



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การออกแบบ สังเคราะห์และพัฒนาสีย้อมสารอินทรีย์ไวแสงที่มีระบบคอนจูเกต และ  
นาโนคอมโพสิตอิเล็กโทรไลต์สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์  
A design, synthesis and development of conjugated organic dyes  
and nanocomposite electrolytes for improving efficiency  
of Dye-sensitized solar cell (DSSC)

นางสาวดารินี พรหมโยธิน  
นายสิรพัฒน์ ประโทนเทพ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2557

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การออกแบบ สังเคราะห์และพัฒนาสีย้อมสารอินทรีย์ไวแสงที่มีระบบคอนจูเกต และ  
นาโนคอมโพสิตอิเล็กโทรไลต์สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์  
A design, synthesis and development of conjugated organic dyes  
and nanocomposite electrolytes for improving efficiency  
of Dye-sensitized solar cell (DSSC)

นางสาวดารินี พรหมโยธิน  
นายสิริพัฒน์ ประโทนเทพ

12696468

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2557  
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ การออกแบบ สังเคราะห์และพัฒนาสีย้อมสารอินทรีย์ไวแสงที่มีระบบคอนจูเกตและนาโนคอมโพสิตอเล็กโทรไลต์สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์  
แหล่งเงิน ทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ประจำปีงบประมาณ 2557 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 421,400 บาท  
ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2556 ถึง 30 กันยายน 2557  
ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ ดารินี พรหมโยธิน วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

การศึกษาโครงสร้างของสีย้อมในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นหมู่ให้อิเล็กตรอน-ตัวส่งผ่านอิเล็กตรอน-หมู่รับอิเล็กตรอนโดยการคำนวณโครงสร้างโมเลกุลด้วยระเบียบวิธีทางเคมีควอนตัมด้วยทฤษฎีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเพื่อทำนายคุณสมบัติการดูดกลืนแสงและความสามารถในการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างสีย้อมกับโลหะออกไซด์ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันที่ส่งผลต่อการกระจายอิเล็กตรอนของหมู่ให้อิเล็กตรอน ได้แก่ ไดฟีนิลอนินลินและไดเมทิลอนินลิน พบว่าค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมไดเมทิลอนินลิน ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดในช่วงความยาวคลื่นที่มากกว่าไดฟีนิลอนินลิน เนื่องจากมีโครงสร้างพันธะพายคอนจูเกตที่ยาวกว่า การศึกษาอิทธิพลของตัวส่งผ่านอิเล็กตรอนไทโอเฟน ไทอะโซลและอิมิดาโซล ที่มีไดเมทิลเอมีนเป็นหมู่ให้อิเล็กตรอนพบว่า ไทโอเฟนเป็นตัวส่งผ่านอิเล็กตรอนที่มีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนมายังหมู่รับอิเล็กตรอนไซยาโนคริลิกเอซิด มีพลังงานในการกระตุ้นต่ำและช่วงการดูดกลืนแสงที่มากขึ้นซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นได้ศึกษาการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงโดยใช้ตัวดูดกลืนแสงเป็นสีย้อมที่สังเคราะห์ขึ้นในกลุ่มอนุพันธ์ของไดเมทิลอนินลินที่มีไทโอเฟนเป็นตัวส่งผ่านอิเล็กตรอนและมีหมู่ไซยาโนคริลิกเอซิดเป็นหมู่รับอิเล็กตรอน และเลือกใช้ฟิล์มไททานเนียมไดออกไซด์เป็นชั้นสารกึ่งตัวนำแบบแถบพลังงานกว้างในขั้วไฟฟ้าเวจคิง โดยมีฟิล์มโลหะแพลทินัม เป็นชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้วแคโทดและสารละลายอิเล็กโทรไลต์คูรีตอกซ์ของไอโอดีน-ไตรไอโอดีน ( $I/I_3^-$ ) สีย้อมไวแสงที่สังเคราะห์ในงานวิจัยนี้ได้แก่สารในกลุ่มอนุพันธ์ของไดเมทิลเอมีนที่มีหมู่ไทโอเฟนเป็นตัวส่งผ่านอิเล็กตรอนและมีหมู่ไซยาโนคริลิกเอซิดเป็นหมู่รับอิเล็กตรอน พบว่าให้ค่าประสิทธิภาพ 1.14 เปอร์เซ็นต์ การสังเคราะห์และประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงอินทรีย์ชนิดโซลิตสเตรท พบว่าแอมโมเนียมเลดไอโอดีน ( $CH_3NH_3PbI_2$ ) มีคุณสมบัติในการดูดกลืนแสงได้ในช่วง 350 - 750 นาโนเมตร การก่อตัวของชั้นสเมทิลแอมโมเนียมเลดไอโอดีนในการแปลงพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าใช้เวลา 20 วินาที ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด การศึกษาผลการเจือนาโนคอมโพสิต (คาร์บอนแบล็คและซิลิกาฟุ่ม) และพอลิเมอร์(พอลิเอทิลีนไกลคอลและพอลิอะคริลิกแอซิด)ลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์  $I_2 / I_3^-$  ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง พบว่าการเจืออนุภาคคาร์บอนแบล็คลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ดีกว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์มาตรฐาน ในขณะที่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีการเติมพอลิเอทิลีนไกลคอลให้ความคงตัวต่อค่าประสิทธิภาพมากกว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์มาตรฐาน

คำสำคัญ : การคำนวณทางเคมีควอนตัม สีย้อมไวแสง ไซยาโนคริลิกเอซิด เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: A design, synthesis and development of conjugated organic dyes and nanocomposite electrolytes for improving efficiency of Dye-sensitized solar cell (DSSC)  
Researcher: Darinee Phromyothin College of Nanotechnology

## ABSTRACT

The organic dyes based donor-linker-accepter were designed and synthesized as photosensitizers for the application of dye-sensitized solar cells (DSSCs). The quantum chemical calculation with density functional theory (DFT) calculations has employed to investigate the absorption spectra, electron distribution and the intramolecular charge transfer (HOMO-LUMO) of the dyes. An effect of donor moiety (diphenyl aniline and dimethyl aniline) was studied. The results found that dimethyl aniline moiety presents higher maximum absorption wavelength than diphenyl aniline donor group because of their longer  $\pi$ -conjugated system. The effect of linker moieties including thiophene, thiazole and imidazole with dimethyl aniline donor and cyanoacrylic acceptor was then studied. The thiophene linker presents the lower excitation energies and it has been shown to enhance the intensity and the absorption spectra which are important features that affect the performance of DSSCs. The dimethyl aniline derivative donor-thiophene linker-cyanoacrylic acceptor dye was then synthesized and fabricated which consists of dimethyl aniline derivative dye,  $\text{TiO}_2$  film semiconductor layer as a working electrodes, platinum metal film as a counter electrode and redox couple solution of iodide - triiodide ( $\text{I}^- / \text{I}_3^-$ ) as electrolyte yielding a power conversion efficiency 1.14%. The methylammonium lead iodide ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_2$ ) was synthesized for solid-state mesoscopic heterojunction solar cells. The results review that the absorption of light in the broad spectral response (350 - 750 nm) and perovskite forming-times based solid-state solar cells by spin-coating for 20 s exhibit the highest conversion efficiencies. The effect of the additives used in the solution electrolytes, nanocomposite (carbon black and silica fume) and polymer (polyethylene glycol and polyacrylic acid), have been tested and good performance was reached employing nanocarbon black whereas good long-term stability was observed for polyethylene glycol in the standard redox couple  $\text{I}^- / \text{I}_3^-$  electrolyte.

Keywords : quantum chemical calculation, dye sensitizer, cyanoacrylic acid, dye-sensitized solar cell

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งเงินทุนงบประมาณประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557 งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีด้วยความร่วมมือของผู้ที่เกี่ยวข้องหลายฝ่ายโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ศ.ดร.จิติ หนูแก้ว ดร. สิริพัฒน์ ประโชนเทพ ดร.วิรัตน์ เจริญบุญ ที่ให้ข้อเสนอแนะและแก้ปัญหาเกี่ยวกับงานวิจัยทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณ ศ.ดร. จำรัส ลิ้มตระกูล ศ.ดร.สุภา หารหนองบัว ผศ.ดร.ทรงวุฒิ สุรมิตร ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ และ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ แห่งชาติ สำหรับการสนับสนุนการทำงานวิจัยในทุกๆด้าน โดยเฉพาะการอนุเคราะห์ให้เครื่องมือวิเคราะห์ทาง วิทยาศาสตร์ และโปรแกรมทางเคมีสำหรับการคำนวณ ขอขอบคุณ นายภควัต จิตตระทาน นางสาวปวรวรรณ ธนากิจ และเจ้าหน้าที่วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีทุกคน สำหรับความสำเร็จของงานวิจัยนี้

ดารินี พรหมโยธิน  
หัวหน้าโครงการวิจัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	V
สารบัญภาพ.....	VI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 คำสำคัญของการวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/การทบทวนวรรณกรรม.....	4
2.1 แนวคิด ทฤษฎีหลักตามประเด็นให้ครอบคลุมเรื่องที่วิจัย.....	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/การทบทวนวรรณกรรม.....	6
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	8
3.1 การคำนวณทางคอมพิวเตอร์.....	8
3.2 การสังเคราะห์สีย้อมไวแสง.....	8
3.3 การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดลิควิดคริสตัลโพลีเมอร์ (นาโนคอมโพสิตโพลีเมอร์).....	10
3.4 การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีคริสตัลไลน์.....	11
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	12
4.1 การคำนวณทางเคมีคอมพิวเตอร์.....	12
4.2 การสังเคราะห์สีย้อมไวแสงอินทรีย์.....	21
4.3 การทำนายประสิทธิภาพโซลาร์เซลล์.....	24
4.4 การศึกษาสารละลายอิลีกโทรไลต์.....	26
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	31
เอกสารอ้างอิง.....	33
ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1	13
ค่าพลังงานกระตุ้น ค่าความแรงออสซิลเลเตอร์ (oscillator strengths, $f$ ) และการทรานซิชันที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธี TDDFT/B3LYP/6-31G (d,p) ของหมู่ไทโออิเล็กทรอนิกส์ในกลุ่มของไคฟีนีลอนีนลินและไคเมทิลอนีนลิน.....	
4.2	15
เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนแต่ละส่วนของโมเลกุลในกลุ่มของไคฟีนีลอนีนลินและไคเมทิลอนีนลิน.....	
4.3	17
เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนแต่ละส่วนของโมเลกุลสี้อมไวแสงในกลุ่มอนุพันธ์ของไคเมทิลเอมีนที่มีหมู่ไทโอฟีนเป็นตัวส่งผ่านอิเล็กตรอน.....	
4.4	17
ค่าพลังงานกระตุ้น ค่าความแรงออสซิลเลเตอร์ (oscillator strengths, $f$ ) และการทรานซิชันที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธี TDDFT-B3LYP/6-31G (d,p) ของโมเลกุลสี้อมไวแสงในกลุ่มอนุพันธ์ของไคเมทิลเอมีนที่มีหมู่ไทโอฟีนเป็นตัวส่งผ่านอิเล็กตรอน.....	
4.5	20
ความยาวพันธะ ( ในหน่วย Å ) ของหมู่รีบิอิเล็กตรอน.....	
4.6	25
การวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสี้อมไวแสง จากสี้อมอินทรีย์ไวแสงในกลุ่มอนุพันธ์ไคเมทิลอนีนลินที่ได้จากการสังเคราะห์.....	
4.7	26
การวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีคริสตัลไลน์สี้อมไวแสง ที่ได้จากการสังเคราะห์.....	
4.8	27
การวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสี้อมไวแสง จากสี้อมอินทรีย์ไวแสงที่มีส่วนประกอบของอิเล็กโทรไลต์แตกต่างกัน.....	
4.9	27
การวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสี้อมไวแสง จากสี้อมอินทรีย์ไวแสงที่มีส่วนประกอบของอิเล็กโทรไลต์แตกต่างกัน.....	
4.10	28
ค่า Ionic Conductivity ( $\mu\text{S}$ ) จากสี้อมอินทรีย์ไวแสงที่มีส่วนประกอบของอิเล็กโทรไลต์แตกต่างกัน.....	
4.11	30
การวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสี้อมไวแสง จากสี้อมอินทรีย์ไวแสงที่มีส่วนประกอบของอิเล็กโทรไลต์แตกต่างกัน.....	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 โมเลกุลสี่ข้อมไวแสงประกอบด้วยโครงสร้างโมเลกุลหลัก 3 กลุ่ม.....	3
2.1 องค์ประกอบของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์แบบสี่ข้อมไวแสง.....	5
2.2 ตัวอย่างสี่ข้อมอินทรีย์ที่ประกอบด้วยโครงสร้าง หมูให้อิเล็กตรอน ตัวส่งต่ออิเล็กตรอน และอิเล็กตรอน และค่าแสดงประสิทธิภาพ เมื่อประกอบเป็นเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์.....	7
3.1 ขั้นตอนการสังเคราะห์สี่ข้อมไวแสงอินทรีย์.....	9
3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์สี่ข้อมไวแสงอินทรีย์เมทิลแอมโมเนียมไอโอดด์.....	9
4.1 โครงสร้างของสี่ข้อมไวแสงในกลุ่มของไดฟีนิลอนีนและโดเมทิลอนีนที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของหมูให้อิเล็กตรอน.....	12
4.2 Frontier Molecular orbital ของโมเลกุลในกลุ่มของไดฟีนิลอนีนและโดเมทิลอนีน.....	12
4.3 ค่าการดูดกลืนแสงของสี่ข้อมไวแสงที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของหมูให้อิเล็กตรอนในกลุ่มของไดฟีนิลอนีนและโดเมทิลอนีน.....	13
4.4 แถบพลังงานต้องห้ามของโมเลกุลในกลุ่มของไดฟีนิลอนีนและโดเมทิลอนีน.....	15
4.5 โครงสร้างของสี่ข้อมไวแสงในกลุ่มอนุพันธ์โดเมทิลเอมีนที่มีหมูไทโอพีน ไทอะโซลและอิมิดาโซลเป็นตัวส่งผ่านอิเล็กตรอน.....	15
4.6 Frontier Molecular orbital ของโมเลกุลสี่ข้อมไวแสงที่สภาวะพื้นและสภาวะเร้าของสี่ข้อมไวแสง ในกลุ่มอนุพันธ์โดเมทิลเอมีนที่มีหมูไทโอพีน ไทอะโซลและอิมิดาโซล เป็นตัวส่งผ่านอิเล็กตรอน.....	16
4.7 ค่าการดูดกลืนแสงของสี่ข้อมไวแสงในกลุ่มอนุพันธ์โดเมทิลเอมีนที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของการเพิ่มหมูไทโอพีนเป็นตัวส่งผ่านอิเล็กตรอน.....	16
4.8 แถบพลังงานต้องห้ามของสี่ข้อมไวแสงที่มีไทโอพีน ไทอะโซลและอิมิดาโซลเป็นหมูส่งผ่านอิเล็กตรอน.....	18
4.9 โครงสร้างสี่ข้อมไวแสงในกลุ่มอนุพันธ์โดเมทิลเอมีนที่ยึดเกาะกับโครงสร้างไททานเนียมไดออกไซด์.....	19
4.10 Frontier Molecular Orbital ของโมเลกุลสี่ข้อมไวแสงที่สภาวะพื้นและ สภาวะเร้าของสี่ข้อมไวแสงในกลุ่มอนุพันธ์ของโดเมทิลอนีน ที่ยึดเกาะกับโครงสร้างไททานเนียมไดออกไซด์.....	20
4.11 การวิเคราะห์โมเลกุลสี่ข้อมไวแสง ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์.....	21
4.12 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
4.13	ค่าการดูดกลืนพลังงานแสงของสีย้อมไวแสงอินทรีย์ที่สังเคราะห์ได้.....	23
4.14	ค่าการดูดกลืนพลังงานแสงของสีย้อมไวแสงอนินทรีย์ที่สังเคราะห์ได้.....	23
4.15	รามานสเปกโตรสโกปีของแอมโมเนียมเลดไอโอไดต์ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์.....	24
4.16	แผนภาพแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงโดยใช้สีย้อมไวแสงในกลุ่มอนุพันธ์ของไดเมทิลอนิสีน.....	25
4.17	a) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ระบบไอโอไดต์/ไตรไอโอไดต์ b) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ระบบไอโอไดต์/ไตรไอโอไดต์ ที่ผสมโคพอลิเมอร์.....	29
4.18	ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่มีส่วนประกอบของอิเล็กโทรไลต์แตกต่างกัน.....	30



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานสะอาดปราศจากมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นพลังงานทางเลือกที่มีอยู่ไม่จำกัด โดยเฉพาะประเทศไทยที่ตั้งอยู่เขตร้อน มีพลังงานแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ที่ตกลงมาจำนวนมาก พื้นที่เกือบทั้งหมดของประเทศสามารถรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ได้ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงจากดวงอาทิตย์ให้นำมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด จึงเป็นเรื่องสำคัญที่จะนำทรัพยากรหมุนเวียนนี้มาใช้อย่างคุ้มค่า เพื่อทดแทนการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิง เช่น น้ำมันและถ่านหิน ซึ่งเป็นทรัพยากรที่มีอยู่จำกัดและประเทศไทยยังคงต้องพึ่งพาการนำเข้าจากต่างประเทศ การใช้พลังงานแสงอาทิตย์แทนการใช้เชื้อเพลิงจากน้ำมันจะสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายเหล่านี้จากการนำเข้าเชื้อเพลิงเหล่านี้ได้เป็นจำนวนมาก และยังเป็นการเพิ่มความมั่นคงด้านพลังงานของประเทศอีกด้วย

รูปแบบการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้งานสามารถทำได้ทั้งการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ เช่น การใช้เซลล์แสงอาทิตย์ และการผลิตความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ เช่น เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ การเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์มาอยู่ในรูปพลังงานไฟฟ้า จะอยู่ในรูปของ เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ (solar cell) ซึ่งถูกผลิตครั้งแรกโดยใช้ธาตุซิลิเนียม ในปี พ.ศ. 2426 โดยชาร์ล ฟรีท์ หลังจากนั้นจึงได้มีการเปลี่ยนมาใช้สารกึ่งตัวนำซิลิกอน เยอรมันเนียม หรือสารอื่น เทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากแสงอาทิตย์ เริ่มต้นจาก แสงอาทิตย์ตกกระทบสารกึ่งตัวนำ พลังงานโฟตอนจากแสงอาทิตย์ จะไปกระตุ้นอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำ จากแถบวาเลนซ์ (valence band) ไปยังแถบตัวนำ (conduction band) และสร้างโฮล (hole) ซึ่งมีประจุทางไฟฟ้าเป็นบวกการทำให้ตัวพาประจุแยกจากกัน และเกิดกระแสของอิเล็กตรอน และอิเล็กตรอนหลุดเป็นอิสระเคลื่อนที่ตามวงจรไฟฟ้าก่อให้เกิดเป็นพลังงาน แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจะมีการใช้แผงเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ในการเก็บเกี่ยวประโยชน์จากแสงอาทิตย์ โดยเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (สมบัติโฟโตโวลตาอิก) หรือเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ที่มีประสิทธิภาพ แต่ยังมีขีดจำกัดในเรื่องของราคาของสารกึ่งตัวนำที่ต้องมีความบริสุทธิ์สูง และแตกหักง่าย และใช้เทคโนโลยีขั้นสูง ทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตสูงตามมา ดังนั้นจึงมีการพัฒนากระบวนการผลิตเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้วัสดุอื่นแทนที่ซิลิกอน เพื่อลดต้นทุนและลดกระบวนการผลิตที่ซับซ้อน เช่น การทำเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (dye-sensitized solar cell, DSSC)

เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ประกอบด้วย สีย้อมไวแสง ระบบอิเล็กโทรไลต์ และสารกึ่งตัวนำออกไซด์ แต่อย่างไรก็ตามเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดนี้ยังมีประสิทธิภาพสู้เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากผลึกสารกึ่งตัวนำไม่ได้ ดังนั้นจึงงานวิจัยมากมาย พยายามที่จะปรับปรุงแก้ปัญหา เช่นการเพิ่มความสามารถในการดูดกลืนแสงของชั้นสี การพัฒนาความสามารถในการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ หรือการปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์มอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ เพื่อเพิ่มจำนวนอิเล็กตรอน และเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่ได้อย่างต่อเนื่อง และลดการรวมตัวกันระหว่างอิเล็กตรอนอิสระกับโมเลกุลของสีย้อม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้เทียบเท่าเซลล์แสงอาทิตย์สารกึ่งตัวนำ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดนี้ โดยการเพิ่มประสิทธิภาพของสีย้อมสารอินทรีย์ โดยการปรับปรุงโครงสร้างสารอินทรีย์ เริ่มต้นจากการใช้เทคนิคการออกแบบโครงสร้างโมเลกุลโดยเคมีคอมพิวเตอร์ เพื่อหาสารโมเลกุลอินทรีย์ใหม่ที่ดีกว่าจะมีความสามารถในการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่ระหว่างสีย้อมกับโลหะออกไซด์ สังเคราะห์ง่าย

มีความทนทาน และศึกษาระบบอิเล็กทรอนิกส์ให้เป็นอีกทางเลือกในการใช้ประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง เพื่อพัฒนาการประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 ออกแบบโครงสร้างโมเลกุลสีย้อมสารอินทรีย์ไวแสงระบบคอนจูเกต ที่มีสมบัติเป็นตัวรับแสงในโฟโตโวลตาอิก โดยใช้ระเบียบวิธีทางคำนวณเคมีควอนตัม
- 1.2.2 วิเคราะห์ และศึกษาสมบัติและการเปลี่ยนแปลงทางอิเล็กทรอนิกส์ของโมเลกุลสีย้อมสารอินทรีย์ไวแสงระบบคอนจูเกต โดยการสร้างโมเดลจำลองโมเลกุลในคอมพิวเตอร์
- 1.2.3 สังเคราะห์โมเลกุลสีย้อมไวแสงระบบคอนจูเกต โมเลกุลนาโนคอมโพสิตอิเล็กทรอนิกส์
- 1.2.4 ประกอบเซลล์แสงอาทิตย์

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

การออกแบบและสังเคราะห์โมเลกุลของสารอินทรีย์สีย้อมไวแสงที่มีสมบัติดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) ได้ดี สารอินทรีย์ที่ศึกษาคืออนุพันธ์ไดเมทิลเอมีนพีนัลเอมีนโดยมีโมเลกุลไซยาโนครีลิกเอซิคทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนและถ่ายเทประจุสู่ขั้วไฟฟ้า งานวิจัยนี้เน้นการเพิ่มความสามารถเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในโครงสร้าง เพื่อเพิ่มความสามารถในการส่งต่อของอิเล็กตรอนจากหมู่ให้อิเล็กตรอนไปยังหมู่รับอิเล็กตรอน และปรับปรุงอิเล็กทรอนิกส์ให้มีความเสถียร และคงทนเพิ่มขึ้น โดยก่อนการสังเคราะห์สีย้อมจะออกแบบโครงสร้างโมเลกุลด้วยระเบียบวิธีทางเคมีคอมพิวเตอร์ทฤษฎีความหนาแน่นอิเล็กตรอน (Time Dependent Density Functional Theory, TD-DFT) โดยการจำลองโครงสร้างโมเลกุล ศึกษาความเป็นไปได้ในการถ่ายเทประจุอิเล็กตรอนของชั้นสีย้อม เพื่อทำนายคุณสมบัติอิเล็กทรอนิกส์ ค่าแถบการนำไฟฟ้าของสารที่ออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์ ก่อนการสังเคราะห์จริง และเมื่อสังเคราะห์ได้แล้วจะนำสีย้อมที่ได้ไปประกอบเป็นเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อวัดประสิทธิภาพและปรับปรุงโครงสร้างสารให้ดียิ่งขึ้นต่อไป

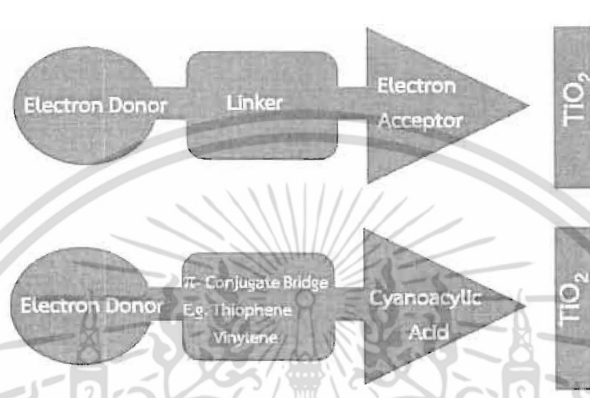
## 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนการทำงานวิจัยดังนี้

- 1.4.1 การศึกษาสมบัติทางโครงสร้างและสมบัติเชิงอิเล็กทรอนิกส์ของสีย้อมไวแสง โดยอาศัยระเบียบวิธีการคำนวณทางเคมีควอนตัมใช้เทคนิคการศึกษาออกแบบวัสดุศาสตร์โดยอาศัยการคำนวณบนเครื่องคอมพิวเตอร์โดยคำนวณทั้งทางกลศาสตร์โมเลกุล และกลศาสตร์ควอนตัมเพื่อให้ได้โครงสร้างสามมิติที่มีความเสถียร และมีพลังงานต่ำ หลังจากนั้นนำโครงสร้างที่ได้ ไปคำนวณสมบัติทางโครงสร้างและสมบัติเชิงอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ระเบียบวิธีทางทฤษฎีความหนาแน่นอิเล็กตรอน (Density Functional Theory, Time Dependent Density Functional Theory) โดยอธิบายพฤติกรรมของอิเล็กตรอนด้วยในออร์บิทัลด้วยเซตมูลฐาน (basis set) โดยจะพิจารณาการจัดเรียงตัวโครงสร้างของโมเลกุลทั้งในสภาวะที่สภาวะพื้น (ground state, สภาวะก่อนโดนกระตุ้นด้วยแสง) และสภาวะการกระตุ้น (excited State, สภาวะหลังกระตุ้นด้วยแสง) เมื่อโมเลกุลสีย้อมได้รับพลังงานจะเกิดการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนภายในโมเลกุล ทำให้เกิดการดูดกลืนแสงและการคายแสงของสาร จากข้อมูลที่ได้ทำให้ทราบสมบัติการดูดกลืนแสง และการเปล่งแสงของสาร ซึ่งเราสามารถใช้ในการทำนายคุณสมบัติของสารก่อนทำการสังเคราะห์ เพื่อประหยัดเวลา ค่าใช้จ่าย และลดการสูญเสียสารเคมีโดยไม่จำเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.2 การสังเคราะห์โมเลกุลสีย้อมไวแสง ในงานวิจัยนี้จะสังเคราะห์ในกลุ่มของสีย้อมอินทรีย์ไวแสง ซึ่งภายในโครงสร้างโมเลกุลของสารนี้ จะประกอบไปด้วยสาร 3 กลุ่มคือ ตัวให้อิเล็กตรอน (electron donor) ตัวรับอิเล็กตรอน (electron acceptor) และ ตัวที่ใช้ในการส่งต่ออิเล็กตรอนจากสีย้อมสู่โลหะออกไซด์ (linker) ตามภาพที่ 1.1 เพื่อให้ได้สาร 3 กลุ่มเหล่านี้ให้เป็นโครงสร้างเดียวกัน โดยมีไซยาโนครีลิกเอซิด ที่มีสมบัติในการยึดเกาะที่ติดกับไททาเนียมไดออกไซด์ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของการส่งผ่านประจุอิเล็กตรอน และสังเคราะห์โมเลกุลสีย้อมไวแสงในกลุ่มของสีย้อมอินทรีย์ ซึ่งเป็นเซลล์แสงอาทิตย์แบบโซลิติลเดท



ภาพที่ 1.1 โมเลกุลสีย้อมไวแสงประกอบด้วยโครงสร้างโมเลกุลหลัก 3 กลุ่ม

1.4.3 การเพิ่มประสิทธิภาพของอิเล็กโตรไลต์ พัฒนาอิเล็กโตรไลต์  $I^-/I_3^-$  ให้มีความเสถียรภาพในระยะยาว โดยการเติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ หรือ พอลิเมอร์ ในสารละลายอิเล็กโตรไลต์

1.4.4 การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ นำสีย้อมสารอินทรีย์ที่สังเคราะห์มาประกอบเซลล์โดยใช้ชั้นฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ เป็นตัวกลางในการส่งผ่านอิเล็กตรอนและวัดกระแสที่ได้จากการให้ความต่างศักย์และนำไปคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของเซลล์

### 1.5 คำสำคัญของงานวิจัย

Quantum chemical calculation, Dye sensitizer, Cyanocrylic acid, Dye-sensitized solar cell

### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลการวิจัยจะเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญ ที่ทำให้เข้าใจกลไกในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดกลืนแสงของโมเลกุลสารอินทรีย์ และการปรับปรุงโครงสร้างเคมีให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ของการทำงาน และจะนำไปสู่การศึกษาและวิจัยต่อยอดได้ในด้านต่างๆ ได้ เช่นการสังเคราะห์สารใหม่ให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานด้านนาโนเทคโนโลยี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

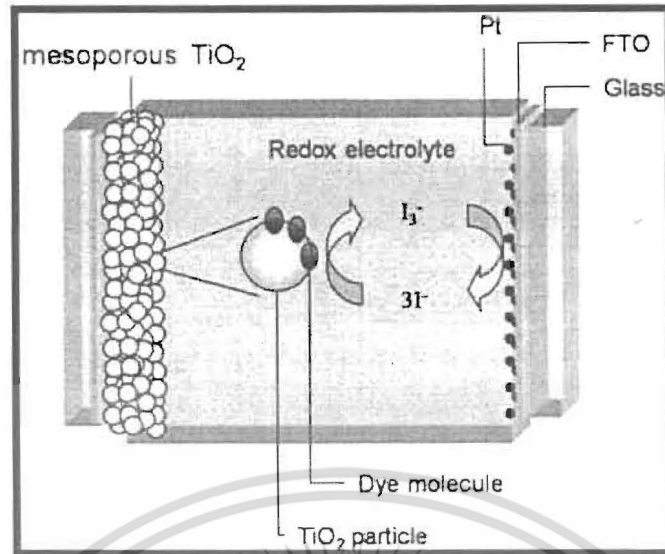
### แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/การทบทวนวรรณกรรม

#### 2.1 แนวคิด ทฤษฎีหลักตามประเด็นให้ครอบคลุมเรื่องที่วิจัย

เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง ประกอบไปด้วยองค์ประกอบหลัก คือ สีย้อมไวแสง อนุภาคของโลหะออกไซด์ อิเล็กโทรไลต์ และขั้วไฟฟ้า โดยแต่ละส่วนมีหน้าที่ดังนี้คือ 1) สีย้อมไวแสง (Dye-sensitizer) ทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยโมเลกุลสีย้อมได้รับพลังงานโฟตอน จะปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา จากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นและส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังแถบการนำไฟฟ้าของอนุภาคโลหะออกไซด์ 2) อนุภาคของโลหะออกไซด์ ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนของโมเลกุลสีย้อมไวแสง และส่งอิเล็กตรอนไปยังขั้วแอโนด มักเป็นกลุ่มสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานกว้าง (wide band gap semiconductor) และระดับพลังงานของขอบล่างของแถบการนำควรจะมีค่าน้อยกว่าค่าระดับพลังงานที่สถานะถูกกระตุ้นของโมเลกุลของสีย้อม เพื่อทำให้เกิดการส่งผ่านอิเล็กตรอนจากโมเลกุลของเม็ดสีมายังสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ได้ 3) สารอิเล็กโทรไลต์ ทำหน้าที่ในการส่งผ่านอิเล็กตรอน (electron transfer) โดยขดเชยอิเล็กตรอนให้กับโมเลกุลสีย้อมไวแสงที่ถูกกระตุ้นกลับสู่สถานะพื้น และรับอิเล็กตรอนคืนจากขั้วแคโทด ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะอาศัยกระบวนการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (reduction) และปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) หรือที่เรียกว่า ปฏิกิริยา รีดอกซ์ (redox reaction) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่นิยมใช้ในการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้คือสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในระบบ ที่ได้จากการแตกตัวของสารไอโอดีน ( $I_2$ ) โดยจะมีประสิทธิภาพในการให้อิเล็กตรอนกับเม็ดสีย้อมที่อยู่ในรูปของตัวออกซิไดซ์ที่สถานะพื้นได้เป็นอย่างดี สารละลาย อิเล็กโทรไลต์แบบของเหลวจะให้ค่าประสิทธิภาพที่ดี แต่มีข้อเสียคือตัวทำละลายที่ใช้ระเหยง่าย จึงทำให้เกิดปัญหาการรั่วซึมของสารละลายออกจากตัวเซลล์แสงอาทิตย์ ส่งผลให้อายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง ไม่มีความคงทน ซึ่งถือเป็นปัญหาใหญ่ของระบบอิเล็กโทรไลต์แบบของเหลวจึงได้มีการคิดค้นระบบอิเล็กโทรไลต์แบบของเหลวไอออนิกที่มีจุดเดือดสูงขึ้นไป การนำไฟฟ้าที่ดี ซึ่งที่นิยมใช้จะเป็นสารประกอบของอิมิดาโซเลียม (imidazolium) แม้ว่าระบบนี้จะช่วยแก้ปัญหาของการระเหยได้ แต่ก็ยังคงมีการรั่วซึมอยู่ และให้ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่ำกว่าระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลว เพราะมีความหนืดสูงกว่า ทำให้ไอออนแพร่ได้ช้ากว่า นอกจากนี้ยังมีอีกระบบหนึ่งที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมา คือ ระบบพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ โดยมีข้อดีในการพาไอออนสูง และสามารถแข็งตัวได้ ช่วยป้องกันปัญหาการระเหยและรั่วซึมของสารละลาย แต่อย่างไรก็ตามระบบอิเล็กโทรไลต์ยังคงต้องได้รับการพัฒนาต่อไปอย่างต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงให้สูงขึ้น

4) ขั้วไฟฟ้า ประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้าแอโนดและขั้วไฟฟ้าแคโทด โดยขั้วแอโนดทำหน้าที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปสู่วงจรภายนอก และขั้วไฟฟ้าแคโทดทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนกลับคืนสู่สารประกอบอิเล็กโทรไลต์ วัสดุที่นิยมใช้ทำเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทดคือ โลหะแพลตตินัม (Pt) แต่เนื่องจากโลหะแพลตตินัมมีราคาแพงอาจใช้วัสดุอื่นแทนได้ เช่น ผงคาร์บอน ท่อคาร์บอนนาโน หรือพอลิเมอร์นำไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.1 องค์ประกอบของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง  
ที่มา Chemical Reviews 2010, 110 (11), 6595-6663

การพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงทำได้โดย 1) การพัฒนาสีย้อมไวแสง สีย้อมไวแสงที่ดีต้องมีสมบัติในการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงตามองเห็น และครอบคลุมถึงช่วงใกล้อินฟราเรด เพื่อให้ดูดกลืนพลังงานคลื่นแสงอาทิตย์ให้ได้มากที่สุด และสามารถยึดเกาะกับพื้นผิวอนุภาคโลหะออกไซด์ได้ดี มีความเสถียรภาพเมื่ออยู่ในสภาวะที่ถูกออกซิไดซ์ สภาวะพื้นและสภาวะถูกกระตุ้น สามารถถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างสีย้อมกับโลหะออกไซด์ได้ดี มีราคาถูกและไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งงานวิจัยนี้ผู้วิจัยมีความตั้งใจที่จะพัฒนาโครงสร้างสีย้อม ให้มีคุณสมบัติดังกล่าว โดยนำสารที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมมาสังเคราะห์โครงสร้างให้รวมกันเป็นโมเลกุลเดียวกัน เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้งานต่อไป 2) การพัฒนาสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ ต้องมีแถบพลังงานกว้าง ( $> 3$  eV) มีรูพรุนสูงกระจายตัวสม่ำเสมอ พื้นผิวสัมผัสมาก ไม่ดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็น มีค่าคงที่ของการนำไฟฟ้า (dielectric constant) ที่สูง มีความเสถียร ราคาถูกและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม 3) การพัฒนาสารละลายอิเล็กโทรไลต์ สารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นส่วนประกอบสำคัญอีกอย่างหนึ่งของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ซึ่งหน้าที่เป็นตัวกลางในการส่งผ่านอิเล็กตรอนระหว่าง 2 ชั้นซึ่งได้แก่  $\text{TiO}_2 + \text{Dye}$  และแพลตินัม โดยส่วนใหญ่อิเล็กโทรไลต์จะมีลักษณะเป็นของเหลวหรือเจล ปกติแล้วอิเล็กโทรไลต์จะอยู่ในรูปของกรด เบส หรือเกลือ นอกจากนี้ แก๊สบางชนิดอาจทำตัวเป็นอิเล็กโทรไลต์ได้ภายใต้อุณหภูมิสูงและความดันต่ำ โดยปกติสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในโซลาร์เซลล์ชนิดนี้ จะเป็นสารประกอบของ  $\text{I}^-/\text{I}_3^-$  ซึ่งมีข้อเสียหลายประการ เช่น เสถียรภาพในระยะยาวไม่ดี ส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลง ระบายได้ง่าย ไม่เสถียร ถ้าปิดผนึกเซลล์ไม่ดี จะทำให้เกิดการระเหยออกของอิเล็กโทรไลต์ได้ ดูดซับแสงช่วงที่ตามองเห็นได้ ซึ่งมีผลทำให้สูญเสียกระแสอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง และศักย์ไฟฟ้าของคู่อิทธิกริยารีดอกซ์มีค่าจำกัดทำให้ไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ดังนั้นในปัจจุบัน การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงนั้น สิ่งที่น่าสนใจอีกด้านหนึ่งก็คือการเพิ่มประสิทธิภาพของสารละลายอิเล็กโทรไลต์นั่นเอง ซึ่งสารละลายอิเล็กโทรไลต์ แบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลักๆ ได้แก่อิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของแข็ง (solid electrolyte) เช่น gel electrolytes, dye polymer electrolytes, solid ceramic electrolytes และอิเล็กโทรไลต์ที่

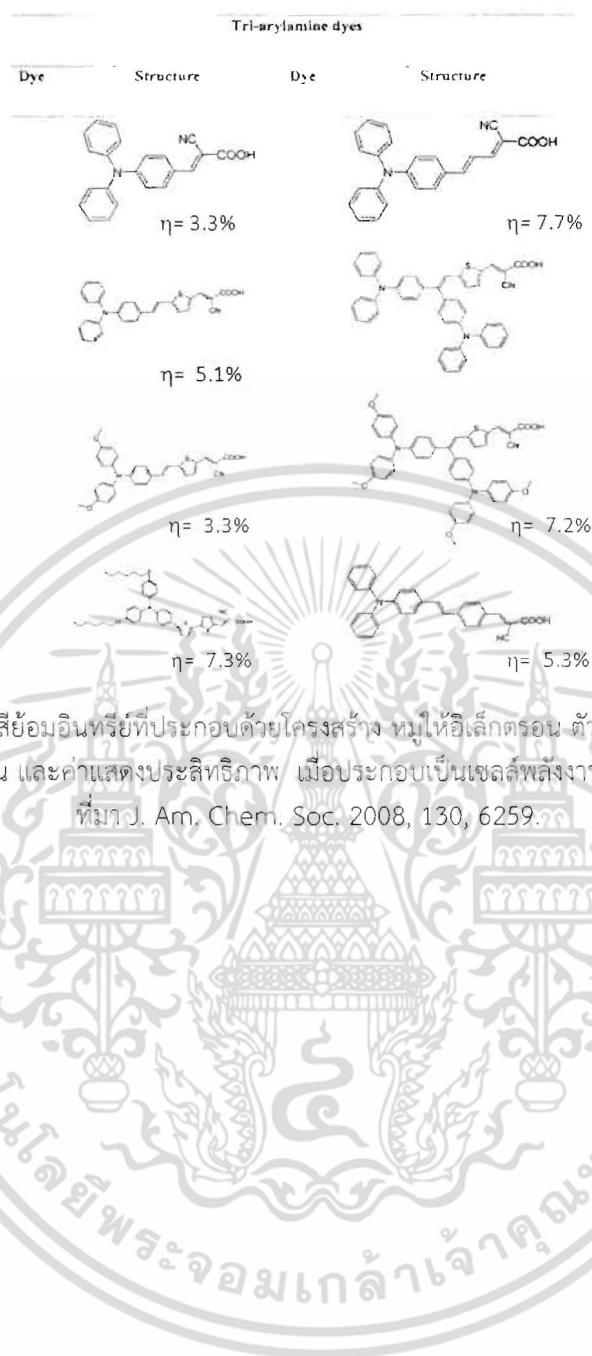
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นของเหลว (liquid electrolyte) ซึ่งอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการทำงานกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงนั้นจะเป็นชนิดที่เป็นของเหลวซึ่งจะสามารถแทรกเข้าไปยังโมเลกุลของไททานเนียมไดออกไซด์ และชั้นโลหะแพลทินัมได้ดี ทำให้สามารถส่งถ่ายอิเล็กตรอนได้ดี นอกจากนี้ยังมีออร์แกนิกส์รีดอกซ์ซึ่งเป็นอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของเหลวจะช่วยลดข้อด้อยจากอิเล็กโทรไลต์ไอออนินได้หลายประการ อิเล็กโทรไลต์เหล่านี้จึงเป็นตัวเลือกที่ค่อนข้างเหมาะสม ส่วนการพัฒนาจะเน้นไปในทางหาวัสดุปฏิบัติการสามารถส่งถ่ายอิเล็กตรอนได้ดี

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทบทวนวรรณกรรม

เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นโดย ดร. เวย์น แคมป์เบลล์ ในปี 1991 ผลงานชิ้นนี้ได้รับความสนใจจากนักวิจัยทั่วโลก เนื่องจากเซลล์ชนิดนี้ มีราคาต้นทุนที่ต่ำ สามารถติดตั้งได้ และมีศักยภาพที่จะนำมาพัฒนาให้เพิ่มประสิทธิภาพต่อไปได้อีก โดยการปรับเปลี่ยนหมู่แทนที่ในโมเลกุล ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอน สีย้อมไวแสงที่นำมาใช้ในในใช้ดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์มีหลายประเภท เช่น 1) สีย้อมไวแสงที่มีหมู่โลหะเป็นองค์ประกอบ เช่น สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูเทเนียม สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะแคดเมียม เซลีเนียม เทลูเรียม สีย้อมกลุ่มนี้ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ประมาณ 10% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำซิลิคอน แต่อย่างไรก็ตามสีย้อมไวแสงในกลุ่มนี้ก็มีข้อเสียคือ มีช่วงการดูดกลืนคลื่นแสงอาทิตย์ที่แคบ ราคาแพง และโลหะบางชนิดเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม 2) สีย้อมที่สกัดได้จากพืชที่มีสี เช่น สีสกัดดอกอัญชัญ, ข้าวเหนียวดำ, กระจับ, แครอท และลูกหมึก สีในกลุ่มนี้จะเป็นสารประกอบประเภท สารคลอโรฟิลล์, แอนโทไซยานิน, แคโรทีนอยด์ แทนนิน หรืออื่นๆ สีในกลุ่มนี้มีข้อดีคือ หาได้ง่ายในธรรมชาติ ราคาถูก เป็นพิษต่ำ แต่ให้ประสิทธิภาพค่อนข้างดีแต่ต่ำกว่าสีย้อมไวแสงที่มีหมู่โลหะเป็นองค์ประกอบ และนอกจากนี้สารกลุ่มนี้ส่วนใหญ่จะไม่เสถียรเมื่อโดนความร้อน เมื่อประกอบเป็นเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์แล้ว จะให้อายุการใช้งานค่อนข้างสั้น 3) สีย้อมไวแสงสารอินทรีย์สังเคราะห์ เช่น กลุ่มพอลิเมอร์นำไฟฟ้าหรือกลุ่มสารอินทรีย์ที่ประกอบด้วยพันธะคู่สลับเดี่ยวในโครงสร้าง สารอินทรีย์กลุ่มนี้มีความสามารถในการนำไฟฟ้าและสามารถทำการปรับเปลี่ยนสมบัติทางโครงสร้างและสมบัติอิเล็กทรอนิกส์เมื่อได้รับพลังงานแสง จึงสามารถนำมาใช้เป็นตัวดูดกลืนแสงอาทิตย์ได้ สีกลุ่มนี้มีข้อดีคือมีความทนทานต่อความดันและความร้อน แต่ก็มีข้อเสียคือ เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ในกลุ่มนี้ยังมีประสิทธิภาพไม่ดี ดังนั้นได้มีงานวิจัยหลายๆชิ้นพยายามที่จะปรับปรุงปัญหาตรงนี้ เช่นการปรับปรุงโครงสร้างของสารอินทรีย์ให้สามารถยึดเกาะกับโลหะออกไซด์ได้ดีมากขึ้น หรือการปรับปรุงโครงสร้างให้สารกลุ่มนี้สามารถดูดกลืนแสงในช่วงที่กว้างมากขึ้น เช่นเพิ่มการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่นช่วงใกล้อินฟราเรด (near IR) ในงานวิจัยนี้ได้สนใจที่จะสังเคราะห์สารอินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงได้ดีในช่วงคลื่นความยาวแสงดวงอาทิตย์ โดยปรับปรุงโครงสร้างสารอินทรีย์ โดยต่อหมู่โมเลกุลสารที่มีข้อดีต่างๆ กันเข้าด้วยกัน และออกแบบรูปร่างโมเลกุลของสาร ปรับปรุงโครงสร้างของโมเลกุลให้จำเพาะต่อการดูดกลืนมากขึ้น เพื่อให้สารอินทรีย์ ที่มีความสามารถในการดูดกลืนแสงที่กว้าง และสามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ดี ภายในโครงสร้างจะต้องประกอบด้วย หมู่ให้อิเล็กตรอน ตัวส่งผ่านอิเล็กตรอน และตัวรับอิเล็กตรอนที่สามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนสู่โลหะออกไซด์ได้ดี ตัวอย่างโครงสร้างสารไตรฟีนิลเอมีนตามภาพที่ 2.2 โดยมีค่าประสิทธิภาพประมาณ 3-8 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยจะเริ่มต้นจากการศึกษางานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงทั้งในด้านการคำนวณแบบจำลองของสีย้อมไวแสงทางคอมพิวเตอร์ การสังเคราะห์โมเลกุลของสีย้อมจากนั้นศึกษาหาคุณสมบัติของสีย้อมที่น่าสนใจ เพื่อนำมาปรับปรุงโครงสร้างเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของโมเลกุลสีย้อมไวแสง และปรับปรุงอิเล็กโทรไลต์ โดยเริ่มต้นจากการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ เพื่อทำนายค่าการดูดกลืนแสง แอมพลิจูดของห้ามและความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่สถานะพื้นและสถานะเร้า เพื่อเป็นการทำนายผลว่ามีความเหมาะสมที่จะนำมาสังเคราะห์ จากนั้นทำการสังเคราะห์โมเลกุลของสีย้อมไวแสง

#### 3.1 การคำนวณทางคอมพิวเตอร์

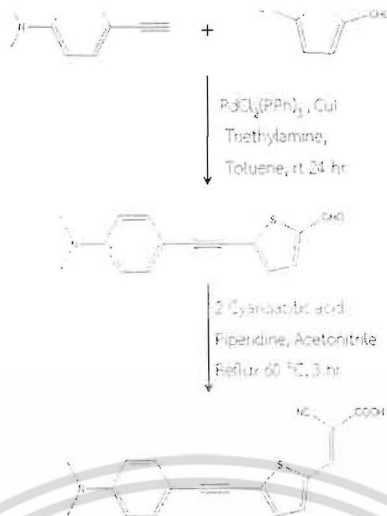
การคำนวณที่ใช้ทั้งหมดเป็นการคำนวณผ่านโปรแกรม Gaussian09 โดยใช้ทฤษฎีความหนาแน่นอิเล็กตรอนและวิธีการคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธี B3LYP/6-31G(d,p) เพื่อหาโครงสร้างที่ถูกต้องที่สถานะพื้นแล้วนำโครงสร้างนี้ไปใช้ในการคำนวณค่าพลังงานที่สถานะเร้าเมื่อโมเลกุลถูกกระตุ้นตั้งแต่ระดับชั้นพลังงานสถานะเร้าที่ 1-10 โดยใช้ทฤษฎีความหนาแน่นอิเล็กตรอนและวิธีการคำนวณโดยใช้สมการระเบียบวิธี cam-B3LYP/6-31G(d,p) เพื่อนำไปใช้หาการดูดกลืนแสง แอมพลิจูดของห้ามและความหนาแน่นอิเล็กตรอน (density of state) เพื่อศึกษาอิทธิพลของหมู่ให้อิเล็กตรอน, ตัวส่งผ่านอิเล็กตรอน และหมู่รับอิเล็กตรอนที่มีผลต่อค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมไวแสง ซึ่งส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

#### 3.2 การสังเคราะห์สีย้อมไวแสง

หลังจากคำนวณเพื่อทำนายการดูดกลืนแสงแอมพลิจูดของห้ามและความหนาแน่นอิเล็กตรอนซึ่งส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงแล้ว เราก็จะทำการสังเคราะห์โครงสร้างของสีย้อมที่มีความเป็นไปได้ที่จะใช้เป็นสีย้อมในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ในงานวิจัยนี้ได้สังเคราะห์สีย้อมไวแสง 2 กลุ่ม คือ สีย้อมอินทรีย์ และสีย้อมอนินทรีย์

3.2.1 การสังเคราะห์สีย้อมไวแสงอินทรีย์ เพื่อใช้เป็นสีย้อมไวแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

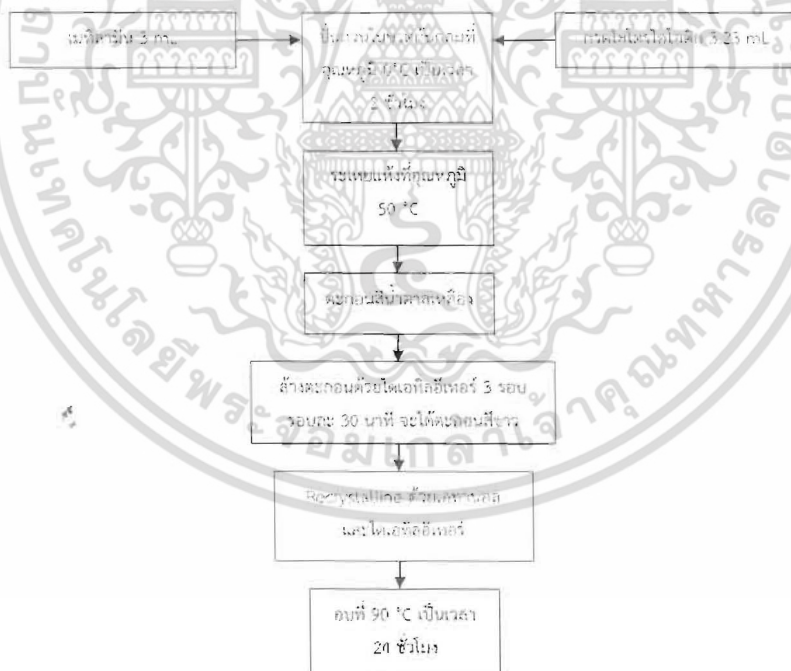
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการสังเคราะห์สีย้อมไวแสงอินทรีย์

3.2.2 การสังเคราะห์สีย้อมไวแสงอินทรีย์ เพื่อใช้เป็นสีย้อมไวแสงในเซลล์แสงอาทิตย์แบบ

โซลิตสเตร



ภาพที่ 3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์สีย้อมไวแสงอินทรีย์เมทิลแอมโมเนียมไอโอดีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. 4-Ethynyl-N,N-dimethylaniline
2. 5-bromo-2-thiophenecarboxaldehyde
3. Bis(triphenylphosphine)palladium(II) dichloride
4. Copper Iodide
5. Triethylamine
6. Cyanoacetic acid
7. Ammonium acetate
8. Potassium carbonate
9. Sodium chloride
10. Silica gel (0.063-0.200 mm)
11. Thin layer chromatography (TLC, aluminium sheet)
12. Cyanoacetic acid
13. Piperidine
14. Toluene
15. Tetrahydrofuran
16. Dimethylformamide
17. Polyaniline composite (20 wt.% polyaniline on carbon black)
18. Silica, nanoparticles, 200 nm particle size, pore size 4 nm
19. Acetonitrile
20. Methylamine
21. Chloroform
22. Hydroiodic acid
23. Lead iodide
24. Diethylether
25. Dimethylformamide
26. Nitrogen gas
27. Zinc powder
28. 3-hexylthiophene

## 3.3 การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดลิควิดคริสตัล (นาโนคอมโพสิตอเล็กโทรไลต์)

ขั้นตอนในการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

3.3.1 ตัดกระจกนำไฟฟ้าให้มีขนาด 1.5 x 2 เซนติเมตร เพื่อใช้เป็นขั้วแคโทด และแอโนด

3.3.2 เริ่มจากการเตรียมขั้วแอโนด โดยนำกระจกที่ตัดได้ขนาดที่ต้องการแล้วมาสกรีนด้วย  $\text{TiO}_2$  โดยการสกรีนทีละชั้น และนำไปให้ความร้อนที่ประมาณ 90 องศาเซลเซียส จากนั้นนำมาพักไว้ให้เย็น จึงทำการสกรีนชั้นถัดไปแล้ว สกรีนทับชั้นสุดท้ายด้วย Scattering  $\text{TiO}_2$  เพื่อช่วยในการกระเจิงแสงเพื่อช่วยเพิ่มโอกาสการตกกระทบของแสงไปยังสีย้อมไวแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 สกรีน Platinum ลงบนกระจกนำไฟฟ้าอีกด้าน 1 ชั้นโดยมีขนาดฟิล์มใหญ่กว่า  $\text{TiO}_2$  เพื่อใช้เป็นขั้วแคโทดจากนั้นนำกระจกนำไฟฟ้าที่สกรีนด้วย  $\text{TiO}_2$  และแพลทินัม แล้วเผาเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เพื่อไล่สารอินทรีย์ออกจากฟิล์ม  $\text{TiO}_2$  และแพลทินัม

