

การเตรียมและการตรวจคุณลักษณะของสารเคลือบเพื่อเป็นตัวแคตะลิสต์สำหรับ
ขั้วแคเตอร์อิเล็กโทรดของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสง

**Preparation and Characterization of Coating Materials as a Catalyst for
Counter Electrode of Dye-Sensitized Solar Cell**

ภูริ กาลเนากุล

Phuri Kalnaowakun

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of

Master of Engineering in Materials Engineering

Prince of Songkla University

2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การเตรียมและการตรวจคุณลักษณะของสารเคลือบเพื่อเป็นตัวแคตะลิสต์สำหรับชั้นเคลือบอีพ็อกซีเรซินของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสง

ผู้เขียน นายภูริ กาลเนากุล

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม นียมवास)

คณะกรรมการสอบ
.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีคง)
.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม นียมवास)
.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรวรรณ เหล่าศิริพจน์)
.....กรรมการ
(ดร.อานอบ คันทะชา)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเองและขอแสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้อง

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม นิยมวาส)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายภูริ กาลเนาวกุล)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายภูริ กาลเนาวกุล)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การเตรียมและการตรวจคุณลักษณะของสารเคลือบเพื่อเป็นตัวแคตะลิสต์สำหรับ ขั้วแคโทดรีเล็กโทรดของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสง
ผู้เขียน	นายภูริ กาลเนากุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้ คือ การเตรียมและการตรวจคุณลักษณะสารเคลือบเพื่อใช้กับขั้วแคโทดรีเล็กโทรดในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสง ที่เกิดจากสารตั้งต้นในระบบ คือ พลาตินัม (Tetraamineplatinum (II) chloride hydrate: Pt Compound) ผงเขม่าดำ (Carbon black: CB) และ Single wall carbon nanotube (SWCNT) ในการวิจัยนี้สามารถแบ่งเป็นสองส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการสังเคราะห์วัสดุผสมจากกระบวนการของ Ultrasonic และถูกทดสอบด้วยเทคนิควิธี Doctor Blade พบว่า เมื่อนำสารตั้งต้นทั้งสองชนิดนี้มาผสมเข้าด้วยกันนั้นจะต้องใช้สาร Ethyl cellulose ซึ่งเป็นสารจำพวกพอลิเมอร์ เพื่อช่วยในการยึดเกาะกับสารที่ต้องการเคลือบ (Bonding coating) และการใช้ Ultrasonic เพื่อทำให้เกิดการแพร่กระจายของเนื้อสารที่ดีขึ้น นอกจากนี้ยังศึกษาตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณจำนวนสารประกอบ Pt (0.0045, 0.0084, 0.01, 0.03, 0.05 กรัม) ผสมกับ Carbon Black พบว่า วัสดุผสมที่สังเคราะห์ CB/Pt ที่ปริมาณของ Pt (0.01 กรัม) ต่อปริมาณคาร์บอนคงที่ หลังจากการทำสารเคลือบด้วยวิธี Doctor Blade ลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และเมื่อนำไปทดสอบค่าการเก็บประจุไฟฟ้าและความต้านทานทางไฟฟ้าพบว่าดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับ SWCNT กับ Pt compound ที่ใช้ปริมาณมากที่สุด ลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ที่ใช้เป็นมาตรฐานซึ่งนำมาเปรียบเทียบกัน พบว่า CB/Pt แสดงสมบัติการนำไฟฟ้าดีที่สุด ในส่วนที่สองเป็นการสังเคราะห์วัสดุผสมจากกระบวนการ Electrophoretic Deposition (EPD) เป็นการศึกษาลักษณะของวัสดุผสมที่สังเคราะห์ขึ้นจากการเตรียมสารละลายประเภทคอลลอยด์โดยทำการศึกษาผลกระทบของการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาของสารเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ซึ่งทำการแปรค่าตั้งแต่ 5-25V และเวลาที่ใช้ คือ 3 5 และ 7 นาที ผลของกระบวนการทาง EPD นี้ ในส่วนของ CB/Pt และ SWCNT/Pt จะถูกทดสอบค่าการเก็บประจุไฟฟ้าและความต้านทานทางไฟฟ้าที่ 5V, 15V, 25V ที่เวลา 3 5 และ 7 นาที ต่อมาในส่วนของ Pt compound จะถูกทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าที่ 5V, 15V และ 25V เป็นเวลา 7 นาที ที่เป็นมาตรฐานเปรียบเทียบกัน พบว่า ค่าความเก็บ

ประจุไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้า 5V 15V และ 25V เป็นเวลา 3 และ 5 นาที ของวัสดุผสมระหว่าง CB/Pt กับ SWCNT/Pt นั้น ในช่วง 5V และ 15V พบว่า CB/Pt กับ SWCNT/Pt นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ในส่วนที่ 5V เป็นเวลา 7 นาที ของวัสดุผสม CB/Pt, SWCNT/Pt และ Pt compound นั้นพบว่า SWCNT/Pt นั้นมีค่ามากที่สุด เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ต่ำ จึงทำให้ Pt compound นั้นแสดงสมบัติการนำไฟฟ้าไม่เต็มที่ และในส่วน 15V เป็นเวลา 7 นาที นั้นพบว่า Pt compound นั้นมีค่ามากที่สุด เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าและเวลาที่ใช้สูงและนานขึ้นจึงทำให้ Pt compound แสดงสมบัติที่ดีออกมา อีกทั้ง Pt นั้นโดยทั่วไปถูกนำไปใช้ในขั้วแคโทดอิเล็กโทรดอยู่แล้วด้วย และในส่วนสุดท้ายเป็นการทดลองที่แรงดันไฟฟ้ามากที่สุด คือ 25V พบว่า โดยที่เวลา 3 และ 5 นาที วัสดุผสมของ CB/Pt กับ SWCNT/Pt นั้นพบว่า วัสดุผสม SWCNT/Pt มีค่าการเก็บประจุทางไฟฟ้าที่ดีที่สุด ต่อมาในช่วงของเวลา 7 นาที ซึ่งทำการตรวจสอบเปรียบเทียบกับ Pt พบว่า Pt มีค่ามากที่สุด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นกับเวลาที่ใช้นานขึ้นทำให้ค่าความเก็บประจุทางไฟฟ้านั้นดีแต่จะมีค่าลดลงเมื่อค่าความถี่นั้นสูงขึ้น อย่างไรก็ตามค่าความเก็บประจุไฟฟ้าและค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุผสมของ CB/Pt และ SWCNT/Pt ที่ถูกเปรียบเทียบกับ Pt compound ที่ใช้เป็นมาตรฐาน วัสดุผสม CB/Pt และ SWCNT/Pt แสดงให้เห็นศักยภาพและสามารถนำไปประยุกต์ในส่วนขั้วแคโทดอิเล็กโทรดสำหรับใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสงได้ นอกจากนี้ผลของการสังเคราะห์วัสดุผสม CB/Pt และ SWCNT/Pt ที่วิเคราะห์ทางโครงสร้างทางจุลภาค องค์ประกอบทางเคมีและการก่อรูปของเฟสของวัสดุผสมถูกนำเสนอในงานนี้ด้วย

Thesis Title	Preparation and Characterization of Coating Materials as a Catalyst for Counter Electrode of Dye-Sensitized Solar Cell
Author	Mr. Phuri Kalnaowakun
Major Program	Materials Engineering
Academic year	2555

Abstract

The purposes of this research were to prepare and characterization of coating materials using for counter electrode of dye-sensitized solar cell. The coating material was synthesized from Carbon black (CB), Tetraamineplatinum (II) chloride hydrate (Pt compound) and Single wall carbon nanotube (SWCNT) in this thesis, which divided into two parts. In first part of the experiment was to study the synthesis of composite materials by ultrasonically method and the composite materials were prepared to doctor blade tested. The effects of platinum compound loading (0.0045, 0.0084, 0.01, 0.03, 0.05 g.) and drying temperature on the result products were investigated. The synthesized Pt/CB powders were used for coating on fluorine-doped tin oxide (FTO) conductive glasses by doctor blade technique and tested for electrical conductivity properties. The experimental results showed that the Pt/CB powders were successfully prepared from a mixture of platinum compound and carbon black powder. The highest increase rate of Pt on CB supports were found by using drying process at 100 °C for 1 h. and added ethyl cellulose. The platinum particles were well dispersed on carbon black support. The FTO coated with Pt/CB composite with lower Pt compound loading has the same range of capacitance with FTO coated Pt with higher Pt compound loading and the resistance of FTO coated with Pt/CB composite is in the same range with FTO coated Pt. In the other part, the single wall carbon nanotubes composite were synthesized for Pt/SWCNT in order to compared with Pt/CB. The results products showed the platinum which was successfully supported and well dispersed on carbon black and single wall carbon nanotube. The FTO coated with Pt/CB composite (0.01g of Pt compound loading) gave the highest capacitance, while the FTO coated, which was with Pt/SWCNT (0.01g of Pt compound loading) gave the lowest capacitance. The resistance of FTO, which was coated with Pt/CB composites, was in the same range with FTO as

coated with Pt/SWCNT. The FTO, which was coated with Pt/CB composites, shows the potential of lower cost counter electrode for DSSC. In the second part, the composite of Pt/CB, Pt/SWCNT and Pt compound nanoparticles, was synthesized to form colloidal solution for coating onto fluorine-doped tin oxide (FTO) as coated glasses by electrophoretic deposition (EPD). The effects of applied voltage (5V, 10V, 15V, 20V and 25V) at different time (3, 5 and 7 min.) were studied and tested for electrical conductivity properties at 5V, 15V and 25V for 3, 5 and 7 minutes for CB/Pt with SWCNT/Pt and Pt compound applied voltage (5V, 15V and 25V) at 7 min were investigated. The results products showed that the CB/Pt, SWCNT/Pt and Pt compound have been successfully synthesized on FTO glass. The conductivity properties at voltages 5V and 15V for 3 and 5 minutes showed SWCNT/Pt with CB/Pt as the same range of the capacitance but at 5V for 7 minutes of CB/Pt, SWCNT/Pt and Pt compound, which was found SWCNT/Pt gave the higher capacitance than Pt compound because it started with the lowest voltages. At 15V for 7 minutes of CB/Pt, SWCNT/Pt and Pt compound, which was found Pt compound gave the highest capacitance. In the final, the voltages of 25V for 3 and 5 min. showed SWCNT/Pt gave the highest capacitance and at 7 min. showed that the Pt compound gave the highest voltages. The conclusion of the capacitance and resistance were the highest value when the voltage was the highest with the longest time and decrease while high frequency. However, the capacitance and resistance showed the potential and applied in counter electrode for DSSC. These results of Pt/CB, Pt/SWCNT and Pt compound coating were characterized in term of chemical composition (XRD), microstructure and phase distribution (SEM) as combine with energy dispersive X-ray (EDX) and TEM analyses.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณผู้เกี่ยวข้องทุกท่านเป็นอย่างสูง ทั้งที่ออกนามและมีได้ออกนาม ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าในทุกด้านไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม นิยมวาส ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำปรึกษาและแนะนำดูแลตลอดช่วงการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีคง ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรวรรณ เหล่าศิริพจน์ และ ดร.อานอบ คันทะชา ที่กรุณารับเป็นกรรมการสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ และบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ ที่คอยให้คำแนะนำและเป็นທີ່ปรึกษาเกี่ยวกับการทำปฏิบัติการและงานด้านเอกสารต่างๆ และขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และกลุ่มวิจัยวิศวกรรมเซรามิกและวัสดุผสม สถาบันวิจัยวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่สนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ และบุคลากรภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อและสนับสนุนเกี่ยวกับการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือ

ขอขอบพระคุณ ร้านกวางฝา โลหะกิจ ที่ให้การสนับสนุนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ตลอดในการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ พี่ๆ พี่ๆ จากภาควิชาฟิสิกส์ และ คณาจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

ท้ายที่สุดขอขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่สาว และน้องชาย ที่อยู่เบื้องหลังคอยให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ภูริ กาลเนากุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(9)
สารบัญ	(10)
รายการตาราง	(13)
รายการรูป	(14)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของหัวข้อวิจัย	1
1.2 ทฤษฎีและหลักการ	5
1.2.1 หลักการทำงานของเซลล์	7
1.2.2 ระบบอิเล็กทรอนิกส์	8
1.2.3 ระบบสารข้อมลืวแสง	10
1.2.4 ระบบสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์	13
1.2.5 ระบบขั้วแคโทดรีเล็กโทรด	14
1.3 สมบัติทางด้านสารกึ่งตัวนำสำหรับปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม	15
1.3.1 ทฤษฎีของแสง	17
1.3.2 ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี	19
1.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
1.5 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	27
1.6 ขอบเขตของการวิจัย	27
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	27
1.8 สถานที่ทำการวิจัย	27
2. วิธีดำเนินงานวิจัย	28
2.1 อุปกรณ์การทดลอง	28
2.2 วัสดุและสารเคมี	30
2.3 การออกแบบการทดลองและวิธีการทดลอง	32

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.1 การทดลองที่ 1: ศึกษาวัสดุผสมระหว่างสารประกอบ Pt/CB	32
2.3.2 การทดลองที่ 2: ศึกษาวัสดุผสมระหว่างสารประกอบ Pt/SWCNT กับ Pt/CB	32
2.3.3 การทดลองที่ 3: ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าระหว่าง Pt/SWCNT กับ Pt/CB	32
2.3.4 การทดลองที่ 4: ศึกษาวัสดุผสมระหว่าง Pt/SWCNT กับ Pt/CB โดย EPD	33
2.3.5 การทดลองที่ 5: ศึกษาวัสดุผสมและสมบัติทางไฟฟ้าระหว่าง Pt/SWCNT, Pt/CB และ Pt compound โดย EPD	33
2.4 การดำเนินการวิจัยโดยสรุป	34
3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	38
3.1 ผลการวิเคราะห์ทางโครงสร้างทางจุลภาค	38
3.1.1 ผลต่อโครงสร้างจุลภาคของ Pt/CB, SWCNT/Pt และ Pt compound ที่เคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้าโดย Doctor Blade	39
3.1.2 ผลต่อโครงสร้างจุลภาคของ Pt/CB ที่เคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้าโดย EPD	41
3.1.3 ผลต่อโครงสร้างจุลภาคของ SWCNT/Pt ที่เคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้าโดย EPD	50
3.1.4 ผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคของ Pt compound ที่เคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้าโดย EPD	54
3.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุโดยเทคนิคทาง EDS	57
3.3 ผลการวิเคราะห์การก่อรูปของเฟสโดยเทคนิค XRD	60
3.4 ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิค TEM	63
3.5 ผลการวิเคราะห์สมบัติการนำไฟฟ้า	64
3.6 ผลการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดข้อมลิวาแสงและผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์	78
3.6.1 การเตรียมชิ้นงานเพื่อประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดข้อมลิวาแสง	78
3.6.2 ค่าผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์	79
4. บทสรุปและข้อเสนอแนะ	80
4.1 สรุปผล	80

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ข้อเสนอแนะ	81
บรรณานุกรม	82
ภาคผนวก	85
ประวัติผู้เขียน	121

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพขั้วแคโทดรีดิวซ์โพลีเมอร์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดขั้วมัลติไวแสงระหว่าง Carbon nanotubes กับ platinum (Lee., J. W. et al. 2009)	20
1.2 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพขั้วแคโทดรีดิวซ์โพลีเมอร์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดขั้วมัลติไวแสงระหว่าง HCS-2 กับ platinum (Huang., Z. et al. 2007)	21
1.3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพขั้วแคโทดรีดิวซ์โพลีเมอร์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดขั้วมัลติไวแสงโดยการเพิ่มปริมาณของ Platinum กับ Carbon black (Li., P. 2009)	22
1.4 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพขั้วแคโทดรีดิวซ์โพลีเมอร์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดขั้วมัลติไวแสงโดยการเปรียบเทียบระหว่าง ED, EP และ TD (W., J. 2008)	23
1.5 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพขั้วแคโทดรีดิวซ์โพลีเมอร์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดขั้วมัลติไวแสงโดยการเปรียบเทียบระหว่าง TD, SD และ ED (Y., H. C. 2008)	24
1.6 ผลการสรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
2.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ ที่ใช้ในการทดลอง	28
2.2 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	31
3.1 แสดงการวัดค่าประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดขั้วมัลติไวแสง	79

รายการรูป

รูปที่	หน้า
1.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำ	3
1.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อสารกึ่งตัวนำกับของเหลว	4
1.3 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดข้อมสีไวแสง	6
1.4 กลไกการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดข้อมสีไวแสง	7
1.5 สารข้อมสีไวแสงกลุ่มสารประกอบเชิงซ้อนรูธเรเนียมกับลิแกนด์โพลีไพริดีน	11
1.6 สารข้อมสีไวแสงพอร์ไฟริน	12
1.7 สารข้อมสีไวแสง Coumarin	13
1.8 การเลือกสมบัติสารกึ่งตัวนำ	16
1.9 แสดงการเปรียบเทียบการสังเคราะห์แสงของพืช (a) กับการทำงานของสารโฟโตแคตลิสต์ (b)	17
1.10 แสดงช่วงของความยาวคลื่นแสงในช่วงตามมองเห็น	19
1.11 ส่วนประกอบของเซลล์อเล็กโทรไลต์	20
1.12 แสดงกราฟผลการทดลองของ Electrophoretic Deposition (EPD) โดยการใช้กระแสไฟฟ้าซึ่งจากรูป b คือ กระแสที่ 50 V และ จากรูป a คือ กระแสที่ 25 V	25
2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติ (a) SEM with EDX (b) XRD (c) XRF และ (d) TEM	29
2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์วัสดุผสม (a) Ultrasonic (b) เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง (c) Low - High Temperature Furnace (d) Power Supply และ (e) Oven	30
2.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสารตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง (a) $Pt(NH_3)_4Cl_2 \cdot x H_2O$ (b) Carbon Black (c) Ethyl cellulose และ (d) Single Wall Carbon Nanotube	30
3.1 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดเป็นการเปรียบเทียบสารตั้งต้นกับผลิตภัณฑ์ (a) Carbon Black (CB) (b) $[Pt(NH_3)_4Cl_2]_x \cdot x H_2O$ (Pt compound) (c) CB/Pt และ (d) CB/Pt on FTO glass	39

รายการรูป

รูปที่	หน้า
3.2 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดเป็นการเปรียบเทียบสารตั้งต้นกับผลิตภัณฑ์ (a) single wall carbon nanotube (SWCNT) (b) SWCNT/Pt และ (c) SWCNT/Pt on FTO glass	40
3.3 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของผลิตภัณฑ์ (a) FTO glass (b) Pt on FTO glass (20000x) และ (c) Pt on FTO glass (50000x)	41
3.4 แสดงภาพการทดลองของกระบวนการทาง EPD	42
3.5 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของ CB/Pt บนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5V จากภาพ (a)-(c) เวลาที่ใช้ คือ 3 นาที โดย (a) ที่กำลังขยาย 2000x (b) ที่กำลังขยาย 10000x และ (c) ที่กำลังขยาย 50000x จากภาพ (d)-(f) เวลาที่ใช้ คือ 5 นาที โดย (d) ที่กำลังขยาย 2000x (e) ที่กำลังขยาย 10000x และ (f) ที่กำลังขยาย 50000x	43
3.6 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของ CB/Pt บนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10V จากภาพ (a)-(c) เวลาที่ใช้ คือ 3 นาที โดย (a) ที่กำลังขยาย 2000x (b) ที่กำลังขยาย 10000x และ (c) ที่กำลังขยาย 50000x จากภาพ (d)-(f) เวลาที่ใช้ คือ 5 นาที โดย (d) ที่กำลังขยาย 2000x (e) ที่กำลังขยาย 10000x และ (f) ที่กำลังขยาย 50000x	44
3.7 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของ CB/Pt บนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15V จากภาพ (a)-(c) เวลาที่ใช้ คือ 3 นาที โดย (a) ที่กำลังขยาย 2000x (b) ที่กำลังขยาย 10000x และ (c) ที่กำลังขยาย 50000x จากภาพ (d)-(f) เวลาที่ใช้ คือ 5 นาที โดย (d) ที่กำลังขยาย 2000x (e) ที่กำลังขยาย 10000x และ (f) ที่กำลังขยาย 50000x	45
3.8 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของ CB/Pt บนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20V จากภาพ (a)-(c) เวลาที่ใช้ คือ 3 นาที โดย (a) ที่กำลังขยาย 10000x (b) ที่กำลังขยาย 30000x และ (c) ที่กำลังขยาย 50000x จากภาพ (d)-(f) เวลาที่ใช้ คือ 5 นาที โดย (d) ที่กำลังขยาย 10000x (e) ที่กำลังขยาย 30000x และ (f) ที่กำลังขยาย 50000x	46

รายการรูป

รูปที่	หน้า
3.9 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของ CB/Pt บนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 25V จากภาพ (a)-(c) เวลาที่ใช้ คือ 3 นาที โดย (a) ที่กำลังขยาย 10000x (b) ที่กำลังขยาย 30000x และ (c) ที่กำลังขยาย 50000x จากภาพ (d)-(f) เวลาที่ใช้ คือ 5 นาที โดย (d) ที่กำลังขยาย 25000x (e) ที่กำลังขยาย 30000x และ (f) ที่กำลังขยาย 50000x	47
3.10 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของ CB/Pt บนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) และภาพตัดขวางของ CB/Pt ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5V, 15V และ 25V ที่เวลา 7 นาที จากภาพ (a)-(c) ที่ 5V โดย (a) ที่กำลังขยาย 5000x (b) ที่กำลังขยาย 10000x และ (c) ที่กำลังขยาย 10000x (d) ที่กำลังขยาย 30000x จากภาพ (e)-(h) ที่ 15V โดย (e) ที่กำลังขยาย 5000x และ (f) ที่กำลังขยาย 10000x	48
3.10 (ต่อ) แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของ CB/Pt บนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) และภาพตัดขวางของ CB/Pt ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5V, 15V และ 25V ที่เวลา 7 นาที รูป (g) ที่กำลังขยาย 10000x (h) ที่กำลังขยาย 30000x และจากภาพ (i)-(l) ที่ 25V โดย (i) ที่กำลังขยาย 5000x (j) ที่กำลังขยาย 10000x (k) ที่กำลังขยาย 10,000x (l) ที่กำลังขยาย 30000x	49
3.11 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของ SWCNT/Pt บนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5V-25V ที่เวลา 3 และ 5 นาที จากภาพ (a)-(b) ที่ 5V โดย (a) ที่เวลา 3 นาที (b) ที่เวลา 5 นาที จากภาพ (c)-(d) ที่ 10V โดย (c) ที่เวลา 3 นาที (d) ที่เวลา 5 นาที	51
3.11 (ต่อ) แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของ SWCNT/Pt บนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5V-25V ที่เวลา 3 และ 5 นาที จากภาพ (e)-(f) ที่ 15V โดย (e) ที่เวลา 3 นาที (f) ที่เวลา 5 นาที จากภาพ (g)-(h) ที่ 20V โดย (g) ที่เวลา 3 นาที (h) ที่เวลา 5 นาที จากภาพ (i)-(j) ที่ 25V โดย (i) ที่เวลา 3 นาที และ (j) ที่เวลา 5 นาที ซึ่งจากภาพทั้งหมดแสดงที่กำลังขยาย 10000x	52

รายการรูป

รูปที่	หน้า
3.12 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของ SWCNT/Pt บนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) และภาพตัดขวางของ SWCNT/Pt ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5V, 15V และ 25V ที่เวลา 7 นาที จากภาพ (a)-(c) ที่ 5V โดย (a) ที่กำลังขยาย 5000x (b) ที่กำลังขยาย 10000x และ (c) ที่กำลังขยาย 30000x	53
3.12 (ต่อ) แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของ SWCNT/Pt บนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) และภาพตัดขวางของ SWCNT/Pt ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5V, 15V และ 25V ที่เวลา 7 นาที จากภาพ (d)-(f) ที่ 15V โดย (d) ที่กำลังขยาย 5000x (e) ที่กำลังขยาย 10000x (f) ที่กำลังขยาย 30000x และจากภาพ (g)-(i) ที่ 25V โดย (g) ที่กำลังขยาย 5000x (h) ที่กำลังขยาย 10000x และ (i) ที่กำลังขยาย 30,000x	54
3.13 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของ Pt compound บนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) และภาพตัดขวางของ Pt compound ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5V, 15V และ 25V ที่เวลา 7 นาที จากภาพ (a)-(d) ที่ 5V โดย (a) ที่กำลังขยาย 5000x (b) ที่กำลังขยาย 10000x และ (c) ที่กำลังขยาย 10000x และ (d) ที่กำลังขยาย 30000x	55
3.13 (ต่อ) แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของ Pt compound บนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) และภาพตัดขวางของ Pt compound ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5V, 15V และ 25V ที่เวลา 7 นาที จากภาพ (e)-(h) ที่ 15V โดย (e) ที่กำลังขยาย 5000x (f) ที่กำลังขยาย 10000x (g) ที่กำลังขยาย 10000x (h) ที่กำลังขยาย 30000x และจากภาพ (i)-(l) ที่ 25V โดย (i) ที่กำลังขยาย 5000x (j) ที่กำลังขยาย 10000x (k) ที่กำลังขยาย 10000x (l) ที่กำลังขยาย 30000x	56
3.14 แสดงภาพผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุระหว่าง Counts per second (cps) และพลังงาน (Energy, keV) โดย EDS พบว่า (a) Carbon black (CB) (b) Pt compound (c) single wall carbon nanotube (SWCNT) (d) CB/Pt และ (e) SWCNT/Pt	57
3.15 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบการก่อรูปของเฟสโดย XRD จากภาพ (a) Carbon black (CB) (b) Pt compound (c) SWCNT (d) CB/Pt และ (e) SWCNT/Pt	60
3.16 แสดงภาพผลการวิเคราะห์โดย TEM พบว่า (a) CB/Pt 20 nm (b) CB/Pt 50 nm (c) SWCNT/Pt 20 nm และ (d) SWCNT/Pt 50 nm	63

รายการรูป

รูปที่	หน้า
3.17 แสดงภาพผลการวิเคราะห์ค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, F) และค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance, Ω) ที่ผ่านช่วงความถี่ (75 KHz – 30 MHz) ของวัสดุผสม CB/Pt	65
3.17 (ต่อ) แสดงภาพ (b) เป็นผลการวิเคราะห์ค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, F) และค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance, Ω) ที่ผ่านช่วงความถี่ (75 KHz – 30 MHz) ของวัสดุผสม CB/Pt ที่ทำการเปรียบเทียบกับ Pt compound ที่มากที่สุดที่ผ่านการเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) เรียบร้อยแล้ว	65
3.17 (ต่อ) แสดงภาพ (c) เป็นผลการวิเคราะห์ค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, F) และค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance, Ω) ที่ผ่านช่วงความถี่ (75 KHz – 30 MHz) ของวัสดุผสม Pt compound ที่มากที่สุด เปรียบเทียบกับกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass)	66
3.17 (ต่อ) แสดงภาพ (d) เป็นผลการวิเคราะห์ค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, F) และค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance, Ω) ที่ผ่านช่วงความถี่ (75 KHz – 30 MHz) ของวัสดุผสม CB/Pt ที่ทำการเปรียบเทียบกับ Pt compound ที่มากที่สุด และค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, F) และค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance, Ω) ที่ผ่านช่วงความถี่ (75 KHz – 30 MHz) ของวัสดุผสม SWCNT/Pt ที่ผ่านการเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) เรียบร้อยแล้ว	66
3.17 (ต่อ) แสดงภาพ (e) เป็นผลการวิเคราะห์ค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, F) และค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance, Ω) ที่ผ่านช่วงความถี่ (75 KHz – 30 MHz) ของวัสดุผสม CB/Pt ที่ทำการเปรียบเทียบกับ Pt compound ที่มากที่สุด	67
3.17 (ต่อ) แสดงภาพ (f) เป็นการรวมของผลการวิเคราะห์ค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, F) และค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance, Ω) ที่ผ่านช่วงความถี่ (75 KHz – 30 MHz) ของวัสดุผสม CB/Pt, SWCNT/Pt ที่ทำการเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) เรียบร้อยแล้ว	67
3.18 แสดงภาพผลการวิเคราะห์ค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, F) และค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance, Ω) ที่ผ่านช่วงความถี่ (75 KHz – 30 MHz) ของ CB/Pt ที่ 5V เวลา 3 5 และ 7 นาที่ ซึ่งผ่านการเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ในกระบวนการ EPD เรียบร้อยแล้ว	69

รายการรูป

รูปที่	หน้า
3.19 แสดงภาพผลการวิเคราะห์ค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, F) และค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance, Ω) ที่ผ่านช่วงความถี่ (75 KHz – 30 MHz) ของ CB/Pt ที่ 15V เวลา 3 5 และ 7 นาที ซึ่งถูกทำการเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ในกระบวนการ EPD เรียบร้อยแล้ว	70
3.20 แสดงภาพผลการวิเคราะห์ค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, F) และค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance, Ω) ที่ผ่านช่วงความถี่ (75 KHz – 30 MHz) ของ CB/Pt ที่ 25V เวลา 3 5 และ 7 นาที ซึ่งถูกทำการเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ในกระบวนการ EPD เรียบร้อยแล้ว	71
3.21 แสดงภาพผลการวิเคราะห์ค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, F) และค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance, Ω) ที่ผ่านช่วงความถี่ (75 KHz – 30 MHz) ของ SWCNT/Pt ที่ 5V เวลา 3 5 และ 7 นาที ซึ่งถูกทำการเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ในกระบวนการ EPD เรียบร้อยแล้ว	72
3.22 แสดงภาพผลการวิเคราะห์ค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, F) และค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance, Ω) ที่ผ่านช่วงความถี่ (75 KHz – 30 MHz) ของ SWCNT/Pt ที่ 15V เวลา 3 5 และ 7 นาที ซึ่งถูกทำการเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ในกระบวนการ EPD เรียบร้อยแล้ว	73
3.23 แสดงภาพผลการวิเคราะห์ค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, F) และค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance, Ω) ที่ผ่านช่วงความถี่ (75 KHz – 30 MHz) ของ SWCNT/Pt ที่ 25V เวลา 3 5 และ 7 นาที ซึ่งถูกทำการเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ในกระบวนการ EPD เรียบร้อยแล้ว	74
3.24 แสดงภาพผลการวิเคราะห์ค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, F) และค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance, Ω) ที่ผ่านช่วงความถี่ (75 KHz – 30 MHz) ของ Pt compound ที่ 5V 15V และ 25V เวลา 7 นาที ซึ่งถูกทำการเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ในกระบวนการ EPD เรียบร้อยแล้ว	75

รายการรูป

รูปที่	หน้า
3.25 แสดงภาพการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, F) ที่ผ่านช่วงความถี่ (75 KHz – 30 MHz) ของ CB/Pt SWCNT/Pt และ Pt compound ที่ 5V เวลา 7 นาที ซึ่งถูกทำการเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ในกระบวนการ EPD เรียบร้อยแล้ว	76
3.26 แสดงภาพการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, F) ที่ผ่านช่วงความถี่ (75 KHz – 30 MHz) ของ CB/Pt SWCNT/Pt และ Pt compound ที่ 15V เวลา 7 นาที ซึ่งถูกทำการเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ในกระบวนการ EPD เรียบร้อยแล้ว	77
3.27 แสดงภาพการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, F) ที่ผ่านช่วงความถี่ (75 KHz – 30 MHz) ของ CB/Pt SWCNT/Pt และ Pt compound ที่ 25V เวลา 7 นาที ซึ่งถูกทำการเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ในกระบวนการ EPD เรียบร้อยแล้ว	77
3.28 แสดงภาพประกอบเซลล์เพื่อทำการตรวจวัดประสิทธิภาพของเซลล์ พบว่า (a) กระจกนำไฟฟ้า (FTO) ที่เคลือบสาร CB/Pt (b) กระจกนำไฟฟ้า (FTO) ที่เคลือบสาร SWCNT/Pt (c) กระจกนำไฟฟ้า (FTO) ที่เคลือบสาร Pt compound (d) กระจกนำไฟฟ้า (FTO) ที่เคลือบสาร TiO ₂ และ N719 (e) กระจกนำไฟฟ้า (FTO) ที่เคลือบสาร SWCNT/Pt หรือ CB/Pt ที่มีสารอิเล็กโทรไลต์ผสมอยู่ และ (f) กระจกนำไฟฟ้า (FTO) ที่ประกอบเซลล์สมบูรณ์แล้ว	79

บทที่ 1

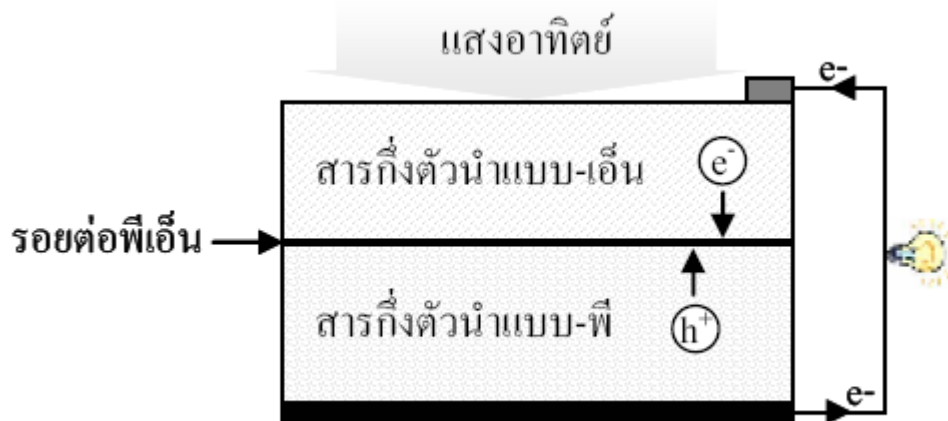
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของหัวข้อวิจัย

พลังงานไฟฟ้าถือว่าเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญของการพัฒนาประเทศ การผลิตพลังงานไฟฟ้าจำเป็นต้องใช้พลังงานจากแหล่งพลังงานอื่นๆ เช่น เชื้อเพลิงซากฟอสซิล พลังงานหมุนเวียนได้แก่ พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น จากการคาดการณ์พบว่าแหล่งพลังงานสำรองของประเทศมีปริมาณก๊าซธรรมชาติ 33 ล้านล้านลูกบาศก์ฟุต สามารถสำรองใช้ได้อีกประมาณ 30 ปี มีถ่านหินปริมาณ 1330 ล้านตันและมีปริมาณน้ำมันดิบ 714 ล้านบาร์เรล ซึ่ง สามารถสำรองใช้ได้ อีกประมาณ 62 ปี อย่างไรก็ตามจากอัตราการเติบโตของประเทศที่เพิ่มขึ้น เพื่อไปสู่ประเทศอุตสาหกรรมใหม่ ทำให้ประเทศไทยยังคงต้องมีการนำเข้าเชื้อเพลิงต่างประเทศเพื่อมาผลิตเป็นพลังงานต่อไป ดังนั้น เพื่อลดการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศและเพื่อความมั่นคงด้านพลังงาน ประเทศไทยจำเป็นต้องมีการเร่งพัฒนาและหันมาใช้พลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆ

ดวงอาทิตย์จัดเป็นแหล่งพลังงานธรรมชาติที่สะอาด ไม่ให้มลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และ พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่ไม่มีวันหมด แสงอาทิตย์นอกจากจะใช้เป็นแหล่งพลังงาน ความร้อน ยังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้โดยตรงด้วย เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำผลึกเดี่ยวซิลิคอนได้ถูกพัฒนาให้มี ประสิทธิภาพสูงเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1954 โดย Chapin และคณะ ณ ห้องปฏิบัติการเบลล์ ประเทศสหรัฐอเมริกา หลังจากนั้นได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเรื่อยๆ ในปัจจุบันได้มีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำซิลิคอนในเชิงพาณิชย์ แต่เนื่องจาก กระบวนการผลิตที่ต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูงและต้องการซิลิคอนที่มีความบริสุทธิ์สูง ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีราคาแพงเกินไปที่จะซื้อใช้ในบ้านเรือนทั่วไป ดังนั้นได้มีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสง (Dye-sensitized solar cell, DSSC) ขึ้นมา และในปัจจุบันกำลังเป็นที่สนใจเป็นอย่างมากทั้งในเชิงวิชาการและในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพีเอ็นของ สารกึ่งตัวนำซิลิคอนแต่มีกระบวนการผลิตที่ง่ายกว่า จึงทำให้มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่า

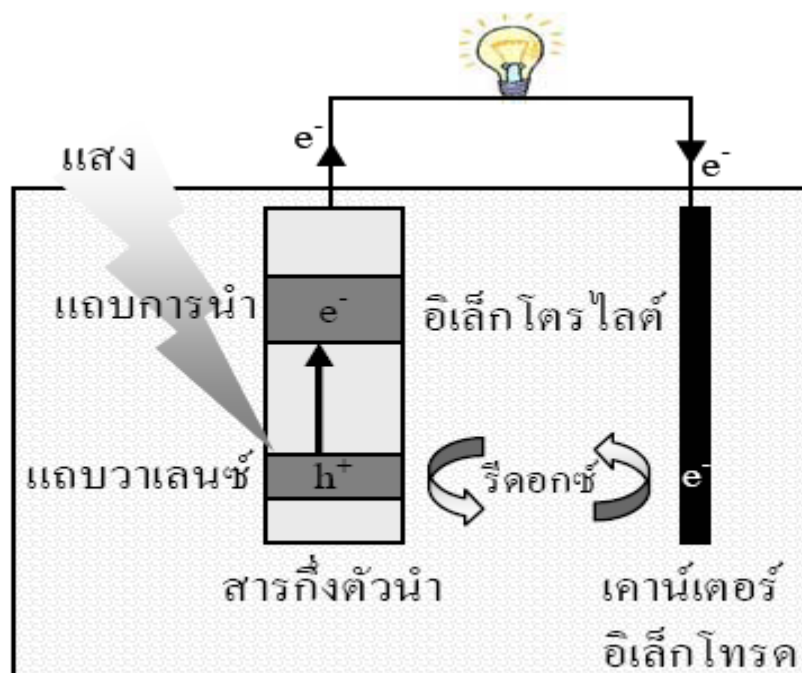
เซลล์แสงอาทิตย์สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า หรือกระแสไฟฟ้าได้โดยตรง โดยอาศัยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic effect) ซึ่งถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1839 โดย Antonie César Becquerel นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส พบว่ามีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่อมีแสงตกกระทบบนขั้วไฟฟ้าโลหะของเซลล์อิเล็กโตรไลติก และในปีค.ศ. 1941 Russell Ohl พัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำผลึกเดี่ยวซิลิคอน ณ ห้องปฏิบัติการเบลล์ ต่อมาในปี ค.ศ. 1954 Chapin และคณะ ได้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำซิลิคอน เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานของโครงการอวกาศ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้มีประสิทธิภาพเท่ากับร้อยละ 4 และได้มีพัฒนาให้มีประสิทธิภาพเท่ากับร้อยละ 11 ในเวลาอีกไม่กี่ปีต่อมา หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้อาศัยการเกิดอิเล็กตรอน (Electron, e-) และโฮล (Hole, h+) อิสระที่รอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำเมื่อมีแสงตกกระทบบน (รูปที่ 1) ดังนั้นเมื่อต่อวงจรไฟฟ้าภายนอกเข้ากับเซลล์แสงอาทิตย์ ก็จะเกิดการไหลของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระเกิดเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งสามารถนำไปใช้ได้โดยตรงหรือเก็บสำรองไว้ในแบตเตอรี่ ปี ค.ศ. 1958 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำถูกนำไปใช้งานจริงเป็นครั้งแรก กับดาวเทียมแวนการ์ด I และปี ค.ศ. 1960 บริษัท Hoffman Electronics สามารถผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 14 และหลังจากนั้นได้มีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้อย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำ ได้แก่ ก) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิคอน เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประเทศไทยนำเข้ามาใช้มากที่สุดในปัจจุบัน ข) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน นิยมใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และ ค) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกแกเลียมอาร์เซไนด์ ใช้ในอุตสาหกรรมอวกาศ เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง แต่มีราคาแพง



รูปที่ 1.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำ
(ที่มา: วินิชและคณะ, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี)

แม้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำ จะมีประสิทธิภาพในการให้กระแสไฟฟ้าสูงแต่ยังไม่ได้รับความนิยมใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีราคาแพง มีต้นทุนการผลิตสูงโดยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน 1 พานเนล 36 เซลล์ มีราคาประมาณ 35000 บาท นอกจากนี้ในกระบวนการผลิตยังมีการสร้างก๊าซมลพิษ ต่อมาได้มีแนวความคิดสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่อาศัยรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำ โดยสร้างรอยต่อสารกึ่งตัวนำกับของเหลวแทน (รูปที่ 1.2) เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำ n -CdSe กับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของ $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-/4-}$ หรือ Poly-chalcogenide เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ประกอบด้วยฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำบนขั้วไฟฟ้า แคโทดอิเล็กโทรด และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เมื่อแสงตกกระทบเซลล์ สารกึ่งตัวนำจะดูดกลืนแสงทำให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ถูกกระตุ้นขึ้นไปแถบการนำทำให้เกิดโฮลในแถบวาเลนซ์ ซึ่งจะถูกรดเชยโดยอิเล็กตรอนจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ในขณะเดียวกันอิเล็กตรอนในแถบการนำจะเคลื่อนที่ออกสู่วงจรภายนอก และสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะรับอิเล็กตรอนคืนจากแคโทดอิเล็กโทรด โดยกระบวนการทั้งหมดที่เกิดขึ้นนี้ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าครบวงจรสมบัติที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำที่จะใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ คือ ต้องมีช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) อยู่ในช่วง 1-2 eV และเสถียรต่อแสง อุณหภูมิ ความชื้น รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช (pH) ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เพื่อไม่ให้โฮลที่เกิดขึ้นถูกทำลายได้ง่าย สารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานในช่วงที่ต้องการส่วนใหญ่จะเป็นสารในกลุ่ม n -CdSe หรือ

InP แต่สารกึ่งตัวนำเหล่านี้เกิดปฏิกิริยากับน้ำหรือออกซิเจนได้ง่ายให้เป็นชั้นฟิล์มบางออกไซด์ที่มีสมบัติเป็นฉนวนและมีโฮลไม่เสถียร ดังนั้นแนวทางการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ จึงเน้นที่การสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานแคบและมีโฮลที่เสถียร เช่น CdInSe หรือ การใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีตัวทำละลายเป็นสารอินทรีย์ เป็นต้น ดังนั้นจึงนำไปสู่การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อสารกึ่งตัวนำกับของเหลว ที่ใช้สารกึ่งตัวนำเป็นโลหะออกไซด์ที่มีแถบพลังงานกว้าง (มากกว่า 3 eV) แทนสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานแคบโดยเคลือบผิวสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ด้วยโมเลกุลสารย้อมสีไวแสง (Dye sensitizer) ซึ่งทำหน้าที่ดูดกลืนแสงอาทิตย์แล้วส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังสารกึ่งตัวนำ เรียกเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ว่า “เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสง (Dye-sensitized solar cell, DSSC)” (วินิชและคณะ, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี)



รูปที่ 1.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อสารกึ่งตัวนำกับของเหลว

(ที่มา: วินิชและคณะ, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี)

เมื่อประมาณ 10 กว่าปีที่ผ่านมามี M. Grätzel และ B. Órgan ได้อาศัยพื้นฐานจากการสังเคราะห์แสงของพืชประดิษฐ์ Nano-structure dye-sensitized electrochemical solar cell ประสิทธิภาพร้อยละ 10 โดยใช้ Ruthenium (II) polypyridyl complex เป็นตัวดูดแสง ในปัจจุบันทีม

ของ Grätzel ได้พัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสงให้ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงถึงร้อยละ 11.18 โดยที่ Mr. Gratzel ได้ทำการทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสง (Dye-sensitized solar cell : DSSC) โครงสร้างพื้นฐานของ DSSC ประกอบด้วยวัสดุชั้นเป็นชั้นๆ ได้แก่ (1) ชั้นแอโนด ซึ่งเป็นกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยโลหะออกไซด์ เช่น SnO_2 และเคลือบทับด้วย TiO_2 (ที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลมคล้ายฟองน้ำ) ทำหน้าที่ดูดซับตัว Dye และรับอิเล็กตรอนจากตัว Dye (2) Dye ทำหน้าที่รับพลังงานแสงอาทิตย์และถ่ายเทอิเล็กตรอนให้กับชั้นไฟฟ้า (3) Electrolyte system (มีลักษณะหนืด) ที่สามารถจ่ายอิเล็กตรอนให้กับ Dye (4) ชั้นแคโทด ซึ่งทำหน้าที่เป็น ชั้นขั้ว ซึ่งมีความต้านทานต่ำซึ่งเคลือบด้วยโลหะ Platinum ทำหน้าที่จ่ายอิเล็กตรอนให้กับ Electrolyte system โดยใช้สารกึ่งตัวนำเป็นผลึกนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และสารย้อมสีไวแสงเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียมและลิแกนด์กลุ่มพิริดีน (Ru-pyridine complex) ดังนั้น ทำให้เรียกเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้อีกชื่อหนึ่งว่า “เซลล์แกรทเซล” (Grätzel Cells), (วินิชและคณะ, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี)

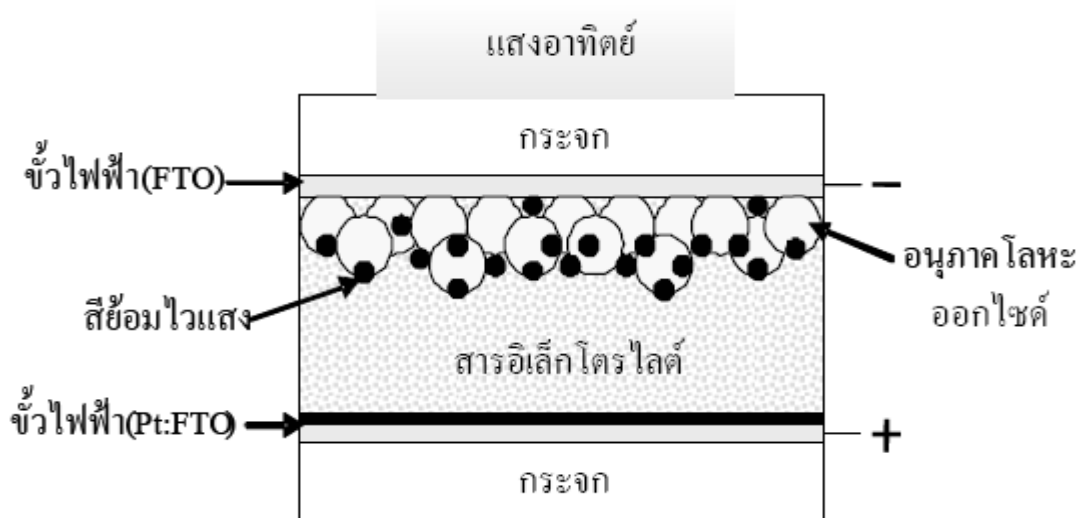
ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาของชั้นแคโทดอิเล็กโทรด เพื่อทำหน้าที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่มาจากภายนอกได้มากขึ้นให้กลับเข้าสู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte solution) โดยที่แคโทดอิเล็กโทรดต้องมีสมบัติดังนี้คือ มีค่าการนำไฟฟ้าที่ดี มีความเป็นรูพรุนสูงเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาและจะต้องเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีด้วย วัสดุที่นิยมใช้ทำเป็นแคโทดอิเล็กโทรดคือ โลหะแพลทินัม (Pt) แต่เนื่องจากโลหะแพลทินัมมีราคาแพงจึงอาจศึกษาโดยใช้วัสดุอื่นขึ้นมาแทนที่ได้ เช่น ผงคาร์บอน ท่อนาโนคาร์บอน หรือ โพลีเมอร์นำไฟฟ้า (Conducting polymer) เช่น PEDOT หรือ Polypyrrole เป็นต้น

