ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
245578

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนผสมโพลิเมอร์เป็นขั้วเคาน์เตอร์

EFFICIENCY OF DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS BASED ON CARBON NANOTUBES MIXED POLYMER AS COUNTER ELECTRODES

นายวสันต์ ไมอัศรี

วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
พ.ศ. 2554

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชา
245578

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนผสมโพลิเมอร์เป็นขั้วเคาน์เตอร์

EFFICIENCY OF DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS BASED ON CARBON NANOTUBES MIXED POLYMER AS COUNTER ELECTRODES

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

นายวสันต์ ไมอักรี

วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

พ.ศ. 2554

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนผสมโพลิเมอร์เป็นขั้วเคาน์เตอร์

นายวสันต์ ไมอักรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น
พ.ศ. 2554

EFFICIENCY OF DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS BASED ON CARBON NANOTUBES MIXED POLYMER AS COUNTER ELECTRODES

MR. WASAN MAIAUGREE

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS

FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE

IN PHYSICS

GRADUATE SCHOOL KHON KAEN UNIVERSITY

2011

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

หลักสูตร

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

ชื่อวิทยานิพนธ์: ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนผสมโพลิเมอร์เป็นขั้วเคาน์เตอร์

ชื่อผู้ทำวิทยานิพนธ์: นายวสันต์ ไมอักรี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ดร. อภิโชค ตั้งตระการ	ประธานกรรมการ
ดร. วิรัตน์ เจริญบุญ	กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา อมรกิจบำรุง	กรรมการ
ดร. สมัคร์ พิมานแพง	กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์:

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา อมรกิจบำรุง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ดร. สมัคร์ พิมานแพง)

....

(รองศาสตราจารย์ ดร. ลำปาง แม่นมาตย์) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ แสงอรุณ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยขอนแก่น

วสันต์ ไมอักรี. 2554. ***ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนผสมโพลิเมอร์เป็นขั้วเคาน์เตอร์.*** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์: รศ.ดร. วิทยา อมรกิจบำรุง, ดร. สมัคร์ พิมานแพง

บทคัดย่อ

245578

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงแบบกระจกและแบบพลาสติก โดยใช้ท่อนาคาร์บอนผสมโพลิเมอร์เป็นขั้วเคาน์เตอร์ และใช้โพลิเมอร์ไม่นำไฟฟ้าชนิดโพลิไวนิลไอดีนฟลูออไรด์ (Poly Vinylidene Fluoride) เป็นตัวผสาน (Binder) ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการอบฟิล์ม นอกจากนี้ได้ทำการปรับแต่งท่อนาโนคาร์บอนด้วยกรดไนตริกผสมกรดซัลฟิวริกต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ และศึกษาผลของอัตราส่วนของท่อนาโนคาร์บอนที่ปรับแต่งผิวผสมโพลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิดโพลิ 3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน-โพลิสทีรีน ซันโฟเนท (Poly 3,4-Ethylendioxythiophene-Poly Styrene Sulfonate) ศึกษาความเสถียรของเซลล์แสงอาทิตย์ ในกรณีของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงแบบกระจกโดยใช้สองวิธีในการเตรียมขั้วเวิร์กกิ้ง (Working Electrode) คือ วิธีสกรีน (Screen Printing) และ วิธีใบปาดหมึก (Doctor Blading) สำหรับกรณีเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงแบบพลาสติกเตรียมขั้วเวิร์กกิ้งด้วยวิธีการอัด (Compression) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเคลือบด้วยวิธีสกรีนได้ความหนาของฟิล์ม TiO_2 ประมาณ 10 ไมโครเมตร และค่าประสิทธิภาพมากกว่าวิธีวิธีใบปาดหมึกที่ฟิล์ม TiO_2 หนาประมาณ 8 ไมโครเมตร ในส่วนกรณีการใช้โพลิเมอร์ไม่นำไฟฟ้าเป็นขั้วเคาน์เตอร์นั้นระยะเวลาในการอบฟิล์มคาร์บอนที่เหมาะสมคือ 6 ชั่วโมง หลังทำการปรับแต่งผิวท่อนาโนคาร์บอนด้วยกรดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบกระจกเพิ่มขึ้นจาก 4.73% เป็น 5.66% และเพิ่มขึ้นจาก 0.80% เป็น 2.11% ในกรณีของเซลล์แสงอาทิตย์แบบพลาสติก สำหรับกรณีการใช้โพลิเมอร์นำไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบกระจกปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่เหมาะสมคือ 0.4 g ซึ่งให้ค่าประสิทธิภาพสูงถึง 9.72% และพบว่าเซลล์ไม่มีความเสถียรหรือความคงตัวประสิทธิภาพลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ในกรณีของเซลล์แสงอาทิตย์แบบพลาสติกปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่เหมาะสมคือ 0.2 g และค่าประสิทธิภาพที่ได้คือ 3.48%

