สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

# การสร้างโซล่าเซลล์ชนิด DSSC โดยใช้ CNTs เป็นขั้วไฟฟ้า

# Fabrication of Dye-sensitized solar cells by using CNTs electrode

นาย วรพล ทรงแสงธรรม

นาย ศุภชัย ชมชื่น

นายสุพศิน วิทยาธรรัตน์

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 117488
วัน,เดือน,ปี 5 ธ.ค. 2554

b 10311095
i

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา อิเล็กทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

# การสร้างโซล่าเซลล์ชนิด DSSC โดยใช้ CNTs เป็นขั้วไฟฟ้า

# Fabrication of Dye-sensitized solar cells by using CNTs electrode


นายวรพล ทรงแสงธรรม รหัส 50011367

นายศุภชัย ชมชื่น รหัส 50011586

นายสุพศิน วิทยาธรรัตน์ รหัส 50011739


**อาจารย์ที่ปรึกษา**

รศ.ดร.สุธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา อิเล็กทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553


ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2553

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การสร้างโซล่าเซลล์ชนิด DSSC โดยใช้ CNT เป็นขั้วไฟฟ้า



ผู้จัดทำ 1. นายวรพล ทรงแสงธรรม

2. นายศุภชัย ชมชื่น

3. นายสุพศิน วิทยาธรรัตน์


..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.สุธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์)

# กิตติกรรมประกาศ

โครงงานครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ อาจารย์สุธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษา ให้ข้อมูล แนวคิด และข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์เป็นอย่างมาก คณะผู้จัดทำโครงงานจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ อีกทั้งบุคคลอื่นๆที่ไม่ได้กล่าวนาม ก็จักขอขอบคุณไว้ณ ที่นี้ด้วย ที่ให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือตลอดมา

# การสร้างโซล่าเซลล์ชนิด DSSC โดยใช้ CNTs เป็นขั้วไฟฟ้า

นาย วรพล ทรงแสงธรรม 50011367

นาย ศุภชัย ชมชื่น 50011586

นาย สุพศิน วิทยาธรรัตน์ 50011739

รศ.ดร. สุธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ อาจารย์ปรึกษา

## บทคัดย่อ

โครงงานนี้ได้พยายามที่จะพัฒนาโซลาเซลล์ชนิดสีย้อมเพื่อเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ถูกกว่าโซลาเซลล์ชนิดซิลิคอน โดยการใช้คาร์บอนนาโนทิวป์เป็นขั้วไฟฟ้าแทนแพลทินัม ฟิล์มบางของคาร์บอนนาโนทิวป์ถูกสร้างขึ้นด้วยเทคนิคการสเปรย์ ผลกระทบต่อปัจจัยต่างๆเช่นความหนาของฟิล์มและการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิในการอบคาร์บอนนาโนทิวป์ถูกทำขึ้นจนสำเร็จในการเปรียบเทียบกับเซลล์ซึ่งใช้ฟิล์มแพลทินัม

# Fabrication of Dye-sensitized solar cells by using CNTs electrode

Mr. Vorapon Songsangtum 50011367

Mr. Supachai Chomchun 50011586

Mr. Supasin wittayatonrat 50011739

Assoc. Professor.Dr.Sutichai Chaisitisak (Advisor)

**Abstract**

This project has tried to develop dry-sensitized solar cells , known as a cheap alternative to silicon solar cells , by using cabon-nanotube (CNT) electrode instead of platinum electrode. Cabon-nanotube (CNT) thin films were deposited by using a spray technique . The effect of preparing parameters such as film-thickness and annealing temperature of the Cabon-nanotube (CNT) films on solar cell performances was investigated in comparison with cells using platinum films

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....1

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....2

สารบัญ.....3

บทที่ 1 บทนำ.....8

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....8

1.2 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์ .....10

1.3 บทบาทของ Dye-sensitized solar cells .....14

1.4 วัตถุประสงค์ .....15

บทที่ 2 ทฤษฎี.....17

2.1 ประวัติการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดดายเซนซิไทซ์.....17

2.2 หลักการทำงานของรอยต่อสารกึ่งตัวนำและอิเล็กโตรไลต์.....18

2.3 ส่วนประกอบและโครงสร้างของ Dye-sensitized solar cells.....23

2.4 หลักการทำงานของ Dye-sensitized solar cells.....24

2.5 หลักการพิมพ์สกรีน ( screen printing ).....26

บทที่ 3 วิธีการทดลอง.....28

3.1 อุปกรณ์ในการทดลอง.....28

3.1.1 สารเคมีในการทดลอง.....28

3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....28

3.2 ขั้นตอนการสร้าง Dye-sensitized solar cells.....29

3.2.1 ขั้นตอนการสร้างขั้วลบ($TiO_2$)และการสร้างขั้วบวกด้วยแพลตินัม.....29

หน้า

3.2.2 ขั้นตอนการสร้างขั้วบวกด้วยคาร์บอนนาโนทิวป์(CNTs)ด้วยวิธีสเปรย์.....30

3.2.2.1 ทดลองเพิ่มเวลาในการ Ultrasonic CNTs.....30

3.2.2.2 ทดลองเพิ่มความหนาของ CNTs.....30

3.2.2.3 ทดลองเพิ่มอุณหภูมิในการอบCNTs.....31

3.2.3 ขั้นตอนการประกบ.....31

3.3 ขั้นตอนการวัด.....32

บทที่ 4 ผลการทดลอง .....33

4.1 ผลของจำนวนชั้น ( layer ) $TiO_2$ ต่อประสิทธิภาพของเซลล์.....33

4.1.1 ผลการทดลองสกรีน $TiO_2$ 1 layer .....33

4.1.2 ผลการทดลองสกรีน $TiO_2$ 2 layer.....34

4.1.3 ผลการทดลองสกรีน $TiO_2$ 3 layer.....34

4.1.4 ผลการทดลองสกรีน $TiO_2$ 4 layer.....35

4.1.5 ผลการทดลองสกรีน $TiO_2$ 5 layer.....35

4.1.6 ผลการทดลองสกรีน $TiO_2$ 6 layer.....36

4.1.7 ผลการทดลองสกรีน $TiO_2$ 7 layer.....36

4.1.8 ผลการทดลองสกรีน $TiO_2$ 8 layer.....37

4.1.9 ผลการทดลองสกรีน $TiO_2$ 9 layer.....37

4.1.10 กราฟแสดงค่าตัวแปรของจำนวนชั้น $TiO_2$ .....38

4.1.11 วิเคราะห์ผลการทดลองเมื่อเพิ่มจำนวนชั้น $TiO_2$ .....39

4.2 ผลการทดลองเมื่อใช้ CNTs เป็นขั้วบวก.....40

4.2.1 ผลการทดลองเปลี่ยนเวลาในการ Tip CNTs.....40

4.2.1.1 เวลาในการ Tip 35 วินาที .....40

4.2.1.2 เวลาในการ Tip 5 นาที .....41

4.2.1.3 เวลาในการ Tip 10 นาที .....41

4.2.1.4 กราฟแสดงตัวแปรต่างๆ โดยการเปลี่ยนเวลาในการTip.....41

หน้า

4.2.1.5 วิเคราะห์ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนเวลาในการ Tip……..43

4.2.2 ผลการทดลองเปลี่ยนความหนาของ CNTs……..……..43

4.2.2.1 ความหนา CNTs 0 ชั้น ……..43

4.2.2.2 ความหนา CNTs 3 ชั้น ……..44

4.2.2.3 ความหนา CNTs 5 ชั้น ……..44

4.2.2.4 ความหนา CNTs 6 ชั้น ……..45

4.2.2.5 ความหนา CNTs 10 ชั้น ……..45

4.2.2.6 ความหนา CNTs 15 ชั้น ……..46

4.2.2.7 ความหนา CNTs 20 ชั้น ……..46

4.2.2.8 ความหนา CNTs 25 ชั้น ……..47

4.2.2.9 ความหนา CNTs 30 ชั้น ……..47

4.2.2.10 ความหนา CNTs 35 ชั้น……..48

4.2.2.11 ความหนา CNTs 40 ชั้น……..48

4.2.2.12 กราฟแสดงค่าตัวแปรต่างๆ โดยการเปลี่ยนความหนาของ CNTs……..49

4.2.2.13 วิเคราะห์ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนความหนาของ CNTs ……..50

4.2.3 ผลการทดลองเปลี่ยนเวลาในการอบ CNTs……..……..50

4.2.3.1 อบ CNTs ที่อุณหภูมิ 80 °C……..……..50

4.2.3.2 อบ CNTs ที่อุณหภูมิ 150 °C……..……..51

4.2.3.3 อบ CNTs ที่อุณหภูมิ 200 °C……..……..51

4.2.3.4 อบ CNTs ที่อุณหภูมิ 250 °C……..……..52

4.2.3.5 อบ CNTs ที่อุณหภูมิ 350 °C……..……..52

4.2.3.6 อบ CNTs ที่อุณหภูมิ 400 °C……..……..53

4.2.3.7 กราฟแสดงค่าตัวแปรต่างๆ โดยการเปลี่ยนอุณหภูมิในการอบ CNTs ……54

4.2.3.8 วิเคราะห์ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิในการอบ CNTs……..55

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง……..……..56

เอกสารอ้างอิง ……..……..57

# สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 ระบบการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ .....9

รูปที่ 1.2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกรูปเดี่ยว .....11

รูปที่ 1.3 เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกหลายรูป .....12

รูปที่ 1.4 เซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน..... 14

รูปที่ 1.5 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดดายเซนซิไทซ์ .....16

รูปที่ 2.1 ความพรุนสูงของผลึกนาโนไทเทเนียมกับการดูดซับสีย้อมไวแสง .....18

รูปที่ 2.2 แผนภูมิระดับพลังงานของรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและอิเล็กโตรไลต์..... 20

รูปที่ 2.3 แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อสารกึ่งตัวนำและของเหลว..... 21

รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดดายเซนซิไทซ์ .....23

รูปที่ 2.5 กลไกการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดดายเซนซิไทซ์ ..... 24

รูปที่ 2.6 ลักษณะการแผ่รังสีแบบ AM 1.5 .....26

รูปที่ 2.7 การพิมพ์สกรีน..... 27

รูปที่ 3.1 เครื่อง Ultra sonic แบบ Tip .....29

รูปกราฟที่ 4.1.1 ผลการทดลองสกรีน TiO2 1 layer .....33

รูปกราฟที่ 4.1.2 ผลการทดลองสกรีน TiO2 2 layer.....34

รูปกราฟที่ 4.1.3 ผลการทดลองสกรีน TiO2 3 layer.....34

รูปกราฟที่ 4.1.4 ผลการทดลองสกรีน TiO2 4 layer.....35

รูปกราฟที่ 4.1.5 ผลการทดลองสกรีน TiO2 5 layer.....35

หน้า

รูปกราฟที่ 4.1.6 ผลการทดลองสกรีน TiO2 6 layer.....36

รูปกราฟที่ 4.1.7 ผลการทดลองสกรีน TiO2 7 layer.....36

รูปกราฟที่ 4.1.8 ผลการทดลองสกรีน TiO2 8 layer.....37

รูปกราฟที่ 4.1.9 ผลการทดลองสกรีน TiO2 9 layer.....37

รูปกราฟที่ 4.2.10 ผลการทอลองใช้ CNTs เป็นขั้ว โดย Tip ที่เวลา 35 วินาที.....40

รูปกราฟที่ 4.2.11 ผลการทอลองใช้ CNTs เป็นขั้ว โดย Tip ที่เวลา 5 นาที.....41

รูปกราฟที่ 4.2.12 ผลการทอลองใช้ CNTs เป็นขั้ว โดย Tip ที่เวลา 10 นาที.....41

รูปกราฟที่ 4.2.13 ผลการทอลองใช้ CNTs เป็นขั้ว โดยมีความหนา 0 ชั้น.....43

รูปกราฟที่ 4.2.14 ผลการทอลองใช้ CNTs เป็นขั้ว โดยมีความหนา 3 ชั้น.....44

รูปกราฟที่ 4.2.15 ผลการทอลองใช้ CNTs เป็นขั้ว โดยมีความหนา 5 ชั้น.....44

รูปกราฟที่ 4.2.16 ผลการทอลองใช้ CNTs เป็นขั้ว โดยมีความหนา 6 ชั้น.....45

รูปกราฟที่ 4.2.17 ผลการทอลองใช้ CNTs เป็นขั้ว โดยมีความหนา 10 ชั้น.....45

รูปกราฟที่ 4.2.18 ผลการทอลองใช้ CNTs เป็นขั้ว โดยมีความหนา 15 ชั้น.....46

รูปกราฟที่ 4.2.19 ผลการทอลองใช้ CNTs เป็นขั้ว โดยมีความหนา 20 ชั้น.....46

รูปกราฟที่ 4.2.20 ผลการทอลองใช้ CNTs เป็นขั้ว โดยมีความหนา 25 ชั้น.....47

รูปกราฟที่ 4.2.21 ผลการทอลองใช้ CNTs เป็นขั้ว โดยมีความหนา 30 ชั้น.....47

รูปกราฟที่ 4.2.22 ผลการทอลองใช้ CNTs เป็นขั้ว โดยมีความหนา 35 ชั้น.....48

รูปกราฟที่ 4.2.23 ผลการทอลองใช้ CNTs เป็นขั้ว โดยมีความหนา 40 ชั้น.....48

รูปกราฟที่ 4.2.24 ผลการทอลองใช้ CNTs เป็นขั้ว โดยอบที่อุณหภูมิ 80°C .....50

รูปกราฟที่ 4.2.25 ผลการทอลองใช้ CNTs เป็นขั้ว โดยอบที่อุณหภูมิ 150°C .....51

รูปกราฟที่ 4.2.26 ผลการทอลองใช้ CNTs เป็นขั้ว โดยอบที่อุณหภูมิ 200°C .....51

รูปกราฟที่ 4.2.27 ผลการทอลองใช้ CNTs เป็นขั้ว โดยอบที่อุณหภูมิ 250°C .....52

รูปกราฟที่ 4.2.28 ผลการทอลองใช้ CNTs เป็นขั้ว โดยอบที่อุณหภูมิ 350°C .....52

รูปกราฟที่ 4.2.29 ผลการทอลองใช้ CNTs เป็นขั้ว โดยอบที่อุณหภูมิ 400°C .....53

# บทที่ 1

# บทนำ

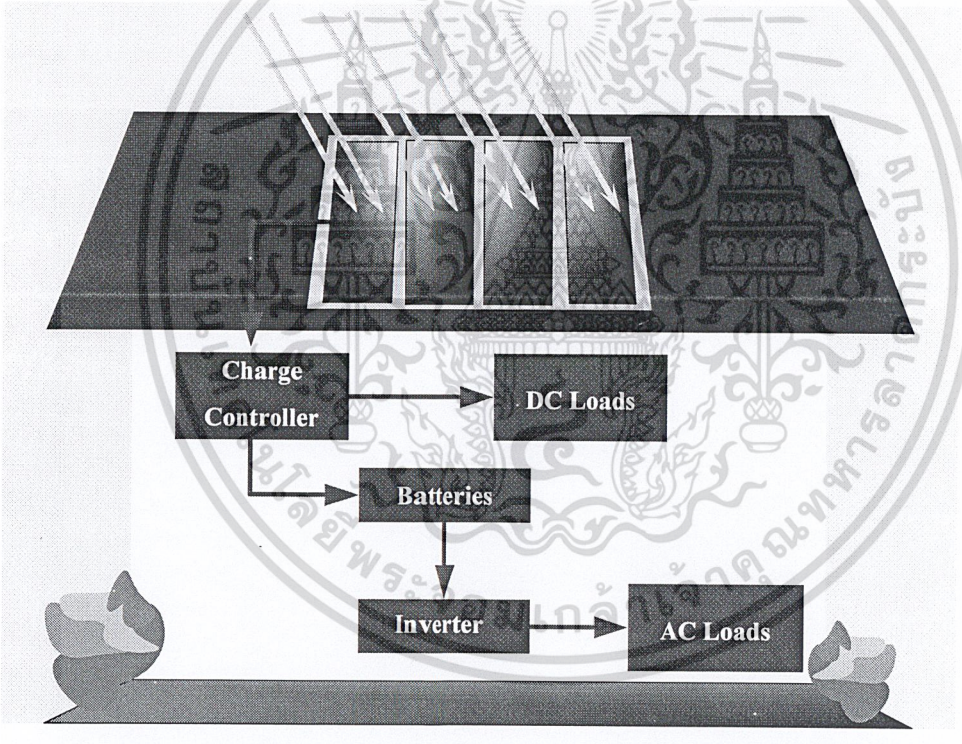
## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการพยายามหาแหล่งพลังงานทดแทนเป็นสิ่งที่ทั่วโลกกำลังเร่งศึกษา วิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพราะพลังงานเป็นสิ่งจำเป็นขั้นพื้นฐานทั้งทางตรงและทางอ้อมของการเกิด และดำรงอยู่ของชีวิตทั้งหลาย รูปแบบของพลังงานที่ใช้กันมากส่วนใหญ่อยู่ในรูปพลังงานความร้อน และพลังงานไฟฟ้า ซึ่งแหล่งกำเนิดพลังงานหลักๆในปัจจุบัน คือ น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ พลังงานจากเชื้อเพลิงต่างๆเหล่านี้ นอกจากจะมีปริมาณจำกัดแล้ว ยังสร้างปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อม รวมถึงทำลายชั้นบรรยากาศของโลกด้วย ส่วนพลังงานไฟฟ้าจากเขื่อนกั้นน้ำนั้น ได้พัฒนาไปถึงจุดอิ่มตัวแล้วสำหรับเกือบทุกประเทศ โดยปัจจุบันโลกใช้พลังงานจากฟอสซิล 95% (น้ำมัน 42% ถ่านหิน 28% ก๊าซธรรมชาติ 25%) พลังงานทดแทนประเภทพลังน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ ลม คลื่น ชีวมวล 3% และพลังงานนิวเคลียร์ 2% ในขณะที่พลังงานสำรองของโลกประเภทน้ำมัน ก๊าซธรรมชาติและถ่านหินยังคงเหลือให้ใช้ไปได้อีกเพียง 40, 62 และ 218 ปี ตามลำดับ

พลังงานไฟฟ้าถือว่าปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญของการพัฒนาประเทศ จากการคาดการณ์พบว่าแหล่งพลังงานสำรองของประเทศมีปริมาณก๊าซธรรมชาติ 33 ล้านล้านลูกบาศก์ฟุต สามารถสำรองใช้ได้อีกประมาณ 30 ปี มีถ่านหินปริมาณ 1,330 ล้านตัน สามารถสำรองใช้ได้อีกประมาณ 62 ปี และมีปริมาณน้ำมันดิบ 714 ล้านบาร์เรล สามารถสำรองใช้ได้อีกประมาณ 62 ปี อย่างไรก็ตามจากอัตราการเติบโตของประเทศที่เพิ่มขึ้น เพื่อไปสู่ประเทศอุตสาหกรรมใหม่ ทำให้ประเทศไทยยังคงต้องมีการนำเข้าเชื้อเพลิงต่างประเทศเพื่อมาผลิตเป็นพลังงานต่อไป ดังนั้นเพื่อเป็นการลดการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ เพื่อความมั่นคงด้านพลังงานประเทศไทยจำเป็นต้องค้นคว้าวิจัยพลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆ เช่น ความร้อนใต้พิภพ พลังงานลม พลังงานคลื่น พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อสร้างไฟฟ้า รวมทั้งความร้อนในกลุ่มพลังงานใหม่เหล่านี้ พลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างเด่นกว่าชนิดอื่น เพราะมีอยู่ทั่วไปเป็นพลังงานธรรมชาติที่สะอาดไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่ไม่มีวันหมด ดังนั้นการใช้พลังงาน

แสงอาทิตย์ในการสร้างพลังงานไฟฟ้าโดยตรงจึงเป็นสิ่งที่หลายประเทศกำลังพยายามพัฒนาให้สำเร็จทั้งในด้านเทคโนโลยี และเศรษฐกิจ เพราะนอกจากจะแก้ปัญหาข้อจำกัดของเชื้อเพลิงธรรมชาติแล้ว ยังจะแก้ปัญหาในด้านมลพิษด้วย ซึ่งการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงนั้น สามารถทำได้โดยอาศัยตัวเปลี่ยนพลังงานที่เรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ หรือ โซลาร์เซลล์ (solar cells)

เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นประดิษฐ์กรรมทางอิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสงเซลล์จะจ่ายไฟฟ้าออกมา ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์นี้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current : DC) พลังงานไฟฟ้าที่ได้สามารถนำไปใช้ได้ทันที หรืออาจมีอุปกรณ์ร่วมเพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current : AC) แล้วจึงนำไปใช้เพื่อให้อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆทำงานได้ต่อไป ดังรูปที่ 1.1




**รูปที่ 1.1** ระบบการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์

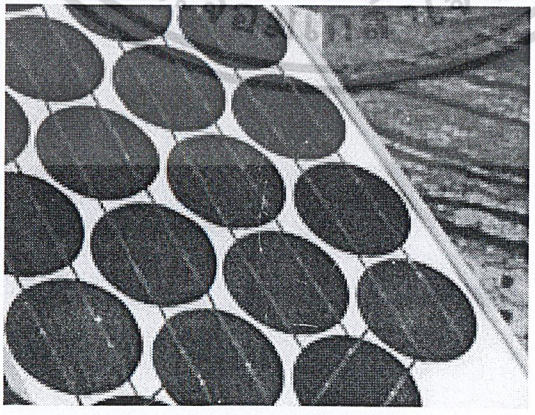
เซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาและใช้งานในปัจจุบันนั้น แทบทั้งหมดทำจากธาตุซิลิคอน ซึ่งเป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับสองบนโลกรองจากออกซิเจน ทำให้ซิลิคอนเป็นธาตุที่มีมากมายเหลือใช้ แต่การนำมาทำ

ให้บริสุทธิ์ใช้งานได้ ต้องใช้เทคโนโลยีชั้นสูงในกระบวนการผลิต และต้องอาศัยบุคลากรที่มีความรู้ความชำนาญสูงซึ่งจะทำให้ต้นทุนในกระบวนการผลิตสูงตามไปด้วย

## 1.2 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์

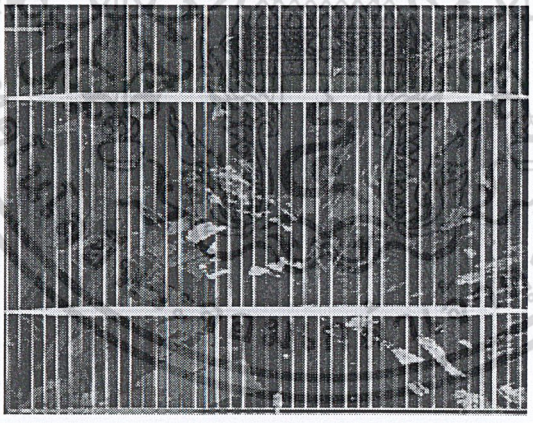
เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานในปัจจุบันมากกว่า 95% ทำมาจากซิลิคอน อันประกอบไปด้วยผลึกรูปเดี่ยวของซิลิคอน (single crystalline Si) ผลึกหลายรูปของซิลิคอน (multi crystalline Si) และอะมอร์ฟัสซิลิคอน (amorphous Si) ในที่นี้มากกว่า 90% อยู่ในรูปของผลึกซิลิคอนเพียงอย่างเดียว ดังนั้น เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากผลึกของซิลิคอนสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ คือ