1.2 ทฤษฎีและหลักการ

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสงมีองค์ประกอบที่สำคัญ คือ ชั้นไฟฟ้า สีย้อมไวแสง อนุภาคของโลหะออกไซด์ และอิเล็กโทรไลต์หรือตัวส่งผ่านประจุบวก (รูปที่ 1.3) โดยแต่ละส่วนมีหน้าที่และสมบัติที่สำคัญดังนี้

1. สีย้อมไวแสง ทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์และส่งผ่านอิเล็กตรอนให้กับอนุภาคโลหะออกไซด์ ดังนั้นจะต้องสมบัติที่สำคัญ เช่น มีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงกว้างในช่วงตาเห็นและใกล้อินฟราเรด เพื่อดูดกลืนแสงอาทิตย์ให้ได้มากที่สุด มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจับแสงโฟตอนที่ตกกระทบ มีสมบัติของสภาวะพื้นและสภาวะกระตุ้นที่

เหมาะสม มีเสถียรภาพสูงในสภาวะถูกออกซิไดส์ และสามารถยึดเกาะบนผิวอนุภาคโลหะออกไซด์ได้ดี



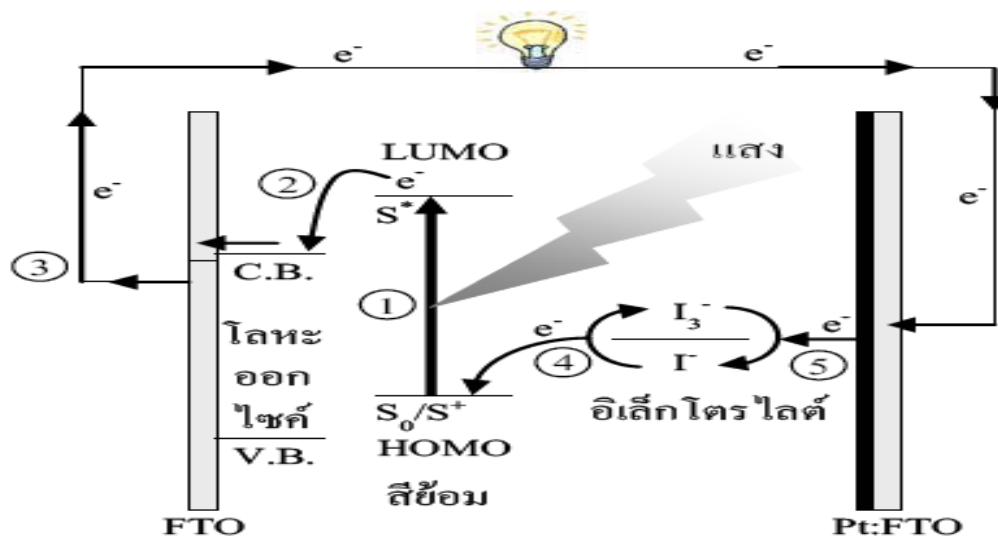
รูปที่ 1.3 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสง
(ที่มา: วินิชและคณะ, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี)

2. ชั้นอนุภาคของโลหะออกไซด์ ทำหน้าที่รับและส่งผ่านอิเล็กตรอน และเป็นพื้นผิวสำหรับการเกาะยึดของโมเลกุลสารย้อมสีไวแสง ต้องมีแถบช่องว่างพลังงานกว้าง (มากกว่า 3 eV) มีพื้นที่ผิวมาก
3. สารอิเล็กทรอนิกส์หรือตัวส่งผ่านประจุบวก ทำหน้าที่ซดเซยอิเล็กตรอนให้กับโมเลกุลสารย้อมสีไวแสงหรือรับประจุบวกจากขั้วไฟฟ้าแคโทด สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย ไม่ดูดกลืนแสงในช่วงตามองเห็น และมีอายุการใช้งานยาวนาน
4. ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าแอนโนดทำหน้าที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปสู่วงจรภายนอก นิยมใช้ Fluoride doped tin oxide (FTO) และขั้วไฟฟ้าแคโทดหรือเคาน์เตอร์ อิเล็กโทรดทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนกลับคืนสู่สารประกอบอิเล็กทรอนิกส์ ต้องนำไฟฟ้าที่ดี มีพื้นที่ผิวมาก และมีค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวสำหรับการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของอิเล็กโทรดต่ำ นิยมใช้โลหะแพลทินัมหรือแกรไฟต์

1.2.1 หลักการทำงานของเซลล์

DSSC หรือ Dye sensitized solar cell เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงชนิดใหม่ และมีหลักการการทำงานคล้ายคลึงกับกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชโดยภายในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง มีกลไกการทำงานเป็นขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 1.4 ดังนี้ (O'Regan, 1991)

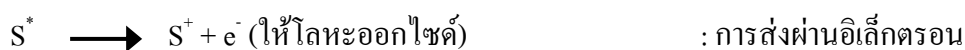
- (1) แสงตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์โมเลกุลสารย้อมสีไวแสงที่เกาะบนผิวของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์จะดูดกลืนแสง แล้วอิเล็กตรอนในสถานะพื้น (S_0) กระตุ้นให้ขึ้นไปอยู่ในสถานะเร้า (S^*)
- (2) อิเล็กตรอนในสถานะเร้า (S^*) ถูกส่งผ่านไปสู่แถบการนำไฟฟ้า (Conduction band) ของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์
- (3) อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านจากสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ไปยังขั้วแอโนด (FTO) แล้วออกสู่วงจรภายนอก (4) และ (5) ที่ขั้วแคโทดสารอิเล็กโทรไลต์เกิดกระบวนการรีดอกซ์ โดยให้อิเล็กตรอนกับสารย้อมสีไวแสงที่สูญเสียอิเล็กตรอน (S^*) ทำให้โมเลกุลสารย้อมสีกลับสู่สถานะพื้น (S_0) ในขณะที่ขั้วแคโทดสารอิเล็กโทรไลต์จะรับอิเล็กตรอนคืนจากขั้วแคโทดโลหะแพลทินัม



รูปที่ 1.4 กลไกการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (ที่มา: O'Regan, 1991)

โดยมีปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นคือ

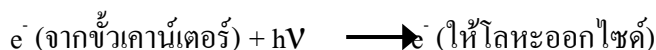
ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด



ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด



ปฏิกิริยารวม



1.2.2 ระบบอิเล็กโตรไลต์

ระบบอิเล็กโตรไลต์เป็นส่วนสำคัญที่ต้องได้รับการพัฒนาเช่นกัน เพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดข้อมลไวแสงให้ประสิทธิภาพสูงสำหรับผลิตในเชิงการค้า ในระยะเริ่มแรกระบบอิเล็กโตรไลต์เป็นระบบที่เตรียมได้ง่าย ไม่ยุ่งยาก คือ อิเล็กโตรไลต์ ของเหลว มีส่วนประกอบของกลุ่มปฏิกิริยารีดอกซ์ของไอโอดีน/ไตรไอโอดีน (I/I_3) ที่ละลายอยู่ในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น อะซีโตรไนไตร์ โพรพิโอนไนไตร์ เมทริกซ์อะซีโตรไนไตร์ โพรพิลคาร์บอนเนต เป็นต้น ในปัจจุบันอิเล็กโตรไลต์ชนิดนี้สามารถให้ประสิทธิภาพรวมของเซลล์สูงกว่าร้อยละ 10 เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการขนส่งของไอออนที่รวดเร็ว แต่มีข้อเสียคือ ตัวทำละลายที่ใช้ระเหยง่าย จึงทำให้เกิดปัญหาการหายไปหรือรั่วซึมของสารละลายออกจากตัวเซลล์แสงอาทิตย์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพรวม อายุการใช้งาน และความคงทนของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดข้อมลไวแสงลดลง ซึ่งถือว่าเป็นปัญหาที่สำคัญสำหรับเซลล์ที่ใช้ระบบอิเล็กโตรไลต์ของเหลว และต้องได้รับการแก้ไขให้แล้วเสร็จก่อนที่จะผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดข้อมลไวแสงออกสู่การผลิตในเชิงอุตสาหกรรมต่อไป

จากปัญหาดังกล่าวนำไปสู่ระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลวไอออนิก ที่มีจุดเดือดสูงขึ้น มีการนำไฟฟ้าที่ดี มีความเสถียรต่อสารเคมีและความร้อนที่ดี และไม่ติดไฟ ระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลวไอออนิกที่นิยมใช้คือสารประกอบของ Imidazolium แม้ว่าระบบอิเล็กโทรไลต์นี้จะสามารถแก้ไขปัญหาการระเหยได้ แต่ยังมีปัญหาการรั่วซึมอยู่ และให้กระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่ำกว่าระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลว เพราะมีความหนืดสูง ทำให้ไอออนไอโอดีนแพร่ตัวได้ช้าส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์ที่ได้ยังไม่สูงมากนักประมาณ ร้อยละ 2 – ร้อยละ 4 ต่อมาได้มีรายงานว่าระบบอิเล็กโทรไลต์ 1-methyl-3-propylimidazolium iodide, 1-methyl-3-ethylimidazolium dicyanamide และ lithium iodide สามารถให้ประสิทธิภาพรวมสูงขึ้นเป็นร้อยละ 6.6 เมื่อนำไปประกอบรวมกับเซลล์ที่ใช้สารข้อมสีไวแสงกลุ่มสารประกอบเชิงซ้อนโลหะรูทีเนียม การเติม Lithium iodide สามารถเพิ่มประสิทธิภาพรวมอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ Electron injection yield และ Dye regeneration rate ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลวที่ไม่ระเหยส่วนใหญ่จะใช้ไอโอดีน แต่ประสิทธิภาพรวมที่ได้ก็ยังไม่สูงมากนัก ทำให้ยังมีการพัฒนาระบบอิเล็กโทรไลต์อย่างต่อเนื่อง เช่น ระบบอิเล็กโทรไลต์ที่ปราศจากตัวทำละลายของกลุ่มปฏิริยารีดอกซ์ $\text{SeCN}^-/(\text{SeCN})_3^-$ ซึ่งมีความหนืดที่ต่ำกว่าระบบอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ Imidazolium iodide มาก (ประมาณ 45 เท่า) สามารถให้ประสิทธิภาพรวมของเซลล์สูงมากถึงร้อยละ 7.5–8.3 ภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง ความเข้มแสง AM 1.5 ระบบอิเล็กโทรไลต์อีกระบบที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมา คือ พอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ มีจุดเด่นสำคัญในเรื่องการนำพาไอออนที่สูงกว่าของไหล และสามารถแข็งตัวได้ง่าย โดยพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์มีลักษณะเป็นเจลที่มีโครงสร้างแบบโครงร่างแหสามมิติ เพื่อเพิ่มผิวสัมผัสระหว่างอิเล็กโทรไลต์แบบแข็งและชั้นรูพรุนระดับนาโนของอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ นอกจากนี้สามารถขึ้นรูปได้ง่าย และไม่มีขั้นตอนซับซ้อน ในปัจจุบันนิยมใช้ Poly(ethyleneglycol) (PEG) และ poly(ethylene oxide) (PEO) เป็นพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ และพบว่าการใช้ประโยชน์พอลิเมอร์ร่างแหแบบเจลของ PEO segments ในการทำโคพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ สามารถให้ประสิทธิภาพเซลล์สูงสุดเท่ากับร้อยละ 8.1 ภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง ความเข้มแสง AM 1.5 และยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์โดยการเพิ่มความหนาของชั้นอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ การปรับปรุงสัดส่วน ความหนืด และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของตัวทำละลาย และสามารถเติม Oligomers หรือ Plasticizers อัดแน่นเข้าไปในอิเล็กโทรไลต์พอลิเมอร์ เพื่อเพิ่มการนำพาไอออน และเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคสารข้อมสีไวแสงกับพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์นอกจากนั้นมีการพัฒนาอิเล็กโทรไลต์เจลแบบนาโนคอมพอสิต พบว่าสามารถให้ประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 7 นอกจากระบบอิเล็กโทรไลต์ที่กล่าวมาข้างต้น ยังมีระบบอิเล็กโทรไลต์อีกระบบที่น่าสนใจ คือ ระบบอิเล็กโทรไลต์ฟิล์มบาง (Thin-film solid-electrolytes) หรือตัวส่งผ่าน

ประจุบวก (Hole conductors) โดยจะเป็นสารอินทรีย์ที่มีสมบัติเป็นตัวส่งผ่านประจุบวก เช่น โมเลกุลคาร์บาโซล (Carbazole) อิเล็กโตรไลต์ระบบนี้จะไม่มีปัญหาการรั่วซึมของอิเล็กโตรไลต์ และมีอายุการใช้งานนานขึ้น เป็นต้น (Bin Li และคณะ, 2006)

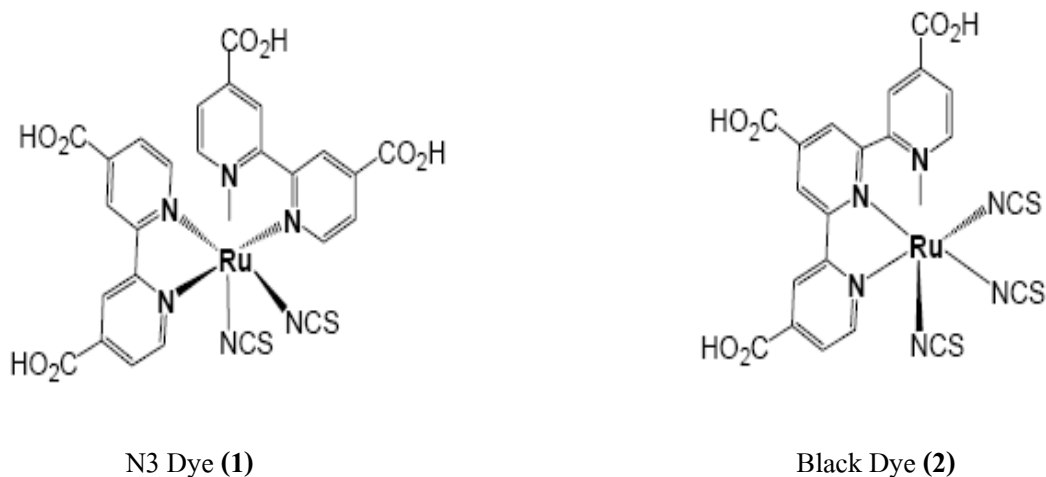
ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ระบบสารอิเล็กโตรไลต์ ทำหน้าที่ในการส่งผ่านอิเล็กตรอน (Electron transfer) จากขั้วไฟฟ้าแคโทดอิเล็กโตรดในฝั่งที่เป็นฟิล์มบางจะอาศัยกระบวนการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) และปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) หรือที่เรียกว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction) ซึ่งคุณสมบัติของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ที่ดีมีดังนี้ จะต้องไม่มีการดูดกลืนแสงอาทิตย์ ในช่วงที่ตามองเห็น มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน-ออกซิเดชันได้ง่าย เพื่อชดเชยอิเล็กตรอนให้แก่เม็ดสารย้อมสีที่อยู่ในรูปตัวออกซิไดซ์ได้อย่างรวดเร็ว และจะต้องมีความคงตัวสูง ไม่ก่อให้เกิดสารประกอบตัวใหม่ที่ไมต้องการขึ้นภายในเซลล์สารละลายอิเล็กโตรไลต์ ที่นิยมใช้ในการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้คือ สารละลายอิเล็กโตรไลต์ในระบบ ที่ได้จากการแตกตัวของสารไอโอดีน (I_2) โดยจะมีประสิทธิภาพในการให้อิเล็กตรอนกับเม็ดสารย้อมสีที่อยู่ในรูปของตัวออกซิไดซ์ที่สถานะพื้นได้เป็นอย่างดี เป็นต้น

1.2.3 ระบบสารย้อมสีไวแสง

การพัฒนาสารย้อมสีไวแสงสามารถแบ่งเป็น 3 แนวทางหลัก คือ ก) หาสารย้อมสีไวแสงชนิดใหม่ที่มีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงกว้างตั้งแต่ช่วงแสงตาเห็นจนถึงแสงใกล้อินฟราเรด เพื่อเพิ่มจำนวนอิเล็กตรอนในสถานะเร้าให้มากที่สุด ข) เพิ่มความสามารถในการยึดเกาะของสารย้อมสีไวแสงกับพื้นผิวของโลหะออกไซด์ เพื่อเพิ่มปริมาณสารย้อมสีไวแสงให้เกาะกับโลหะออกไซด์ในปริมาณมาก และ ค) เพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทอิเล็กตรอน ระหว่างสารย้อมสีกับโลหะออกไซด์ เพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนระหว่างการถ่ายเทอิเล็กตรอน จากแนวทางดังกล่าวสามารถจำแนกสารย้อมสีไวแสงออกเป็น 3 กลุ่มหลัก คือ

1.2.3.1 กลุ่มสารย้อมสีไวแสงจำพวกสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูธินียมกับลิแกนด์โพลีไพริดีน สารย้อมสีกลุ่มไวแสงกลุ่มนี้ได้รับความสนใจและศึกษาพัฒนาอย่างกว้างขวาง เนื่องจากรูธินียมเป็นโลหะมีความต่างศักย์รีดอกซ์สูง เหมาะสมสำหรับการกระตุ้นและส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ออกไซด์ได้ดี (Grätzel และคณะ, 1991), (Nazeeruddin และคณะ, 1997), (Nazeeruddin และคณะ, 2003), (Cherepy และคณะ, 1997) เป็นกลุ่มวิจัยแรกที่ประสบความสำเร็จอย่างมากในการพัฒนาสารย้อมสีไวแสงประเภทนี้ โดย

สังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียมกับลิแกนด์โพลีไพริดีนหรืออนุพันธ์ของโพลีไพริดีน โดยลิแกนด์โพลีไพริดีนจะมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล (-COOH) เป็นส่วนประกอบของโมเลกุล และมีความสามารถดูดซับบนพื้นผิวของโลหะออกไซด์ได้ดี ตัวอย่างสารย้อมสีไวแสงกลุ่มนี้ ได้แก่ N3 Dye (1) และ Black Dye (2) พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สารย้อมสีไวแสงกลุ่มนี้พบว่าให้ประสิทธิภาพรวมสูงถึง 10.4% มีค่าใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำ ดังรูปที่ 1.5 แม้ว่าการใช้สารประกอบเชิงซ้อนกลุ่มโลหะรูทีเนียมกับลิแกนด์โพลีไพริดีนจะให้ประสิทธิภาพรวมสูง แต่ยังมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น มีช่วงการดูดกลืนคลื่นแสงอาทิตย์ที่แคบ การสังเคราะห์และทำให้บริสุทธิ์ยาก และยังมีราคาแพง จึงมีการศึกษาและทดลองใช้สารย้อมสีไวแสงชนิดอื่นๆแทน

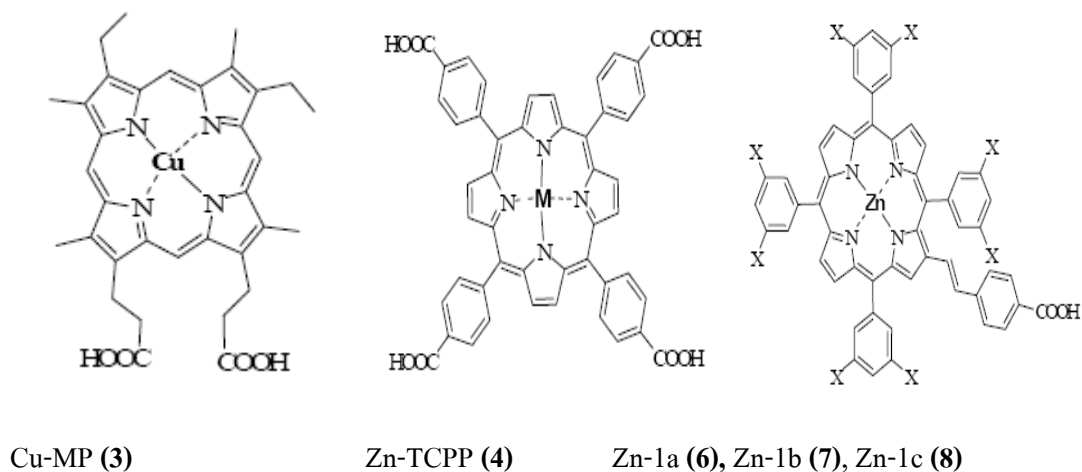


รูปที่ 1.5 สารย้อมสีไวแสงกลุ่มสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียมกับลิแกนด์โพลีไพริดีน

(ที่มา : <http://www.lookchem.com>, 2009)

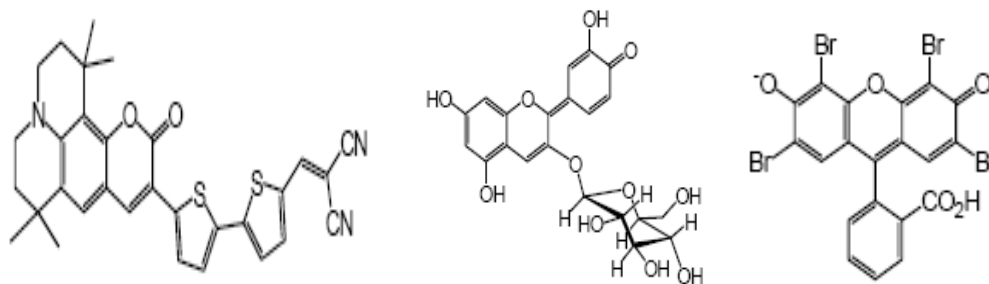
1.2.3.2 กลุ่มสารย้อมสีไวแสงพอร์ไฟริน (Porphyrin) โดยปี 1993 ได้สังเคราะห์อนุพันธ์พอร์ไฟริน เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการดูดกลืนแสงบนตัวดูดซับไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าสารย้อมสีไวแสง Cu-MP (3) ให้ประสิทธิภาพรวมเท่ากับร้อยละ 2.6 ในปี 1996 ได้สังเคราะห์พอร์ไฟริน Zn-TCPP (4) พบว่าให้ประสิทธิภาพรวมประมาณร้อยละ 1.1 ต่อมาในปี 2000 ใช้ TCPP (5) ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของ Zn-TCPP (4) แต่ปราศจากโลหะ Zn เป็นโมเลกุลสารย้อมสีไวแสง พบว่าให้ประสิทธิภาพรวมเพิ่มขึ้นเป็น 3.5% และในปี 2004 สังเคราะห์พอร์ไฟริน Meso-linkes สาร Zn-1a (6), Zn-1b (7) และ Zn-1c (8) พบว่าให้ประสิทธิภาพรวมของ Zn-1b (7) สูงถึงร้อยละ 4.2 แม้ว่า

ประสิทธิภาพรวมของสารย้อมสีกลุ่มพอร์ไฟริน จะมีค่าต่ำกว่าของสารย้อมสีกลุ่มสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียมมาก แต่การสังเคราะห์สารย้อมสีไวแสงพอร์ไฟรินสามารถปรับเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันภายในโมเลกุลได้ง่ายและมีแนวโน้มในการเพิ่มประสิทธิภาพไปในทางที่ดีขึ้น ดังรูปที่ 1.6

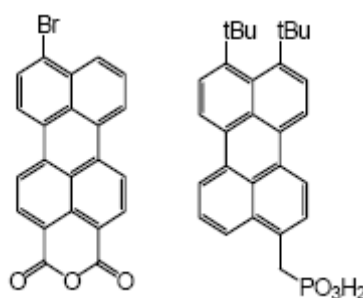


รูปที่ 1.6 สารย้อมสีไวแสงพอร์ไฟริน (ที่มา : <http://www.lookchem.com>, 2009)

1.2.3.3 กลุ่มสารย้อมสีไวแสงสารอินทรีย์ เป็นการนำสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติหรือสังเคราะห์ขึ้นมาใช้เป็นสารย้อมสีไวแสงส่วนใหญ่เป็นโมเลกุลที่มีพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยวต่อกันยาว และมีหมู่ฟังก์ชันที่มีความเป็นขั้วสูง ตัวอย่างสารย้อมสีไวแสงสารอินทรีย์ เช่น กลุ่มอนุพันธ์โมเลกุลของเคมาริน (Coumarin) (9-11) พบว่าให้ประสิทธิภาพรวมประมาณร้อยละ 7.7 นอกจากนี้ยังมีอีกกลุ่มหนึ่งที่น่าสนใจคือ สารกลุ่มเพอริลีน (Perylene dye) (12-13) พบว่าให้ประสิทธิภาพรวมใกล้เคียงกันกับอนุพันธ์ของเคมาริน แม้ว่าสารย้อมสีไวแสงสารอินทรีย์ให้ประสิทธิภาพรวมต่ำกว่ากลุ่มสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียม แต่ยังคงได้รับความสนใจและศึกษาพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพราะมีราคาถูก สังเคราะห์ได้ง่าย และมีความเป็นพิษต่ำ ดังรูปที่ 1.7



Coumarin based NKX-2677 (9) Flavonoid anthocyanin dye (10) Xanthene dye (11)



Perylene dye (12) Perylene dye (13)

รูปที่ 1.7 สารย้อมสีไวแสง Coumarin (ที่มา : <http://www.lookchem.com>, 2009)

1.2.4 ระบบสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์

เพื่อให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสงสูงสุด ชั้นอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ จะต้องมีประสิทธิภาพสูง มีพลังงานแถบช่องว่าง (E_g) ที่กว้าง มีพื้นที่ผิวมากเพื่อให้โมเลกุลสารย้อมสียึดเกาะได้ในปริมาณมาก มีการกระจายตัวของรูพรุนสม่ำเสมอเพื่อการแพร่ผ่านของไอออนอิเล็กโทรไลต์ได้ดี และแต่ละอนุภาคจะต้องเชื่อมติดกันอย่างต่อเนื่องเพื่อให้อิเล็กตรอนสามารถแพร่ผ่านได้ดี อนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำที่กลุ่มของ (Grätzel และคณะ, 1991) เลือกใช้ในการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสงครั้งแรก คือ อนุภาคผลึกนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีพลังงานแถบช่องว่างกว้างประมาณ 3.2 eV มีประสิทธิภาพสูง ในการพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสง ได้มีความพยายามเปลี่ยนอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำที่มีพลังงานแถบช่องว่างชนิดอื่นๆ แทน เช่น TiO_2 , ZnO , WO_3 , Fe_2O_3 , SrTiO_3 , CdS , MoS_2 , ZnS , ZnTe และ CdSe เป็นต้น โดยในปี (Law, M., และคณะ, 2005) พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสง ที่ใช้สารย้อมสีไวแสง

N719 คุณสมบัติของลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ มีประสิทธิภาพรวมใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่ใช้อุณหภูมิปกติของซิลิคอนไดออกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากลวดนาโนช่วยให้ส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังขั้วไฟฟ้าได้มากขึ้น และลวดนาโนมีพื้นที่ผิวสูง และในปี (Baxter, J. และคณะ, 2006) สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่ใช้อุณหภูมิสูง N719 คุณสมบัติของลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ พบว่ามีแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด 0.7 – 0.8 V กระแสไฟฟ้าลัดวงจร 3 mA/cm² และมีประสิทธิภาพรวมร้อยละ 1.1 นอกจากการเปลี่ยนชนิดของสารกึ่งตัวนำ แล้ว แนวทางหนึ่งสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่ใช้อุณหภูมิสูง คือ การปรับเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคของสารกึ่งตัวนำ ทั้งเพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวเพื่อให้ปริมาณโมเลกุลสารซิลิคอนที่ผลิตได้สามารถยึดเกาะได้มากขึ้น ทำให้มีการกระจายตัวของช่องว่างระหว่างอนุภาคอย่างสม่ำเสมอและเพิ่มระยะทางการแพร่ของอิเล็กตรอนให้มากขึ้นเพื่อลดการเกิดการรีคอมไบเนชันของประจุ เป็นต้น

1.2.5 ระบบขั้วแคโทดอิเล็กโทรด

ขั้วแคโทดอิเล็กโทรด ทำหน้าที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่มาจากภายนอกให้กลับเข้าสู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte solution) โดยที่แคโทดอิเล็กโทรดต้องมีสมบัติดังนี้คือ มีการนำไฟฟ้าที่ดี มีความเป็นรูพรุนสูงเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา และจะต้องเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีด้วย วัสดุที่นิยมใช้ทำเป็นขั้วแคโทดอิเล็กโทรดคือ โลหะแพลทินัม (Pt) แต่เนื่องจากโลหะแพลทินัมมีราคาแพงอาจใช้วัสดุอื่นแทนได้ เช่น ผงคาร์บอน ท่อคาร์บอนนาโน ผงคาร์บอนแบล็ค หรือโพลิเมอร์นำไฟฟ้า (Conducting polymer) เช่น PEDOT หรือ Polypyrrole เป็นต้น

จากการค้นคว้าในการทำขั้วแคโทดอิเล็กโทรดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่ใช้อุณหภูมิสูง พบว่า มี 2 ชนิดที่ใช้ในการทำขั้วแคโทดอิเล็กโทรด คือ Platinum (Pt) และ Carbon (C) เหล่านี้จะมีคุณสมบัติที่ต่างกันดังต่อไปนี้

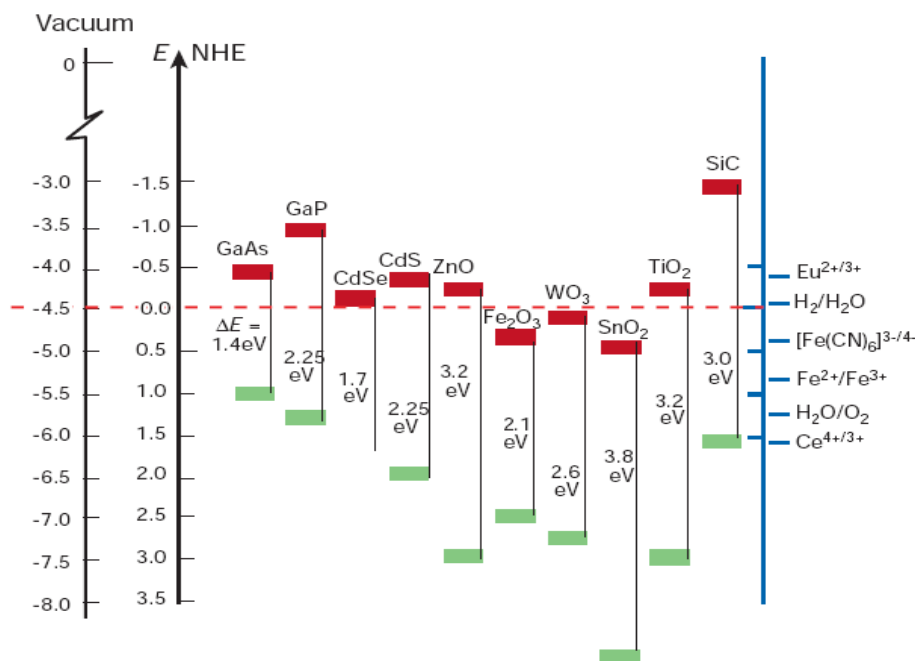
1. Platinum (Pt) มีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ และมีเลขอะตอมเบอร์ 78 น้ำหนักอะตอม 195.07 มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 3827 °C และ 1769 °C มีสภาพไฟฟ้าลบ 2.28 ความหนาแน่น (300K) g/cm³ : 21.5 มีสีเงินเทา มีน้ำหนักมาก สามารถยึดและดีเป็นแผ่นได้ แพลทินัมทนต่อการกัดกร่อนมาก ในธรรมชาติพบอยู่กับสินแร่ของนิกเกิลและทองแดง ส่วนใหญ่ใช้เป็นอุปกรณ์ในห้องทดลอง ตัวนำไฟฟ้า เป็นต้น

2. Graphite เป็นอัญรูปหนึ่งของธาตุคาร์บอน หรือแร่ดินสอดำ มีลักษณะเป็นของแข็ง มีรูปผลึกเป็นแผ่นบาง ๆ ทึบแสง อ่อนนุ่ม สีเทาเข้มถึงดำ เนื้ออ่อน เกาะกันอย่างไม่แข็งแรงนักและสามารถหลุดลอกได้ง่าย เป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดี มักใช้ทำไส้ดินสอดำ เบ้าหลอมโลหะ น้ำมันหล่อลื่นบางชนิด ไส้ถ่านไฟฉาย ไส้ไฟอาร์ค ใช้เป็นตัวลดความเร็ว ช่วยควบคุมจำนวนอนุภาคนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์, โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ และ โรงงานอุตสาหกรรมชั้นนำ เป็นต้น (ที่มา : <http://www.wikipedia.org>)

1.3 สมบัติทางด้านสารกึ่งตัวนำสำหรับปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม

เนื่องจากไทเทเนียมมีตำแหน่งที่ว่างของออกซิเจนในโครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ จึงจัดได้ว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมที่เป็นสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีความสามารถในการดูดซับสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา 2 ชนิดไปพร้อมๆกัน ซึ่งสามารถก่อให้เกิดทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and reduction reactions) โดยการกระตุ้นด้วยการดูดกลืนโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap energy) ความสามารถของสารกึ่งตัวนำที่จะถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาที่ถูกดูดซับไว้นั้น ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำและตำแหน่งของศักย์พลังงานในการเกิดรีดอกซ์ (Redox) ของสารที่ถูกดูดซับ โดยปกติแล้วระดับของพลังงานที่ต่ำที่สุดของแถบการนำไฟฟ้า (Conduction band) จะเป็นระดับของศักย์พลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันด้วยอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น (Excited electron) ในทางกลับกัน ระดับของพลังงานที่สูงที่สุดของแถบเวเลนซ์ (Valence band) จะเป็นระดับศักย์พลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยโฮล (Hole) ที่เหลืออยู่หลังจากที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปแล้ว (Boschloo, G. และคณะ, 1996)

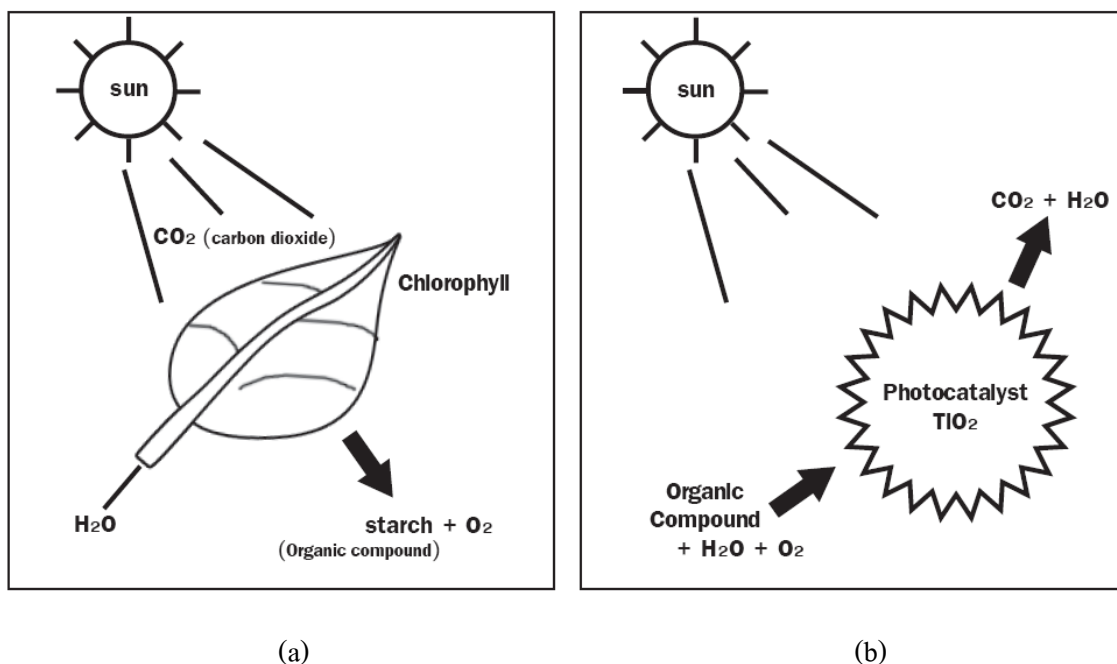
สารกึ่งตัวนำที่สามารถมาใช้งานได้โดยอาศัยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกมีหลากหลาย เช่น TiO_2 , ZnO , WO_3 , Fe_2O_3 , SrTiO_3 , CdS , MoS_2 , ZnS , ZnTe และ CdSe เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 1.8



รูปที่ 1.8 การเลือกสมบัติของสารกึ่งตัวนำ

(ที่มา : Gratzel 2001)

สารเร่งปฏิกิริยาดำแสง (Photocatalyst) เป็นสารที่เมื่อถูกแสงกระทบ ซึ่งอาจเป็นแสงจากดวงอาทิตย์หรือหลอดฟลูออเรสเซนต์ แสงจะเป็นตัวช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีโดยที่ตัวเองไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสารไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ก็เป็นหนึ่งในสารที่มีคุณสมบัติเป็นสารเร่งปฏิกิริยาดำแสงได้ เมื่อสารไทเทเนียมไดออกไซด์ดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) จากแสงอาทิตย์หรือจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันให้ Hydroxyl radicals (OH) และ Superoxide anion ($\text{O}^{\cdot -}$) ซึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้ ทำให้สารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยได้ (Volatile organic compounds: VOCs) และสารอินทรีย์ที่เป็นพิษเปลี่ยนรูปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำที่อุณหภูมิห้อง โดย Hydroxyl radicals จะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน ซึ่งเป็นส่วนประกอบของสารอินทรีย์ กลายเป็นน้ำ (H_2O) ในขณะที่ Superoxide anion จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในสารอินทรีย์กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) การทำงานของสารโฟโตแคตะลิสต์จะคล้ายๆ กับการสังเคราะห์แสงของพืช (Cherian, S. และคณะ, 2000) ดังแสดงในรูปที่ 1.9



รูปที่ 1.9 แสดงการเปรียบเทียบการสังเคราะห์แสงของพืช (a) กับการทำงานของสารโฟโตแคตลิสต์ (b) (ที่มา: <http://opac.tistr.or.th/Multimedia/STJN/5001/5001-11.pdf>)

1.3.1 ทฤษฎีของแสง (Light Theories)

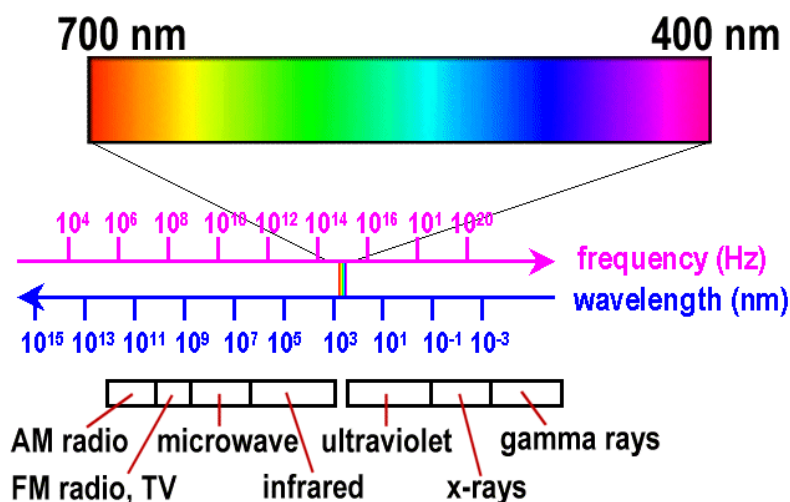
แสง (Light) คือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro magnetic: EM) ชนิดหนึ่ง ที่กระจายกระจายอยู่ทุกอนุในธรรมชาติรอบตัวเรา มีลักษณะคล้ายกับคลื่น ในมหาสมุทร คือ มียอดคลื่น (Crest) และท้องคลื่น (Trough) ระยะทางระหว่างยอดคลื่นเรียกว่า ความยาวคลื่น หรือ Wavelength (บางครั้งเรียก ความถี่หรือ Frequency ซึ่งหมายถึงความเร็วของความยาวคลื่น ต่อ 1 วินาที) ความยาวคลื่น มีหน่วยนับตั้งแต่ นาโนเมตร (Nanometer: Nm., $1\text{nm.} = 1/100,000,000$ เมตร) เป็นต้นไปจนถึง กิโลเมตร และความสูงระหว่าง ท้องคลื่น กับ ยอดคลื่นเรียกว่า Amplitude ในแต่ละช่วงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบด้วยคลื่น,แสงและรังสีที่มนุษย์ นำมาใช้ประโยชน์ มากมายในด้านต่าง ๆ ต่อไปนี้ ดังแสดงในรูปที่ 1.10

- รังสีแกมมา (Gamma Rays)
- รังสีเอกซ์ (X-Rays)
- แสงอุลตราไวโอเลต (Ultraviolet)

- แสงสีที่มองเห็นได้ (Visible Color)
- แสงอินฟราเรด (Infrared)
- คลื่นไมโครเวฟ (Microwave)
- คลื่นวิทยุ (Radio frequency)

แสงที่มองเห็น เป็นสีต่าง ๆ นี้ เกิดจากความยาวคลื่น และความถี่ที่ต่างกันโดยความยาวคลื่น (Wavelength) เป็นตัวกำหนด สี (Hue) และ amplitude เป็นตัวกำหนดความสว่างของสี (Brightness) ความยาวคลื่น ของสีที่มองเห็นมีดังนี้

- สีม่วง (Violet) 380 - 450 nm
- สีน้ำเงิน (Blue) 450 - 490 nm
- สีเขียว (Green) 490 - 560 nm
- สีเหลือง (Yellow) 560 - 590 nm
- สีส้ม (Orange) 590 - 630 nm
- สีแดง (Red) 630 - 780 nm



รูปที่ 1.10 แสดงช่วงของความยาวคลื่นแสงในช่วง Visible light

(ที่มา : <http://groups.csail.mit.edu/graphics/classes/6.837/F01/Lecture02/Slide22.html>)

1.3.2 ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemical reaction)

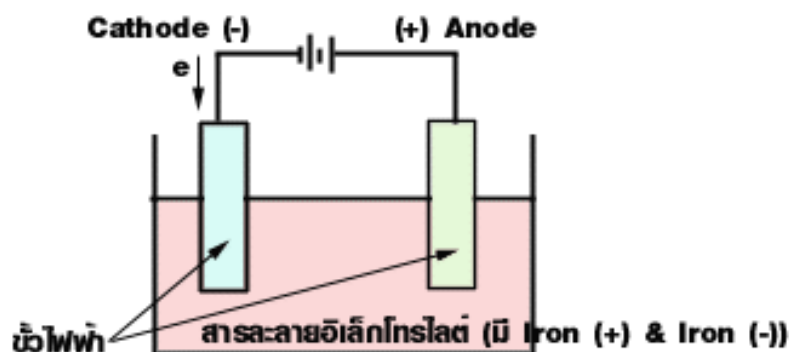
ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemical reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนอิเล็กตรอน โดยเปลี่ยนแปลงพลังงานเคมีเป็นไฟฟ้า หรือให้กระแสไฟฟ้าแล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี (Campbell, W และคณะ, 2004) โดยปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดปฏิกิริยาย่อย 2 ปฏิกิริยาพร้อมกันคือ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) และ ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) โดย ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเป็นปฏิกิริยาที่สูญเสียอิเล็กตรอน และ ปฏิกิริยารีดักชัน จะเป็นปฏิกิริยา ที่รับอิเล็กตรอน (Law, M และคณะ, 2005)

1.3.2.1 อิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) หมายถึงกระบวนการแยกสลายสารเคมีด้วยกระแสไฟฟ้า ซึ่งทำได้โดยผ่านกระแสไฟฟ้าลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ หรือสารอิเล็กโทรไลต์ที่หลอมเหลวแล้วสารอิเล็กโทรไลต์เกิดการแยกสลายได้สารใหม่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด

1.3.2.2 เซลล์อิเล็กโทรไลต์ หมายถึง เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นปฏิกิริยาเคมี หรือเป็นระบบที่เกิดกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส

1.3.2.3 ส่วนประกอบของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ เซลล์อิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าสองขั้ว จุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์หรืออิเล็กโทรไลต์ที่หลอมเหลว ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง

ต่อกับขั้วบวกและขั้วลบของแบตเตอรี่ในเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ขั้วไฟฟ้าที่ต่อกับขั้วบวกของแบตเตอรี่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เรียกขั้วไฟฟ้านี้ว่าแอโนดและ ส่วนขั้วไฟฟ้าที่ต่อกับขั้วลบของแบตเตอรี่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน เรียกขั้วไฟฟ้านี้ว่าแคโทด ดังแสดงในรูปที่ 1.11



รูปที่ 1.11 ส่วนประกอบของเซลล์อิเล็กโทรไลต์

(ที่มา: <http://school.obec.go.th/mrvilai/electrolyticcell.htm>)

1.4 การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Won Jae Lee และคณะ (2009) ได้ศึกษาการสังเคราะห์ Carbon nanotubes (CNTs) ที่มีสมบัติเป็นขั้วแคโทด คือ มีสมบัตินำไฟฟ้าได้สูง สมบัติทางเคมีที่เสถียรและมีพื้นที่ผิวมาก ซึ่งสามารถแบ่งชั้นย่อยได้อีก คือ 1.ผนังชั้นเดียว (Single-wall) จะทำการม้วนแท่งแกรไฟ์ขึ้นให้เป็นม้วนลักษณะกลม 2.ผนังหลายชั้น (Multiwall) ตามปกติจะมีโครงสร้างแบบ Hollow ซึ่งมีขนาดเป็นแผ่นขนานกับแกนท่อ หรือ เรียกอีกอย่างว่า โครงสร้างแบบ Bamboolike แผ่นแกรไฟ์จะทำการฟอร์มตัวขึ้นที่มุมแกนท่อนั้นเพราะว่าระนาบที่ตรงขอบ (Edge planes) ของท่อแกรไฟ์จะมีการส่งอิเล็กตรอนที่เร็วกว่าระนาบ (Basal planes) งานวิจัยนี้จะใช้ Bamboolike structure multiwall เป็นขั้วแคโทดและมีสาร ไตร ไอ โอ ไดด์ ทำปฏิกิริยารีดักชัน นอกจากนี้ยังได้ทดลองทำการเปรียบเทียบกับ Platinum อีกด้วย ซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 1.1

counter electrode	light intensity (mW/cm ²)	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF	η (%)
multiwall CNT	11	0.660	1.50	0.75	6.75
	54	0.720	8.41	0.71	7.96
	100	0.740	16.20	0.64	7.67
platinum	11	0.640	1.52	0.74	6.54
	54	0.710	8.60	0.71	8.03
	100	0.730	16.50	0.65	7.83

ตารางที่ 1.1 แสดงผลการทดลองการเปรียบเทียบประสิทธิภาพขั้วแคโทดรีเล็กโทรดในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสงระหว่าง Carbon nanotubes กับ platinum

[ที่มา: Won Jae Lee และคณะ (2009)]

จากผลที่ได้พบว่า Multiwall CNT ที่ความเข้มแสงขนาด 100 mW/cm² เมื่อทำการประกอบเซลล์ พบว่ามีค่าประสิทธิภาพ (η %) นั้นมีค่าใกล้เคียงกับ Platinum ที่ใช้ขนาดเดียวกัน คือ 7.67 และ 7.83 ซึ่งใช้ทำเป็นในส่วนของขั้วแคโทดรีได้โดยใช้ไตรโอไอโอดีเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นต้น

Zhen Huang และคณะ (2007) ได้ศึกษาสมบัติของขั้วแคโทดรีเล็กโทรดของคาร์บอนชนิด Hard carbon spherule (HCS) ซึ่งพบว่ามีประสิทธิภาพร้อยละ 5.7 เมื่อทำการเปรียบเทียบกับ Platinum โดยกระบวนการ Sputtered พบว่ามีประสิทธิภาพร้อยละ 6.5 มีการทดลองดังนี้ การเตรียมสารคาร์บอนจากสารละลายน้ำตาล 1.5 M ใน Autoclave ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม ทิ้งไว้ 5 ชั่วโมง ทดสอบด้วยกระบวนการ Hydrothermal ที่ 190°C ต่อมาใส่ผงคาร์บอนและอบที่ 1000°C ที่ใช้แก๊สอาร์กอนในบรรยากาศก็ได้ (HCS-1) แต่ให้ความร้อนต่อไปอีก 900°C ภายใต้อุณหภูมิประมาณ 5 ชั่วโมงก็จะได้ Hard carbon spherule (HCS-2) ตามต้องการ ซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 1.2

Catalyst	η %	S^a ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)
Graphite (+20 wt% CB)	3.8	13
Carbon black (CB)	4.5	77
HCS-1	4.7	161
HCS-2	5.7	833
Pt	6.5	–

ตารางที่ 1.2 แสดงผลการทดลองการเปรียบเทียบประสิทธิภาพขั้วแคโทดรีเล็กโทรดในเซลล์
แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสงระหว่าง HCS-2 กับ Pt

[ที่มา: Zhen Huang และคณะ (2007)]

จากผลที่ได้พบว่า Pt จะมีประสิทธิภาพสูงสุด (η %) และรองลงมาคือ HCS-2 ได้ร้อยละ 6.5 และร้อยละ 5.7 ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาพื้นที่ผิวพบว่า HCS-2 มีมากกว่า HCS-1 โดยการทดลองที่สภาวะเดียวกัน

Pinjiang Li และคณะ (2009) ได้ศึกษาสมบัติของขั้วแคโทดรีโดยใช้ Pt / Carbon black ของ Low platinum loading ที่ให้ประสิทธิภาพสูง โดยทำการเปรียบเทียบกับ Platinum loading ที่ไม่ผสม โดยการรีดิวซึ่งระหว่าง H_2PtCl_6 กับ NaBH_4 ใน Carbon black (CB) และสมบัติของ Pt / Carbon black ที่ทำการทดลอง คือ มี Electrocatalytic activity สูง สำหรับไดรไอโอดีคที่เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 1.3

Platinum loading (%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF	η (%)
0	8.53	724	0.601	3.76
1.0	13.59	737	0.614	6.17
1.5	14.46	753	0.616	6.72
2.0	14.57	748	0.612	6.67
4.0	14.73	742	0.611	6.68
100 (Pt electrode)	14.86	723	0.617	6.63

ตารางที่ 1.3 แสดงผลการทดลองการเปรียบเทียบประสิทธิภาพขั้วแคโทดรีดอกซ์โพลีเมอร์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดข้อมสีไวแสงโดยการเพิ่มปริมาณของ Platinum กับ Carbon black

[ที่มา: Pinjiang Li และคณะ (2009)]

จากผลที่ได้พบว่า Pt / Carbon black (ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก) เป็นขั้วแคโทดรีดอกซ์โพลีเมอร์เกิดประสิทธิภาพร้อยละ 6.72 ขณะที่ใช้ Platinum (ร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก) พบว่าเกิดประสิทธิภาพร้อยละ 6.63 โดยใช้ที่สภาวะเดียวกัน คือ AM1.5 P_{in} of 100 mW cm² เป็นต้น

Jihuai Wu และคณะ (2008) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของ platinum ระดับนาโนที่ใช้เป็นขั้วแคโทดรีดอกซ์โพลีเมอร์โดยเปรียบเทียบวิธีการสังเคราะห์ 3 วิธี คือ Electrodepositing (ED) Electroplating (EP) และ Thermal decompositing (TD) ซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 1.4

Preparation methods of counter electrodes	Sheet resistance (Ω cm ⁻²)	J_{sc} (mAcm ⁻²)	V_{oc} (mV)	FF	η (%)	Pt load ^a (μ gcm ⁻²)
Electrodepositing	9.3	15.23	711	0.591	6.40	<10
Electroplating	3.2	14.86	723	0.617	6.63	>80
Thermal decompositing	8.6	13.74	692	0.587	5.58	>30

^a The platinum loads on FTO glass sheets were estimated by weighing method.