Wasan Maiaugree. 2011. **Efficiency of Dye-Sensitized Solar Cells Based on Carbon Nanotubes Mixed Polymer as Counter Electrodes.** Master of Science Thesis in Physics, Graduate School, Khon Kaen University.

Thesis Advisors: Assoc. Prof. Dr. Vittaya Amornkitbamrung, Dr. Samuk Pimanpang

ABSTRACT

245578

In this research work, glass type dye-sensitized solar cells (DSSCs) and plastic type DSSCs (or flexible DSSCs) were fabricated by using multiwall carbon nanotubes (MWCNTs) mixing with polymer as counter electrodes. Heating time duration and acid modification on MWCNTs effects on the DSSC performance were studied. The modified multiwall carbon nanotubes (Modified-MWCNTs) mixed Poly 3,4-Ethylendioxythiophene-Poly Styrene Sulfonate (PEDOT-PSS) at various Modified-MWCNTs were also investigated. Working electrodes of glass type DSSCs were prepared by two techniques: (1) screen printing and (2) doctor blading. For flexible DSSCs, compression method was used in preparing TiO_2 film. The TiO_2 film thickness of screen printing technique and doctor blading technique is about 10 μm and about 8 μm, respectively. In case of MWCNTs mixed PVDF counter electrodes, the optimized heating time is 6 h. The efficiency of the modified MWCNTs DSSC is much higher than the non-modified carbon film for both glass and flexible DSSCs. I case of PEDOT-PSS, the optimized content of Modified MWCNTs was 0.4 g, with efficiency ~9.72% and observe that DSSCs not stability. However, the optimized content of Modified MWCNTs was 0.2 g, with efficiency ~3.48%.

วิทยานิพนธ์นี้ขอมอบส่วนดีแด่
บิดา มารดา และ คณาจารย์

กิตติกรรมประกาศ

ในงานวิจัยนี้ผู้ทำวิจัยขอขอบพระคุณ รศ.ดร. วิทยา อมรกิจบำรุง และ ดร.สมัคร์ พิมานแพง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำเกี่ยวกับการศึกษาวิจัย อบรมสั่งสอนให้มีความมุมานะพยายามทำงานวิจัยนี้จนสำเร็จ อีกทั้งเป็นแบบอย่างนักวิจัยที่ดี

ขอบพระคุณ ดร.วิรัตน์ เจริญบุญ ที่ได้ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงรวมทั้งคำแนะนำที่ดียิ่งในเรื่องการศึกษาและการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ทุกท่านที่กรุณาประสิทธิ์ประสาทความรู้และประสบการณ์อันมีค่ายิ่ง

ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่เอื้อเฟื้อวัสดุอุปกรณ์ และ เครื่องมือในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่เอื้อเฟื้อการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นที่ได้ให้กำลังใจ คอยดูแลและช่วยเหลือเป็นอย่างดีเสมอมา

