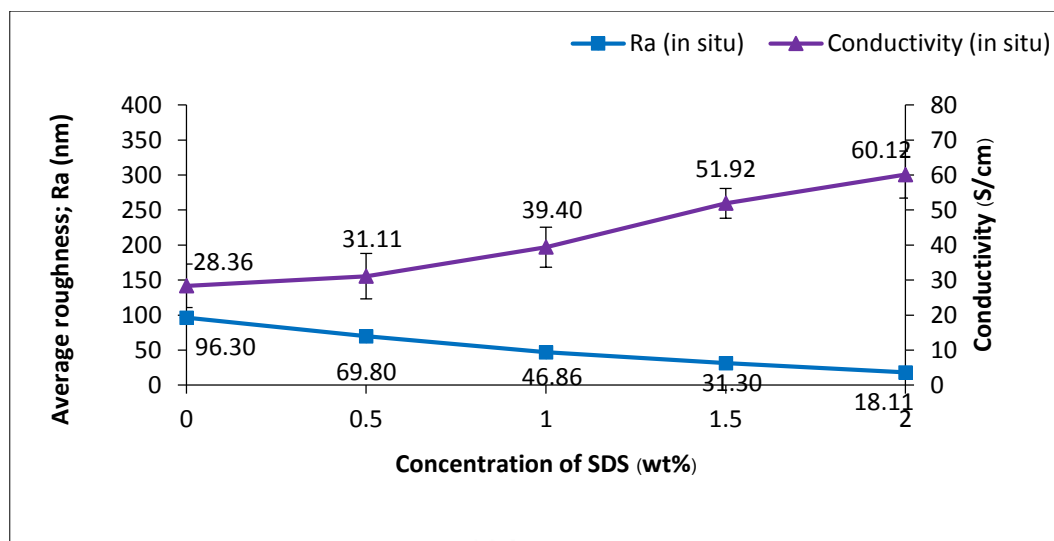
รูปที่ 4.21 แสดงผลของความเข้มข้นของโซเดียมโตะเตซิลลัลเฟตที่มีต่อการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี in situ จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ทำให้เห็นถึงลักษณะภายนอกกว่ามีการอยู่ร่วมกัน มีการเชื่อมโยงกันของอนุภาคต่างๆ บนฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ พบว่ามีการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคแกรฟีนและพอลิเมอร์เป็นกลุ่มขนาดเล็กบ้างใหญ่บ้าง ไม่เป็นแนวโน้มที่ชัดเจน อาจเป็นเพราะใน

งานวิจัยนี้มีการเติมแกรฟีนในปริมาณที่น้อยและเป็นการเตรียมด้วยวิธี in situ อาจทำให้อนุภาคแกรฟีนกระจายตัวกันออกไปและเกิดการซ้อนทับกันของ PEDOT:PSS บนชั้นของแกรฟีน เมื่อคุณลักษณะภายในว่ามีการซ้อนทับกันของอนุภาคแกรฟีนมากน้อยเพียงใด จากผลของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ SDS เพิ่มขึ้นการซ้อนทับกันของอนุภาคแกรฟีนมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับค่าความขรุขระเฉลี่ยหรือค่า Ra ที่ได้จากผลของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM ที่สามารถบอกถึงการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีน พบว่าเมื่อปริมาณของ SDS เพิ่มขึ้นค่า Ra มีแนวโน้มลดลง จากผลที่ค่อนข้างสอดคล้องกันของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM, TEM และ AFM แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณของ SDS เพิ่มขึ้นการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนก็เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน จะเห็นได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนนั้นได้แก่ วิธีหรือขั้นตอนการเติมแกรฟีนและปริมาณของ SDS

%SDS	No SDS	0.5	1.0	1.5	2.0
SEM					
TEM					
AFM(Ra)	96.30 nm	69.80 nm	46.86 nm	31.30 nm	18.11 nm

รูปที่ 4.21 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตที่มีต่อการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี in situ

รูปที่ 4.22 แสดงผลของความเข้มข้นของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตที่มีต่อความสามารถในการนำไฟฟ้าและค่า Ra ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี in situ พบว่าเมื่อปริมาณของ SDS เพิ่มขึ้นความสามารถในการนำไฟฟ้าก็เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ค่า Ra ที่แสดงถึงความขรุขระก็มีค่าลดลง อนุภาคแกรฟีนกระจายตัวดีขึ้น อนุภาคไม่เกาะกลุ่มกันเองหรือเกาะกลุ่มกันน้อยลง อนุภาคแกรฟีนนั้นจะกระจายไปทั่วชิ้นงานเกิดการเชื่อมโยงกันของอนุภาคแกรฟีน ส่งผลทำให้การถ่ายเทประจุดีขึ้นและความสามารถในการนำไฟฟ้าสูงขึ้น โดยความเข้มข้นของ SDS ที่ 2.0 %wt มีค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุดอยู่ที่ 60.12 S/cm และมีค่า Ra ต่ำที่สุดอยู่ที่ 18.11 nm



รูปที่ 4.22 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมโอดีเดซิลซัลเฟตที่มีต่อความสามารถในการนำไฟฟ้า และค่า Ra ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี in situ

4.2 การเตรียมพอลิ(3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟิน):พอลิสไตรีนซัลโฟนิกแอซิด/แกรฟีน/โซเดียมโอดีเดซิลซัลเฟตที่ผสมเอทิลีนไกลคอล (PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG)

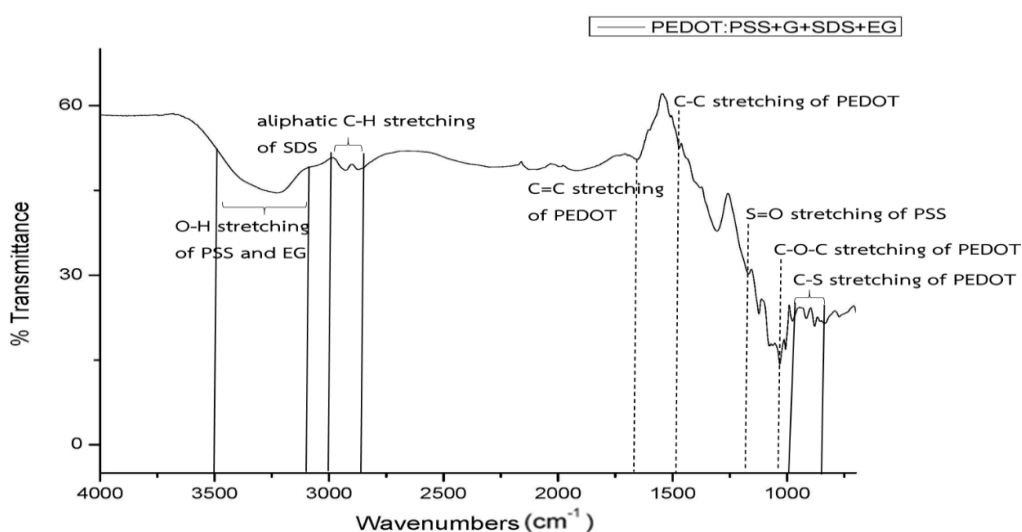
จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่างานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะปรับปรุงความสามารถในการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS โดยศึกษาการเตรียม PEDOT:PSS ที่มีการเติมแกรฟีนเข้าไปในขั้นตอนการสังเคราะห์ PEDOT:PSS และเพิ่มการกระจายตัวของแกรฟีนด้วย SDS เมื่อได้ปริมาณที่เหมาะสมของแกรฟีนและ SDS แล้วจึงเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าอีกครั้งด้วยสารโอดีดพหุติยภูมิซึ่งในที่นี้คือเอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol, EG) การปรับปรุงความสามารถในการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS ด้วยการผสมแกรฟีน มีข้อดีอยู่ที่ตัวแกรฟีนเองมีความสามารถในการนำไฟฟ้า และมีความเสถียรต่อสภาพแวดล้อมสูงแต่แกรฟีนก็มีข้อจำกัดเรื่องการกระจายตัว งานวิจัยนี้จึงเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS อีกครั้งด้วยการผสมเอทิลีนไกลคอล เนื่องจากสามารถเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS ได้หลายเท่าและเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยากสามารถผสมเข้ากับ PEDOT:PSS ได้ดีแต่ก็มีข้อจำกัดเรื่องของความเสถียรเช่นกัน เป็นสาเหตุให้งานวิจัยนี้ใช้ทั้งแกรฟีนและเอทิลีนไกลคอลในการปรับปรุงความสามารถในการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS

จากผลการทดลองเบื้องต้นที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1 พบว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี in situ สูตรที่เติม SDS ที่ 2.0 %wt มีความสามารถในการนำไฟฟ้าสูงที่สุด จึงนำสูตรนี้มาเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าอีกครั้งด้วยเอทิลีนไกลคอล โดยศึกษาที่ความเข้มข้นแตกต่างกันดังนี้ 16.67, 28.57, 37.50, 44.44 และ 50.00 %wt

4.2.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคแอทเทนนูเอเทดโททัลรีเฟล็กชันฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy, ATR-FTIR)

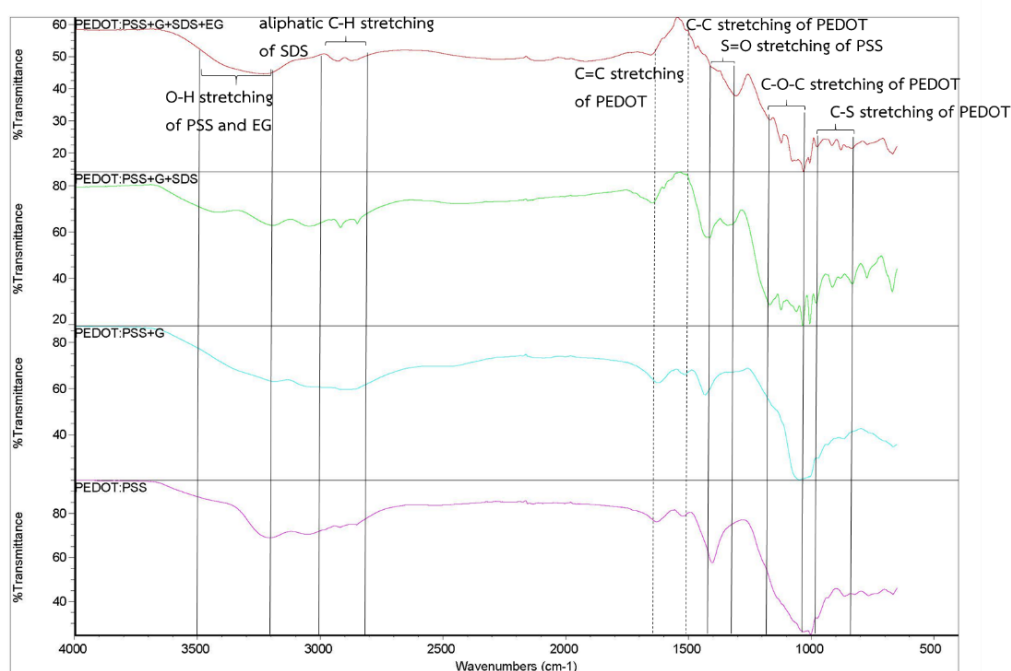
งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียม PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG ที่มีการเติม graphene และ SDS เข้าไปในขั้นตอนการสังเคราะห์ PEDOT:PSS เมื่อสังเคราะห์ PEDOT:PSS เสร็จสิ้นแล้วจึงผสมกับเอทิลีนไกลคอล ดังนั้นการพิสูจน์เอกลักษณ์เพื่อยืนยันว่าเกิดการสังเคราะห์ของ EDOT มอนอเมอร์เป็น PEDOT และการมีอยู่ของ SDS และเอทิลีนไกลคอลจึงเป็นสิ่งสำคัญ การวิเคราะห์ทำได้โดยนำสารที่เตรียมได้ซึ่งเป็นของเหลวที่มีสีน้ำเงินเข้มไปขึ้นรูปเป็นฟิล์ม แล้วนำฟิล์มที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ATR-FTIR