1. แบบผลึกรูปเดี่ยว (single crystal or monocrystalline wafers) เป็นการนำเอาซิลิคอนที่มีความบริสุทธิ์สูงมาก (99.999%) ไปหลอมละลายที่อุณหภูมิสูงถึง 1500 องศาเซลเซียสเพื่อการสร้างแท่งผลึกขนาดใหญ่ซึ่งได้จากกระบวนการโชคราลสกี้ (Czochralski process) ต่อไปก็นำแท่งผลึกรูปเดี่ยวมาตัดเป็นแผ่นๆ เรียกว่าเวเฟอร์มีความหนาประมาณ 300 ไมโครเมตรหลังจากตัดแล้วก็ต้องนำมาขัดให้เรียบจากนั้นก็ต้องนำไปเจือสารเพื่อให้เกิดคุณสมบัติทางไฟฟ้าเกิดเป็น p-n junction ขึ้นด้วยกระบวนการ diffusion ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ต่อจากนั้นก็นำแผ่นเวเฟอร์ที่ได้ไปสร้างขั้วไฟฟ้าเพื่อนำกระแสไฟฟ้าออกมาใช้งาน และขั้นตอนสุดท้ายเป็นการเคลือบฟิล์มผิวหน้าเพื่อลดการสะท้อนของแสงให้น้อยที่สุด จากกระบวนการผลิตที่ยุ่งยากซับซ้อนต้องการเทคโนโลยีที่สามารถผลิตซิลิคอนที่มีความบริสุทธิ์สูงทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้มีราคาค่อนข้างแพงมาก อย่างไรก็ตามเซลล์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงอยู่ที่ประมาณ 16-20% เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกรูปเดี่ยวแสดงดังรูปที่ 1.2



**รูปที่ 1.2** เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกรูปเดี่ยว

2. แบบผลึกหลายรูป (poly or multi crystalline) ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาต้นทุนสูงของแบบผลึกรูปเดี่ยวของซิลิคอน ผลึกโพลีหรือโพลีซิลิคอนคือ แท่งซิลิคอนที่เกิดจากการรวมตัวกันของผลึกเล็กๆ (ขนาดระดับไมโครเมตรถึงระดับมิลลิเมตร) ของซิลิคอนแบบผลึกรูปเดี่ยว โดยจะเทซิลิคอนที่หลอมเหลวลงในเบ้าหลอม (crucible) แล้วปล่อยให้เย็นลงอย่างช้าๆ ซึ่งก็จะได้แท่งของโพลีซิลิคอนที่มีรูปร่างตามเบ้าหลอมที่ใช้ หลังจากนั้น การนำไปทำเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ก็จะคล้ายกับกรณีของแบบผลึกรูปเดี่ยว คือ นำไปตัดเป็นเวเฟอร์ (wafer) หนาขนาด 300 - 400 ไมโครเมตร แล้วนำไป diffusion ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสเกิดเป็น p-n junction เซลล์ชนิดนี้มีต้นทุนที่ถูกกว่าแบบผลึกรูปเดี่ยวแต่ก็มีประสิทธิภาพน้อยกว่าด้วย (ประมาณ 15 - 16%) อย่างไรก็ตาม ข้อได้เปรียบอีกอย่างหนึ่งของเซลล์แบบผลึกโพลี คือ รูปร่างของแผ่นเซลล์ซึ่งสามารถทำเป็นรูปสี่เหลี่ยมได้ ทำให้มีช่องว่างบนแผงเซลล์น้อยกว่าแบบแผ่นกลม ทำให้สามารถดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ได้มากกว่าแบบแผ่นกลมถึง 25% เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกหลายรูปแสดงดังรูปที่ 1.3



**รูปที่ 1.3** เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกหลายรูป

3. แบบริบบอน (ribbon silicon) เทคโนโลยีของการสร้างแผ่นผลึกทั้งแบบผลึกรูปเดี่ยวที่เป็นแผ่นกลม และแบบผลึกหลายรูปที่เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมนั้น ยังคงเป็นกระบวนการที่สิ้นเปลืองวัสดุอยู่ เนื่องจากต้องมีการตัดแผ่นผลึกทำให้ต้องเสียเนื้อของซิลิคอนไปส่วนหนึ่ง จึงได้มีการปรับปรุงเทคนิคต่างๆ เพื่อนำมาใช้ในการสร้างแผ่นซิลิคอนให้เป็นแผ่นบาง และยาว ที่เรียกว่า ริบบอน (ribbon) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบ

ผลึกหลายรูป ทำให้ไม่ต้องเสียเนื้อซิลิคอนในการตัดให้เป็นแผ่นบางๆ เทคนิคในการสร้างแผ่นผลึกแบบริบบอนมีอยู่หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้กันมีอยู่ 2 วิธี คือ วิธีอีเอฟจี และเดนดริติค (dentritic)

อีเอฟจี (EFG) ย่อมาจาก Edge-defined film-fed growth เป็นวิธีการสร้างแผ่นผลึกที่คล้ายกับวิธีของโชคราลสกี้ ที่ต้องใช้เมล็ดผลึกไปล่อ และดึงซิลิคอนให้ผ่านขึ้นมาทางช่องเล็กๆ บางๆ ที่ทำด้วยแกรไฟต์ เพื่อให้ซิลิคอนฟอร์มตัวเป็นรูปสี่เหลี่ยมยาวตามที่ต้องการ แผ่นผลึกที่ผลิตด้วยวิธีนี้จะมีความหนาราว 150-300 ไมครอน มีความกว้างตั้งแต่ 5-10 เซนติเมตร ข้อเสียของริบบอนแบบอีเอฟจีนี้ คือ มีโครงสร้างของผลึกที่ไม่ดีนักเมื่อเทียบกับวิธีของโชคราลสกี้และการที่ซิลิคอนต้องถูกหลอมเหลวอยู่ภายในเบ้าหลอมแล้ว ยังต้องมีการดึงผ่านช่องแคบๆ ของแกรไฟท์อีก วิธีการเช่นนี้ ทำให้แผ่นผลึกที่ได้มีความไม่สมบูรณ์สูง เนื่องจากสิ่งแปลกปลอม และสารเจือปนต่างๆจากเบ้าหลอมและแผ่นแกรไฟต์สามารถเข้าไปในเนื้อซิลิคอนได้ง่าย วิธีการที่สามารถจะลดความไม่บริสุทธิ์ของแผ่นผลึกแบบริบบอนได้ก็คือ วิธีการแบบเดนดริติค

การดึงแผ่นผลึกริบบอนแบบเดนดริติค จะใช้เมล็ดผลึกไปล่อ และดึงซิลิคอนให้ผ่านขึ้นมาทางช่องที่มีอยู่เฉพาะตรงขอบทั้ง 2 ด้าน เพื่อให้ซิลิคอนฟอร์มตัวเป็นรูปสี่เหลี่ยมในแบบริบบอน แผ่นผลึกที่สร้างด้วยวิธีนี้จะมีความบริสุทธิ์สูงใกล้เคียงกับวิธีของโชคราลสกี้ เมื่อนำไปสร้างเซลล์จะได้เซลล์ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบอีเอฟจี

ต้นทุนของเซลล์แบบริบบอนนั้นถือว่าถูกกว่าแบบชนิดอื่นเพราะมีการสูญเสียซิลิคอนน้อยกว่าทุกวิธี แต่เซลล์ที่ได้ก็มีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าแบบอื่นคือประมาณ 13.5 - 15% และมีราคาจำหน่ายที่สูงเนื่องจากการผลิตที่ต่ำ

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากผลึกของซิลิคอนทั้ง 3 แบบดังกล่าว ถือเป็นอุตสาหกรรมที่รองรับเทคโนโลยีการผลิตเซลล์จากแผ่นเวเฟอร์ (wafer-based manufacturing) เนื่องจากเป็นการนำแผ่นซิลิคอนหรือเวเฟอร์ (wafer) ที่มีความหนาระหว่าง 180-240 ไมโครเมตร มาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ และนำเซลล์แต่ละเซลล์มาต่อเชื่อมกันให้เป็นโมดูล (module) ก่อนนำไปใช้ ในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์จากฟิล์มบาง (thin film) ถือเป็นอุตสาหกรรมที่รองรับเทคโนโลยีการผลิตเซลล์จากโมดูล หรือ แผงเซลล์ (module-based manufacturing) เพราะแผงเซลล์ที่เป็นฐานรองนั้นจะถูกเคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางต่างๆ ตามที่ต้องการ และทำการตัดออกเป็นแต่ละเซลล์ด้วยแสงเลเซอร์ (laser scribe) ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากฟิล์มบางที่ใช้อยู่ในปัจจุบันสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ

1. แบบฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน (amorphous silicon films) เซลล์แสงอาทิตย์แบบ

อะมอร์ฟัส มีวิธีการผลิตที่ต่างจากแบบผลึกโดยสิ้นเชิง ซึ่งเป็นลักษณะของแผ่นฟิล์มบางไม่ใช่เวเฟอร์ โดยจะสร้างแผ่นฟิล์มบางของซิลิคอนบนแผ่นฐานรองด้วยเทคนิคที่เรียกว่า CVD (Chemical Vapor Deposition) ซึ่งจะมีระบบนำก๊าซที่มีซิลิคอนติดอยู่ เช่น ก๊าซไซเรน ($SiH_4$) ผ่านเข้าไปในท่อสุญญากาศ และตรงบริเวณที่วางแผ่นฐานรองก็จะมีการกระตุ้น เช่น โดยใช้พลาสมา เพื่อส่งพลังงานให้ซิลิคอนแยกตัวออกจากก๊าซเข้าไปจับตัวกันบนแผ่นฐานรอง โดยส่วนใหญ่จะเป็น แก้ว สแตนเลส หรือพลาสติก ซึ่งได้ทำให้การเคลือบชั้นตัวนำโปรงแสงไว้ก่อน โดยมีอุณหภูมิบนแผ่นฐานรองประมาณ 200-300 องศาเซลเซียส ซิลิคอนจะทับถมสะสมบนแผ่น เกิดเป็นอะมอร์ฟัสซิลิคอน ในขั้นตอนนี้ หากเราใส่ก๊าซที่มีโบรอน (boron) เช่น $B_2H_6$ เข้าไปด้วย เราก็จะได้แผ่นฟิล์มที่เป็นอะมอร์ฟัสซิลิคอนชนิดพี (p-type Si) และถ้าหากใส่ก๊าซที่มีฟอสฟอรัส (phosphorus) เช่น $PH_3$ เราก็จะได้แผ่นฟิล์มที่เป็นอะมอร์ฟัสซิลิคอนชนิดเอ็น (n-type Si) ซึ่งจะเห็นได้ว่าด้วยวิธีนี้ เราสามารถควบคุมการไหลของก๊าซ เพื่อสร้างให้เกิดชั้นฟิล์มบางต่างๆ ตามที่ต้องการได้

จุดเด่นของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัส ก็คือ มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำมาก และอะมอร์ฟัสซิคอนมีช่องว่างพลังงาน (energy bandgap) 1.7 eV มากกว่าแบบผลึกซิลิคอน (1.1 eV) ทำให้อัตราการดูดแสงของอะมอร์ฟัสซิลิคอนสูงกว่าแบบผลึกมาก จึงสามารถลดความหนาของฟิล์มเป็นระดับ 1 ไมโครเมตรได้ ในขณะที่แบบผลึกต้องทำอย่างน้อยหนาประมาณ 300 ไมโครเมตรซึ่งทั้งนี้ก็เพื่อ ความแข็งแรงทางกลของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย นั่นก็คือ อะมอร์ฟัสซิลิคอนสามารถประหยัดปริมาณของซิลิคอนได้มากกว่า และยังนิยมนำมาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างเป็นไดโอด (diode) 2 ตัวเรียงต่อกันเป็นชั้น (tandem cell) ให้เซลล์ด้านบนเป็นอะมอร์ฟัสซิลิคอนเพื่อดูดกลืนแสงย่านที่ตามองเห็น (visible light) และปล่อยให้แสงย่านอินฟาเรด (infrared) ถูกดูดกลืนโดยเซลล์ด้านล่างซึ่งเป็นผลึกระดับนาโนเมตรของซิลิคอน (nanocrystalline Si) ที่มีช่องว่างพลังงานเท่ากับผลึกรูปเดี่ยวของซิลิคอน เซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนแสดงดังรูปที่1.4

**รูปที่ 1.4** เซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน

จุดด้อยของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัส คือ ประสิทธิภาพของเซลล์ที่ต่ำประมาณ 8% และเซลล์แบบนี้ยังมีอายุการใช้งานที่สั้น เมื่อนำไปใช้กับแสงแดด ปัญหาการเสื่อมลงของเซลล์แบบอะมอร์ฟัสนี้ยังเป็นปัญหาหลักที่ยังต้องมีการพัฒนาปรับปรุงแก้ไขกันต่อไปอีก

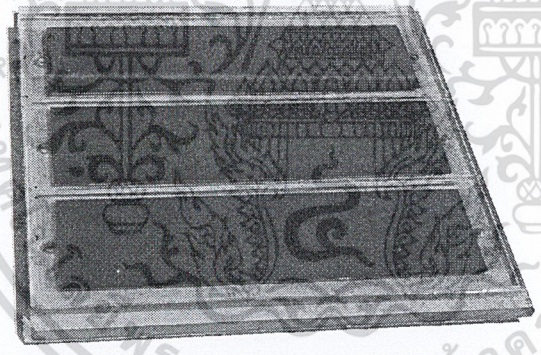
2. แบบซีไอเอส (CIS) เซลล์แสงอาทิตย์แบบซีไอเอสถูกสร้างขึ้นด้วยฟิล์มบางของธาตุที่ประกอบไปด้วย ทองแดง (copper) อินเดียม (indium) และ ซีลีเนียม (selenium) มีสัญลักษณ์ทางเคมี คือ CuInSe2 หรือ Cu(In x Ga 1-x)(Se x S 1-x)2 ฟิล์มบางของเซลล์แบบซีไอเอสจะมีความหนาน้อยกว่าเซลล์แบบโพลีอยู่ประมาณ 10 เท่า ประสิทธิภาพของเซลล์แบบซีไอเอสนี้สูงถึง 11% แต่เมื่อเทียบกับต้นทุนก็ยังมีราคาที่สูงอยู่มาก

## 1.3 บทบาทของ Dye-sensitized solar cells

ถึงแม้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนจะทำมาจากซิลิคอนโดยอาศัยโครงสร้างของรอยต่อ พี-เอ็นในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าจะมีประสิทธิภาพสูงและมีอายุการใช้งานไม่น้อยกว่า 20 ปี แต่ยังไม่ได้รับความนิยมใช้อย่างแพร่หลาย เพราะราคาค่อนข้างแพงมาก อันเนื่องมาจากกระบวนการผลิตที่ยุ่งยากซับซ้อนต้องใช้เทคโนโลยีชั้นสูง เช่น ต้องใช้ห้องสะอาด (clean room) เครื่องจักรที่ใช้จะต้องมีความแม่นยำสูงมาก และในกระบวนการผลิตต้องเป็นระบบสุญญากาศอุณหภูมิสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส โดยแต่ละกระบวนการผลิตจะใช้คอมพิวเตอร์ไปควบคุมแขนกล (arm robot) ในการเคลื่อนย้ายแผ่นเวเฟอร์ นอกจากนั้นบุคลากรที่ปฏิบัติงานจะต้องมีความรู้ความชำนาญเป็นพิเศษส่งผลให้ต้นทุนในกระบวนการ

ผลิตสูง ราคาของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน 1 พาเนล 36 เซลล์ ตกประมาณ 20,000-35,000 บาททำให้ไม่นิยมใช้ในบ้านเรือนโดยทั่วไป

จากปัญหาดังกล่าวทำให้ วิศวกร นักวิทยาศาสตร์ค้นคว้าวิจัยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใหม่เพื่อจะมาแทนเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำมาจากซิลิคอน โดยมีการนำเอาความรู้เกี่ยวกับวัสดุนาโนมา(nanomaterial) ประยุกต์ใช้ร่วมกับความรู้ทางเคมีไฟฟ้าเชิงแสงซึ่งจะส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตมีคุณสมบัติโดดเด่นขึ้น คือไม่ต้องใช้เทคโนโลยีชั้นสูงในกระบวนการผลิต เช่น ไม่ต้องใช้ห้องสะอาด(clean room) ไม่ต้องใช้เครื่องจักร และอุณหภูมิที่ใช้ก็ไม่เกิน 500 องศาเซลเซียสเซลล์ ไม่ต้องใช้ระบบสุญญากาศ นอกจากนั้นแล้วบุคลากรก็ไม่จำเป็นต้องมีความรู้ความชำนาญเป็นพิเศษทำให้แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากวัสดุนาโนเริ่มที่จะเป็นคู่แข่งกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตมาจากซิลิคอน เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำมาจากวัสดุนาโนนี้มีชื่อเรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดดายเซนซิไทซ์ (Dye Sensitized Solar Cell) หรือ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง แสดงดังรูปที่ 1.5



**รูปที่ 1.5** เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดดายเซนซิไทซ์

## 1.4 วัตถุประสงค์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังการศึกษา และพัฒนา Dye-sensitize solar cells โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

- เพื่อศึกษาวิธีการสร้าง dye-sensitized solar cells

- เพื่อลดต้นทุนในการผลิต dye-sensitized solar cells โดย การใช้ CNTs แทน Pt ในขั้วไฟฟ้าขั้วบวก
- เพื่อศึกษาการนำ CNTs มาสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าขั้วบวกโดยใช้วิธีต่างๆ
- เพื่อลดต้นทุนในการผลิต dye-sensitized solar cells โดย การใช้ CNTs แทน Pt ในขั้วไฟฟ้าขั้วบวก

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง


# บทที่ 2

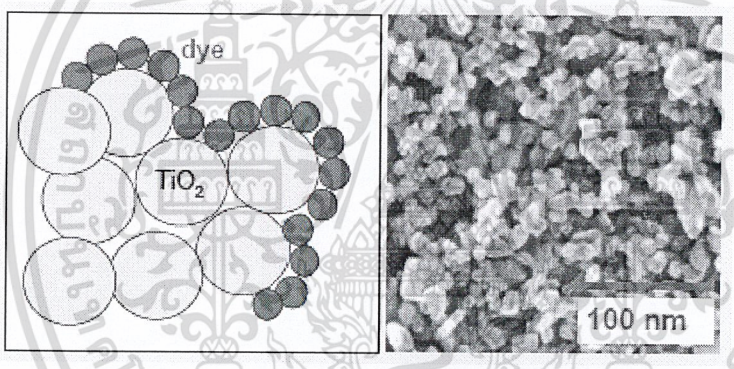
# ทฤษฎี

## 2.1 ประวัติการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดดายเซนซิไทซ์

การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดดายเซนซิไทซ์ ในยุคแรกเกิดการนำเอาเทคโนโลยีการถ่ายภาพเข้ามาผสมผสานกับหลักการของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดกัลวานิก โดย Becquerel ได้ทดลองส่องแสงบนขั้วโลหะที่จุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโตรไลต์ โดยที่มีส่วนผสมของโลหะเฮไลต์พบว่ามีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น แต่ในตอนนั้นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดดังกล่าวจะทำงานในช่วงยูวี (UV) ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ได้มีค่าต่ำมากจึงไม่สามารถนำไปใช้งานได้ ซึ่งภายหลังได้มีชื่อเรียกว่า โฟโตอิเล็กโตรเคมิคัลเซลล์ (photoelectrochemical cell) หลังจากนั้นในปี ค.ศ. 1837-1839 ได้มีการค้นพบเทคโนโลยีภาพถ่ายขึ้นโดยมีการใช้ silver halide ต่อมาในปี ค.ศ.1883 Vogel ได้พบว่าเมื่อเติมสีย้อมลงใน silver halide emulsion แล้วจะทำให้เกิดภาพที่ดีขึ้น ต่อมาภายหลังจากนั้น 4 ปี Moser ได้นำหลักการที่ว่าสารกึ่งตัวนำสามารถถูกกระตุ้นด้วยสีย้อม นำมาใช้ในเซลล์ไฟฟ้าแล้วพบว่าสามารถเกิดกระแสไฟฟ้าได้นอกเหนือจากการใช้โลหะ แล้วเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโฟโตอิเล็กโตรเคมิคัลสามารถทำได้ในช่วงแสงที่ตามองเห็น (Visible light) และจากจุดนี้เองจึงเป็นจุดเชื่อมโยงหลักการ การเกิดภาพถ่ายและการเกิดกระแสไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโฟโตอิเล็กโตรเคมิคัลแต่ถึงอย่างไรก็ตามเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโฟโตอิเล็กโตรเคมิคัลก็ยังคงมีประสิทธิภาพต่ำ ซึ่ง Namba และ Hishiki ได้ทดลองเคลือบบผิวสารกึ่งตัวนำด้วยสีย้อมแล้วพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโฟโตอิเล็กโตรเคมิคัล จะเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นไฟฟ้าได้ดีที่สุดเมื่อมีการเคลือบผิวสารกึ่งตัวนำเป็นชั้นบางๆที่เรียกว่า Monolayer อย่างไรก็ตามยังไม่สามารถสรุปได้แน่ชัดว่ากลไกการทำงานของเซลล์ชนิดนี้เป็นเช่นไร จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1970 Tributsh ได้ศึกษากลไกการทำงานของสีย้อมแล้วพบว่าอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโฟโตอิเล็กโตรเคมิคัลนั้น เกิดมาจากสีย้อมถ่ายเทอิเล็กตรอนให้กับสารกึ่งตัวนำ แต่ถึงอย่างไรก็ตามยังไม่มีใครสามารถผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโฟโตอิเล็กโตรเคมิคัลให้มีประสิทธิภาพได้สูงกว่า 1% ทั้งนี้เนื่องมาจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโฟโตอิเล็กโตรเคมิคัล ยังมีข้อบกพร่องอยู่เนื่องจากปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ผลิตมาจากสีย้อมบนอิเล็กโทรด ถ้าหากอิเล็กโทรดเป็นแบบเรียบๆ แบนๆ จำนวนสีย้อมบนอิเล็กโทรดก็จะมีปริมาณน้อย และส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่เซลล์ผลิตได้น้อยไปด้วยซึ่งข้อบกพร่องนี้ได้ถูกแก้ไขโดยศาสตราจารย์ Gratzel โดยในปี ค.ศ. 1991 ได้นำเอานาโนเทคโนโลยีมาพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโฟโตอิ

117488

เล็กโตรเคมิคัลโดยทำให้ขั้วอาโนดที่มีความพรุนสูง โดยการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ ($TiO_2$) ให้มีขนาด 10-20 นาโนเมตรเคลือบบนขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง Transparent conducting oxide (TCO) ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความพรุนสูงสามารถดูดซับสีย้อมได้ดีมาก แสดงดังรูปที่ 1.6 เมื่อนำไปประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ส่งผลทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงขึ้นถึง 7% เมื่อใช้สีย้อมเป็น cisbis(isothiocyanato)(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylato)ruthenium(II) และเมื่อใช้สีย้อม tris(isothiocyanato)-ruthenium(II)-2,2':6',2-terpyridine-4,4',4"-tricarboxylic acid เป็นสีย้อมที่มีประสิทธิภาพของเซลล์จะสูงขึ้นถึง 10.4 % นับเป็นการจุดประกายให้วิศวกร และนักวิทยาศาสตร์ทั่วโลกหันมาวิจัยเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้เป็นจำนวนมาก แต่อย่างไรก็ตามหลังจากที่ Gratzel สามารถผลิตเซลล์ชนิดดายเซนซิไทซ์ที่มีประสิทธิภาพสูงถึง 10.4% ได้แล้วก็ยังไม่มีทีมวิจัยอื่นที่ทำให้ประสิทธิภาพสูงกว่าได้เลย



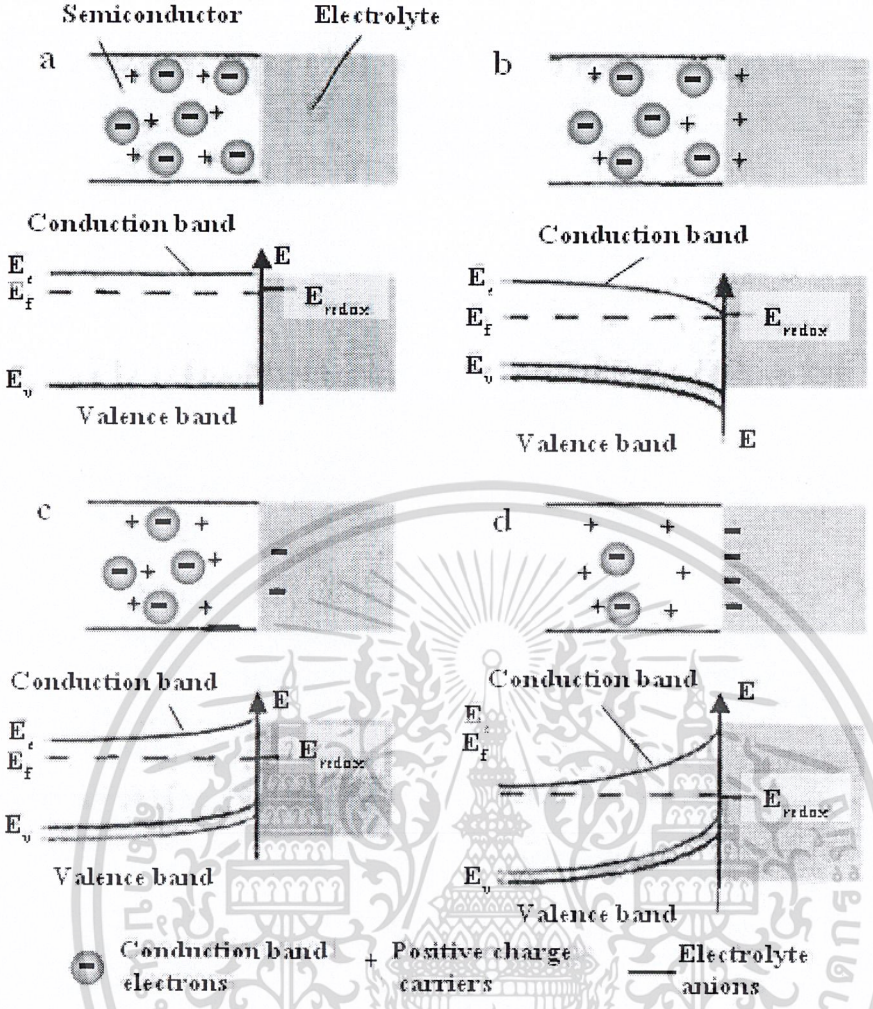

**รูปที่ 2.1** ความพรุนสูงของผลึกนาโนไทเทเนียมกับการดูดซับสีย้อมไวแสง

## 2.2 หลักการทำงานของรอยต่อสารกึ่งตัวนำและอิเล็กโตรไลต์

เมื่อสารกึ่งตัวนำถูกนำมาจุ่มในสารละลายอิเล็กโตรไลต์ สิ่งที่เกิดขึ้นกับตัวมันก็คือมีการถ่ายโอนประจุระหว่างสารกึ่งตัวนำและอิเล็กโตรไลต์จนกระทั่งเกิดสมดุลอิเล็กโทรนิก ซึ่งสิ่งที่พบก็คือ พลังงาน Fermi ของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ ($E_f$) เท่ากันกับศักย์ไฟฟ้ารีดอกซ์ของอิเล็กโตรไลต์ ($E_{redox}$) ดังแสดงในรูปที่ 1.7 (a) ซึ่งจะพบว่าไม่เกิดการเบนของระดับพลังงาน แต่ถ้าประจุของแต่ละด้านไม่เท่ากันก็จะเกิดการถ่ายเทของประจุไฟฟ้ากันดังในรูปที่ 1.7 (b) ซึ่งจะเป็นกรณีที่ระบบอิเล็กโตรไลต์มีประจุลบมากกว่าสารกึ่งตัวนำ และจะพบว่าอิเล็กตรอนจะถูกถ่ายเทสู่สารกึ่งตัวนำแล้วผิวของสารกึ่งตัวนำจะเสียอิเล็กตรอน และทำให้เกิดประจุบนผิวของสารกึ่งตัวนำแล้วพบว่าแถบพลังงานมีการเบนลง (downward bending) ในกรณีที่ 3 คือเมื่อสารกึ่งตัวนำมีอิเล็กตรอนมากกว่าอิเล็โทรไลต์ อิเล็กตรอนที่สารกึ่งตัวนำจะถ่ายเทสู่อิเล็กโตรไลต์

โดยตัวมันจะเหลือพาหะที่เป็นบวกอยู่บนตัวผลก็คือเกิดการเบนของระดับพลังงาน และในกรณีสุดท้าย เมื่อผิวของสารกึ่งตัวนำมีความแตกต่างของประจุมากๆจะมีการถ่ายเทประจุลบไปที่ผิวของสารอิเล็กโตรไลต์ ผลก็คือผิวของสารกึ่งตัวนำจะแสดงตัวเหมือนเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ทำให้เกิดการเบนของแถบระดับพลังงานมีมากขึ้น

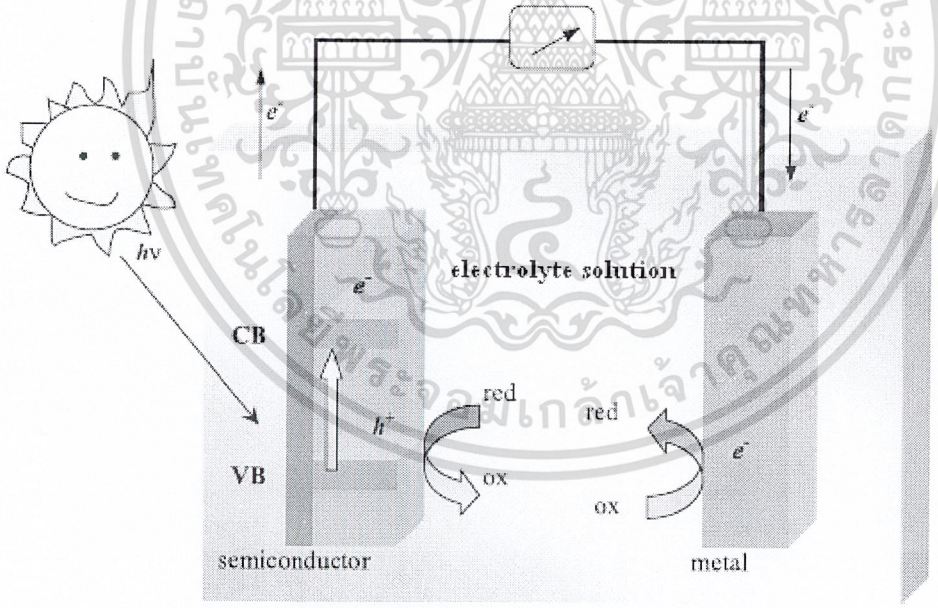
ระดับพลังงานที่ภาวะสมดุล (flat band) เป็นปริมาณที่มีประโยชน์มากในทางเคมีไฟฟ้าเชิงแสง (photo electrochemistry) เพราะเป็นตัวบอกระดับพลังงานต่างๆได้ เช่น ระดับแถบความนำ (conduction band), ระดับแถบวาเลนซ์ (valence band) โดยทั่วไปการหาระดับพลังงานเหล่านี้สามารถทำได้โดยการวัดความสามารถในการประจุไฟ (capacitance) ระหว่างรอยต่อของสารกึ่งตัวนำและอิเล็กโตรไลต์ โดยการค่อยๆป้อนความต่างศักย์ไฟฟ้าให้กับสารกึ่งตัวนำ-อิเล็กโตรไลต์ซึ่งผลที่ได้คือ ความสามารถในการประจุไฟฟ้าจะเปลี่ยนไป และเมื่อพิจารณาจากสมการของ Mott-Schotky $1/(C_{sc})^2 = 2(\Delta \Phi_{sc} RT/F)/\varepsilon_0 \varepsilon^1 N)$, เมื่อ $\Phi_{sc} = V\text{-}V_{fb}$ คือความต่างศักย์ใน space charge layer, R คือค่าคงที่ของแก๊ส, F คือค่าคงที่ของฟาราเดย์, $\varepsilon$ คือ dielectric constant และ N คือ ionized donor dopant concentration ซึ่งจากสมการดังกล่าวเราสามารถนำมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับความสามารถในการประจุไฟฟ้าและแก้สมการเพื่อหาค่า $1/(C_{sc})^2 = 0$ จะทำให้หาระดับของ flat band potential ออกมาได้




**รูปที่ 2.2 แผนภูมิระดับพลังงานของรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและอิเล็กโตรไลต์**

แผนภูมิระดับพลังงานของรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและอิเล็กโตรไลต์ แบ่งได้เป็นกรณี (a) ศักย์ไฟฟ้าแบบราบ (flat band potential) ,ไม่มีการถ่ายโอนประจุระหว่างรอยต่อสารกึ่งตัวนำและอิเล็กโตรไลต์ (b) มีการสะสมประจุลบที่สารกึ่งตัวนำ เมื่อสารกึ่งตัวนำมีอิเล็กตรอนน้อยกว่าอิเล็กโตรไลต์ ดังนั้นจึงพบการเบนลงของแถบพลังงาน (c) เกิดการเบนขึ้น (upward bending) ของระดับพลังงาน เนื่องจากอิเล็กตรอนถ่ายเทจากสารกึ่งตัวนำไปสู่อิเล็กโตรไลต์ (d) เมื่ออิเล็กตรอนจากอิเล็กโตรไลต์มีการถ่ายเทมากกว่าระดับพลังงาน intrinsic จะเกิดการเบนของแถบพลังงานมากขึ้นและอิเล็กโตรไลต์จะแสดงตัวเสมือนสารกึ่งตัวนำชนิดพี

ต่อมาได้มีแนวความคิดสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสร้างรอยต่อสารกึ่งตัวนำกับของเหลว (semiconductor-liquid junction) ขึ้นมา เช่น เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำ *n*-CdSe กับสารละลายอิเล็กโตรไลต์ $Fe(CN)_6^{3-/4-}$ หรือโพลิคาลโคจีไนด์ (poly-chalcogenides) แสดงดังรูปที่ 1.8 ประกอบด้วย (1) ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำบนขั้วไฟฟ้า (2) เคาน์เตอร์อิเล็กโทรด (counter electrode, metal) และ (3) สารละลายอิเล็กโตรไลต์ (electrolyte solution) โดยเมื่อแสงตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (valence band, VB) ของสารกึ่งตัวนำจะดูดกลืนแสง แล้วขึ้นไปอยู่ในชั้นแถบการนำ (conduction band, CB) ทำให้เกิดโฮล (hole, $h^+$)ในแถบวาเลนซ์ โฮลที่เกิดขึ้นจะถูกชดเชยโดยอิเล็กตรอนที่มาจากตัวริดิวซ์ (reducing agent, Red) ในสารละลายอิเล็กโตรไลต์ สำหรับอิเล็กตรอนในแถบตัวนำจะเคลื่อนที่ออกสู่วงจรภายนอก และตัวออกซิไดซ์ (oxidizing agent, Ox) ในสารละลายอิเล็กโตรไลต์ที่เกิดขึ้นจะมารับอิเล็กตรอนคืนที่เคาน์เตอร์อิเล็กโทรด โดยกระบวนการทั้งหมดที่เกิดขึ้นนี้ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าครบวงจร




**รูปที่ 2.3** แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อสารกึ่งตัวนำและของเหลว

สารกึ่งตัวนำที่จะใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อสารกึ่งตัวนำและของเหลว ต้องมีช่องว่างแถบพลังงาน (band gap energy, $E_g$) ที่แคบประมาณ 1-2 eV และต้องทนทานต่อแสงแดด อุณหภูมิ ความชื้น รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช (pH) ของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ เพื่อไม่ให้โฮลที่เกิดขึ้นถูกทำลายได้ง่าย พบว่าสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานที่แคบส่วนใหญ่ เช่น *n*-CdSe มีโฮลถูกทำลายได้ง่าย ส่วนสารกึ่งตัวนำซิลิคอน หรือ อินเดียมฟอสฟอรัส (InP) สามารถเกิดปฏิกิริยากับน้ำหรือออกซิเจนได้ง่าย เกิดเป็นชั้นฟิล์มบางออกไซด์ที่มีสมบัติเป็นฉนวน สำหรับแนวทางการแก้ปัญหาของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อสารกึ่งตัวนำและของเหลว ได้แก่ การพัฒนาสารกึ่งตัวนำที่สร้างโฮลที่มีเสถียรภาพสูงขึ้น เช่น CdInSe หรือใช้สารละลายอิเล็กโตรไลต์ที่ไม่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (non aqueous electrolyte solution) เป็นต้น

นอกจากนั้นสามารถพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อสารกึ่งตัวนำและของเหลว โดยใช้สารกึ่งตัวนำที่เป็นสารประกอบโลหะออกไซด์ที่มีแถบพลังงานกว้าง (> 3 eV) แทนสารกึ่งตัวนำมีแถบพลังงานแคบ โดยทำการเคลือบผิวสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ด้วยโมเลกุลสีย้อมไวแสง (dye sensitized) ซึ่งทำหน้าที่ดูดกลืนแสงอาทิตย์แล้วส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังสารกึ่งตัวนำ เรียกเซลล์อาทิตย์ชนิดนี้ว่า “เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (dye-sensitized solar cell, DSSC)” ข้อดีของสารประกอบออกไซด์กึ่งตัวนำ (oxide semiconductors) คือมีเสถียรภาพมากกว่าแต่ในช่วงการพัฒนาแรกๆ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงยังมีประสิทธิภาพต่ำ

ในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดดายเซนซิไทซ์ องค์ประกอบที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งก็คือ ขั้วไฟฟ้า Gratzel ได้ทำการพัฒนาขั้วไฟฟ้าให้มีความพรุนสูง เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของสารกึ่งตัวนำให้สามารถดูดซับสีย้อมและมีพื้นที่ผิวรับแสงมากขึ้น โดยเขาใช้หลักการเดียวกับพืชที่มี Granum เป็นโครงสร้างที่ช่วยเพิ่มพื้นที่ให้คลอโรฟิลล์ได้สัมผัสกับแสงได้มากขึ้น สารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดดายเซนซิไทซ์ได้แก่ $TiO_2$ ZnO $SnO_2$ และ $Nb_2O_5$ หรืออาจใช้สารกึ่งตัวนำในกลุ่ม chalcogenide เช่น CdSe ลักษณะของชั้นพรุนตัวที่ Gratzel พัฒนาขึ้นนั้นมีความหนาประมาณ 10 ไมโครเมตร ความพรุนตัว 50% จากลักษณะเช่นนี้จะช่วยให้ขั้วไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นสามารถยึดติดกับสีย้อมแบบ monolayer ได้สูงกว่าขั้วที่ไม่มีความพรุนตัว(ขั้วแบบเรียบ) ถึง 1000 เท่า จากสารกึ่งตัวนำที่ Gratzel ใช้เป็นขั้วจะพบว่าเป็นสารกึ่งตัวนำที่เป็น intrinsic แต่คุณสมบัตินี้จะเปลี่ยนไปเมื่ออยู่ในสารละลายอิเล็กโตรไลต์ หากว่าอิเล็กโตรไลต์มีความสามารถให้อิเล็กตรอนได้ดีสารกึ่งตัวนำจะแสดงลักษณะเป็นชนิดเอ็น

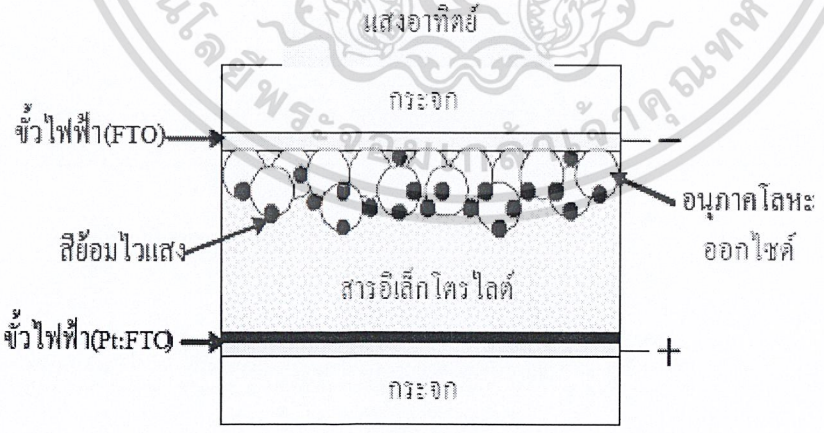
## 2.3 ส่วนประกอบและโครงสร้างของ Dye-sensitized solar cells

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดดายเซนซิไทซ์ เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใหม่ที่มีโครงสร้างคล้ายแบตเตอร์รีที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน โดยมีองค์ประกอบที่สำคัญ คือ ขั้วไฟฟ้า สีย้อมไวแสง อนุภาคของโลหะออกไซด์ และอิเล็กโตรไลต์หรือตัวส่งผ่านประจุบวก โดยแต่ละส่วนมีหน้าที่และสมบัติที่สำคัญดังนี้ แสดงดังรูปที่ 1.9

1. สีย้อมไวแสง ทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์และส่งผ่านอิเล็กตรอนให้กับอนุภาคโลหะออกไซด์ ดังนั้นจะต้องสมบัติที่สำคัญ เช่น มีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงกว้างในช่วงตามองเห็น และใกล้ย่านอินฟาเรดเพื่อดูดกลืนแสงอาทิตย์ให้ได้มากที่สุด มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจับแสงโฟตอนที่ตกกระทบ มีคุณสมบัติของสภาวะพื้นและสภาวะกระตุ้นที่เหมาะสม มีเสถียรภาพสูงในสภาวะถูกออกซิไดส์ และสามารถยึดเกาะบนผิวอนุภาคโลหะออกไซด์ได้ดี

2. ชั้นอนุภาคของโลหะออกไซด์ ทำหน้าที่รับและส่งผ่านอิเล็กตรอน และเป็นพื้นผิวสำหรับการเกาะยึดของโมเลกุลสีย้อมไวแสง ต้องมีแถบช่องว่างพลังงานกว้าง (> 3 eV) มีพื้นที่ผิวมาก

3. สารอิเล็กโตรไลต์หรือตัวส่งผ่านประจุบวก ทำหน้าที่ชดเชยอิเล็กตรอนให้กับโมเลกุลสีย้อมไวแสง หรือรับประจุบวกจากขั้วไฟฟ้าแคโทด สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย ไม่ดูดกลืนแสงในช่วง วิสิเบิล และมีอายุการใช้งานยาวนาน

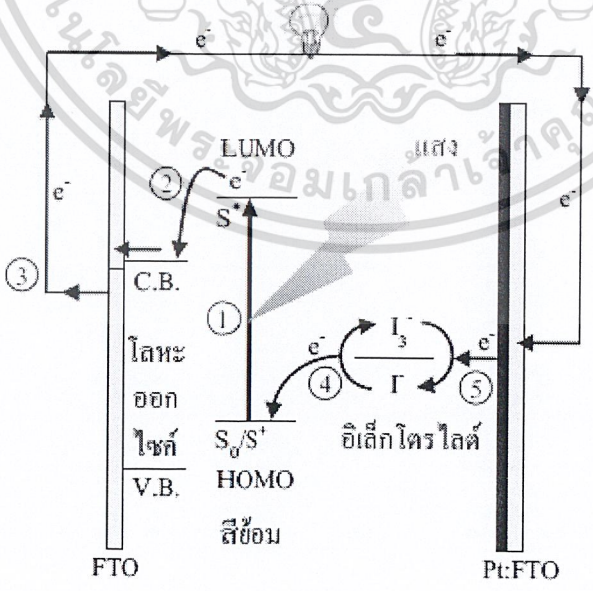



**รูปที่ 2.4** โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดดายเซนซิไทซ์[2]

4. ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าแอโนดทำหน้าที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปสู่วงจรภายนอก นิยมใช้ fluoride doped tin oxide (FTO) และขั้วไฟฟ้าแคโทดหรือเคาน์เตอร์อิเล็กโทรดทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนกลับคืนสู่สารประกอบอิเล็กโตรไลต์ ต้องนำไฟฟ้าที่ดี มีพื้นที่ผิวมาก และมีค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวสำหรับการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของอิเล็กโตรไลต์ต่ำนิยมใช้โลหะแพลททินัมหรือแกรไฟต์

## 2.4 หลักการทำงานของ Dye-sensitized solar cells

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดดายเซนซิไทซ์มีกลไกการทำงานเป็นขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2 เมื่อแสงอาทิตย์มาตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ ① โมเลกุลสีย้อมไวแสงในสถานะพื้น ($S_0$) ที่เกาะยึดที่ผิวของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ ($TiO_2$) จะดูดกลืนแสง แล้วมีพลังงานขึ้นไปอยู่ในสถานะเร้า ($S^*$) จากนั้น ②โมเลกุลสีย้อมไวแสงในสถานะเร้า ($S^*$) จะส่งผ่านอิเล็กตรอนไปสู่แถบการนำของ $TiO_2$ จากนั้น ③ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านจาก $TiO_2$ ไปยังขั้วแอโนด (FTO) แล้วออกสู่วงจรภายนอกต่อไป สำหรับที่ขั้วแคโธดหรือเคาน์เตอร์อิเล็กโทรด ④ ไทรไอโอไดด์ ($I_3^-$) จะถูกรีดิวซ์ไปเป็นไอโอไดด์ ($I^-$) และ ⑤ โมเลกุลสีย้อมที่สูญเสียอิเล็กตรอน ($S^+$) จะถูกออกซิไดซ์ไอโอไดด์กลับไปเป็นโมเลกุลสีย้อมไวแสงสถานะพื้น ($S_0$) ในขณะเดียวกันสารอิเล็กโตรไลต์จะรับอิเล็กตรอนคืนจากขั้วแคโทดโลหะแพลททินัม