ตารางที่ 1.4 แสดงผลการทดลองการเปรียบเทียบประสิทธิภาพขั้วแคโทดรีดอกซ์โพลีเมอร์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดข้อมสีไวแสงโดยการเปรียบเทียบระหว่าง ED, EP และ TD

[ที่มา: Jihuai Wu และคณะ (2008)]

จากผลที่ได้พบว่า วิธี Electrodepositing (ED) ได้ประสิทธิภาพดีที่สุด คือ ร้อยละ 6.4 เนื่องจากได้ใช้ปริมาณของ Low platinum loading น้อยที่สุด โดยใช้สภาวะเดียวกัน คือ AM1.5 P_{in} of 100 mW /cm² และ เวลา 20 นาที เป็นต้น

Chang Ho Yoon และคณะ (2008) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของ Mesoporous platinum ที่ใช้เป็นขั้วแคโทดรีดิวต์โพรดโดยเปรียบเทียบวิธีการสังเคราะห์ 3 วิธี คือ Electrochemically-deposited Pt (ED-Pt) Sputter-deposited Pt (SD-Pt) และ Thermal-deposited Pt (TD-Pt) ซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 1.5

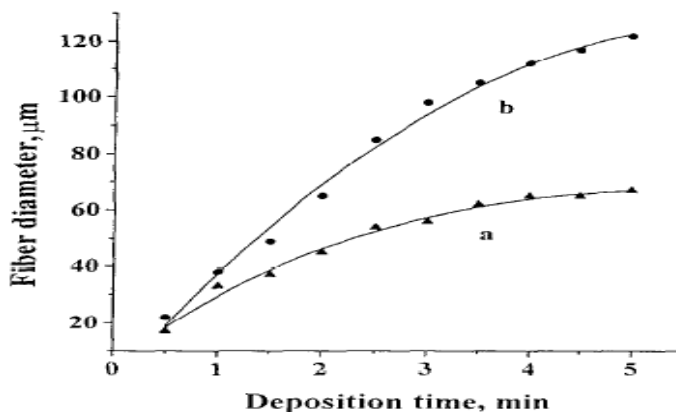
Deposition	J_{sc} (mA cm ⁻²)	V_{oc} (V)	FF	η (%)
TD	13.87	0.70	0.63	6.3
SD	13.95	0.73	0.65	6.4
ED	15.38	0.73	0.68	7.6

ตารางที่ 1.5 แสดงผลการทดลองการเปรียบเทียบประสิทธิภาพขั้วแคโทดรีดิวต์โพรดในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสงโดยการเปรียบเทียบระหว่าง TD, SD และ ED

[ที่มา: Chang Ho Yoon และคณะ (2008)]

จากผลที่ได้พบว่า วิธี Electrochemically-deposited Pt (ED-Pt) ได้ประสิทธิภาพดีที่สุด คือ มีค่า (η %) สูงถึงร้อยละ 7.6 เนื่องจากให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ลดความต้านทาน และ เพิ่มการสะท้อนของแสง ซึ่งมีไตรไอโอไดด์ที่เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์และทดลองที่สภาวะเดียวกัน เป็นต้น

Zhitomirsky (1997) ได้ศึกษาทาง Electrophoretic deposition (EPD) ของเซรามิกลงบนคาร์บอนไฟเบอร์ โดยการใส่กระแสไฟฟ้าที่ 50 โวลต์ และ 25 โวลต์ ซึ่งได้ผลดังแสดงในรูปที่ 1.12



รูปที่ 1.12 แสดงกราฟผลการทดลองของ Electrophoretic Deposition (EPD) โดยการใช้กระแสไฟฟ้า ซึ่งจากรูป b คือ กระแสที่ 50 V และ จากรูป a คือ กระแสที่ 25 V

[ที่มา: Zhitomirsky (1997)]

จากผลที่ได้พบว่า เมื่อใส่กระแสไฟฟ้าที่ 50 V ทำให้สามารถช่วยเพิ่มขนาดของท่อคาร์บอนไฟเบอร์นี้ได้และยังทำให้ได้พื้นที่ของเซรามิกส์ลงบนคาร์บอนไฟเบอร์นี้มากขึ้นอีกด้วย เป็นต้น

สรุปกระบวนการ EPD นี้เป็นกระบวนการซึ่งสามารถควบคุมปัจจัยทางด้านเวลาและค่ากระแสได้และเป็นกระบวนการที่ทำได้ง่ายและยังสามารถพัฒนาในการประยุกต์ในงานวิจัยด้านอื่น เช่น ทางการแพทย์ ทางวัสดุผสม ทางโมเลกุล และทางอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

จากการทบทวนเอกสารข้างต้นพบว่าการทำงานขั้วแคโทดอิเล็กโทรดนั้น ในปัจจุบันมีการวิจัยที่หลากหลาย ซึ่งพบว่า การทำงานขั้วแคโทดอิเล็กโทรดที่ใช้ Platinum (Pt) เกิดประสิทธิภาพมากที่สุด แต่เนื่องจาก Platinum (Pt) มีราคาแพงมาก ดังนั้นโครงการวิจัยนี้ทดลองและวิจัยขึ้นเพื่อลดต้นทุนของ Platinum (Pt) โดยยังคงใช้ Platinum (Pt) เป็นองค์ประกอบที่มีส่วนผสมหลัก คือ Carbon Black (CB) ดังตารางที่ 1.6 แสดงผลการสรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชื่อผู้แต่ง/ปี	ชื่อเรื่อง	ผลการทดลอง	สรุปผลการทดลอง
Won Jae Lee (2009)	Efficient DSSCs with catalytic MWCNT Counter Electrodes	ค่าประสิทธิภาพของเซลล์ MWCNT มีค่าใกล้เคียงกับ Platinum ที่ใช้ทำการเปรียบเทียบ	MWCNT มีค่า 7.67 และ Platinum มีค่า 7.83 สามารถใช้เป็นขั้วแคโทดใน DSSCs ได้

Zhen Huang (2007)	Application of carbon materials as counter electrodes of DSSCs	ค่าประสิทธิภาพของ Pt นั้นดีที่สุด เมื่อทำการเปรียบเทียบกับ HCS-2 ภายใต้แก๊สอาร์กอนด้วย Hydrothermal	Platinum มีค่ามากที่สุด และ HCS-2 สามารถทำได้ใกล้เคียงกันเมื่อทำการเปรียบเทียบกับ Pt ที่ใช้
Pinjiang Li (2009)	High-performance and low platinum loading Pt/Carbon black counter electrode for DSSCs	เมื่อทำการเติม Platinum ตั้งแต่ 0, 1, 1.5, 2 และ 4 % โดยน้ำหนักลงใน carbon black พบว่าที่ 1.5 % โดยน้ำหนัก มีค่าใกล้เคียงกันกับ Platinum ที่ไม่มีการเติม carbon black ลงไปเลย	Carbon black/Pt ที่เติม Pt loading ที่ 1.5 % โดยน้ำหนัก พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับ Platinum ที่ไม่มี Carbon black ผสมอยู่ คือ มีค่าประสิทธิภาพเมื่อทำการประกอบเซลล์ (n %) 6.72
Jihuai Wu (2008)	Improvement of performance of DSSCs based on electrodeposited-platinum counter electrode	เมื่อทำการเปรียบเทียบทั้ง 3 เทคนิค คือ ED, EP และ TD พบว่าเทคนิค ED มีค่าประสิทธิภาพ (n %) ดีที่สุด คือ ร้อยละ 6.40 โดยจากการเติม platinum loading น้อยกว่า 10% โดยน้ำหนัก	เทคนิค ED เมื่อทำการทดสอบ ประสิทธิภาพ พบว่าดีกว่าทั้ง EP และ TD โดยใช้ platinum loading น้อยที่สุด ด้วยจากการทดสอบที่เวลา 20 นาที
Chang Ho Yoon (2008)	Enhanced performance of DSSCs with an electrodeposited-platinum counter electrode	เมื่อทำการเปรียบเทียบทั้ง 3 เทคนิค คือ TD, SD และ ED พบว่าเทคนิค ED ดีที่สุด ของ platinum มีประสิทธิภาพ (n %) ร้อยละ 7.6	เทคนิค ED เมื่อทำการทดสอบ ประสิทธิภาพ พบว่าดีกว่าทั้ง SD และ TD โดยใช้ platinum

1.5 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.5.1 ศึกษาการเตรียมสารที่เพื่อใช้เป็นตัวแคตะลิสต์ คือ Carbon black, Single wall carbon nanotube และ Platinum compound ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดข้อมสีไวแสง

1.5.2 ศึกษาลักษณะของสารเคลือบ คือ Ethyl cellulose ที่มีผลต่อการใช้งานเป็นขั้วแคเตอร์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดข้อมสีไวแสง

1.5.3 ศึกษากระบวนการสังเคราะห์ของ EPD เพื่อเตรียมสารเคลือบสำหรับขั้วแคเตอร์อิเล็กโทรด

1.5.4 ศึกษาอิทธิพลของแรงดันไฟฟ้า (โวลต์) กับ เวลา (นาที่) ที่มีผลต่อการสังเคราะห์ของ EPD เพื่อเตรียมสารเคลือบสำหรับขั้วแคเตอร์อิเล็กโทรด

1.6 ขอบเขตการวิจัย

1.6.1 ศึกษาลักษณะของสารเคลือบที่ใช้เป็นตัวแคตะลิสต์ให้เหมาะสมที่สุด

1.6.2 ศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้าของขั้วแคเตอร์อิเล็กโทรด

1.6.3 ศึกษากระบวนการเคลือบตัวแคตะลิสต์ด้วยวิธีการ Electrophoretic deposition กับ Doctor Blade

1.6.4 ศึกษาวิเคราะห์และตรวจสอบลักษณะทางกายภาพด้วยเครื่อง XRD SEM และ TEM

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ทราบถึงกระบวนการของการเคลือบและสารที่ใช้เคลือบสำหรับขั้วแคเตอร์อิเล็กโทรด

1.7.2 ทราบถึงกระบวนการเลือกสารที่ใช้เป็นตัวแคตะลิสต์สำหรับขั้วแคเตอร์อิเล็กโทรด

1.7.3 สร้างองค์ความรู้ใหม่เพื่อพัฒนาและประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดข้อมสีไวแสงให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

1.8 สถานที่ทำวิจัย

1.8.1 ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

1.8.2 ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

1.8.3 กลุ่มวิจัยเซรามิกและคอมโพสิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

บทที่ 2

วิธีการดำเนินการวิจัย

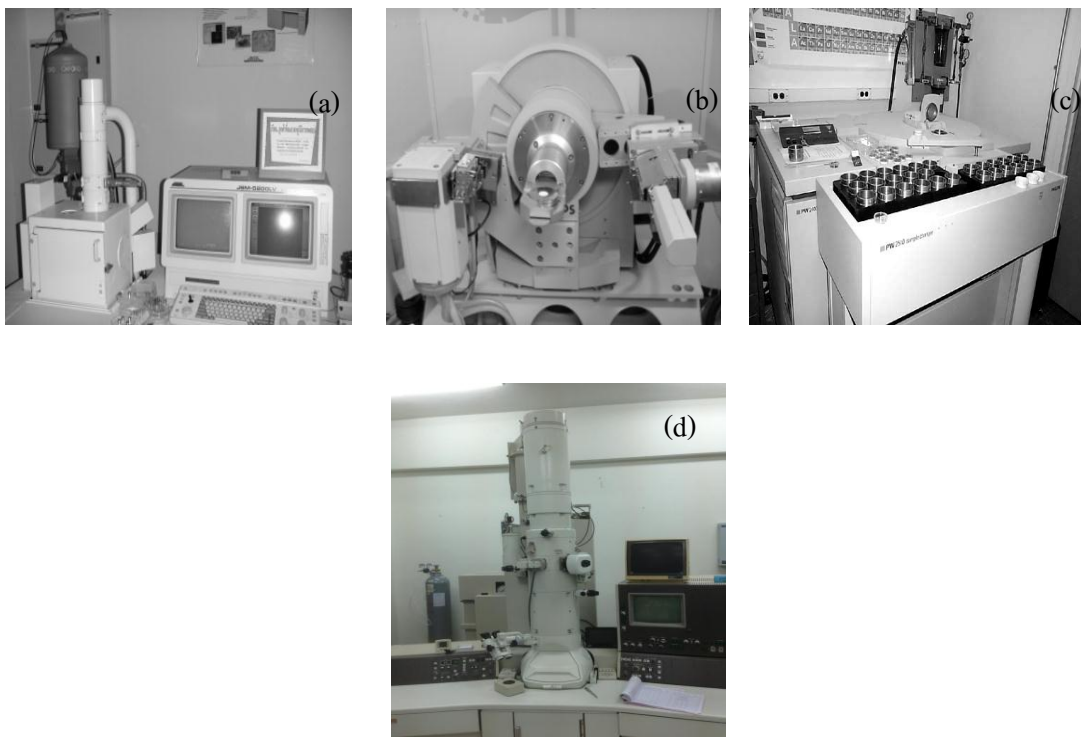
เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงวิธีการดำเนินการวิจัย ประกอบไปด้วยวัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์วัสดุผสม รวมถึงขั้นตอนการดำเนินการ

2.1 อุปกรณ์การทดลอง

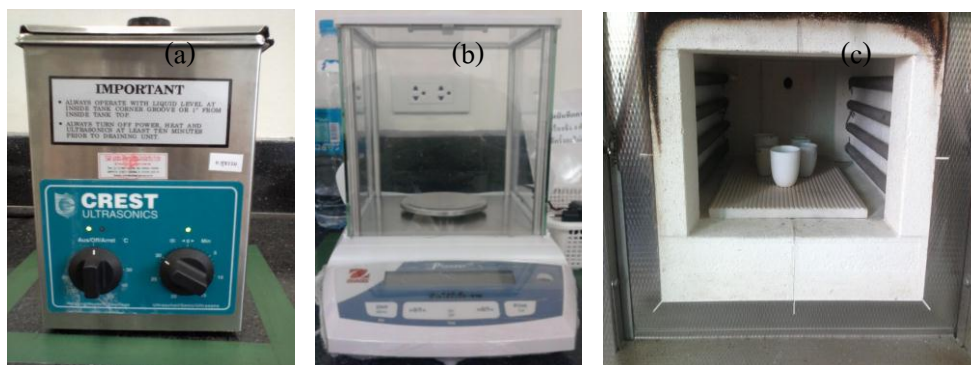
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง วิเคราะห์และทดสอบ แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์	ยี่ห้อ	แบบ/รุ่น
X-ray Diffractometer (XRD)	Philips	X' Pert MPD
Scanning Electron Microscope (SEM) With Energy Dispersive X-ray Spectrometry (EDX)	JEOL,FEI	JSM-5800 LV, QUANTA
Transmittance Scanning Electron Microscope (TEM)	JEOL	JSM-2010
X-ray Fluorescence Spectrometry (XRF)	Philips	PW 2400
Ultrasonic เครื่องซั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง	CREST	CP200HT
Power Supply	QHAUS	Pioneer™
Low - High Temperature Furnace (30- 3000 °C)	Agilent	E3612A
Oven	Nabertherm	-
	Memmert	UNE400



รูปที่ 2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติ (a) SEM with EDX (b) XRD (c) XRF และ (d) TEM

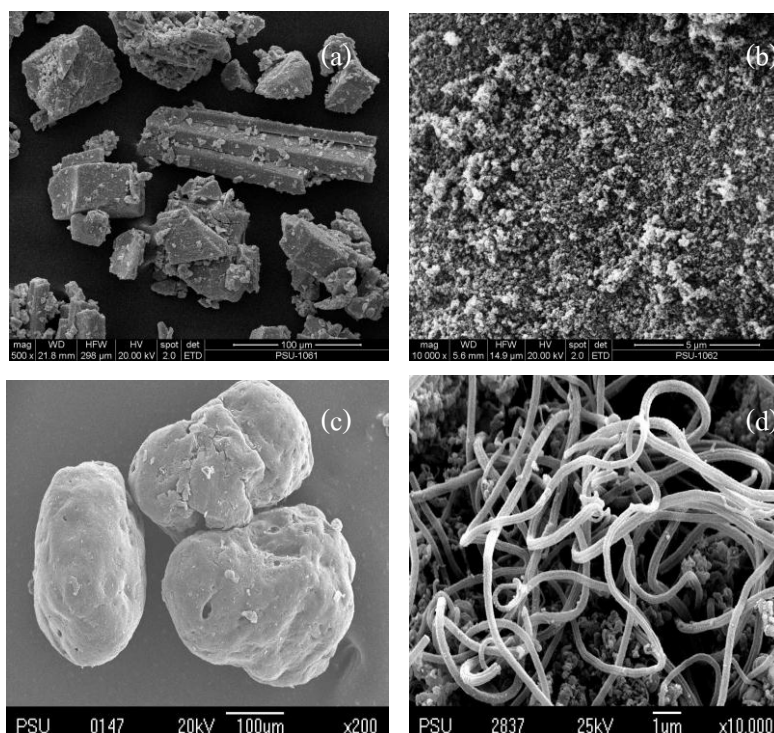




รูปที่ 2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์วัสดุผสม (a) Ultrasonic (b) เครื่องซั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง (c) Low - High Temperature Furnace (d) Power Supply และ (e) Oven

2.2 วัสดุและสารเคมี

วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 2.2 และแสดงลักษณะกายภาพในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสารตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง (a) $\text{Pt}(\text{NH}_3)_4\text{Cl}_2 \times \text{H}_2\text{O}$ (b) Carbon Black (c) Ethyl cellulose และ (d) Single Wall Carbon Nanotube

ตารางที่ 2.2 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อทางการค้า	ขนาด อนุภาค (μm)	ความ บริสุทธิ์ (ร้อยละ)	ผู้ผลิต / ให้ความอนุเคราะห์
Tetraammineplatinum chloride hydrate [Pt(NH ₃) ₄ Cl ₂] _x XH ₂ O	-	98	ALDRICH Chemical Company, Inc
Carbon Black N220 (CB)	-	100	THAI CARBON BLACK ALDRICH Chemical Company, Inc
Ethyl cellulose (Ethoxyl)	-	48	China
Single Wall Carbon Nanotube (SWCNT)	-	90	RCI Labscan Ltd.
Iso-Propanol (CH ₃) ₂ CHOH	-	-	DYESOL Industries Pty Ltd, Australia
Fluorine doped tin oxide coated glass (FTO glass)	-	-	ร้านกวางฝ้า อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา
Stainless Steel Grade 304 (SS304)	-	-	ALDRICH Chemical Company, Inc
Dye N719	-	90	Constructed by Scientific Equipment Center Prince of
Deionized-water (DI- water)	-	100	Songkla University, HatYai, Thailand.

2.3 การออกแบบการทดลองและวิธีการทดลอง

2.3.1 การทดลองที่ 1 : ศึกษาการสังเคราะห์วัสดุผสมระหว่างสารประกอบของ Pt หรือ Pt compound กับผง Carbon Black

ศึกษาผลของการเพิ่มปริมาณสารประกอบของ $[Pt(NH_3)_4Cl_2] \times XH_2O$ หรือเรียกสั้นๆว่า Pt compound ตั้งแต่ 0.0045 0.0084 0.01 0.03 และ 0.05 กรัม ต่อปริมาณผง Carbon black คงที่ คือ 0.3 กรัม และศึกษาผลของการเติมและไม่เติมพอลิเมอร์ (Ethyl cellulose) เพื่อเข้าไปช่วยในการยึดเกาะกับสารประกอบของ Pt compound กับผง Carbon black เพื่อให้ได้จำนวนธาตุ Pt ที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดเข้าด้วยกัน

2.3.2 การทดลองที่ 2 : ศึกษาการสังเคราะห์วัสดุผสมระหว่างสารประกอบของ Pt หรือ Pt compound กับผง Single wall carbon nanotube (SWCNT) เทียบกับวัสดุผสมระหว่างสารประกอบของ Pt compound กับผง Carbon Black

ศึกษาผลของการเพิ่มปริมาณสารประกอบของ Pt compound ที่ดีที่สุดจากกิจกรรมข้างต้น มาผสมกับผง Single Wall Carbon Nanotube (SWCNT) ด้วยปริมาณคงที่ (ที่ได้รับการปรับปรุงผิวแล้ว) จากนั้นนำผงวัสดุผสมที่เกิดจากสังเคราะห์ ระหว่าง CB/Pt และ SWCNT/Pt นี้ขึ้นมาทำการเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO Glass) หรือ ชี้นงาน ด้วยเทคนิค Doctor blade หลังจากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิที่ 500 °C เป็นเวลา 30 นาที ก่อนนำมาตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าในขั้นตอนต่อไป

2.3.3 การทดลองที่ 3 : ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างสารประกอบของ Pt หรือ Pt compound กับผง Single wall carbon nanotube (SWCNT) เทียบกับวัสดุผสมระหว่างสารประกอบของ Pt หรือ Pt compound กับผง Carbon black

นำผงวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้นระหว่าง CB/Pt และ SWCNT/Pt มาเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า ด้วยเทคนิค Doctor blade แล้ว ทำการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าโดยผ่านการวัดค่าการเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance) และค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistance) ด้วยเครื่อง LCR meter ด้วยเทคนิค Doctor blade.

2.3.4 การทดลองที่ 4 : ศึกษาการสังเคราะห์วัสดุผสมระหว่างสารประกอบของ Pt หรือ Pt compound กับผง Single wall carbon nanotube (SWCNT) และวัสดุผสมระหว่างสารประกอบของ Pt หรือ Pt compound กับผง Carbon black ด้วยกระบวนการ Electrophoretic deposition (EPD)

นำผงวัสดุผสมที่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นระหว่าง CB/Pt และ SWCNT/Pt เติมน้ำกลั่นและ Iso-Propanol อัตราส่วนที่เท่ากัน นำมา Ultrasonic เป็นเวลา 30 นาที เมื่อเสร็จสิ้นแล้ว จะได้วัสดุผสมที่ได้จากการสังเคราะห์จะอยู่ในรูปสารละลายคอลลอยด์ซึ่งพร้อมนำมาทำกระบวนการ EPD ต่อไปดังนี้

ในกระบวนการทาง EPD นี้ จะศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการเคลือบผิวลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ตัวแปรในที่นี้คือ ค่าแรงดันทางไฟฟ้า (Voltage) หน่วยเป็น โวลต์ กับ เวลาที่ใช้ (Time) หน่วยเป็นนาฬิกา ซึ่งจะทำการแปรค่าแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 5V 10V 15V 20V และ 25V ส่วนเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา คือ 3 และ 5 นาที หลังจากนั้นนำวัสดุผสมที่ผ่านการเคลือบลงบนกระจก (FTO glass) ด้วยกระบวนการ EPD นี้ นำมาทำให้แห้งโดยการปล่อยให้อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นไปเผาที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 30 นาที ก่อนจะนำไปตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางไฟฟ้าที่ 5V, 15V และ 25V เวลาที่ใช้ 7 นาที โดย LCR meter

2.3.5 การทดลองที่ 5 : ศึกษาการสังเคราะห์วัสดุสารประกอบของ Pt หรือ Pt compound ด้วยกระบวนการ Electrophoretic deposition (EPD) และสมบัติการนำไฟฟ้าของ Pt compound

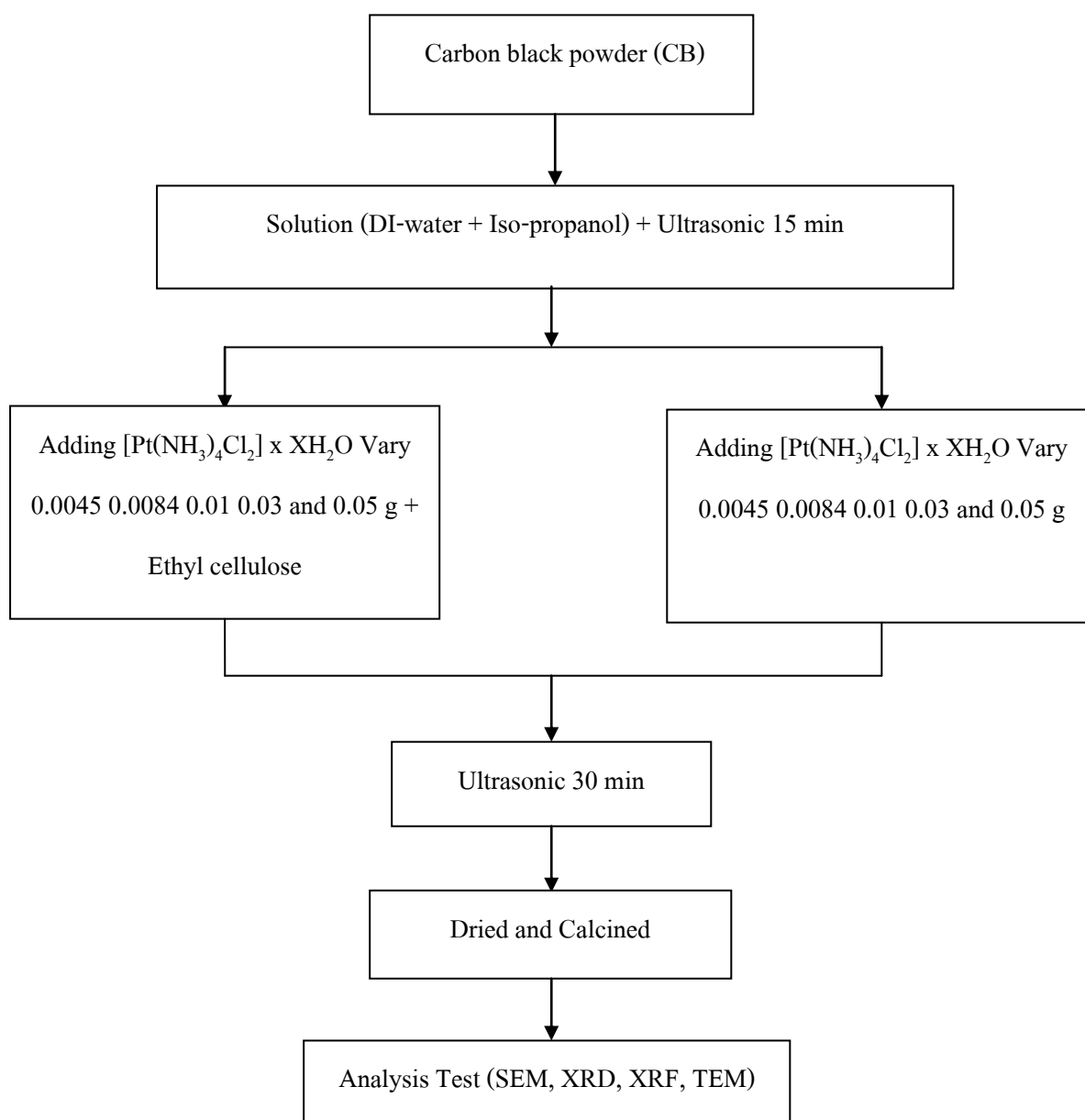
นำสารประกอบของ Pt compound ที่ดีที่สุดจากการศึกษาการทดลองที่ 1 มาผสมลงในสารละลาย (DI-water + Iso-propanol+ Ethyl cellulose) หลังจากนั้นทำการ Ultrasonic เป็นเวลา 30 นาที สารละลายของสารประกอบ Pt compound ที่ได้จะอยู่ในรูปสารละลายคอลลอยด์พร้อมนำมาทำกระบวนการ EPD ต่อไปดังนี้

ในกระบวนการทาง EPD นี้ จะศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการเคลือบผิวลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ตัวแปรในที่นี้คือ ค่าแรงดันทางไฟฟ้า (Voltage) หน่วยเป็น โวลต์ กับ เวลาที่ใช้ (Time) หน่วยเป็นนาฬิกา ซึ่งจะทำการแปรค่าแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 5V, 15V และ 25V ส่วนเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา คือ 7 นาที ซึ่งเป็นขั้นตอนการทดลองที่มากที่สุด หลังจากนั้นนำชิ้นงานมาทำให้แห้งโดยการปล่อยให้อุณหภูมิห้อง ต่อมานำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวหน้าบนแล้วไปเผาที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 30 นาที ก่อนจะนำไปตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทาง

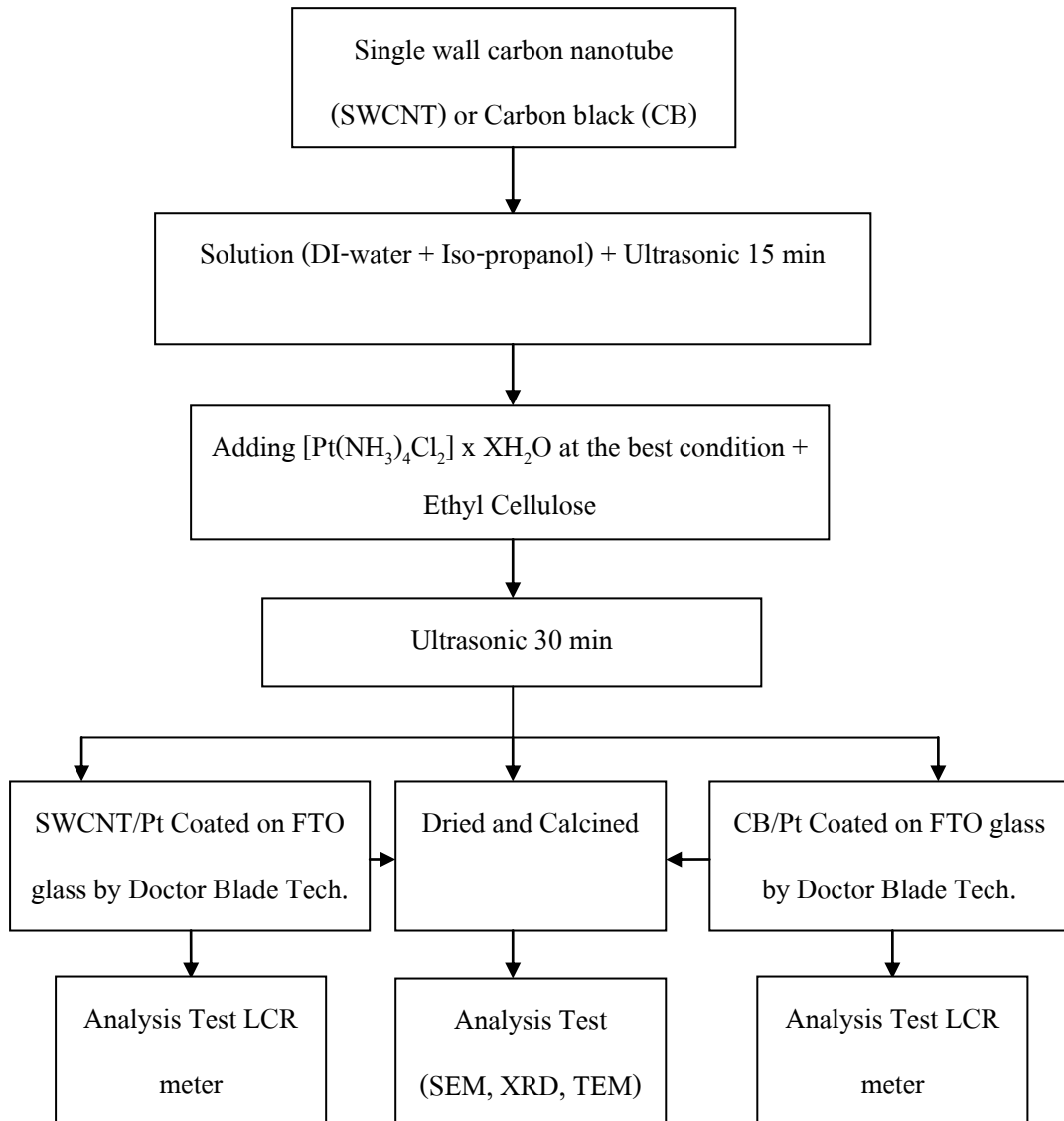
ไฟฟ้า เพื่อทำการเปรียบเทียบวัสดุผสมที่เกิดจากการสังเคราะห์ระหว่าง CB/Pt และ SWCNT/Pt เป็นต้น

2.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยโดยสรุป

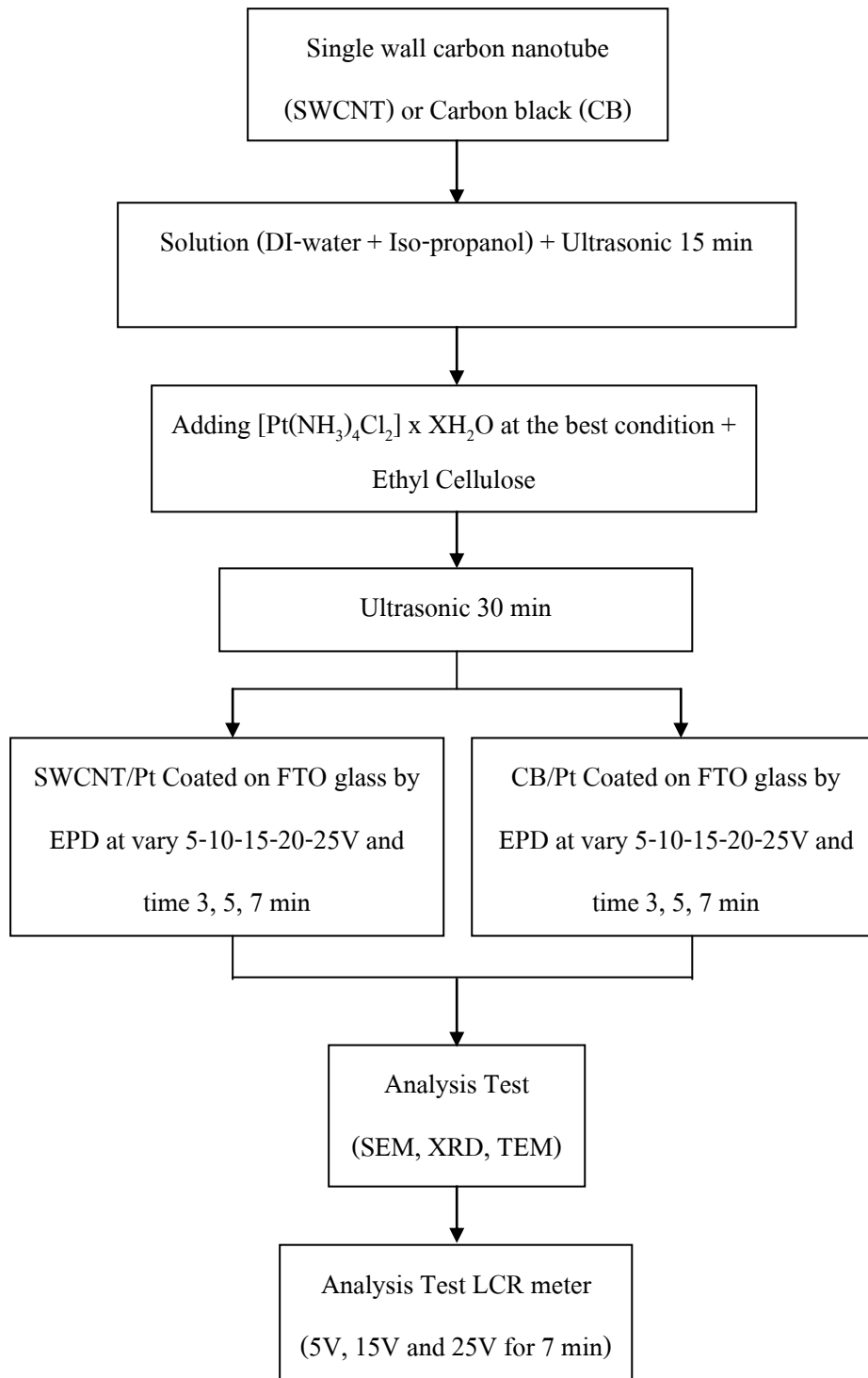
การทดลองที่ 1

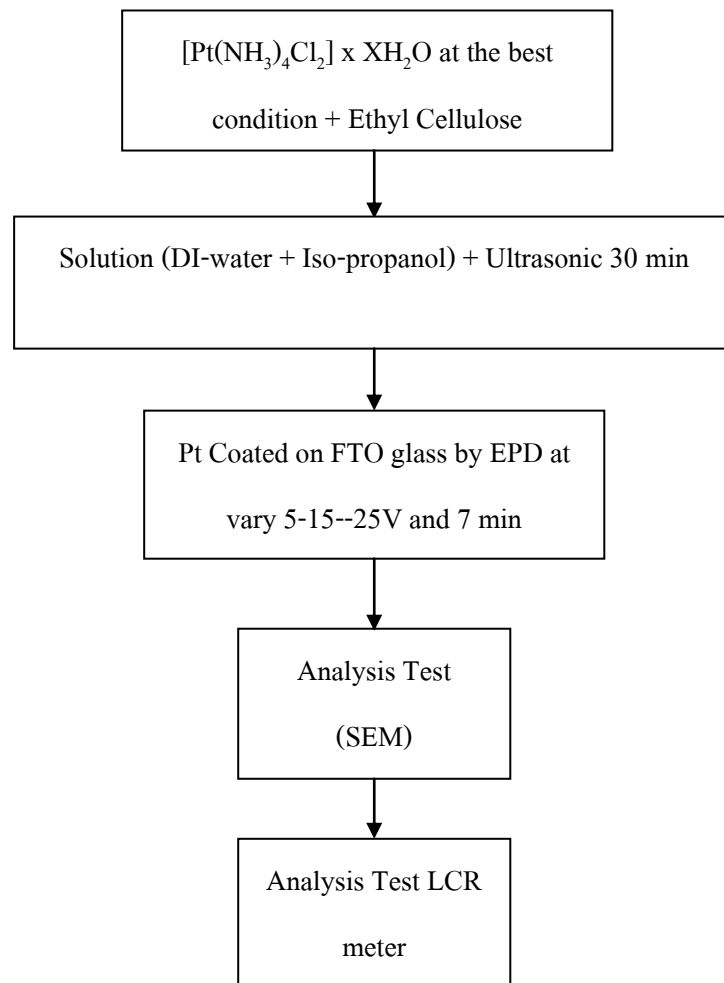


การทดลองที่ 2 และ การทดลองที่ 3



การทดลองที่ 4



การทดลองที่ 5

บทที่ 3

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการวิจัยในครั้งนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบ Carbon Black/Platinum (CB/Pt) และ Single wall carbon nanotube/Platinum (SWCNT/Pt) โดยศึกษาความเป็นไปได้ในสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบทั้งสองชนิดนี้ ซึ่งศึกษาจากผลต่อการพัฒนาของโครงสร้างทางจุลภาค ผลต่อการก่อรูปของเฟส ผลต่อการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุกึ่งเชิงปริมาณ

ส่วนที่สอง เป็นการศึกษาผลของการเคลือบวัสดุผสม Carbon black/Platinum (CB/Pt) และ Single Wall Carbon nanotube/Platinum (SWCNT/Pt) ที่เคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ที่ผ่านจากเทคนิค Doctor blade แล้ว นำมาตรวจสอบวัดค่าสมบัติทางไฟฟ้า ที่ผ่านตัวแปรของการเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance) และ ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance) และทำเปรียบเทียบกับสารประกอบเชิง Platinum หรือ Platinum compound ที่ใช้ในปริมาณมากที่สุดเป็นมาตรฐานการเปรียบเทียบ

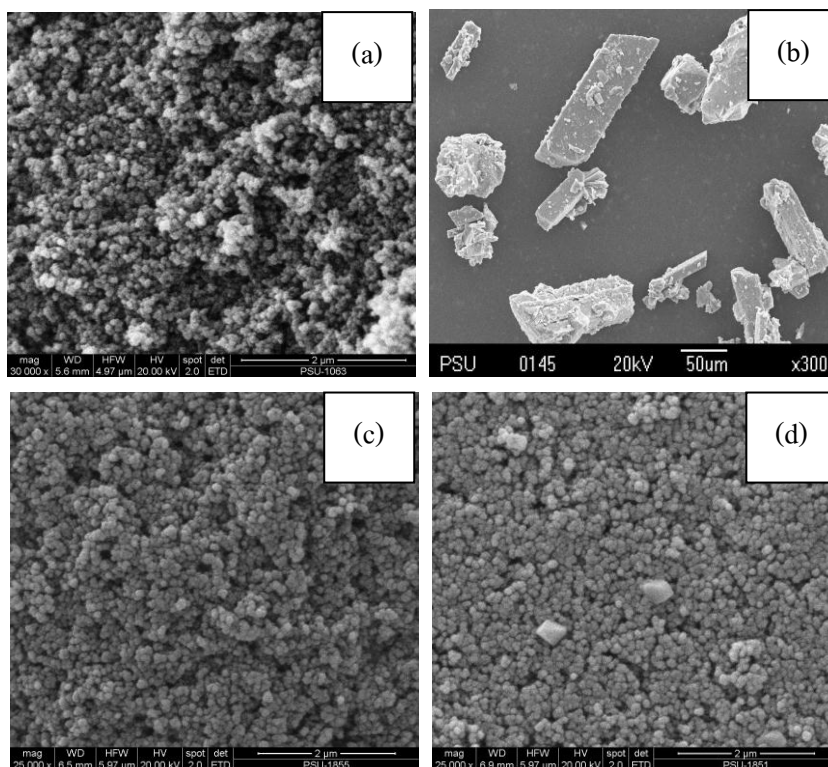
ในส่วนสุดท้าย เป็นการศึกษาการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบ Carbon black/Platinum (CB/Pt) และ Single wall carbon nanotube/Platinum (SWCNT/Pt) จากกระบวนการ Electrophoretic deposition (EPD) โดยศึกษาความเป็นไปได้ในสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบทั้งสองชนิดนี้ ซึ่งศึกษาจากผลต่อการพัฒนาของโครงสร้างทางจุลภาค ผลต่อการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุกึ่งเชิงปริมาณ และตรวจสอบวัดค่าสมบัติทางไฟฟ้า ที่ผ่านตัวแปรของการเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance) และ ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance) และทำเปรียบเทียบกับสารประกอบเชิง Platinum หรือ Platinum compound ที่เกิดจากกระบวนการ EPD นี้เพื่อใช้เป็นมาตรฐานอีกด้วย