รูปที่ 4.23 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG พบว่ามีการดูดกลืนอินฟราเรดสเปกตรัมที่เลขคลื่นต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งเลขคลื่นที่ประมาณ 1175 cm^{-1} , 1126 cm^{-1} และ 1040 cm^{-1} แสดงถึง S=O stretching ในโครงสร้างของ PSS [41] เลขคลื่นที่ประมาณ 1522 cm^{-1} และ 1513 cm^{-1} แสดงถึง C=C stretching ในโครงสร้างของ PEDOT [42], เลขคลื่นที่ประมาณ 1316 cm^{-1} แสดงถึง C-C stretching ในโครงสร้างของ PEDOT, เลขคลื่นที่ประมาณ 1199 cm^{-1} และ 1087 cm^{-1} แสดงถึง C-O-C stretching ในโครงสร้างของ PEDOT, เลขคลื่นที่ประมาณ 982 cm^{-1} , 839 cm^{-1} และ 689 cm^{-1} แสดงถึง C-S stretching ในโครงสร้างของ PEDOT [43] เลขคลื่นที่ประมาณ 3000 cm^{-1} ถึง 2800 cm^{-1} แสดงถึง aliphatic C-H stretching ในโครงสร้างของ SDS และเลขคลื่นที่ประมาณ 3500 cm^{-1} ถึง 3200 cm^{-1} แสดงถึง O-H stretching ในโครงสร้างของ PSS และเอทิลีนไกลคอล



รูปที่ 4.23 ATR-FTIR สเปกตรัมของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG

นอกจากนี้ในรูปที่ 4.24 ได้ทำการเปรียบเทียบกราฟการดูดกลืนของรังสีอินฟราเรดของฟิล์ม PEDOT:PSS, ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene, PEDOT:PSS/graphene/SDS และ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG ซึ่งกราฟที่ได้มีการดูดกลืนของรังสีอินฟราเรดที่ตำแหน่งใกล้เคียงกัน เนื่องจากฟิล์มที่เตรียมได้นั้นมีส่วนประกอบของสารชนิดเดียวกัน แต่สำหรับสูตรที่มีการเติม SDS พบว่ามีการดูดกลืนอินฟราเรดสเปกตรัมที่เลขคลื่นประมาณ 3000 cm^{-1} ถึง 2800 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึง aliphatic C-H stretching ในโครงสร้างของ SDS



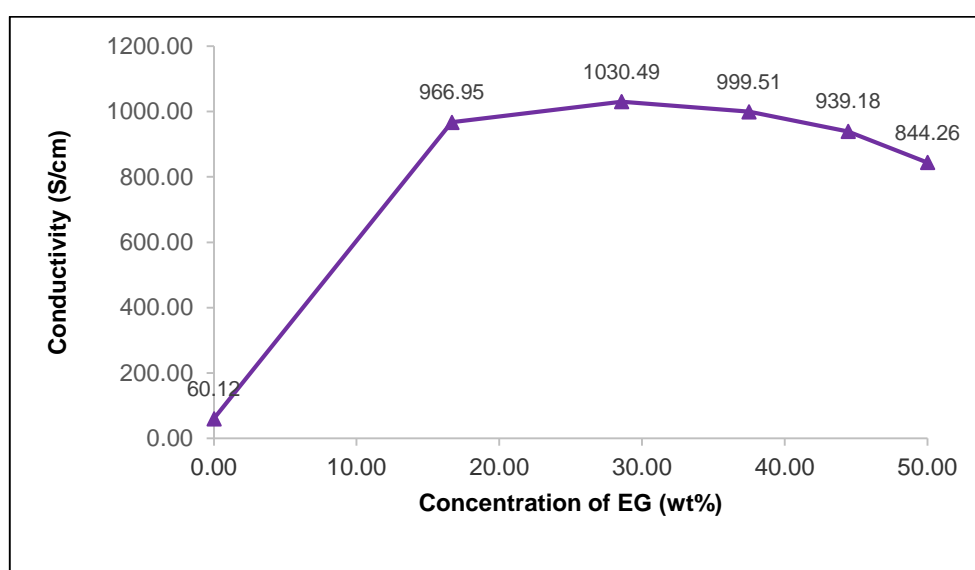
รูปที่ 4.24 กราฟเปรียบเทียบ ATR-FTIR สเปกตรัมของฟิล์ม PEDOT:PSS, ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene, PEDOT:PSS/graphene/SDS และ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG

ตารางที่ 4.2 ตำแหน่งของพีคที่พบในสเปกตรัมของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG

เลขคลื่น (cm^{-1})	หมู่ฟังก์ชัน
1175, 1126 และ 1040	S=O stretching ใน PSS
1522 และ 1513	C=C stretching ใน PEDOT
1316	C-C stretching ใน PEDOT
1199 และ 1087	C-O-C stretching ใน PEDOT
982, 839 และ 689	C-S stretching ใน PEDOT
3000-2800	aliphatic C-H stretching ใน SDS
3500-3200	O-H stretching ใน PSS และใน EG

4.2.2 ผลของเอทิลีนไกลคอลที่มีต่อความสามารถในการนำไฟฟ้า

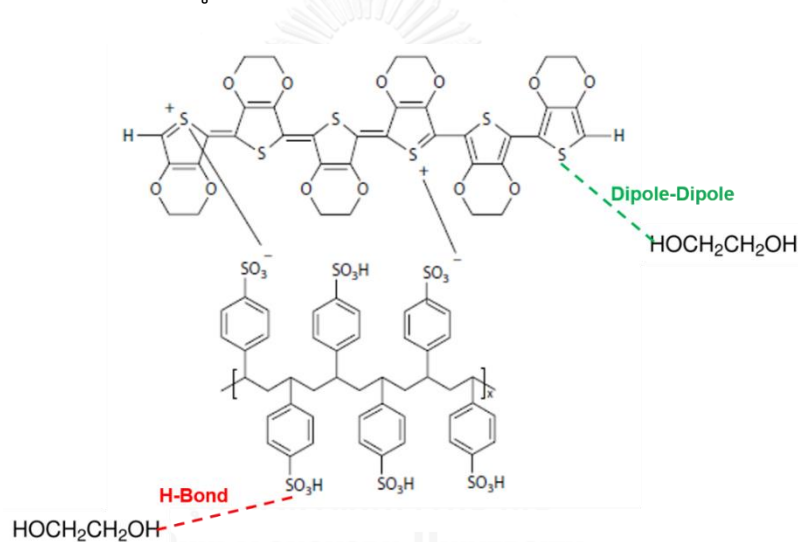
จากผลการทดลองเบื้องต้นที่ได้กล่าวมาแล้ว พบว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี in situ สูตรที่เติม SDS ที่ 2.0 %wt มีความสามารถในการนำไฟฟ้าสูงที่สุด จึงนำสูตรนี้มาเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าอีกครั้งด้วยเอทิลีนไกลคอล โดยทำการผสมเอทิลีนไกลคอลที่ความเข้มข้นแตกต่างกันดังนี้ 16.67, 28.57, 37.50, 44.44 และ 50.00 %wt นำไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงแล้ววัดความสามารถในการนำไฟฟ้าซึ่งค่าการนำไฟฟ้าที่ได้แสดงในรูปที่ 4.25



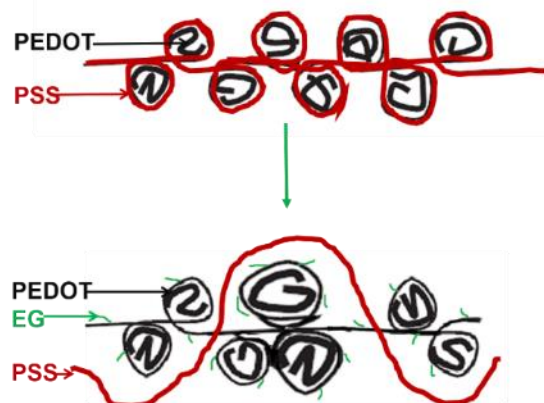
รูปที่ 4.25 ผลของความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอลที่มีต่อความสามารถในการนำไฟฟ้าของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG

รูปที่ 4.25 แสดงผลของความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอลที่มีต่อความสามารถในการนำไฟฟ้าของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG จากรูปพบว่าเมื่อปริมาณของเอทิลีนไกลคอลเพิ่มขึ้นความสามารถในการนำไฟฟ้าของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน โดยในช่วงแรกที่มีความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอลเท่ากับ 16.67 %wt ความสามารถในการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอลเพิ่มขึ้นมากกว่า 16.67 %wt ความสามารถในการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย โดยที่ความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอลเท่ากับ 28.57 %wt มีค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุดอยู่ที่ 1030.49 S/cm และเมื่อความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอลเพิ่มขึ้นมากกว่า 28.57 %wt ความสามารถในการนำไฟฟ้าจะลดลงเล็กน้อย

สาเหตุที่เอทิลีนไกลคอลทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นนั้นเกิดจากการแยกวัฏภาค (phase) ของสายโซ่ PSS ออกจากสายโซ่ของ PEDOT เมื่อสายโซ่ของ PSS แยกตัวออกไปทำให้อัตราส่วนของสายโซ่ PEDOT ที่เป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้ามีมากขึ้น ส่งผลทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าสูงขึ้น [18, 44] สำหรับสาเหตุหรือกลไกที่ทำให้สายโซ่ของ PSS แยกตัวออกจากสายโซ่ของ PEDOT หลังจากที่เติมเอทิลีนไกลคอลนั้น เกิดได้โดยหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของเอทิลีนไกลคอลเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ sulfonic acid ของ PSS และหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของเอทิลีนไกลคอลที่เหลืออีกหมู่หนึ่งหรือหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของเอทิลีนไกลคอลจากตัวอื่น อาจไปเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วกับ PEDOT ทำให้สายโซ่ของ PSS ออกจากสายโซ่ของ PEDOT มากขึ้นและเกิดการแยก phase ออกจากกัน [45] ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.26 และ 4.27