3.3.4 นำกระจกนำไฟฟ้าที่สกรีนด้วย  $\text{TiO}_2$  มาแช่ลงในสีย้อมซึ่งอยู่ในตัวทำละลาย เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้พาราฟิล์มที่มีลักษณะเป็นวงแหวนสี่เหลี่ยม เป็นตัวกั้นระหว่างขั้วสองขั้ว โดยมีนาโนคอมโพสิตอิเล็กโทรไลต์ที่ทำหน้าที่ส่งผ่านอิเล็กตรอนระหว่างขั้วทั้งสองขั้ว

### 3.4 การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบโซลิดสเตท

3.4.1 ตัดกระจกนำไฟฟ้าขนาด 9 ตารางเซนติเมตร จากนั้นนำฟิล์ม FTO ในส่วนที่ไม่ต้องการออก โดยใช้เทปกั้นกรดปิดในส่วนที่ต้องการขนาด  $1 \times 3$  ตารางเซนติเมตร

3.4.2 หมุนเคลือบชั้นบล็อกกิ้ง (blocking layer) ด้วยสารละลายไทเทเนียม (dense  $\text{TiO}_2$ ) และเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส จากนั้นนำมาพักไว้ให้เย็น

3.4.3 หมุนเคลือบมีโซพอร์สไทเทเนียม (PST-18NR) และเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จากนั้นนำมาพักไว้ให้เย็น

3.4.4 หมุนเคลือบสารละลายเลดไอโอดด์ ระเหยตัวทำละลาย จากนั้นนำมาพักไว้ให้เย็น

3.4.5 หมุนเคลือบเมทิลแอมโมเนียมไอโอดด์ โดยหยดลงบนชั้นเลดไอโอดด์ โดยรอให้ชั้นสีก่อตัวใช้เวลา 20 วินาที 45 วินาที และ 60 วินาที แล้วทำการหมุนเคลือบ จากนั้นระเหยตัวทำละลายที่ปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง

3.4.6 หมุนเคลือบสารส่งถ่ายโฮล (P3HT) ปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

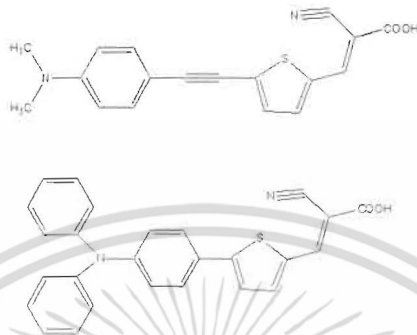
3.4.7 บล็อกขั้วแคโทดด้วยโลหะเงินด้วยกระเหยไอเคมี (thermal evaporation) ความหนา 500 นาโนเมตร ด้วยอัตราการปลูก 1 อังสตรอมต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4 ผลการวิจัย

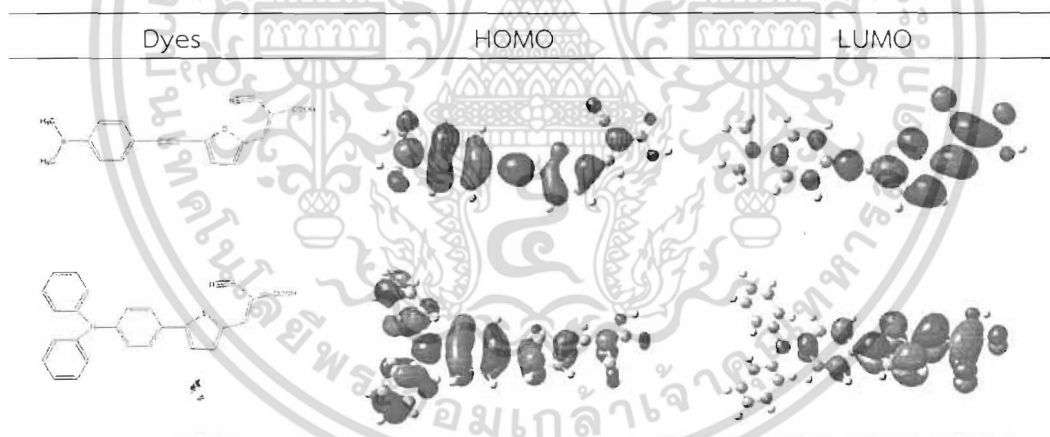
### 4.1 การคำนวณทางเคมีคอมพิวเตอร์

#### 4.1.1 ศึกษาอิทธิพลของหมู่ให้อิเล็กตรอนในกลุ่มของไดฟีนิลอนิลินและโดเมทิลอนิลิน



ภาพที่ 4.1 โครงสร้างของสีย้อมไวแสงในกลุ่มของไดฟีนิลอนิลินและโดเมทิลอนิลินที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของหมู่ให้อิเล็กตรอน

#### 4.1.1.1 โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์

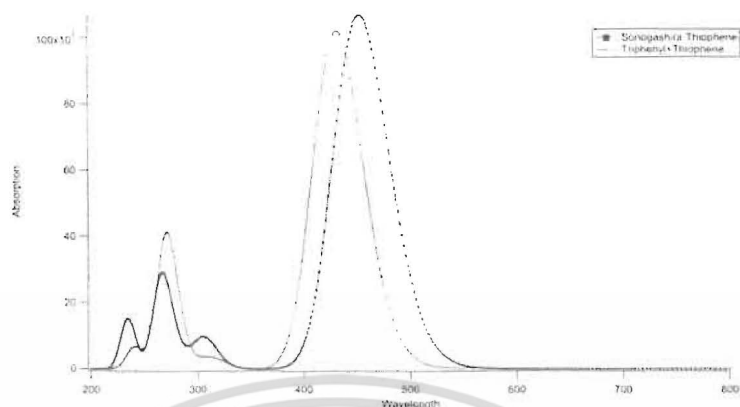


ภาพที่ 4.2 Frontier Molecular orbital ของโมเลกุลในกลุ่มของไดฟีนิลอนิลินและโดเมทิลอนิลิน

ภาพที่ 4.2 แสดงความหนาแน่นของอิเล็กตรอนของโมเลกุลสีย้อมที่สภาวะพื้นและสภาวะเร้า โดยที่สภาวะพื้นอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะรวมตัวอยู่ในส่วนของ หมู่ให้อิเล็กตรอน นั่นคือไดฟีนิลอนิลินและโดเมทิลอนิลิน ตามลำดับ และเมื่อโมเลกุลได้รับพลังงาน อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากสภาวะพื้นไปสู่สภาวะเร้า โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยัง หมู่รับอิเล็กตรอน ซึ่งอยู่อีกด้านหนึ่งของโมเลกุลซึ่งทำหน้าที่ยึดติดกับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.1.1.2 ค่าการดูดกลืนพลังงานแสง



ภาพที่ 4.3 ค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมไวแสงที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของหมู่ให้อิเล็กตรอนในกลุ่มของไดฟีนิลอนีนลินและโดเมทิลอนีนลิน

จากภาพที่ 4.3 พบว่าเมื่อสีย้อมทั้งสองโมเลกุล มี ตัวส่งผ่านอิเล็กตรอน ที่เหมือนกันคือไทโอพีนแต่ในส่วนของหมู่ให้อิเล็กตรอนต่างกันนั้น ค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมที่มีหมู่ให้อิเล็กตรอนเป็นโดเมทิลอนีนลินมีช่วงการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มากกว่าไดฟีนิลอนีนลิน ทั้งนี้เนื่องมาจากพันธะไพคอนจูเกตที่ยาวกว่านั่นเอง


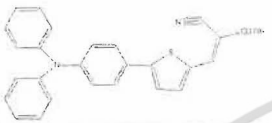
ตารางที่ 4.1 ค่าพลังงานกระตุ้น ค่าความแรงออสซิลเลเตอร์ (oscillator strengths,  $f$ ) และการทรานซิชันที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธี TDDFT/B3LYP/6-31G (d,p) ของหมู่ให้อิเล็กตรอนในกลุ่มของไดฟีนิลอนีนลินและโดเมทิลอนีนลิน

Functional group of aromatic donor	พลังงานกระตุ้น (eV)	$\lambda_{max}$ (nm)	$f$	Main contribution
โดเมทิลอนีนลิน	2.63	452.64	1.4750	0.86 (H $\rightarrow$ L)
ไดฟีนิลอนีนลิน	2.65	431.04	1.4077	0.80 (H $\rightarrow$ L)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.1.1.3 ความหนาแน่นสถานะ

ตารางที่ 4.2 เปรอ์เซ็นต์ความหนาแน่นของอเล็กตรอนแต่ละส่วนของโมเลกุลในกลุ่มของไดฟีนิลอนีลีนและโดเมทิลอนีลีน

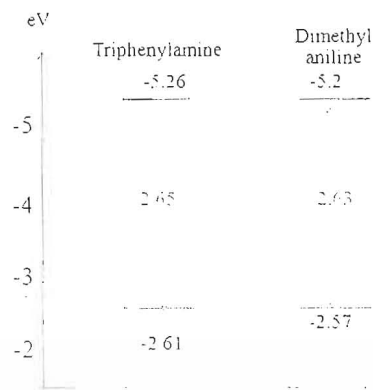
Molecule	State	Donor	Linker	Acceptor
	HOMO	58	32	10
	LUMO	9	46	46
	HOMO	81	12	7
	LUMO	14	37	50

จากผลการคำนวณการกระจายตัวของอเล็กตรอนที่สถานะพื้นและสถานะเร้าพบว่า สีย้อมทั้งสองโครงสร้าง มีแนวโน้มการเคลื่อนที่ของอเล็กตรอนไปในแนวทางเดียวกัน นั่นคือมีการเคลื่อนที่จากบริเวณส่วนที่เป็น หมูให้อเล็กตรอนไปยังส่วนของหมูรับอเล็กตรอน โดยพบว่าโครงสร้างของโมเลกุลสีย้อมไวแสงที่มี หมูให้อเล็กตรอนเป็นไดฟีนิลอนีลีน มีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอเล็กตรอนมากกว่าทั้งบริเวณ หมูให้อเล็กตรอน มีการเปลี่ยนแปลงที่ 67% และหมูรับอเล็กตรอน มีการเปลี่ยนแปลงที่ 43% ส่วนโมเลกุลสีย้อมไวแสงที่มี หมูให้อเล็กตรอน เป็นโดเมทิลอนีลีน มีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอเล็กตรอนน้อยกว่าคือที่บริเวณ หมูให้อเล็กตรอน มีการเปลี่ยนแปลง 49% และบริเวณหมูรับอเล็กตรอนมีการเปลี่ยนแปลง 36% ถึงแม้ว่าการเคลื่อนที่ของอเล็กตรอนในโมเลกุลสีย้อมไวแสงที่มีหมูให้อเล็กตรอนเป็น ไดฟีนิลอนีลีนนั้นจะมีความเหมาะสมมากกว่า แต่อย่างไรก็ตามสีย้อมไวแสงโมเลกุลนี้ มีค่าการดูดกลืนแสงในช่วงที่น้อยกว่า ทำให้ไม่สามารถบอกประสิทธิภาพของสีย้อมทั้งสองโมเลกุลนี้ได้อย่างแน่นอน แต่โมเลกุลสีย้อมไวแสงทั้งสอง สามารถใช้เป็นสีย้อมไวแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงได้

## 4.1.1.4 แถบพลังงานต้องห้าม

จากความแตกต่างระหว่างระดับพลังงาน HOMO และ LUMO แสดงให้เห็น แถบพลังงานต้องห้าม ซึ่งเป็นค่าพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นอเล็กตรอนจากสถานะพื้นขึ้นไปสู่สถานะเร้า ซึ่งจากกราฟ พบว่าโครงสร้างของโมเลกุลสีย้อมไวแสงทั้งสองโมเลกุลมีค่าพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นอเล็กตรอนขึ้นไปสู่สถานะเร้า มีค่าไม่ต่างกันมากนัก โดยโมเลกุลสีย้อมไวแสงที่มี หมูให้อเล็กตรอน เป็นโดเมทิลอนีลีน มีค่าพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นน้อยกว่า จากค่าการดูดกลืนแสง การกระจายตัวของอเล็กตรอน และค่าพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นของสีย้อมไวแสงทั้งสองชนิด สามารถทำนายได้ว่าโมเลกุลสีย้อมไวแสงที่มี หมูให้อเล็กตรอน เป็นโดเมทิลอนีลีน มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นสีย้อมไวแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมากกว่า เนื่องจากค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มากกว่า และค่าพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นมีค่าน้อยกว่า อีกทั้งยังมีการเคลื่อนที่ของอเล็กตรอนในลักษณะที่เหมาะสมคือจากหมูให้อเล็กตรอนไปยังบริเวณหมูรับอเล็กตรอนอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.4 แถบพลังงานต้องห้ามของโมเลกุลในกลุ่มของไตรฟีนิลามีนและไดเมทิลอนีน

4.1.2 การศึกษาอิทธิพลของหมู่ไทโอพีน ไทอะโซลและอิมิดาโซลเมื่อใช้เป็นตัวส่งผ่านอิเล็กตรอน ในกลุ่มอนุพันธ์ของไตรเมทิลเอมีน





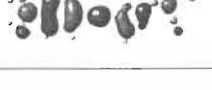



ภาพที่ 4.5 โครงสร้างของสีย้อมไวแสงในกลุ่มอนุพันธ์ไตรเมทิลเอมีนที่มีหมู่ไทโอพีน ไทอะโซลและอิมิดาโซลเป็นตัวส่งผ่านอิเล็กตรอน

#### 4.1.2.1 โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์

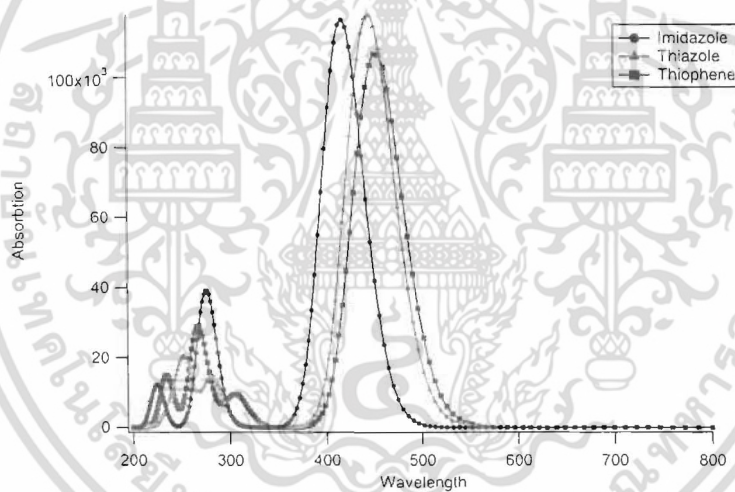
ภาพที่ 4.6 แสดงความหนาแน่นของอิเล็กตรอนของโมเลกุลสีย้อมไวแสงที่สภาวะพื้นและสภาวะเร้า โดยที่สภาวะพื้นอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะรวมตัวอยู่ในส่วนของ หมู่ไตรฟีนิลและเมื่อโมเลกุลของสีย้อมไวแสงได้รับการกระตุ้น อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากสภาวะพื้นไปสู่สภาวะเร้า โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านหมู่ไทโอพีน ไทอะโซลและอิมิดาโซล ซึ่งเป็นตัวส่งผ่านอิเล็กตรอน ไปยังอีกด้านหนึ่งของโมเลกุลซึ่งเรียกว่า หมู่รับอิเล็กตรอน การเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเช่นนี้ เป็นลักษณะสำคัญของสีย้อมที่จะสามารถส่งอิเล็กตรอนไปยังแถบการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ไททาเนียมไดออกไซด์ และยังเป็นปรากฏการณ์สำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวส่งผ่านอิเล็กทรอนิกส์	HOMO	LUMO
ไทโอเฟน		
ไทอะโซล		
อิมิดาโซล		

ภาพที่ 4.6 Frontier Molecular orbital ของโมเลกุลสี่เหลี่ยมวงแหวนที่สภาวะพื้นและสภาวะเร้าของสี่เหลี่ยมวงแหวนในกลุ่มอนุพันธ์ไคเมทิลเอมีนที่มีหมู่ไทโอเฟน ไทอะโซลและอิมิดาโซล เป็นตัวส่งผ่านอิเล็กทรอนิกส์

#### 4.1.2.2 ค่าการดูดกลืนพลังงานแสง



ภาพที่ 4.7 ค่าการดูดกลืนแสงของสี่เหลี่ยมวงแหวนในกลุ่มอนุพันธ์ไคเมทิลเอมีนที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของการเพิ่มหมู่ไทโอเฟนเป็นตัวส่งผ่านอิเล็กทรอนิกส์

จากภาพที่ 4.7 พบว่าเมื่อเปลี่ยนหมู่ส่งผ่านอิเล็กทรอนิกส์เป็นไทโอเฟน ไทอะโซลและอิมิดาโซล จะทำให้สี่เหลี่ยมวงแหวนมีช่วงการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน โดยหมู่ไทโอเฟน ไทอะโซลมีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นมากกว่าและอิมิดาโซล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2.3 ความหนาแน่นสถานะ

จากผลการคำนวณการกระจายตัวของอิเล็กตรอนที่สถานะพื้นและสถานะเร้าพบว่า สีย้อมทุกโครงสร้าง มีแนวโน้มการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปในแนวทางเดียวกันหมด นั่นก็คือมีการเคลื่อนที่จากบริเวณส่วนที่เป็นหมู่ให้อิเล็กตรอนไปยังส่วนของหมู่รับอิเล็กตรอนโดยพบว่าโครงสร้างของโมเลกุลสีย้อมไวแสงที่มีไทโอฟีน ไทอะโซลและอิมิดาโซลเป็นหมู่ส่งผ่านอิเล็กตรอน การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่บริเวณหมู่รับอิเล็กตรอน มีค่าการเปลี่ยนแปลงที่ 36, 40 และ 53 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นั่นคือเมื่อเปลี่ยนตัวส่งผ่านอิเล็กตรอนจากไทโอฟีนเป็นไทอะโซลและอิมิดาโซล ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปยังหมู่รับได้ดีขึ้น