3.1 ผลการวิเคราะห์ทางโครงสร้างทางจุลภาค

3.1.1 ผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคของ CB/Pt SWCNT/Pt และ Pt compound ที่เคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ด้วยเทคนิค Doctor blade

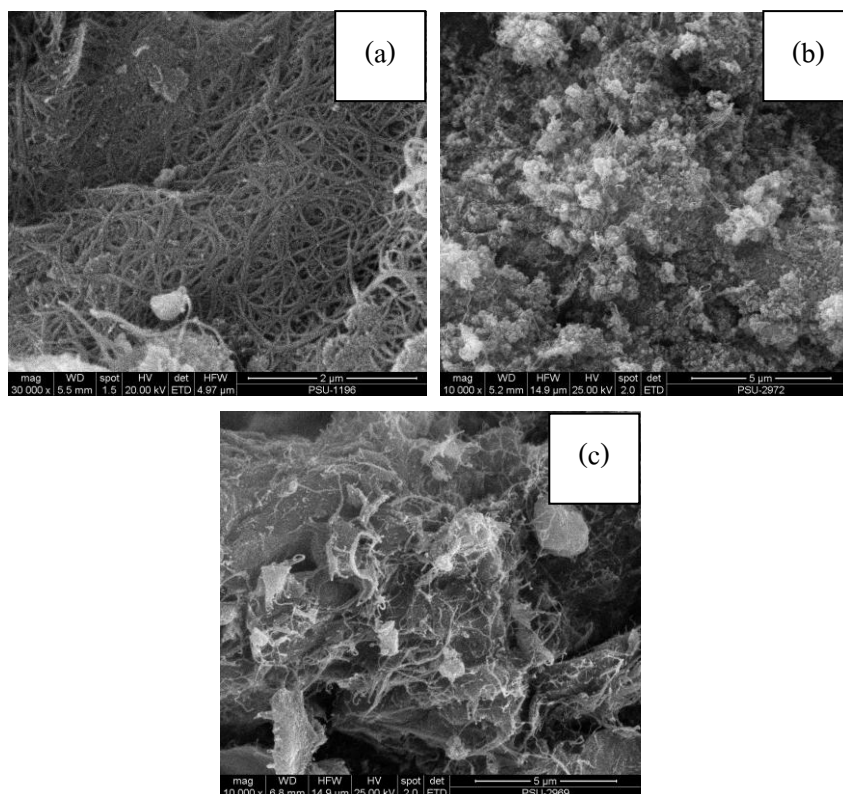
โดยทั่วไป CB มีลักษณะพื้นฐานวิทยา (Morphology) เป็นกลุ่มก้อน และสารประกอบเชิง Pt หรือ Pt compound นี้มีลักษณะเป็นก้อนหรือแท่ง ซึ่งเมื่อทำการสังเคราะห์วัสดุผสมสองชนิดนี้เข้าด้วยกัน พบว่า สารประกอบเชิง Pt จะเข้าไปแทรกฝังปะอยู่ภายใน และเมื่อนำมาเคลือบลงบน

กระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ด้วยเทคนิค Doctor blade วิธีนี้ พบว่า CB/Pt ยึดเกาะจับตัวกันแน่นอย่างสม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



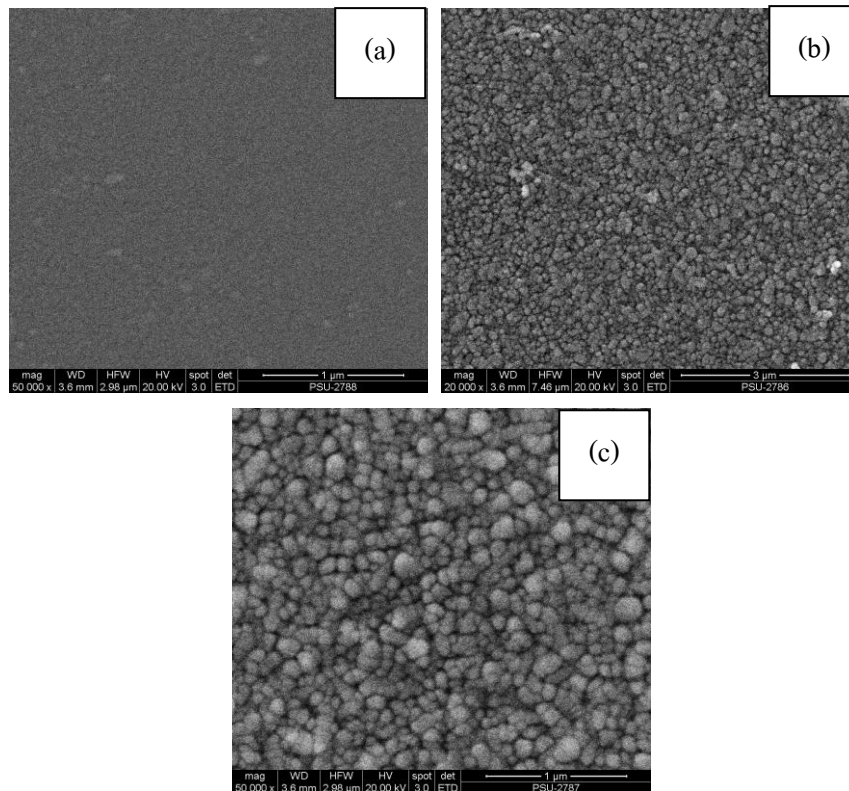
รูปที่ 3.1 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดเป็นการเปรียบเทียบสารตั้งต้นกับผลิตภัณฑ์ (a) Carbon Black (CB) (b) $[Pt(NH_3)_4Cl_2]_x XH_2O$ (Pt compound) (c) CB/Pt และ (d) CB/Pt on FTO glass

ต่อมาในส่วนของ single wall carbon nanotube (SWCNT) ที่ได้รับมานั้นก่อนที่จะนำมาผสมกับสารประกอบเชิง Pt compound นี้จะต้องนำ SWCNT ปรับปรุงผิวเสียก่อน โดยได้รับการปรับปรุงผิวด้วยการกัดกรดไนตริก (HNO_3) และกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เรียบร้อยแล้ว เมื่อนำมาทำการสังเคราะห์วัสดุผสมสองชนิดนี้เข้าด้วยกัน พบว่า สารประกอบเชิง Pt compound จะเข้าไปแทรกฝังปะอยู่ภายใน และเมื่อนำมาเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ด้วยเทคนิค Doctor Blade วิธีนี้ พบว่า SWCNT/Pt ยึดเกาะจับตัวกันแน่นเป็นกลุ่มก้อนเรียบแน่น ดังแสดงรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดเป็นการเปรียบเทียบสารตั้งต้นกับผลิตภัณฑ์ (a) single wall carbon nanotube (SWCNT) (b) SWCNT/Pt และ (c) SWCNT/Pt on FTO glass

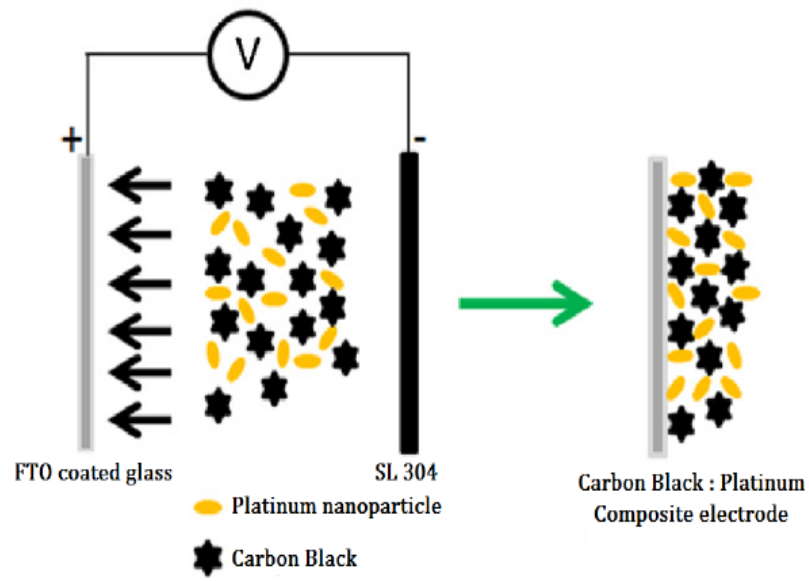
ในส่วนสุดท้ายเป็นในส่วนของสารประกอบเชิง Pt compound ที่นำมาทำการเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ด้วยเทคนิค Doctor blade วิธีนี้ พบว่า Pt compound กระจายตัวเกาะจับตัวกันแน่นเป็นก้อนกลมสม่ำเสมอ ดังแสดงรูปที่ 3.3



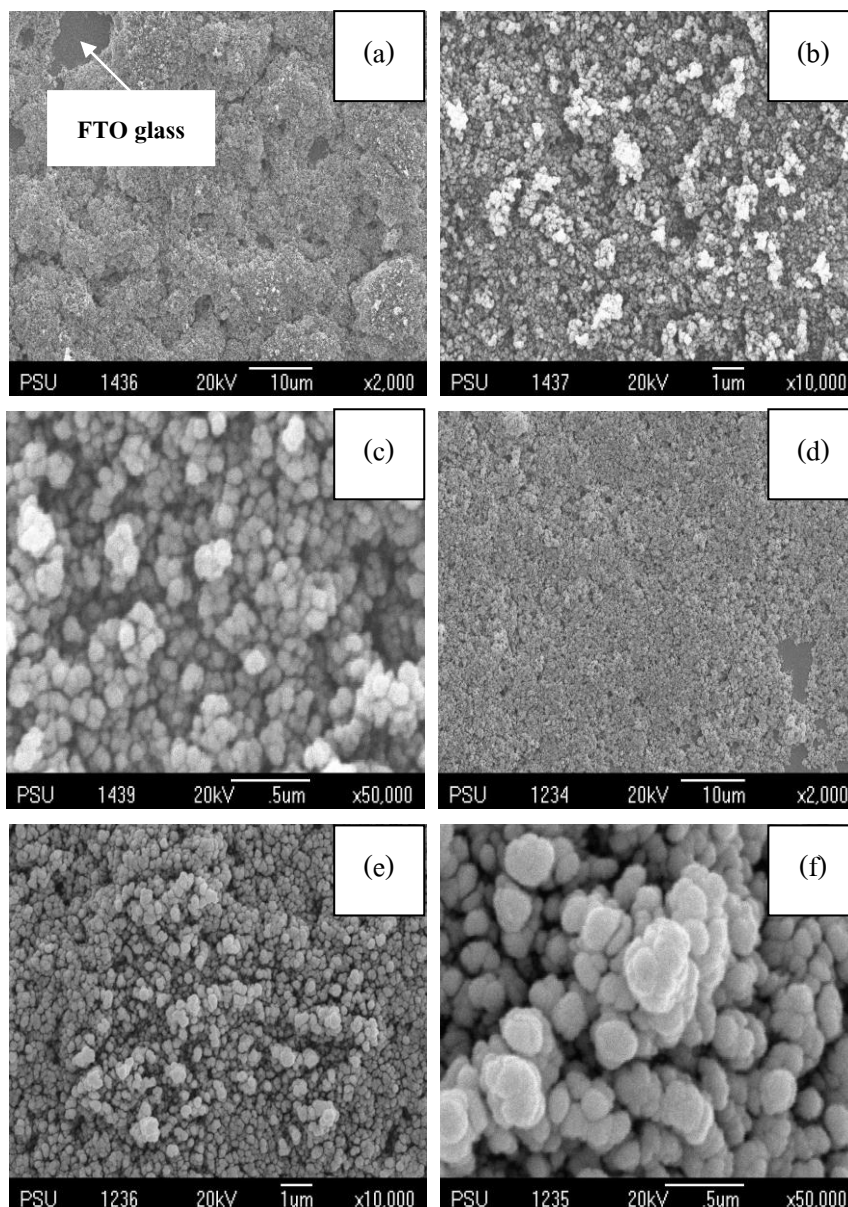
รูปที่ 3.3 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของผลิตภัณฑ์ (a) FTO glass (b) Pt on FTO glass (20000x) และ (c) Pt on FTO glass (50000x)

3.1.2 ผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคของ CB/Pt ที่เคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ด้วยเทคนิค Electrophoretic deposition (EPD)

การทดลองทาง EPD นี้ในส่วนของคุณสมบัติของ CB/Pt นั้นจะทำการปรับค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าตั้งแต่ 5V-25V โดยเวลาที่ใช้ในการทดลอง คือ 3 และ 5 นาที ในส่วนผลของการวิเคราะห์สมบัติการนำไฟฟ้านั้นจะทำการทดสอบที่ 5V 15V และ 25V เวลาที่ใช้ คือ 3 5 และ 7 นาที ดังแสดงรูปที่ 3.4 ซึ่งเป็นแผนภาพกระบวนการทาง EPD โดยสารที่นำมาใช้ยกตัวอย่างในที่นี้ คือ CB/Pt ซึ่งในการทดลองของ SWCNT/Pt นั้นเปลี่ยนจาก CB/Pt เป็น SWCNT/Pt ในระบบแทนและจะถูกนำเสนอต่อไปในส่วนของการวิเคราะห์ทางไฟฟ้า การทดลองทาง EPD ของ CB/Pt นั้นพบว่าเมื่อความต่างศักย์ทางไฟฟ้า 5V ประกอบกับเวลาที่ใช้ 3 และ 5 นาที ทำให้ CB/Pt นั้นเกิดการจับตัวกันอย่างเป็นกลุ่มก้อนค่อนข้างกลมและเกิดการพอกของชั้นฟิล์มที่เคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) นั้นเริ่มหนาขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งมีขนาดอนุภาคเท่ากับ 300-500 nm ดังแสดงรูปที่ 3.5

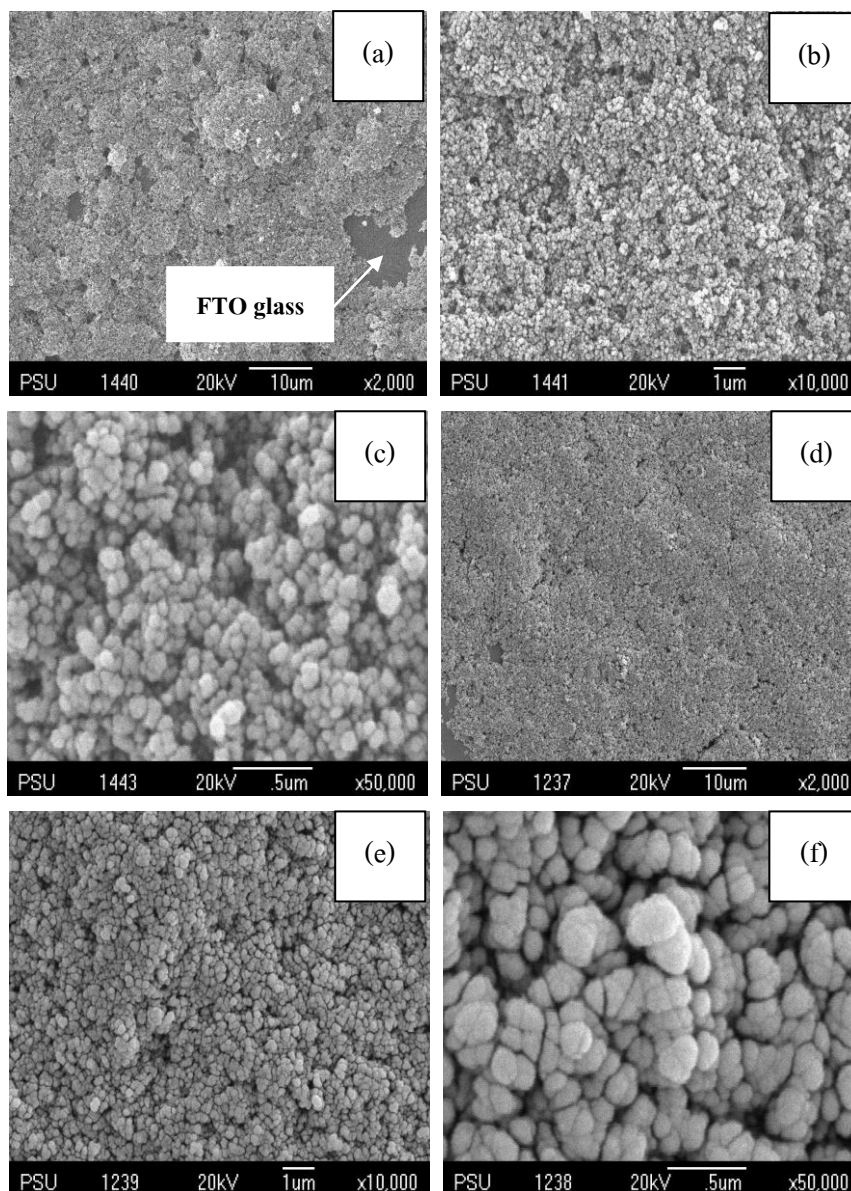


รูปที่ 3.4 แสดงภาพการทดลองของกระบวนการทาง EPD



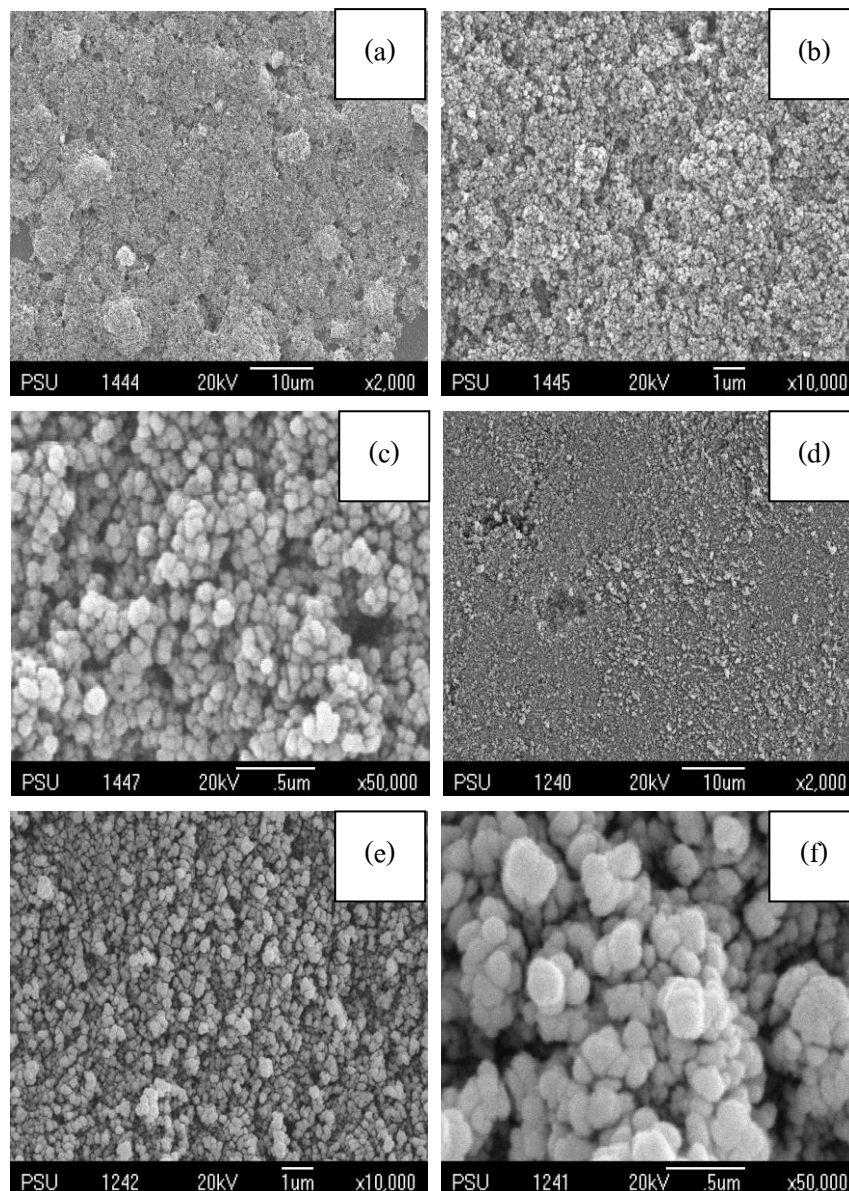
รูปที่ 3.5 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของ CB/Pt บนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5V จากภาพ (a)-(c) เวลาที่ใช้ คือ 3 นาที โดย (a) ที่กำลังขยาย 2000x (b) ที่กำลังขยาย 10000x และ (c) ที่กำลังขยาย 50000x จากภาพ (d)-(f) เวลาที่ใช้ คือ 5 นาที โดย (d) ที่กำลังขยาย 2000x (e) ที่กำลังขยาย 10000x และ (f) ที่กำลังขยาย 50000x

ต่อมาในส่วน EPD ของ CB/Pt ที่ความต่างศักย์ทางไฟฟ้า 10V และเวลาที่ใช้ 3 และ 5 นาที พบว่า เมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและเวลาที่ใช้เวลานานขึ้น พบว่า CB/Pt ที่เคลือบบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) นั้นจับเรียงตัวอัดบีบกันอย่างหนาแน่นมีจำนวนเยอะมากขึ้น ดังแสดงรูปที่ 3.6



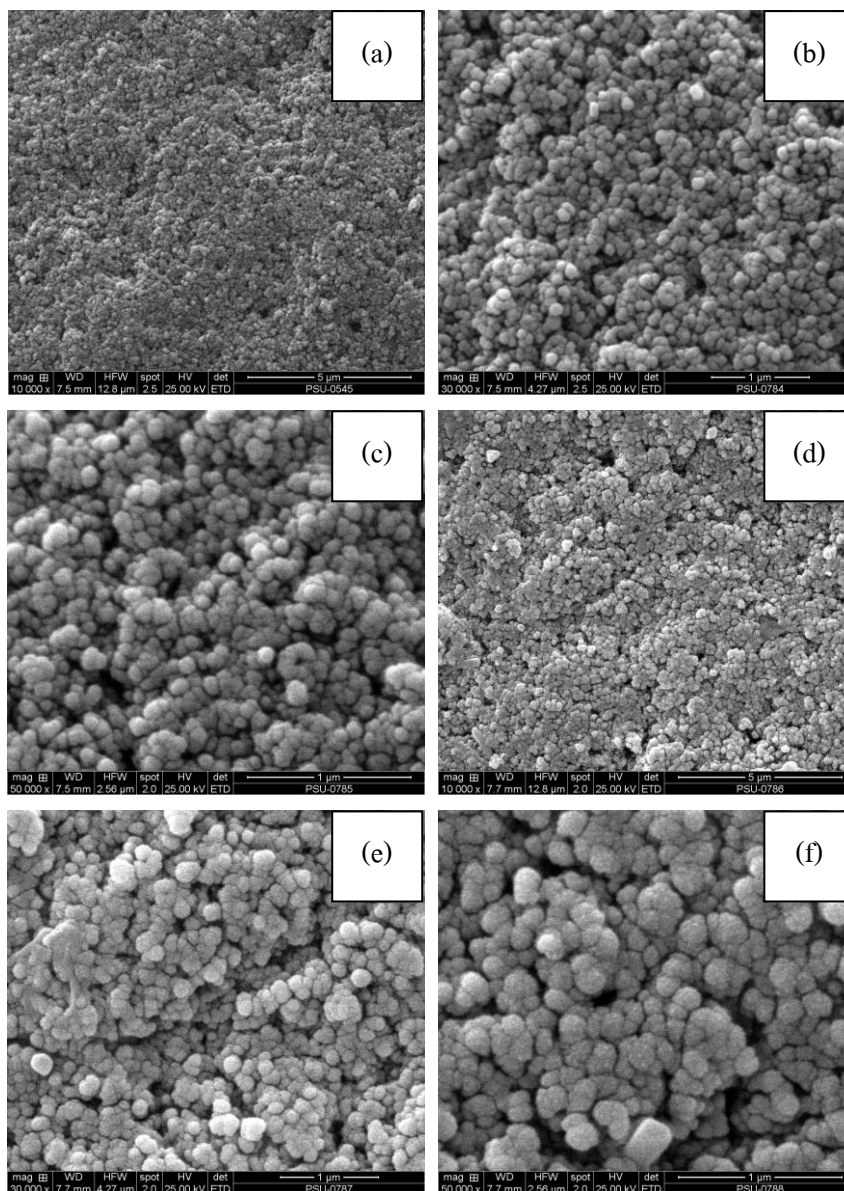
รูปที่ 3.6 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของ CB/Pt บนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10V จากภาพ (a)-(c) เวลาที่ใช้ คือ 3 นาที โดย (a) ที่กำลังขยาย 2000x (b) ที่กำลังขยาย 10000x และ (c) ที่กำลังขยาย 50000x จากภาพ (d)-(f) เวลาที่ใช้ คือ 5 นาที โดย (d) ที่กำลังขยาย 2000x (e) ที่กำลังขยาย 10000x และ (f) ที่กำลังขยาย 50000x

ต่อมาในส่วน EPD ของ CB/Pt ที่ความต่างศักย์ทางไฟฟ้า 15V และเวลาที่ใช้ 3 และ 5 นาที พบว่า เมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและเวลาที่ใช้ยาวนานขึ้น พบว่า CB/Pt ที่เคลือบบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) นั้นจับเรียงตัวอัดบีบกันอย่างหนาแน่นมีจำนวนเยอะมากขึ้นค่อนข้างกลมขนาดใหญ่ ดังแสดงรูปที่ 3.7



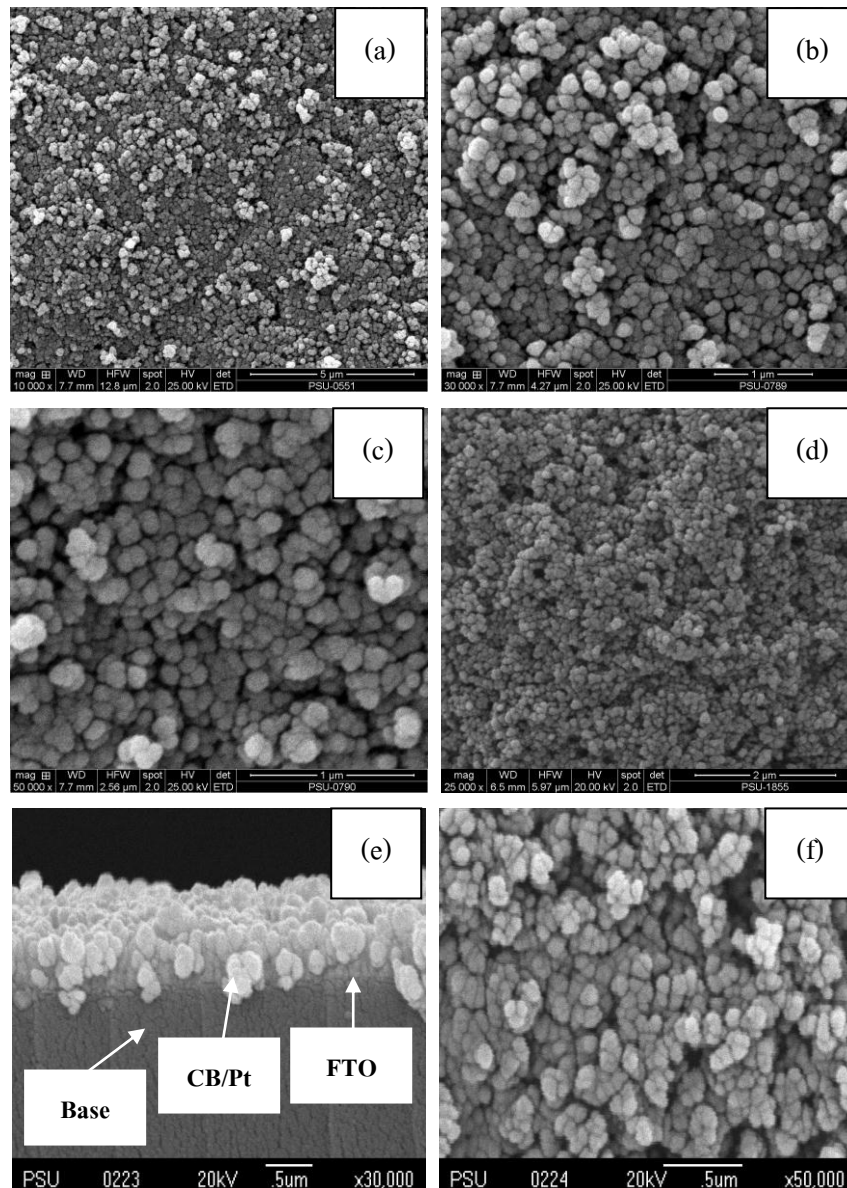
รูปที่ 3.7 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของ CB/Pt บนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15V จากภาพ (a)-(c) เวลาที่ใช้ คือ 3 นาที โดย (a) ที่กำลังขยาย 2000x (b) ที่กำลังขยาย 10000x และ (c) ที่กำลังขยาย 50000x จากภาพ (d)-(f) เวลาที่ใช้ คือ 5 นาที โดย (d) ที่กำลังขยาย 2000x (e) ที่กำลังขยาย 10000x และ (f) ที่กำลังขยาย 50000x

ต่อมาในส่วน EPD ของ CB/Pt ที่ความต่างศักย์ทางไฟฟ้า 20V และเวลาที่ใช้ 3 และ 5 นาที พบว่า เมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและเวลาที่ใช้เวลานานขึ้น พบว่า CB/Pt ที่เคลือบบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) นั้นจับเรียงตัวอัดบีบกันอย่างหนาแน่นมีจำนวนเยอะมากขึ้นค่อนข้างกลมขนาดเล็ก ดังแสดงรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของ CB/Pt บนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20V จากภาพ (a)-(c) เวลาที่ใช้ คือ 3 นาที โดย (a) ที่กำลังขยาย 10000x (b) ที่กำลังขยาย 30000x และ (c) ที่กำลังขยาย 50000x จากภาพ (d)-(f) เวลาที่ใช้ คือ 5 นาที โดย (d) ที่กำลังขยาย 10000x (e) ที่กำลังขยาย 30000x และ (f) ที่กำลังขยาย 50000x

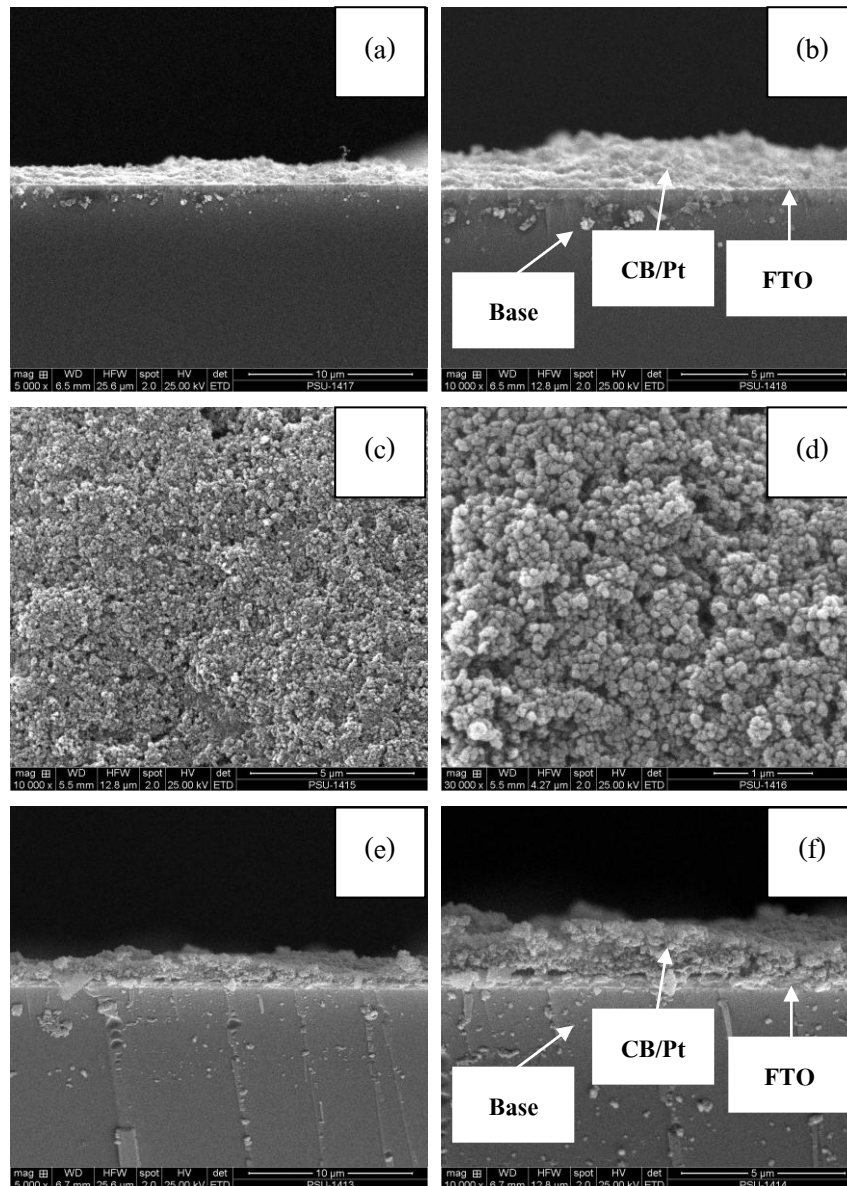
ต่อมาในส่วน EPD ของ CB/Pt ที่ความต่างศักย์ทางไฟฟ้า 25V และเวลาที่ใช้ 3 และ 5 นาที พบว่า เมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและเวลาที่ใช้ยาวนานขึ้น พบว่า CB/Pt ที่เคลือบบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) นั้นจับตัวอัดบีบกันอย่างหนาแน่นเป็นกลุ่มก้อนกลมขนาดเล็กมาก ดังแสดงรูปที่ 3.9



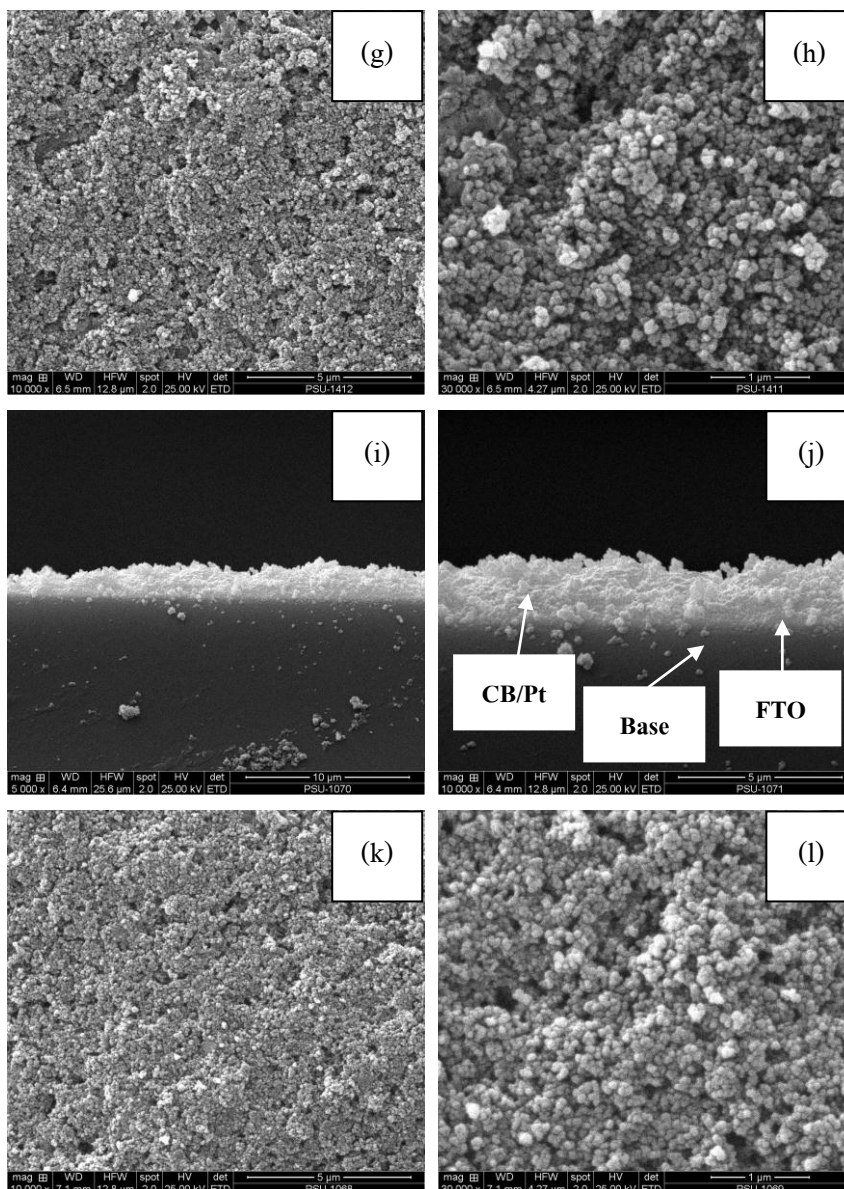
รูปที่ 3.9 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของ CB/Pt บนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 25V จากภาพ (a)-(c) เวลาที่ใช้ คือ 3 นาที โดย (a) ที่กำลังขยาย 10000x (b) ที่กำลังขยาย 30000x และ (c) ที่กำลังขยาย 50000x จากภาพ (d)-(f) เวลาที่ใช้ คือ 5 นาที โดย (d) ที่กำลังขยาย 25000x (e) ที่กำลังขยาย 30000x และ (f) ที่กำลังขยาย 50000x

และในส่วน EPD ช่วงสุดท้ายของ CB/Pt ที่ใช้เวลา 7 นาที และแรงดันไฟฟ้า (ความต่างศักย์ไฟฟ้า) ที่ใช้ทดลอง คือ 5V, 15V และ 25V ซึ่งแสดงผลตามลำดับต่อไปนี้ โดยเริ่มต้นจากภาพตัดขวาง พบว่า CB/Pt ที่ 5V เกิดผิวเคลือบของชั้นฟิล์มน้อยอันเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าอื่นๆ ส่วนบริเวณผิวเคลือบด้านบน พบว่า CB/Pt เคลือบลงบนกระจกไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอขนาดอนุภาคจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนกลมขนาดเล็กมากอัดแน่นและกระจายตัว

กันเสมอ ในส่วน CB/Pt ที่ 15V นั้นผลใกล้เคียงกันกับที่ 5V เพียงแต่ที่ 15V นั้นจะได้ฟิล์มเคลือบที่หนากว่าและค่อนข้างเรียบกว่า ส่วนทางด้าน 25V พบว่า ฟิล์มเคลือบหนาที่สุดและขนาดอนุภาคค่อนข้างเล็กเรียบแน่นไม่เป็นก้อนกลมขนาดใหญ่ ดังแสดงรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของ CB/Pt บนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) และภาพตัดขวางของ CB/Pt ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5V, 15V และ 25V ที่เวลา 7 นาที จากภาพ (a)-(c) ที่ 5V โดย (a) ที่กำลังขยาย 5000x (b) ที่กำลังขยาย 10000x และ (c) ที่กำลังขยาย 10000x (d) ที่กำลังขยาย 30000x จากภาพ (e)-(h) ที่ 15V โดย (e) ที่กำลังขยาย 5000x และ (f) ที่กำลังขยาย 10000x



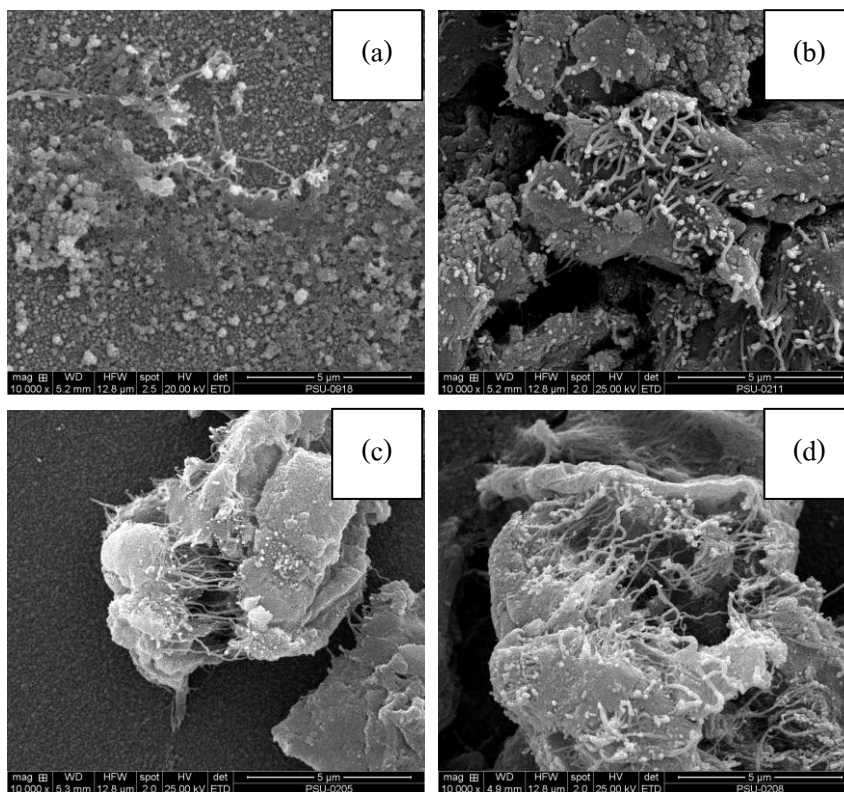
รูปที่ 3.10 (ต่อ) แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของ CB/Pt บนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) และภาพตัดขวางของ CB/Pt ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5V, 15V และ 25V ที่เวลา 7 นาที รูป (g) ที่กำลังขยาย 10000x (h) ที่กำลังขยาย 30000x และจากภาพ (i)-(l) ที่ 25V โดย (i) ที่กำลังขยาย 5000x (j) ที่กำลังขยาย 10000x (k) ที่กำลังขยาย 10,000x (l) ที่กำลังขยาย 30000x

จากผลการวิเคราะห์กระบวนการ EPD ของวัสดุผสม CB/Pt ที่เคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.4 พบว่า เมื่อทำการปล่อยแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 5V-25V โดยเพิ่มขึ้นทีละ 5V และเวลาที่ใช่ คือ 3, 5 และ 7 นาที จะสังเกตได้ว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ใช่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้เกิดการยึดเกาะวัสดุผสมของผิวเคลือบบนกระจกนำไฟฟ้าที่ดีขึ้นและเมื่อใช้เวลาที่เพิ่มมากขึ้นจาก 3 นาที

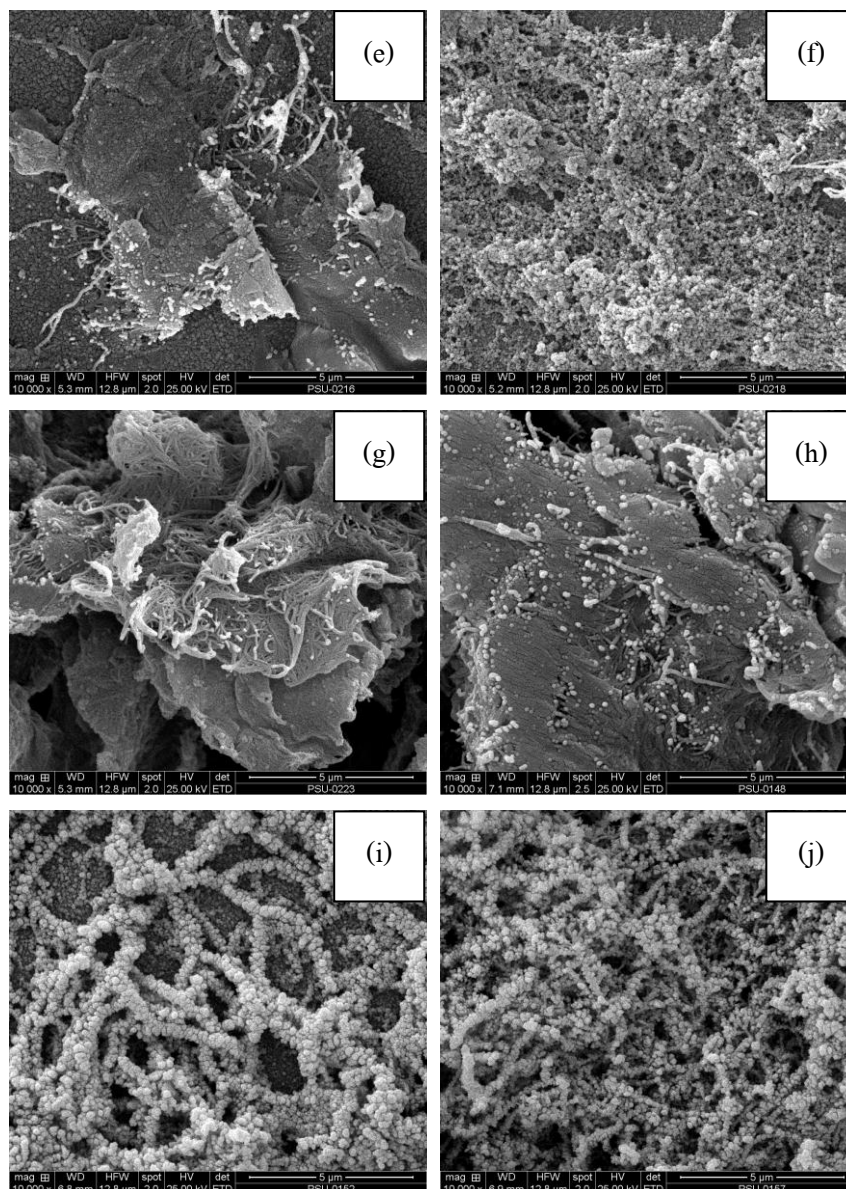
กลายเป็น 5 และ 7 นาที จะพบว่า วัสดุผสมของผิวเคลือบบนกระจกนำไฟฟ้านั้นยึดเกาะและกระจายตัวอยู่กันหนาแน่นมากขึ้นดังแสดงไว้ข้างต้น

3.1.3 ผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคของ SWCNT/Pt ที่เคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ด้วยเทคนิค Electrophoretic deposition (EPD)