สุดท้าย ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อบุญทัน และ คุณแม่ประเพ็ญ ไมอักรี ที่เป็นกำลังใจอันยิ่งใหญ่ในการศึกษา กรุณาอบรมสั่งสอนให้ลูกเป็นคนดี และทำงานหนักเพื่อลูกมาตลอด

วสันต์ ไมอักรี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
คำอุทิศ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 สถานที่ทำการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์	3
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 องค์ประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	5
2.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	8
2.3 การวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์	9
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	19
3.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (บนกระจกนำไฟฟ้า)	19
3.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงแบบพลาสติก	25
3.3 เทคนิคการวิเคราะห์	29
บทที่ 4 ผลการทดลอง	33
4.1 ผลการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (บนกระจกนำไฟฟ้า)	33
4.2 ผลการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงแบบพลาสติก	57
บทที่ 5 สรุป	68

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	69
ภาคผนวก	71
ประวัติผู้เขียน	74

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 4.1	สรุปค่า V_{oc} , J_{sc} , FF และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (η) ที่ใช้ฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนผสม PVDF บนกระจกนำไฟฟ้า อบที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นระยะเวลา 2, 4, 6, 8 และ 12 ชั่วโมง เป็นขั้วเคาน์เตอร์	38
ตารางที่ 4.2	สรุปค่า R_S, R_{CE}, R_{ct}, V_{oc}, J_{sc}, FF และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (η) ที่ใช้ฟิล์ม MWCNTs และ Modified-MWCNTs บนกระจกนำไฟฟ้า อบที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง และฟิล์ม Pt เป็นขั้วเคาน์เตอร์	44
ตารางที่ 4.3	สรุปค่า V_{oc}, J_{sc}, FF และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (η) ของ Modified-MWCNTs/PEDOT-PSS DSSC โดยปริมาณ Modified-MWCNTs เป็น 0.0 g, 0.1 g, 0.2 g, 0.3 g, 0.4 g, 0.5 g และ Pt บนกระจกนำไฟฟ้า	52
ตารางที่ 4.4	สรุปค่า V_{oc} , J_{sc} , FF และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (η) MWCNTs DSSC, Modified-MWCNTs DSSC และ Pt DSSC บนพลาสติกนำไฟฟ้า	62
ตารางที่ 4.5	สรุปค่า V_{oc}, J_{sc}, FF และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (η) ของ Modified-MWCNTs/PEDOT-PSS DSSC โดยปริมาณ Modified-MWCNTs เป็น 0.0 g, 0.1 g, 0.2 g, 0.3 g และ Pt บนพลาสติกนำไฟฟ้า	67

สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 2.1	ตัวอย่างสูตรโครงสร้างโมเลกุลสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูเทเนียม (Ru) ชนิดต่างๆ	7
ภาพที่ 2.2	วัฏจักรในการหมุนเวียนอิเล็กตรอนของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	9
ภาพที่ 2.3	วงจรเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น ในอุดมคติ	10
ภาพที่ 2.4	วงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็น	11
ภาพที่ 2.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ เมื่อ R_s ต่างๆ	12
ภาพที่ 2.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ เมื่อ R_{sh} ต่างๆ	12
ภาพที่ 2.7	วงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	13
ภาพที่ 2.8	แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็น กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	13
ภาพที่ 2.9	วงจรการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่าย	14
ภาพที่ 2.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส (I) กับความต่างศักย์ (V) ในการวัดความต่างศักย์และกระแสที่ไหลในวงจรมีสองกรณีที่น่าสนใจคือ	14
ภาพที่ 3.1	การเคลือบฟิล์มบนแผ่นกระจกนำไฟฟ้าด้วยวิธี Doctor Blading	20
ภาพที่ 3.2	การเคลือบฟิล์มบนแผ่นกระจกนำไฟฟ้าด้วยวิธี Screen Printing	21
ภาพที่ 3.3	การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	24
ภาพที่ 3.4	การอัด TiO_2 บนพลาสติกนำไฟฟ้า	25
ภาพที่ 3.5	การวางพาราฟิล์มลงบน Working-electrode	27
ภาพที่ 3.6	การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงแบบพลาสติก	28
ภาพที่ 3.7	การหยดสารละลายอิเล็คโตรไลต์	28
ภาพที่ 3.8	ระบบการวัดไซคลิคโวลแทมเมตรี (Cyclic Voltammetry, CV)	30
ภาพที่ 3.9	วงจรสมมูลของ DSSC และ Nyquist plots ของ DSSC	32
ภาพที่ 4.1	ภาพถ่ายของฟิล์ม TiO_2 ที่เคลือบด้วยวิธี Doctor Blading บนกระจกนำไฟฟ้า FTO	34
ภาพที่ 4.2	ภาพถ่ายของฟิล์ม TiO_2 ที่เคลือบด้วยวิธี Screen Printing บนกระจกนำไฟฟ้า FTO	36