ตารางที่ 4.3 เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนแต่ละส่วนของโมเลกุลสีย้อมไวแสงในกลุ่มอนุพันธ์ของโดเมทิลเอมีนที่มีหมู่ไทโอฟีนเป็นตัวส่งผ่านอิเล็กตรอน

Linker	State	Donor	Linker	Acceptor
ไทโอฟีน	LUMO	9	46	46
	HOMO	58	32	10
ไทอะโซล	LUMO	16	38	46
	HOMO	66	26	6
อิมิดาโซล	LUMO	11	27	62
	HOMO	62	29	9

ตารางที่ 4.4 ค่าพลังงานกระตุ้น ค่าความแรงออสซิลเลเตอร์ (oscillator strengths,  $f$ ) และการทรานซิชันที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธี TDDFT-B3LYP/6-31G (d,p) ของโมเลกุลสีย้อมไวแสงในกลุ่มอนุพันธ์ของโดเมทิลเอมีนที่มีหมู่ไทโอฟีนเป็นตัวส่งผ่านอิเล็กตรอน

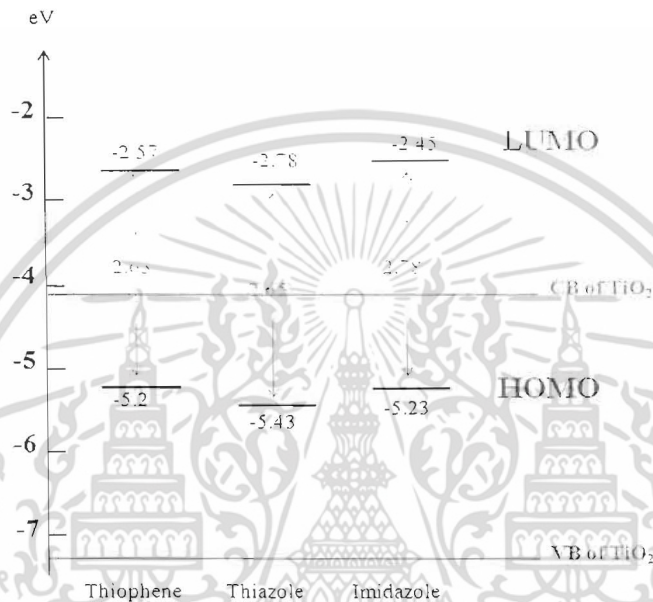
Functional group of aromatic donor	พลังงานกระตุ้น (eV)	$\lambda_{\max}$ (nm)	$f$	Main contribution
ไทโอฟีน	2.63	452	1.4750	0.86 (H→L)
ไทอะโซล	2.65	445	1.6242	0.83 (H→L)
อิมิดาโซล	2.78	416	1.6061	0.82 (H→L)

#### 4.1.2.4 แถบพลังงานต้องห้าม

จากภาพที่ 4.8 ความแตกต่างระหว่างระดับพลังงาน HOMO และ LUMO แสดงให้เห็นแถบพลังงานต้องห้าม ซึ่งเป็นค่าพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากสถานะพื้นขึ้นไปสู่สถานะเร้า โดยพบว่าเมื่อเปลี่ยนตัวส่งผ่านอิเล็กตรอนจาก ไทโอฟีน เป็นไทอะโซลและอิมิดาโซลจะทำให้ค่าพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นอิเล็กตรอนขึ้นไปสู่สถานะเร้ามีค่ามากขึ้น ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นขึ้นไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

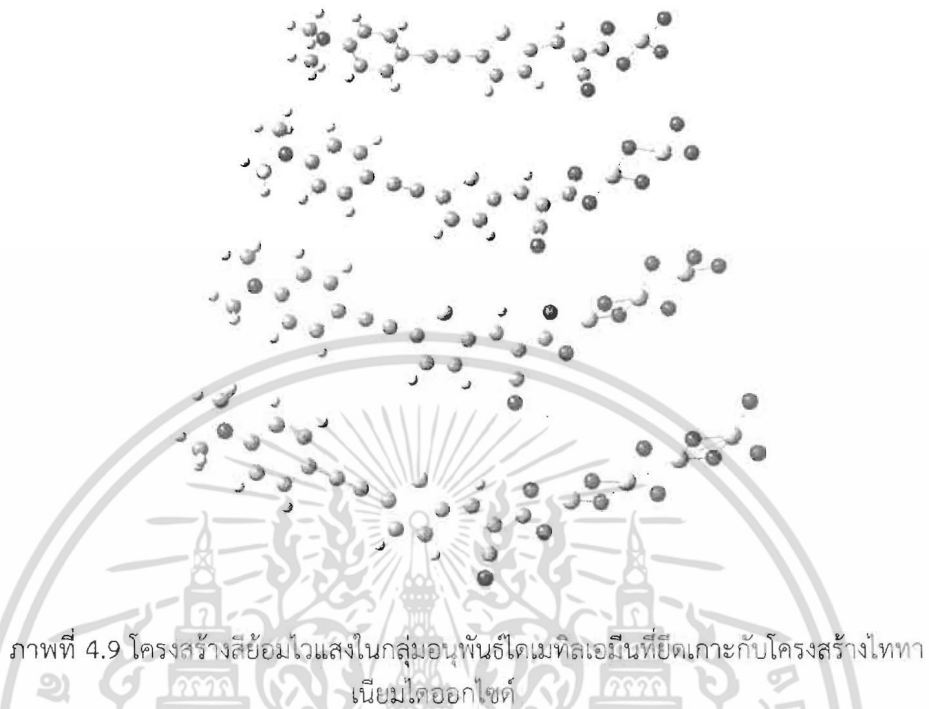
สภาวะกระตุ้นได้ยากขึ้น จากผลศึกษาสรุปได้ว่า ไทโอฟินเป็นตัวส่งผ่านอิเล็กตรอนที่ดีที่สุดในการทดลองนี้ เนื่องจากให้ค่าการดูดกลืนแสงในช่วงที่มีค่าความยาวคลื่นมากที่สุด มีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนมายังหมู่รับที่ดี และยังมีพลังงานในการกระตุ้นต่ำที่สุดอีกด้วย แม้ว่าการเปลี่ยนตัวส่งผ่านอิเล็กตรอนจากไทโอฟินเป็นไทอะโซลและอิมิดาโซลจะทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในโมเลกุลเป็นไปได้ดีขึ้นแต่เนื่องด้วยค่าการดูดกลืนแสงและพลังงานในการกระตุ้น จึงทำให้พบว่าไทอะโซลและอิมิดาโซลใช้เป็นตัวส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ แต่ไม่เหมาะสำหรับใช้เป็นตัวส่งผ่านอิเล็กตรอนเป็นไทโอฟิน



ภาพที่ 4.8 แถบพลังงานต้องห้ามของสีย้อมไวแสงที่มีไทโอฟิน ไทอะโซลและอิมิดาโซลเป็นหมู่ส่งผ่านอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.3 การศึกษาการกระจายตัวของอิเล็กตรอนในสีย้อมกลุ่มอนุพันธ์ไดเมทิลเอมีนเมื่อสีย้อมไวแสงยึดเกาะกับโครงสร้างไททาเนียมไดออกไซด์

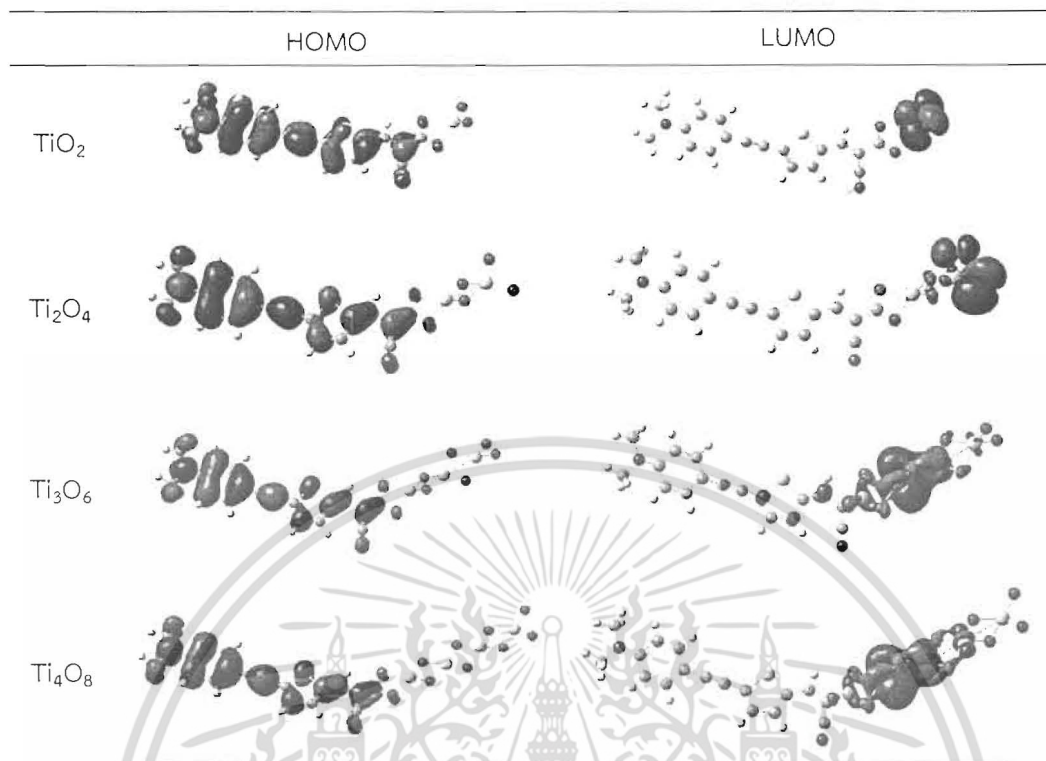


ภาพที่ 4.9 โครงสร้างสีย้อมไวแสงในกลุ่มอนุพันธ์ไดเมทิลเอมีนที่ยึดเกาะกับโครงสร้างไททาเนียมไดออกไซด์

##### 4.1.3.1 โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์

ภาพที่ 4.10 โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์แสดงความหนาแน่นอิเล็กตรอนของโมเลกุลสีย้อมไวแสงที่ยึดเกาะกับโครงสร้างไททาเนียมไดออกไซด์ ที่สภาวะพื้นและสภาวะเร้า โดยที่สภาวะพื้นอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะรวมตัวอยู่ในส่วนของโมเลกุลสีย้อมไวแสง และเมื่อโมเลกุลของสีย้อมไวแสงได้รับการกระตุ้นจากพลังงานแสงอาทิตย์ อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากสภาวะพื้นไปสู่สภาวะเร้า โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนไปยังอีกด้านหนึ่งของโมเลกุลซึ่งเรียกว่าหมู่รับอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ยึดเกาะกับโมเลกุลของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ ซึ่งในการทดลองนี้ศึกษาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากสีย้อมไวแสงไปยังไททาเนียมไดออกไซด์ทั้งหมด 4 รูปแบบ โดยเพิ่มความยาวของไททาเนียมไดออกไซด์ชั้นเรื่อยๆ เพื่อให้การคำนวณเข้าใกล้สภาพจริงโดยการทดลองทั้งหมดศึกษาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในแนวเส้นตรงตั้งฉากกับพื้นผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ นั่นคือ  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Ti}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Ti}_3\text{O}_6$  และ  $\text{Ti}_4\text{O}_8$  ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.10 Frontier Molecular Orbital ของโมเลกุลสีย้อมไวแสงที่สภาวะพื้นและ สภาวะเร้าของสีย้อมไวแสงในกลุ่มอนุพันธ์ของโดเมทิลอนีน ที่ยึดเกาะกับโครงสร้างไททาเนียมไดออกไซด์

ตารางที่ 4.5 ความยาวพันธะ ( ในหน่วย Å ) ของหมู่รับอิเล็กตรอน

โครงสร้าง	C-C (1)	C-O (2)	C-O (3)
Dye	1.4810	1.2134	1.3610
Dye-TiO <sub>2</sub>	1.4937	1.2715	1.2740
Dye-Ti <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1.4435	1.2985	1.2980
Dye-Ti <sub>3</sub> O <sub>6</sub>	1.4338	1.3029	1.3047
Dye-Ti <sub>4</sub> O <sub>8</sub>	1.4338	1.3030	1.3047

ผลการศึกษาพบว่าอิเล็กตรอนของสีย้อมไวแสงมีการส่งต่อไปยังไททาเนียมไดออกไซด์ โดยมีค่าความยาวพันธะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มจำนวนโมเลกุลของไททาเนียมไดออกไซด์ ดังตารางที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเช่นนี้เป็นลักษณะพฤติกรรมที่สำคัญของสีย้อมไวแสงที่ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้นในวงจรเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงและยังเป็นปรากฏการณ์สำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงอีกด้วย

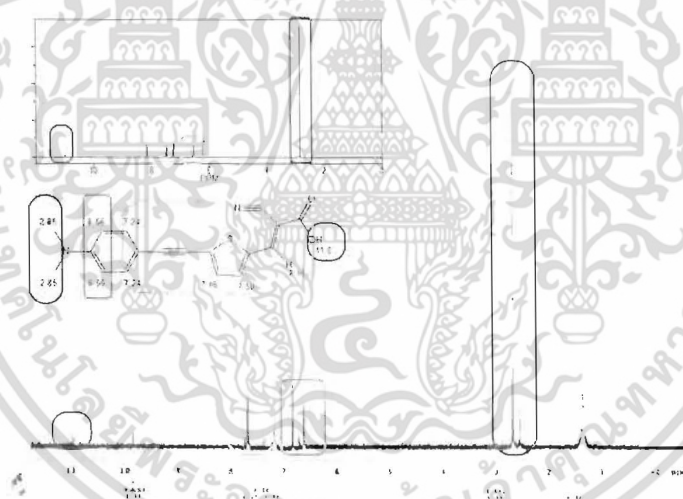
#### 4.2 การสังเคราะห์สีย้อมไวแสงอินทรีย์

4.2.1 การสังเคราะห์สีย้อมไวแสงที่มีหมู่ให้อิเล็กตรอนเป็นโดเมทิลอนิสีน และมีหมู่ไทโอฟินเป็นตัวส่งผ่านอิเล็กตรอน

ปฏิกิริยารวมตัว sonogashira coupling reaction ระหว่าง 4-Ethynyl-N,N-dimethylaniline และ 5-bromo-2-thiophenecarboxaldehyde โดยใช้ Bis (triphenylphosphine) palladium (II) dichloride และ copper iodide เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา มีตัวทำละลายเป็นโทลูอีนทำปฏิกิริยาภายใต้สภาวะเบสโดยการใส่ไตรเอทิลแอมเมียม ทำปฏิกิริยาภายใต้สภาวะไนโตรเจนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ติดตามปฏิกิริยาโดยใช้ Thin layer Chromatography หลังจากปฏิกิริยาสมบูรณ์ทำให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีทางโครมาโตกราฟีจะได้โมเลกุลของสีย้อมไวแสงที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นแอลดีไฮด์ที่ผลผลิตเท่ากับ 29 % จากนั้นทำปฏิกิริยาเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันโดยใช้ 2-cyanoacetic acid, piperidine โดยมี Acetonitrile เป็นสารละลายในการทำปฏิกิริยาได้ผลผลิตเท่ากับ 25 %

#### 4.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลสีย้อมไวแสง

##### 4.2.2.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์

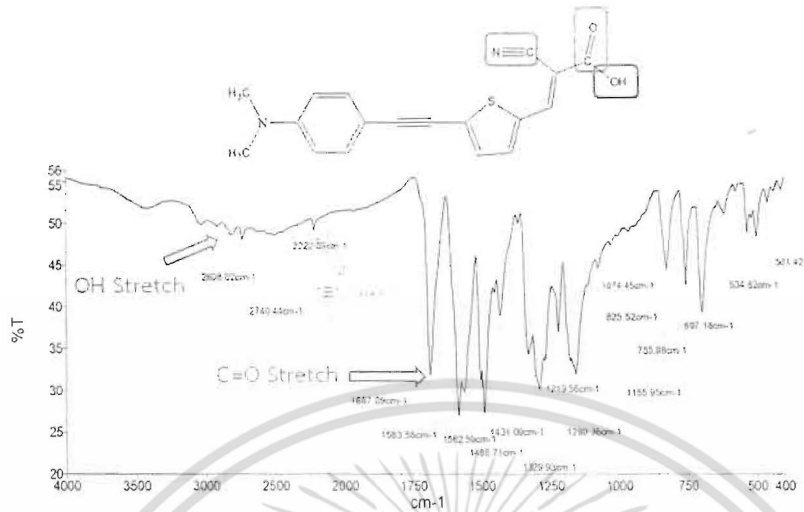


ภาพที่ 4.11 การวิเคราะห์โมเลกุลสีย้อมไวแสง ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์

การพิสูจน์เอกลักษณ์โครงสร้างของสีย้อมไวแสงในกลุ่มอนุพันธ์ของโดเมทิลอนิสีน แสดงในภาพที่ 4.11 โดยทำการการพิสูจน์เอกลักษณ์โครงสร้างที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นไซยาโนอะคริลิก ( $-C\equiv N$ ,  $COOH$ ) พบว่า  $^1H$  NMR ของสีย้อมไวแสงมีความสอดคล้องกับสีย้อมที่ได้จากการสังเคราะห์ดังนี้ ( $CDCl_3$ ):  $\delta$  11.0 (s, 1H, OH), 7.50 (s, 1H, -Thiophene-CH=CHO), 7.46 (s, 1H, -Thiophene-CH=CHO), 7.24 (s, 1H, -Benzene-CH=C), 6.56 (s, 2H, -Benzene-CH=N), 2.85 (s, 6H,  $CH_3$ -N)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR)