การทดลองทาง EPD ในส่วนของวัสดุผสมระหว่าง SWCNT/Pt นั้นจะทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้า ตั้งแต่ 5V-25V โดยเวลาที่ใช้ในการทดลอง คือ 3, 5 และ 7 นาที ซึ่งผลของการวิเคราะห์ทางสมบัติการนำไฟฟ้านั้นจะทำการทดสอบที่ 5V, 15V และ 25V เวลาที่ใช้ คือ 7 นาที จะถูกนำเสนอต่อไปในส่วนของผลการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้า การทดลองทาง EPD ของ SWCNT/Pt นั้นพบว่า เมื่อความต่างศักย์ทางไฟฟ้า 5V-20V ประกอบกับเวลาที่ใช้ 3 และ 5 นาที ทำให้ SWCNT/Pt นั้นเกิดการจับตัวกันอย่างเป็นกลุ่มก้อนค่อนข้างกลมใหญ่ภายในก้อนกลมนั้นจะมีลักษณะเป็นเส้นใยระดับนาโนหลายๆเส้นพันขดกันอยู่เป็นส่วนใหญ่ แต่ในขณะที่เดียวกันอนุภาคจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด คือ ช่วงที่ใช้แรงดันไฟฟ้าที่ 25V ที่เวลา 3 และ 5 นาที พบว่าเส้น SWCNT เกิดการเติบโตของอนุภาคเป็นเส้นใยก้อนกลมเรียงต่อกันเป็นแนวยาวตลอดสายจำนวนมาก นอกจากนี้เกิดการพอกของชั้นฟิล์มที่ถูกเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) นั้นมีความหนาขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของ SWCNT/Pt บนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5V-25V ที่เวลา 3 และ 5 นาที จากภาพ (a)-(b) ที่ 5V โดย (a) ที่เวลา 3 นาที (b) ที่เวลา 5 นาที จากภาพ (c)-(d) ที่ 10V โดย (c) ที่เวลา 3 นาที (d) ที่เวลา 5 นาที

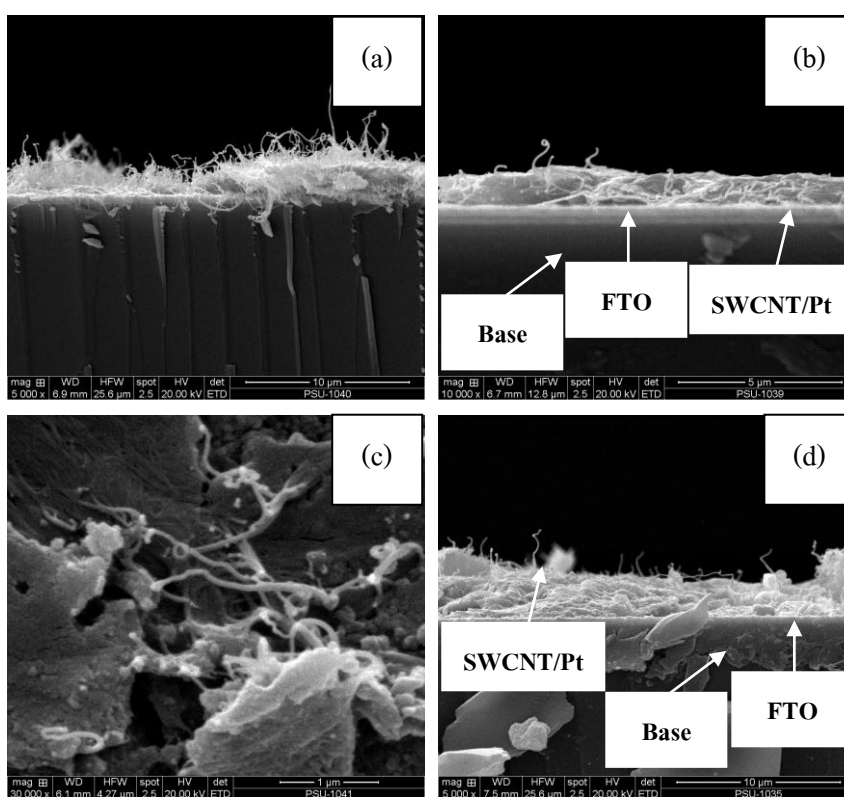


รูปที่ 3.11 (ต่อ) แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของ SWCNT/Pt บนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5V-25V ที่เวลา 3 และ 5 นาที จากภาพ (e)-(f) ที่ 15V โดย (e) ที่เวลา 3 นาที (f) ที่เวลา 5 นาที จากภาพ (g)-(h) ที่ 20V โดย (g) ที่เวลา 3 นาที (h) ที่เวลา 5 นาที จากภาพ (i)-(j) ที่ 25V โดย (i) ที่เวลา 3 นาที และ (j) ที่เวลา 5 นาที ซึ่งจากภาพทั้งหมด แสดงที่กำลังขยาย 10000x

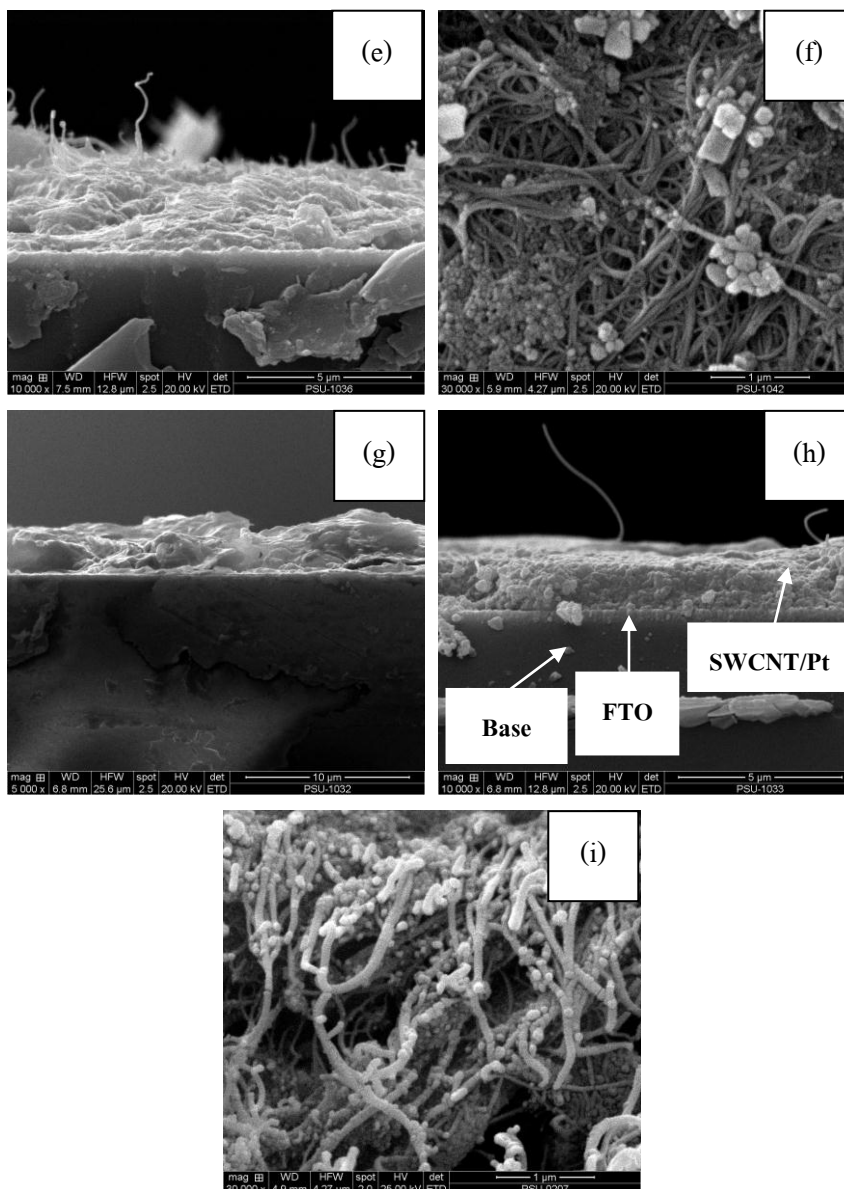
และในส่วน EPD ช่วงสุดท้ายของ SWCNT/Pt ที่ใช้เวลา 7 นาที และความต่างศักย์ทางไฟฟ้าที่ใช้ทดลอง คือ 5V, 15V และ 25V ซึ่งแสดงผลตามลำดับต่อไปนี้ โดยเริ่มต้นจากภาพตัดขวางพบว่า SWCNT/Pt ที่ 5V เกิดผิวเคลือบของชั้นฟิล์มน้อยอันเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ใช้น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าอื่นๆ พบว่า เส้นใย SWCNT/Pt เกิดการขดเรียงกันอย่างเห็นได้

ชัดส่วนบริเวณผิวเคลือบด้านบน พบว่า SWCNT/Pt เคลือบลงบนกระจกไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอขนาดอนุภาคขดกันอย่างเป็นระเบียบเรียบและกระจายตัวกันเสมอ

ในส่วน SWCNT/Pt ที่ 15V นั้นผลใกล้เคียงกันกับที่ 5V เพียงแต่ที่ 15V นั้นจะได้ฟิล์มเคลือบที่หนากว่าและค่อนข้างเรียบ ส่วนทางด้าน 25V พบว่า ได้ฟิล์มเคลือบหนาที่สุดและขนาดอนุภาคค่อนข้างเล็กเรียบแน่น ในส่วนของเส้นใย SWCNT ขดราบเรียบนอนเรียงตัวกันอย่างสม่ำเสมอ ดังแสดงรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของ SWCNT/Pt บนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) และภาพตัดขวางของ SWCNT/Pt ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5V, 15V และ 25V ที่เวลา 7 นาที จากภาพ (a)-(c) ที่ 5V โดย (a) ที่กำลังขยาย 5000x (b) ที่กำลังขยาย 10000x และ (c) ที่กำลังขยาย 30000x

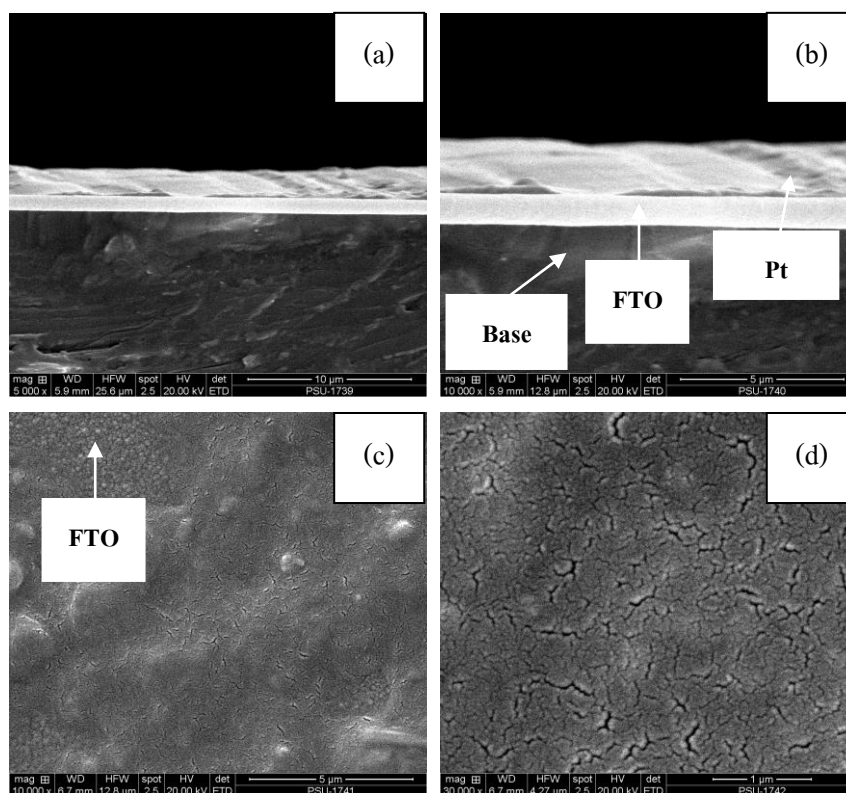


รูปที่ 3.12 (ต่อ) แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของ SWCNT/Pt บนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) และภาพตัดขวางของ SWCNT/Pt ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5V, 15V และ 25V ที่เวลา 7 นาที จากภาพ (d)-(f) ที่ 15V โดย (d) ที่กำลังขยาย 5000x (e) ที่กำลังขยาย 10000x (f) ที่กำลังขยาย 30000x และจากภาพ (g)-(i) ที่ 25V โดย (g) ที่กำลังขยาย 5000x (h) ที่กำลังขยาย 10000x และ (i) ที่กำลังขยาย 30,000x

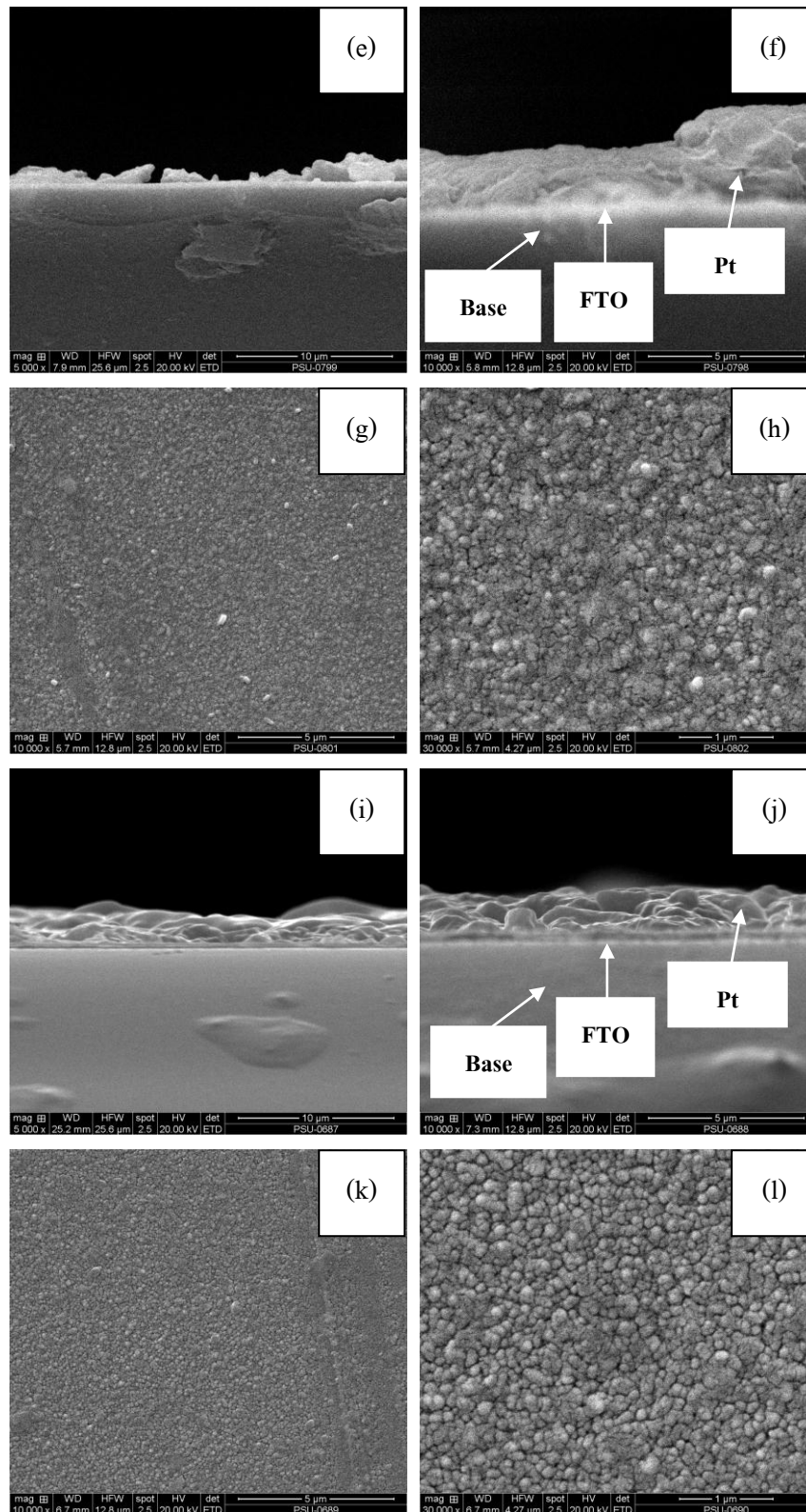
3.1.4 ผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคของ Pt compound ที่เคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ด้วยเทคนิค Electrophoretic deposition (EPD)

การทดลองทาง EPD ในส่วนของสารประกอบ Pt compound นั้นทำการทดลองที่ 5V, 15V และ 25V เวลาที่ใช้ คือ 7 นาที ซึ่งได้ทำการทดลองเชิงมาตรฐานเพื่อเปรียบเทียบระหว่าง CB/Pt

และ SWCNT/Pt และจะถูกนำเสนอต่อไปในส่วนของการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้า การทดลองทาง EPD ของ Pt compound นั้นพบว่า ที่ 5V อนุภาคของ Pt compound ผิวยาวเรียบและเริ่มเกิดการฟอร์มตัวเป็นก้อนกลมเล็กปะปนอยู่บนอนุภาคของกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) และเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น พบว่า ผิวนูนของ Pt compound จับตัวกันแน่นเป็นก้อนเรียบยาวตลอดผิวนูน และขนาดอนุภาคนั้นเป็นก้อนกลมเล็กๆกระจายอยู่เต็มบนกระจกของ FTO นอกจากนี้ชั้นฟิล์มของ Pt compound ที่ถูกเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) นั้นหนาที่สุดเมื่อแรงดันไฟฟ้าและเวลาที่ใช้สูงที่สุดอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของ Pt compound บนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) และภาพถ่ายตัดขวางของ Pt compound ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5V, 15V และ 25V ที่เวลา 7 นาที จากภาพ (a)-(d) ที่ 5V โดย (a) ที่กำลังขยาย 5000x (b) ที่กำลังขยาย 10000x และ (c) ที่กำลังขยาย 10000x และ (d) ที่กำลังขยาย 30000x

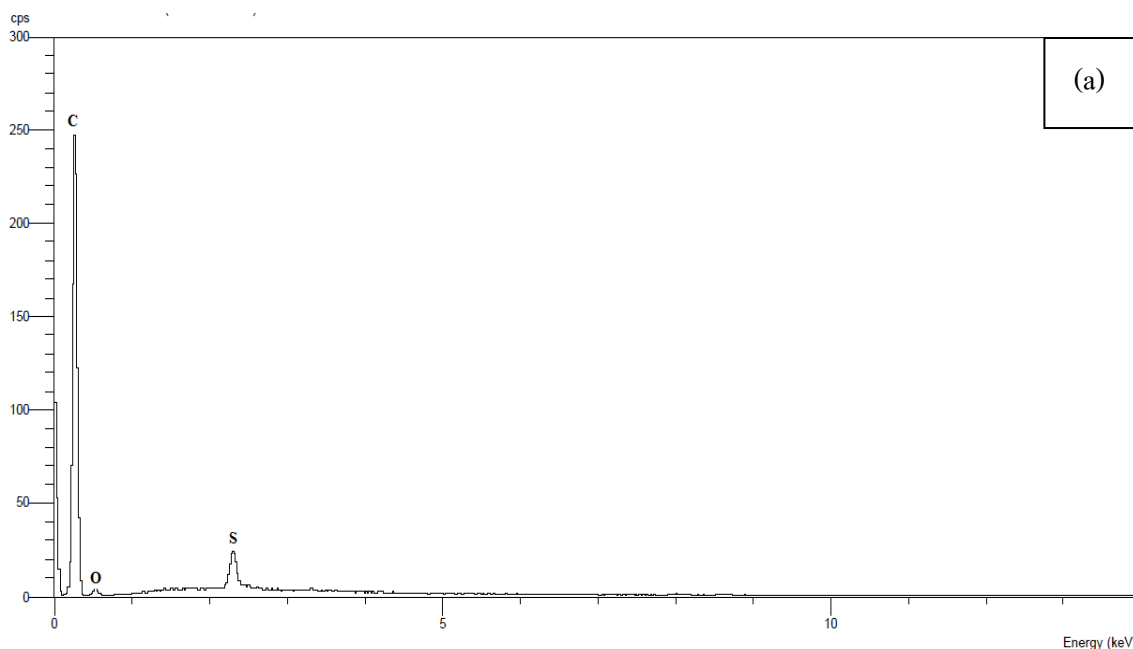


รูปที่ 3.13 (ต่อ) แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของ Pt compound บนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) และภาพตัดขวางของ Pt compound ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5V, 15V

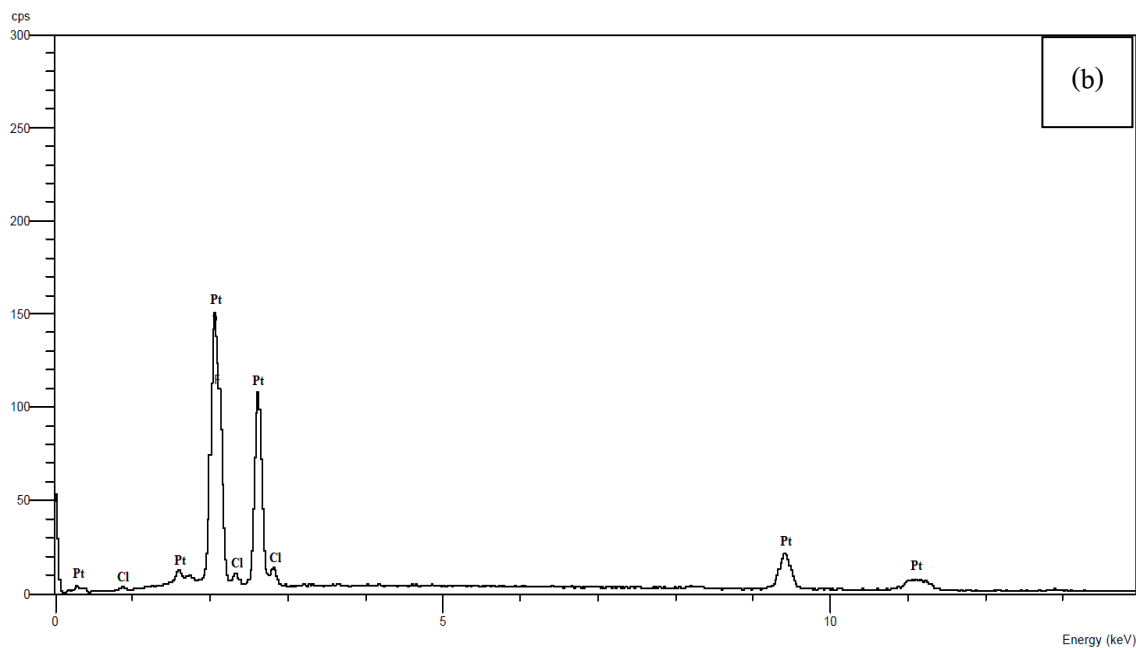
และ 25V ที่เวลา 7 นาที จากภาพ (e)-(h) ที่ 15V โดย (e) ที่กำลังขยาย 5000x (f) ที่กำลังขยาย 10000x (g) ที่กำลังขยาย 10000x (h) ที่กำลังขยาย 30000x และจากภาพ (i)-(l) ที่ 25V โดย (i) ที่กำลังขยาย 5000x (j) ที่กำลังขยาย 10000x (k) ที่กำลังขยาย 10000x (l) ที่กำลังขยาย 30000x

3.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุโดยเทคนิคทาง EDS

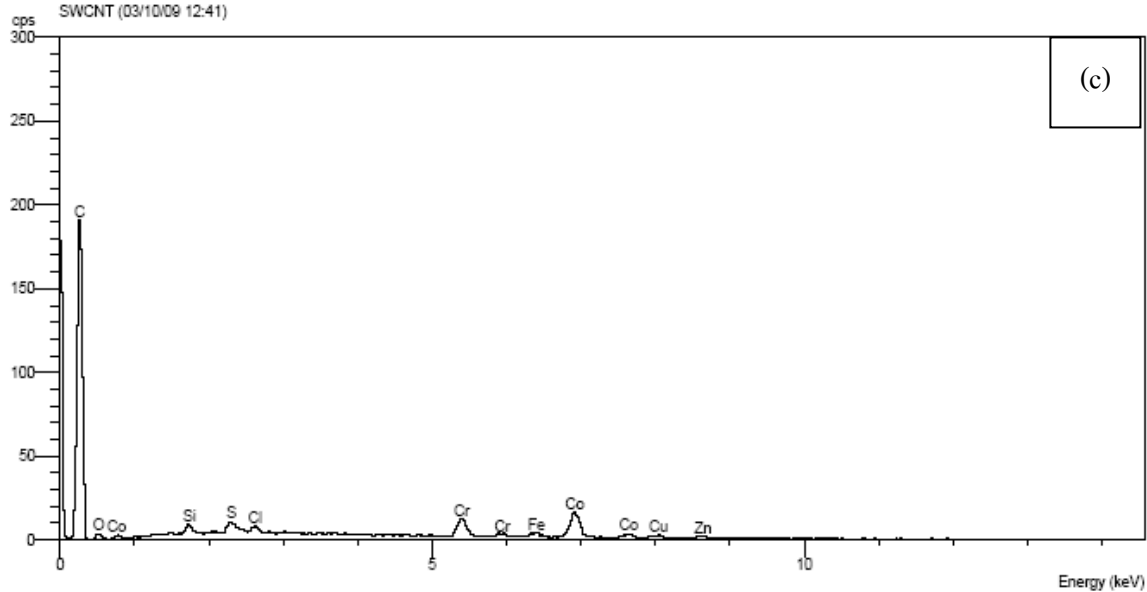
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุที่ใช้ในการวิจัย ในที่นี้ คือ CB SWCNT และ Pt compound ก่อนทำการเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) พบว่า CB มีธาตุที่เป็นองค์ประกอบสำคัญ คือ C, O และ S ต่อมา SWCNT มีธาตุที่สำคัญ คือ C, Cr, Co, Si และ S ที่มีจำนวนเยอะ ส่วนธาตุอื่นๆ มีจำนวนน้อย เช่น Fe, Cu, Zn และ Cl ในส่วนของ Pt compound มีธาตุที่เป็นองค์ประกอบสำคัญ คือ Pt และ Cl เมื่อทำการสังเคราะห์วัสดุผสมระหว่าง CB/Pt กับ SWCNT/Pt หลังจากทำการเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้าแล้ว พบว่า CB/Pt มีธาตุ C Pt S และ Cl ส่วน SWCNT/Pt มีธาตุหลัก C, Cr, Co, S, Si, Cl และ Pt ซึ่งธาตุ Pt เป็นธาตุที่ต้องการในระบบและเป็นสิ่งยืนยันว่าเป็นวัสดุผสม CB/Pt และ SWCNT/Pt เกิดการสังเคราะห์ได้จริง ดังแสดงรูปที่ 3.14



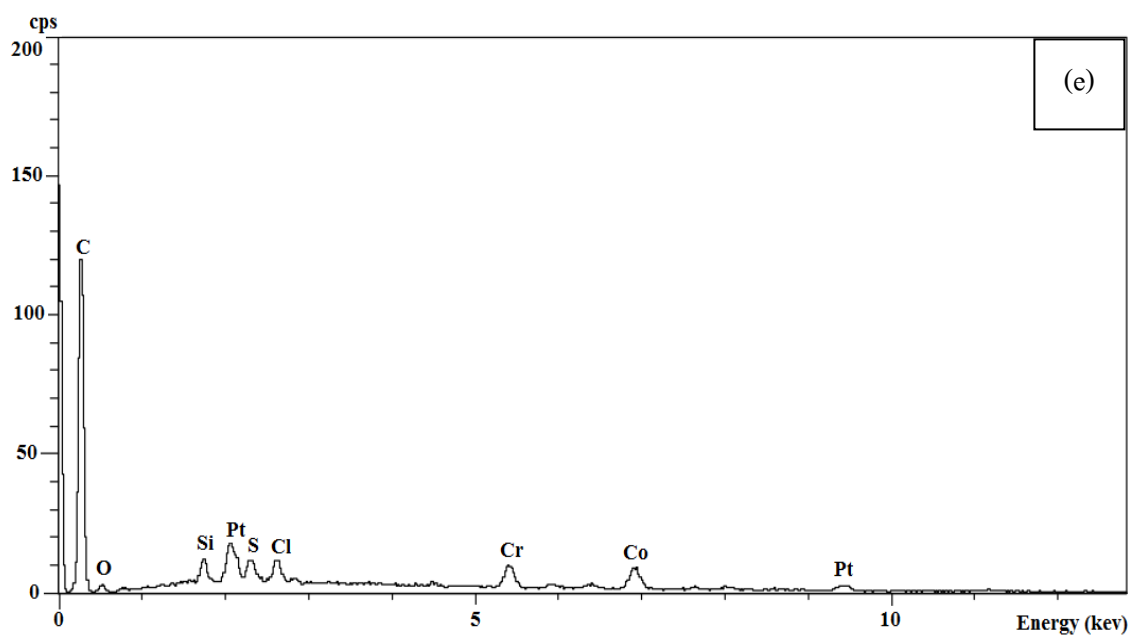
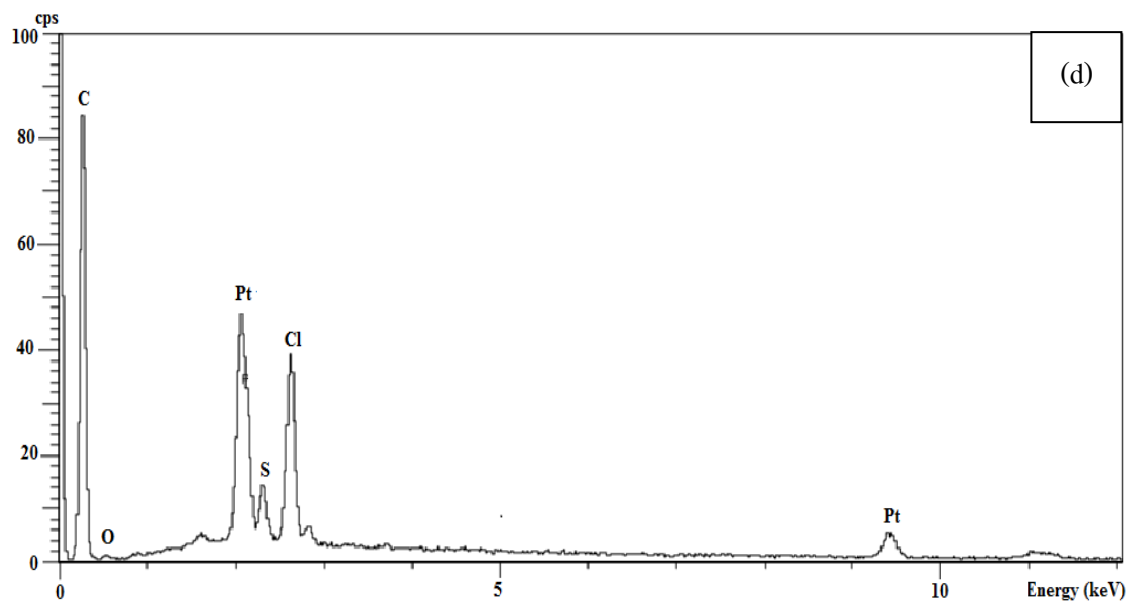
รูปที่ 3.14 แสดงภาพผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุระหว่าง Counts per second (cps) และพลังงาน (Energy, keV) โดย EDS พบว่า (a) Carbon black (CB) (b) Pt compound (c) single wall carbon nanotube (SWCNT) (d) CB/Pt และ (e) SWCNT/Pt



Operator : N.Pornpot
 Client : Dept.of Mining and Materials Engineering, PSU
 Job : 2700/52 Suchad
 SWCNT (03/10/09 12:41)



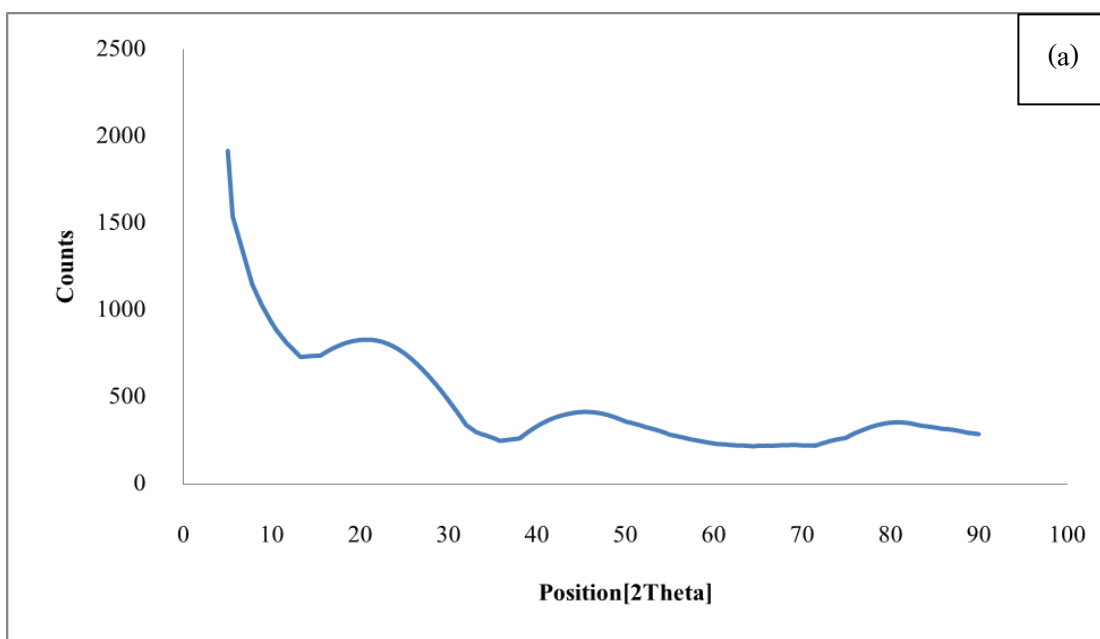
รูปที่ 3.14 (ต่อ) แสดงภาพผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุระหว่าง Counts per second (cps) และพลังงาน (Energy, keV) โดย EDS พบว่า (a) Carbon black (CB) (b) Pt compound (c) single wall carbon nanotube (SWCNT) (d) CB/Pt และ (e) SWCNT/Pt



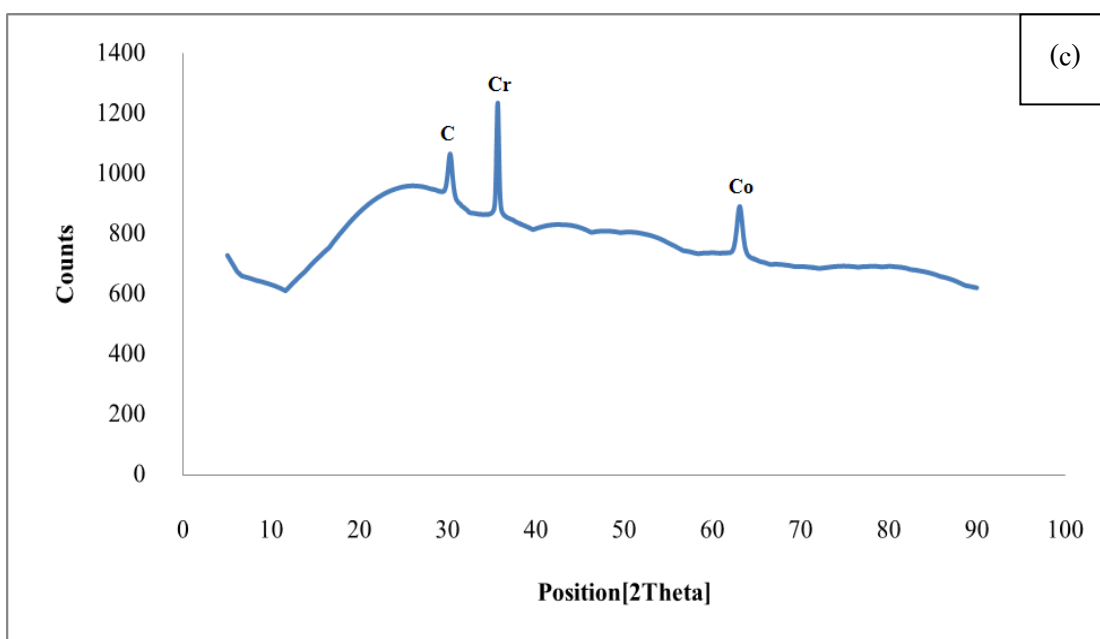
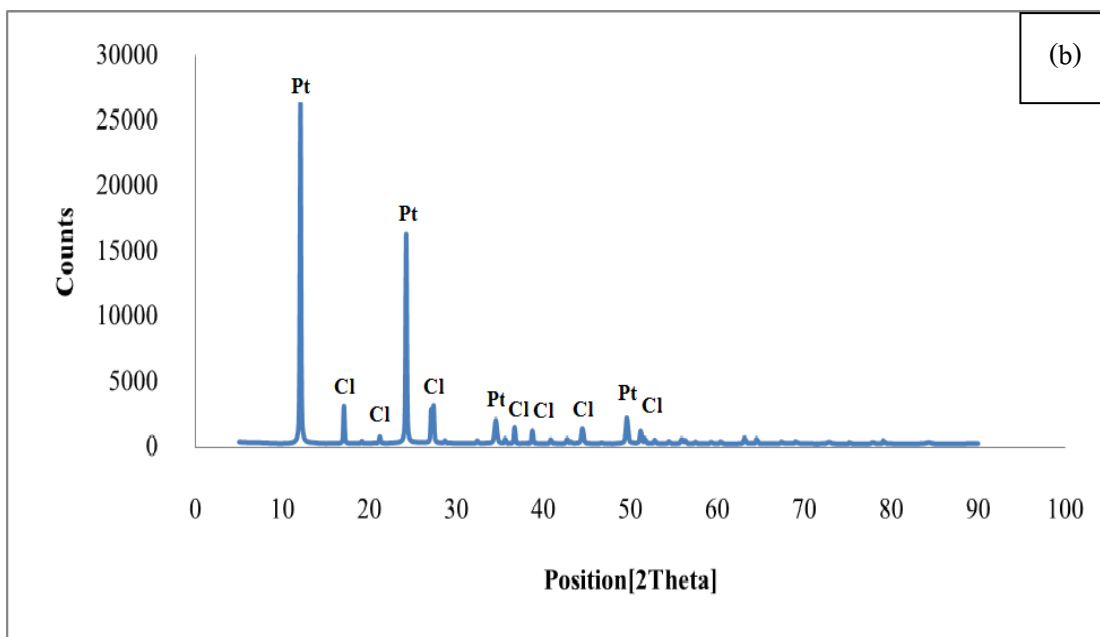
รูปที่ 3.14 (ต่อ) แสดงภาพผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุระหว่าง Counts per second (cps) และพลังงาน (Energy, keV) โดย EDS พบว่า (a) Carbon black (CB) (b) Pt compound (c) single wall carbon nanotube (SWCNT) (d) CB/Pt และ (e) SWCNT/Pt

3.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบการก่อรูปของเฟสโดยเทคนิค XRD

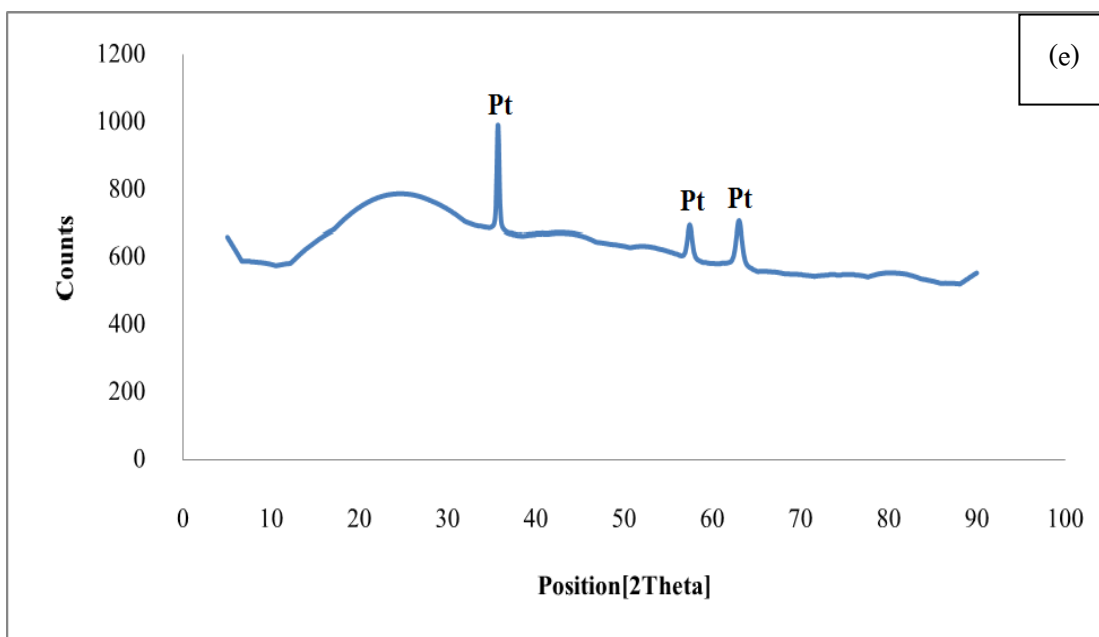
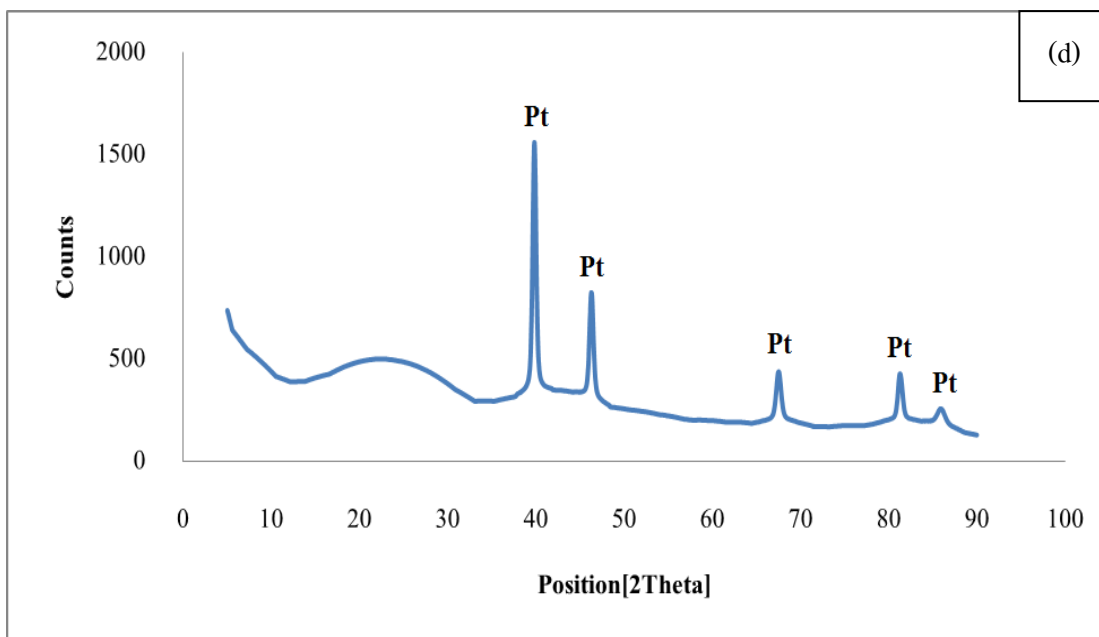
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบการก่อรูปของเฟสที่ใช้ในการวิจัย ในที่นี้ คือ CB SWCNT Pt compound CB/Pt และ SWCNT/Pt สามารถอภิปรายผลการทดลองได้ดังนี้ เริ่มต้น พง CB ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์เฟส พบว่า ส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นอะมอร์ฟัส มีจำนวนเล็กน้อยที่ Carbon ประพฤติตัวเหมือนแกรไฟต์ ซึ่งมีโครงสร้าง Rhombohedral ในส่วนของ Pt compound พบว่า มีโครงสร้างแบบ Tetragonal และ SWCNT พบว่า ประกอบด้วยเฟสของ CoCr_2O_4 และ Carbon ที่มีอยู่ในรูปของแกรไฟต์ เช่นเดียวกัน เมื่อนำวัสดุทั้งสองชนิดมาผสมกับ Pt compound แล้วทำการสังเคราะห์ขึ้นจะได้ว่า CB/Pt จะพบ Pt ผสมอยู่ที่เฟส 39.9° 46.1° 67.5° และ 81.1° แสดงรูปที่ 3.14 (c) และในส่วนสุดท้าย SWCNT/Pt จะพบ Pt อยู่ที่เฟสลักษณะเดียวกัน ดังแสดงรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบการก่อรูปของเฟสโดย XRD จากภาพ (a) Carbon black (CB) (b) Pt compound (c) SWCNT (d) CB/Pt และ (e) SWCNT/Pt



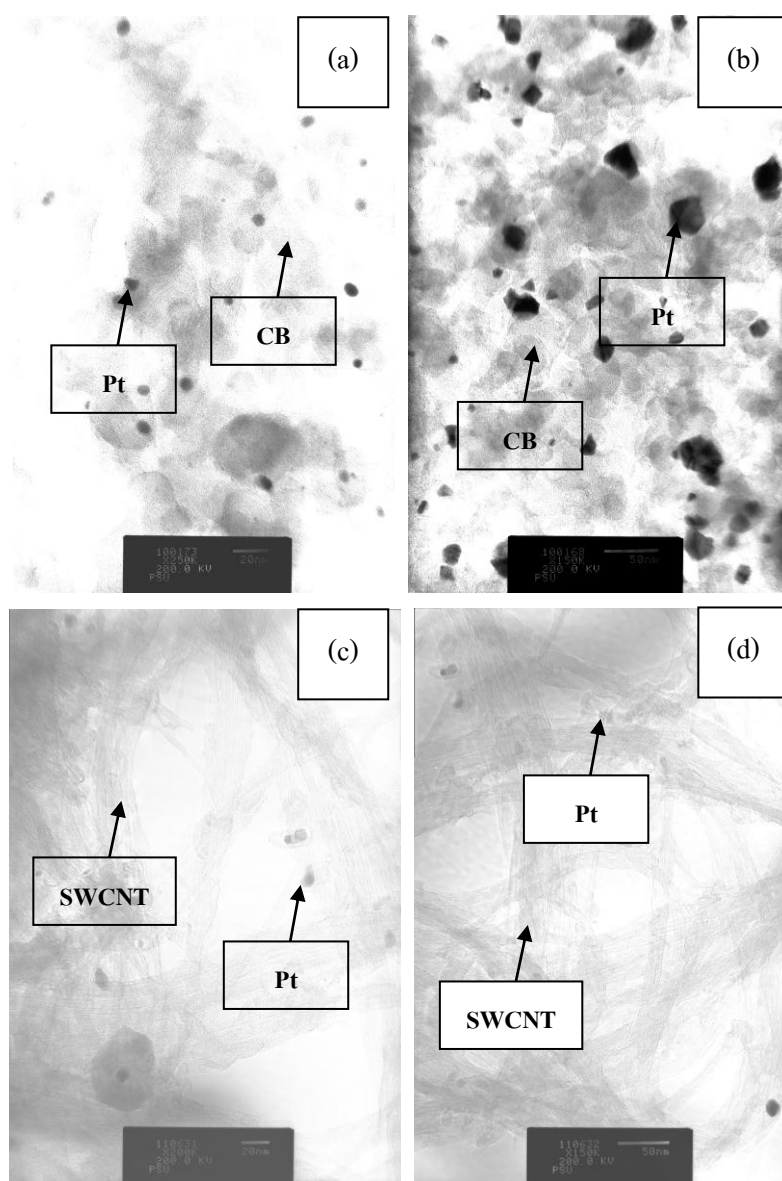
รูปที่ 3.15 (ต่อ) แสดงผลการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบการก่อรูปของเฟสโดย XRD จากภาพ (a) Carbon black (CB) (b) Pt compound (c) SWCNT (d) CB/Pt และ (e) SWCNT/Pt