**รูปที่ 2.5** กลไกการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดดายเซนซิไทซ์

โดยมีปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นคือ

*ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด*

$S_0 + hv \longrightarrow S^*$ : การดูดกลืนแสง

$S^* \longrightarrow S^+ + e^-$(ให้โลหะออกไซด์) : การถ่ายเทอิเล็กตรอน

*ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด*

อิเล็กโตรไลต์($I_3^-$) + $e^-$ (จากขั้วแพลททินัม) $\longrightarrow$ อิเล็กโตรไลต์ ($I^-$)

$S^+$ + อิเล็กโตรไลต์ ($I^-$) $\longrightarrow$ $S_0$ + อิเล็กโตรไลต์($I_3^-$) : การสร้างใหม่ของสีย้อม

*ปฏิกิริยารวม*

$e^-$ (จากขั้วแพลททินัม) + hv $\longrightarrow$ $e^-$(ให้โลหะออกไซด์)

## 2.4 ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

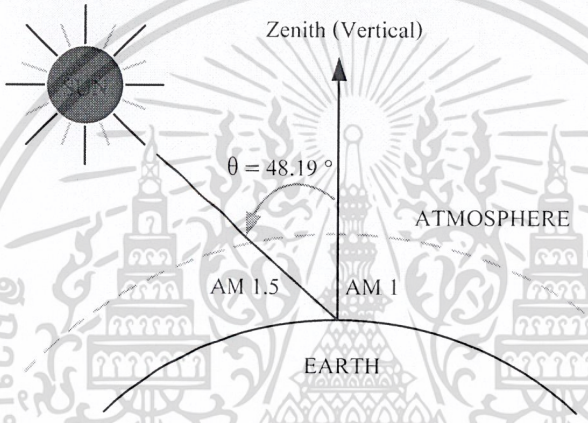
สำหรับบนพื้นผิวโลก พลังงานจากแสงอาทิตย์จะสูญเสียไปในชั้นบรรยากาศของโลก เนื่องจากชั้นของก๊าซต่างๆ เช่น $O_2$, $O_3$, ไอน้ำ, $CO_2$ เป็นต้น ดังนั้นความเข้มของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์จะลดลง และองค์การนาซ่าร์ (NASA) แห่งสหรัฐอเมริกาได้เป็นผู้กำหนดมาตรฐานของพลังงานที่ได้รับในระดับน้ำทะเล เมื่อแสงอาทิตย์มีทิศทางตั้งฉากกับผิวโลกมีค่า 100 $mW/cm^2$ และกำหนดว่าเป็นการแผ่รังสีแบบ air mass 1 หรือเขียนย่อๆได้เป็น AM1 ค่าของพลังงานนี้ถูกนำมาใช้เป็นค่าเปรียบเทียบความสามารถ หรือประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ ในการเปลี่ยนพลังงานแสงมาเป็นพลังงานไฟฟ้า

$$air\ mass = \frac{1}{\cos\theta} = \sec\theta$$

เมื่อ $\theta$ คือ มุมที่ลำแสงจากดวงอาทิตย์ทำกับทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวโลกบริเวณที่ทำการวัด (solar zenith angle)

ดังนั้น ถ้าดวงอาทิตย์ทำมุมตั้งฉากกับโลกเป็นมุม $60^{\circ}$ ลักษณะของการแผ่รังสีนี้จะเรียกว่าเป็นแบบ AM2

ยิ่งค่าของ air mass มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่เงื่อนไขอื่นๆไม่เปลี่ยนแปลง พลังงานแสงอาทิตย์ที่มายังผิวโลกก็จะยิ่งมีค่าลดลง ค่าพลังงานมาตรฐานบนพื้นโลกที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางอีกค่าหนึ่งคือ ลักษณะการแผ่รังสีแบบ AM1.5 ที่มุม $\theta = 48.19^{\circ}$ [16] ดังรูปที่ 2.1 มีค่าพลังงานรวมทั้งหมด 100 $mW/cm^2$




**รูปที่ 2.6** ลักษณะการแผ่รังสีแบบ AM 1.5

ประสิทธิภาพรวมของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\eta_{global}$ ) คำนวณได้จาก

ประสิทธิภาพ = [ Jsc*Voc*FF ] / Pin

เมื่อ $J_{sc}$ คือ ความหนาแน่นกระแสโฟโตรอิทิกรัลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่โฟโตอิเล็กโทรด (Integral photocurrent density)

$V_{oc}$ คือ แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด

$FF$ คือ ค่า Fill factor คำนวณจาก

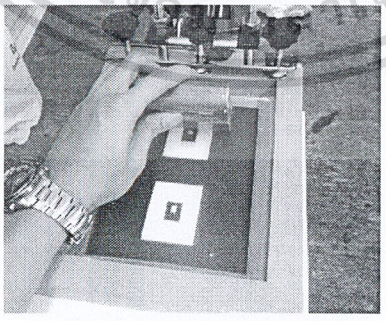
$$FF = Pmax / [ Isc * Voc ]$$

$P_{max}$ คือ ค่ากำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์

## 2.5 หลักการพิมพ์สกรีน ( screen printing )

การพิมพ์สกรีนเป็นการพิมพ์ที่มีลักษณะพิเศษเฉพาะตัวคือ เป็นการพิมพ์โดยการกดปากหมึกพิมพ์ที่มีความหนืดที่พอเหมาะด้วยยางปาดผ่านรูเปิดของผ้าสกรีน ( screen fabric ) บนแม่พิมพ์สกรีนเพื่อให้หมึกไหลลงบนวัสดุที่รองรับ แล้วเกิดลวดลายต่างๆ ตามแม่แบบที่อยู่บนแม่พิมพ์สกรีน ทั้งนี้ การพิมพ์สกรีนจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ พร้อมทั้งกรรมวิธีและเทคนิคการพิมพ์ ในขณะเดียวกัน อุปกรณ์ที่ใช้ในการพิมพ์สกรีนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่ต้องคัดเลือกและนำมาใช้ให้ได้ตรงตามความต้องการของชิ้นงานที่พิมพ์ เช่น หมึกพิมพ์ , ผ้าสกรีน , ยางปาด , เครื่องพิมพ์สกรีน เป็นต้น

เนื่องจากการการพิมพ์สกรีนสามารถพิมพ์ลงบนวัสดุหลายประเภท เช่น ไม้ ผ้า กระดาษ โลหะ พลาสติก และวัสดุสังเคราะห์อื่นๆเป็นจำนวนมาก และมีรูปร่างที่แตกต่างกัน เช่น แผ่นราบ ทรงกลม ทรงกระบอก รวมทั้งสามารถพิมพ์ให้เกิดลายพิเศษ เช่น นูนขึ้นจากวัสดุ เทคนิคที่ใช้เพื่อให้การพิมพ์ลงบนวัสดุเหล่านี้ได้อย่างเหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาให้เข้าใจถึงหลักการพิมพ์เป็นอย่างดี อีกทั้งควรจะศึกษาเครื่องมือ เครื่องใช้ วัสดุอุปกรณ์ หมึกพิมพ์ชนิดต่างๆที่นำมาใช้บนวัสดุแต่ละประเภท มิฉะนั้น การพิมพ์ที่ปราศจากความเข้าใจที่ถูกต้องจะทำให้ผลงานที่พิมพ์ได้ไม่ตรงกับความต้องการ



**รูปที่ 2.7** การพิมพ์สกรีน

# บทที่ 3

# วิธีการทดลอง

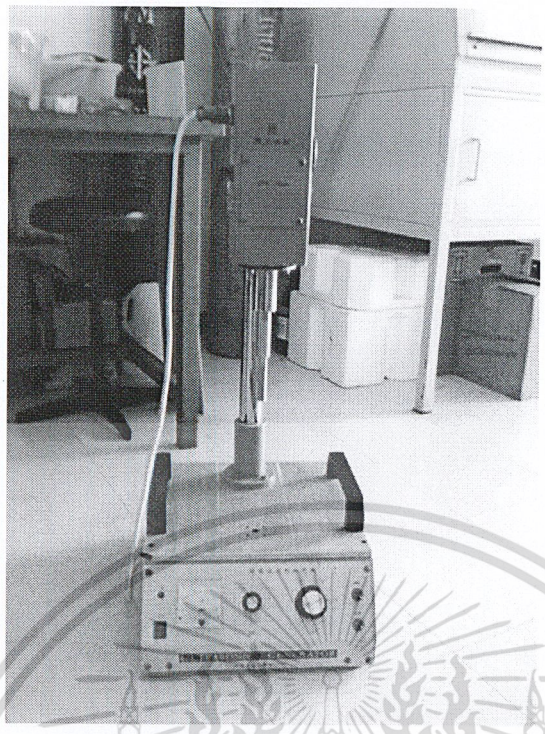
## 3.1 อุปกรณ์ในการทดลอง

### 3.1.1 สารเคมีในการทดลอง

1. ไททาเนียมไดออกไซด์($TiO_2$)
2. แพลติมัม(Pt)
3. สารละลายอิเล็กโตรไลต์(Electrolyte)
4. สีย้อมไวแสง(Dye sensitized)
5. แอลกอฮอล์($C_2H_5OH$)
6. สารละลายDMF [$(CH_3O)_2CHN(CH_3)_2$]
7. คาร์บอนนาโนทิวป์(CNTs)

### 3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. กระจกนำไฟฟ้า(TCO)
2. บล็อกสกรีน Pt และ $TiO_2$
3. แท่นยึดบล็อกสกรีน
4. ยางปาด Pt และ $TiO_2$
5. Twister
6. เข็มและหลอดฉีดยา
7. บีกเกอร์ , เตาเผา และหัวแร้ง
8. ฐานสำหรับจับเครื่องพ่นสเปรย์
9. ก๊าซ $N_2$
10. แผ่น Sealing sheet
11. เครื่องพ่นสเปรย์ และ เครื่อง Ultrasonic แบบ Tip



**รูป 3.1 เครื่อง Ultrasonic แบบ Tip**

## 3.2 ขั้นตอนการสร้าง Dye-sensitized solar cells

### 3.2.1 ขั้นตอนการสร้างขั้วลบ( $TiO_2$ ) และการสร้างขั้วบวกด้วยแพลตินั่ม

1. เริ่มจากการทำความสะอาดโดยการนำกระจกนำไฟฟ้าที่เตรียมไว้ไปใส่ในบีกเกอร์ ใส่แอลกอฮอล์ลงไป จากนั้นนำไปใส่เครื่อง Ultrasonic เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดอยู่บนกระจกนำไฟฟ้า

2. นำกระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วไปเป่าให้แห้งด้วย Air Gun

3. นำกระจกนำไฟฟ้าที่ได้ไป Screen printing ขนาด 0.25 $cm^2$ ด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ ($TiO_2$)และแพลตินัมแล้วนำไปอบในเตาสำหรับอบที่อุณหภูมิ 120 $^{\circ}C$ เป็นเวลา 2 นาที จะได้ชั้นไททาเนียมชั้นที่ 1

4. ทำขั้นตอนที่ 3 ซ้ำจนได้จำนวนชั้นไททาเนียมที่ต้องการ แล้วจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 120 $^{\circ}C$ เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ไททาเนียมแห้งติดกระจกนำไฟฟ้า( สำหรับแพลตินัมไม่ต้องทำขั้นตอนที่ 3 ซ้ำ )

5. หลังจากอบที่อุณหภูมิ 120 $^{\circ}C$ เป็นเวลา 30 นาทีแล้วต้องนำไปอบที่อุณหภูมิ 450 $^{\circ}C$ เป็นเวลา 30 นาที เพื่อทำให้ไททาเนียมเกิดการแตกตัว

6. นำแผ่นกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบไททาเนียมไปจุ่มในสารย้อมไวแสงเป็นเวลา 1 วันที่อุณหภูมิปกติ หรือนำไปจุ่มสารย้อมไวแสงที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 2 ชม.( หากจุ่มที่อุณหภูมิห้องหลักจากการจุ่มจะต้องนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 °Cเป็นเวลา10 นาที )

### 3.2.2 ขั้นตอนการสร้างขั้วบวกด้วยคาร์บอนนาโนทิวป์ (CNTs) โดยวิธีสเปรย์

#### 3.2.2.1 ทดลองเพิ่มเวลาในการ Ultrasonic CNTs

1. เตรียม CNTs กับสารละลาย DMF ที่จะใช้ในอัตราส่วน 0.01:3

2. ใส่คาร์บอนนาโนทิวป์ลงในสารละลาย DMF แล้วนำไป UltraSonic แบบ Tip ปรับให้ได้ 0.7 A โดยใช้เวลาในการ Tip คือ 35 , 300 และ 600 วินาที

3. ทำความสะอาดกระจกนำไฟฟ้าด้วยการ UltraSonic ในแอลกอฮอล์และ acetone จากนั้นนำไปเป่าให้แห้งด้วย Air Gun

4. นำ CNTs ที่กระจายตัวอยู่ในสารละลาย DMF ไปใส่ในเครื่องพ่นสเปรย์โดยปรับแรงดันของก๊าซ $N_2$ ที่ 50 kg/cm$^2$ แล้วพ่นลงบนกระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการทำความสะอาดแล้ว โดยพ่นทำมุม 45° กับฐานวางชิ้นงานและห่างจากชิ้นงานประมาณ 30 cm การพ่นแต่ละครั้งจะเป็นการกดและปล่อยเป็นจำนวน 5 ครั้ง

5. นำไปอบที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นเวลา 30 นาทีเพื่อให้สารละลาย DMF เกิดการระเหย

#### 3.2.2.2 ทดลองเพิ่มความหนาของ CNTs

1. เตรียม CNTs กับสารละลาย DMF ที่จะใช้ในอัตราส่วน 0.01:3

2. ใส่คาร์บอนนาโนทิวป์ลงในสารละลาย DMF แล้วนำไป UltraSonic แบบ Tip ปรับให้ได้ 0.7 A โดยใช้เวลาในการ Tip 105 วินาที

3. ทำความสะอาดกระจกนำไฟฟ้าด้วยการ UltraSonic ในแอลกอฮอล์และ acetone จากนั้นนำไปเป่าให้แห้งด้วย Air Gun

4. นำ CNTs ที่กระจายตัวอยู่ในสารละลาย DMF ไปใส่ในเครื่องพ่นสเปรย์โดยปรับแรงดันของก๊าซ $N_2$ ที่ 50 kg/cm$^2$ แล้วพ่นลงบนกระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการทำความสะอาดแล้ว โดยพ่นทำมุม 45° กับฐานวางชิ้นงานและห่างจากชิ้นงานประมาณ 30 cm

5. พ่นทีละ 5 ครั้งแล้วจึงนำไปอบที่ 300 °C เป็นวลา 10 นาทีแต่ชั้นที่เราต้องการจะนำไปอบ 30 นาที ที่ 300 °C

6. โดยพ่นแบ่งเป็น 0 , 3 , 5 , 6 , 10 , 15 , 20 , 25 , 30 , 35 และ 40 ชั้น

### 3.2.2.3 ทดลองเพิ่มอุณหภูมิในการอบ CNTs

1. เตรียม CNTs กับสารละลาย DMF ที่จะใช้ในอัตราส่วน 0.01:3

2. ใส่คาร์บอนนาโนทิวป์ลงในสารละลาย DMF แล้วนำไป UltraSonic แบบ Tip ปรับให้ได้ 0.7 A โดยใช้เวลาในการ Tip คือ 105 วินาที

3. ทำความสะอาดกระจกนำไฟฟ้าด้วยการ UltraSonic ในแอลกอฮอล์และ acetone จากนั้นนำไปเป่าให้แห้งด้วย Air Gun

4. นำ CNTs ที่กระจายตัวอยู่ในสารละลาย DMF ไปใส่ในเครื่องพ่นสเปรย์โดยปรับแรงดันของก๊าซ $N_2$ ที่ 50 kg/cm$^2$ แล้วพ่นลงบนกระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการทำความสะอาดแล้ว โดยพ่นทำมุม 45° กับฐานวางชิ้นงานและห่างจากชิ้นงานประมาณ 30 cm

5. พ่นทีละ 5 ครั้งแล้วจึงนำไปอบที่ 150 , 200 , 250 , 300 , 350 และ 400 °C เป็นวลา 10 นาทีและชั้นที่ 30 จะนำไปอบ 30 นาทีที่ 150 , 200 , 250 , 300 , 350 และ 400 °

### 3.2.3 ขั้นตอนการประกบ

1. สำหรับขั้วลบคือไททาเนียม จะต้องนำไปเป่าให้แห้งด้วยไดเป่าผม

2. สำหรับขั้วบวกที่ทำจาก CNTs จะต้องจำกัดพื้นที่ให้เหลือ 0.25 cm$^2$

3. สำหรับการประกบขั้วไทเทเนียมกับ CNTs ใช้ไทเทเนียม 7 ชั้นในการประกบ เพราะเป็นจำนวนชั้นที่ผู้ทดลองสามารถทำได้ประสิทธิภาพมากสุด

4. นำขั้วทั้งสองมาประกบกันด้วยแผ่น Sealing Sheet แล้วใช้หัวแร้งจี้เพื่อให้แผ่น Sealing Sheet ละลายติดกับขั้วทั้ง 2

5. ฉีดอิเล็กโตรไลต์ลงในช่องว่างระหว่างขั้ว จะต้องให้อิเล็กโตรไลต์เข้าสู่พื้นที่เซลล์ทั้งหมด

## 3.3 ขั้นตอนการวัด

ในขั้นตอนเริ่มต้น นำเซลล์มาตรฐานมาต่อเข้ากับเครื่องวัดเพื่อทำการ calibrate เครื่อง Solar simulator ให้ได้กำลังไฟฟ้าที่ 100 $mW/cm^2$ และ AM = 1.5 หลังจากนั้นจึงนำเซลล์ทดลองที่ได้ทำการสร้างนำมาวัดซึ่งในขั้นตอนการวัดนั้นจะทำการต่อเซลล์เข้าเครื่อง Source Meter หลังจากนั้นทำการให้แสงอาทิตย์จำลองจากเครื่อง Solar simulator แล้วทำการ simulate ด้วยโปรแกรม Labview ซึ่งในโปรแกรมสามารถควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆเพื่อทำการ simulate หาค่ากระแสและแรงดัน

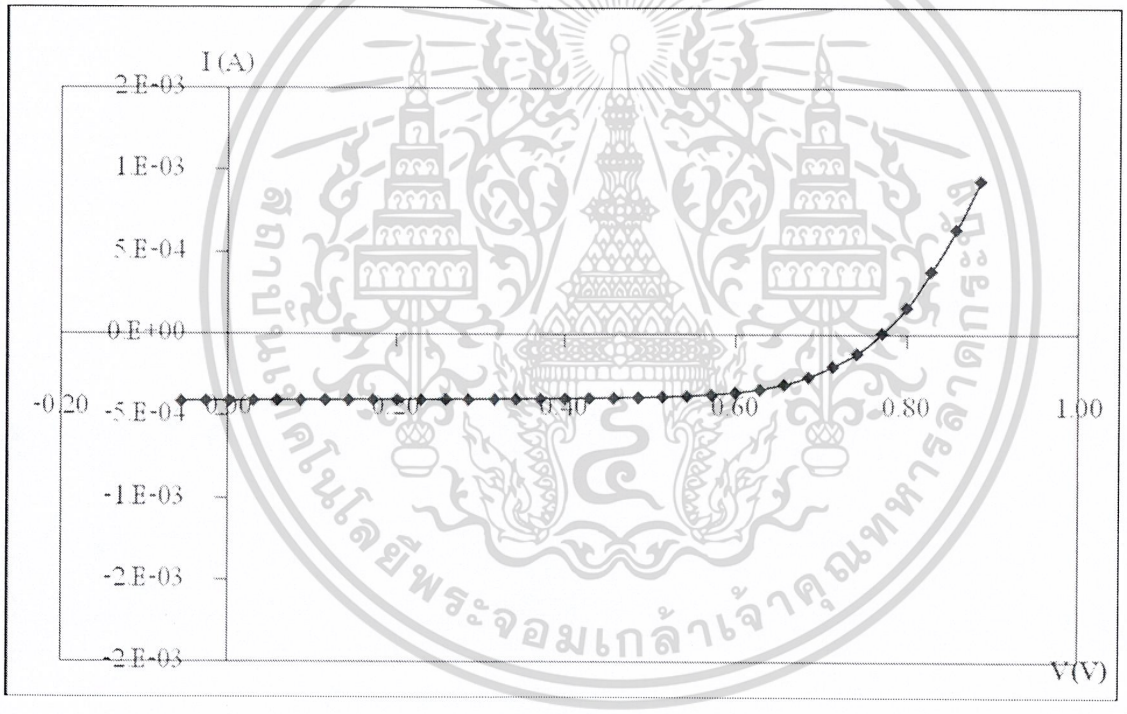
# บทที่ 4

# ผลการทดลอง

## 4.1 ผลของจำนวนชั้น ( layer ) $TiO_2$ ต่อประสิทธิภาพของเซลล์

ในการทดลองนี้ได้ทำการเพิ่มชั้นของ $TiO_2$ (ขั้วลบ)โดยวิธีการสกรีนจำนวนชั้น 1 ชั้น ( layer ) จนถึง 9 ชั้น เพื่อหาว่าจำนวนชั้นเท่าไรให้ประสิทธิภาพดีที่สุด (โดยขั้วบวกสกรีนสาร Pt จำนวน 1 ชั้น)

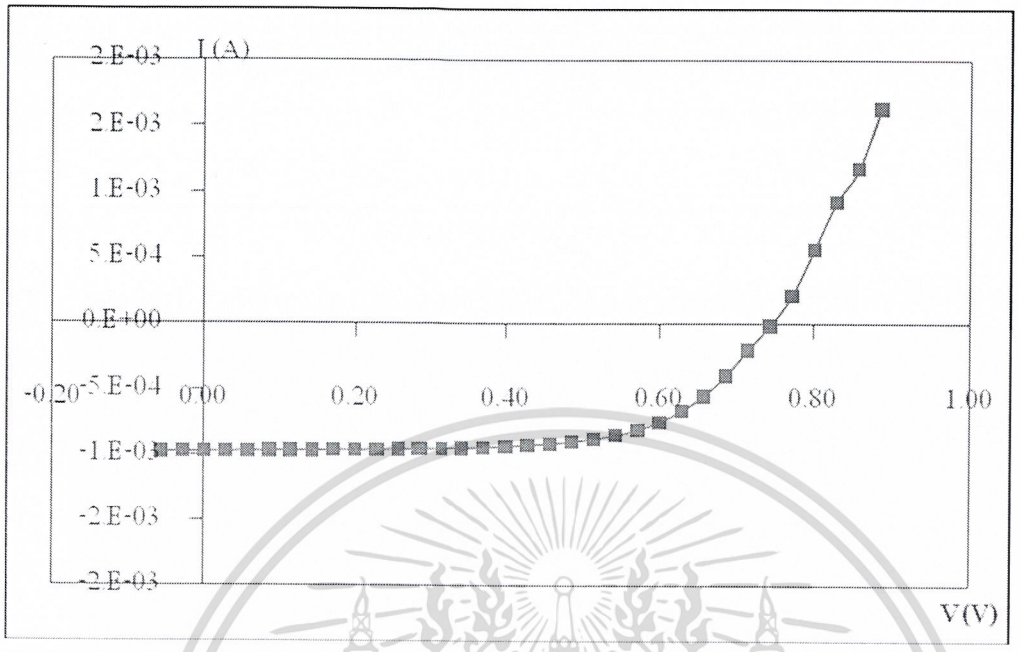
### 4.1.1 ผลการทดลองสกรีน $TiO_2$ 1 layer