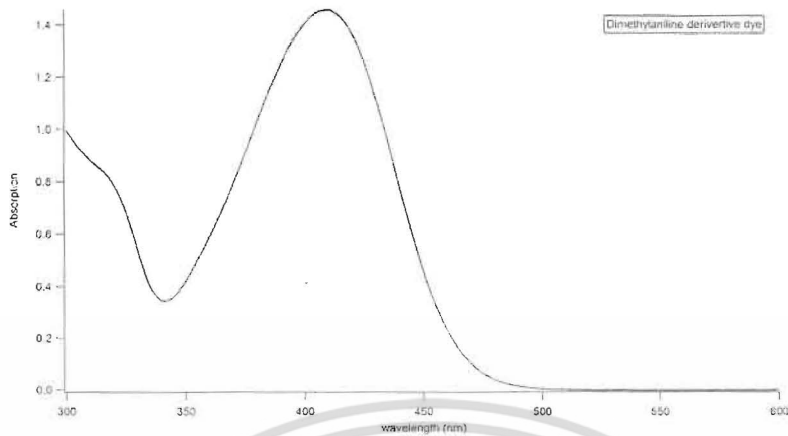
ภาพที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของโมเลกุลสียอมไวแสง ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี เป็นการหาค่าประกอบของโครงสร้างจากการเปลี่ยนแปลงทรานซิชันของการสั่นและการหมุนของโมเลกุล เพื่อยืนยันโครงสร้างและพิสูจน์เอกลักษณ์หมู่ฟังก์ชันของโมเลกุลสียอมไวแสงจากหมู่แอลดีไฮด์เป็นไซยาโนอะคริลิกแอซิด ( $C\equiv N$  และ  $COOH$ ) สามารถบอกองค์ประกอบของโครงสร้างได้ดังนี้  $2808.02\text{ cm}^{-1}$  (OH stretch),  $2222.05\text{ cm}^{-1}$  ( $C\equiv N$  stretch),  $1687.09\text{ cm}^{-1}$  ( $C=O$  stretch) การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีมีลักษณะที่สอดคล้องกับหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุลสียอมไวแสงที่สังเคราะห์ได้

#### 4.2.2.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคยูวีวิสิเบิล สเปกโตรสโกปี

จากการวัดค่าพลังงานการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคยูวีวิสิเบิลสเปกโตรสโกปีพบว่าสียอมไวแสงมีค่าการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 300 นาโนเมตร ไปจนถึง 450 นาโนเมตร โดยมีค่าการดูดกลืนพลังงานสูงสุดที่ 411 นาโนเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สียอมไวแสงที่เราสังเคราะห์ได้นั้นมีความสามารถในการดูดกลืนแสงอาทิตย์ได้ในช่วงกว้าง เมื่อเทียบกับ N719 ซึ่งเป็นสียอมมาตรฐานซึ่งมีค่าการดูดกลืนพลังงานแสงสูงสุดที่ 534 นาโนเมตร สียอมไวแสงที่สังเคราะห์ได้มีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์น้อยกว่าสียอมมาตรฐาน ซึ่งทำให้ค่าประสิทธิภาพน้อยกว่าสียอมมาตรฐาน การปรับปรุงโครงสร้างสียอมไวแสงให้มีค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นมากขึ้นเพื่อให้ใกล้เคียงกับช่วงพลังงานงานแสงอาทิตย์ที่มีค่าพลังงานมากที่สุดในช่วงความยาวคลื่น 500-600 นาโนเมตร นั้น จะทำให้ประสิทธิภาพของสียอมไวแสงมากขึ้นด้วย ซึ่งการปรับปรุงประสิทธิภาพของสียอมไวแสงควรมีค่าเข้าใกล้สียอมมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



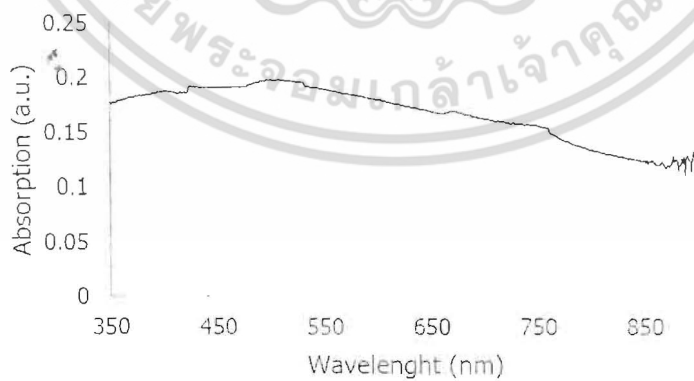
ภาพที่ 4.13 ค่าการดูดกลืนพลังงานแสงของสีย้อมไวแสงอินทรีย์ที่สังเคราะห์ได้

#### 4.2.2 การสังเคราะห์สีย้อมไวแสงอินทรีย์

การสังเคราะห์สีย้อมไวแสงอินทรีย์ทำโดยผสมเมทิลามีนและกรดไฮโดรไอติก ที่ 0 องศาเซลเซียส แล้วนำมาระเหยด้วยเครื่องระเหยสาร (Rotary evaporator) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จนได้ตะกอนของแข็งที่มีสีเหลือง นำไปตกผลึกด้วยเอทานอล และไดเอทิลอีเทอร์ จะได้ผลึกของเมทิลแอมโมเนียมไอโอไดด์ที่มีลักษณะผลึกผงสีขาววาวเล็กน้อย

##### 4.2.2.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคยูวีวิสิเบิล สเปกโตรสโคปี

จากการศึกษาอัตราการดูดกลืนแสงพบว่าเมทิลแอมโมเนียมเลดไอโอไดด์สามารถดูดกลืนแสงได้ในช่วงกว้าง คือ ประมาณ 350 – 750 นาโนเมตรแสดงดังภาพที่ 4.14 การที่สามารถดูดกลืนแสงได้ดีโดยเฉพาะแสงในช่วงที่ตามองเห็น (visible light) นั้น เป็นคุณสมบัติหนึ่งที่ดีสำหรับการใช้เป็นสีย้อมหรือตัวดูดกลืนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นเมทิลแอมโมเนียมเลดไอโอไดด์นี้ จึงเหมาะที่จะนำไปเป็นตัวดูดกลืนไวแสงในงานวิจัย

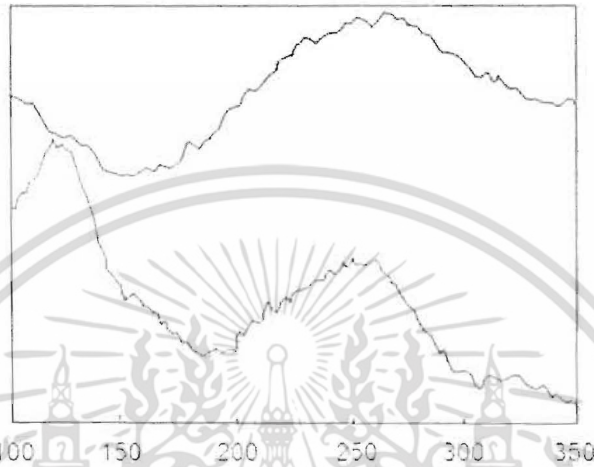


ภาพที่ 4.14 ค่าการดูดกลืนพลังงานแสงของสีย้อมไวแสงอินทรีย์ที่สังเคราะห์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2.3 การวิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโตรสโกปี

เพื่อป้องกันเมทิลแอมโมเนียมเลดไอโอไดต์ที่ได้จากการก่อตัวด้วยวิธีการหมุนเคลือบนั้นสามารถก่อเป็นเมทิลแอมโมเนียมเลดไอโอไดต์ได้จริง ซึ่งจากการวิเคราะห์การกระเจิงแบบรามาน พบตำแหน่งรามานชิฟ (Raman shift) ที่ตำแหน่ง  $130\text{ cm}^{-1}$  และตำแหน่ง  $260\text{ cm}^{-1}$  เมื่อศึกษาเปรียบเทียบกับรายวิสัยก่อนหน้า พบว่ามีตำแหน่งรามานชิฟ ที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับเมทิลแอมโมเนียมเลดไอโอไดต์ที่สังเคราะห์ได้ ดังแสดงในภาพที่ 4.15



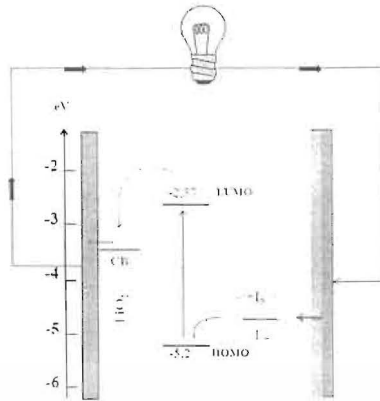
ภาพที่ 4.15 รามานสเปกโตรสโกปีของแอมโมเนียมเลดไอโอไดต์ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์

### 4.3 การทำนายประสิทธิภาพโซลาร์เซลล์

#### 4.3.1 การทำนายประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดลิควิดคริสตัล

เมื่อทำการพิสูจน์เอกลักษณ์สีย้อมไวแสงด้วยเทคนิคต่างๆ เพื่อทำการยืนยันความถูกต้องของโครงสร้างที่สังเคราะห์แล้ว สีย้อมไวแสงที่ได้จากการสังเคราะห์นั้นมีความเหมาะสมต้องห้ามจากการคำนวณโดยเทียบกับแถบการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำไททาเนียมไดออกไซด์ และระดับชั้นพลังงานของสารละลายอิเล็กโทรไลต์คู่ปฏิกริยารีดอกซ์ ไอโอไดต์/ไตรไอโอไดต์ พบว่าค่าพลังงานของสภาวะ LUMO ของสีย้อมไวแสงนั้นมีค่ามากกว่าชั้นพลังงานของแถบการนำไฟฟ้าของไททาเนียมไดออกไซด์ และชั้นพลังงานของสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีค่าสูงกว่าชั้นพลังงาน HOMO ของสีย้อมไวแสงทำให้การไหลของอิเล็กตรอนเกิดขึ้นได้ดังภาพที่ 4.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.16 แผนภาพแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงโดยใช้สีย้อมไวแสงในกลุ่มอนุพันธ์ของโดเมทิลอนีน

การประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง จากใช้สีย้อมไวแสงในกลุ่มอนุพันธ์ของโดเมทิลอนีนที่ได้จากการสังเคราะห์ข้างต้น โดยปริมาณสีย้อมที่ใช้ 15 mM แล้วนำไปวัดค่าประสิทธิภาพโดยเครื่อง เครื่องโซลาร์ซิมูเลเตอร์ ที่แหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน A.M. 1.5 ที่ความเข้มแสง 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส วัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าด้วย Keithley2400 electrometer

ตารางที่ 4.6 การวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง จากสีย้อมอินทรีย์ไวแสงในกลุ่มอนุพันธ์โดเมทิลอนีนที่ได้จากการสังเคราะห์

Dyes	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	Fill Factor	Efficiency (%)
DYE	3.39 ± 0.03	0.55 ± 0.00	0.61 ± 0.04	1.14 ± 0.08
Reference	12.00 ± 0.08	0.74 ± 0.01	0.51 ± 0.02	4.49 ± 0.04

ผลการทดสอบในตารางที่ 4.6 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) แรงดันไฟฟ้าวงจเปิด ( $V_{oc}$ ) ฟิวด์แฟกต์ออร์ (FF) และค่าประสิทธิภาพ ( $\eta$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงโดยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมอินทรีย์ไวแสงในกลุ่มอนุพันธ์โดเมทิลอนีนที่ได้จากการสังเคราะห์เปรียบเทียบกับ N719 (reference)

#### 4.3.2 การทำนายประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโซลิดสเตท

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบโซลิดสเตทชนิดสีย้อมแบบไวแสง จากเมทิลแอมโมเนียมเลดไอโอไดด์ที่เวลาการก่อตัวที่เวลา 20 วินาที 45 วินาที และ 60 วินาที พบว่าจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสและความต่างศักย์ วัดที่แหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน A.M. 1.5 ที่ความเข้มแสง 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พื้นที่ตอบสนอง 0.2 ตารางเซนติเมตร พบว่าที่เวลาการก่อตัวของเมทิลแอมโมเนียมเลดไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โอดีทที่เวลาการก่อตัว 20 วินาที ให้ประสิทธิภาพสูงสุด และที่เวลาการก่อตัว 45 วินาที และ 60 วินาที ให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานลดลงตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 4.7

ตารางที่ 4.7 การวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบโซลิตสเตรทชนิดสีย้อมไวแสง ที่ได้จากการสังเคราะห์

เวลาในการก่อตัวของ CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PbI <sub>2</sub> (s)	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	Fill Factor	Efficiency (%)
20	7.2 ± 0.01	0.23 ± 0.03	0.42 ± 0.02	0.65 ± 0.08
45	5.6 ± 0.05	0.19 ± 0.02	0.47 ± 0.01	0.49 ± 0.03
60	6.6 ± 0.02	0.11 ± 0.03	0.32 ± 0.03	0.22 ± 0.04

#### 4.4 การศึกษาสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์แบบของเหลว มักจะพบปัญหาในเรื่องของการรั่วซึมและการระเหยของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ลดลง และเกิดการกัดกร่อนขั้วขึ้น ทำให้เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์มีอายุการใช้งานสั้นลง งานวิจัยนี้จึงได้ดำเนินการปรับปรุงและพัฒนาอิเล็กโทรไลต์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ และทำให้เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น โดยวิธีการดังต่อไปนี้ การพัฒนาประสิทธิภาพอิเล็กโทรไลต์ การศึกษาประสิทธิภาพอิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วยเงื่อนไขดังนี้ ระบบที่ 1 ส่วนประกอบของสารอิเล็กโทรไลต์ I<sub>2</sub> + Lil + TBP + 1-Methyl-3-propylimidazolium iodide + 3-Methoxypropionitrile + Polyethylene Glycol (MW 20,000) ระบบที่ 2 ปรับปรุงอิเล็กโทรไลต์โดยใช้โคพอลิเมอร์ระหว่างพอลิเอทิลีนไกลคอลกับพอลิอะคริลิกแอซิด (PEG/PAA) การทำโคพอลิเมอร์ระหว่างพอลิเอทิลีนไกลคอลกับพอลิอะคริลิกแอซิด จะเกิดเป็นเจลอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเป็นรูพรุนสูง โดยความเป็นรูพรุนนี้ จะช่วยดูดซับอิเล็กโทรไลต์เอาไว้ ทำให้อิเล็กโทรไลต์ระเหยได้ยากขึ้น ส่วนประกอบของสารอิเล็กโทรไลต์ I<sub>2</sub> + Lil + TBP + 1-Methyl-3-propylimidazolium iodide + 3-Methoxypropionitrile + Polyethylene Glycol (MW 20,000) + Acrylic acid monomer ระบบที่ 3 ปรับปรุงอิเล็กโทรไลต์เพื่อให้ประสิทธิภาพเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มสูงขึ้นโดยใช้ไทโอยูเรีย (thiourea) ส่วนประกอบของสารอิเล็กโทรไลต์ I<sub>2</sub> + Lil + TBP + 1-Methyl-3-propylimidazolium iodide + 3-Methoxypropionitrile + thiourea ระบบที่ 4 ปรับปรุงอิเล็กโทรไลต์เพื่อให้ประสิทธิภาพเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มสูงขึ้นโดยใช้พอลิอนิไลน์เจือด้วยคาร์บอนแบล็ค (polyaniline doped carbon black) ส่วนประกอบของสารอิเล็กโทรไลต์ I<sub>2</sub> + Lil + TBP + 1-Methyl-3-propylimidazolium iodide + 3-Methoxypropionitrile + polyaniline doped carbon black ระบบที่ 5 ปรับปรุงอิเล็กโทรไลต์เพื่อให้ประสิทธิภาพเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มสูงขึ้นโดยใช้ฟูมซิลิกา (fume silica) ส่วนประกอบของสารอิเล็กโทรไลต์ I<sub>2</sub> + Lil + TBP + 1-Methyl-3-propylimidazolium iodide + 3-Methoxypropionitrile + fume silica

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.1 พัฒนาอิเล็กโทรไลต์โดยผสมพอลิเมอร์ชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG)

ตารางที่ 4.8 การวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง จากสีย้อมอินทรีย์ไวแสงที่มีส่วนประกอบของอิเล็กโทรไลต์แตกต่างกัน

ชนิดของอิเล็กโทรไลต์	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	Efficiency (%)
สารละลายอิเล็กโทรไลต์ $I_2 / I_3^-$	14.01 ± 0.08	0.72 ± 0.02	4.73 ± 0.03
สารละลายอิเล็กโทรไลต์ $I_2 / I_3^- + PEG$	3.18 ± 0.01	0.69 ± 0.01	0.66 ± 0.04

จากตารางที่ 4.8 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) แรงดันไฟฟ้าวงจรมืด ( $V_{oc}$ ) และค่าประสิทธิภาพของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ ( $\eta$ ) โดยเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้อิเล็กโทรไลต์ที่ผสมพอลิเอทิลีนไกลคอลมีค่า  $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ ,  $FF$  และ  $\eta$  ที่ต่ำกว่าเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้อิเล็กโทรไลต์ปกติ เนื่องจากการผสมพอลิเมอร์ลงไป จะทำให้อิเล็กโทรไลต์มีความหนืดมากขึ้น อิเล็กตรอนจึงเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าจึงลดลง เป็นผลให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ลดต่ำลงไปด้วย

4.4.2 พัฒนาอิเล็กโทรไลต์โดยใช้โคพอลิเมอร์ระหว่างพอลิเอทิลีนไกลคอลกับพอลิอะคริลิกแอซิด (PEG+PAA) การทำโคพอลิเมอร์ระหว่างพอลิเอทิลีนไกลคอลกับพอลิอะคริลิกแอซิด จะเกิดเป็นเจลอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเป็นรูพรุนสูง โดยความเป็นรูพรุนนี้ จะช่วยลดข้อบกพร่องของอิเล็กโทรไลต์เอาไว้ ทำให้อิเล็กโทรไลต์ระเหยได้ยากขึ้น

ตารางที่ 4.9 การวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง จากสีย้อมอินทรีย์ไวแสงที่มีส่วนประกอบของอิเล็กโทรไลต์แตกต่างกัน

ชนิดของอิเล็กโทรไลต์	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	Efficiency (%)
$I_2 / I_3^-$	14.01 ± 0.08	0.72 ± 0.02	4.73 ± 0.03
$I_2 / I_3^- + PEG + PAA$	8.81 ± 0.01	0.63 ± 0.03	2.12 ± 0.04