รูปที่ 3.15 (ต่อ) แสดงภาพรวมผลการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบการก่อรูปของเฟสโดย XRD พบว่า (a) Carbon black (CB) (b) Pt compound (c) SWCNT (d) CB/Pt และ (e) SWCNT/Pt

3.4 ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิค TEM

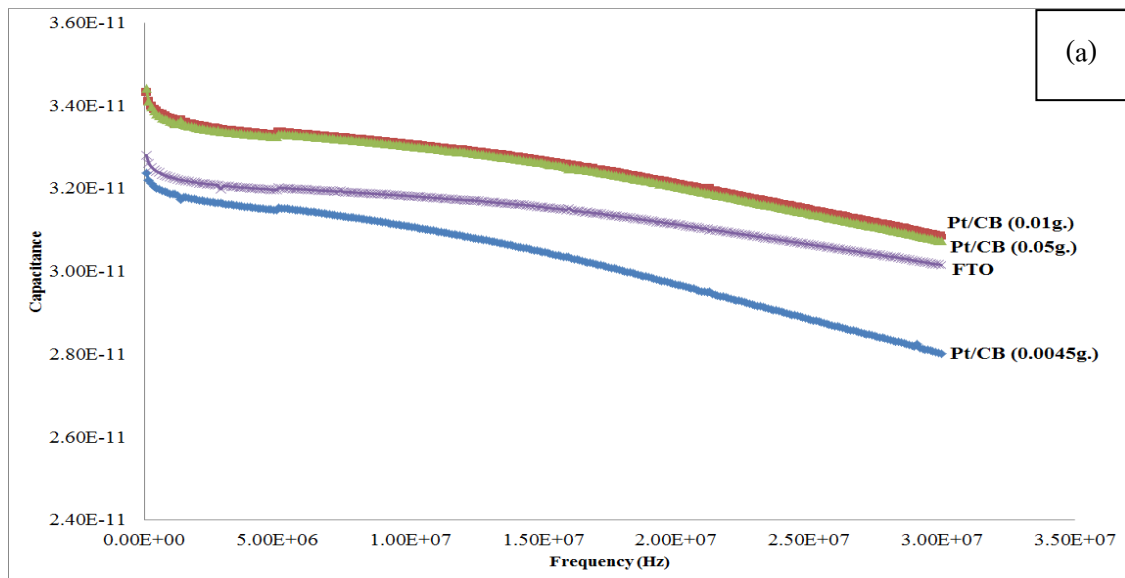
ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM นี้จะทำการวิเคราะห์วัสดุผสมที่เกิดจากการสังเคราะห์ CB/Pt กับ SWCNT/Pt พบว่า ลักษณะของ CB/Pt มีลักษณะกลมและมี Pt แทรกฝังปะกระจายตัวกันอย่างสม่ำเสมอโดยรอบซึ่งมีขนาดอนุภาคเท่ากับ 20 และ 50 nm ต่อมาในส่วนของ SWCNT/Pt มีลักษณะเป็นเส้นเรียงตัวเรียบยาวและมี Pt แทรกฝังปะกระจายตัวกันอย่างสม่ำเสมอโดยรอบซึ่งมีขนาดอนุภาคเท่ากับ 20 และ 50 nm เช่นเดียวกัน ดังแสดงรูปที่ 3.16



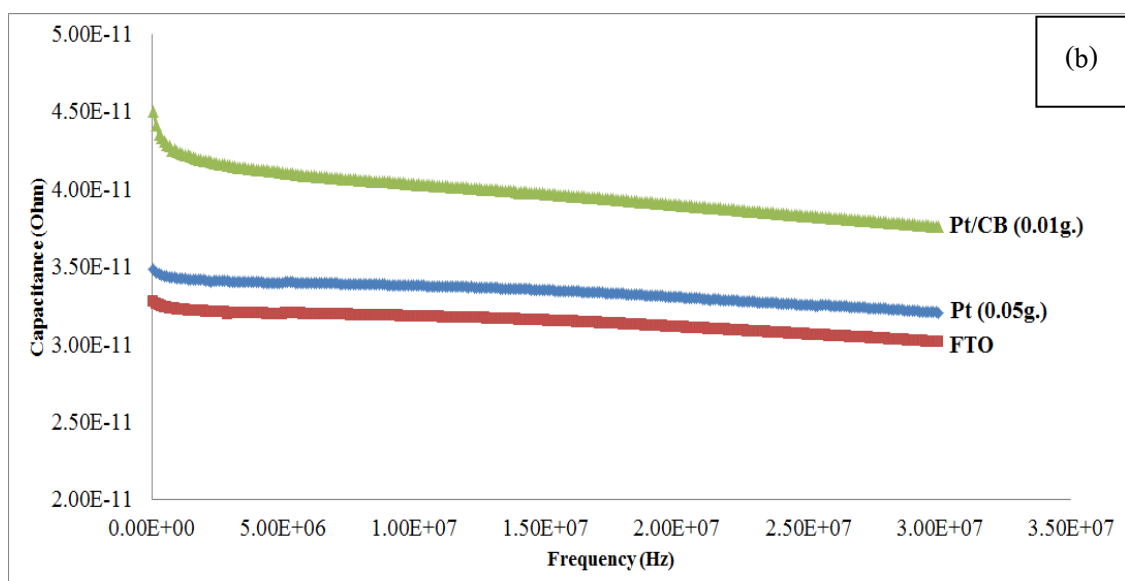
รูปที่ 3.16 แสดงภาพผลการวิเคราะห์โดย TEM พบว่า (a) CB/Pt 20 nm (b) CB/Pt 50 nm (c) SWCNT/Pt 20 nm และ (d) SWCNT/Pt 50 nm

3.5 ผลการวิเคราะห์สมบัติการนำไฟฟ้า

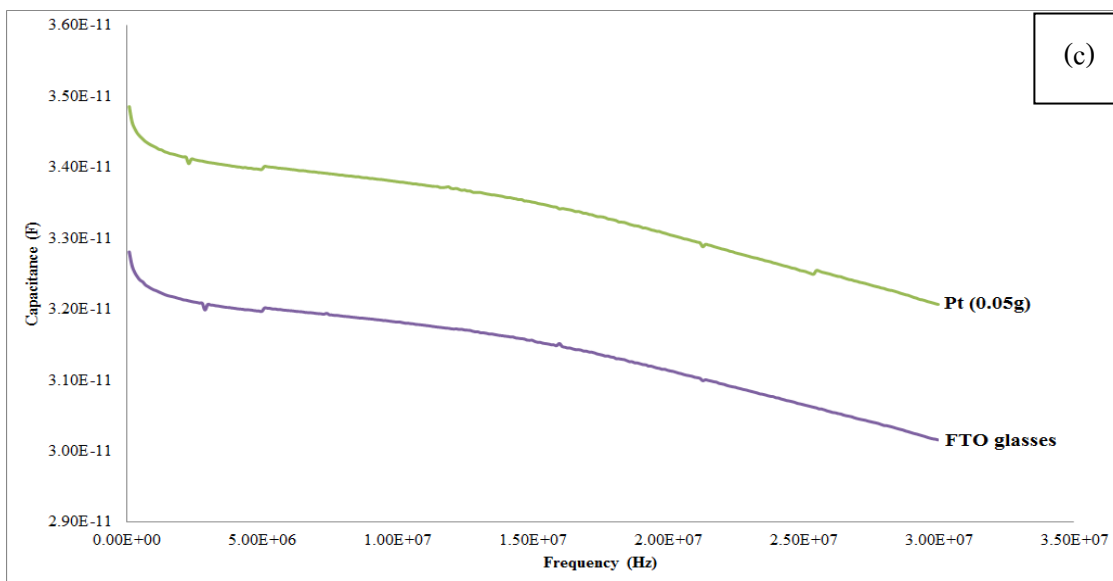
3.5.1 ในงานวิจัยนี้ ผงวัสดุผสมที่สังเคราะห์ขึ้น CB/Pt SWCNT/Pt และปริมาณการเติมสาร Pt compound ที่ใช้มากที่สุด ทำการเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ที่เรียบร้อยแล้ว นำมาทำการทดสอบตรวจวัดทางสมบัติการนำไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้ในขั้วแคโทดรีดอกซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสง โดยผ่านการวัดค่าความเก็บประจุไฟฟ้าและค่าความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งพบว่า ถ้าค่าความเก็บประจูงมีค่ามากยิ่งขึ้นเนื่องจากมีความสามารถในการเก็บอิเล็กตรอนเพื่อนำไปใช้งานสูงส่วนค่าความต้านทานไฟฟ้ายิ่งน้อยยิ่งดีเนื่องจากเป็นตัวป้องกันไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านในวงจรได้ไม่ดี โดยผ่านเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ในการทดสอบได้แก่ LCR meter พบว่าค่าความเก็บประจุไฟฟ้าและค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ถูกแสดงผ่านทางกราฟพล็อตความถี่ตั้งแต่ 75 KHz – 30 MHz ของ CB/Pt ซึ่งถูกเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้าที่ทำการเพิ่มจำนวนปริมาณ Pt compound ลงไป พบว่า CB/Pt ที่มี Pt compound 0.01 กรัม นั้น ให้ค่าความเก็บประจุสูงสุด ($3.76-4.5 \times 10^{-11}$ F) แต่ในขณะที่เดียวกัน Pt compound 0.05 กรัม ที่ไม่มี CB ผสมอยู่ นั้นแสดงค่าความเก็บประจูงต่ำกว่าเมื่อเทียบกับ CB/Pt ที่ 0.01 กรัม ต่อมาในส่วนของ SWCNT/Pt ที่มี Pt compound 0.01 กรัม นั้นแสดงค่าความเก็บประจูงต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับ CB/Pt ที่ 0.01 กรัม ($4.35-2.59 \times 10^{-12}$ F) ในส่วนการวิเคราะห์ค่าความต้านทานไฟฟ้า พบว่า CB/Pt และ SWCNT/Pt มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน คือ ($1.02 \times 10^3 - 2.36 \times 10^1 \Omega$) และ ($2.22 \times 10^5 - 1.69 \times 10^1 \Omega$) ดังแสดงรูปที่ 3.17 จากภาพ (a)-(f) เป็นต้น



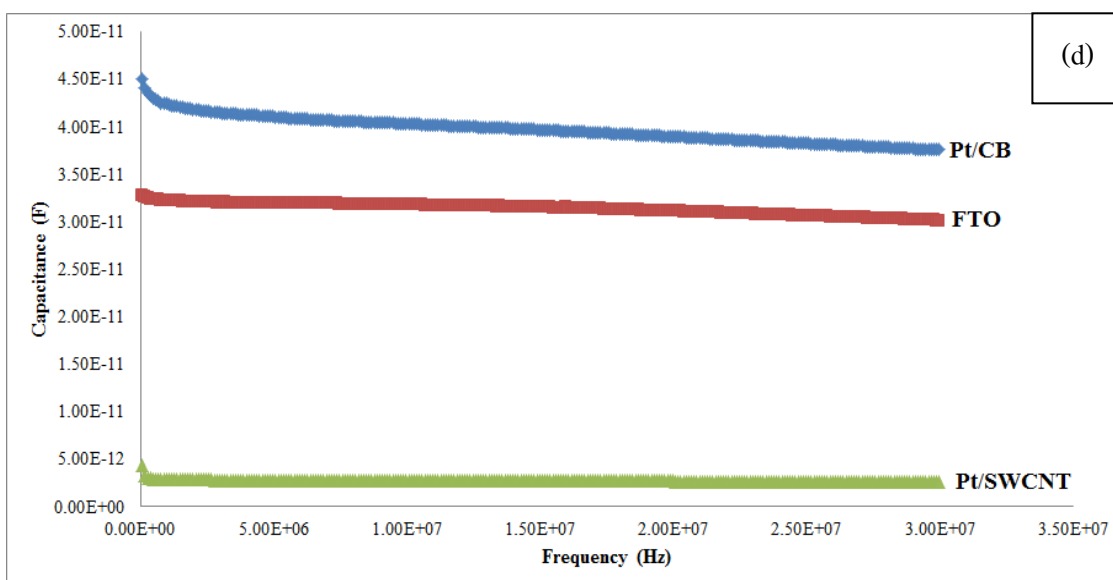
รูปที่ 3.17 แสดงภาพผลการวิเคราะห์ค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, F) และค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance, Ω) ที่ผ่านช่วงความถี่ (75 KHz – 30 MHz) ของวัสดุผสม CB/Pt



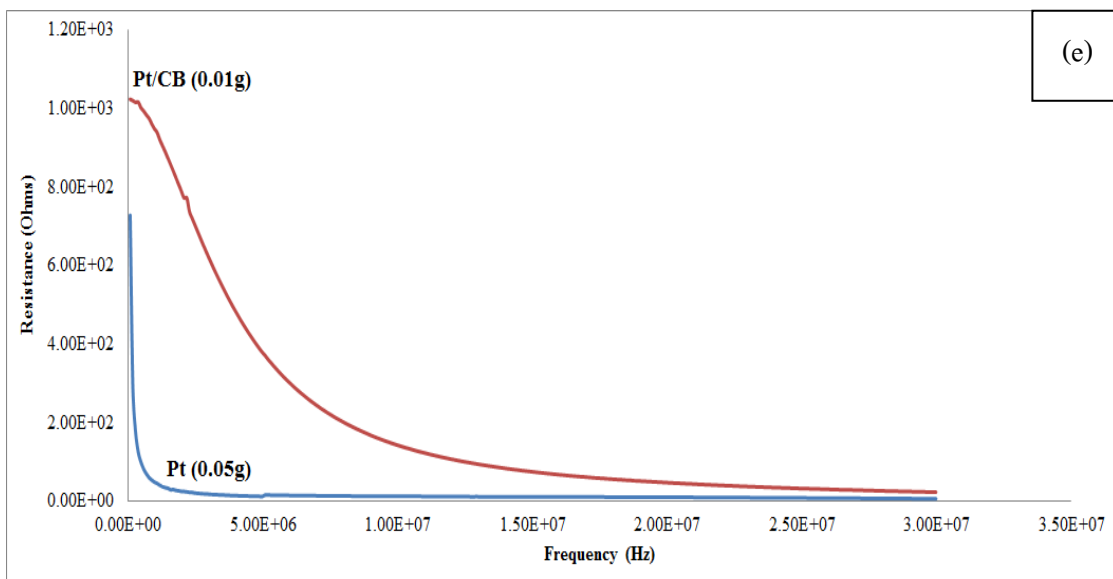
รูปที่ 3.17 (ต่อ) แสดงภาพ (b) เป็นผลการวิเคราะห์ค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, F) และค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance, Ω) ที่ผ่านช่วงความถี่ (75 KHz – 30 MHz) ของวัสดุผสม CB/Pt ที่ทำการเปรียบเทียบกับ Pt compound ที่มากที่สุด ที่ผ่านการเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) เรียบร้อยแล้ว



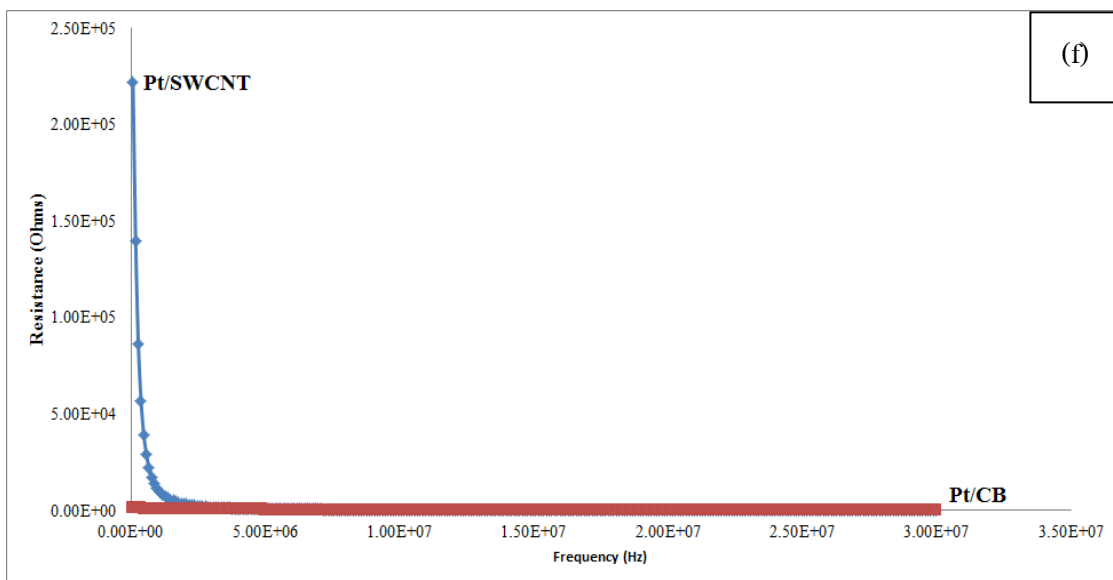
รูปที่ 3.17 (ต่อ) แสดงภาพ (c) เป็นผลการวิเคราะห์ค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, F) และค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance, Ω) ที่ผ่านช่วงความถี่ (75 KHz – 30 MHz) ของวัสดุผสม Pt compound ที่มากที่สุด เปรียบเทียบกับกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass)



รูปที่ 3.17 (ต่อ) แสดงภาพ (d) เป็นผลการวิเคราะห์ค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, F) และค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance, Ω) ที่ผ่านช่วงความถี่ (75 KHz – 30 MHz) ของวัสดุผสม CB/Pt ที่ทำการเปรียบเทียบกับ Pt compound ที่มากที่สุด และ ค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, F) และ ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance, Ω) ที่ผ่านช่วงความถี่ (75 KHz – 30 MHz) ของวัสดุผสม SWCNT/Pt ที่ผ่านการเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) เรียบร้อยแล้ว



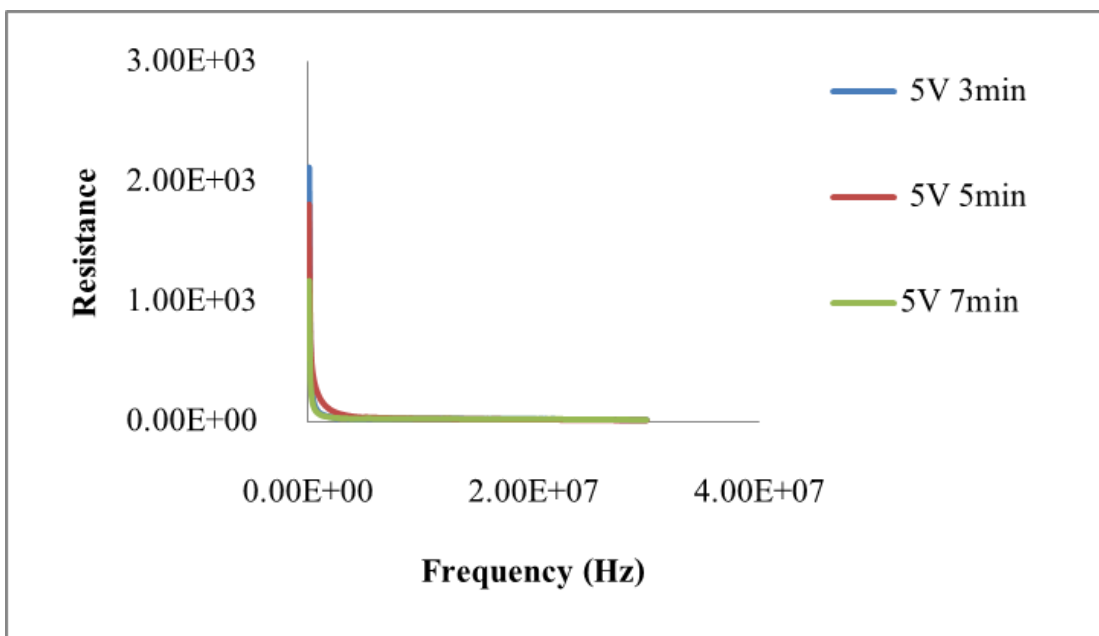
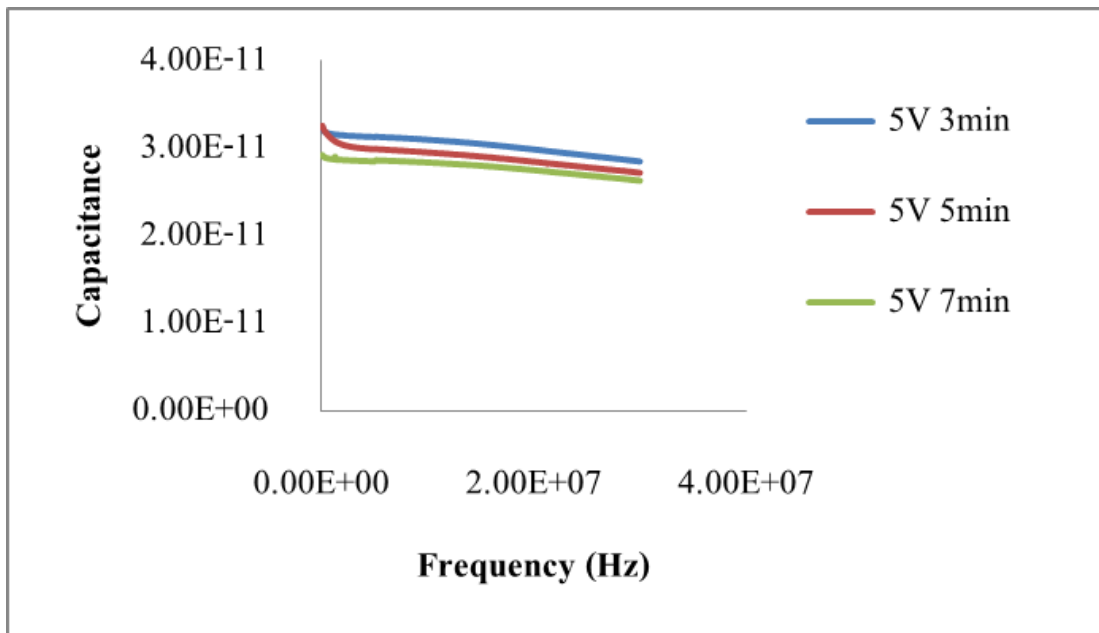
รูปที่ 3.17 (ต่อ) แสดงภาพ (e) เป็นผลการวิเคราะห์ค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, F) และค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance, Ω) ที่ผ่านช่วงความถี่ (75 KHz – 30 MHz) ของวัสดุผสม CB/Pt ที่ทำการเปรียบเทียบกับ Pt compound ที่มากที่สุด



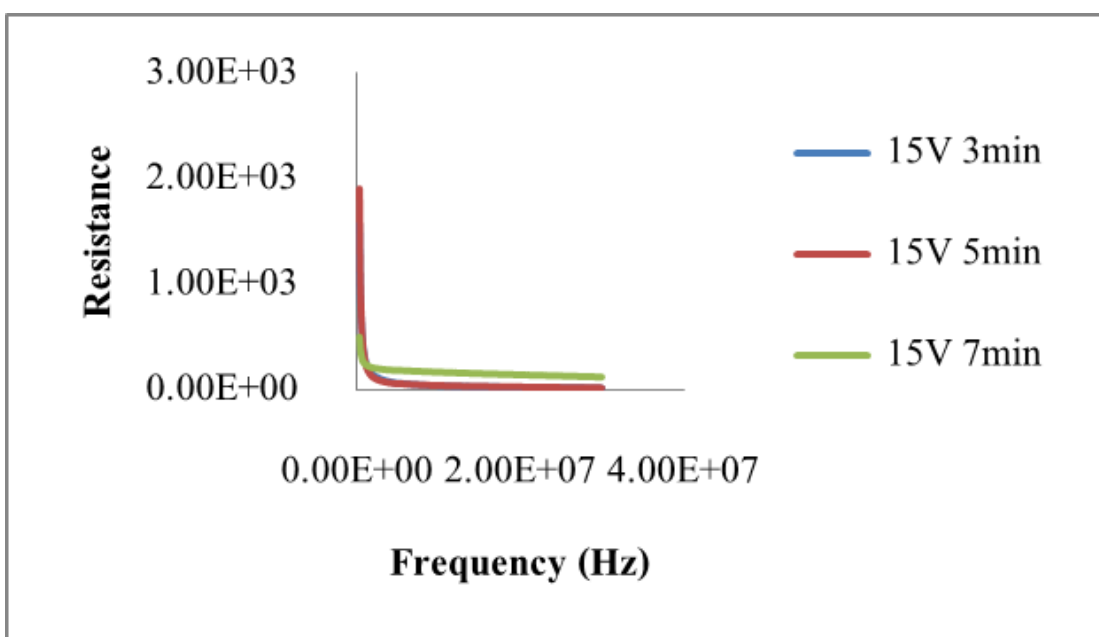
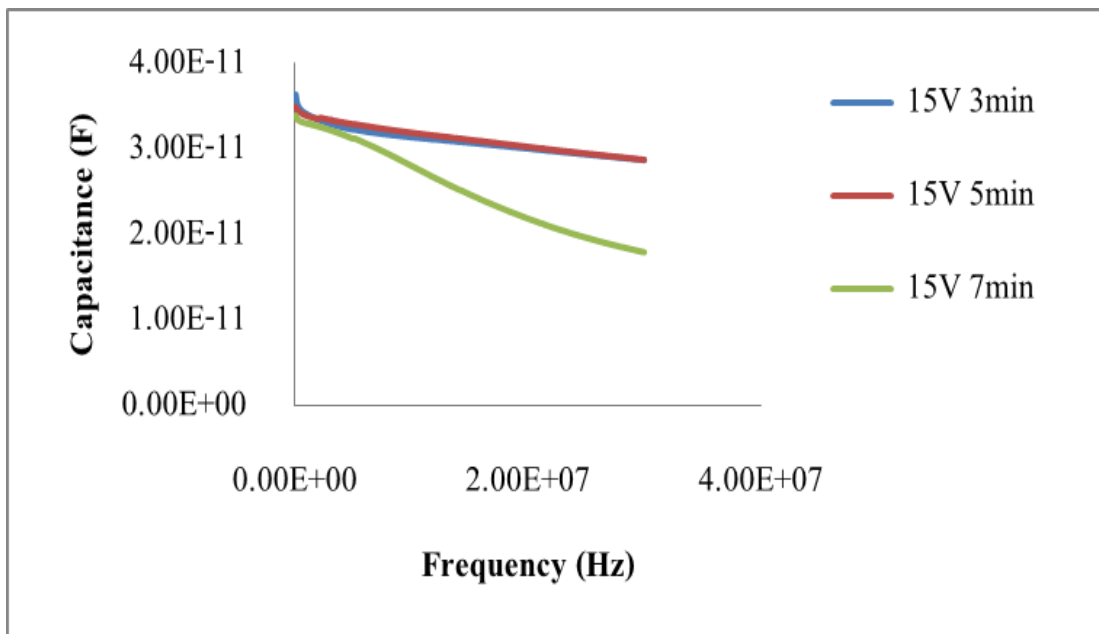
รูปที่ 3.17 (ต่อ) แสดงภาพ (f) เป็นการรวมของผลการวิเคราะห์ค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, F) และ ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance, Ω) ที่ผ่านช่วงความถี่ (75 KHz – 30 MHz) ของวัสดุผสม CB/Pt, SWCNT/Pt ที่ทำการเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) เรียบร้อยแล้ว

3.5.2 ในส่วนสุดท้ายเป็นผลการวิเคราะห์สมบัติการนำไฟฟ้าที่ถูกรวบรวมโดยค่าความเก็บประจุไฟฟ้ากับค่าความต้านทานไฟฟ้าของ CB/Pt และ SWCNT/Pt ที่แรงดันไฟฟ้า (ความต่างศักย์ไฟฟ้า) ที่แตกต่างกัน 5V, 15V และ 25V ที่เวลา 3, 5 และ 7 นาที ในกระบวนการ EPD โดยเริ่มต้นจาก CB/Pt ดังแสดงรูปที่ 3.18 - 3.20 ต่อมา SWCNT/Pt ดังแสดงรูปที่ 3.21 - 3.23 และในส่วน Pt compound ที่จะนำมาทำการวิเคราะห์ คือ 5V, 15V และ 25V ที่เวลา 7 นาที ดังแสดงรูปที่ 3.24 ซึ่งได้ทำการทดลองเงื่อนไขที่มากที่สุด เพื่อนำมาเป็นตัวมาตรฐานเปรียบเทียบกับวัสดุผสม CB/Pt และ SWCNT/Pt ที่ได้สังเคราะห์ขึ้นมา ดังแสดงรูปที่ 3.25 - 3.27 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเก็บประจุไฟฟ้าจากวัสดุผสมทั้ง 3 ชนิด ซึ่งจากรูปที่แสดงสมบัติทางไฟฟ้าทั้งหมดนั้น พบว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นกับเวลาที่ใช้นานขึ้นทำให้ค่าความเก็บประจุทางไฟฟ้านั้นดีแต่จะมีค่าลดลงเมื่อค่าความถี่นั้นมีค่าสูงขึ้น ต่อมาในส่วนของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าพบว่าเป็นค่าการแปรผันโดยตรงกับค่าการเก็บประจุไฟฟ้า กล่าวคือ ยิ่งค่าความเก็บประจุมากส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้านั้นมีค่ามาก และในส่วนของ Pt compound นั้นก็มีค่าเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามค่าความเก็บประจุไฟฟ้าและค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุผสมของ CB/Pt และ SWCNT/Pt ซึ่งให้เห็นว่าสามารถนำไปประยุกต์ในส่วนขั้วแคโทดหรือแอโนดสำหรับใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสงได้ นอกจากนี้ในส่วนวัสดุผสมของ CB/Pt โดยผลการวิเคราะห์ทาง TEM นั้นคล้ายกับงานวิจัยของ (Pinjiang Li , 2009) ซึ่งพบว่า มี Pt ฝังประและกระจายตัวผสมอยู่ Carbon black ด้วยเช่นกัน

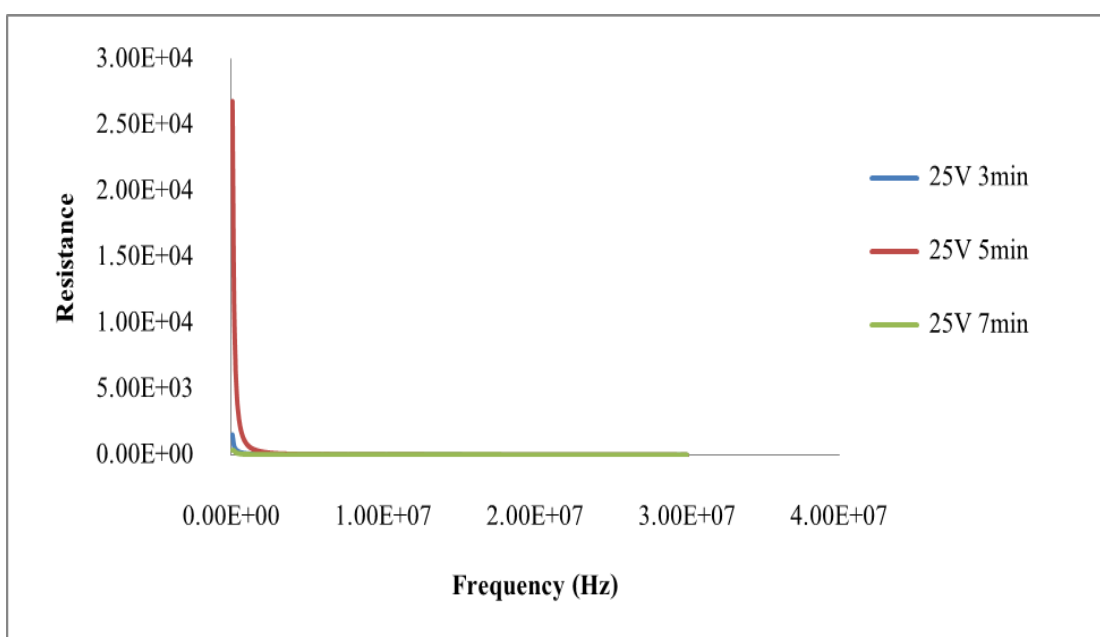
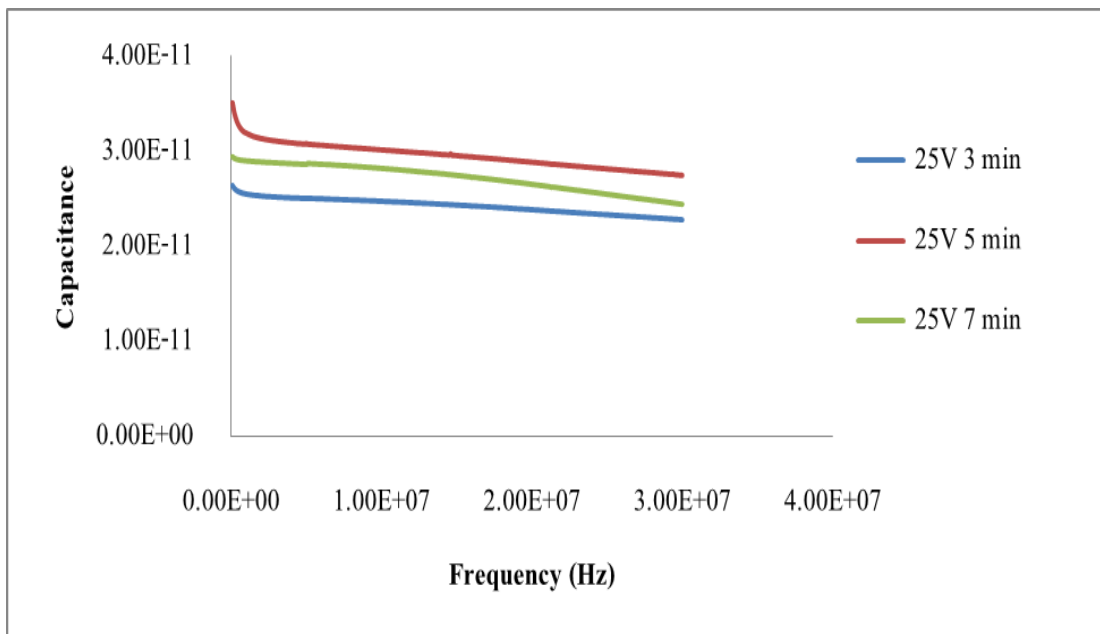
จากรูปที่ 3.18 – 3.20 เป็นผลการทดสอบค่าความเก็บประจุไฟฟ้าและค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุผสม CB/Pt ที่สภาวะต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 3.18 แสดงภาพผลการวิเคราะห์ค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, F) และค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance, Ω) ที่ผ่านช่วงความถี่ (75 KHz – 30 MHz) ของ CB/Pt ที่ 5V เวลา 3 5 และ 7 นาที ซึ่งผ่านการเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ในกระบวนการ EPD เรียบร้อยแล้ว

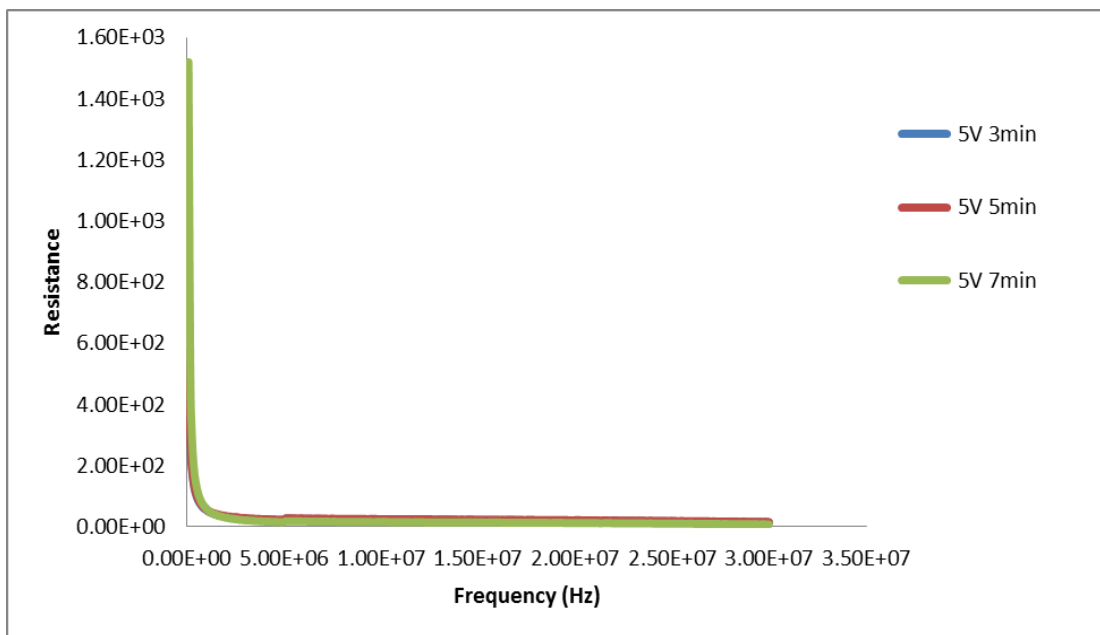
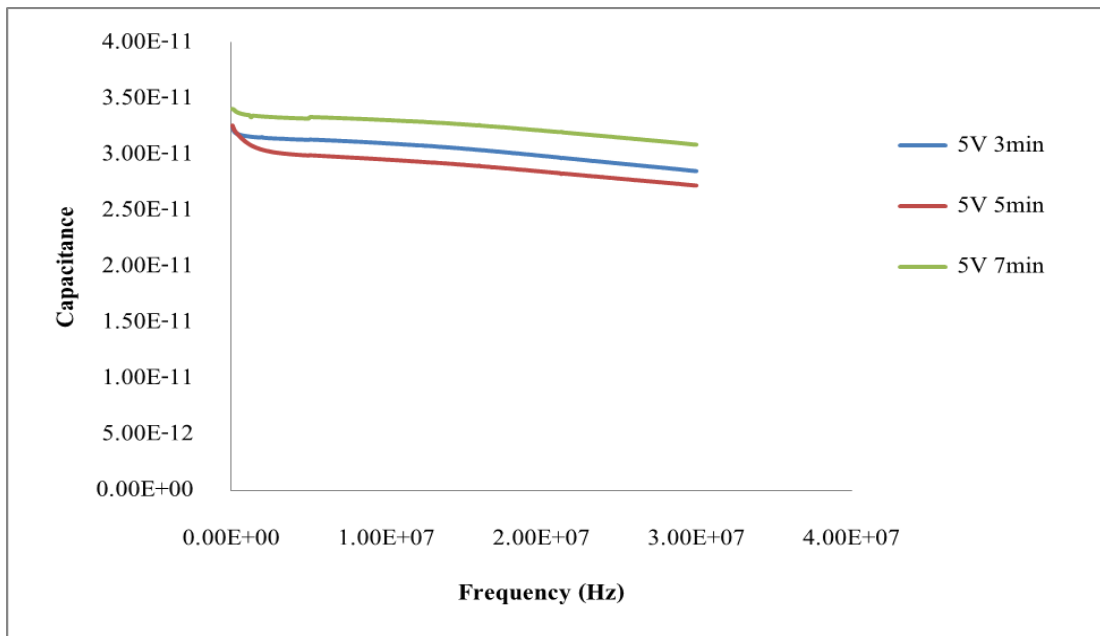


รูปที่ 3.19 แสดงภาพผลการวิเคราะห์ค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, F) และค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance, Ω) ที่ผ่านช่วงความถี่ (75 KHz – 30 MHz) ของ CB/Pt ที่ 15V เวลา 3 5 และ 7 นาที ซึ่งถูกทำการเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ในกระบวนการ EPD เรียบร้อยแล้ว

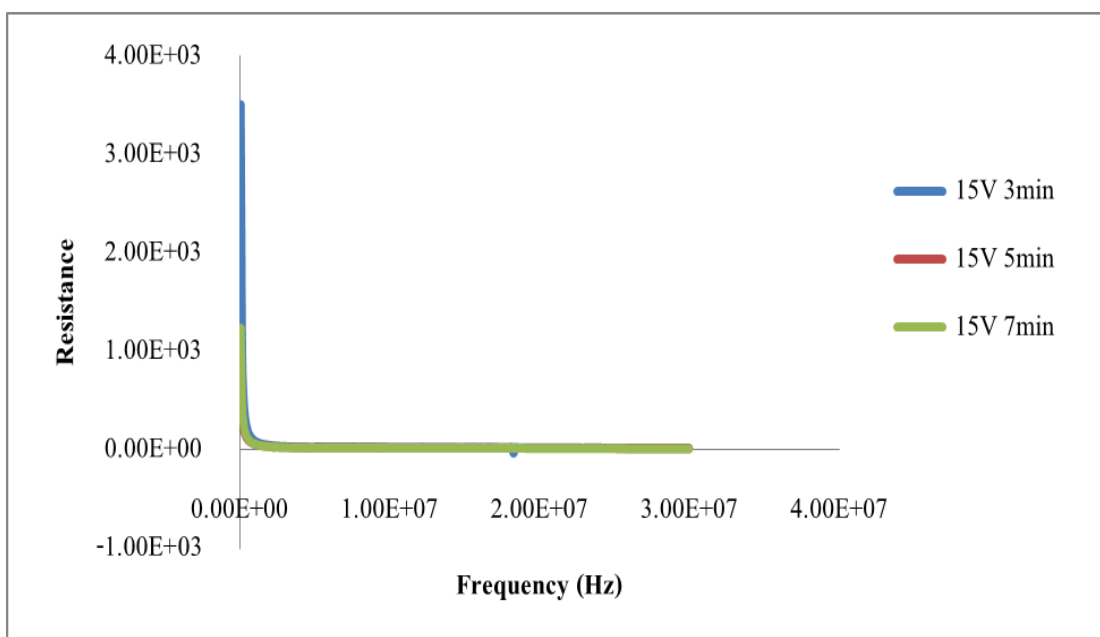
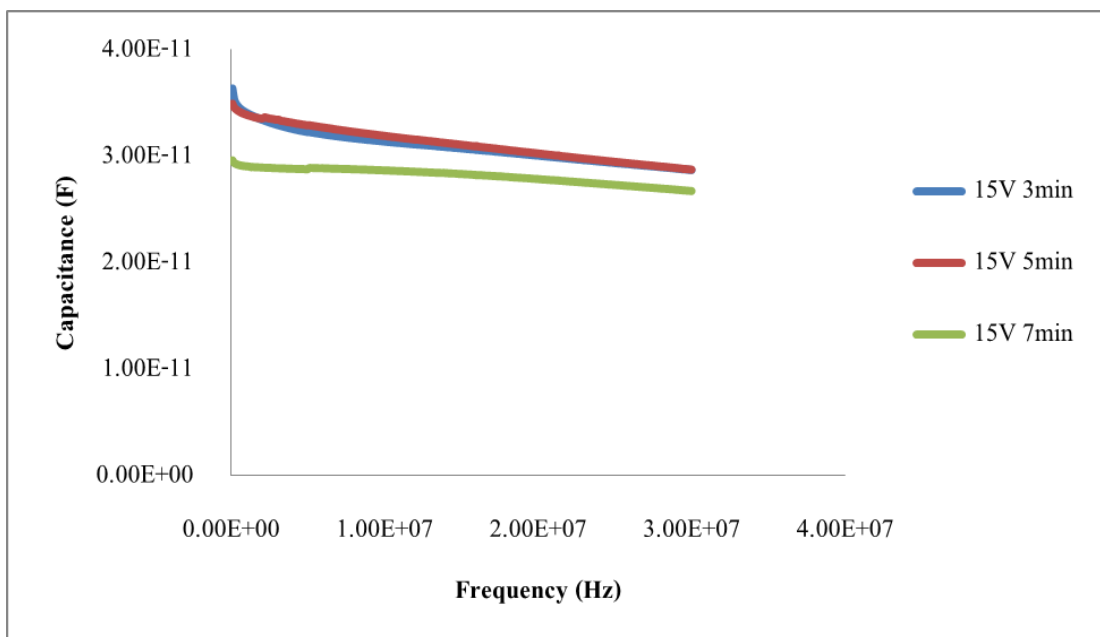


รูปที่ 3.20 แสดงภาพผลการวิเคราะห์ค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, F) และค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance, Ω) ที่ผ่านช่วงความถี่ (75 KHz – 30 MHz) ของ CB/Pt ที่ 25V เวลา 3 5 และ 7 นาที ซึ่งถูกทำการเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ในกระบวนการ EPD เรียบร้อยแล้ว

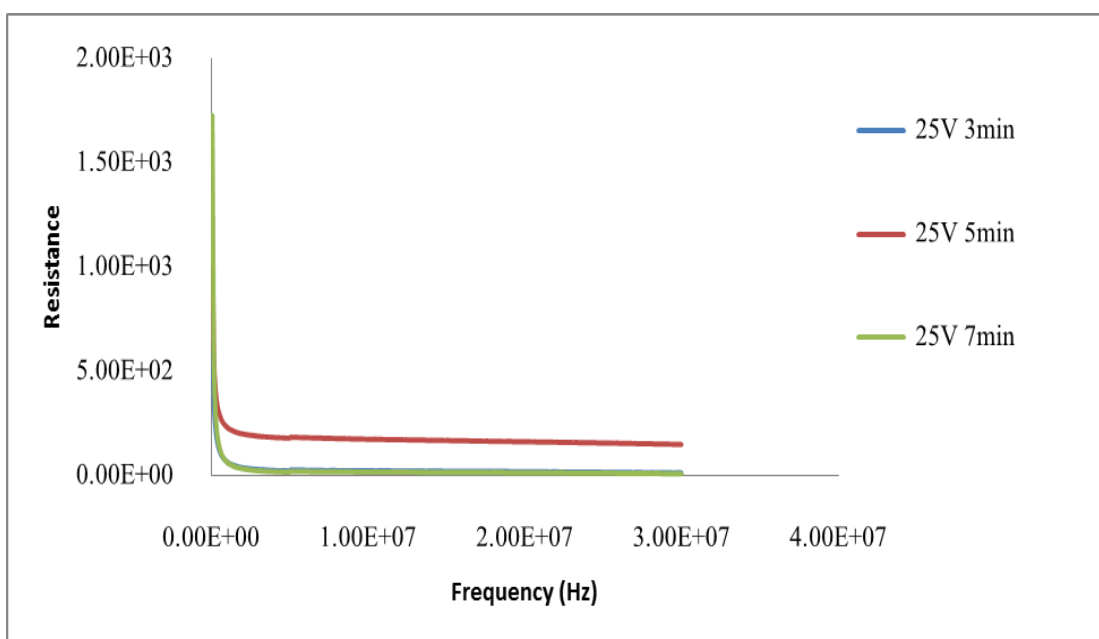
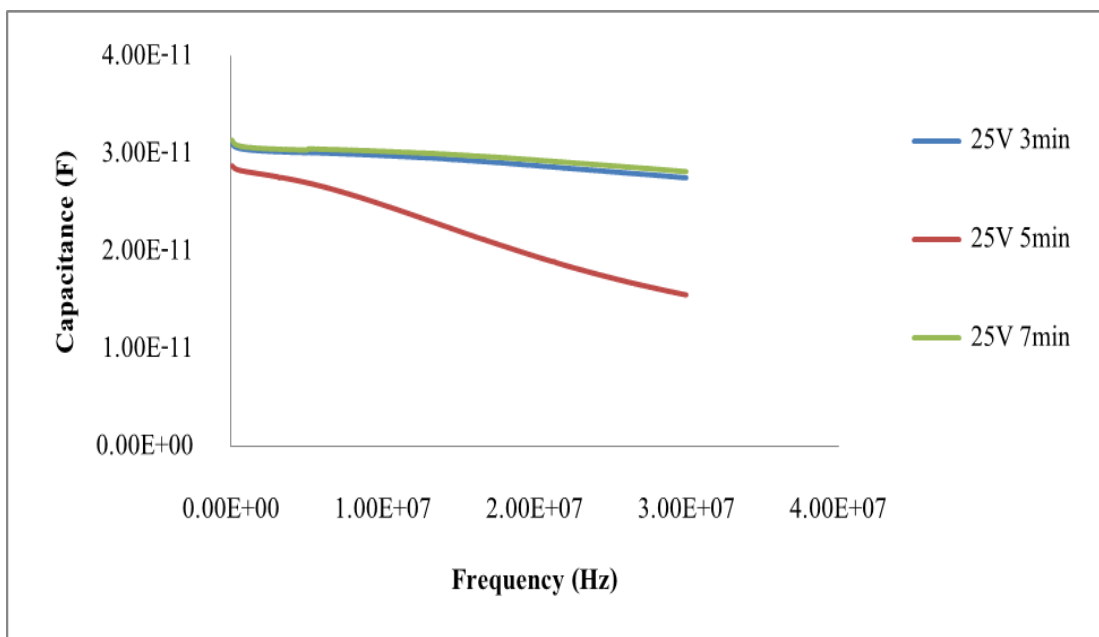
จากรูปที่ 3.21 – 3.23 เป็นผลการทดสอบค่าความเก็บประจุไฟฟ้าและค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุผสม SWCNT/Pt ที่สภาวะต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 3.21 แสดงภาพผลการวิเคราะห์ค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, F) และ ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance, Ω) ที่ผ่านช่วงความถี่ (75 KHz – 30 MHz) ของ SWCNT/Pt ที่ 5V เวลา 3 5 และ 7 นาที ซึ่งถูกทำการเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ในกระบวนการ EPD เรียบร้อยแล้ว