รูปที่ 4.1 กราฟกระแสแสงของ $TiO_2$ 1 layer

มีค่า Jsc = 1.62 $mA/cm^2$ , Voc = 0.78 V , FF = 0.68 , Eff = 0.85 %

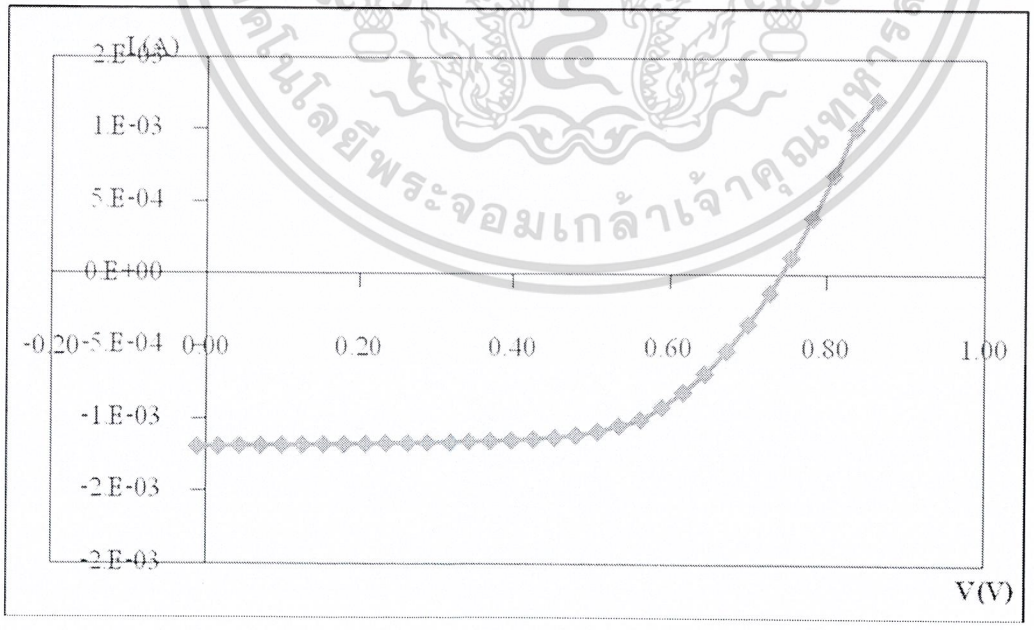
### 4.1.2 ผลการทดลองสกรีน $TiO_2$ 2 layer




รูปที่ 4.2 กราฟกระแสแสงของ $TiO_2$ 2 layer

มีค่า Jsc = 3.89 mA/cm$^2$ , Voc = 0.74 V , FF = 0.64 , Eff = 1.84 %

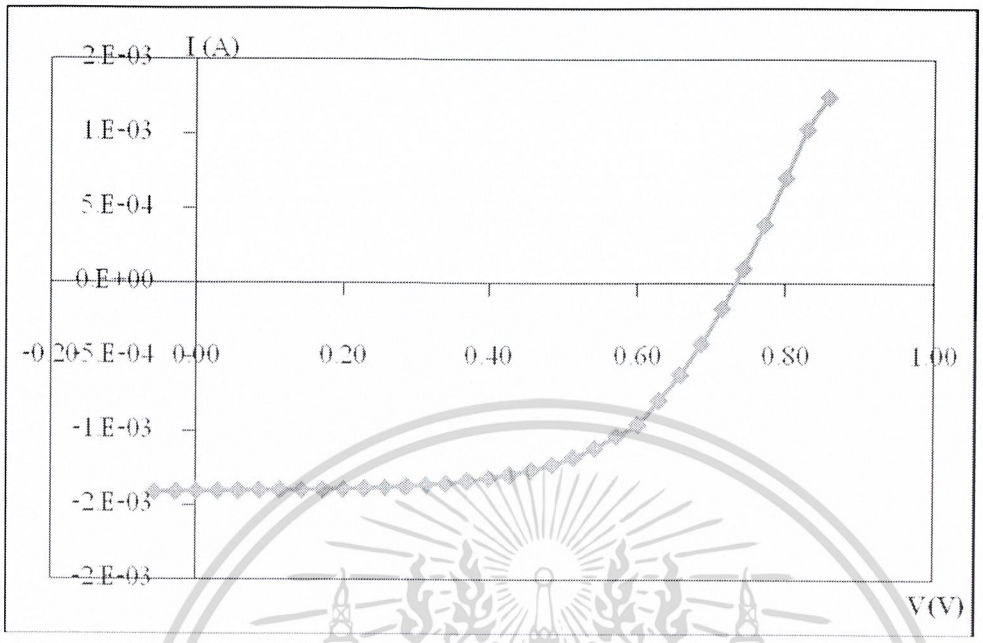
### 4.1.3 ผลการทดลองสกรีน $TiO_2$ 3 layer




รูปที่ 4.3 กราฟกระแสแสงของ $TiO_2$ 3 layer

มีค่า Jsc = 4.75 mA/cm$^2$ , Voc = 0.74 V , FF = 0.65 , Eff = 1.87 %

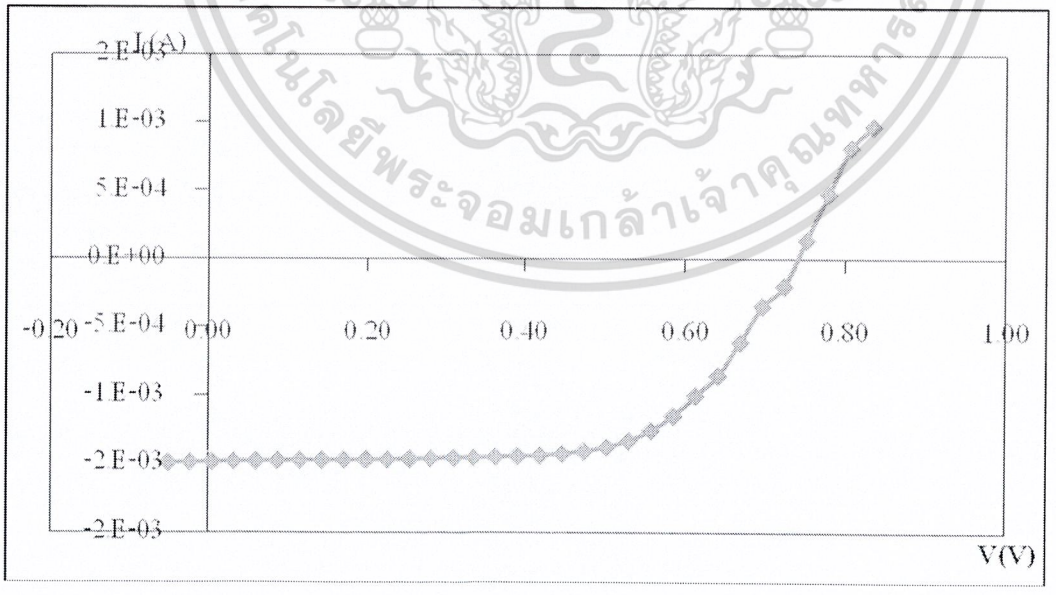
### 4.1.4 ผลการทดลองสกรีน $TiO_2$ 4 layer




รูปที่ 4.4 กราฟกระแสแสงของ $TiO_2$ 4 layer

มีค่า Jsc = 5.61 mA/cm$^2$ , Voc = 0.74 V , FF = 0.58 , Eff = 2.41 %

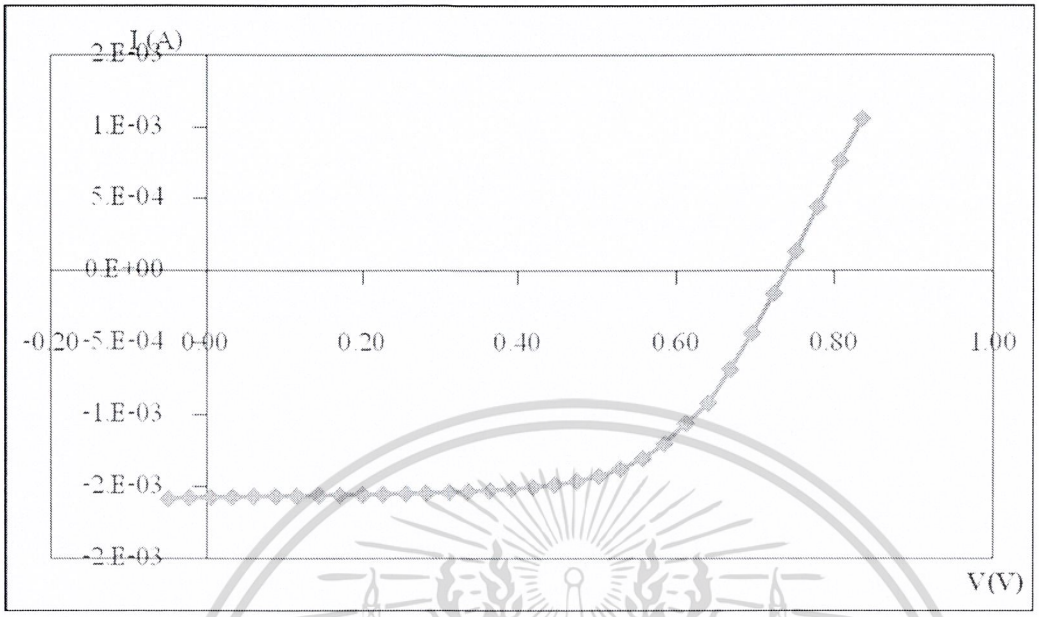
### 4.1.5 ผลการทดลองสกรีน $TiO_2$ 5 layer




รูปที่ 4.5 กราฟกระแสแสงของ $TiO_2$ 5 layer

มีค่า Jsc = 5.94 mA/cm$^2$ , Voc = 0.7 V , FF = 0.66 , Eff = 2.71 %

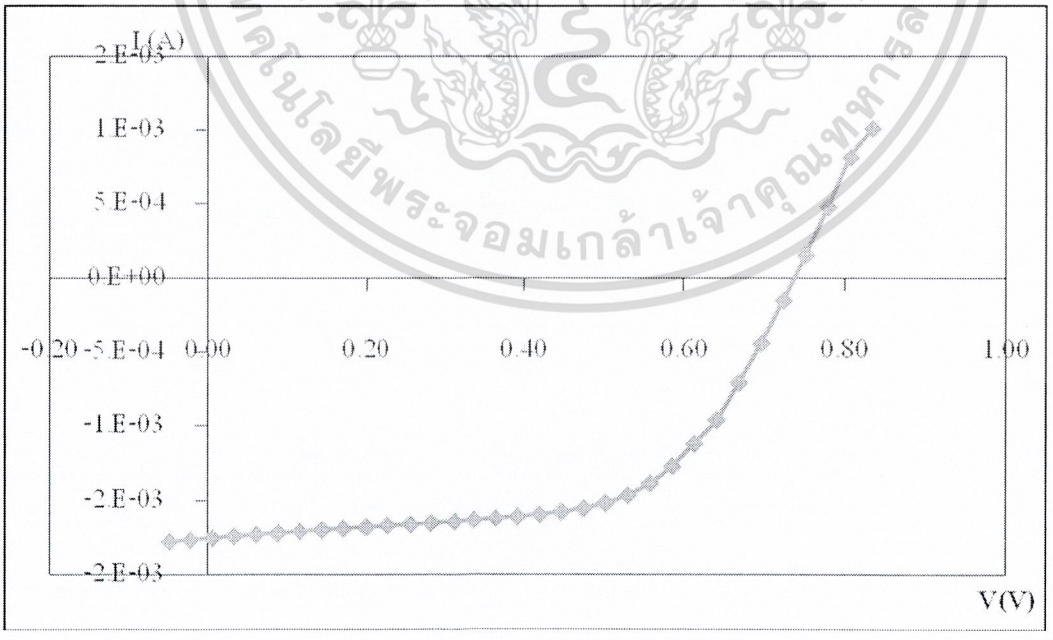
### 4.1.6 ผลการทดลองสกรีน $TiO_2$ 6 layer




รูปที่ 4.6 กราฟกระแสแสงของ $TiO_2$ 6 layer

มีค่า Jsc = 6.29 mA/cm$^2$ , Voc = 0.7 V , FF = 0.64 , Eff = 2.84 %

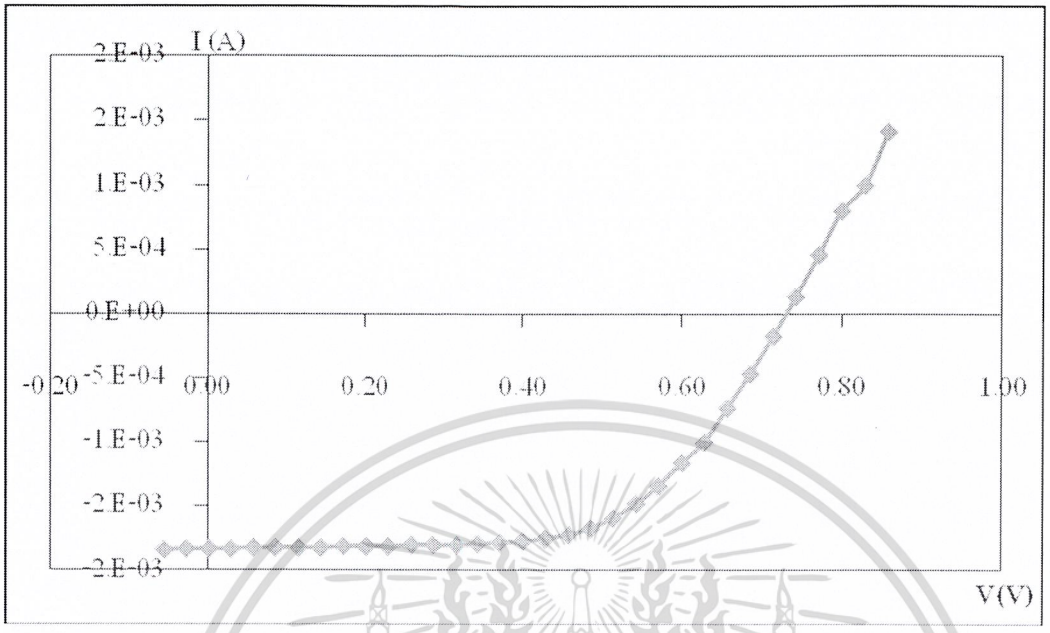
### 4.1.7 ผลการทดลองสกรีน $TiO_2$ 7 layer




รูปที่ 4.7 กราฟกระแสแสงของ $TiO_2$ 7 layer

มีค่า Jsc = 6.43 mA/cm$^2$ , Voc = 0.74 V , FF = 0.62 , Eff = 3.05 %

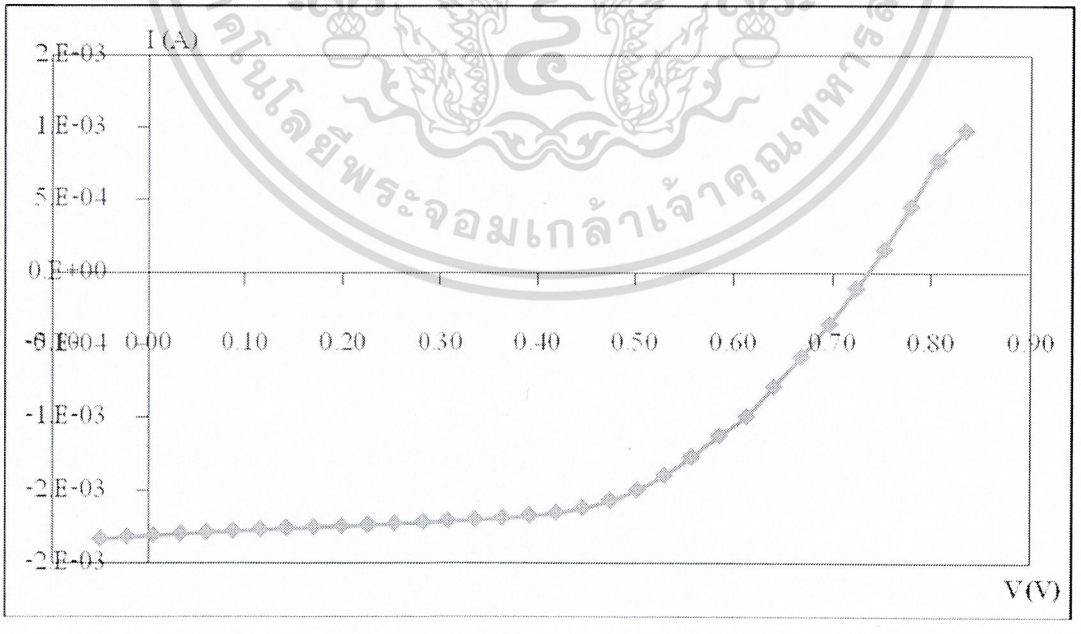
### 4.1.8 ผลการทดลองสกรีน $TiO_2$ 8 layer




รูปที่ 4.8 กราฟกระแสแสงของ $TiO_2$ 8 layer

มีค่า Jsc = 6.97 mA/cm$^2$ , Voc = 0.72 V , FF = 0.59 , Eff = 2.96 %

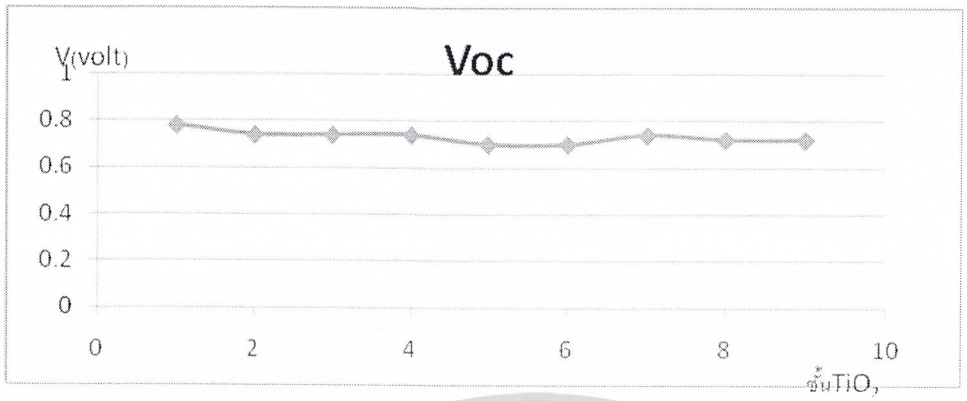
### 4.1.9 ผลการทดลองสกรีน $TiO_2$ 9 layer

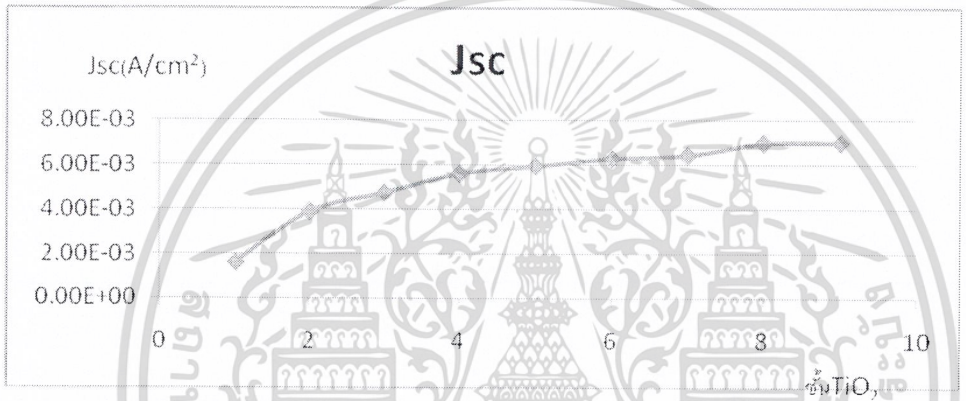


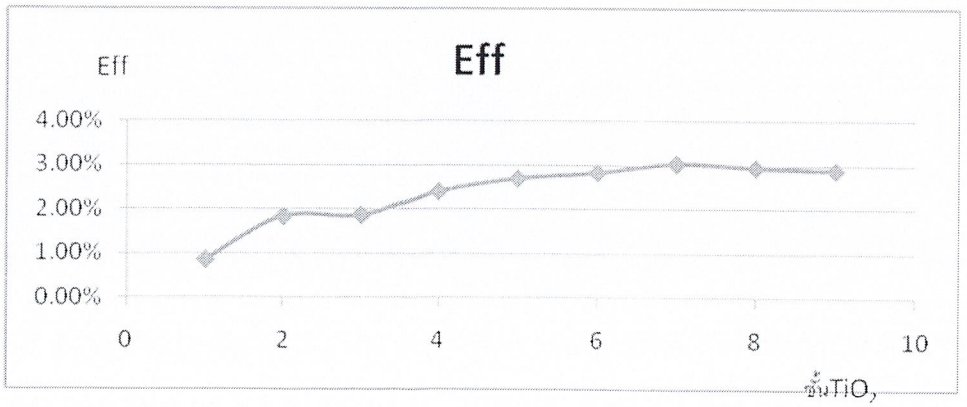

รูปที่ 4.9 กราฟกระแสแสงของ $TiO_2$ 9 layer

มีค่า Jsc = 7 mA/cm$^2$ , Voc = 0.72 V , FF = 0.58 , Eff = 2.90 %

## 4.1.10 กราฟแสดงค่าตัวแปรต่างๆเมื่อมีการเพิ่มชั้น $TiO_2$ และใช้ Pt เป็นขั้วบวก





## 4.1.11วิเคราะห์ผลการทดลองเมื่อเพิ่มจำนวนชั้น $TiO_2$ โดยใช้ Pt เป็นขั้วบวก

จากการทดลองสร้าง Dye-sensitized Solar Cell โดยการเพิ่มจำนวนชั้น $TiO_2$ พบว่าประสิทธิภาพที่จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนชั้นจนถึงชั้นที่ 7 ซึ่งเกิดจากพื้นที่ผิวของไททาเนียมสามารถดูดซับสารย้อมไวแสงไว้ได้มากขึ้นจึงทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนในตัวเซลล์มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตได้จากกระแสต่อพื้นที่(Jsc)ที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นมากขึ้นเป็น 8 และ 9 ชั้น พบว่าประสิทธิภาพเริ่มมีค่าลดลงเล็กน้อย ซึ่งเกิดมาจาก อัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสนั้นมีค่าลดลงอย่างมากสังเกตได้จาก Jsc ของชั้นที่ 8 และ 9 นั้นแทบไม่ต่างกันเลย ในขณะที่ค่า FF นั้นเริ่มมีค่าลดลงจึงทำให้ประสิทธิภาพนั้นลดลงเล็กน้อย การค่ากระแส Iscที่ได้นั้นมีค่าคงที่เกิดจากจำนวนชั้นที่มากขึ้นของไททาเนียมทำให้แสงไม่อาจส่องถึงสารย้อมไวแสงในชั้นล่างๆจึงทำ กระแสนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง สำหรับค่า FF ที่มีค่าลดลงนั้นเกิดมาจากความต้านทานมีค่ามากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มจำนวนชั้น จากการทดลองจึงสรุปได้ว่าจำนวนชั้นไททาเนียมที่ดีที่สุด คือ 7 ชั้น