จากตารางที่ 4.9 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) แรงดันไฟฟ้าวงจรมืด ( $V_{oc}$ ) และค่าประสิทธิภาพของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ ( $\eta$ ) โดยเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ที่อิเล็กโทรไลต์ที่ดูดซับอยู่ใน โคพอลิเมอร์ มีค่า  $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ ,  $FF$  และ  $\eta$  ที่ต่ำกว่าเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้อิเล็กโทรไลต์ปกติ เนื่องจากโคพอลิเมอร์ จะทำให้อิเล็กโทรไลต์มีความหนืดมากขึ้น อิเล็กตรอนจึงเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าจึงลดลง เป็นผลให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ลดต่ำลงไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.3 การศึกษาผลการเจือจางนาโนคอมโพสิตลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ $I_2 / I_3^-$

การศึกษาผลการเจือจางนาโนคอมโพสิตลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์  $I_2 / I_3^-$  โดยเจือจางอนุภาคคาร์บอนแบล็คใน 20 wt% พอลิไนลีน และซิลิกาขนาดอนุภาค 200 นาโนเมตรลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์มาตรฐาน  $I_2 / I_3^-$  เพื่อเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้า

ตารางที่ 4.10 ค่า Ionic Conductivity ( $\mu S$ ) จากสี่ขั้วอินทรีย์ไวแสงที่มีส่วนประกอบของอิเล็กโทรไลต์แตกต่างกัน

สารละลายอิเล็กโทรไลต์	Ionic Conductivity( $\mu S$ )	% Efficiency
$I_2 / I_3^-$	1933 $\pm$ 0.50	4.73 $\pm$ 0.08
$I_2 / I_3^-$ + Carbon black 0.1 g/l	1503 $\pm$ 0.31	3.95 $\pm$ 0.01
$I_2 / I_3^-$ + Carbon black 0.25 g/l	1610 $\pm$ 0.10	5.35 $\pm$ 0.03
$I_2 / I_3^-$ + Carbon black 0.5 g/l	1630 $\pm$ 0.15	5.27 $\pm$ 0.02
$I_2 / I_3^-$ + Silica fume 0.1 g/l	2730 $\pm$ 0.30	3.24 $\pm$ 0.01
$I_2 / I_3^-$ + Silica fume 0.25 g/l	2800 $\pm$ 0.24	4.47 $\pm$ 0.06

จากผลการทดลองในการวัดค่าประสิทธิภาพ (%efficiency) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสี่ขั้วไวแสงซึ่งมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์แตกต่างกัน จะพบว่า เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วยอนุภาคคาร์บอนแบล็ค 0.25 g/l และ 0.5 g/l จะมีค่าประสิทธิภาพสูงกว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์แบบไม่มีสารเจือปน ส่วนเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วยซิลิกาจะมีค่าประสิทธิภาพต่ำกว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์แบบไม่มีสารเจือปน แสดงว่าอนุภาคคาร์บอนแบล็คในระดับนาโนที่เจือปนอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ มีขนาดอนุภาคเล็ก มีรูพรุนขนาดเล็ก และมีจำนวนรูพรุนมาก จะทำให้มีการยึดเกาะกับไอออนของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ แล้วเป็นตัวนำพาไอออนซึ่งทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic) ไอออนจะเคลื่อนที่ไปเกิดปฏิกิริยาในการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนภายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้รวดเร็วขึ้น ทำให้มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานซึ่งก็คือการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนได้ดีกว่าสารละลายที่ไม่มีเจือปน ส่วนซิลิกาเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคคาร์บอนแบล็คจึงทำให้มีการยึดเกาะกับไอออนได้น้อยกว่า และเนื่องจากมีขนาดใหญ่จึงทำให้เคลื่อนที่ได้ช้า จึงส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนในสารละลายในน้อย ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนจากพลังงานแสงเป็นไฟฟ้าจึงน้อยกว่าอนุภาคคาร์บอนแบล็คและอาจไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของไอออนลบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จึงทำให้มีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่มีเจือปน

จากค่าความต้านทานที่วัดได้ ในโนโคมอดิมทีแดนซ์ (EIS) ของเซลล์แสงอาทิตย์ดังกล่าวพบว่า เซลล์แสงอาทิตย์ มีค่าความต้านทานที่บริเวณรอยต่อของเซลล์ในส่วนต่างๆคือ  $R_s$ ,  $R_{ct}$ , และ  $R_{pe}$  ค่าความต้านทานทั้งสามค่าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีอนุภาคคาร์บอนแบล็คเจือปนจะมีค่าความต้านทานโดยรวมที่น้อยกว่าค่าความต้านทานของสารละลายที่มีซิลิกาเจือปนอยู่ และค่าความสามารถในการกักเก็บประจุที่รอยต่อของสารละลายที่มีคาร์บอนแบล็คเจือปน มีค่าความเก็บประจุที่มากกว่า ส่งผลให้มีความสามารถในการเก็บสะสมไอออนไว้ในเซลล์เพื่อนำมาใช้ในการแลกเปลี่ยนพลังงานจากแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ดีกว่าสารละลายที่มีซิลิกาเจือปน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความต้านทาน  $R_{ct}$  โดยเฉลี่ยของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ปกติ สารละลายที่เจืออนุภาคคาร์บอนแบล็คและซิลิกา จะมีค่าความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้นตามลำดับ ค่าความต้านทาน  $R_{ct}$  จะบ่งบอกถึงความต้านทานในการเคลื่อนย้ายประจุจากรอยต่อระหว่าง  $TiO_2$  , สีย้อมและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งสารละลายที่มีค่าความต้านทาน  $R_{ct}$  น้อย จะมีการเคลื่อนย้ายหรือแลกเปลี่ยนประจุได้ดี ดังนั้น สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีคาร์บอนแบล็กเจือปน จะมีการแลกเปลี่ยนประจุที่ดีกว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์ปกติและสารละลายที่เจือด้วยซิลิกา

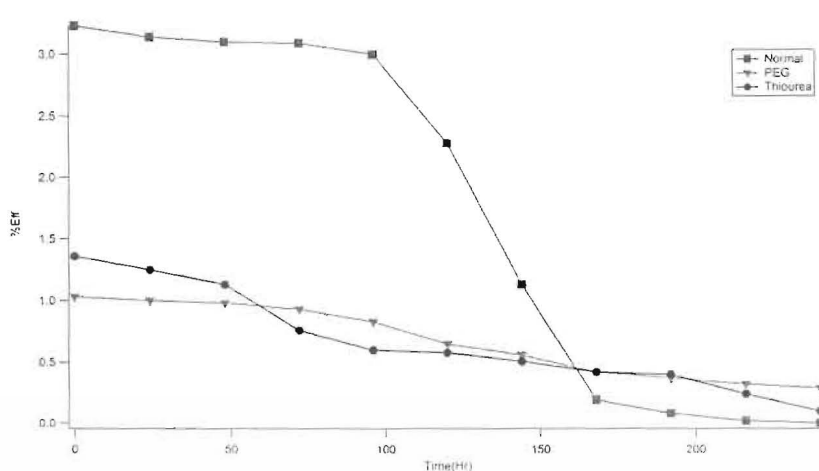
4.4.4 การศึกษาความเสถียรของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์แบบของเหลว มักจะพบปัญหาในเรื่องของการรั่วซึมและการระเหยของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ลดลง และเกิดการกัดกร่อนขั้วขึ้น ทำให้เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์มีอายุการใช้งานสั้นลง งานวิจัยนี้จึงได้ดำเนินการปรับปรุงและพัฒนาอิเล็กโทรไลต์เพื่อเพิ่มความเสถียรต่อค่าประสิทธิภาพเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ และทำให้เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น โดยสารละลายอิเล็กโทรไลต์มาตรฐานที่ใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพเป็นระบบไอโอดีน-ไตรไอโอดีน ( $I/I_3^-$ ) ในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์เพื่อให้คืนอิเล็กตรอนกับสีย้อมไวแสง โดยเตรียมสารละลายจากไอโอดีน ลิเทียมไอโอดีน (LiI) สารละลายเตตระบิวทิลไพรีดีน และอิมิดาโซเลียมไอโอดีน (Imidazolium iodide) ในตัวทำละลายคือสารละลาย 3-เมทอกซีโพรพิโอนไตรายต์ ผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันจะได้สารละลายสีน้ำตาลเข้มดังภาพที่ 4.17



ภาพที่ 4.17 a) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ระบบไอโอดีน/ไตรไอโอดีน b) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ระบบไอโอดีน/ไตรไอโอดีน ที่ผสมโคพอลิเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.18 ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่มีส่วนประกอบของอิเล็กโทรไลต์แตกต่างกัน

จากกราฟในภาพที่ 4.18 พบว่าการปรับปรุงอิเล็กโทรไลต์โดยผสมพอลิเมอร์ชนิด พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol : PEG) มีผลทำให้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ในช่วงแรกมีค่าประสิทธิภาพลดลงจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์มาตรฐาน แต่เมื่อเวลาผ่านไปพบว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีการเติมพอลิเอทิลีนไกลคอลมีความคงตัวต่อค่าประสิทธิภาพมากกว่า โดยเมื่อเวลาผ่านไป 216 ชม. สารละลายอิเล็กโทรไลต์มาตรฐานเหลือค่าประสิทธิภาพเพียง 0.02 % เท่านั้นและลดลงจนไม่มีประสิทธิภาพที่เวลาผ่านไป 240 ชม. ในขณะที่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีการเติมพอลิเอทิลีนไกลคอลมีค่าประสิทธิภาพเหลือมากถึง 0.29 %

ตารางที่ 4.11 การวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง จากสีย้อมอินทรีย์ไวแสงที่มีส่วนประกอบของอิเล็กโทรไลต์แตกต่างกัน

Dyes	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	Fill Factor	Efficiency (%)
NORMAL(I <sub>2</sub> /I <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	3.76 ± 0.04	0.63 ± 0.00	0.62 ± 0.02	1.48 ± 0.01
PEG	2.68 ± 0.17	0.73 ± 0.01	0.60 ± 0.02	1.24 ± 0.02
THIOUREA	3.34 ± 0.12	0.61 ± 0.01	0.62 ± 0.01	1.25 ± 0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอผลการวิจัยของการสังเคราะห์สีย้อมไวแสง สำหรับใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยการทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ 1) การออกแบบและทำนายคุณสมบัติพื้นฐานของสีย้อมไวแสงโดยการคำนวณทางเคมีควอนตัม ซึ่งแบ่งออกเป็นการทำนายอิทธิพลของหมู่ให้อิเล็กตรอน และการทำนายอิทธิพลของหมู่ส่งผ่านอิเล็กตรอนที่มีต่อการกระจายตัวของอิเล็กตรอนในโครงสร้าง พร้อมทั้งทำนายคุณสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าของโมเลกุลสีย้อมไวแสง เพื่อเป็นการทำนายคุณสมบัติเบื้องต้นก่อนทำการสังเคราะห์สีย้อมไวแสงเพื่อใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง 2) การสังเคราะห์สีย้อมไวแสงซึ่งได้ผ่านการทำนายโครงสร้างด้วยการคำนวณทางเคมีควอนตัมแล้ว โดยเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ในการสังเคราะห์ ได้แก่ นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโคปี และ อินฟราเรดสเปกโทรสโคปี จากนั้นนำมาประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง เพื่อทำนายประสิทธิภาพโดยเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น มีฟิล์มนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เป็นชั้นสารกึ่งตัวนำแบบแถบพลังงานกว้างในชั้นไฟฟ้าเวดคิงและใช้ฟิล์มโลหะแพลตินัมเป็นชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาในชั้นแคโทด และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการทดลอง เป็นระบบสารละลายคู่รีดอกซ์ของ ไอโอไดด์/ไตรไอโอไดด์ และ ระบบสารละลายคู่รีดอกซ์ของ ไอโอไดด์/ไตรไอโอไดด์ ที่มีการเจือด้วยนาโนคอมโพสิตหรือกลุ่มพอลิเมอร์ จากผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

การศึกษาการกระจายตัวของอิเล็กตรอนในสีย้อมไวแสงที่ยึดติดกับโครงสร้างของไททาเนียมไดออกไซด์ พบว่าอิเล็กตรอนของสีย้อมไวแสง มีแนวโน้มเคลื่อนที่ไปยังอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ โดยลักษณะเช่นนี้เป็นลักษณะสำคัญของอิเล็กตรอน ซึ่งมีผลเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

การศึกษาเปรียบเทียบอิทธิพลของหมู่ให้อิเล็กตรอนที่มีต่อคุณสมบัติพื้นฐานของสีย้อมไวแสง โดยหมู่ให้อิเล็กตรอนที่ศึกษา ได้แก่ ไดฟีนิลอนินลินและเดเมทิลอนินลิน พบว่าค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมที่มีหมู่ให้อิเล็กตรอนเป็นเดเมทิลอนินลิน มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดในช่วงความยาวคลื่นที่มากกว่าไดฟีนิลอนินลิน นั่นคือ 453 และ 431 นาโนเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากพันธะพายคอนจูเกตที่ยาวกว่าของโครงสร้างที่มีเดเมทิลอนินลินเป็นหมู่ให้อิเล็กตรอน ส่วนค่าพลังงานกระตุ้นของทั้ง 2 โมเลกุลมีค่าใกล้เคียงกันโดยโครงสร้างของสีย้อมไวแสงที่มีเดเมทิลอนินลินเป็นหมู่ให้อิเล็กตรอนจะมีค่าต่ำกว่าสีย้อมที่มีหมู่ให้อิเล็กตรอนเป็นไดฟีนิลอนินลินเล็กน้อยนั่นคือ 2.63 และ 2.65 อิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ

สีย้อมไวแสงที่สังเคราะห์หลังจากผ่านการออกแบบและคำนวณทางเคมีคอมพิวเตอร์แล้วเป็นสีย้อมไวแสงในกลุ่มอนุพันธ์ของเดเมทิลอนินลินซึ่งมีหมู่ไทโอพีนเป็นตัวส่งผ่านอิเล็กตรอนทำการพิสูจน์เอกลักษณ์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโครงสร้างที่สังเคราะห์ได้ จากนั้นนำไปประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยใช้แกมมา-บิวทิลแลคโตน เป็นสารละลายที่ใช้ในการแช่สีย้อม จากผลการทดสอบเพื่อศึกษาหาค่าประสิทธิภาพพบว่า เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงจากสีย้อมอินทรีย์ไวแสงในกลุ่มอนุพันธ์เดเมทิลอนินลินที่ได้จากการสังเคราะห์นั้นมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 1.14 เปอร์เซ็นต์

การศึกษาผลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ ซึ่งเป็นสีย้อมประเภทอินทรีย์ ในการก่ตัวของชั้นซีเมทิลแอมโมเนียมเลดไอโอไดด์ต่อความสามารถในการแปลงพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าที่เวลาการก่ตัว 20 วินาที 45 วินาที และ 60 วินาที ด้วยเทคนิคหมุนเคลือบ และการศึกษาความสามารถในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดูคลื่นแสงแสดงเห็นว่าเมทิลแอมโมเนียมเลดไอโอไดต์ที่เตรียมได้ มีคุณสมบัติดูคลื่นแสงได้ในช่วงกว้าง จึงเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นตัวดูคลื่นแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงได้ดี และผลของเวลาการก่อดิวของเมทิลแอมโมเนียมเลดไอโอไดต์ มีผลต่อความสามารถในการแปลงพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยจากการศึกษาพบว่าที่เวลาการก่อดิว 20 วินาที ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าที่เวลาการก่อดิวสูงกว่า คือ 45 วินาที และ 60 วินาที ตามลำดับ

การศึกษามูลการเจือนาโนคอมโพสิตลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์  $I_2 / I_3^-$  ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยเปรียบเทียบกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ปกติคือ  $I_2 / I_3^-$  กับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เจืออนุภาคคาร์บอนแบล็คและซิลิกาฟุ่มที่ความเข้มข้นต่างๆ จะพบว่าการเจืออนุภาคคาร์บอนแบล็คลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ดีกว่าสารละลายปกติ ส่วนสารละลายที่เจือซิลิกาฟุ่ม จะมีแนวโน้มของค่าประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปแบบของพลังงานที่น้อยกว่าอนุภาคคาร์บอนแบล็ค เนื่องจากคาร์บอนแบล็คมีอนุภาคขนาดเล็ก มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมากทำให้เกิดการยึดเกาะของไอออนสารละลายสารละลายอิเล็กโทรไลต์มากแล้วเป็นตัวนำไอออนเคลื่อนที่ไปเร่งการเกิดปฏิกิริยาในการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนภายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้รวดเร็วขึ้น ส่วนซิลิกาฟุ่มที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า ทำให้เกิดการยึดเกาะกับไอออนได้น้อยกว่า และมีขนาดใหญ่ทำให้เคลื่อนที่ได้ช้าและขัดขวางการเคลื่อนที่อิเล็กตรอน ส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนในสารละลายได้น้อย ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์จึงน้อยกว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่ผ่านการเจือนาโนคอมโพสิต จากการทดสอบค่าความต้านทานที่บริเวณรอยต่อของเซลล์  $R_{ct}$  ที่บอกถึงความต้านทานในการเคลื่อนย้ายประจุจากรอยต่อระหว่าง  $TiO_2$  สีย้อม และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ พบว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เจือด้วยคาร์บอนแบล็ค 0.25 g/L มีค่า  $R_{ct}$  น้อยสุด แสดงว่ามีการเคลื่อนย้ายหรือแลกเปลี่ยนประจุได้ดี จากการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่สารละลายอิเล็กโทรไลต์เจือด้วยคาร์บอนแบล็คมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ดีกว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่ผ่านการเจือนาโนคอมโพสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