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 4.3	การดูดกลืนแสงปริมาณของสีย้อม ชนิด N719 ที่เกาะบนฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่เคลือบด้วยวิธี Doctor Blading และ Screen Printing บนกระจกนำไฟฟ้า ในช่วงความยาวคลื่น 250-700 nm	37
ภาพที่ 4.4	ฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนและฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนที่ปรับแต่งผิวด้วยกรดบนกระจกนำไฟฟ้า	39
ภาพที่ 4.5	ภาพถ่าย SEM ของฟิล์ม MWCNT ที่เคลือบบนกระจกนำไฟฟ้า	40
ภาพที่ 4.6	หมู่คาร์บอกซิลบนผิวของท่อนาโนคาร์บอนเมื่อผ่านการกัดด้วยกรด	41
ภาพที่ 4.7	Cyclic Voltammograms ของฟิล์ม MWCNT, Modified-MWCNTs และ Pt ใน สารละลาย Acetronitrile 10 mM LiI, 1 mM I_2 and 0.1 M $LiClO_4$ โดยใช้ Scan rate ที่ 20 mV/s	42
ภาพที่ 4.8	ภาพถ่ายของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (บนกระจกนำไฟฟ้า)	43
ภาพที่ 4.9	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ MWCNTs DSSC, Modified-MWCNTs DSSC และ Pt DSSC บนกระจกนำไฟฟ้า	43
ภาพที่ 4.10	วงจรสมมูลของ DSSCs และ Nyquist plots ของ MWCNTs DSS, Modified-MWCNTs DSSC และ Pt DSSC ที่ AC amplitude 10 mV ความถี่จาก 0.1Hz ถึง 100,000 Hz	45
ภาพที่ 4.11	ภาพถ่ายฟิล์ม Modified-MWCNTs ผสม PEDOT-PSS บนกระจกนำไฟฟ้า	46
ภาพที่ 4.12	ภาพถ่าย SEM ฟิล์ม Modified-MWCNTs ปริมาณต่างๆ ผสม PEDOT-PSS บนกระจกนำไฟฟ้า	47
ภาพที่ 4.13	ภาพถ่าย SEM ฟิล์ม Modified-MWCNTs ปริมาณต่างๆ ผสม PEDOT-PSS บนกระจกนำไฟฟ้า	48