รูปที่ 4.26 การเกิดพันธะของเอทิลีนไกลคอลกับ PEDOT:PSS

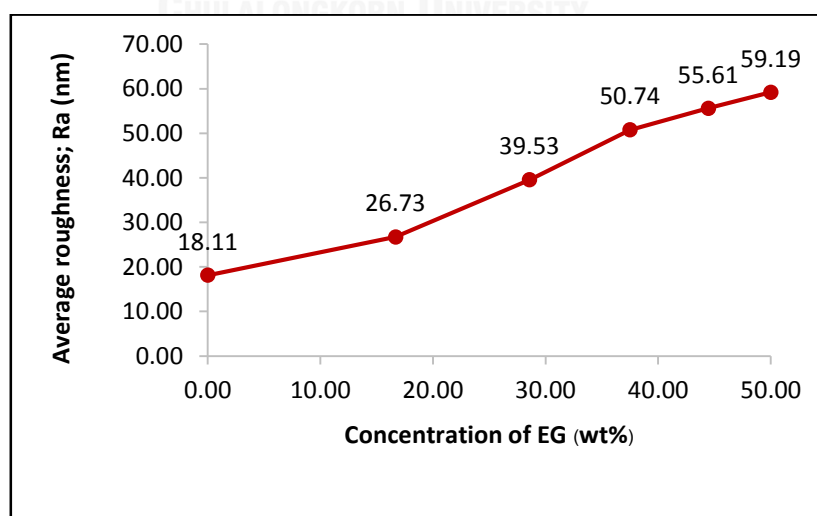


รูปที่ 4.27 การแยกวัฏภาคของสายโซ่ PSS ออกจากสายโซ่ของ PEDOT เมื่อเติมเอทิลีนไกลคอล

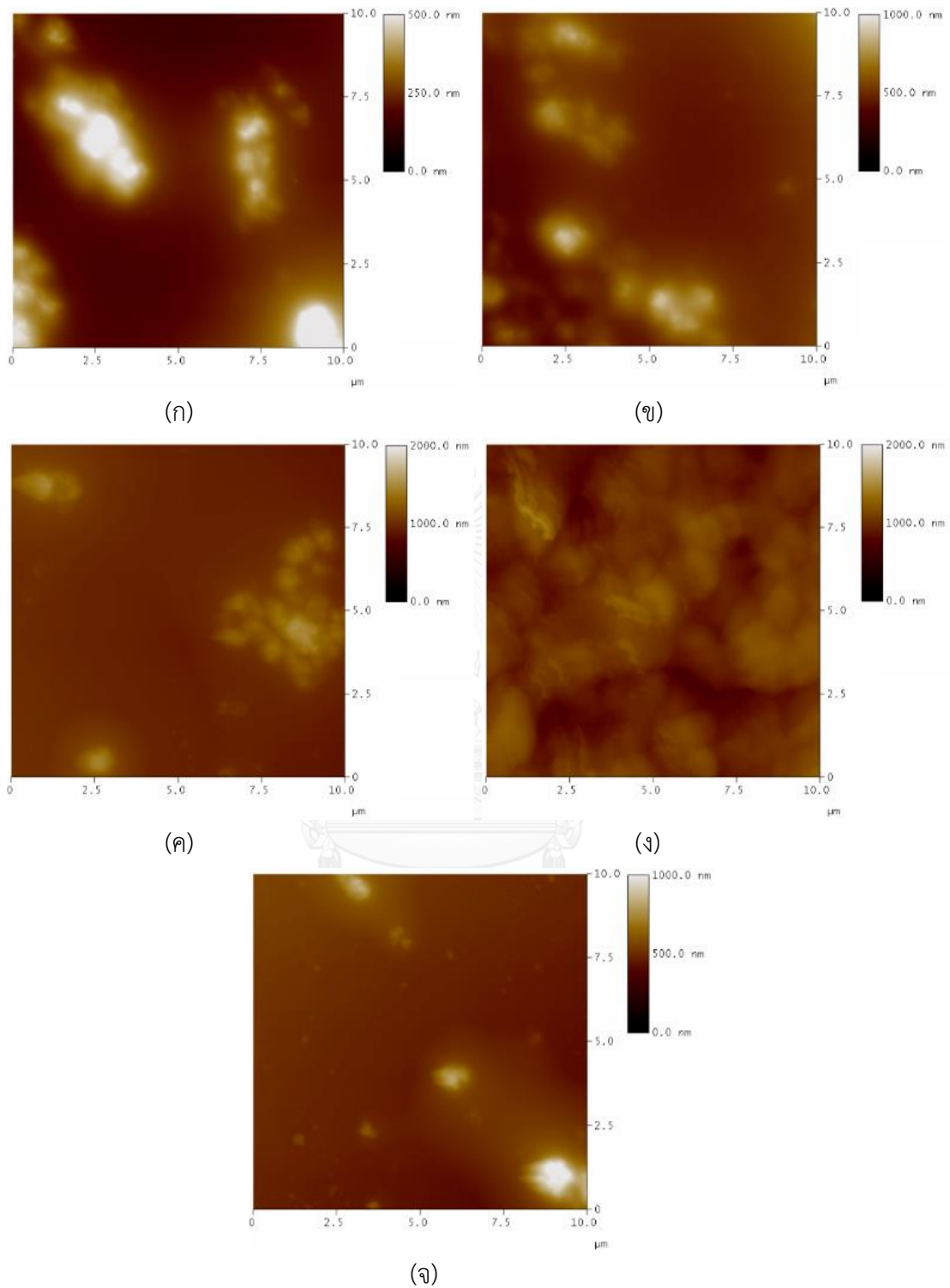
จากรูปที่ 4.27 แสดงการแยก phase ของสายโซ่ PSS ออกจากสายโซ่ของ PEDOT เมื่อเติมเอทิลีนไกลคอลเข้าไปใน PEDOT:PSS ซึ่งการแยก phase ออกไปของสายโซ่ PSS ที่ไม่มีความสามารถในการนำไฟฟ้า และการเข้าใกล้กันมากขึ้นของสายโซ่หรืออนุภาคของ PEDOT ส่งผลทำให้ ความสามารถในการนำไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น แต่การที่สายโซ่หรืออนุภาคของ PEDOT เข้าใกล้กันมากขึ้นก็อาจส่งผลทำให้เกิดการรวมกลุ่มหรือจับกลุ่มกันเอง ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าเฉพาะกลุ่มก้อนหรือเฉพาะจุดนั้นๆ สายโซ่หรืออนุภาคของ PEDOT ไม่กระจายตัว ไม่เกิดการเชื่อมโยงอย่างทั่วถึง อาจทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าไม่เพิ่มขึ้นเท่าที่ควรหรือลดลงได้เช่นกัน

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.25 ที่แสดงผลของความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอลที่มีต่อความสามารถในการนำไฟฟ้าของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG เมื่อความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอลเพิ่มขึ้นมากกว่า 28.57 %wt ความสามารถในการนำไฟฟ้าจะลดลงเล็กน้อย อาจเกิดจากการเติมเอทิลีนไกลคอลในปริมาณที่มากเกินไปส่งผลให้เกิดการแยก phase ของสายโซ่ PSS ทำให้สายโซ่หรืออนุภาคของ PEDOT เข้าใกล้กันมากขึ้นอาจส่งผลให้เกิดการรวมกลุ่มหรือจับกลุ่มกันเองส่งผลทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าจะลดลง

เมื่อนำฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG ไปศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค AFM เพื่อดูลักษณะพื้นผิวของฟิล์มว่ามีความเรียบความขรุขระหรือมีการแยก phase มากน้อยเพียงใด โดยค่าความขรุขระเฉลี่ยหรือค่า Ra ที่ได้แสดงในรูปที่ 4.28 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอลเพิ่มขึ้นค่า Ra ก็เพิ่มสูงขึ้น ความขรุขระเฉลี่ยเพิ่มมากขึ้น มีการแยก phase ของสายโซ่ PSS ออกจากสายโซ่ของ PEDOT มากขึ้น สำหรับภาพที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM แสดงในรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงค่า Ra ที่ได้จากเทคนิค AFM ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG ที่ความเข้มข้นของ EG แตกต่างกัน

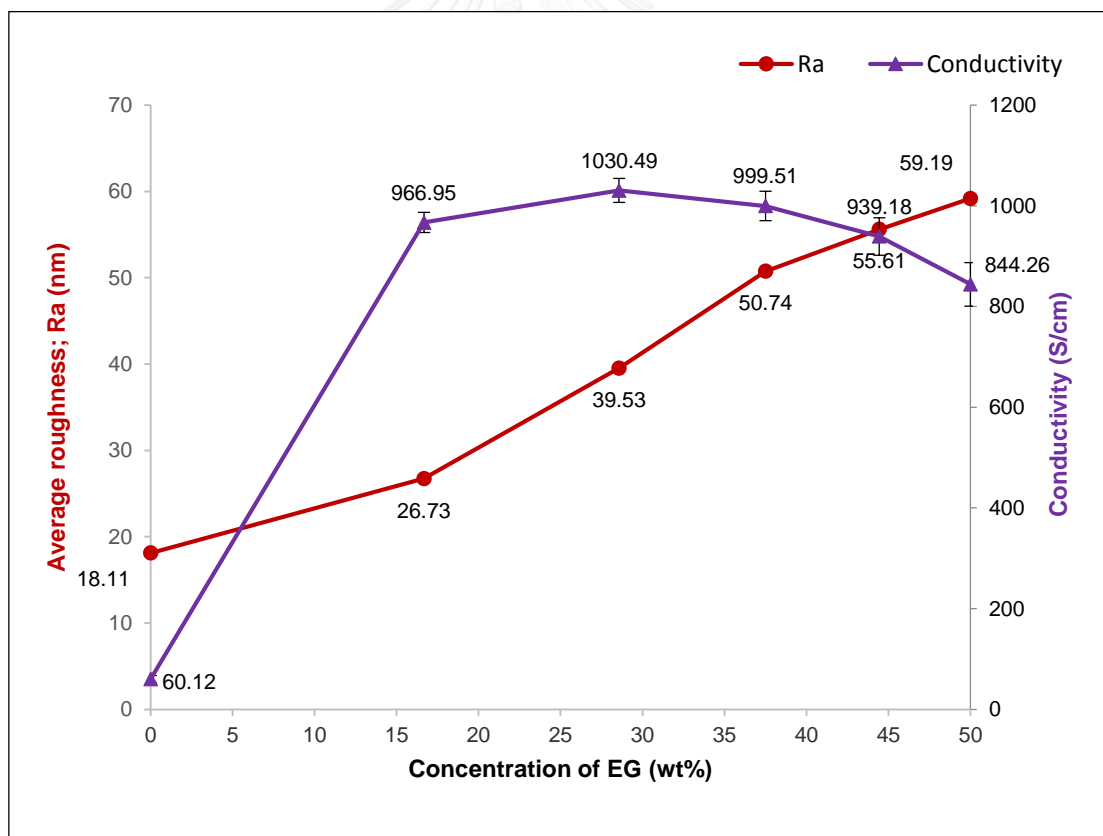


รูปที่ 4.29 ภาพ AFM ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG

(ก) 16.67 %wt EG, (ข) 28.57 %wt EG, (ค) 37.50 %wt EG,

(ง) 44.44 %wt EG และ (จ) 50.00 %wt EG

เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างผลของความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอลที่มีต่อความสามารถในการนำไฟฟ้าและค่า Ra ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM ที่แสดงถึงการแยก phase ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG ดังแสดงในรูปที่ 4.30 พบว่าเมื่อปริมาณของเอทิลีนไกลคอลเพิ่มขึ้น ความขรุขระเฉลี่ยหรือค่า Ra จะเพิ่มสูงขึ้น เกิดจากการแยก phase โดยสายโซ่ของ PSS ที่หุ้มอยู่แยกตัวออกจากสายโซ่ของ PEDOT ทำให้สายโซ่หรืออนุภาคของ PEDOT อยู่ใกล้กันมากขึ้น เกิดการรวมกลุ่มหรือจับกลุ่มกันเอง ซึ่งการแยก phase ออกไปของสายโซ่ PSS ที่ไม่มีความสามารถในการนำไฟฟ้า และการเข้าใกล้กันมากขึ้นของสายโซ่หรืออนุภาคของ PEDOT ส่งผลทำให้ ความสามารถในการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น แต่การที่สายโซ่หรืออนุภาคของ PEDOT เข้าใกล้กันมากขึ้นก็อาจส่งผลทำให้เกิดการรวมกลุ่มหรือจับกลุ่มกันเอง ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าเฉพาะกลุ่มก้อนหรือเฉพาะจุดนั้นๆ สายโซ่หรืออนุภาคของ PEDOT ไม่กระจายตัว ไม่เกิดการเชื่อมโยงอย่างทั่วถึง อาจทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าไม่เพิ่มขึ้นเท่าที่ควรหรือลดลงได้เช่นกัน