## 4.2 ผลการทดลองเมื่อใช้ CNTs เป็นขั้วบวก

### 4.2.1 ผลการทดลองเปลี่ยนเวลาในการ Tip CNTs

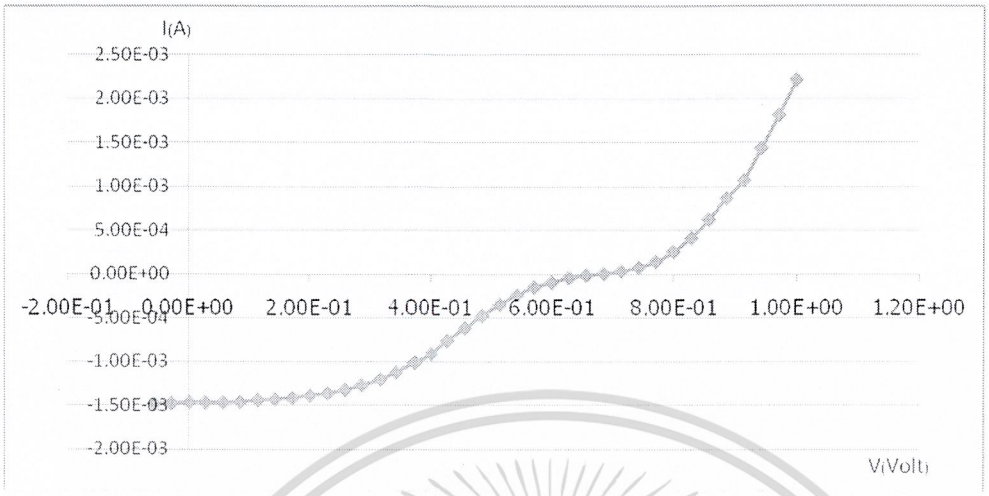
โดยใช้ $TiO_2$ 7 ชั้น สร้างขั้วCNTs โดยวิธี Spray CNTs:DMF = 0.01:3 spray ห่างจากชิ้นงาน 25 cm ทำมุม $60^{o}$ กับพื้นราบ ความเร็วก๊าซ $N_2$ 50 $kg/cm^2$ ความหนา 5 ชั้น อบที่อุณหภูมิ 300 $^{o}C$

#### 4.2.1.1 เวลาในการ Tip 35 วินาที

รูปที่ 4.10 กราฟกระแสแสงของ Tip 35 sec

มีค่า Jsc = 6.52 $mA/cm^2$ , Voc = 0.686 V , FF = 0.366 , Eff = 1.64 %

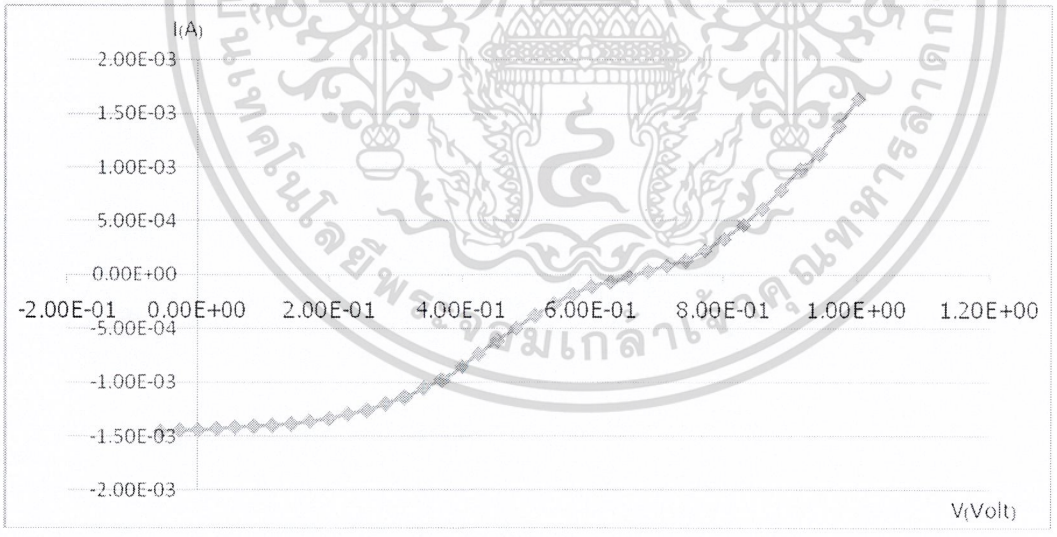
### 4.2.1.2 เวลาในการ Tip 5 นาที




รูปที่ 4.11 กราฟกระแสแสงของ Tip 5 minute

มีค่า Jsc = 5.87 mA/cm$^2$ , Voc = 0.686 V , FF = 0.382 , Eff = 1.52 %

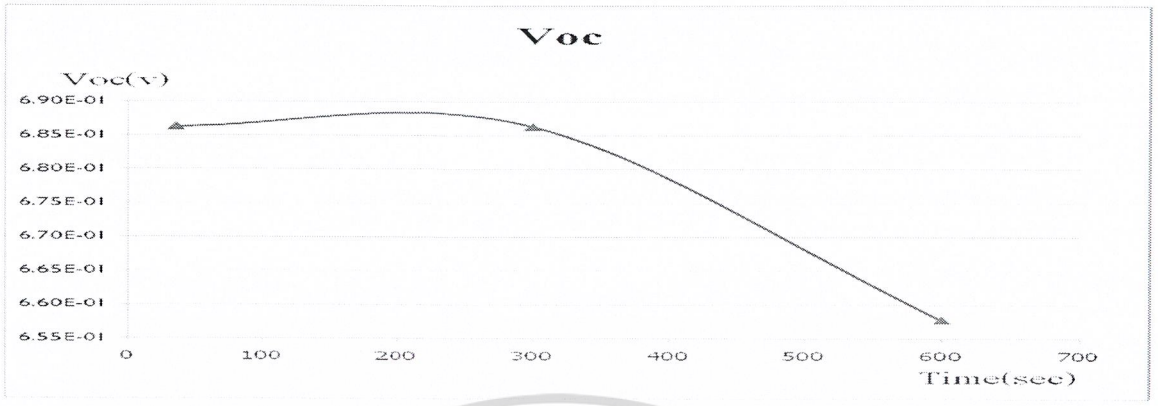
### 4.2.1.3 เวลาในการ Tip 10 นาที

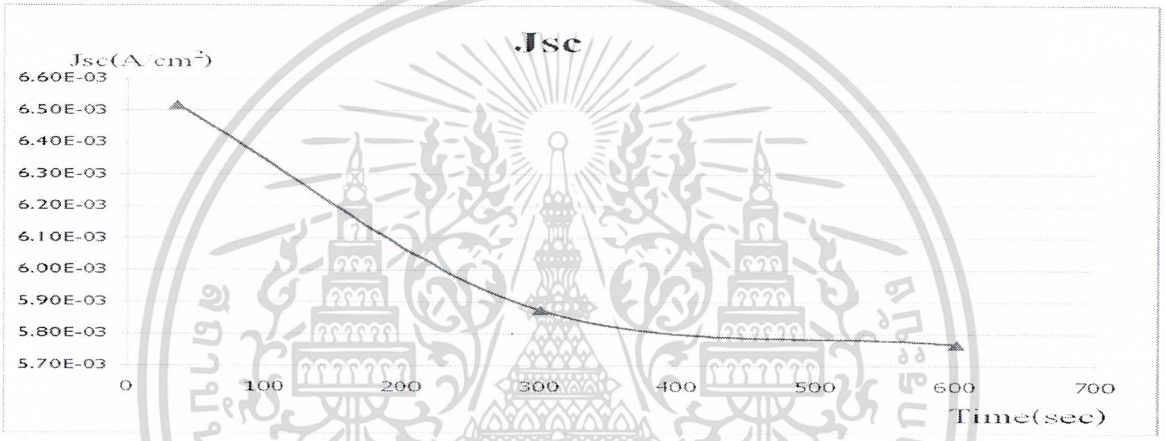


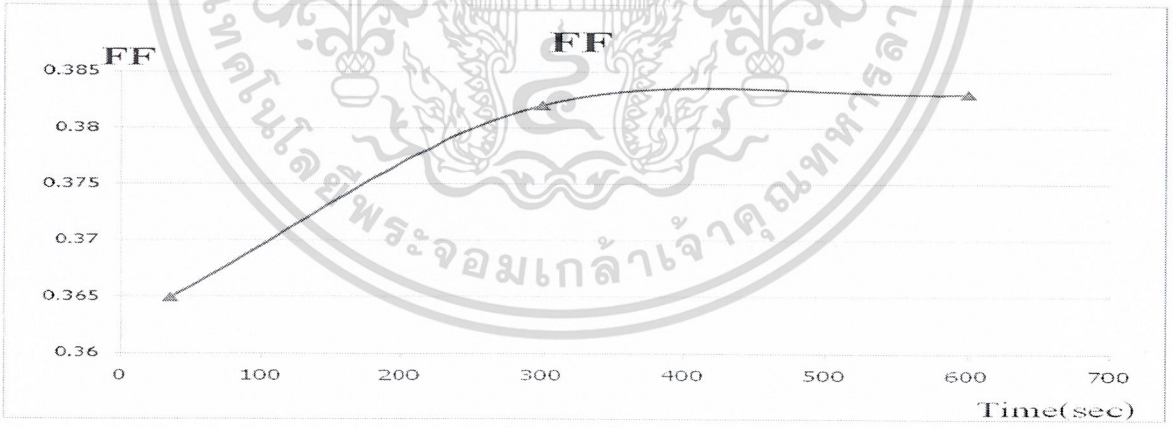

รูปที่ 4.12 กราฟกระแสแสงของ Tip 5 minute

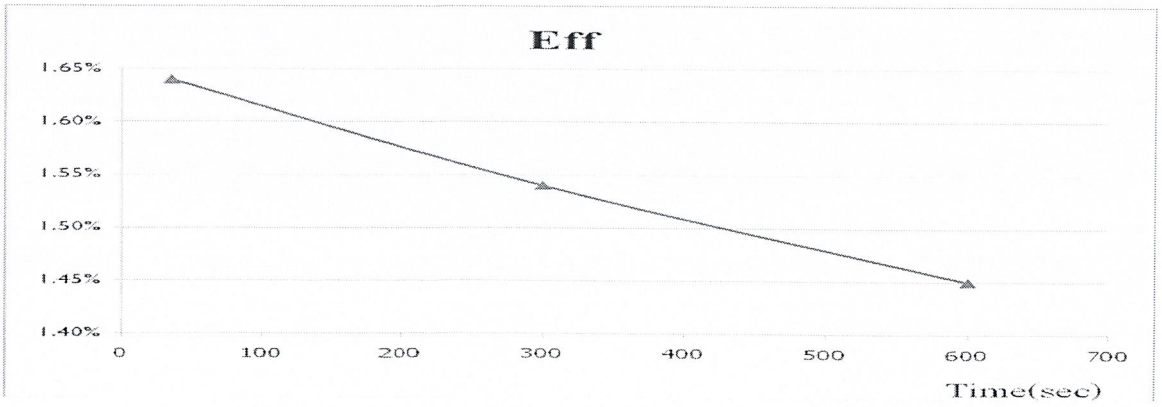
มีค่า Jsc = 5.77 mA/cm$^2$ , Voc = 0.658 V , FF = 0.383 , Eff = 1.45 %

## 4.2.1.4 กราฟแสดงตัวแปรต่างๆโดยการเปลี่ยนเวลาในการ Ultrasonic แบบ Tip



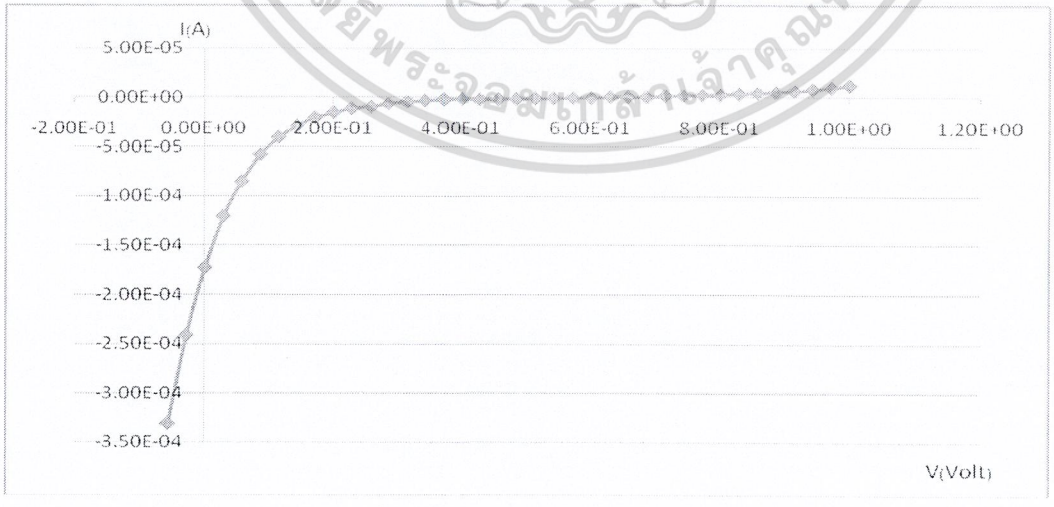
### 4.2.1.5 วิเคราะห์ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนเวลาในการ Tip Ultra sonic CNTs

จากการทดลองสร้าง Dye-sensitized Solar Cell โดยเปลี่ยนขั้วบวกจาก Pt เป็น CNTs ซึ่งเปลี่ยนเวลาในการ Tip CNTs โดยมี CNTs 5 ชั้นและอุณหภูมิ 300 °C พบว่า Voc มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเวลาในการ Tip มากขึ้น Jsc มีค่าลดลงเมื่อเวลาในการ Tip มากขึ้นอาจเนื่องมาจากเส้นท่อ CNTs ขาดทำให้เกิดความต้านทานภายในเซลล์มากขึ้น Jsc จึงลดลง FF มากขึ้นเมื่อเวลาในการ Tip มากขึ้นอาจเพราะเมื่อ Tip นานขึ้นจึงทำให้ CNTs เกิดการกระจายตัวมากขึ้นทำให้ CNTs เกิดการสัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์มากขึ้นจึงเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์มากขึ้น Eff ลดลงเพราะ Jsc และ Voc ที่ลดลง จึงสรุปได้ว่าควรใช้เวลาในการ Tip น้อยๆ

### 4.2.2 ผลการทดลองเปลี่ยนความหนาของ CNTs

โดยใช้ $TiO_2$ 7 ชั้น สร้างขั้วCNTs โดยวิธี Spray CNTs:DMF = 0.01:3 ระยะเวลา Tip 105 วินาที spray ห่างจากชิ้นงาน 25 cm ทำมุม 60° กับพื้นราบ ความเร็วก๊าซ $N_2$ 50 kg/cm$^2$ อบที่อุณหภูมิ 300 °C

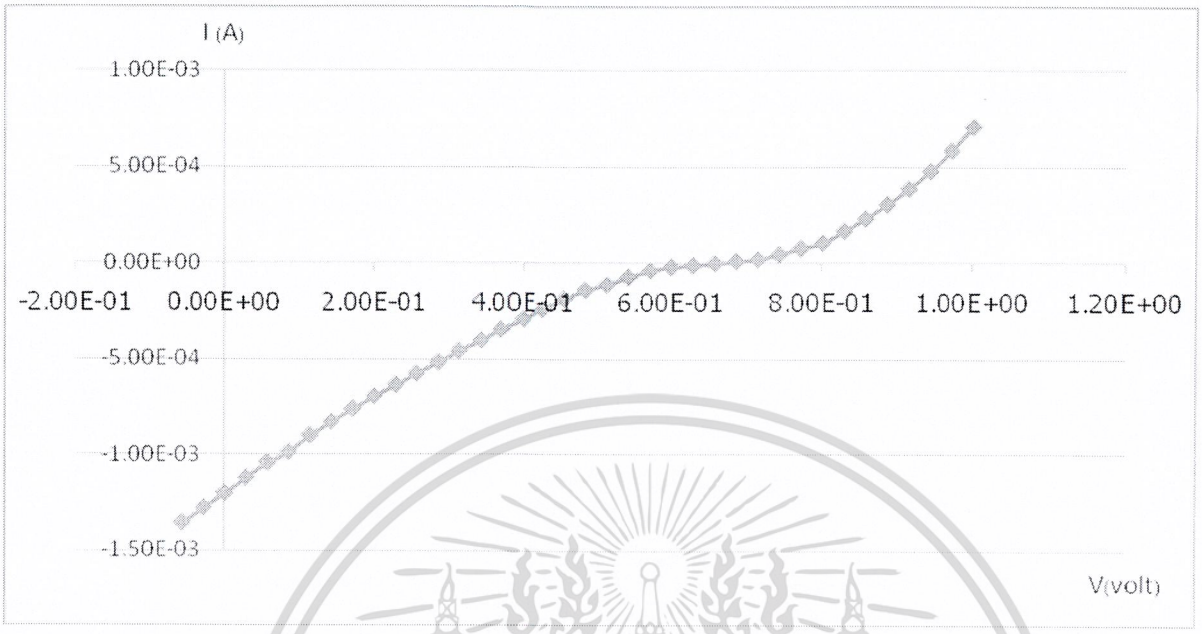
### 4.2.2.1 ความหนา CNTs 0 ชั้น




รูปที่ 4.13 กราฟกระแสแสงของ CNTs ที่ 0 ชั้น

มีค่า Jsc = 0.69 mA/cm$^2$ , Voc = 0.58 V , FF = 0.05 , Eff = 0.02 %

## 4.2.2.ความหนา CNTs 3 ชั้น




รูปที่ 4.14 กราฟกระแสแสงของ CNTs ที่ 3 ชั้น

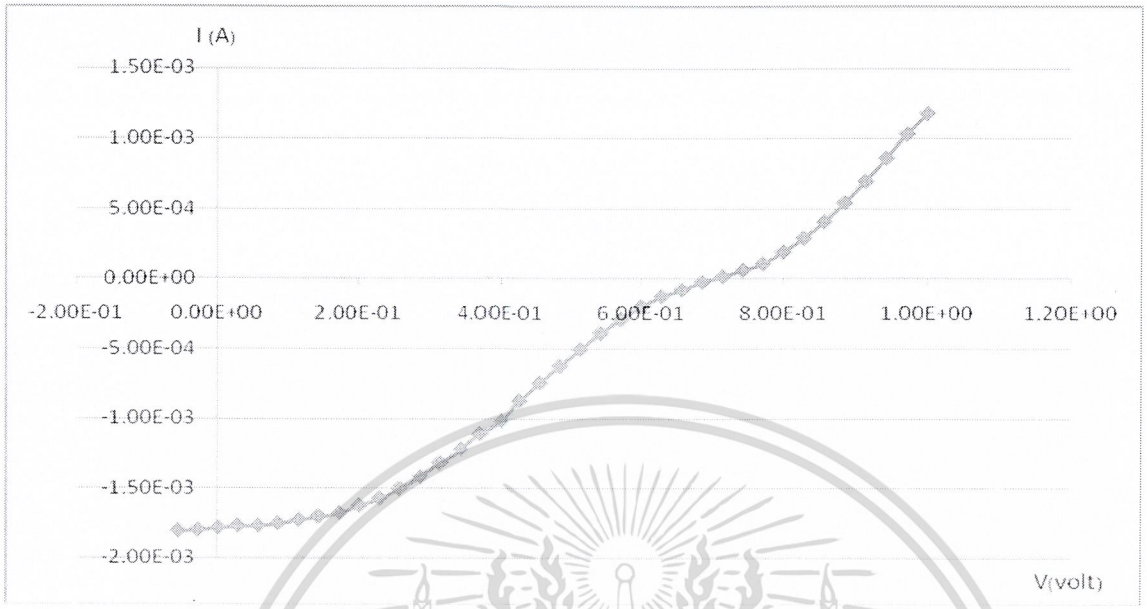
มีค่า Jsc = 4.81 mA/cm$^2$ , Voc = 0.66 V , FF = 0.19 , Eff = 0.6 %