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 4.14	(a) Cyclic Voltammograms ของฟิล์ม Pt และ PEDOT-PSS บนกระจกนำไฟฟ้า ในสารละลาย Acetronitrile 10 mM LiI, 1 mM I_2 and 0.1 M $LiClO_4$ โดยใช้ Scan rate ที่ 20 mV/s (b) Cyclic Voltammograms ของฟิล์ม Modified-MWCNTs ปริมาณต่างๆ ผสม PEDOT-PSS บนกระจกนำไฟฟ้า ในสารละลาย Acetronitrile 10 mM LiI, 1 mM I_2 and 0.1 M $LiClO_4$ โดยใช้ Scan rate ที่ 20 mV/s	50
ภาพที่ 4.15	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ ของ Modified-MWCNTs/PEDOT-PSS DSSC โดยปริมาณ Modified-MWCNTs เป็น 0.0 g, 0.1 g, 0.2 g, 0.3 g, 0.4 g, 0.5 g ตามลำดับซึ่งมีการเปรียบเทียบกับ Pt DSSC	51
ภาพที่ 4.16	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Modified-MWCNTs กับประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์	52
ภาพที่ 4.17	Nyquist plots ของ Modified-MWCNTs /PEDOT-PSS DSSC และ Pt DSSC	53
ภาพที่ 4.18	กราฟของ (a) ความหนาแน่นกระแสวงจรปิด (J_{sc}) (b) ความต่างศักย์วงจรเปิด (V_{oc}) (c) Fill Factor (FF) และ (d) ประสิทธิภาพ (η) พบกับ ระยะเวลา	55
ภาพที่ 4.19	Nyquist plots ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่วัดในวันแรกและวัดในวันที่ 30	56
ภาพที่ 4.20	ภาพถ่ายของฟิล์ม TiO_2 บนพลาสติกนำไฟฟ้า (a) ก่อนอัด (b) หลังอัด (c) ภาพ SEM ถ่ายด้านบน และ (d) ภาพ SEM ถ่ายตามขวาง	57
ภาพที่ 4.21	กราฟการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของ Dye ชนิด N719 ที่เกาะบนฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์บนพลาสติกนำไฟฟ้า 3 ตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 250-700 nm	58
ภาพที่ 4.22	ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบน ITO/PEN (a) MWCNTs กำลังขยายต่ำ (b) MWCNTs กำลังขยายสูง (c) Modified-MWCNTs กำลังขยายต่ำ (d) Modified-MWCNTs กำลังขยายสูง	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 4.23	Cyclic Voltammograms ของฟิล์ม MWCNTs และ Modified-MWCNTs บน ITO/PEN ในสารละลาย acetronitrile 10 mM LiL, 1 mM I_2 and 0.1 M $LiClO_4$ โดยใช้ Scan rate ที่ 20 mV/s	60
ภาพที่ 4.24	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ ของ MWCNTs DSSC, Modified-MWCNTs DSSC และ Pt DSSC บนพลาสติกนำไฟฟ้า	61
ภาพที่ 4.25	ภาพถ่ายฟิล์ม Modified-MWCNT ผสม PEDOT-PSS บนพลาสติกนำไฟฟ้าที่อัตราส่วน Modified-MWCNTs 0 g (PEDOT-PSS), Modified-MWCNTs 0.1 g, Modified-MWCNTs 0.2 g และ Modified-MWCNTs 0.3 g	63
ภาพที่ 4.26	ภาพถ่าย SEM ของฟิล์ม Modified-MWCNTs ผสม PEDOT-PSS บนพลาสติกนำไฟฟ้าในอัตราส่วน (a) Modified-MWCNTs 0 g (b) Modified-MWCNTs 0.1 g (c) Modified-MWCNTs 0.2 g และ (d) Modified-MWCNTs 0.3g	64
ภาพที่ 4.27	Cyclic Voltammograms ของฟิล์ม Modified-MWCNTs ปริมาณต่างๆ ผสม PEDOT-PSS และฟิล์ม Pt บนพลาสติกนำไฟฟ้า ในสารละลาย Acetronitrile 10 mM LiI, 1 mM I_2 and 0.1 M $LiClO_4$ โดยใช้ Scan rate ที่ 20 mV/s	65
ภาพที่ 4.28	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ ของ Modified-MWCNTs/PEDOT-PSS DSSC โดยปริมาณ Modified-MWCNTs เป็น 0.0 g, 0.1 g, 0.2 g, 0.3 g และ Pt บนพลาสติกนำไฟฟ้า	66
ภาพที่ 4.29	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับปริมาณ Modified-MWCNTs บนพลาสติกนำไฟฟ้า	67