รูปที่ 4.30 ผลของความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอลที่มีต่อความสามารถในการนำไฟฟ้าและค่า Ra ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG

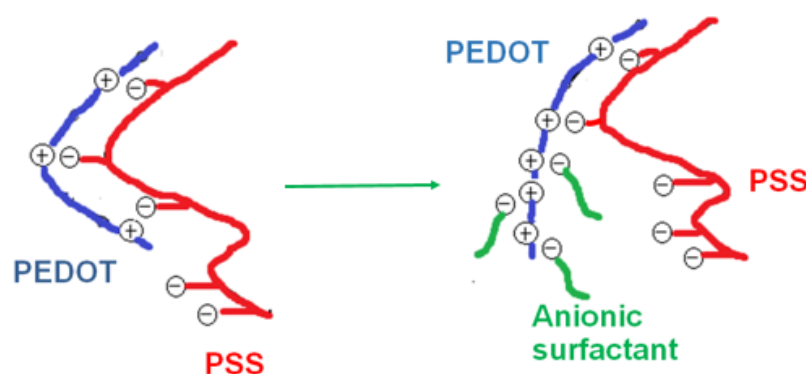
4.3 ผลของการปรับปรุงความสามารถในการนำไฟฟ้าด้วยโซเดียมโตนเตซิลซัลเฟตและเอทิลีนไกลคอล

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่างานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียม PEDOT:PSS ที่ผสมแกรฟีนโดยคาดหวังว่าแกรฟีนจะช่วยเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้า มีการเติมสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบซึ่งในที่นี้คือ SDS โดยคาดหวังว่า SDS ไปเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนและถ้าอนุภาคแกรฟีนกระจายตัวดี อนุภาคไม่เกาะกลุ่มกันเองหรือเกาะกลุ่มกันน้อยลง ก็มีโอกาสที่อนุภาคแกรฟีนนั้นจะกระจายไปทั่วชิ้นงานเกิดการเชื่อมโยงกันของอนุภาคแกรฟีน ส่งผลทำให้การถ่ายเทประจุดีขึ้น และส่งผลให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าดีขึ้นด้วยเช่นกัน

สำหรับการทดสอบสมมติฐานที่คาดว่า SDS ไปเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนและอาจจะช่วยเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าได้นั้น ผู้วิจัยได้ออกแบบการทดลองเพื่อเปรียบเทียบถึงวิธีการที่จะผสมแกรฟีนใน PEDOT:PSS โดยวิธีแรกคือแบบ in situ เป็นการเติมแกรฟีนเข้าไปในขั้นตอนการสังเคราะห์ PEDOT:PSS โดยตรง และวิธีที่สองคือแบบ mixing เป็นการเติมแกรฟีนเข้าไปหลังจากสังเคราะห์ PEDOT:PSS เสร็จสิ้นแล้ว ถ้า SDS ทำให้อนุภาคของแกรฟีนกระจายตัวได้ดีขึ้นจริง ไม่ว่าจะเป็นการเติมแกรฟีนเข้าไปในขั้นตอนการสังเคราะห์ PEDOT:PSS โดยตรง หรือหลังจากสังเคราะห์ PEDOT:PSS เสร็จสิ้นแล้ว ก็ควรมีการกระจายตัวและมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น จากผลการทดลองที่ได้อธิบายไปแล้วเบื้องต้นในหัวข้อที่ 4.1.5 แสดงให้เห็นว่าเป็นไปตามสมมติฐานดังกล่าวและการเตรียมด้วยวิธี in situ นั้นมีการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนและมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่สูงกว่าการเตรียมด้วยวิธี mixing เมื่อใช้ความเข้มข้นของ SDS เท่ากัน

นอกจากนี้ยังศึกษาถึงผลของปริมาณของ SDS ที่มีต่อสมบัติของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบด้วยเช่นกัน แต่เนื่องจากที่เคยกล่าวไว้ข้างต้นว่า SDS ส่งผลต่อความหนืดของสารที่เตรียมได้ ปริมาณ SDS ในช่วงที่เหมาะสมที่สามารถทำให้การเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงของสารที่เตรียมได้บนกระจกสไลด์ติดสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นคือไม่เกิน 2 %wt ดังนั้นความเข้มข้นของ SDS ที่ศึกษาจึงอยู่ที่ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 %wt จากผลการทดลองที่ได้อธิบายไปแล้วเบื้องต้นในหัวข้อที่ 4.1.6 แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณของ SDS เพิ่มขึ้นการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนก็เพิ่มขึ้น ความสามารถในการนำไฟฟ้าก็เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ยังพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนคือวิธีหรือขั้นตอนการเติมแกรฟีนและปริมาณของ SDS สำหรับค่าการนำไฟฟ้าที่วัดได้แสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี in situ ที่มีความเข้มข้นของ SDS ที่ 2.0 %wt มีค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุดอยู่ที่ 60.12 S/cm

จะเห็นได้ว่า SDS นอกจากจะช่วยเพิ่มการกระจายตัวให้กับอนุภาคแกรฟีนแล้วยังสามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าให้แก่ PEDOT:PSS ได้อีกด้วย โดยจากการที่ SDS เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบที่สามารถเข้าไปแทรก แทนที่สายโซ่ของ PSS ทำให้สายโซ่ของ PSS ออกจากสายโซ่ของ PEDOT มากขึ้น ส่งผลให้สายโซ่ของ PEDOT คลายตัวมากขึ้น การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนดีขึ้น ความสามารถในการนำไฟฟ้าจึงมากขึ้นด้วยเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.31 [46]



รูปที่ 4.31 การแยกตัวของสายโซ่ PSS ออกจากสายโซ่ของ PEDOT เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ

ตารางที่ 4.3 ค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์ม PEDOT:PSS และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS

Electrical conductive additive	Conductivity enhancement agent		Method of preparation	Specific conductivity (S/cm)
No graphene	No SDS	No EG	Polymerization	18.72
graphene	No SDS	No EG	Mixing in solution	20.99
	2.0 wt.% SDS			39.50
graphene	No SDS	No EG	In situ polymerization	28.36
	0.5 wt.% SDS			31.11
	1.0 wt.% SDS			39.40
	1.5 wt.% SDS			51.92
	2.0 wt.% SDS			60.12

เมื่อได้วิธีการเตรียมและปริมาณที่เหมาะสมของ SDS แล้วจึงเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าอีกครั้งด้วยสารโตนิกซ์โพลีเมอร์ซึ่งในที่นี้คือเอทิลีนไกลคอล การปรับปรุงความสามารถในการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS ด้วยการผสมแกรฟีน มีข้อดีอยู่ที่ตัวแกรฟีนเองมีความสามารถในการนำไฟฟ้าและมีความเสถียรต่อสภาพแวดล้อมสูง แต่แกรฟีนก็มีข้อจำกัดเรื่องการกระจายตัว งานวิจัยนี้จึงเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS อีกครั้งด้วยการผสมเอทิลีนไกลคอล เนื่องจากสามารถเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS ได้หลายเท่าและเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยาก สามารถผสมเข้ากับ PEDOT:PSS ได้ดี แต่ก็มีข้อจำกัดเรื่องของความเสถียรเช่นกัน เป็นสาเหตุให้งานวิจัยนี้ใช้ทั้งแกรฟีนและเอทิลีนไกลคอลในการปรับปรุงความสามารถในการนำไฟฟ้าของ PEDOT:PSS จากผลการทดลองเบื้องต้นที่ได้กล่าวมาแล้ว พบว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี in situ สูตรที่เติม SDS ที่ 2.0 %wt มีความสามารถในการนำไฟฟ้าดีที่สุด จึงนำสูตรนี้มาเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าอีกครั้งด้วยเอทิลีนไกลคอล โดยศึกษาที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ดังนี้ 16.67, 28.57, 37.50, 44.44 และ 50.00 %wt สำหรับค่าการนำไฟฟ้าที่วัดได้แสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าเมื่อปริมาณของเอทิลีนไกลคอลเพิ่มขึ้นความสามารถในการนำไฟฟ้าของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอลที่ 28.57 %wt มีค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุดอยู่ที่ 1030.49 S/cm

ตารางที่ 4.4 ค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG

Electrical conductive additive	Conductivity enhancement agent	Method of preparation	Specific conductivity (S/cm)
graphene	2.0 wt.% SDS	In situ polymerization	966.95
		(graphene)	1030.49
		followed by	999.51
		mixing with	939.18
		EG	844.26

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า

- แกรฟีนช่วยเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าให้แก่ PEDOT:PSS ได้ แต่มีข้อจำกัดเรื่องปริมาณที่เหมาะสมที่จะส่งผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีน โดยปริมาณที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้คือ 0.5 %wt ของ EDOT มอนอเมอร์

- การกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนนั้นขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียมหรือขั้นตอนการเติมแกรฟีนและปริมาณของ SDS ซึ่งการเตรียมด้วยวิธี in situ ทำให้อนุภาคแกรฟีนกระจายตัวได้ดีกว่าการเตรียมด้วยวิธี mixing เมื่อปริมาณของ SDS เพิ่มมากขึ้น ทำให้การกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนมากขึ้นและส่งผลให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าสูงขึ้นด้วยเช่นกัน โดยฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี in situ สูตรที่เติม SDS ที่ 2.0 %wt มีค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 60.12 S/cm

- SDS นอกจากจะช่วยให้อนุภาคแกรฟีนกระจายตัวดีขึ้นแล้วยังช่วยเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าให้แก่ PEDOT:PSS ได้อีกด้วย แต่การที่จะใช้ SDS เพื่อวัตถุประสงค์หลักในปรับปรุงความสามารถในการนำไฟฟ้านั้นต้องคำนึงถึงความหนืดของสารที่ต้องการจะเตรียมด้วย เนื่องจาก SDS ส่งผลต่อความหนืดของสารที่เตรียมได้ กล่าวคือเมื่อปริมาณของ SDS มากขึ้นส่งผลให้ความหนืดของสารลดลง