## 4.2.2.3 ความหนา CNTs 5 ชั้น

รูปที่ 4.15 กราฟกระแสแสงของ CNTs ที่ 5 ชั้น

มีค่า Jsc = 5.28 mA/cm$^2$ , Voc = 0.69 V , FF = 0.20 , Eff = 0.74 %

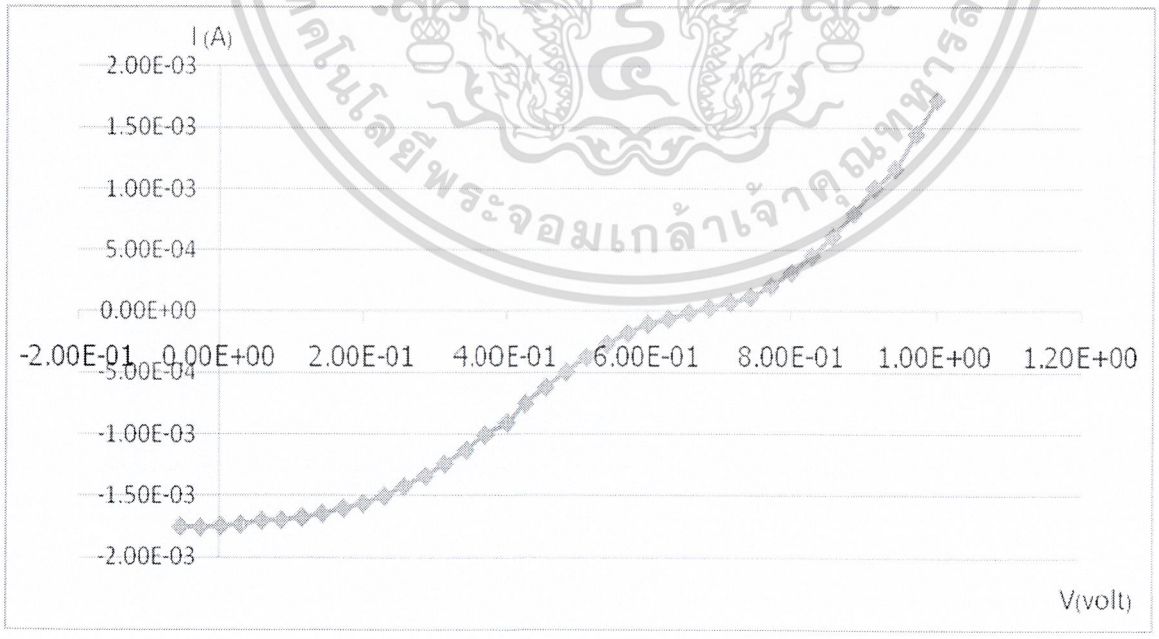
### 4.2.2.4 ความหนา CNTs 6 ชั้น




รูปที่ 4.16 กราฟกระแสแสงของ CNTs ที่ 6 ชั้น

มีค่า Jsc = 7.13 mA/cm$^2$ , Voc = 0.72 V , FF = 0.33 , Eff = 1.68 %

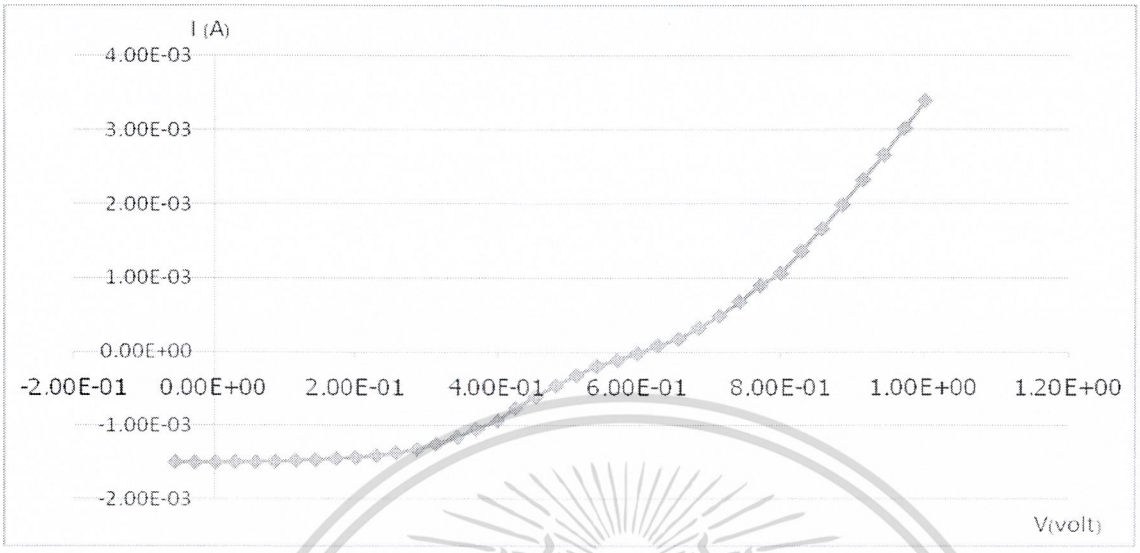
### 4.2.2.5 ความหนา CNTs 10 ชั้น




รูปที่ 4.17 กราฟกระแสแสงของ CNTs ที่ 10 ชั้น

มีค่า Jsc = 6.98 mA/cm$^2$ , Voc = 0.66 V , FF = 0.34 , Eff = 1.57 %

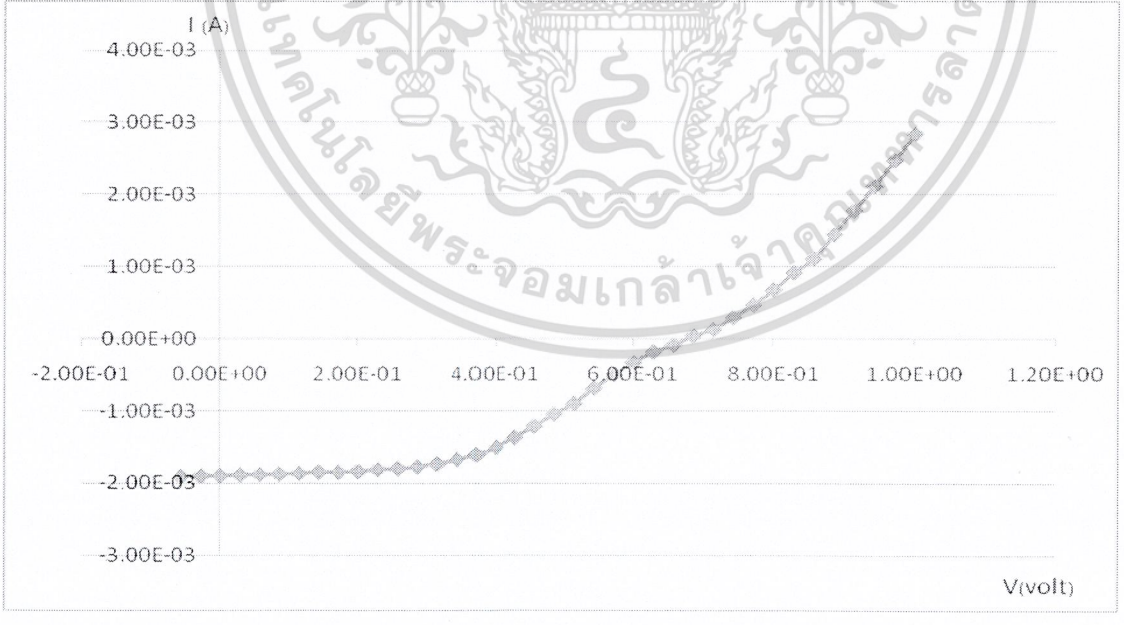
### 4.2.2.6 ความหนา CNTs 15 ชั้น




รูปที่ 4.18 กราฟกระแสแสงของ CNTs ที่ 15 ชั้น

มีค่า Jsc = 5.98 mA/cm$^2$ , Voc = 0.60 V , FF = 0.44 , Eff = 1.59 %

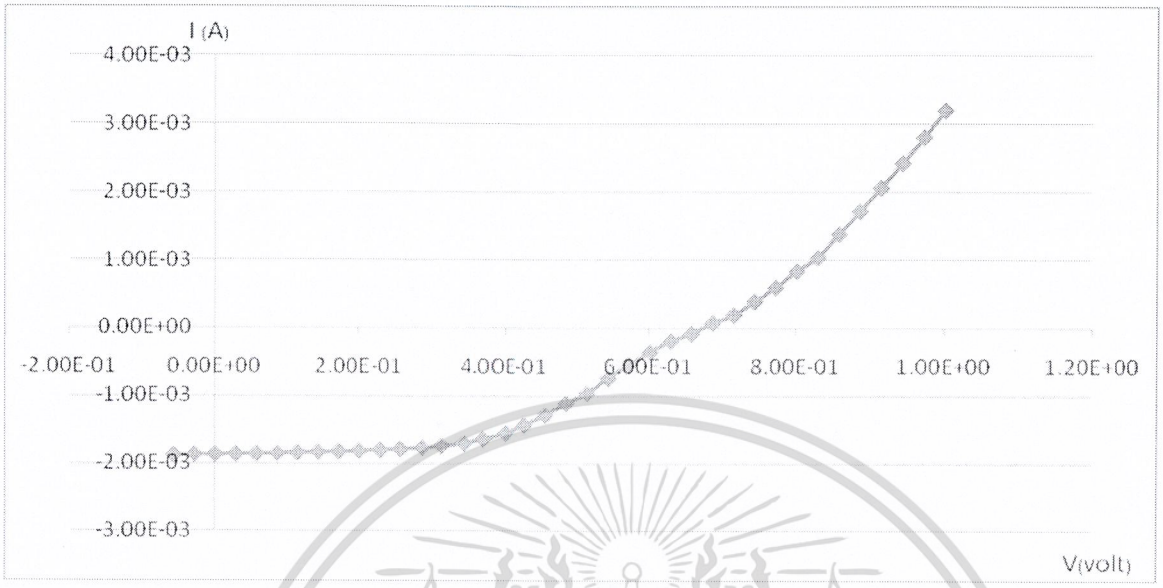
### 4.2.2.7 ความหนา CNTs 20 ชั้น




รูปที่ 4.19 กราฟกระแสแสงของ CNTs ที่ 20 ชั้น

มีค่า Jsc = 7.60 mA/cm$^2$ , Voc = 0.67 V , FF = 0.46 , Eff = 2.41 %

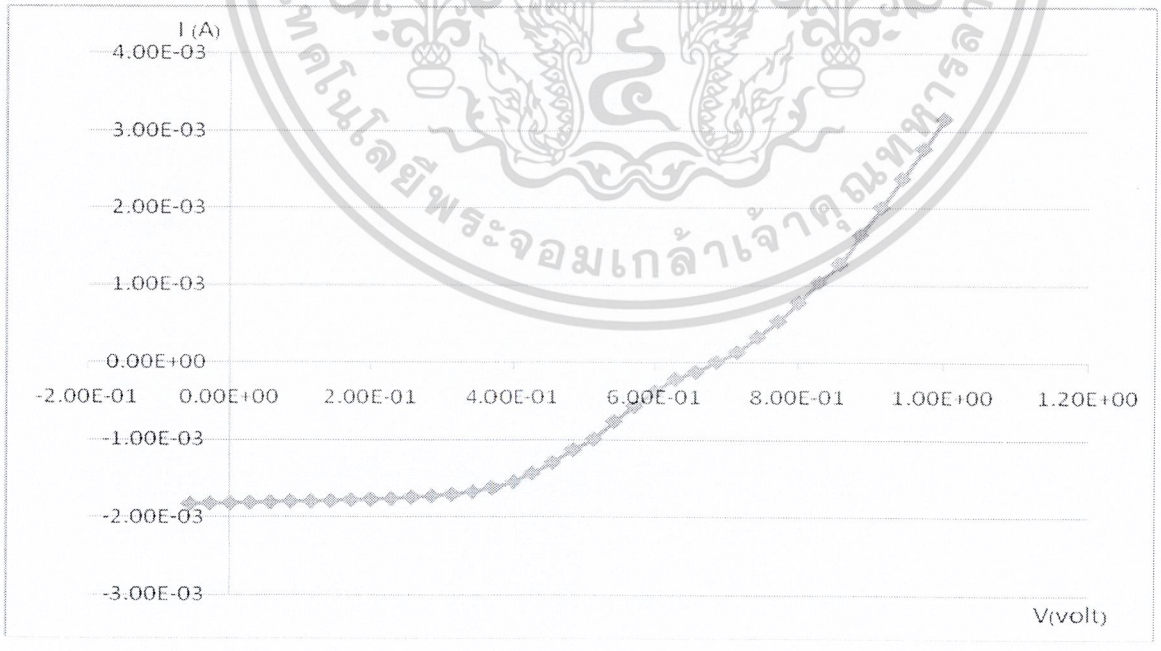
### 4.2.2.8 ความหนา CNTs 25 ชั้น




รูปที่ 4.20 กราฟกระแสแสงของ CNTs ที่ 25 ชั้น

มีค่า Jsc = 7.50 mA/cm$^2$ , Voc = 0.69 V , FF = 0.49 , Eff = 2.50 %

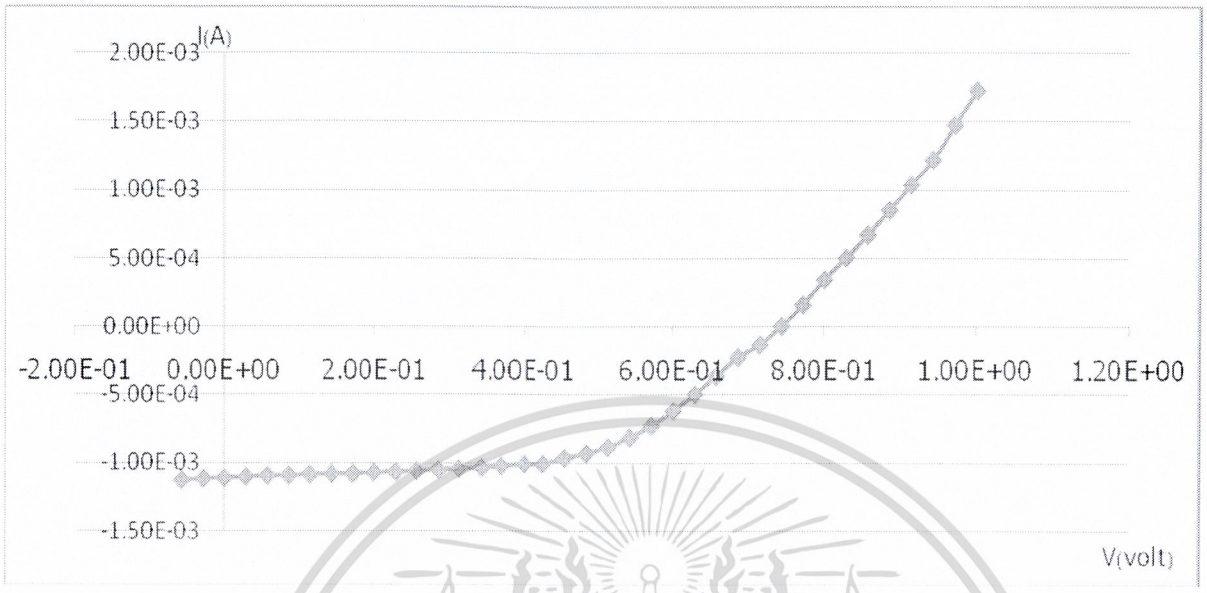
### 4.2.2.9 ความหนา CNTs 30 ชั้น




รูปที่ 4.21 กราฟกระแสแสงของ CNTs ที่ 30 ชั้น

มีค่า Jsc = 7.28 mA/cm$^2$ , Voc = 0.69 V , FF = 0.49 , Eff = 2.47 %

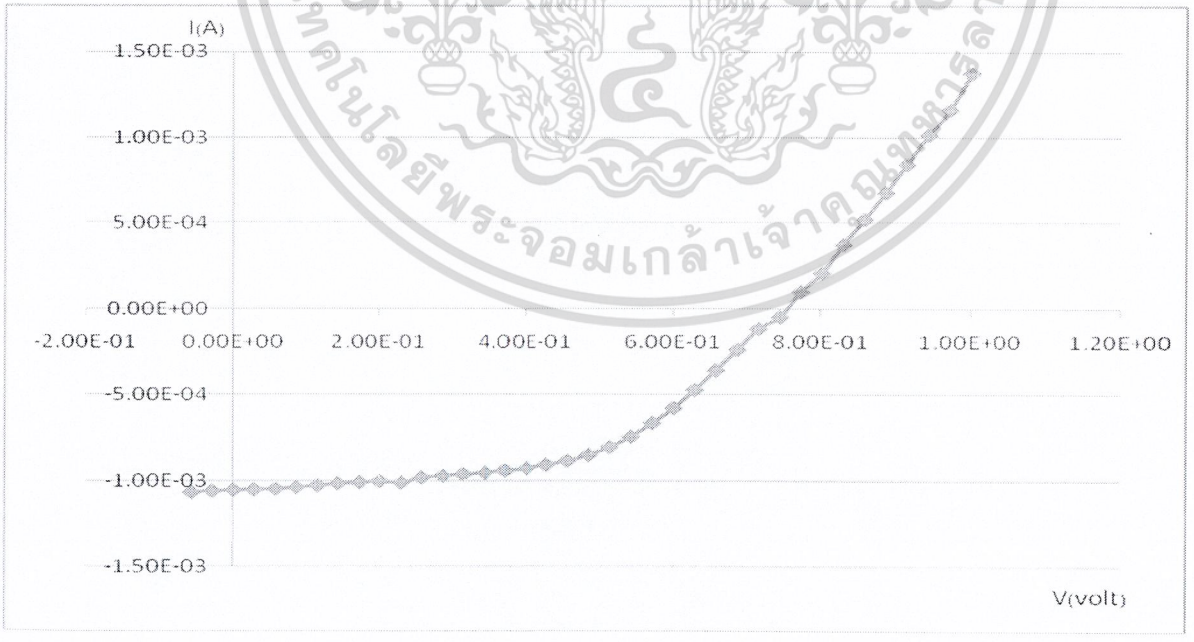
## 4.2.2.10 ความหนา CNTs 35 ชั้น




รูปที่ 4.22 กราฟกระแสแสงของ CNTs ที่ 35 ชั้น

มีค่า Jsc = 4.45 mA/cm$^2$ , Voc = 0.74 V , FF = 0.55 , Eff = 1.82 %

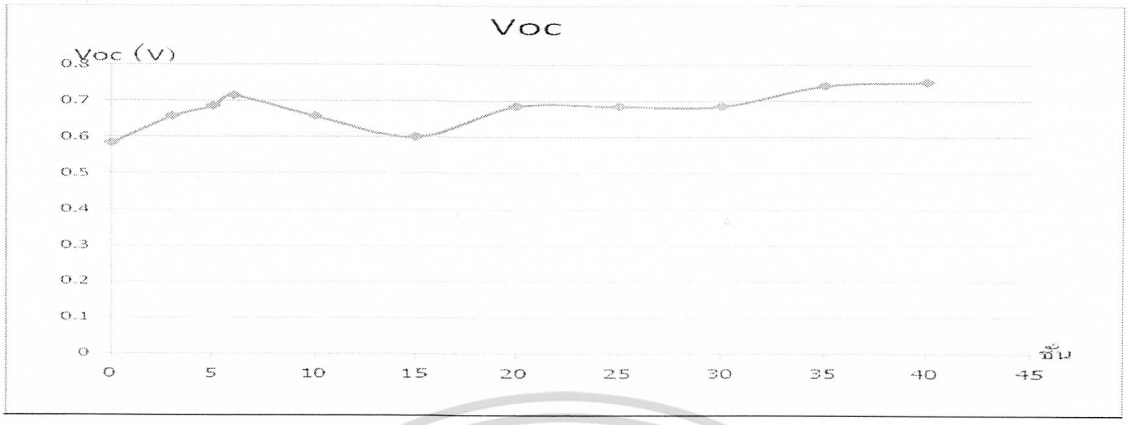
## 4.2.2.11 ความหนา CNTs 40 ชั้น

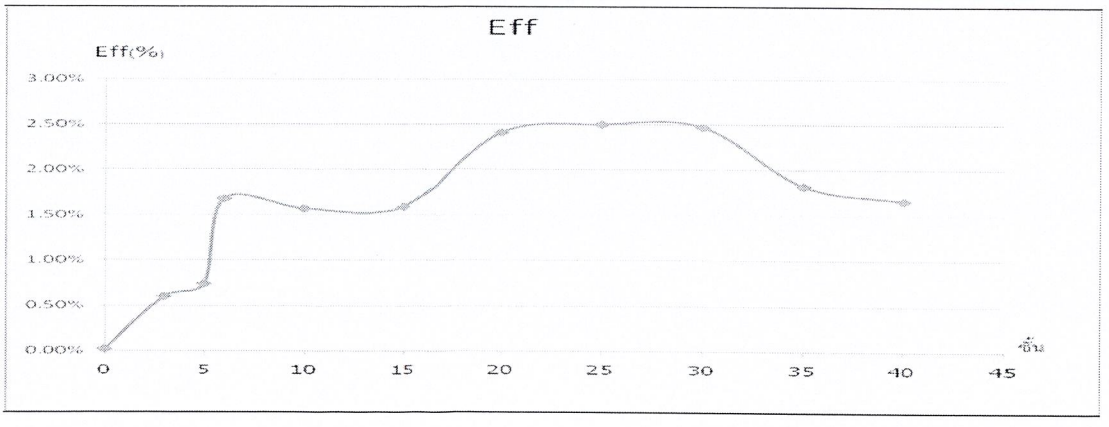



รูปที่ 4.23 กราฟกระแสแสงของ CNTs ที่ 40 ชั้น

มีค่า Jsc = 4.21 mA/cm$^2$ , Voc = 0.75 V , FF = 0.52 , Eff = 1.66 %

## 4.2.2.12 กราฟแสดงค่าตัวแปรต่างๆโดยการเปลี่ยนความหนาของ CNTs





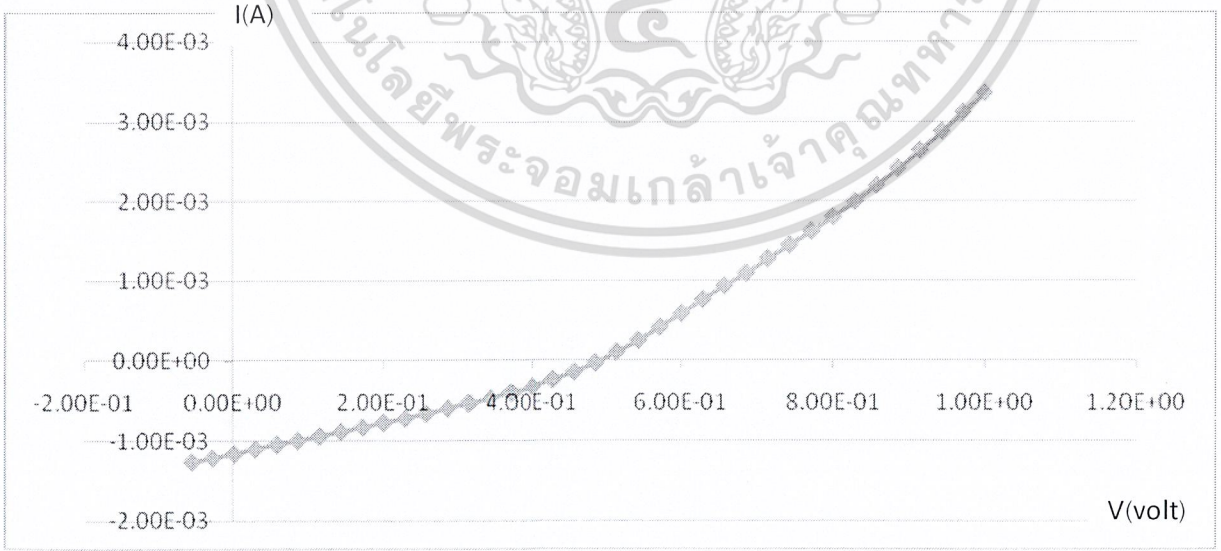
### 4.2.2.13 วิเคราะห์ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนความหนาของ CNTs

จากการทดลองสร้าง Dye-sensitized Solar Cell โดยเปลี่ยนขั้วบวกจาก Pt เป็น CNTs ซึ่งเปลี่ยนความหนาของ CNTs โดยใช้ อุณหภูมิ 300 °C และเวลาในการ Tip 105 วินาที พบว่า Voc มีค่าค่อนข้างคงที่ Jsc ช่วงแรกมีค่าเพิ่มขึ้นอาจเนื่องมาจาก CNTs ที่มากขึ้น CNTs จึงสามารถสัมผัสกับ CNTs จึงเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์มากขึ้น Jsc จึงมากขึ้น และช่วงต่อมา Jsc ลดลงอาจเพราะเกิดความต้านทานภายในเซลล์มากขึ้น FF มีค่ามากขึ้นตามความหนาของ CNTs อาจเพราะ CNTs มีมากขึ้นทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ได้มากขึ้น และ Eff มีแนวโน้มประมาณ Jsc และ FF เพราะ Voc มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก จึงสรุปได้ว่าควรใช้ความหนาของ CNTs ที่พอเหมาะไม่มากหรือน้อยเกินไป