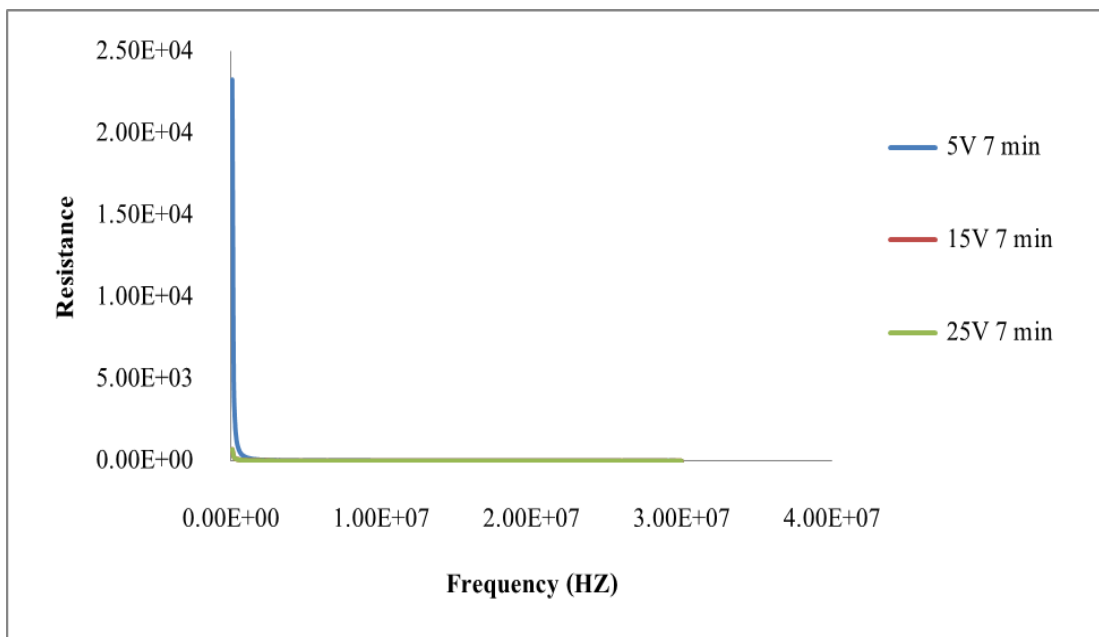
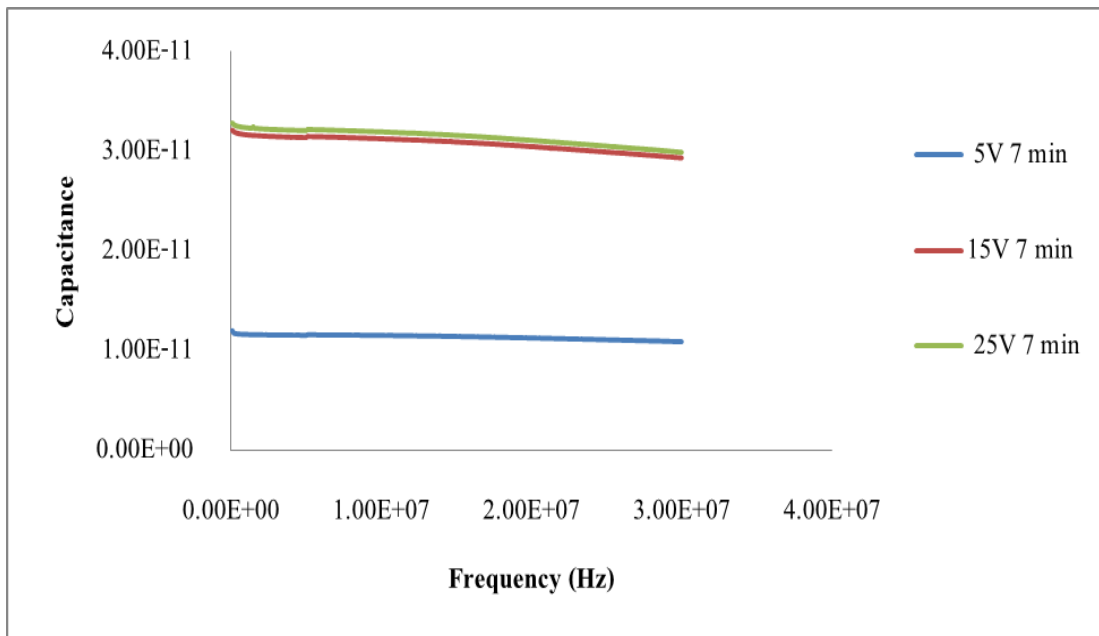


รูปที่ 3.22 แสดงภาพผลการวิเคราะห์ค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, F) และ ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance, Ω) ที่ผ่านช่วงความถี่ (75 KHz – 30 MHz) ของ SWCNT/Pt ที่ 15V เวลา 3 5 และ 7 นาที ซึ่งถูกทำการเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ในกระบวนการ EPD เรียบร้อยแล้ว



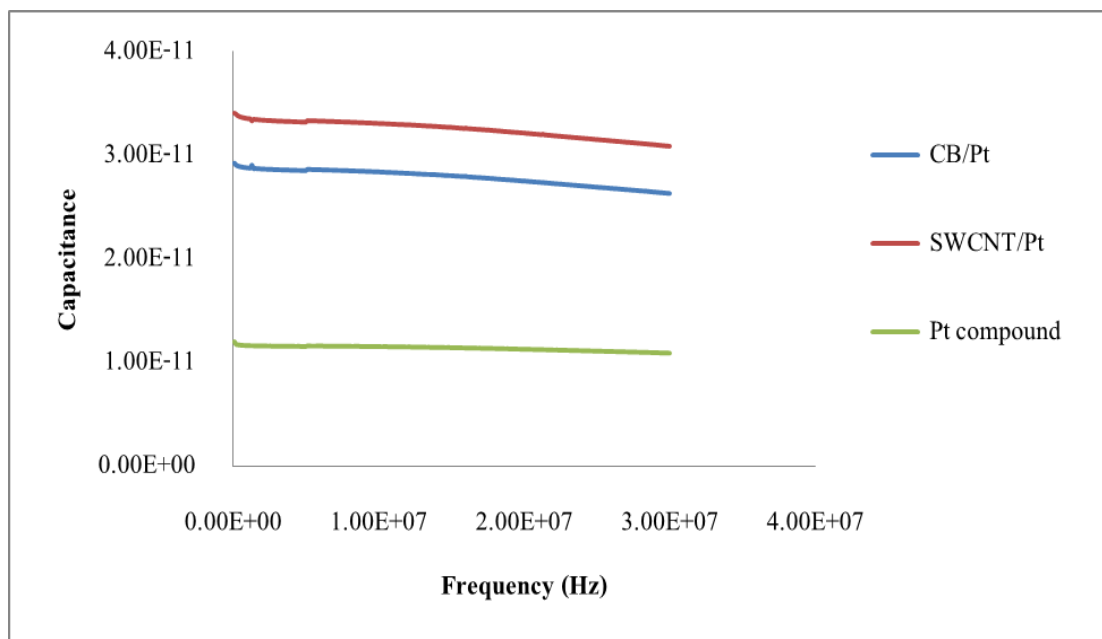
รูปที่ 3.23 แสดงภาพผลการวิเคราะห์ค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, F) และ ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance, Ω) ที่ผ่านช่วงความถี่ (75 KHz – 30 MHz) ของ SWCNT/Pt ที่ 25V เวลา 3 5 และ 7 นาที ซึ่งถูกทำการเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ในกระบวนการ EPD เรียบร้อยแล้ว

จากรูปที่ 3.24 ผลการทดสอบค่าความเก็บประจุไฟฟ้าและค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุผสม Pt compound ที่สภาวะต่างๆ ดังนี้

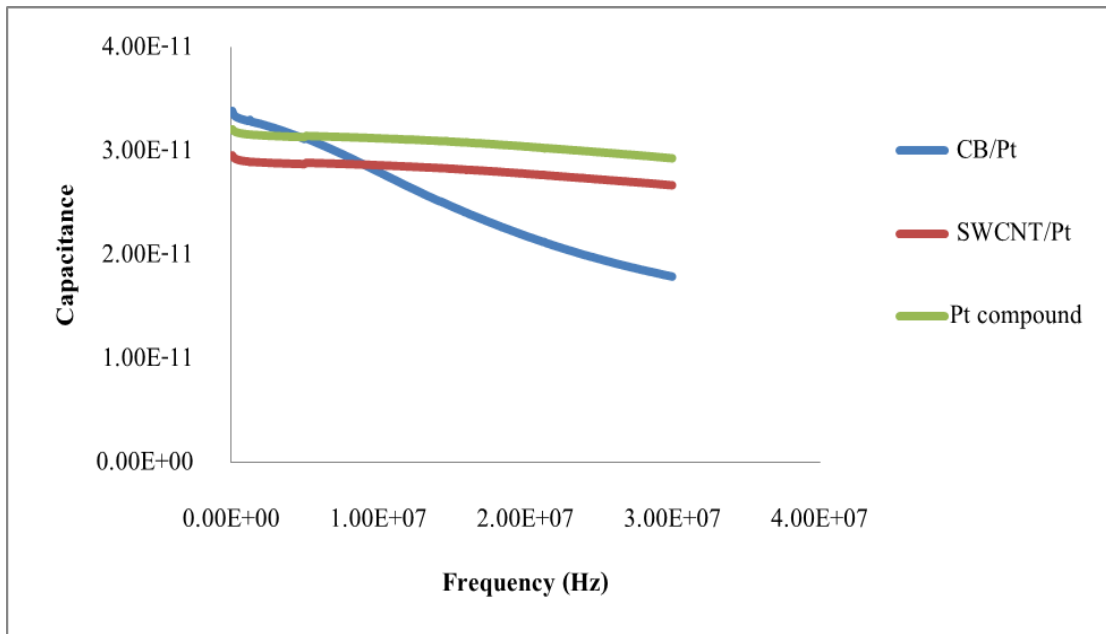


รูปที่ 3.24 แสดงภาพผลการวิเคราะห์ค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, F) และ ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance, Ω) ที่ผ่านช่วงความถี่ (75 KHz – 30 MHz) ของ Pt compound ที่ 5V 15V และ 25V เวลา 7 นาที ซึ่งถูกทำการเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ในกระบวนการ EPD เรียบร้อยแล้ว

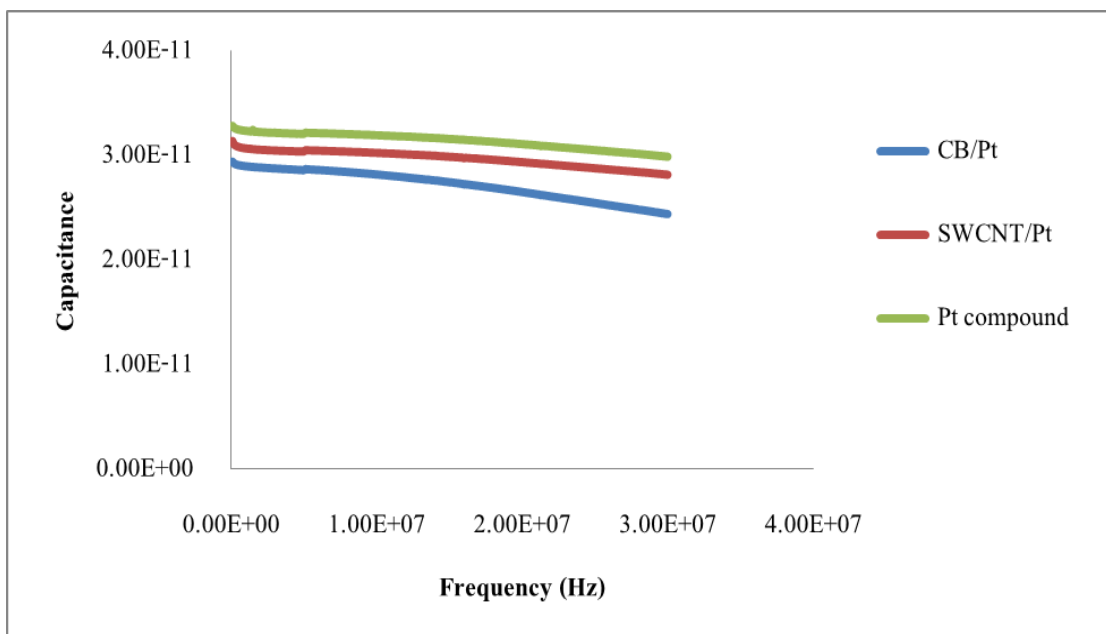
จากรูปที่ 3.25 – 3.27 เป็นผลการทดสอบค่าความเก็บประจุไฟฟ้าและค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุผสม CB/Pt, SWCNT/Pt มาทำการเปรียบเทียบกับ Pt compound ที่สภาวะต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 3.25 แสดงภาพการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, F) ที่ผ่านช่วงความถี่ (75 KHz – 30 MHz) ของ CB/Pt SWCNT/Pt และ Pt compound ที่ 5V เวลา 7 นาที ซึ่งถูกทำการเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ในกระบวนการ EPD เรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 3.26 แสดงภาพการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, F) ที่ผ่านช่วงความถี่ (75 KHz – 30 MHz) ของ CB/Pt SWCNT/Pt และ Pt compound ที่ 15V เวลา 7 นาที ซึ่งถูกทำการเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ในกระบวนการ EPD เรียบร้อยแล้ว

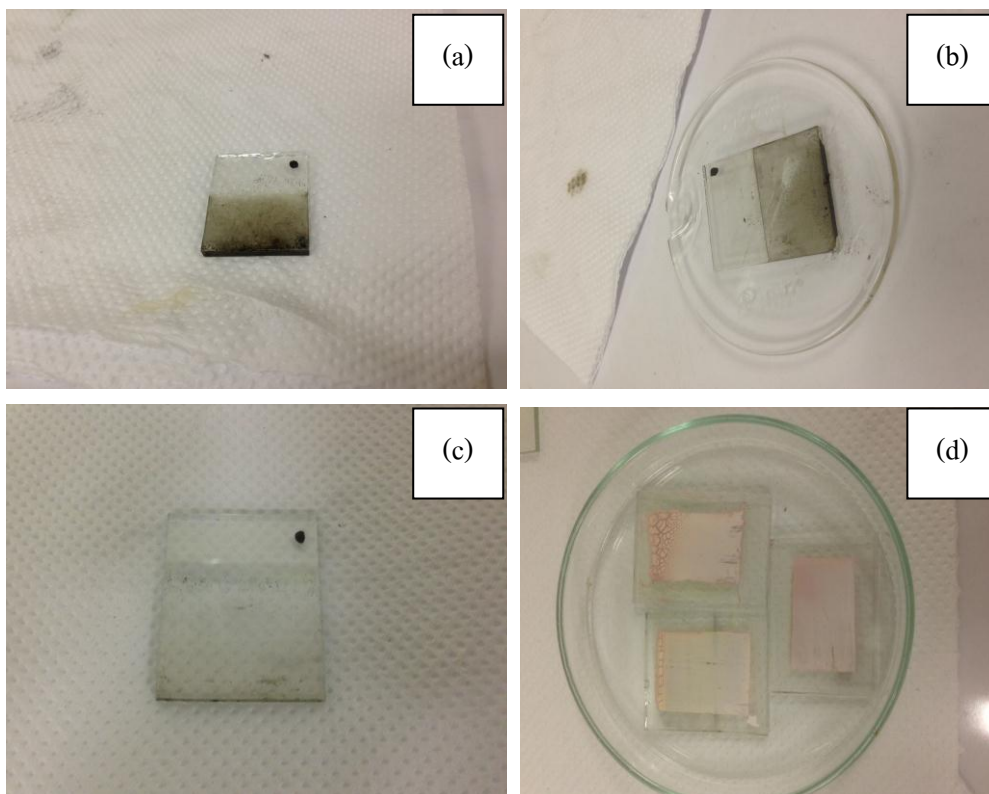


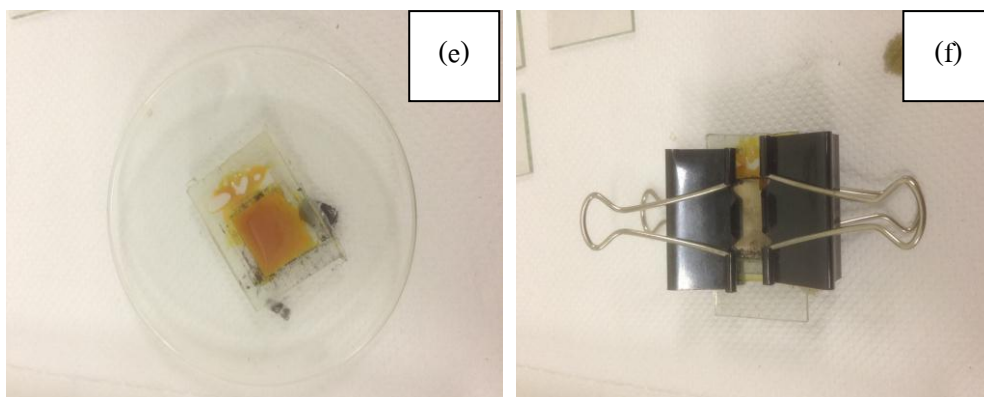
รูปที่ 3.27 แสดงภาพการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, F) ที่ผ่านช่วงความถี่ (75 KHz – 30 MHz) ของ CB/Pt SWCNT/Pt และ Pt compound ที่ 25V เวลา 7 นาที ซึ่งถูกทำการเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass) ในกระบวนการ EPD เรียบร้อยแล้ว

3.6 ผลการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสงและผลทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์

3.6.1 ภาพการเตรียมชิ้นงานเพื่อประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสง

นำชิ้นงานกระจกนำไฟฟ้า (FTO) ที่ถูกเคลือบด้วยวัสดุผสมของ CB/Pt, SWCNT/Pt และ Pt compound ที่ผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 30 นาที มาทำการประกอบเซลล์ในฝั่งขั้วแคโทด โดยเริ่มต้นจาก ขั้วแอโนดที่ใช้คือ TiO_2 ที่ผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการหยดสารย้อมสี N719 ลงบนกระจกเคลือบที่มี TiO_2 และปล่อยให้แห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำพาราฟิล์มมาปิดบนขั้วแคโทดและหยดสารอิเล็กโทรไลต์ลงบนขั้วแคโทดและทำการหนีบขั้วเซลล์ทั้งสองให้สนิทกันจากนั้นทำการวัดประสิทธิภาพ ดังแสดงรูปที่ 3.28





รูปที่ 3.28 แสดงภาพประกอบเซลล์เพื่อทำการตรวจวัดประสิทธิภาพของเซลล์ พบว่า (a) กระจกนำไฟฟ้า (FTO) ที่เคลือบสาร CB/Pt (b) กระจกนำไฟฟ้า (FTO) ที่เคลือบสาร SWCNT/Pt (c) กระจกนำไฟฟ้า (FTO) ที่เคลือบสาร Pt compound (d) กระจกนำไฟฟ้า (FTO) ที่เคลือบสาร TiO₂ และ N719 (e) กระจกนำไฟฟ้า (FTO) ที่เคลือบสาร SWCNT/Pt หรือ CB/Pt ที่มีสารอิเล็กโทรไลต์ผสมอยู่ และ (f) กระจกนำไฟฟ้า (FTO) ที่ประกอบเซลล์สมบูรณ์แล้ว

3.6.2 ตารางการแสดงผลทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

วัสดุผสมที่ใช้เคลือบกระจกนำไฟฟ้า FTO	V_{min} (mV)	V_{max} (mV)
CB/Pt	46	470
SWCNT/Pt	48	500
Pt compound	50	510

ตารางที่ 3.1 แสดงการวัดค่าประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสง

จากค่าในตารางที่ 3.1 พบว่า Pt compound นั้นแสดงประสิทธิภาพได้สูงสุด เนื่องจากสถานะเงื่อนไขที่ทำการทดลอง คือ 25V 7 นาที ซึ่งเป็นข้อพิสูจน์ยืนยันตรงกับผลของค่าความเก็บประจุไฟฟ้านั้นเอง ในส่วนของกระแสไฟฟ้า (A) ที่ออกมาเป็นค่าประสิทธิภาพนั้นไม่สามารถทำการวัดได้ เนื่องจาก ชี้นงานที่นำมาวัดนั้นมีขนาดเล็กและพื้นที่การวัดไม่เพียงพอประกอบกับเครื่องมือวัดนั้นมีประสิทธิภาพสูงเหมาะแก่การวัดชี้นงานที่มีขนาดใหญ่มากกว่า

บทที่ 4

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผล

4.1.1 จากการทดลองในงานวิจัยนี้ สามารถสังเคราะห์วัสดุผสมเชิงประกอบ Carbon Black/Platinum (CB/Pt) และ Single Wall Carbon Nanotube/Platinum (SWCNT/Pt) เกิดขึ้นได้จากสองระบบ และผ่านการเคลือบผิวลงบนกระจกนำไฟฟ้าด้วยเทคนิคสองวิธี คือ Doctor Blade และ Electrophoretic Deposition (EPD)

ระบบที่ 1 : Carbon Black (CB) + Tetraamineplatinum chloride hydrate ($\text{Pt}(\text{NH}_3)_4\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) หรือ Pt compound + Doctor Blade

ระบบที่ 1.1 : Carbon Black (CB) + Tetraamineplatinum chloride hydrate ($\text{Pt}(\text{NH}_3)_4\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) หรือ Pt compound + Electrophoretic Deposition (EPD)

ระบบที่ 2 : Single Wall Carbon Nanotube (SWCNT) + Tetraamineplatinum chloride hydrate ($\text{Pt}(\text{NH}_3)_4\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) หรือ Pt compound + Doctor Blade

ระบบที่ 2.1 : Single Wall Carbon Nanotube (SWCNT) + Tetraamineplatinum chloride hydrate ($\text{Pt}(\text{NH}_3)_4\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) หรือ Pt compound + Electrophoretic Deposition (EPD)

4.1.2 ขนาดอนุภาคของ CB/Pt ในระบบที่ 1 พบว่า มีขนาดเล็กและค่อนข้างกลมจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์จากภาพถ่ายจะมีขนาดอนุภาคประมาณ 300-350 นาโนเมตร และเมื่อทำการเคลือบลงบนผิวกระจกนำไฟฟ้าด้วยเทคนิค Doctor Blade นี้พบว่าอนุภาคมีขนาดเล็กกลมจับตัวกันแน่นขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงประมาณ 300-500 นาโนเมตร ในส่วนของระบบที่ 1.1 วิธี EPD พบว่า ที่แรงดันไฟฟ้า 25V เป็นเวลา 7 นาที ทำให้ได้ขนาดอนุภาคค่อนข้างกลมใหญ่จับตัวกันอย่างหนาแน่นและขนาดของฟิล์มที่ได้มีความหนาที่สุด เพราะแรงดันไฟฟ้ามากสุดกับเวลาที่นานสุด ทำให้ฟิล์มที่ได้หนาสุดเนื่องจากเกิดการพอกของอนุภาคที่เพิ่มมากขึ้น ระบบที่ 2 และ 2.1 พบว่า SWCNT/Pt มีลักษณะเป็นเส้นใยในระดับนาโนและมี Pt เข้าไปแทรกฝังปะปนอยู่ภายใน SWCNT นี้

4.1.3 การก่อรูปของเฟสของ CB/Pt พบว่า ผง Pt compound ที่เกิดการสังเคราะห์เกิดธาตุ Pt นั้น ปรากฏอยู่ในเฟสที่ 39.9° 46.1° 67.5° และ 81.1° รวมถึงใน SWCNT/Pt จะพบเฟสของ Pt compound เช่นเดียวกัน

4.1.4 องค์ประกอบของธาตุใน CB/Pt พบว่าใน CB มีธาตุ C O S และใน CB/Pt ก็จะมี Pt เพิ่มเข้ามาในระบบด้วย ต่อมาในส่วนของ SWCNT/Pt จะพบว่ามีธาตุในระบบดังนี้ C O S Cr Co Cu Si และ Pt ในส่วนสุดท้ายจะเป็นของ Pt compound พบว่ามีธาตุ Pt และ Cl เป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญอยู่ในระบบอีกด้วย

4.1.5 ผลการวิเคราะห์ทางสมบัติการนำไฟฟ้าในกระบวนการ EPD นี้พบว่า เมื่อแรงดันไฟฟ้า (ความต่างศักย์ไฟฟ้า) เพิ่มมากขึ้นและเมื่อใช้เวลานานขึ้นทำให้เกิดการเก็บประจุทางไฟฟ้าสูงขึ้น ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าก็สูงขึ้นตามลำดับ และจะมีค่าลดลงเมื่อความถี่มีค่าเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อถ้าใช้แรงดันไฟฟ้าที่มากที่สุดกับเวลาที่นานที่สุดก็จะทำให้วัสดุผสมที่ทำการเคลือบผิวนั้นได้ฟิล์มที่มีความหนามากที่สุด (Thick film) ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อค่าการเก็บประจุไฟฟ้าและความต้านทานทางไฟฟ้า นอกจากนี้สมบัติการนำไฟฟ้าของ CB/Pt และ SWCNT/Pt แสดงถึงศักยภาพที่สามารถช่วยลดต้นทุนของขั้วแคโทดรีดิวซ์โครมในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดขั้วสัมผัสไวแสงได้

4.1.6 ผลการประกอบและวัดประสิทธิภาพของเซลล์พบว่า Pt compound นั้นให้ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด และในส่วนของค่ากระแสไฟฟ้า (A) นั้นไม่สามารถวัดได้ เนื่องจาก ชี้นงานมีขนาดเล็กเกินไป

4.2 ข้อเสนอแนะ

4.2.1 ปริมาณของเฟสต่างๆ ที่ก่อรูปขึ้นในวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้นั้นอาจมีความคลาดเคลื่อน ดังนั้นเพื่อทำให้เกิดความเป็นไปได้ในการสังเคราะห์ให้ได้สัดส่วนที่ถูกต้องและมีความใกล้เคียงกันดังกล่าว การคำนวณปริมาณสารสัมพันธ์ของสารตั้งต้นแต่ละชนิด จึงเป็นปัจจัยที่ต้องมีความละเอียดรอบคอบ

4.2.2 ในช่วงของการทำการทดลองของ EPD นั้นจะต้องทำการทดลองตามสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม เช่น ไม่ถูกตัดหรือปรับปรุงระบบไฟฟ้า ในช่วงแถบนั้นไม่มีการก่อสร้างเจาะพื้นอาคารใดๆทั้งสิ้น เพราะ เกิดการสั่นสะเทือนทำให้อัตราการไหลของกระแสไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ทำให้การทดลองเกิดความผิดพลาดขึ้นด้วย

4.2.3 ในกระบวนการอบและกระบวนการเผาอาจเกิดการปนเปื้อนได้ง่าย อันเนื่องจากเตาเผาและเตาที่ใช้อบนั้นมีจำนวนเครื่องน้อยกว่าจำนวนนักวิจัย ซึ่งเป็นข้อระมัดระวังอย่างยิ่งที่อาจจะได้สารที่เราไม่ต้องการอยู่ในระบบด้วย

4.2.4 ในการวัดประสิทธิภาพของเซลล์ควรนำกระแสจกนำไฟฟ้าทำการเคลือบสารทั้งแผ่นใหญ่หรือถ้าทำแผ่นใหญ่ไม่ได้ก็ทำแผ่นเล็กๆแล้วนำมาต่ออนุกรมกันก็ได้

บรรณานุกรม

- [1] วินิช พรหมอารักษ์, ทวีศักดิ์ สุดยอดสุข, สายันต์ แสงสุวรรณ และ ทินกร แก้วอินทร์. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง, คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- [2] O'Regan, B., and Graetzel, M. (1991), "A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye sensitized colloidal TiO₂ films", *Nature* 353 (6346), 737-740.
- [3] Li, B., Wang, L., Kang, B., Wang, P., and Qiu, Y. (2006), "Review of recent progress in solid-state dye-sensitized solar cells", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 90, 549–573.
- [4] <http://dyesolarcells-kku.blogspot.com> Retrieved on December 24, 2009
- [5] Nazeeruddin, Md.K., Pechy, P., and Graetzel, M. (1997), "Efficient panchromatic sensitization of nanocrystalline TiO₂ films by a black dye based on atrithiocyanato-ruthenium complex", *Chem Comm*, (18), 1705-1706.
- [6] Nazeeruddin, Md.K., Splivallo, R., Liska, P., Comte, P., and Graetzel, M. (2003), "A Swift Dye Uptake Procedure for Dye Sensitized Solar Cells", *Chem Comm*, 9 (12), 1456-1457.
- [7] Cherepy, N.J., Smestad, G.P., Graetzel, M., and Zhang, J.Z. (1997), "J. Ultrafast Electron Injection: Implications for a Photoelectrochemical Cell Utilizing an Anthocyanin Dye-Sensitized TiO₂ Nanocrystalline Electrode", *Phys Chem B*, 101 (45), 9342-9351.
- [8] Kay, A. and Gratzel, M. (1993), "Artificial photosynthesis. 1. Photosensitization of titania solar cells with chlorophyll derivatives and related natural porphyrins", *J. Phys .Chem.* 97, 6272-6277.
- [9] Boschloo, G. K. and Goossens, A. (1996), "Electron Trapping in Porphyrin-Sensitized Porous Nanocrystalline TiO₂ Electrodes", *J. Phys .Chem.* 100, 19489-19494.

- [10] Cherian, S. and Wamser, C. C. (2000), “Adsorption and Photoactivity of Tetra (4-carboxyphenyl) porphyrin (TCPP) on Nanoparticulate TiO₂”, *J. Phys. Chem. B.* 104, 3624-3629.
- [11] Campbell, W.M., Burrell, A.K., Officer, D.L., Jolley, K.W. (2004), “Porphyrins as light Harvesters in the Dye-Sensitized TiO₂ Solar Cell”, *Coordination Chemistry Reviews* 248 (13-14), 1363-1379.
- [12] Law, M., Greene, L., Johnson, J. C., Saykally, R. and Yang, P. (2005), “Nanowire dye-sensitized solar cells”, *Nature Materials*, 4, 455 – 459.
- [13] Baxter, J. B., and Aydil, E. S. (2006), “Dye-sensitized solar cells based on semiconductor morphologies with ZnO nanowires”, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 90, 607–622.
- [14] <http://www.lookchem.com> Retrieved on December 24, 2009
- [15] <http://www.wikipedia.org> Retrieved on December 24, 2009
- [16] Lee, J. W., Ramasamy, E., Lee, Y. D., and Song, S. J. (2009), “Efficient Dye-Sensitized Solar Cells with Catalytic Multiwall Carbon Nanotube Counter Electrodes”, Korea Electrotechnology Research Institute, Changwon 641-120, *American Chemical Society*, 1145-1149.
- [17] Huang, Z., Liu, X., Li, K., Li, D., Luo, Y., Li, H., Song, W., Chen, Q. Li., and Meng, Q. (2007), “Application of carbon materials as counter electrodes of dye-sensitized solar cells”, *Electrochemistry Communications* 9, 596–598.
- [18] Li, P., Wu, J., Lin, J., Huang, M., Huang, Y., and Li, Q. (2009), “High-performance and low platinum loading Pt/Carbon black counter electrode for dye-sensitized solar cells”, *Solar Energy* 83, 845–849.
- [19] Wu, J., Li, P., Lin, J., Huang, M., Lan, Z., and Li, Q. (2008), “Improvement of performance of dye-sensitized solar cells based on electrodeposited-platinum counter electrode”, *Electrochimica Acta* 53, 4161–4166.

[20] Yoon, H. C., R. Vittal, Lee, J., Chae, S. W., and Kim, J. K. (2008), “Enhanced performance of a dye-sensitized solar cell with an electrodeposited-platinum counter electrode”, *Electrochimica Acta* 53, 2890–2896.

[21] Zhitomirsky, M. (1997), “Electrophoretic and electrolytic deposition of ceramic coating on carbon fibers”, *Journal of European ceramic society*, 849-856.

ภาคผนวก

ข้อมูลดิบจากการวัดค่าความเก็บประจุไฟฟ้าของชิ้นงานตัวอย่าง

กระบวนการ EPD ที่ 5V เวลา 7 นาที

Frquency (Hz)	CB/Pt	SWCNT/Pt	Pt compound
7.50E+04	2.93E-11	3.41E-11	1.20E-11
1.75E+05	2.91E-11	3.40E-11	1.18E-11
2.75E+05	2.90E-11	3.39E-11	1.17E-11
3.75E+05	2.89E-11	3.38E-11	1.17E-11
4.75E+05	2.89E-11	3.37E-11	1.17E-11
5.75E+05	2.89E-11	3.37E-11	1.17E-11
6.75E+05	2.89E-11	3.36E-11	1.17E-11
7.75E+05	2.88E-11	3.36E-11	1.16E-11
8.75E+05	2.88E-11	3.36E-11	1.16E-11
9.75E+05	2.88E-11	3.36E-11	1.16E-11
1.08E+06	2.88E-11	3.35E-11	1.16E-11
1.18E+06	2.88E-11	3.35E-11	1.16E-11
1.28E+06	2.91E-11	3.33E-11	1.16E-11
1.38E+06	2.87E-11	3.35E-11	1.16E-11
1.48E+06	2.87E-11	3.35E-11	1.16E-11
1.58E+06	2.87E-11	3.35E-11	1.16E-11
1.68E+06	2.87E-11	3.34E-11	1.16E-11
1.78E+06	2.87E-11	3.34E-11	1.16E-11
1.88E+06	2.87E-11	3.34E-11	1.16E-11
1.98E+06	2.87E-11	3.34E-11	1.16E-11
2.08E+06	2.87E-11	3.34E-11	1.16E-11
2.18E+06	2.87E-11	3.34E-11	1.16E-11

2.28E+06	2.87E-11	3.34E-11	1.16E-11
2.38E+06	2.87E-11	3.34E-11	1.16E-11
2.48E+06	2.87E-11	3.34E-11	1.16E-11
2.58E+06	2.86E-11	3.34E-11	1.16E-11
2.68E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
2.78E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
2.88E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
2.98E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
3.08E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
3.18E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
3.28E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
3.38E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
3.48E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
3.58E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
3.68E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
3.78E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
3.88E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
3.98E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
4.08E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
4.18E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
4.28E+06	2.86E-11	3.32E-11	1.16E-11
4.38E+06	2.86E-11	3.32E-11	1.16E-11
4.48E+06	2.86E-11	3.32E-11	1.16E-11
4.58E+06	2.86E-11	3.32E-11	1.16E-11
4.68E+06	2.85E-11	3.32E-11	1.16E-11
4.78E+06	2.85E-11	3.32E-11	1.16E-11

4.88E+06	2.85E-11	3.32E-11	1.16E-11
4.98E+06	2.85E-11	3.32E-11	1.16E-11
5.08E+06	2.87E-11	3.34E-11	1.16E-11
5.18E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
5.28E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
5.38E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
5.48E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
5.58E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
5.68E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
5.78E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
5.88E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
5.98E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
6.08E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
6.18E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
6.28E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
6.38E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
6.48E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
6.58E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
6.68E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
6.78E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
6.88E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
6.98E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
7.08E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
7.18E+06	2.86E-11	3.33E-11	1.16E-11
7.28E+06	2.86E-11	3.32E-11	1.16E-11
7.38E+06	2.85E-11	3.32E-11	1.16E-11

7.48E+06	2.85E-11	3.32E-11	1.16E-11
7.58E+06	2.85E-11	3.32E-11	1.16E-11
7.68E+06	2.85E-11	3.32E-11	1.16E-11
7.78E+06	2.85E-11	3.32E-11	1.16E-11
7.88E+06	2.85E-11	3.32E-11	1.16E-11
7.98E+06	2.85E-11	3.32E-11	1.16E-11
8.08E+06	2.85E-11	3.32E-11	1.16E-11
8.18E+06	2.85E-11	3.32E-11	1.16E-11
8.28E+06	2.85E-11	3.32E-11	1.16E-11
8.38E+06	2.85E-11	3.32E-11	1.16E-11
8.48E+06	2.85E-11	3.32E-11	1.16E-11
8.58E+06	2.85E-11	3.32E-11	1.16E-11
8.68E+06	2.85E-11	3.32E-11	1.16E-11
8.78E+06	2.85E-11	3.32E-11	1.16E-11
8.88E+06	2.85E-11	3.32E-11	1.16E-11
8.98E+06	2.85E-11	3.32E-11	1.16E-11
9.08E+06	2.85E-11	3.31E-11	1.15E-11
9.18E+06	2.85E-11	3.31E-11	1.15E-11
9.28E+06	2.84E-11	3.31E-11	1.15E-11
9.38E+06	2.84E-11	3.31E-11	1.15E-11
9.48E+06	2.84E-11	3.31E-11	1.15E-11
9.58E+06	2.84E-11	3.31E-11	1.15E-11
9.68E+06	2.84E-11	3.31E-11	1.15E-11
9.78E+06	2.84E-11	3.31E-11	1.15E-11
9.88E+06	2.84E-11	3.31E-11	1.15E-11
9.98E+06	2.84E-11	3.31E-11	1.15E-11

1.01E+07	2.84E-11	3.31E-11	1.15E-11
1.02E+07	2.84E-11	3.31E-11	1.15E-11
1.03E+07	2.84E-11	3.31E-11	1.15E-11
1.04E+07	2.84E-11	3.31E-11	1.15E-11
1.05E+07	2.84E-11	3.31E-11	1.15E-11
1.06E+07	2.84E-11	3.30E-11	1.15E-11
1.07E+07	2.84E-11	3.30E-11	1.15E-11
1.08E+07	2.84E-11	3.30E-11	1.15E-11
1.09E+07	2.83E-11	3.30E-11	1.15E-11
1.10E+07	2.83E-11	3.30E-11	1.15E-11
1.11E+07	2.83E-11	3.30E-11	1.15E-11
1.12E+07	2.83E-11	3.30E-11	1.15E-11
1.13E+07	2.83E-11	3.30E-11	1.15E-11
1.14E+07	2.83E-11	3.30E-11	1.15E-11
1.15E+07	2.83E-11	3.30E-11	1.15E-11
1.16E+07	2.83E-11	3.30E-11	1.15E-11
1.17E+07	2.83E-11	3.30E-11	1.15E-11
1.18E+07	2.83E-11	3.30E-11	1.15E-11
1.19E+07	2.83E-11	3.30E-11	1.15E-11
1.20E+07	2.83E-11	3.30E-11	1.15E-11
1.21E+07	2.83E-11	3.29E-11	1.15E-11
1.22E+07	2.83E-11	3.29E-11	1.15E-11
1.23E+07	2.83E-11	3.29E-11	1.15E-11
1.24E+07	2.82E-11	3.29E-11	1.15E-11
1.25E+07	2.82E-11	3.29E-11	1.15E-11
1.26E+07	2.82E-11	3.29E-11	1.15E-11

1.27E+07	2.82E-11	3.29E-11	1.15E-11
1.28E+07	2.82E-11	3.29E-11	1.15E-11
1.29E+07	2.82E-11	3.29E-11	1.15E-11
1.30E+07	2.82E-11	3.29E-11	1.15E-11
1.31E+07	2.82E-11	3.29E-11	1.15E-11
1.32E+07	2.82E-11	3.29E-11	1.15E-11
1.33E+07	2.82E-11	3.28E-11	1.15E-11
1.34E+07	2.82E-11	3.29E-11	1.15E-11
1.35E+07	2.82E-11	3.28E-11	1.15E-11
1.36E+07	2.82E-11	3.28E-11	1.15E-11
1.37E+07	2.81E-11	3.28E-11	1.15E-11
1.38E+07	2.81E-11	3.28E-11	1.15E-11
1.39E+07	2.81E-11	3.28E-11	1.15E-11
1.40E+07	2.81E-11	3.28E-11	1.15E-11
1.41E+07	2.81E-11	3.28E-11	1.15E-11
1.42E+07	2.81E-11	3.28E-11	1.15E-11
1.43E+07	2.81E-11	3.28E-11	1.15E-11
1.44E+07	2.81E-11	3.28E-11	1.14E-11
1.45E+07	2.81E-11	3.27E-11	1.14E-11
1.46E+07	2.81E-11	3.27E-11	1.14E-11
1.47E+07	2.81E-11	3.27E-11	1.14E-11
1.48E+07	2.81E-11	3.27E-11	1.14E-11
1.49E+07	2.80E-11	3.27E-11	1.14E-11
1.50E+07	2.80E-11	3.27E-11	1.14E-11
1.51E+07	2.80E-11	3.27E-11	1.14E-11
1.52E+07	2.80E-11	3.27E-11	1.14E-11

1.53E+07	2.80E-11	3.27E-11	1.14E-11
1.54E+07	2.80E-11	3.27E-11	1.14E-11
1.55E+07	2.80E-11	3.26E-11	1.14E-11
1.56E+07	2.80E-11	3.26E-11	1.14E-11
1.57E+07	2.80E-11	3.26E-11	1.14E-11
1.58E+07	2.80E-11	3.26E-11	1.14E-11
1.59E+07	2.80E-11	3.26E-11	1.14E-11
1.60E+07	2.80E-11	3.26E-11	1.14E-11
1.61E+07	2.79E-11	3.26E-11	1.14E-11
1.62E+07	2.79E-11	3.26E-11	1.14E-11
1.63E+07	2.79E-11	3.26E-11	1.14E-11
1.64E+07	2.79E-11	3.26E-11	1.14E-11
1.65E+07	2.79E-11	3.26E-11	1.14E-11
1.66E+07	2.79E-11	3.25E-11	1.14E-11
1.67E+07	2.79E-11	3.25E-11	1.14E-11
1.68E+07	2.79E-11	3.25E-11	1.14E-11
1.69E+07	2.79E-11	3.25E-11	1.14E-11
1.70E+07	2.79E-11	3.25E-11	1.14E-11
1.71E+07	2.78E-11	3.25E-11	1.14E-11
1.72E+07	2.78E-11	3.25E-11	1.14E-11
1.73E+07	2.78E-11	3.25E-11	1.14E-11
1.74E+07	2.78E-11	3.25E-11	1.14E-11
1.75E+07	2.78E-11	3.24E-11	1.14E-11
1.76E+07	2.78E-11	3.24E-11	1.14E-11
1.77E+07	2.78E-11	3.24E-11	1.14E-11
1.78E+07	2.78E-11	3.24E-11	1.14E-11

1.79E+07	2.78E-11	3.24E-11	1.14E-11
1.80E+07	2.77E-11	3.24E-11	1.14E-11
1.81E+07	2.77E-11	3.24E-11	1.13E-11
1.82E+07	2.77E-11	3.24E-11	1.13E-11
1.83E+07	2.77E-11	3.24E-11	1.13E-11
1.84E+07	2.77E-11	3.23E-11	1.13E-11
1.85E+07	2.77E-11	3.23E-11	1.13E-11
1.86E+07	2.77E-11	3.23E-11	1.13E-11
1.87E+07	2.77E-11	3.23E-11	1.13E-11
1.88E+07	2.77E-11	3.23E-11	1.13E-11
1.89E+07	2.76E-11	3.23E-11	1.13E-11
1.90E+07	2.76E-11	3.23E-11	1.13E-11
1.91E+07	2.76E-11	3.23E-11	1.13E-11
1.92E+07	2.76E-11	3.22E-11	1.13E-11
1.93E+07	2.76E-11	3.22E-11	1.13E-11
1.94E+07	2.76E-11	3.22E-11	1.13E-11
1.95E+07	2.76E-11	3.22E-11	1.13E-11
1.96E+07	2.76E-11	3.22E-11	1.13E-11
1.97E+07	2.76E-11	3.22E-11	1.13E-11
1.98E+07	2.75E-11	3.22E-11	1.13E-11
1.99E+07	2.75E-11	3.22E-11	1.13E-11
2.00E+07	2.75E-11	3.22E-11	1.13E-11
2.01E+07	2.75E-11	3.21E-11	1.13E-11
2.02E+07	2.75E-11	3.21E-11	1.13E-11
2.03E+07	2.75E-11	3.21E-11	1.13E-11
2.04E+07	2.75E-11	3.21E-11	1.13E-11

2.05E+07	2.75E-11	3.21E-11	1.13E-11
2.06E+07	2.75E-11	3.21E-11	1.13E-11
2.07E+07	2.74E-11	3.21E-11	1.13E-11
2.08E+07	2.74E-11	3.21E-11	1.13E-11
2.09E+07	2.74E-11	3.20E-11	1.13E-11
2.10E+07	2.74E-11	3.20E-11	1.12E-11
2.11E+07	2.74E-11	3.20E-11	1.12E-11
2.12E+07	2.74E-11	3.20E-11	1.12E-11
2.13E+07	2.74E-11	3.20E-11	1.12E-11
2.14E+07	2.74E-11	3.20E-11	1.12E-11
2.15E+07	2.73E-11	3.20E-11	1.12E-11
2.16E+07	2.73E-11	3.20E-11	1.12E-11
2.17E+07	2.73E-11	3.19E-11	1.12E-11
2.18E+07	2.73E-11	3.19E-11	1.12E-11
2.19E+07	2.73E-11	3.19E-11	1.12E-11
2.20E+07	2.73E-11	3.19E-11	1.12E-11
2.21E+07	2.73E-11	3.19E-11	1.12E-11
2.22E+07	2.73E-11	3.19E-11	1.12E-11
2.23E+07	2.73E-11	3.19E-11	1.12E-11
2.24E+07	2.72E-11	3.19E-11	1.12E-11
2.25E+07	2.72E-11	3.18E-11	1.12E-11
2.26E+07	2.72E-11	3.18E-11	1.12E-11
2.27E+07	2.72E-11	3.18E-11	1.12E-11
2.28E+07	2.72E-11	3.18E-11	1.12E-11
2.29E+07	2.72E-11	3.18E-11	1.12E-11
2.30E+07	2.72E-11	3.18E-11	1.12E-11