- เอทิลีนไกลคอล ช่วยเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าให้แก่ PEDOT:PSS ได้หลายเท่าและชัดเจนกว่าแกรฟีน วิธีการเตรียมไม่ยุ่งยากสามารถผสมเข้ากับ PEDOT:PSS ได้ดีแต่ก็ต้องคำนึงถึงปริมาณที่เหมาะสมและความเสถียรของเอทิลีนไกลคอลในสภาพแวดล้อมด้วยเช่นกัน โดยฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG สูตรที่เติมเอทิลีนไกลคอล 28.57 %wt มีค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 1030.49 S/cm

5.2 ข้อเสนอแนะ

- วิธีการเตรียมสารหรือขั้นตอนการเติมสารนั้นมีความสำคัญ ต้องควบคุมให้เหมือนกันเพราะจะส่งผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนและความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ได้
- ต้องควบคุมสภาวะที่ใช้ในการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงให้เหมือนกัน รวมถึงขั้นตอนก่อนและหลังการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง
- ควรจะศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความเสถียรของแกรฟีนในเรื่องการกระจายตัวว่ามีระยะเวลาอย่างน้อยเพียงใด และในเรื่องความเสถียรของความสามารถในการนำไฟฟ้าของสารที่เตรียมได้ทั้งในรูปแบบของเหลวและในรูปของฟิล์ม
- ควรจะศึกษาเพิ่มเติมเรื่องของความเสถียรของเอทิลีนไกลคอลต่อสภาพแวดล้อมรวมถึงระยะเวลาในการเก็บของสารที่เตรียมได้ว่าจะทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงอย่างน้อยเพียงใด ทั้งในรูปแบบของเหลวและในรูปของฟิล์ม



รายการอ้างอิง

1. Krebs, F.C., Jørgensen, M., Norrman, K., Hagemann, O., Alstrup, J., Nielsen, T.D., Fyenbo, J., Larsen, K., and Kristensen, J. A complete process for production of flexible large area polymer solar cells entirely using screen printing-first public demonstration. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 93 (2009):422-441.
2. Krebs, F.C. Polymer solar cell modules prepared using roll-to-roll methods: knife-over-edge coating, slot-die coating and screen printing. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 93 (2009): 465-475.
3. Pagès, H., Topart, P., and Lemordant, D. Wide band electrochromic displays based on thin conducting polymer films. *Electrochimica Acta* 46 (2001): 2137-2143.
4. Zhang, B., Li, W., Yang, J., Fu, Y., Xie, Z., Zhang, S., and Wang, L. Performance enhancement of polymer light-emitting diodes by using ultrathin fluorinated polyimide modifying the surface of poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate). *The Journal of Physical Chemistry C* 113 (2009): 7898-7903.
5. Xu, Y., Wang, Y., Huang, Y., Ma, Y., Wan, X., and Chen, Y. A hybrid material of graphene and poly(3,4-ethyldioxythiophene) with high conductivity, flexibility, and transparency. *Nano Research* 2 (2009): 343-348.
6. Elschner, A., Kirchmeyer, S., Merker, U., and Reuter, K. From EDOT to PEDOT: oxidative polymerization and other routes. in Elschner, A. (Ed.), *Principles and applications of an intrinsically conductive polymer*, pp.67-81. Boca Raton:CRC Press, 2010.
7. Kumar, A. and Reynolds, J.R. Soluble alkyl-substituted poly(ethylenedioxythiophenes) as electrochromic materials. *Macromolecules* 29 (1996): 7629-7630.

8. Groenendaal, L., Jonas, F., Freitag, D., Pielartzik, H., and Reynolds, J.R. Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) and its derivatives: past, present, and future. *Advanced Materials* 12 (2000): 481-494.
9. Elschner, A., Kirchmeyer, S., Merker, U., and Reuter, K. Counterions for PEDOT. in Elschner, A. (Ed.), *Principles and applications of an intrinsically conductive polymer*, pp.83-89. Boca Raton: CRC Press, 2010.
10. Elschner, A., Kirchmeyer, S., Merker, U., and Reuter, K. PEDOT:PSS. in Elschner, A. (Ed.), *Principles and applications of an intrinsically conductive polymer*, pp.113-165. Boca Raton: CRC Press, 2010.
11. Jonas, F. and Morrison, J.T. 3,4-Polyethylenedioxythiophene (PEDT): conductive coatings technical applications and properties. *Synthetic Metals* 85 (1997): 1397-1398.
12. Kishi, N., Kato, S., Saito, T., Hayashi, J., Ito, D., Hayashi, Y., SoGa, T., and Jimbo, T. Poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate)/single-wall carbon nanotube composite film for the hole transport layer in polymer solar cells. *Nano* 06 (2011): 583-588.
13. Hong, W., Xu, Y., Lu, G., Li, C., and Shi, G. Transparent graphene/PEDOT-PSS composite films as counter electrodes of dye-sensitized solar cells. *Electrochemistry Communications* 10 (2008): 1555-1558.
14. Alvi, F., Ram, M.K., Basnayaka, P.A., Stefanakos, E., Goswami, Y., and Kumar, A. Graphene-polyethylenedioxythiophene conducting polymer nano composite based supercapacitor. *Electrochimica Acta* 56 (2011):9406-9412.
15. Ashizawa, S., Horikawa, R., and Okuzaki, H. Effects of solvent on carrier transport in poly(3,4-ethylenedioxythiophene)/poly(4-styrenesulfonate). *Synthetic Metals* 153 (2005): 5-8.
16. Ouyang, J. "Secondary doping" methods to significantly enhance the conductivity of PEDOT:PSS for its application as transparent electrode of optoelectronic devices. *Displays* 34 (2013): 423-436.

17. Ouyang, J., Xu, Q., Chu, C.-W., Yang, Y., Li, G., and Shinar, J. On the mechanism of conductivity enhancement in poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonate) film through solvent treatment. Polymer 45 (2004): 8443-8450.
18. Crispin, X., Jakobsson, F.L.E., Crispin, A., Grim, P.C.M., Andersson, P., Volodin, A., Van Haesendonck, C., Van Der Auweraer, M., Salaneck, W.R., and Berggren, M. The origin of the high conductivity of poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonate) (PEDOT-PSS) plastic electrodes. Chemistry of Materials 18 (2006): 4354-4360.
19. Yan, H. and Okuzaki, H. Effect of solvent on PEDOT/PSS nanometer-scaled thin films: XPS and STEM/AFM studies. Synthetic Metals 159 (2009): 2225-2228.
20. Hu, Z., Zhang, J., Hao, Z., and Zhao, Y. Influence of doped PEDOT:PSS on the performance of polymer solar cells. Solar Energy Materials and Solar Cells 95 (2011): 2763-2767.
21. Dimitriev, O.P., Grinko, D.A., Noskov, Y.V., Ogurtsov, N.A., and Pud, A.A. PEDOT:PSS films-effect of organic solvent additives and annealing on the film conductivity. Synthetic Metals 159 (2009): 2237-2239.
22. Kim, J.Y., Jung, J.H., Lee, D.E., and Joo, J. Enhancement of electrical conductivity of poly(3,4-ethylenedioxythiophene)/poly(4-styrenesulfonate) by a change of solvents. Synthetic Metals 126 (2002): 311-316.
23. Cruz-Cruz, I., Reyes-Reyes, M., Aguilar-Frutis, M.A., Rodriguez, A.G., and López-Sandoval, R. Study of the effect of DMSO concentration on the thickness of the PSS insulating barrier in PEDOT:PSS thin films. Synthetic Metals 160 (2010): 1501-1506.
24. Fan, B., Xia, Y., and Ouyang, J. Novel ways to significantly enhance the conductivity of transparent PEDOT:PSS. Organic Light Emitting Materials and Devices XIII, pp.74151Q-74151Q-9. San Diego, California: SPIE Proceedings, 2009.

25. Sukchol, K., Thongyai, S., Praserttham, P., and Sotzing, G.A. Effects of the addition of anionic surfactant during template polymerization of conducting polymers containing PEDOT with sulfonated poly(imide) and poly(styrene sulfonate) as templates for nano-thin film applications. Synthetic Metals 179 (2013): 10-17.
26. Callister, W.D. and Rethwisch, D.G. Materials science and engineering: an introduction. New York: John Wiley & Sons, 2010.
27. Elschner, A., Kirchmeyer, S., Merker, U., and Reuter, K. The discovery and development of conducting polymers. in Elschner, A. (Ed.), Principles and applications of an intrinsically conductive polymer, pp.1-20. Boca Raton: CRC Press, 2010.
28. Roth, S. and Carroll, D. Conducting polymers: solitons and polarons. One-dimensional metals: conjugated polymers, organic crystals, carbon nanotubes and graphene, pp.117-158. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2015.
29. Takemoto, K., Ottenbrite, R.M., and Kamachi, M. Functional monomers and polymers, New York: Marcel Dekker, 1997.
30. Dai, L. Conducting polymers. Intelligent macromolecules for smart devices: from materials synthesis to device applications, pp.41-80. London: Springer 2004.
31. Van Mullekom, H.A.M., Vekemans, J.A.J.M., Havinga, E.E., and Meijer, E.W. Developments in the chemistry and band gap engineering of donor-acceptor substituted conjugated polymers. Materials Science and Engineering: R: Reports 32 (2001): 1-40.
32. Somani, P.R. and Radhakrishnan, S. Electrochromic materials and devices: present and future. Materials Chemistry and Physics 77 (2003): 117-133.
33. Tolbert, L.M. Solitons in a box: the organic chemistry of electrically conducting polyenes. Accounts of Chemical Research 25 (1992): 561-568.
34. Wallace, G.G., Spinks, G.M., Kane-Maguire, L.A.P., and Teasdale, P.R. Introduction. Conductive electroactive polymers, pp.1-58. Boca Raton: CRC Press, 2008.

35. Wang, Y. Research progress on a novel conductive polymer–poly(3,4-ethylenedioxythiophene) (PEDOT). Journal of Physics: Conference Series 152 (2009): 012023.
36. Roth, S. and Carroll, D. One-dimensional substances. One-dimensional metals: conjugated polymers, organic crystals, carbon nanotubes and graphene, pp.19-56. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2015.
37. Singh, V., Joung, D., Zhai, L., Das, S., Khondaker, S.I., and Seal, S. Graphene based materials: Past, present and future. Progress in Materials Science 56 (2011): 1178-1271.
38. Tkalya, E.E., Ghislandi, M., De With, G., and Koning, C.E. The use of surfactants for dispersing carbon nanotubes and graphene to make conductive nanocomposites. Current Opinion in Colloid & Interface Science 17 (2012): 225-232.
39. Geim, A.K. and Novoselov, K.S. The rise of graphene. Nat Mater 6 (2007): 183-191.
40. Liang, X. Transition from tubes to sheets-a comparison of the properties and applications of carbon nanotubes and graphene. in Shanov, V.N. and Yin, Z. (Ed.), Nanotube Superfiber Materials, pp.519-568. Boston: William Andrew Publishing, 2014.
41. Si, Y. and Samulski, E.T. Synthesis of water soluble graphene. Nano Letters 8 (2008): 1679-1682.
42. Kvarnström, C., Neugebauer, H., Ivaska, A., and Sariciftci, N.S. Vibrational signatures of electrochemical p- and n-doping of poly(3,4-ethylenedioxythiophene) films: an *in situ* attenuated total reflection fourier transform infrared (ATR-FTIR) study. Journal of Molecular Structure 521 (2000): 271-277.
43. Han, M.G. and Foulger, S.H. 1-Dimensional structures of poly(3,4-ethylene dioxythiophene) (PEDOT): a chemical route to tubes, rods, thimbles, and belts. Chemical Communications (2005): 3092-3094.