### 4.2.3 ผลการทดลองเปลี่ยนอุณหภูมิในการอบ CNTs

โดยใช้ $TiO_2$ 7 ชั้น สร้างขั้วCNTs โดยวิธี Spray CNTs:DMF = 0.01:3 ระยะเวลา Tip 105 วินาที sprayห่างจากชิ้นงาน 25 cm ทำมุม 60° กับพื้นราบ ความเร็วก๊าซ $N_2$ 50 kg/cm$^2$ ความหนา 25 ชั้น

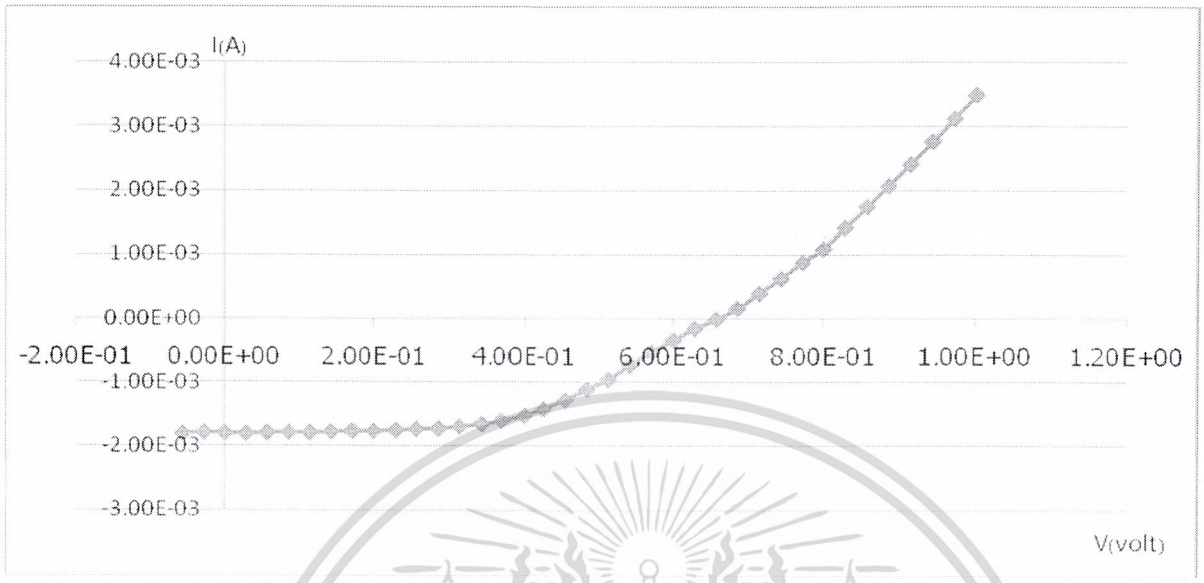
### 4.2.3.1 อบ CNTs ที่อุณหภูมิ 80 °C




รูปที่ 4.24 กราฟกระแสแสงของการอบที่ 80 °C

มีค่า Jsc = 4.67 mA/cm$^2$ , Voc = 0.49 V , FF = 0.3 , Eff = 0.69 %

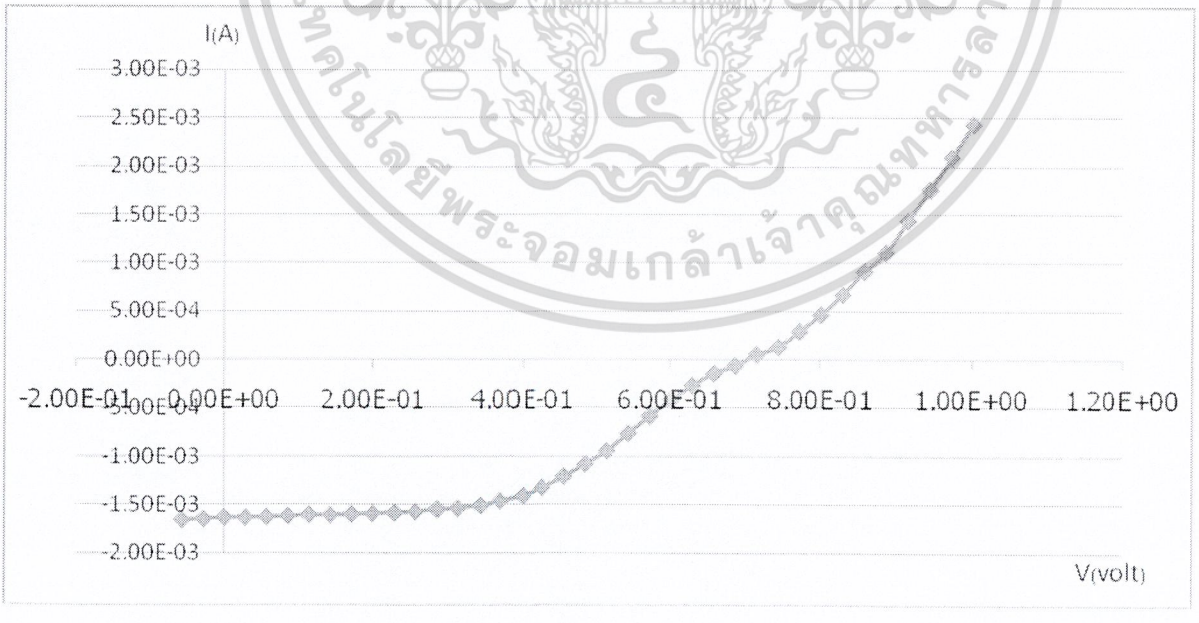
### 4.2.3.2 อบ CNTs ที่อุณหภูมิ 150 °C




รูปที่ 4.25 กราฟกระแสแสงของการอบที่ 150 °C

มีค่า Jsc = 7.18 mA/cm$^2$ , Voc = 0.66 V , FF = 0.52 , Eff = 2.44 %

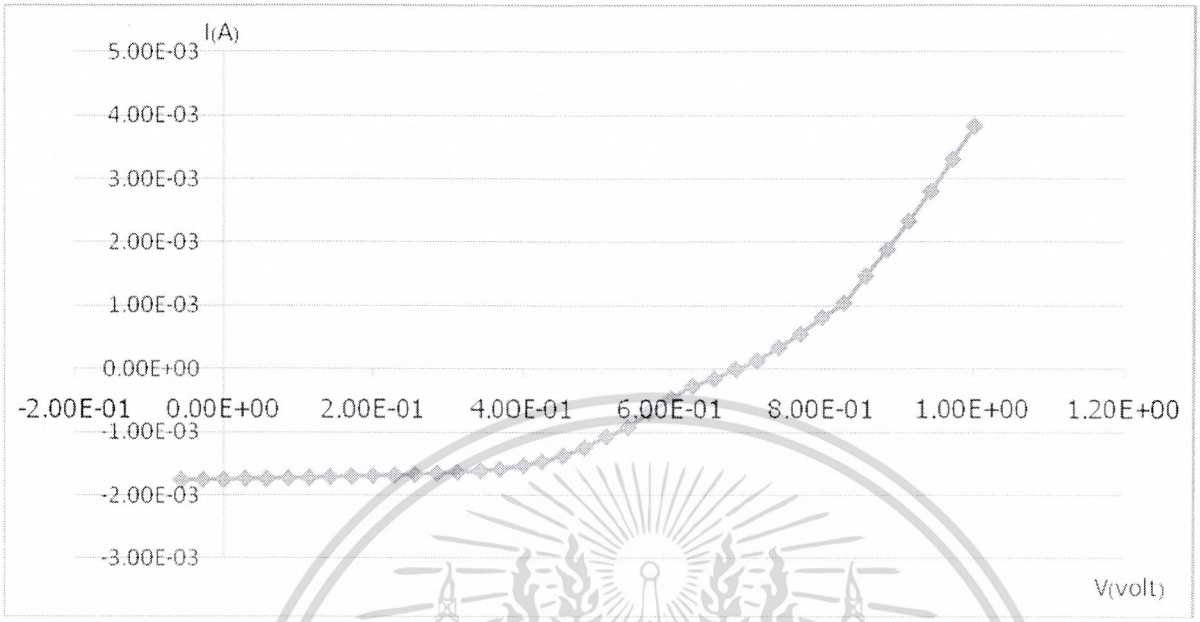
### 4.2.3.3 อบ CNTs ที่อุณหภูมิ 200 °C




รูปที่ 4.26 กราฟกระแสแสงของการอบที่ 200 °C

มีค่า Jsc = 6.52 mA/cm$^2$ , Voc = 0.70 V , FF = 0.5 , Eff = 2.27 %

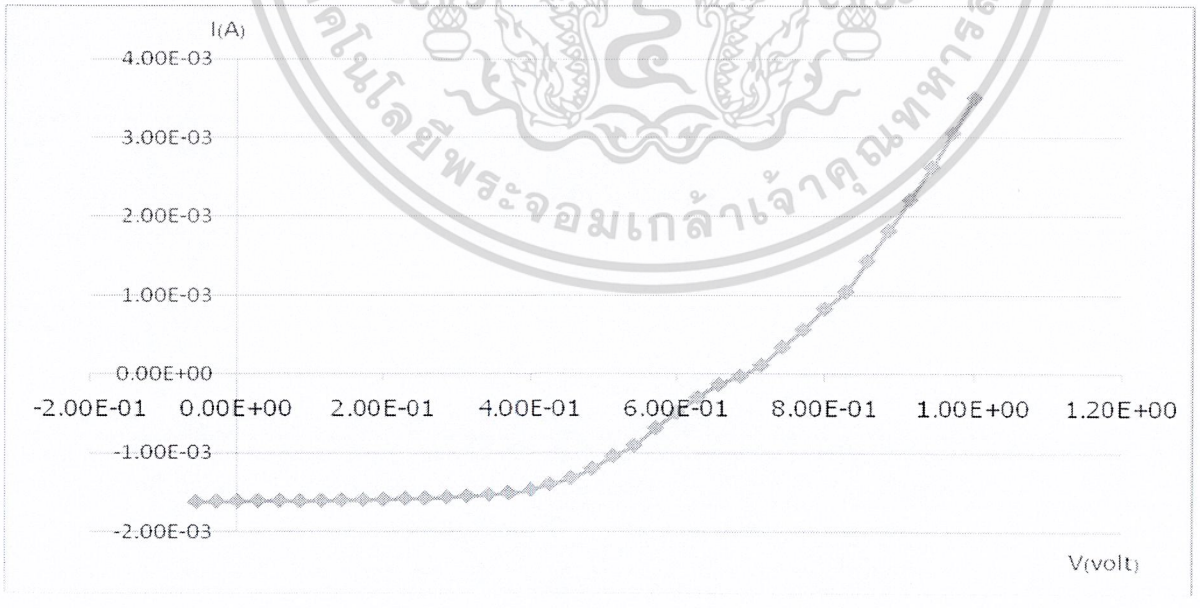
### 4.2.3.4 อบ CNTs ที่อุณหภูมิ 250 °C




รูปที่ 4.27 กราฟกระแสแสงของการอบที่ 250 °C

มีค่า Jsc = 6.99 mA/cm$^2$ , Voc = 0.69 V , FF = 0.52 , Eff = 2.51 %

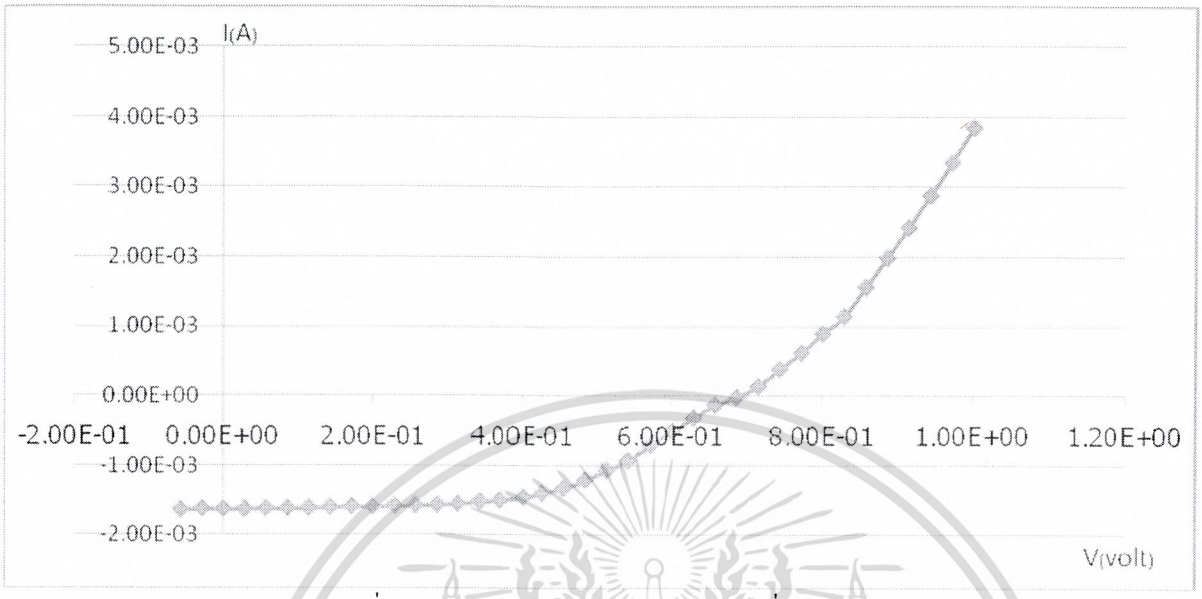
### 4.2.3.5 อบ CNTs ที่อุณหภูมิ 350 °C




รูปที่ 4.28 กราฟกระแสแสงของการอบที่ 350 °C

มีค่า Jsc = 6.45 mA/cm$^2$ , Voc = 0.69 V , FF = 0.54 , Eff = 2.42 %

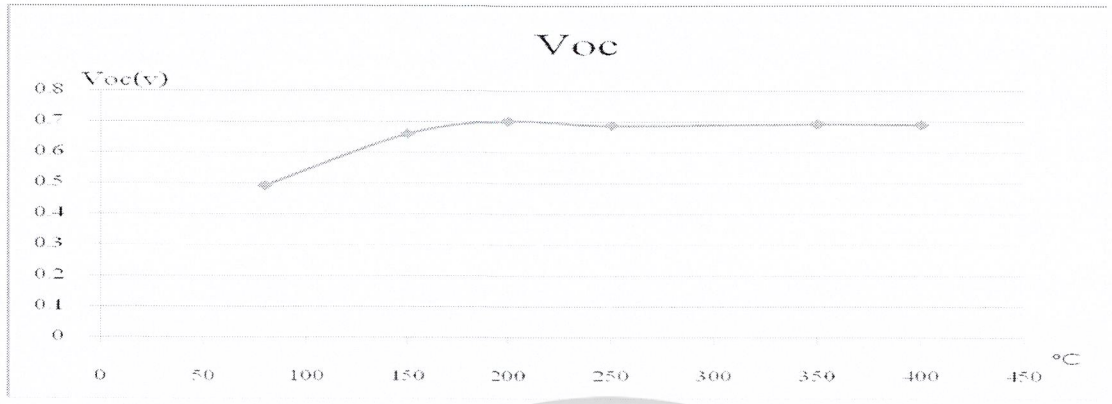
## 4.2.3.6 อบ CNTs ที่อุณหภูมิ 400 °C

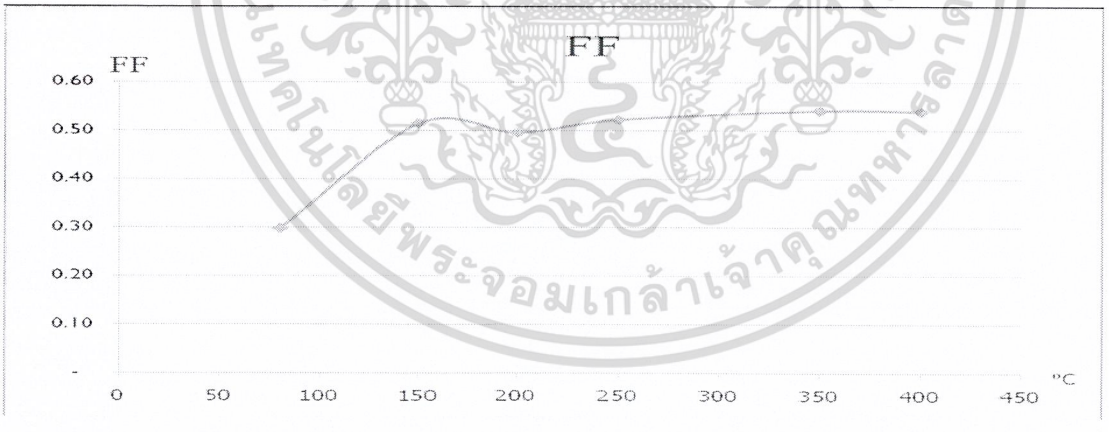


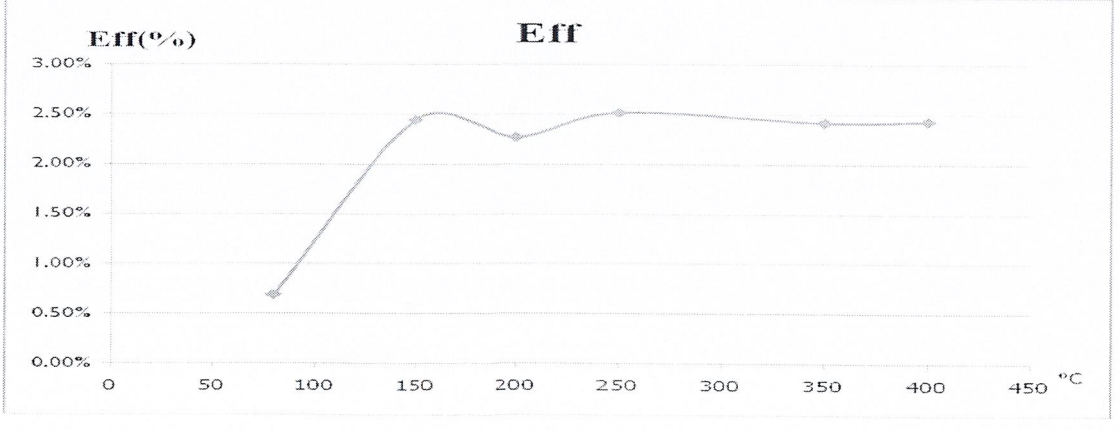

รูปที่ 4.29 กราฟกระแสแสงของการอบที่ 400 °C

มีค่า Jsc = 6.52 mA/cm$^2$ , Voc = 0.69 V , FF = 0.54 , Eff = 2.43 %

## 4.2.3.7 กราฟแสดงค่าตัวแปรต่างๆโดยการเปลี่ยนอุณหภูมิในการอบ CNTs





### 4.2.3.8 วิเคราะห์ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิในการอบ CNTs

จากการทดลองสร้าง Dye-sensitized Solar Cell โดยเปลี่ยนขั้วบวกจาก Pt เป็น CNTs ซึ่งเปลี่ยนอุณหภูมิในการอบ CNTs โดย CNTs หนา 25 ชั้น และเวลาในการ Tip 105 วินาที พบว่า Voc , Jsc , FF และ Eff มีค่าคล้ายๆกันคือจะค่อนข้างต่ำที่ 80 °C และอุณหภูมิต่างๆหลังจากเกิน 150 °C มีค่าค่อนข้างคงที่ เพราะ สารละลาย DMF มีจุดระเหยที่ประมาณ 150 °C คือที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 150 °C จะมีสารละลาย DMF ตกค้างอยู่ จึงสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ CNTs ที่ใช้สารละลาย DMF ในการผสมควรอบที่อุณหภูมิตั้งแต่ประมาณ 150 °C เป็นต้นไป

# บทที่ 5

# สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเพิ่มความหนาของ $TiO_2$ ควรจะให้ $TiO_2$ ความหนาไม่มากหรือไม่น้อยเกินไปซึ่งในการทดลองนั้นที่ 7 ชั้นจะให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด

จากการทดลองเปลี่ยนระยะเวลาในการ Tip ultra sonic CNTs ควรจะใช้ระยะเวลาที่น้อยๆจึงจะให้ประสิทธิภาพที่ดีซึ่งในการทดลองพบว่า Tip ที่ระยะเวลา 35 วินาทีได้ประสิทธิภาพดีที่สุด

จากการทดลองเปลี่ยนความหนาของ CNTs พบว่าควรจะมีความหนาที่ไม่มากและไม่น้อยเกินไปซึ่งในการทดลองจะพบว่าชั้นที่ 25 จะให้ประสิทธิภาพดีที่สุด

จากการทดลองเปลี่ยนอุณหภูมิในการอบ CNTs พบว่าควรจะอบที่อุณหภูมิมากกว่า 150 $^{\circ}C$ จึงจะทำให้ประสิทธิภาพไม่ลดลง

จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง เมื่อใช้ $TiO_2$ 7 ชั้นเป็นขั้วลบและใช้ Pt เป็นขั้วบวกจะทำให้ DSSC มีประสิทธิภาพมากที่สุด เมื่อเปลี่ยนขั้วบวกจาก Pt มาเป็น CNTs DSSC จะมีประสิทธิภาพสูงสุดที่เวลา Tip 105 วินาที ความหนา 25 ชั้น และอบที่อุณหภูมิ 250 $^{\circ}C$ เมื่อนำตารางตัวแปรที่สำคัญมาเทียบกันจะเป็นดังนี้

| ชนิดสารที่ใช้ทำขั้วบวก | Eff | Jsc($A/cm^2$) | Voc(volt) | Pmax(w) | FF |
|---|---|---|---|---|---|
| Pt | 3.05% | 6.43E-03 | 0.74 | 7.64E-04 | 6.42E-01 |
| CNTs | 2.51% | 6.99E-03 | 0.69 | 6.28E-04 | 5.23E-01 |

จากตารางจะเห็นได้ว่า CNTs สามารถนำมาใช้เป็นขั้วบวกแทน Pt ได้เพียงแต่ประสิทธิภาพที่ได้จะมีค่าน้อยกว่า Pt

# เอกสารอ้างอิง

[1] พงศธร อมรพิทักษ์สุข และ นรารักษ์ หลีสกุล, " เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใช้สีย้อมเป็นเซนซิไทเซอร์ "

[2] วินิช พรมอารักษ์ , ทวีศักดิ์ สุดยอดสุข , สายันต์ แสงสุวรรณ และ ทินกร แก้วอินทร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, " Dye-sensitized solar Cells (DSSC) "

[3] Haiying Wan University of Alabama, " Dye-sensitize solar cells "

[4] www.Sciencedirect.com

[5] รศ.ดร ณรงค์ ผังวิวัฒน์ , รศ.ดร สุรินทร์ เหล่าสุขสถิต , ดร.พอพนธ์ สิชณมุกฤษณ์ , นายชัยยุท แซ่กัง, " การสร้างโมดูลต้นแบบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดดายเซนซิไทซ์ที่เหมาะสม "