2.31E+07	2.72E-11	3.18E-11	1.12E-11
2.32E+07	2.72E-11	3.18E-11	1.12E-11
2.33E+07	2.71E-11	3.17E-11	1.12E-11
2.34E+07	2.71E-11	3.17E-11	1.12E-11
2.35E+07	2.71E-11	3.17E-11	1.12E-11
2.36E+07	2.71E-11	3.17E-11	1.12E-11
2.37E+07	2.71E-11	3.17E-11	1.12E-11
2.38E+07	2.71E-11	3.17E-11	1.11E-11
2.39E+07	2.71E-11	3.17E-11	1.11E-11
2.40E+07	2.71E-11	3.17E-11	1.11E-11
2.41E+07	2.70E-11	3.17E-11	1.11E-11
2.42E+07	2.70E-11	3.16E-11	1.11E-11
2.43E+07	2.70E-11	3.16E-11	1.11E-11
2.44E+07	2.70E-11	3.16E-11	1.11E-11
2.45E+07	2.70E-11	3.16E-11	1.11E-11
2.46E+07	2.70E-11	3.16E-11	1.11E-11
2.47E+07	2.70E-11	3.16E-11	1.11E-11
2.48E+07	2.70E-11	3.16E-11	1.11E-11
2.49E+07	2.70E-11	3.15E-11	1.11E-11
2.50E+07	2.69E-11	3.15E-11	1.11E-11
2.51E+07	2.69E-11	3.15E-11	1.11E-11
2.52E+07	2.69E-11	3.15E-11	1.11E-11
2.53E+07	2.69E-11	3.15E-11	1.11E-11
2.54E+07	2.69E-11	3.15E-11	1.11E-11
2.55E+07	2.69E-11	3.15E-11	1.11E-11
2.56E+07	2.69E-11	3.15E-11	1.11E-11

2.57E+07	2.69E-11	3.14E-11	1.11E-11
2.58E+07	2.68E-11	3.14E-11	1.11E-11
2.59E+07	2.68E-11	3.14E-11	1.11E-11
2.60E+07	2.68E-11	3.14E-11	1.11E-11
2.61E+07	2.68E-11	3.14E-11	1.11E-11
2.62E+07	2.68E-11	3.14E-11	1.11E-11
2.63E+07	2.68E-11	3.14E-11	1.11E-11
2.64E+07	2.68E-11	3.14E-11	1.11E-11
2.65E+07	2.68E-11	3.13E-11	1.10E-11
2.66E+07	2.67E-11	3.13E-11	1.10E-11
2.67E+07	2.67E-11	3.13E-11	1.10E-11
2.68E+07	2.67E-11	3.13E-11	1.10E-11
2.69E+07	2.67E-11	3.13E-11	1.10E-11
2.70E+07	2.67E-11	3.13E-11	1.10E-11
2.71E+07	2.67E-11	3.13E-11	1.10E-11
2.72E+07	2.67E-11	3.13E-11	1.10E-11
2.73E+07	2.67E-11	3.12E-11	1.10E-11
2.74E+07	2.67E-11	3.12E-11	1.10E-11
2.75E+07	2.66E-11	3.12E-11	1.10E-11
2.76E+07	2.66E-11	3.12E-11	1.10E-11
2.77E+07	2.66E-11	3.12E-11	1.10E-11
2.78E+07	2.66E-11	3.12E-11	1.10E-11
2.79E+07	2.66E-11	3.12E-11	1.10E-11
2.80E+07	2.66E-11	3.12E-11	1.10E-11
2.81E+07	2.66E-11	3.11E-11	1.10E-11
2.82E+07	2.66E-11	3.11E-11	1.10E-11

2.83E+07	2.65E-11	3.11E-11	1.10E-11
2.84E+07	2.65E-11	3.11E-11	1.10E-11
2.85E+07	2.65E-11	3.11E-11	1.10E-11
2.86E+07	2.65E-11	3.11E-11	1.10E-11
2.87E+07	2.65E-11	3.11E-11	1.10E-11
2.88E+07	2.65E-11	3.11E-11	1.10E-11
2.89E+07	2.65E-11	3.10E-11	1.10E-11
2.90E+07	2.65E-11	3.10E-11	1.10E-11
2.91E+07	2.64E-11	3.10E-11	1.09E-11
2.92E+07	2.64E-11	3.10E-11	1.09E-11
2.93E+07	2.64E-11	3.10E-11	1.09E-11
2.94E+07	2.64E-11	3.10E-11	1.09E-11
2.95E+07	2.64E-11	3.10E-11	1.09E-11
2.96E+07	2.64E-11	3.09E-11	1.09E-11
2.97E+07	2.64E-11	3.09E-11	1.09E-11
2.98E+07	2.64E-11	3.09E-11	1.09E-11
2.99E+07	2.63E-11	3.09E-11	1.09E-11
3.00E+07	2.63E-11	3.09E-11	1.09E-11

กระบวนกร EPD ที่ 15V เวลา 7 นาที

Frquency (Hz)	CB/Pt	SWCNT/Pt	Pt compound
7.50E+04	3.39E-11	2.96E-11	3.22E-11
1.75E+05	3.35E-11	2.94E-11	3.20E-11
2.75E+05	3.34E-11	2.93E-11	3.19E-11
3.75E+05	3.33E-11	2.93E-11	3.19E-11
4.75E+05	3.32E-11	2.92E-11	3.18E-11

5.75E+05	3.32E-11	2.92E-11	3.18E-11
6.75E+05	3.31E-11	2.91E-11	3.18E-11
7.75E+05	3.31E-11	2.91E-11	3.17E-11
8.75E+05	3.31E-11	2.91E-11	3.17E-11
9.75E+05	3.30E-11	2.91E-11	3.17E-11
1.08E+06	3.30E-11	2.91E-11	3.17E-11
1.18E+06	3.29E-11	2.90E-11	3.17E-11
1.28E+06	3.31E-11	2.90E-11	3.16E-11
1.38E+06	3.29E-11	2.90E-11	3.16E-11
1.48E+06	3.28E-11	2.90E-11	3.16E-11
1.58E+06	3.28E-11	2.90E-11	3.16E-11
1.68E+06	3.28E-11	2.90E-11	3.16E-11
1.78E+06	3.27E-11	2.90E-11	3.16E-11
1.88E+06	3.27E-11	2.90E-11	3.16E-11
1.98E+06	3.27E-11	2.90E-11	3.16E-11
2.08E+06	3.26E-11	2.90E-11	3.16E-11
2.18E+06	3.26E-11	2.89E-11	3.16E-11
2.28E+06	3.26E-11	2.89E-11	3.15E-11
2.38E+06	3.25E-11	2.89E-11	3.15E-11
2.48E+06	3.25E-11	2.89E-11	3.15E-11
2.58E+06	3.24E-11	2.89E-11	3.15E-11
2.68E+06	3.24E-11	2.89E-11	3.15E-11
2.78E+06	3.23E-11	2.89E-11	3.15E-11
2.88E+06	3.23E-11	2.89E-11	3.15E-11
2.98E+06	3.22E-11	2.89E-11	3.15E-11
3.08E+06	3.22E-11	2.89E-11	3.15E-11

3.18E+06	3.22E-11	2.89E-11	3.15E-11
3.28E+06	3.21E-11	2.89E-11	3.15E-11
3.38E+06	3.21E-11	2.89E-11	3.15E-11
3.48E+06	3.20E-11	2.89E-11	3.15E-11
3.58E+06	3.20E-11	2.89E-11	3.15E-11
3.68E+06	3.19E-11	2.89E-11	3.15E-11
3.78E+06	3.19E-11	2.89E-11	3.15E-11
3.88E+06	3.18E-11	2.89E-11	3.14E-11
3.98E+06	3.18E-11	2.88E-11	3.14E-11
4.08E+06	3.17E-11	2.88E-11	3.14E-11
4.18E+06	3.17E-11	2.88E-11	3.14E-11
4.28E+06	3.16E-11	2.88E-11	3.14E-11
4.38E+06	3.15E-11	2.88E-11	3.14E-11
4.48E+06	3.15E-11	2.88E-11	3.14E-11
4.58E+06	3.14E-11	2.88E-11	3.14E-11
4.68E+06	3.14E-11	2.88E-11	3.14E-11
4.78E+06	3.13E-11	2.88E-11	3.14E-11
4.88E+06	3.13E-11	2.88E-11	3.14E-11
4.98E+06	3.12E-11	2.88E-11	3.14E-11
5.08E+06	3.13E-11	2.89E-11	3.15E-11
5.18E+06	3.12E-11	2.89E-11	3.15E-11
5.28E+06	3.12E-11	2.89E-11	3.15E-11
5.38E+06	3.11E-11	2.89E-11	3.15E-11
5.48E+06	3.11E-11	2.89E-11	3.15E-11
5.58E+06	3.10E-11	2.89E-11	3.15E-11
5.68E+06	3.09E-11	2.89E-11	3.15E-11

5.78E+06	3.09E-11	2.89E-11	3.15E-11
5.88E+06	3.08E-11	2.89E-11	3.15E-11
5.98E+06	3.07E-11	2.89E-11	3.15E-11
6.08E+06	3.07E-11	2.89E-11	3.15E-11
6.18E+06	3.06E-11	2.89E-11	3.15E-11
6.28E+06	3.06E-11	2.89E-11	3.15E-11
6.38E+06	3.05E-11	2.89E-11	3.15E-11
6.48E+06	3.04E-11	2.89E-11	3.15E-11
6.58E+06	3.04E-11	2.89E-11	3.14E-11
6.68E+06	3.03E-11	2.89E-11	3.14E-11
6.78E+06	3.03E-11	2.89E-11	3.14E-11
6.88E+06	3.02E-11	2.88E-11	3.14E-11
6.98E+06	3.01E-11	2.88E-11	3.14E-11
7.08E+06	3.01E-11	2.88E-11	3.14E-11
7.18E+06	3.00E-11	2.88E-11	3.14E-11
7.28E+06	2.99E-11	2.88E-11	3.14E-11
7.38E+06	2.99E-11	2.88E-11	3.14E-11
7.48E+06	2.98E-11	2.88E-11	3.14E-11
7.58E+06	2.97E-11	2.88E-11	3.14E-11
7.68E+06	2.97E-11	2.88E-11	3.14E-11
7.78E+06	2.96E-11	2.88E-11	3.14E-11
7.88E+06	2.95E-11	2.88E-11	3.14E-11
7.98E+06	2.95E-11	2.88E-11	3.14E-11
8.08E+06	2.94E-11	2.88E-11	3.14E-11
8.18E+06	2.93E-11	2.88E-11	3.14E-11
8.28E+06	2.93E-11	2.88E-11	3.14E-11

8.38E+06	2.92E-11	2.88E-11	3.14E-11
8.48E+06	2.91E-11	2.88E-11	3.14E-11
8.58E+06	2.91E-11	2.88E-11	3.14E-11
8.68E+06	2.90E-11	2.88E-11	3.14E-11
8.78E+06	2.89E-11	2.88E-11	3.13E-11
8.88E+06	2.88E-11	2.88E-11	3.13E-11
8.98E+06	2.88E-11	2.87E-11	3.13E-11
9.08E+06	2.87E-11	2.87E-11	3.13E-11
9.18E+06	2.86E-11	2.87E-11	3.13E-11
9.28E+06	2.86E-11	2.87E-11	3.13E-11
9.38E+06	2.85E-11	2.87E-11	3.13E-11
9.48E+06	2.84E-11	2.87E-11	3.13E-11
9.58E+06	2.83E-11	2.87E-11	3.13E-11
9.68E+06	2.83E-11	2.87E-11	3.13E-11
9.78E+06	2.82E-11	2.87E-11	3.13E-11
9.88E+06	2.81E-11	2.87E-11	3.13E-11
9.98E+06	2.81E-11	2.87E-11	3.13E-11
1.01E+07	2.80E-11	2.87E-11	3.13E-11
1.02E+07	2.79E-11	2.87E-11	3.13E-11
1.03E+07	2.78E-11	2.87E-11	3.13E-11
1.04E+07	2.78E-11	2.87E-11	3.13E-11
1.05E+07	2.77E-11	2.87E-11	3.13E-11
1.06E+07	2.76E-11	2.87E-11	3.13E-11
1.07E+07	2.76E-11	2.86E-11	3.12E-11
1.08E+07	2.75E-11	2.86E-11	3.12E-11
1.09E+07	2.74E-11	2.86E-11	3.12E-11

1.10E+07	2.74E-11	2.86E-11	3.12E-11
1.11E+07	2.73E-11	2.86E-11	3.12E-11
1.12E+07	2.72E-11	2.86E-11	3.12E-11
1.13E+07	2.72E-11	2.86E-11	3.12E-11
1.14E+07	2.71E-11	2.86E-11	3.12E-11
1.15E+07	2.70E-11	2.86E-11	3.12E-11
1.16E+07	2.69E-11	2.86E-11	3.12E-11
1.17E+07	2.69E-11	2.86E-11	3.12E-11
1.18E+07	2.68E-11	2.86E-11	3.12E-11
1.19E+07	2.67E-11	2.86E-11	3.12E-11
1.20E+07	2.67E-11	2.86E-11	3.12E-11
1.21E+07	2.66E-11	2.86E-11	3.12E-11
1.22E+07	2.65E-11	2.86E-11	3.12E-11
1.23E+07	2.65E-11	2.85E-11	3.12E-11
1.24E+07	2.64E-11	2.85E-11	3.12E-11
1.25E+07	2.63E-11	2.85E-11	3.11E-11
1.26E+07	2.63E-11	2.85E-11	3.11E-11
1.27E+07	2.62E-11	2.85E-11	3.11E-11
1.28E+07	2.61E-11	2.85E-11	3.11E-11
1.29E+07	2.61E-11	2.85E-11	3.11E-11
1.30E+07	2.60E-11	2.85E-11	3.11E-11
1.31E+07	2.59E-11	2.85E-11	3.11E-11
1.32E+07	2.59E-11	2.85E-11	3.11E-11
1.33E+07	2.58E-11	2.85E-11	3.11E-11
1.34E+07	2.57E-11	2.85E-11	3.11E-11
1.35E+07	2.57E-11	2.85E-11	3.11E-11

1.36E+07	2.56E-11	2.85E-11	3.11E-11
1.37E+07	2.55E-11	2.85E-11	3.11E-11
1.38E+07	2.55E-11	2.84E-11	3.11E-11
1.39E+07	2.54E-11	2.85E-11	3.10E-11
1.40E+07	2.53E-11	2.84E-11	3.10E-11
1.41E+07	2.53E-11	2.84E-11	3.10E-11
1.42E+07	2.52E-11	2.84E-11	3.10E-11
1.43E+07	2.52E-11	2.84E-11	3.10E-11
1.44E+07	2.51E-11	2.84E-11	3.10E-11
1.45E+07	2.50E-11	2.84E-11	3.10E-11
1.46E+07	2.50E-11	2.84E-11	3.10E-11
1.47E+07	2.49E-11	2.84E-11	3.10E-11
1.48E+07	2.49E-11	2.84E-11	3.10E-11
1.49E+07	2.48E-11	2.84E-11	3.10E-11
1.50E+07	2.47E-11	2.84E-11	3.10E-11
1.51E+07	2.47E-11	2.83E-11	3.10E-11
1.52E+07	2.46E-11	2.83E-11	3.09E-11
1.53E+07	2.45E-11	2.83E-11	3.09E-11
1.54E+07	2.45E-11	2.83E-11	3.09E-11
1.55E+07	2.44E-11	2.83E-11	3.09E-11
1.56E+07	2.44E-11	2.83E-11	3.09E-11
1.57E+07	2.43E-11	2.83E-11	3.09E-11
1.58E+07	2.42E-11	2.83E-11	3.09E-11
1.59E+07	2.42E-11	2.83E-11	3.09E-11
1.60E+07	2.41E-11	2.82E-11	3.09E-11
1.61E+07	2.41E-11	2.83E-11	3.09E-11

1.62E+07	2.40E-11	2.82E-11	3.09E-11
1.63E+07	2.39E-11	2.82E-11	3.08E-11
1.64E+07	2.39E-11	2.82E-11	3.08E-11
1.65E+07	2.38E-11	2.82E-11	3.08E-11
1.66E+07	2.38E-11	2.82E-11	3.08E-11
1.67E+07	2.37E-11	2.82E-11	3.08E-11
1.68E+07	2.36E-11	2.82E-11	3.08E-11
1.69E+07	2.36E-11	2.82E-11	3.08E-11
1.70E+07	2.35E-11	2.82E-11	3.08E-11
1.71E+07	2.35E-11	2.82E-11	3.08E-11
1.72E+07	2.34E-11	2.82E-11	3.08E-11
1.73E+07	2.33E-11	2.81E-11	3.08E-11
1.74E+07	2.33E-11	2.81E-11	3.07E-11
1.75E+07	2.32E-11	2.81E-11	3.07E-11
1.76E+07	2.32E-11	2.81E-11	3.07E-11
1.77E+07	2.31E-11	2.81E-11	3.07E-11
1.78E+07	2.31E-11	2.81E-11	3.07E-11
1.79E+07	2.30E-11	2.81E-11	3.07E-11
1.80E+07	2.30E-11	2.81E-11	3.07E-11
1.81E+07	2.29E-11	2.81E-11	3.07E-11
1.82E+07	2.29E-11	2.81E-11	3.07E-11
1.83E+07	2.28E-11	2.81E-11	3.07E-11
1.84E+07	2.27E-11	2.80E-11	3.07E-11
1.85E+07	2.27E-11	2.80E-11	3.06E-11
1.86E+07	2.26E-11	2.80E-11	3.06E-11
1.87E+07	2.26E-11	2.80E-11	3.06E-11

1.88E+07	2.25E-11	2.80E-11	3.06E-11
1.89E+07	2.25E-11	2.80E-11	3.06E-11
1.90E+07	2.24E-11	2.80E-11	3.06E-11
1.91E+07	2.24E-11	2.80E-11	3.06E-11
1.92E+07	2.23E-11	2.80E-11	3.06E-11
1.93E+07	2.23E-11	2.80E-11	3.06E-11
1.94E+07	2.22E-11	2.79E-11	3.06E-11
1.95E+07	2.22E-11	2.79E-11	3.05E-11
1.96E+07	2.21E-11	2.79E-11	3.05E-11
1.97E+07	2.21E-11	2.79E-11	3.05E-11
1.98E+07	2.20E-11	2.79E-11	3.05E-11
1.99E+07	2.20E-11	2.79E-11	3.05E-11
2.00E+07	2.19E-11	2.79E-11	3.05E-11
2.01E+07	2.18E-11	2.79E-11	3.05E-11
2.02E+07	2.18E-11	2.79E-11	3.05E-11
2.03E+07	2.17E-11	2.78E-11	3.05E-11
2.04E+07	2.17E-11	2.78E-11	3.05E-11
2.05E+07	2.17E-11	2.78E-11	3.04E-11
2.06E+07	2.16E-11	2.78E-11	3.04E-11
2.07E+07	2.16E-11	2.78E-11	3.04E-11
2.08E+07	2.15E-11	2.78E-11	3.04E-11
2.09E+07	2.15E-11	2.78E-11	3.04E-11
2.10E+07	2.14E-11	2.78E-11	3.04E-11
2.11E+07	2.14E-11	2.78E-11	3.04E-11
2.12E+07	2.13E-11	2.77E-11	3.04E-11
2.13E+07	2.13E-11	2.78E-11	3.03E-11

2.14E+07	2.12E-11	2.77E-11	3.03E-11
2.15E+07	2.12E-11	2.77E-11	3.03E-11
2.16E+07	2.11E-11	2.77E-11	3.03E-11
2.17E+07	2.11E-11	2.77E-11	3.03E-11
2.18E+07	2.10E-11	2.77E-11	3.03E-11
2.19E+07	2.10E-11	2.77E-11	3.03E-11
2.20E+07	2.09E-11	2.77E-11	3.03E-11
2.21E+07	2.09E-11	2.76E-11	3.03E-11
2.22E+07	2.08E-11	2.76E-11	3.03E-11
2.23E+07	2.08E-11	2.76E-11	3.02E-11
2.24E+07	2.08E-11	2.76E-11	3.02E-11
2.25E+07	2.07E-11	2.76E-11	3.02E-11
2.26E+07	2.07E-11	2.76E-11	3.02E-11
2.27E+07	2.06E-11	2.76E-11	3.02E-11
2.28E+07	2.06E-11	2.76E-11	3.02E-11
2.29E+07	2.05E-11	2.76E-11	3.02E-11
2.30E+07	2.05E-11	2.75E-11	3.02E-11
2.31E+07	2.04E-11	2.75E-11	3.02E-11
2.32E+07	2.04E-11	2.75E-11	3.01E-11
2.33E+07	2.04E-11	2.75E-11	3.01E-11
2.34E+07	2.03E-11	2.75E-11	3.01E-11
2.35E+07	2.03E-11	2.75E-11	3.01E-11
2.36E+07	2.02E-11	2.75E-11	3.01E-11
2.37E+07	2.02E-11	2.75E-11	3.01E-11
2.38E+07	2.01E-11	2.75E-11	3.01E-11
2.39E+07	2.01E-11	2.74E-11	3.01E-11

2.40E+07	2.01E-11	2.74E-11	3.01E-11
2.41E+07	2.00E-11	2.74E-11	3.01E-11
2.42E+07	2.00E-11	2.74E-11	3.00E-11
2.43E+07	1.99E-11	2.74E-11	3.00E-11
2.44E+07	1.99E-11	2.74E-11	3.00E-11
2.45E+07	1.99E-11	2.74E-11	3.00E-11
2.46E+07	1.98E-11	2.74E-11	3.00E-11
2.47E+07	1.98E-11	2.74E-11	3.00E-11
2.48E+07	1.97E-11	2.74E-11	3.00E-11
2.49E+07	1.97E-11	2.73E-11	3.00E-11
2.50E+07	1.97E-11	2.73E-11	2.99E-11
2.51E+07	1.96E-11	2.73E-11	2.99E-11
2.52E+07	1.96E-11	2.73E-11	2.99E-11
2.53E+07	1.95E-11	2.73E-11	2.99E-11
2.54E+07	1.95E-11	2.73E-11	2.99E-11
2.55E+07	1.95E-11	2.73E-11	2.99E-11
2.56E+07	1.94E-11	2.73E-11	2.99E-11
2.57E+07	1.94E-11	2.73E-11	2.99E-11
2.58E+07	1.94E-11	2.72E-11	2.99E-11
2.59E+07	1.93E-11	2.72E-11	2.98E-11
2.60E+07	1.93E-11	2.72E-11	2.98E-11
2.61E+07	1.92E-11	2.72E-11	2.98E-11
2.62E+07	1.92E-11	2.72E-11	2.98E-11
2.63E+07	1.92E-11	2.72E-11	2.98E-11
2.64E+07	1.91E-11	2.72E-11	2.98E-11
2.65E+07	1.91E-11	2.72E-11	2.98E-11

2.66E+07	1.91E-11	2.71E-11	2.98E-11
2.67E+07	1.90E-11	2.71E-11	2.98E-11
2.68E+07	1.90E-11	2.71E-11	2.97E-11
2.69E+07	1.90E-11	2.71E-11	2.97E-11
2.70E+07	1.89E-11	2.71E-11	2.97E-11
2.71E+07	1.89E-11	2.71E-11	2.97E-11
2.72E+07	1.89E-11	2.71E-11	2.97E-11
2.73E+07	1.88E-11	2.71E-11	2.97E-11
2.74E+07	1.88E-11	2.71E-11	2.97E-11
2.75E+07	1.87E-11	2.71E-11	2.97E-11
2.76E+07	1.87E-11	2.70E-11	2.97E-11
2.77E+07	1.87E-11	2.70E-11	2.96E-11
2.78E+07	1.86E-11	2.70E-11	2.96E-11
2.79E+07	1.86E-11	2.70E-11	2.96E-11
2.80E+07	1.86E-11	2.70E-11	2.96E-11
2.81E+07	1.86E-11	2.70E-11	2.96E-11
2.82E+07	1.85E-11	2.70E-11	2.96E-11
2.83E+07	1.85E-11	2.70E-11	2.96E-11
2.84E+07	1.85E-11	2.69E-11	2.96E-11
2.85E+07	1.84E-11	2.69E-11	2.95E-11
2.86E+07	1.84E-11	2.69E-11	2.95E-11
2.87E+07	1.84E-11	2.69E-11	2.95E-11
2.88E+07	1.83E-11	2.69E-11	2.95E-11
2.89E+07	1.83E-11	2.69E-11	2.95E-11
2.90E+07	1.83E-11	2.69E-11	2.95E-11
2.91E+07	1.82E-11	2.69E-11	2.95E-11

2.92E+07	1.82E-11	2.68E-11	2.95E-11
2.93E+07	1.82E-11	2.68E-11	2.94E-11
2.94E+07	1.81E-11	2.68E-11	2.94E-11
2.95E+07	1.81E-11	2.68E-11	2.94E-11
2.96E+07	1.81E-11	2.68E-11	2.94E-11
2.97E+07	1.80E-11	2.68E-11	2.94E-11
2.98E+07	1.80E-11	2.68E-11	2.94E-11
2.99E+07	1.80E-11	2.68E-11	2.94E-11
3.00E+07	1.80E-11	2.68E-11	2.94E-11

กระบวนการ EPD ที่ 25V เวลา 7 นาที

Frquency (Hz)	CB/Pt	SWCNT/Pt	Pt compound
7.50E+04	2.94E-11	3.14E-11	3.29E-11
1.75E+05	2.93E-11	3.11E-11	3.27E-11
2.75E+05	2.92E-11	3.10E-11	3.26E-11
3.75E+05	2.92E-11	3.09E-11	3.26E-11
4.75E+05	2.91E-11	3.09E-11	3.25E-11
5.75E+05	2.91E-11	3.08E-11	3.25E-11
6.75E+05	2.91E-11	3.08E-11	3.25E-11
7.75E+05	2.90E-11	3.08E-11	3.24E-11
8.75E+05	2.90E-11	3.07E-11	3.24E-11
9.75E+05	2.90E-11	3.07E-11	3.24E-11
1.08E+06	2.90E-11	3.07E-11	3.24E-11
1.18E+06	2.90E-11	3.07E-11	3.24E-11
1.28E+06	2.90E-11	3.07E-11	3.23E-11
1.38E+06	2.89E-11	3.06E-11	3.23E-11

1.48E+06	2.89E-11	3.06E-11	3.25E-11
1.58E+06	2.89E-11	3.06E-11	3.23E-11
1.68E+06	2.89E-11	3.06E-11	3.23E-11
1.78E+06	2.89E-11	3.06E-11	3.23E-11
1.88E+06	2.89E-11	3.06E-11	3.23E-11
1.98E+06	2.89E-11	3.06E-11	3.23E-11
2.08E+06	2.89E-11	3.06E-11	3.23E-11
2.18E+06	2.89E-11	3.06E-11	3.23E-11
2.28E+06	2.89E-11	3.06E-11	3.22E-11
2.38E+06	2.88E-11	3.06E-11	3.22E-11
2.48E+06	2.88E-11	3.05E-11	3.22E-11
2.58E+06	2.88E-11	3.05E-11	3.22E-11
2.68E+06	2.88E-11	3.05E-11	3.22E-11
2.78E+06	2.88E-11	3.05E-11	3.22E-11
2.88E+06	2.88E-11	3.05E-11	3.22E-11
2.98E+06	2.88E-11	3.05E-11	3.22E-11
3.08E+06	2.88E-11	3.05E-11	3.22E-11
3.18E+06	2.88E-11	3.05E-11	3.22E-11
3.28E+06	2.88E-11	3.05E-11	3.22E-11
3.38E+06	2.88E-11	3.05E-11	3.22E-11
3.48E+06	2.88E-11	3.05E-11	3.22E-11
3.58E+06	2.87E-11	3.05E-11	3.22E-11
3.68E+06	2.87E-11	3.05E-11	3.22E-11
3.78E+06	2.87E-11	3.05E-11	3.22E-11
3.88E+06	2.87E-11	3.05E-11	3.21E-11
3.98E+06	2.87E-11	3.05E-11	3.21E-11

4.08E+06	2.87E-11	3.04E-11	3.21E-11
4.18E+06	2.87E-11	3.04E-11	3.21E-11
4.28E+06	2.87E-11	3.04E-11	3.21E-11
4.38E+06	2.87E-11	3.04E-11	3.21E-11
4.48E+06	2.87E-11	3.04E-11	3.21E-11
4.58E+06	2.87E-11	3.04E-11	3.21E-11
4.68E+06	2.87E-11	3.04E-11	3.21E-11
4.78E+06	2.86E-11	3.04E-11	3.21E-11
4.88E+06	2.86E-11	3.04E-11	3.21E-11
4.98E+06	2.86E-11	3.04E-11	3.21E-11
5.08E+06	2.87E-11	3.05E-11	3.22E-11
5.18E+06	2.87E-11	3.05E-11	3.22E-11
5.28E+06	2.87E-11	3.05E-11	3.22E-11
5.38E+06	2.87E-11	3.05E-11	3.22E-11
5.48E+06	2.87E-11	3.05E-11	3.22E-11
5.58E+06	2.87E-11	3.05E-11	3.22E-11
5.68E+06	2.87E-11	3.05E-11	3.22E-11
5.78E+06	2.87E-11	3.05E-11	3.22E-11
5.88E+06	2.87E-11	3.05E-11	3.22E-11
5.98E+06	2.87E-11	3.05E-11	3.22E-11
6.08E+06	2.86E-11	3.05E-11	3.22E-11
6.18E+06	2.86E-11	3.05E-11	3.22E-11
6.28E+06	2.86E-11	3.05E-11	3.22E-11
6.38E+06	2.86E-11	3.05E-11	3.22E-11
6.48E+06	2.86E-11	3.05E-11	3.22E-11
6.58E+06	2.86E-11	3.05E-11	3.21E-11

6.68E+06	2.86E-11	3.05E-11	3.21E-11
6.78E+06	2.86E-11	3.05E-11	3.21E-11
6.88E+06	2.86E-11	3.05E-11	3.21E-11
6.98E+06	2.86E-11	3.04E-11	3.21E-11
7.08E+06	2.85E-11	3.04E-11	3.21E-11
7.18E+06	2.85E-11	3.04E-11	3.21E-11
7.28E+06	2.85E-11	3.04E-11	3.21E-11
7.38E+06	2.85E-11	3.04E-11	3.21E-11
7.48E+06	2.85E-11	3.04E-11	3.21E-11
7.58E+06	2.85E-11	3.04E-11	3.21E-11
7.68E+06	2.85E-11	3.04E-11	3.21E-11
7.78E+06	2.85E-11	3.04E-11	3.21E-11
7.88E+06	2.85E-11	3.04E-11	3.21E-11
7.98E+06	2.85E-11	3.04E-11	3.21E-11
8.08E+06	2.84E-11	3.04E-11	3.21E-11
8.18E+06	2.84E-11	3.04E-11	3.21E-11
8.28E+06	2.84E-11	3.04E-11	3.21E-11
8.38E+06	2.84E-11	3.04E-11	3.21E-11
8.48E+06	2.84E-11	3.04E-11	3.21E-11
8.58E+06	2.84E-11	3.04E-11	3.20E-11
8.68E+06	2.84E-11	3.04E-11	3.20E-11
8.78E+06	2.84E-11	3.04E-11	3.20E-11
8.88E+06	2.84E-11	3.04E-11	3.20E-11
8.98E+06	2.83E-11	3.03E-11	3.20E-11
9.08E+06	2.83E-11	3.03E-11	3.20E-11
9.18E+06	2.83E-11	3.03E-11	3.20E-11

9.28E+06	2.83E-11	3.03E-11	3.20E-11
9.38E+06	2.83E-11	3.03E-11	3.20E-11
9.48E+06	2.83E-11	3.03E-11	3.20E-11
9.58E+06	2.83E-11	3.03E-11	3.20E-11
9.68E+06	2.83E-11	3.03E-11	3.20E-11
9.78E+06	2.82E-11	3.03E-11	3.20E-11
9.88E+06	2.82E-11	3.03E-11	3.20E-11
9.98E+06	2.82E-11	3.03E-11	3.20E-11
1.01E+07	2.82E-11	3.03E-11	3.20E-11
1.02E+07	2.82E-11	3.03E-11	3.20E-11
1.03E+07	2.82E-11	3.03E-11	3.20E-11
1.04E+07	2.82E-11	3.03E-11	3.19E-11
1.05E+07	2.82E-11	3.03E-11	3.19E-11
1.06E+07	2.81E-11	3.02E-11	3.19E-11
1.07E+07	2.81E-11	3.02E-11	3.19E-11
1.08E+07	2.81E-11	3.02E-11	3.19E-11
1.09E+07	2.81E-11	3.02E-11	3.19E-11
1.10E+07	2.81E-11	3.02E-11	3.19E-11
1.11E+07	2.81E-11	3.02E-11	3.19E-11
1.12E+07	2.81E-11	3.02E-11	3.19E-11
1.13E+07	2.80E-11	3.02E-11	3.19E-11
1.14E+07	2.80E-11	3.02E-11	3.19E-11
1.15E+07	2.80E-11	3.02E-11	3.19E-11
1.16E+07	2.80E-11	3.02E-11	3.19E-11
1.17E+07	2.80E-11	3.02E-11	3.19E-11
1.18E+07	2.80E-11	3.02E-11	3.19E-11

1.19E+07	2.80E-11	3.02E-11	3.19E-11
1.20E+07	2.79E-11	3.01E-11	3.19E-11
1.21E+07	2.79E-11	3.01E-11	3.18E-11
1.22E+07	2.79E-11	3.01E-11	3.18E-11
1.23E+07	2.79E-11	3.01E-11	3.18E-11
1.24E+07	2.79E-11	3.01E-11	3.18E-11
1.25E+07	2.79E-11	3.01E-11	3.18E-11
1.26E+07	2.79E-11	3.01E-11	3.18E-11
1.27E+07	2.78E-11	3.01E-11	3.18E-11
1.28E+07	2.78E-11	3.01E-11	3.18E-11
1.29E+07	2.78E-11	3.01E-11	3.18E-11
1.30E+07	2.78E-11	3.01E-11	3.18E-11
1.31E+07	2.78E-11	3.01E-11	3.18E-11
1.32E+07	2.78E-11	3.01E-11	3.18E-11
1.33E+07	2.77E-11	3.01E-11	3.18E-11
1.34E+07	2.77E-11	3.01E-11	3.18E-11
1.35E+07	2.77E-11	3.00E-11	3.17E-11
1.36E+07	2.77E-11	3.00E-11	3.17E-11
1.37E+07	2.77E-11	3.00E-11	3.17E-11
1.38E+07	2.77E-11	3.00E-11	3.17E-11
1.39E+07	2.77E-11	3.00E-11	3.17E-11
1.40E+07	2.76E-11	3.00E-11	3.17E-11
1.41E+07	2.76E-11	3.00E-11	3.17E-11
1.42E+07	2.76E-11	3.00E-11	3.17E-11
1.43E+07	2.76E-11	3.00E-11	3.17E-11
1.44E+07	2.76E-11	3.00E-11	3.17E-11

1.45E+07	2.76E-11	3.00E-11	3.17E-11
1.46E+07	2.75E-11	3.00E-11	3.17E-11
1.47E+07	2.75E-11	2.99E-11	3.16E-11
1.48E+07	2.75E-11	2.99E-11	3.16E-11
1.49E+07	2.75E-11	2.99E-11	3.16E-11
1.50E+07	2.75E-11	2.99E-11	3.16E-11
1.51E+07	2.75E-11	2.99E-11	3.16E-11
1.52E+07	2.75E-11	2.99E-11	3.16E-11
1.53E+07	2.74E-11	2.99E-11	3.16E-11
1.54E+07	2.74E-11	2.99E-11	3.16E-11
1.55E+07	2.74E-11	2.99E-11	3.16E-11
1.56E+07	2.74E-11	2.99E-11	3.16E-11
1.57E+07	2.74E-11	2.98E-11	3.16E-11
1.58E+07	2.73E-11	2.98E-11	3.15E-11
1.59E+07	2.73E-11	2.98E-11	3.15E-11
1.60E+07	2.73E-11	2.98E-11	3.15E-11
1.61E+07	2.73E-11	2.98E-11	3.15E-11
1.62E+07	2.73E-11	2.98E-11	3.15E-11
1.63E+07	2.72E-11	2.98E-11	3.15E-11
1.64E+07	2.72E-11	2.98E-11	3.15E-11
1.65E+07	2.72E-11	2.98E-11	3.15E-11
1.66E+07	2.72E-11	2.98E-11	3.15E-11
1.67E+07	2.72E-11	2.98E-11	3.15E-11
1.68E+07	2.72E-11	2.97E-11	3.15E-11
1.69E+07	2.71E-11	2.97E-11	3.14E-11
1.70E+07	2.71E-11	2.97E-11	3.14E-11

1.71E+07	2.71E-11	2.97E-11	3.14E-11
1.72E+07	2.71E-11	2.97E-11	3.14E-11
1.73E+07	2.71E-11	2.97E-11	3.14E-11
1.74E+07	2.70E-11	2.97E-11	3.14E-11
1.75E+07	2.70E-11	2.97E-11	3.14E-11
1.76E+07	2.70E-11	2.97E-11	3.14E-11
1.77E+07	2.70E-11	2.97E-11	3.14E-11
1.78E+07	2.70E-11	2.96E-11	3.14E-11
1.79E+07	2.70E-11	2.96E-11	3.14E-11
1.80E+07	2.69E-11	2.96E-11	3.13E-11
1.81E+07	2.69E-11	2.96E-11	3.13E-11
1.82E+07	2.69E-11	2.96E-11	3.13E-11
1.83E+07	2.69E-11	2.96E-11	3.13E-11
1.84E+07	2.69E-11	2.96E-11	3.13E-11
1.85E+07	2.68E-11	2.96E-11	3.13E-11
1.86E+07	2.68E-11	2.96E-11	3.13E-11
1.87E+07	2.68E-11	2.95E-11	3.13E-11
1.88E+07	2.68E-11	2.95E-11	3.13E-11
1.89E+07	2.68E-11	2.95E-11	3.12E-11
1.90E+07	2.67E-11	2.95E-11	3.12E-11
1.91E+07	2.67E-11	2.95E-11	3.12E-11
1.92E+07	2.67E-11	2.95E-11	3.12E-11
1.93E+07	2.67E-11	2.95E-11	3.12E-11
1.94E+07	2.67E-11	2.95E-11	3.12E-11
1.95E+07	2.66E-11	2.95E-11	3.12E-11
1.96E+07	2.66E-11	2.94E-11	3.12E-11

1.97E+07	2.66E-11	2.94E-11	3.12E-11
1.98E+07	2.66E-11	2.94E-11	3.11E-11
1.99E+07	2.66E-11	2.94E-11	3.11E-11
2.00E+07	2.65E-11	2.94E-11	3.11E-11
2.01E+07	2.65E-11	2.94E-11	3.11E-11
2.02E+07	2.65E-11	2.94E-11	3.11E-11
2.03E+07	2.65E-11	2.94E-11	3.11E-11
2.04E+07	2.65E-11	2.94E-11	3.11E-11
2.05E+07	2.64E-11	2.93E-11	3.11E-11
2.06E+07	2.64E-11	2.93E-11	3.11E-11
2.07E+07	2.64E-11	2.93E-11	3.10E-11
2.08E+07	2.64E-11	2.93E-11	3.10E-11
2.09E+07	2.63E-11	2.93E-11	3.10E-11
2.10E+07	2.63E-11	2.93E-11	3.10E-11
2.11E+07	2.63E-11	2.93E-11	3.10E-11
2.12E+07	2.63E-11	2.93E-11	3.10E-11
2.13E+07	2.62E-11	2.92E-11	3.09E-11
2.14E+07	2.62E-11	2.92E-11	3.10E-11
2.15E+07	2.62E-11	2.92E-11	3.10E-11
2.16E+07	2.62E-11	2.92E-11	3.09E-11
2.17E+07	2.62E-11	2.92E-11	3.09E-11
2.18E+07	2.62E-11	2.92E-11	3.09E-11
2.19E+07	2.61E-11	2.92E-11	3.09E-11
2.20E+07	2.61E-11	2.92E-11	3.09E-11
2.21E+07	2.61E-11	2.92E-11	3.09E-11
2.22E+07	2.61E-11	2.91E-11	3.09E-11

2.23E+07	2.61E-11	2.91E-11	3.09E-11
2.24E+07	2.60E-11	2.91E-11	3.09E-11
2.25E+07	2.60E-11	2.91E-11	3.08E-11
2.26E+07	2.60E-11	2.91E-11	3.08E-11
2.27E+07	2.60E-11	2.91E-11	3.08E-11
2.28E+07	2.59E-11	2.91E-11	3.08E-11
2.29E+07	2.59E-11	2.91E-11	3.08E-11
2.30E+07	2.59E-11	2.90E-11	3.08E-11
2.31E+07	2.59E-11	2.90E-11	3.08E-11
2.32E+07	2.59E-11	2.90E-11	3.08E-11
2.33E+07	2.59E-11	2.90E-11	3.07E-11
2.34E+07	2.58E-11	2.90E-11	3.07E-11
2.35E+07	2.58E-11	2.90E-11	3.07E-11
2.36E+07	2.58E-11	2.90E-11	3.07E-11
2.37E+07	2.58E-11	2.90E-11	3.07E-11
2.38E+07	2.57E-11	2.90E-11	3.07E-11
2.39E+07	2.57E-11	2.89E-11	3.07E-11
2.40E+07	2.57E-11	2.89E-11	3.07E-11
2.41E+07	2.57E-11	2.89E-11	3.07E-11
2.42E+07	2.57E-11	2.89E-11	3.06E-11
2.43E+07	2.56E-11	2.89E-11	3.06E-11
2.44E+07	2.56E-11	2.89E-11	3.06E-11
2.45E+07	2.56E-11	2.89E-11	3.06E-11
2.46E+07	2.56E-11	2.89E-11	3.06E-11
2.47E+07	2.56E-11	2.88E-11	3.06E-11
2.48E+07	2.55E-11	2.88E-11	3.06E-11

2.49E+07	2.55E-11	2.88E-11	3.06E-11
2.50E+07	2.55E-11	2.88E-11	3.05E-11
2.51E+07	2.55E-11	2.88E-11	3.05E-11
2.52E+07	2.55E-11	2.88E-11	3.05E-11
2.53E+07	2.54E-11	2.88E-11	3.05E-11
2.54E+07	2.54E-11	2.88E-11	3.05E-11
2.55E+07	2.54E-11	2.88E-11	3.05E-11
2.56E+07	2.54E-11	2.87E-11	3.05E-11
2.57E+07	2.53E-11	2.87E-11	3.05E-11
2.58E+07	2.53E-11	2.87E-11	3.04E-11
2.59E+07	2.53E-11	2.87E-11	3.04E-11
2.60E+07	2.53E-11	2.87E-11	3.04E-11
2.61E+07	2.53E-11	2.87E-11	3.04E-11
2.62E+07	2.52E-11	2.87E-11	3.04E-11
2.63E+07	2.52E-11	2.87E-11	3.04E-11
2.64E+07	2.52E-11	2.86E-11	3.04E-11
2.65E+07	2.52E-11	2.86E-11	3.04E-11
2.66E+07	2.52E-11	2.86E-11	3.04E-11
2.67E+07	2.51E-11	2.86E-11	3.03E-11
2.68E+07	2.51E-11	2.86E-11	3.03E-11
2.69E+07	2.51E-11	2.86E-11	3.03E-11
2.70E+07	2.51E-11	2.86E-11	3.03E-11
2.71E+07	2.50E-11	2.86E-11	3.03E-11
2.72E+07	2.50E-11	2.86E-11	3.03E-11
2.73E+07	2.50E-11	2.85E-11	3.03E-11
2.74E+07	2.50E-11	2.85E-11	3.03E-11

2.75E+07	2.50E-11	2.85E-11	3.02E-11
2.76E+07	2.49E-11	2.85E-11	3.02E-11
2.77E+07	2.49E-11	2.85E-11	3.02E-11
2.78E+07	2.49E-11	2.85E-11	3.02E-11
2.79E+07	2.49E-11	2.85E-11	3.02E-11
2.80E+07	2.49E-11	2.85E-11	3.02E-11
2.81E+07	2.48E-11	2.84E-11	3.02E-11
2.82E+07	2.48E-11	2.84E-11	3.02E-11
2.83E+07	2.48E-11	2.84E-11	3.01E-11
2.84E+07	2.48E-11	2.84E-11	3.01E-11
2.85E+07	2.48E-11	2.84E-11	3.01E-11
2.86E+07	2.47E-11	2.84E-11	3.01E-11
2.87E+07	2.47E-11	2.84E-11	3.01E-11
2.88E+07	2.47E-11	2.84E-11	3.01E-11
2.89E+07	2.47E-11	2.83E-11	3.01E-11
2.90E+07	2.46E-11	2.83E-11	3.01E-11
2.91E+07	2.46E-11	2.83E-11	3.00E-11
2.92E+07	2.46E-11	2.83E-11	3.00E-11
2.93E+07	2.46E-11	2.83E-11	3.00E-11
2.94E+07	2.46E-11	2.83E-11	3.00E-11
2.95E+07	2.45E-11	2.83E-11	3.00E-11
2.96E+07	2.45E-11	2.82E-11	3.00E-11
2.97E+07	2.45E-11	2.82E-11	3.00E-11
2.98E+07	2.45E-11	2.82E-11	2.99E-11
2.99E+07	2.44E-11	2.82E-11	2.99E-11
3.00E+07	2.44E-11	2.82E-11	2.99E-11

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายภูริ กาลเนากุล
 รหัสประจำตัวนักศึกษา 5210120090
 วุฒิกการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2552

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

1. ทุนบัณฑิตวิทยาลัยภายใต้มหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ (NRU)
2. ทุนสนับสนุนการทำวิจัยจากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Kalnaowakun, P., and Niyomwas, S. (2011), "Preparation and Characterization of Platinum/Carbon Black Powder as Catalytic Materials." The 5th PSU-UNS International Conference on Engineering and Technology (ICET-2011), Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand., 1-3.

Kalnaowakun, P., and Niyomwas, S. (2012), "Low Temperature Fabrication of Platinum/Carbon Black Powder Coating." Advanced Materials Research, 415-417, 178-183.

Kalnaowakun, P., Niyomwas, S. and Chantaramanee, S. (2012), "Comparative Study of Platinum/Single Wall Carbon Nanotube versus Platinum/Carbon Black Coating" Advanced Materials Research, 488-489, 928-933.

Kalnaowakun, P., Srimuangmak, K. and Niyomwas, S. (2013), "Synthesis of Carbon Black/Platinum Composite Materials as Catalytic Electrodes Prepared by Electrophoretic Deposition" Advanced Materials Research, 664, 510-514.