44. Jönsson, S.K.M., Birgersson, J., Crispin, X., Greczynski, G., Osikowicz, W., Denier Vander Gon, A.W., Salaneck, W.R., and Fahlman, M. The effects of solvents on the morphology and sheet resistance in poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-polystyrenesulfonic acid (PEDOT-PSS) films. Synthetic Metals 139 (2003): 1-10.
45. Ouyang, J., Chu, C.W., Chen, F.C., Xu, Q., and Yang, Y. High-conductivity poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonate) film and its application in polymer optoelectronic devices. Advanced Functional Materials 15 (2005): 203-208.
46. Fan, B., Mei, X., and Ouyang, J. Significant conductivity enhancement of conductive poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate) films by adding anionic surfactants into polymer solution. Macromolecules 41 (2008): 5971-5973.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก-1 ค่าสภาพความต้านทานของฟิล์ม PEDOT:PSS จากการทดลองครั้งที่ 1

ชั้นที่	การทดลองครั้งที่ 1					SER ($\times 10^3 \Omega/\text{sq}$)
	Resistance ($\times 10^3 \Omega$)				SD	
	1	2	3	Average		
1	3.79	3.78	3.73			
2	3.83	3.84	3.85			
3	3.89	3.85	3.86			
4	3.86	3.83	3.94			
5	3.89	3.92	3.95	3.84	0.10	7.99
6	3.74	3.93	3.78			
7	3.93	3.95	3.97			
8	3.68	3.72	3.54			

ตารางที่ ก-2 ค่าสภาพความต้านทานของฟิล์ม PEDOT:PSS จากการทดลองครั้งที่ 2

ชั้นที่	การทดลองครั้งที่ 2					SER ($\times 10^3 \Omega/\text{sq}$)
	Resistance ($\times 10^3 \Omega$)				SD	
	1	2	3	Average		
1	3.74	3.76	3.75			
2	3.93	3.95	3.97			
3	3.64	3.66	3.67			
4	3.64	3.68	3.69			
5	3.76	3.74	3.67	3.75	0.13	7.82
6	3.54	3.56	3.57			
7	3.93	3.95	3.97			
8	3.75	3.78	3.76			

ตารางที่ ก-3 ค่าสภาพความต้านทานของฟิล์ม PEDOT:PSS จากการทดลองครั้งที่ 3

ชั้นที่	การทดลองครั้งที่ 3					SER ($\times 10^3 \Omega/\text{sq}$)
	Resistance ($\times 10^3 \Omega$)			Average	SD	
	1	2	3			
1	3.86	3.87	3.89			
2	3.92	3.93	3.95			
3	3.68	3.69	3.72			
4	3.77	3.78	3.79			
5	3.72	3.84	3.95	3.81	0.10	7.94
6	3.82	3.95	3.87			
7	3.84	3.88	3.86			
8	3.63	3.65	3.66			

ตารางที่ ก-4 ค่าความหนาของฟิล์ม PEDOT:PSS

สูตร	ความหนา ($\text{cm} \times 10^{-7}$)				
	จากการทดลองครั้งที่			Average	SD
	1	2	3		
PEDOT:PSS	74.25	63.57	64.59	67.47	5.89

ตารางที่ ก-5 ค่าสภาพความต้านทานจากการเตรียมด้วยวิธี mixing ในการทดลองครั้งที่ 1

		การทดลองครั้งที่ 1							
%wt. SDS	ชั้นที่	Resistance ($\times 10^3 \Omega$)				SER ($\times 10^3 \Omega/\text{sq}$)			
		1	2	3	Average	SD	Average		
0 %wt	1	3.02	3.03	3.04					
	2	3.05	3.06	3.07					
	3	3.01	3.02	3.03					
	4	3.07	3.08	3.09	3.09	0.05	6.44		
	5	3.10	3.11	3.12					
	6	3.12	3.13	3.14					
	7	3.14	3.15	3.16					
	8	3.15	3.15	3.16					
1	2.18	2.19	2.30						
2	2.16	2.17	2.18						
3	2.19	2.30	2.31						
2.0 %wt.	4	2.15	2.16	2.17	2.25	0.08	4.68		
	5	2.17	2.18	2.19					
	6	2.30	2.32	2.31					
	7	2.34	2.33	2.32					
	8	2.34	2.35	2.36					

ตารางที่ ก-6 ค่าสภาพความต้านทานจากการเตรียมด้วยวิธี mixing ในการทดลองครั้งที่ 2

%wt. SDS	ชั้นที่	การทดลองครั้งที่ 2					SER ($\times 10^3 \Omega/\text{sq}$)	
		Resistance ($\times 10^3 \Omega$)			Average	SD	Average	
		1	2	3				
0 %wt	1	2.91	2.92	2.93	2.95	0.04	6.14	
	2	2.93	2.94	2.95				
	3	2.96	2.97	2.98				
	4	2.98	2.99	3.00				
	5	3.01	3.02	3.03				
	6	2.89	2.90	2.91				
	7	2.93	2.94	2.95				
	8	2.90	2.89	2.88				
2.0 %wt.	1	2.06	2.07	2.08	2.08	0.03	4.33	
	2	2.05	2.04	2.06				
	3	2.03	2.04	2.05				
	4	2.04	2.05	2.07				
	5	2.06	2.07	2.07				
	6	2.08	2.09	2.10				
	7	2.10	2.11	2.12				
	8	2.13	2.12	2.14				

ตารางที่ ก-7 ค่าสภาพความต้านทานจากการเตรียมด้วยวิธี mixing ในการทดลองครั้งที่ 3

%wt. SDS	ชั้นที่	การทดลองครั้งที่ 3					SER ($\times 10^3 \Omega/\text{sq}$)
		Resistance ($\times 10^3 \Omega$)			Average	SD	
		1	2	3			
0 %wt	1	2.90	2.89	2.87			
	2	2.86	2.87	2.88			
	3	2.89	2.90	2.91			
	4	2.86	2.87	2.88			
	5	2.85	2.86	2.87	2.90	0.03	6.03
	6	2.90	2.91	2.92			
	7	2.92	2.93	2.94			
	8	2.93	2.94	2.95			
2.0 %wt.	1	1.98	1.99	2.00			
	2	2.01	2.02	2.03			
	3	2.02	2.03	2.04			
	4	1.97	1.96	1.95			
	5	1.96	1.98	1.99	1.99	0.03	4.16
	6	1.94	1.95	1.96			
	7	1.99	2.00	2.01			
	8	2.02	2.03	2.04			

ตารางที่ ก-8 ค่าสภาพความต้านทานจากการเตรียมด้วยวิธี mixing ในการทดลองครั้งที่ 4

		การทดลองครั้งที่ 4							
%wt. SDS	ชั้นที่	Resistance ($\times 10^3 \Omega$)					SER ($\times 10^3 \Omega/\text{sq}$)		
		1	2	3	Average	SD	Average		
0 %wt	1	3.11	3.12	3.13					
	2	3.12	3.13	3.14					
	3	3.09	3.08	3.07					
	4	3.09	3.1	3.11	3.13	0.03	6.51		
	5	3.1	3.12	3.14					
	6	3.12	3.13	3.14					
	7	3.15	3.16	3.17					
	8	3.16	3.17	3.18					
1	2.26	2.27	2.28						
2	2.23	2.24	2.25						
3	2.26	2.27	2.28						
2.0 %wt.	4	2.18	2.19	2.20	2.24	0.03	4.67		
	5	2.22	2.23	2.23					
	6	2.23	2.24	2.25					
	7	2.24	2.25	2.27					
	8	2.24	2.25	2.26					

ตารางที่ ก-9 ค่าสภาพความต้านทานจากการเตรียมด้วยวิธี mixing ในการทดลองครั้งที่ 5

%wt. SDS	ชั้นที่	การทดลองครั้งที่ 5					SER ($\times 10^3 \Omega/\text{sq}$)	
		Resistance ($\times 10^3 \Omega$)			Average	SD	Average	
		1	2	3				
0 %wt	1	3.41	3.42	3.43	3.43	0.03	7.15	
	2	3.38	3.39	3.40				
	3	3.40	3.41	3.43				
	4	3.44	3.45	3.46				
	5	3.46	3.47	3.48				
	6	3.39	3.40	3.41				
	7	3.45	3.46	3.47				
	8	3.47	3.46	3.48				
2.0 %wt.	1	2.52	2.53	2.54	2.59	0.07	5.40	
	2	2.53	2.54	2.55				
	3	2.56	2.57	2.58				
	4	2.57	2.58	2.59				
	5	2.72	2.71	2.69				
	6	2.66	2.67	2.68				
	7	2.63	2.64	2.65				
	8	2.48	2.49	2.52				

ตารางที่ ก-10 ค่าสภาพความต้านทานจากการเตรียมด้วยวิธี in situ ในการทดลองครั้งที่ 1

%wt. SDS	ชั้นที่	การทดลองครั้งที่ 1					SER ($\times 10^3 \Omega/\text{sq}$)	
		Resistance ($\times 10^3 \Omega$)			Average	SD	Average	
		1	2	3				
0 %wt	1	2.38	2.39	2.40	2.48	0.10	5.17	
	2	2.39	2.41	2.43				
	3	2.45	2.46	2.47				
	4	2.46	2.49	2.50				
	5	2.48	2.89	2.49				
	6	2.51	2.53	2.54				
	7	2.46	2.47	2.48				
	8	-	-	-				
0.5 %wt	1	2.33	2.31	2.32	2.35	0.05	4.91	
	2	2.25	2.26	2.27				
	3	2.43	2.42	2.43				
	4	2.41	2.43	2.45				
	5	2.34	2.35	2.37				
	6	2.38	2.35	2.36				
	7	2.37	2.34	2.36				
	8	2.34	2.33	2.31				
1.0 %wt	1	2.28	2.24	2.31	2.10	0.14	4.38	
	2	2.19	2.20	2.17				
	3	1.92	1.93	1.94				
	4	1.97	1.93	1.95				
	5	1.96	1.98	1.95				
	6	2.23	2.27	2.28				
	7	2.14	2.15	2.16				
	8	-	-	-				
1.5 %wt	1	1.73	1.75	1.74	1.71	0.09	3.56	
	2	1.74	1.72	1.70				
	3	1.69	1.69	1.72				
	4	1.74	1.70	1.72				
	5	1.49	1.50	1.51				
	6	1.75	1.74	1.73				
	7	1.83	1.82	1.81				
	8	1.76	1.75	1.73				
2.0 %wt	1	1.75	1.71	1.69	1.55	0.14	3.24	
	2	1.57	1.58	1.57				
	3	1.59	1.62	1.60				
	4	1.49	1.49	1.48				
	5	1.25	1.25	1.24				
	6	1.48	1.50	1.59				
	7	1.53	1.58	1.66				
	8	1.67	1.66	1.73				

ตารางที่ ก-11 ค่าสภาพความต้านทานจากการเตรียมด้วยวิธี in situ ในการทดลองครั้งที่ 2

%wt. SDS	ชั้นที่	การทดลองครั้งที่ 2					SER ($\times 10^3 \Omega/\text{sq}$)	
		Resistance ($\times 10^3 \Omega$)			Average	SD	Average	
		1	2	3				
0 %wt	1	2.33	2.34	2.35	2.39	0.05	4.98	
	2	2.35	2.35	2.36				
	3	2.40	2.39	2.41				
	4	2.41	2.42	2.43				
	5	2.34	2.35	2.36				
	6	2.34	2.36	2.37				
	7	2.42	2.45	2.46				
	8	2.47	2.46	2.45				
0.5 %wt	1	2.23	2.24	2.25	2.31	0.05	4.81	
	2	2.31	2.34	2.33				
	3	2.27	2.28	2.29				
	4	2.27	2.26	2.28				
	5	2.33	2.32	2.31				
	6	2.35	2.36	2.37				
	7	2.36	2.38	2.39				
	8	2.29	2.28	2.28				
1.0 %wt	1	1.95	1.96	1.97	1.98	0.04	4.12	
	2	1.96	1.98	1.99				
	3	1.97	1.98	1.98				
	4	1.99	2.00	2.03				
	5	2.05	2.06	2.07				
	6	1.95	1.94	1.93				
	7	1.92	1.93	1.94				
	8	1.97	1.98	1.96				
1.5 %wt	1	1.58	1.57	1.56	1.57	0.01	3.28	
	2	1.56	1.57	1.57				
	3	1.58	1.59	1.60				
	4	1.55	1.57	1.58				
	5	1.56	1.59	1.57				
	6	1.58	1.59	1.58				
	7	1.56	1.57	1.57				
	8	1.55	1.56	1.58				
2.0 %wt	1	1.38	1.39	1.40	1.39	0.03	2.89	
	2	1.34	1.35	1.36				
	3	1.40	1.41	1.42				
	4	1.43	1.44	1.45				
	5	1.36	1.37	1.38				
	6	1.37	1.37	1.38				
	7	1.35	1.36	1.38				
	8	1.39	1.38	1.38				

ตารางที่ ก-12 ค่าสภาพความต้านทานจากการเตรียมด้วยวิธี in situ ในการทดลองครั้งที่ 3

%wt. SDS	ชั้นที่	การทดลองครั้งที่ 3					SER ($\times 10^3 \Omega/\text{sq}$)	
		Resistance ($\times 10^3 \Omega$)			Average	SD	Average	
		1	2	3				
0 %wt	1	2.38	2.36	2.35	2.37	0.05	4.95	
	2	2.35	2.33	2.34				
	3	2.29	2.30	2.31				
	4	2.32	2.33	2.34				
	5	2.35	2.36	2.37				
	6	2.40	2.41	2.42				
	7	2.42	2.43	2.43				
	8	2.45	2.46	2.47				
0.5 %wt	1	2.28	2.29	2.30	2.28	0.03	4.75	
	2	2.26	2.27	2.28				
	3	2.23	2.24	2.25				
	4	2.24	2.25	2.26				
	5	2.29	2.28	2.30				
	6	2.31	2.32	2.33				
	7	2.29	2.28	2.29				
	8	-	-	-				
1.0 %wt	1	1.82	1.83	1.84	1.81	0.05	3.78	
	2	1.85	1.86	1.87				
	3	1.79	1.78	1.76				
	4	1.75	1.74	1.76				
	5	1.85	1.86	1.87				
	6	1.88	1.87	1.89				
	7	1.78	1.77	1.76				
	8	1.78	1.78	1.79				
1.5 %wt	1	1.47	1.49	1.49	1.50	0.04	3.12	
	2	1.48	1.49	1.50				
	3	1.46	1.47	1.48				
	4	1.45	1.46	1.47				
	5	1.52	1.53	1.54				
	6	1.56	1.57	1.58				
	7	1.49	1.51	1.52				
	8	1.46	1.47	1.48				
2.0 %wt	1	1.28	1.29	1.30	1.35	0.04	2.82	
	2	1.30	1.31	1.32				
	3	1.33	1.34	1.35				
	4	1.34	1.32	1.33				
	5	1.37	1.38	1.39				
	6	1.39	1.40	1.41				
	7	1.40	1.41	1.42				
	8	1.34	1.35	1.36				

ตารางที่ ก-13 ค่าสภาพความต้านทานจากการเตรียมด้วยวิธี in situ ในการทดลองครั้งที่ 4

%wt. SDS	ชั้นที่	การทดลองครั้งที่ 4					SER ($\times 10^3 \Omega/\text{sq}$)	
		Resistance ($\times 10^3 \Omega$)			Average	SD	Average	
		1	2	3				
0 %wt	1	2.54	2.57	2.56	2.55	0.03	5.32	
	2	2.57	2.56	2.54				
	3	2.51	2.52	2.53				
	4	2.53	2.54	2.55				
	5	2.55	2.56	2.57				
	6	2.60	2.59	2.61				
	7	2.51	2.52	2.53				
	8	2.56	2.54	2.58				
0.5 %wt	1	2.41	2.42	2.43	2.40	0.04	4.99	
	2	2.39	2.40	2.41				
	3	2.36	2.37	2.38				
	4	2.39	2.38	2.40				
	5	2.39	2.38	2.37				
	6	2.34	2.35	2.36				
	7	2.45	2.47	2.48				
	8	-	-	-				
1.0 %wt	1	2.15	2.16	2.17	2.18	0.04	4.54	
	2	2.13	2.14	2.15				
	3	2.14	2.15	2.16				
	4	2.15	2.16	2.17				
	5	2.16	2.17	2.18				
	6	2.19	2.20	2.21				
	7	2.21	2.22	2.23				
	8	2.24	2.25	2.26				
1.5 %wt	1	1.77	1.76	1.78	1.78	0.03	3.70	
	2	1.78	1.79	1.80				
	3	1.80	1.81	1.82				
	4	1.76	1.77	1.75				
	5	1.78	1.79	1.80				
	6	1.80	1.81	1.82				
	7	1.75	1.76	1.74				
	8	1.73	1.74	1.75				
2.0 %wt	1	1.54	1.56	1.57	1.62	0.04	3.37	
	2	1.55	1.58	1.59				
	3	1.57	1.58	1.59				
	4	1.63	1.64	1.65				
	5	1.63	1.65	1.67				
	6	1.60	1.68	1.69				
	7	1.62	1.63	1.64				
	8	1.65	1.66	1.67				

ตารางที่ ก-14 ค่าสภาพความต้านทานจากการเตรียมด้วยวิธี in situ ในการทดลองครั้งที่ 5

%wt. SDS	ชั้นที่	การทดลองครั้งที่ 5					SER ($\times 10^3 \Omega/\text{sq}$)	
		Resistance ($\times 10^3 \Omega$)			Average	SD	Average	
		1	2	3				
0 %wt	1	2.47	2.48	2.49	2.62	0.11	5.46	
	2	2.48	2.49	2.50				
	3	2.54	2.55	2.56				
	4	2.56	2.56	2.57				
	5	2.78	2.77	2.78				
	6	2.76	2.75	2.75				
	7	2.64	2.66	2.63				
	8	2.69	2.70	2.71				
0.5 %wt	1	2.37	2.38	2.39	2.53	0.13	5.27	
	2	2.40	2.42	2.43				
	3	2.39	2.40	2.41				
	4	2.72	2.73	2.74				
	5	2.69	2.68	2.67				
	6	2.60	2.59	2.59				
	7	2.58	2.57	2.58				
	8	2.46	2.47	2.48				
1.0 %wt	1	2.19	2.20	2.21	2.26	0.04	4.71	
	2	2.20	2.21	2.22				
	3	2.23	2.25	2.26				
	4	2.30	2.29	2.31				
	5	2.25	2.26	2.27				
	6	2.26	2.27	2.28				
	7	2.31	2.32	2.33				
	8	2.29	2.28	2.27				
1.5 %wt	1	1.83	1.84	1.85	1.87	0.03	3.89	
	2	1.85	1.86	1.87				
	3	1.89	1.90	1.91				
	4	1.79	1.80	1.81				
	5	1.87	1.88	1.89				
	6	1.90	1.91	1.92				
	7	1.85	1.86	1.86				
	8	1.86	1.87	1.89				
2.0 %wt	1	1.62	1.63	1.64	1.67	0.03	3.48	
	2	1.64	1.66	1.67				
	3	1.69	1.69	1.70				
	4	1.70	1.71	1.72				
	5	1.65	1.66	1.67				
	6	1.67	1.66	1.69				
	7	1.64	1.66	1.67				
	8	1.68	1.70	1.71				

ตารางที่ ก-15 ค่าความหนาของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี in situ และ วิธี mixing ที่ความเข้มข้นของ SDS แตกต่างกัน

% wt. SDS	Method	ความหนา (cm x10 ⁻⁷)			Average	SD
		จากการทดลองครั้งที่				
		1	2	3		
No SDS	Mixing	65.78	79.54	74.77	73.36	6.99
	In situ	64.24	67.87	72.44	68.18	4.11
0.5	In situ	62.96	64.59	67.6	65.05	2.35
1.0	In situ	60.75	58.76	57.44	58.98	1.67
1.5	In situ	54.78	52.76	56.97	54.84	2.11
2.0	Mixing	53.69	59.34	50.28	54.44	4.58
	In situ	52.04	54.76	51.38	52.73	1.79

ตารางที่ ก-16 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS ที่เตรียมด้วยวิธี in situ และ วิธี mixing ที่ความเข้มข้นของ SDS แตกต่างกัน

% wt (SDS)	Method	Average Resistance (*10 ³ Ω)					Average SER (*10 ³ Ω/sq)	Conductivity (S/cm)
		1 st	2 nd	3 rd	4 th	5th		
0	Mixing	3.09	2.95	2.99	3.13	3.43	6.50	20.99
	In situ	2.48	2.39	2.37	2.55	2.62	5.17	28.363
0.5	In situ	2.35	2.3	2.28	2.4	2.53	4.94	31.109
1	In situ	2.1	1.98	1.81	2.18	2.26	4.30	39.39
1.5	In situ	1.71	1.57	1.5	1.78	1.87	3.51	51.916
2	Mixing	2.25	2.08	2	2.24	2.59	4.65	39.5
	In situ	1.55	1.39	1.35	1.61	1.67	3.15	60.12

ตารางที่ ก-17 ค่าสภาพความต้านทานของ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG จากการทดลองครั้งที่ 1

%wt. EG	ชั้นที่	การทดลองครั้งที่ 1					SER (Ω/sq)	
		Resistance (Ω)			Average	SD	Average	
		1	2	3				
16.67 %wt.	1	96.53	96.55	96.56	96.79	0.18	201.64	
	2	96.57	96.58	96.59				
	3	97.02	97.04	97.05				
	4	96.65	96.67	96.69				
	5	96.71	96.73	96.75				
	6	96.79	96.82	96.85				
	7	96.87	96.89	96.92				
	8	97.01	96.98	97.03				
28.57 %wt.	1	90.28	90.35	90.37	90.58	0.17	188.70	
	2	90.46	90.53	90.62				
	3	90.34	90.52	90.59				
	4	90.64	90.67	90.70				
	5	90.76	90.79	90.82				
	6	90.38	90.46	90.44				
	7	90.57	90.61	90.64				
	8	90.72	90.78	90.84				
37.50 %wt.	1	93.76	93.78	93.79	93.80	0.04	195.42	
	2	93.85	93.83	93.80				
	3	93.72	93.74	93.75				
	4	93.77	93.79	93.81				
	5	93.81	93.82	93.84				
	6	93.86	93.87	93.89				
	7	93.75	93.76	93.78				
	8	93.79	93.82	93.85				
44.44 %wt.	1	98.39	98.52	98.61	99.77	0.63	207.85	
	2	99.45	99.51	99.57				
	3	99.59	99.67	99.63				
	4	98.78	99.82	99.91				
	5	100.17	100.23	100.29				
	6	100.27	100.36	100.42				
	7	100.29	100.37	100.44				
	8	99.97	100.04	100.13				
50.00 %wt.	1	107.33	107.46	107.51	110.22	2.08	229.63	
	2	107.87	107.92	107.99				
	3	108.71	108.79	108.84				
	4	109.38	109.47	109.58				
	5	110.87	110.92	110.98				
	6	111.07	111.10	111.24				
	7	112.79	112.86	112.91				
	8	113.05	113.27	113.42				

ตารางที่ ก-18 ค่าสภาพความต้านทานของ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG จากการทดลองครั้งที่ 2

%wt. EG	ชั้นที่	การทดลองครั้งที่ 2					SER (Ω/sq)	
		Resistance (Ω)			Average	SD	Average	
		1	2	3				
16.67 %wt.	1	96.43	96.47	96.45	97.09	0.45	202.27	
	2	96.75	96.78	96.81				
	3	96.83	96.86	96.84				
	4	96.84	96.87	96.88				
	5	96.95	96.94	96.97				
	6	97.35	97.37	97.39				
	7	97.57	97.58	97.63				
	8	97.83	97.86	97.89				
28.57 %wt.	1	90.78	90.74	90.81	91.08	0.22	189.76	
	2	90.83	90.86	90.92				
	3	90.98	91.03	91.07				
	4	91.02	91.07	91.15				
	5	91.26	91.29	91.31				
	6	91.33	91.38	91.42				
	7	90.85	90.89	91.04				
	8	91.37	91.28	91.34				
37.50 %wt.	1	93.84	93.87	93.89	93.83	0.05	195.48	
	2	93.73	93.76	93.78				
	3	93.87	93.86	93.88				
	4	93.89	93.87	93.85				
	5	93.86	93.87	93.89				
	6	93.78	93.74	93.76				
	7	93.87	93.86	93.85				
	8	93.75	93.78	93.79				
44.44 %wt.	1	99.54	99.63	99.57	99.87	0.49	208.06	
	2	98.97	98.73	98.68				
	3	99.73	99.78	99.85				
	4	100.07	100.14	100.21				
	5	100.12	100.03	100.17				
	6	100.23	100.28	100.32				
	7	99.83	99.89	99.93				
	8	100.35	100.38	100.42				
50.00 %wt.	1	114.28	114.47	114.53	111.39	2.84	232.06	
	2	109.56	109.64	109.73				
	3	108.73	108.79	108.84				
	4	108.57	108.46	108.38				
	5	113.72	113.84	113.89				
	6	113.98	114.07	114.04				
	7	114.15	114.22	114.31				
	8	107.94	107.57	107.67				

ตารางที่ ก-19 ค่าสภาพความต้านทานของ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG จากการทดลองครั้งที่ 3

%wt. EG	ชั้นที่	การทดลองครั้งที่ 3					SER (Ω/sq)	
		Resistance (Ω)			Average	SD	Average	
		1	2	3				
16.67 %wt.	1	96.37	96.38	96.39	96.88	0.49	201.83	
	2	96.57	96.59	96.61				
	3	96.39	96.41	96.45				
	4	96.45	96.47	96.48				
	5	96.75	96.74	96.77				
	6	97.52	97.54	97.59				
	7	97.52	97.55	97.53				
	8	97.33	97.36	97.35				
28.57 %wt.	1	90.51	90.47	90.43	90.41	0.19	188.35	
	2	90.32	90.35	90.37				
	3	90.42	90.45	90.49				
	4	90.67	90.65	90.62				
	5	90.68	90.69	90.73				
	6	90.22	90.23	90.25				
	7	90.24	90.26	90.28				
	8	90.15	90.17	90.19				
37.50 %wt.	1	93.73	93.75	93.78	93.80	0.06	195.42	
	2	93.86	93.83	93.87				
	3	93.82	93.81	93.85				
	4	93.71	93.72	93.74				
	5	93.81	93.82	93.85				
	6	93.77	93.78	93.79				
	7	93.88	93.89	93.91				
	8	93.75	93.76	93.78				
44.44 %wt.	1	99.56	99.58	99.61	99.74	0.59	207.80	
	2	98.79	99.82	99.85				
	3	100.12	100.15	100.19				
	4	100.23	100.31	100.35				
	5	100.35	100.39	100.43				
	6	99.96	99.93	99.97				
	7	98.57	98.59	98.63				
	8	99.46	99.51	99.48				
50.00 %wt.	1	107.83	107.89	107.97	110.68	1.81	230.59	
	2	108.72	108.74	108.82				
	3	109.39	109.47	109.53				
	4	110.86	110.91	110.97				
	5	111.04	111.12	111.24				
	6	111.07	111.14	111.21				
	7	112.73	112.84	112.89				
	8	113.15	113.37	113.45				

ตารางที่ ก-20 ค่าสภาพความต้านทานของ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG จากการทดลองครั้งที่ 4

%wt. EG	ชั้นที่	การทดลองครั้งที่ 4					SER (Ω/sq)	
		Resistance (Ω)			Average	SD	Average	
		1	2	3				
16.67 %wt.	1	96.89	96.93	96.91	97.09	0.23	202.26	
	2	96.83	96.89	96.93				
	3	96.93	96.99	96.97				
	4	97.47	97.49	97.52				
	5	97.27	97.23	97.29				
	6	97.32	97.34	97.37				
	7	96.89	96.95	96.91				
	8	96.94	96.89	96.93				
28.57 %wt.	1	91.25	91.23	91.27	91.47	0.14	190.57	
	2	91.32	91.35	91.37				
	3	91.45	91.47	91.50				
	4	91.47	91.49	91.52				
	5	91.53	91.57	91.59				
	6	91.62	91.64	91.65				
	7	91.34	91.37	91.38				
	8	91.63	91.65	91.67				
37.50 %wt.	1	93.88	93.87	93.89	93.85	0.05	195.52	
	2	93.76	93.79	93.78				
	3	93.88	93.87	93.89				
	4	93.92	93.89	93.93				
	5	93.87	93.89	93.92				
	6	93.79	93.81	93.83				
	7	93.87	93.86	93.85				
	8	93.76	93.79	93.82				
44.44 %wt.	1	99.67	99.69	99.73	99.91	0.50	208.15	
	2	98.97	98.75	98.68				
	3	99.75	99.79	99.85				
	4	100.15	100.23	100.21				
	5	100.17	100.25	100.27				
	6	100.23	100.29	100.32				
	7	99.87	99.89	99.95				
	8	100.37	100.39	100.45				
50.00 %wt.	1	108.84	108.79	108.87	111.44	2.81	232.17	
	2	108.67	108.69	108.71				
	3	113.75	113.84	113.89				
	4	113.99	114.06	114.04				
	5	114.25	114.22	114.31				
	6	107.97	107.58	107.60				
	7	114.37	114.47	114.53				
	8	109.68	109.74	109.78				

ตารางที่ ก-21 ค่าสภาพความต้านทานของ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG จากการทดลองครั้งที่ 5

%wt. EG	ชั้นที่	การทดลองครั้งที่ 5					SER (Ω/sq)	
		Resistance (Ω)			Average	SD	Average	
		1	2	3				
16.67 %wt.	1	96.49	96.54	96.57	97.12	0.44	202.34	
	2	96.79	96.82	96.84				
	3	96.86	96.89	96.91				
	4	96.87	96.89	96.93				
	5	96.97	96.99	96.98				
	6	97.37	97.39	97.42				
	7	97.55	97.56	97.64				
	8	97.88	97.89	97.94				
28.57 %wt.	1	91.53	91.57	91.59	91.52	0.13	190.66	
	2	91.45	91.43	91.48				
	3	91.31	91.35	91.34				
	4	91.36	91.38	91.39				
	5	91.47	91.49	91.50				
	6	91.56	91.58	91.61				
	7	91.63	91.65	91.67				
	8	91.68	91.71	91.73				
37.50 %wt.	1	93.89	93.93	93.95	93.87	0.06	195.57	
	2	93.81	93.83	93.85				
	3	93.88	93.89	93.90				
	4	93.78	93.79	93.82				
	5	93.86	93.89	93.93				
	6	93.79	93.81	93.82				
	7	93.87	93.88	93.91				
	8	93.95	93.97	93.98				
44.44 %wt.	1	99.85	99.79	99.87	100.01	0.43	208.35	
	2	100.25	100.23	100.27				
	3	100.24	100.28	100.32				
	4	99.87	99.89	99.83				
	5	98.99	99.05	99.12				
	6	100.47	100.49	100.45				
	7	100.33	100.37	100.39				
	8	99.97	99.95	99.93				
50.00 %wt.	1	114.47	114.49	114.55	111.81	2.54	232.93	
	2	109.98	109.59	109.64				
	3	109.78	109.84	109.98				
	4	108.98	108.99	108.97				
	5	108.78	108.82	108.87				
	6	113.85	113.94	113.97				
	7	114.29	114.36	114.34				
	8	114.25	114.29	114.37				

ตารางที่ ก-22 ค่าความหนาของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG

% wt. EG	ความหนา ($\text{cm} \times 10^{-7}$)					Average	SD
	จากการทดลองครั้งที่						
	1	2	3	4	5		
16.67	48.253	53.112	49.148	53.185	52.223	51.184	2.32
28.57	53.428	50.698	49.784	48.576	53.431	51.183	2.18
37.5	49.263	47.038	54.542	50.130	54.941	51.183	3.44
44.44	52.596	49.879	44.927	52.653	55.852	51.181	4.09
50.00	53.786	44.156	48.454	50.881	58.554	51.166	5.43

ตารางที่ ก-23 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ PEDOT:PSS/graphene/SDS/EG

%wt (EG)	SER (Ω/sq)					Average SER (Ω/sq)	Conductivity S/cm
	1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th		
16.67	201.64	202.27	201.83	202.26	202.34	202.07	966.9458
28.57	188.70	189.76	188.35	190.57	190.66	189.61	1030.4882
37.50	195.42	195.48	195.43	195.52	195.57	195.48	999.513
44.44	207.85	208.06	207.80	208.15	208.35	208.04	939.1797
50.00	229.63	232.06	230.59	232.17	232.93	231.48	844.2647

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว บรรณพรวรรณ เอียดแก้ว เกิดวันที่ 20 ธันวาคม พ.ศ. 2531 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2553 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2555 ในระหว่างการศึกษได้เข้าร่วมการประชุมและนำเสนอผลงานทางวิชาการในงานการประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาศาสตร์วิจัยครั้งที่ 7 ในระหว่างวันที่ 30-31 มีนาคม พ.ศ.2558 ณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย นเรศวร