1. Beaujuge, P. M. & Reynolds, J. R. (2010). Color Control in  $\pi$ -Conjugated Organic Polymers for Use in Electrochromic Devices. *Chemical Reviews* 110(1): 268-320.
2. B. O'Regan and M. Gratzel. (1991). A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films. *Nature* 353: 737-740.
3. Chang, Y. J. & Chow, T. J. (2009a). Dye-sensitized solar cell utilizing organic dyads containing triarylene conjugates. *Tetrahedron* 65(24): 4726-4734.
4. Chang, Y. J. & Chow, T. J. (2009b). Triaryl linked donor acceptor dyads for high-performance dye-sensitized solar cells. *Tetrahedron* 65(46): 9626-9632.
5. Chaurasia, S., Chen, Y.-C., Chou, H.-H., Wen, Y.-S. & Lin, J. T. (2012). Coplanar indenofluorene-based organic dyes for dye-sensitized solar cells. *Tetrahedron* 68(38): 7755-7762.
6. Cheng, X., Liang, M., Sun, S., Shi, Y., Ma, Z., Sun, Z. & Xue, S. (2012). Synthesis and photovoltaic properties of organic sensitizers containing electron-deficient and electron-rich fused thiophene for dye-sensitized solar cells. *Tetrahedron* 68(27-28): 5375-5385.
7. Chou, H.-H., Hsu, C.-Y., Hsu, Y.-C., Lin, Y.-S., Lin, J. T. & Tsai, C. (2012). Dipolar organic pyridyl dyes for dye-sensitized solar cell applications. *Tetrahedron* 68(2): 767-773.
8. D. Quick. (2010) World record efficiency for organic based photovoltaic solar cells.
9. Funabiki, K., Mase, H., Saito, Y., Otsuka, A., Hibino, A., Tanaka, N., Miura, H., Himori, Y., Yoshida, T., Kubota, Y. & Matsui, M. (2012). Design of NIR-Absorbing Simple Asymmetric Squaraine Dyes Carrying Indoline Moieties for Use in Dye-Sensitized Solar Cells with Pt-Free Electrodes. *Organic Letters* 14(5): 1246-1249.
10. Günes, S., Neugebauer, H. & Sariciftci, N. S. (2007). Conjugated Polymer-Based Organic Solar Cells. *Chemical Reviews* 107(4): 1324-1338.
11. Hagberg, D. P., Edvinsson, T., Marinado, T., Boschloo, G., Hagfeldt, A. & Sun, L. (2006). A novel organic chromophore for dye-sensitized nanostructured solar cells. *Chemical Communications* (21): 2245-2247.
12. Hagfeldt, A., Boschloo, G., Sun, L., Kloo, L. & Pettersson, H. (2010). Dye-Sensitized Solar Cells. *Chemical Reviews* 110(11): 6595-6663.
13. Hara, K., Kurashige, M., Dan-oh, Y., Kasada, C., Shinpo, A., Suga, S., Sayama, K. & Arakawa, H. (2003). Design of new coumarin dyes having thiophene moieties for highly efficient organic-dye-sensitized solar cells. *New Journal of Chemistry* 27(5): 783-785.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. Hong, Y., Liao, J.-Y., Fu, J., Kuang, D.-B., Meier, H., Su, C.-Y. & Cao, D. (2012). Performance of dye-sensitized solar cells based on novel sensitizers bearing asymmetric double D- $\pi$ -A chains with arylamines as donors. *Dyes and Pigments* 94(3): 481-489.
15. Horiuchi, T., Miura, H., Sumioka, K. & Uchida, S. (2004). High Efficiency of Dye-Sensitized Solar Cells Based on Metal-Free Indoline Dyes. *Journal of the American Chemical Society* 126(39): 12218-12219.
16. Howie, W. H., Claeysens, F., Miura, H. & Peter, L. M. (2008). Characterization of Solid-State Dye-Sensitized Solar Cells Utilizing High Absorption Coefficient Metal-Free Organic Dyes. *Journal of the American Chemical Society* 130(4): 1367-1375.
17. Hu, Z.-Y., Fort, A., Barzoukas, M., Jen, A. K. Y., Barlow, S. & Marder, S. R. (2004). Trends in Optical Nonlinearity and Thermal Stability in Electrooptic Chromophores Based upon the 3-(Dicyanomethylene)-2,3-dihydrobenzothiophene-1, 1-dioxide Acceptor. *The Journal of Physical Chemistry B* 108(25): 8626-8630.
18. Kamat, P. V., Tvrđy, K., Baker, D. R. & Radich, J. G. (2010). Beyond Photovoltaics: Semiconductor Nanoarchitectures for Liquid-Junction Solar Cells. *Chemical Reviews* 110(11): 6664-6688.
19. Kim, D., Lee, J. K., Kang, S. O. & Ko, J. (2007). Molecular engineering of organic dyes containing N-aryl carbazole moiety for solar cell. *Tetrahedron* 63(9): 1913-1922.
20. J.K. Lee, S.M. Lee, S.B. Lee, K.H. Kim, S.E. Cho, S.I. Jang, S.H. Park, W.P. Hwang, M.H. Seo, M.R. Kim. (2011). Syntheses of triphenylamine-based organic dyes and effects of their acceptor groups on photovoltaic performances of dye sensitized solar cells. *Current Applied Physics*. 11: 140-146.
21. Lee, W., Yang, Y., Cho, N., Ko, J. & Hong, J.-I. (2012). Functionalized organic dyes containing a phenanthroimidazole donor for dye-sensitized solar cell applications. *Tetrahedron* 68(27-28): 5590-5598.
22. Lin, L.-Y., Tsai, C.-H., Wong, K.-T., Huang, T.-W., Hsieh, L., Liu, S.-H., Lin, H.-W., Wu, C.-C., Chou, S.-H., Chen, S.-H. & Tsai, A.-I. (2010). Organic Dyes Containing Coplanar Diphenyl-Substituted Dithienosilole Core for Efficient Dye-Sensitized Solar Cells. *The Journal of Organic Chemistry* 75(14): 4778-4785.
23. Lin, Y.-D. & Chow, T. J. (2012). Fluorine substituent effect on organic dyes for sensitized solar cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 230(1): 47-54.
24. M. Grätzel. (2003) Dye-sensitized solar cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews* 4: 145-153.
25. M. Liang, W. Xu, F. Cai, P. Chen, B. Peng, J. Chen and Z. Li. (2007) New Triphenylamine-Based Organic Dyes for Efficient Dye-Sensitized Solar Cells. *J. Phys. Chem. C* 111: 4465-4472.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

26. Melucci, M., Barbarella, G., Zambianchi, M., Di Pietro, P. & Bongini, A. (2004). Solution-Phase Microwave-Assisted Synthesis of Unsubstituted and Modified  $\alpha$ -Quinque- and Sexithiophenes. *The Journal of Organic Chemistry* 69(14): 4821-4828.
27. Menzel, R., Ogermann, D., Kupfer, S., Weiß, D., Görls, H., Kleinermanns, K., González, L. & Beckert, R. (2012). 4-Methoxy-1,3-thiazole based donor-acceptor dyes: Characterization, X-ray structure, DFT calculations and test as sensitizers for DSSC. *Dyes and Pigments* 94(3): 512-524.
28. Meyer, G. J. (2010). The 2010 Millennium Technology Grand Prize: Dye-Sensitized Solar Cells. *ACS Nano* 4(8): 4337-4343.
29. Mishra, A., Behera, R. K., Behera, P. K., Mishra, B. K. & Behera, G. B. (2000). Cyanines during the 1990s: A Review. *Chemical Reviews* 100(6): 1973-2012.
30. M. J. Frisch, G. W. Trucks, H. B. Schlegel, G. E. Scuseria, M. A. Robb, J. R. Cheeseman, G. Scalmani, V. Barone, B. Mennucci, G. A. Petersson, H. Nakatsuji, M. Caricato, X. Li, H. P. Hratchian, A. F. Izmaylov, J. Bloino, G. Zheng, J. L. Sonnenberg, M. Hada, M. Ehara, K. Toyota, R. Fukuda, J. Hasegawa, M. Ishida, T. Nakajima, Y. Honda, O. Kitao, H. Nakai, T. Vreven, J. A. Montgomery, Jr., J. E. Peralta, F. Ogliaro, M. Bearpark, J. J. Heyd, E. Brothers, K. N. Kudin, V. N. Staroverov, R. Kobayashi, J. Normand, K. Raghavachari, A. Rendell, J. C. Burant, S. S. Iyengar, J. Tomasi, M. Cossi, N. Rega, J. M. Millam, M. Klene, J. E. Knox, J. B. Cross, V. Bakken, C. Adamo, J. Jaramillo, R. Gomperts, R. E. Stratmann, O. Yazyev, A. J. Austin, R. Cammi, C. Pomelli, J. W. Ochterski, R. L. Martin, K. Morokuma, V. G. Zakrzewski, G. A. Voth, P. Salvador, J. J. Dannenberg, S. Dapprich, A. D. Daniels, Ö. Farkas, J. B. Foresman, J. V. Ortiz, J. Cioslowski, and D. J. Fox. (2009) *Gaussian, Inc., Wallingford CT*.
31. Navacchia, M. L., Melucci, M., Favaretto, L., Zanelli, A., Gazzano, M., Bongini, A. & Barbarella, G. (2008). Alkylsulfanyl-Bridged Bithienyl Cores for Simultaneous Tuning of Electronic, Filming, and Thermal Properties of Oligothiophenes. *Organic Letters* 10(17): 3665-3668.
32. O'Regan, B. & Gratzel, M. (1991). A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films. *Nature* 353(6346): 737-740.
33. Ramkumar, S., Mancharan, S. & Anandan, S. (2012). Synthesis of D-( $\pi$ -A)<sub>2</sub> organic chromophores for dye-sensitized solar cells. *Dyes and Pigments* 94(3): 503-511.
34. Sahu, D., Padhy, H., Patra, D., Yin, J.-F., Hsu, Y.-C., Lin, J.-T. S., Lu, K.-L., Wei, K.-H. & Lin, H.-C. (2011). Synthesis and applications of novel acceptor-donor-acceptor organic dyes with dithienopyrrole- and fluorene-cores for dye-sensitized solar cells. *Tetrahedron* 67(2): 303-311.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

35. Sayama, K., Hara, K., Mori, N., Satsuki, M., Suga, S., Tsukagoshi, S., Abe, Y., Sugihara, H. & Arakawa, H. (2000). Photosensitization of a porous TiO electrode with merocyanine dyes containing a carboxyl group and a long alkyl chain. *Chemical Communications* (13): 1173-1174.
36. Shen, P., Liu, X., Jiang, S., Wang, L., Yi, L., Ye, D., Zhao, B. & Tan, S. (2012). Synthesis of new N, N-diphenylhydrazone dyes for solar cells: Effects of thiophene-derived  $\pi$ -conjugated bridge. *Dyes and Pigments* 92(3): 1042-1051.
37. Srinivas, K., Sivakumar, G., Ramesh Kumar, C., Ananth Reddy, M., Bhanuprakash, K., Rao, V. J., Chen, C.-W., Hsu, Y.-C. & Lin, J. T. (2011). Novel 1,3,4-oxadiazole derivatives as efficient sensitizers for dye-sensitized solar cells: A combined experimental and computational study. *Synthetic Metals* 161(15-16): 1671-1681.
38. Teng, C., Yang, X., Yang, C., Tian, H., Li, S., Wang, X., Hagfeldt, A. & Sun, L. (2010). Influence of Triple Bonds as  $\pi$ -Spacer Units in Metal-Free Organic Dyes for Dye-Sensitized Solar Cells. *The Journal of Physical Chemistry C* 114(25): 11305-11313.
39. Wang, T., Han, J., Zhang, Z., Xu, B., Huang, J. & Su, J. (2012). Bistriphenylamine-substituted fluoranthene derivatives as electroluminescent emitters and dye-sensitized solar cells. *Tetrahedron* 68(50): 10372-10377.
40. Wang, Y., Wang, D., Xu, C., Wang, R., Han, J. & Feng, S. (2011). Click polymerization: Synthesis of novel  $\sigma$ - $\pi$  conjugated organosilicon polymers. *Journal of Organometallic Chemistry* 696(18): 3000-3005.
41. Wang, Z.-S., Koumura, N., Cui, Y., Takahashi, M., Sekiguchi, H., Mori, A., Kubo, T., Furube, A. & Hara, K. (2008). Hexylthiophene-Functionalized Carbazole Dyes for Efficient Molecular Photovoltaics: Tuning of Solar-Cell Performance by Structural Modification. *Chemistry of Materials* 20(12): 3993-4003.
42. Welmaker, G. S. & Sabalski, J. E. (2004). A process for the preparation of 1,2,3,4,8,9,10,10a-octahydro-7bH-cyclopenta[b][1,4]diazepino[6,7,1-hi]indole. *Tetrahedron Letters* 45(25): 4851-4854.
43. Y.J. Chang, T.J. Chow. (2009) Triaryl linked donor acceptor dyads for high-performance dye-sensitized solar cells. *Tetrahedron*, 65: 9626-9632.
44. Zhang, F., Luo, Y.-h., Song, J.-s., Guo, X.-z., Liu, W.-l., Ma, C.-p., Huang, Y., Ge, M.-f., Bo, Z. & Meng, Q.-B. (2009). Triphenylamine-based dyes for dye-sensitized solar cells. *Dyes and Pigments* 81(3): 224-230.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุลตารินี พรหมโยธิน

ตำแหน่งปัจจุบันอาจารย์

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

หมายเลขติดต่อ 02-326-4111 ต่อ 3034 โทรสาร 02-3264733

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา

	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่ยจบ
วท.บ.	เคมี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	2544
วท.ม.	เคมีเชิงฟิสิกส์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	2547
ปร.ด.	เคมี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	2552

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ  
Computational chemistry, Computer aided design, Organic synthesis,  
Natural product extraction,

ผลงานวิจัย

1. Saiphon Songarsa, Shuleewan Rajviroongit, Darinee Sae-Tang, Supa Hannongbua, Kanyawim Kirtikara, and Prasat Kittakoop :New Racemosol Derivatives as Potent Cyclooxygenase (COX) Inhibitors. CHEMISTRY & BIODIVERSITY , Vol. 2 (2005) 1635-1647.
2. Darinee Sae-Tang, Prasat Kittakoop and Supa Hannongbua. Role of Key Residue Specific to Cyclooxygenase II : An ONIOM Study. Monatshefte fuer Chemie (2009), 140(12), 1533-1541.
4. Pratoomrat Tongkate, Darinee S. Phromyothin and Jitapa Sumranjita. Copper(II) ion-sensing mechanism of 2,5-phenylene vinylene derivatives: Syntheses and theoretical calculations. Tetrahedron Vol. 18 (2012) 3329-3325.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. Pongthep Prajongtat, Darinee Sae-Tang Phromyothin and Supa Hannongbua. Key Role of Hydrazine to the Interaction between Oxaloacetic against Phosphoenolpyruvic Carboxykinase (PEPCK): ONIOM Calculations. *J Mol Model*. Vol. 19(8) (2013)3165-74.
6. Prawonwan Thanakit, Thanawee Chodjarusawad, Pakawat Chittratan, Sirapat Pratontap and Darinee Phromyothin. A Study of Fluorescent Chemosensor for Fe(II) Based On Cyanoacrylic Derivatives. *Advanced Materials Research* Vol. 802 (2013) 94-98
7. Narathon Khemasiri, Chanunthorn Chananonnawathorn, Mati Horprathum, Yossawat Rayanasukha, Darinee Phromyothin, Win Bunjongpru, Supanit Porntheeraphat and Jiti Nukeaw. Effect of Operated Pressure on Anticorrosive Behavior of Ta2O5 Thin Film Grown by D.C. Reactive Magnetron Sputtering System. *Advanced Materials Research* Vol. 802 (2013) pp 242-246
8. Pakawat Chittratan, Prawonwan Thanakit, Wirat Jarernboon and Darinee Phromyothin Efficiency Improvement of Triphenylamine-Based Organic Dyes in DSSCs, An Effects of Linker Moiety. *Advanced Materials Research* Vol. 802 (2013) 257-261.
9. R. Puingam, A. Chindaduang, G. Tumcharem, D. Sae-Tang Phromyothin, S. Pratontep. Theoretical Investigation of Rhodamine6G Derivative as Fluorescence Metal Ion Sensor. *Integrated Ferroelectrics*, vol. 155 (2014) pp 126-133
10. P. Thanakit, P. Chittratan, S. Pratontap, D. Sae-Tang Phromyothin. Effect of Functional Chemosensor Based on Dithienopyrrole Derivatives: A DFT Study. *Integrated Ferroelectrics*, vol. 155 (2014) pp 119-125
11. Narathon Khemasiri, Chanunthorn Chananonnawathorn, Mati Horprathum, Pitak Eiamchai, Pongpan Chindaudom, Siraphat Pratontep, Darinee Phromyothin, Supanit Porntheeraphat, Jiti Nukeaw. High Performance Metal Surface Coating Using Ta2O5 thin film Prepare by D.C. Magnetron Sputtering *Advanced Materials Research* Vol. 979 (2014) 240-243.

#### ผลงานวิชาการอื่น ๆ

1. Darinee Sae-Tang, Nahoun Anthony, Sumalee Kamchonwongpaisan, Simon Mackay and Supa Hannongbua. Binding Energy Calculation of Cyclopropane Synthase Enzymes between Cofactors and Their Active Site: ONIOM Study, Pure and Applied Chemistry International Conference 2008, Bangkok, Thailand, 30 January – 1 February 2008.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Pongthep Prajongtat, Darinee Sae-Tang, Phronphimon Maitarad, Patchreenart Saparpakorn and Supa Hannongbua. Interaction Energies of Oxaloacetate and Binding Site of Phosphoenolpyruvate Carboxykinase(PEPCK) by MP2 Calculations, Pure and Applied Chemistry International Conference 2008, Sofital Centara Grand Bangkok, Thailand, 30 January – 1 February 2008.
3. Darinee Sae-Tang, Prasat Kittakoop, Supa Hannongbua. An ONIOM Study on Succinate Dehydrogenase/Substrate-Inhibitor Interaction, The 12<sup>th</sup> Annual Symposium on Computational Science and Engineering, Ubon Rajathanee University, Thailand, 27-29 March 2008.
4. Darinee Sae-Tang, Sumalee Kamchonwongpaisan, Nahoum Anthony, Simon Mackay and Supa Hannongbua. Effect of Water Molecule in Cyclopropane Synthase Cofactor Binding Site by Quantum Chemical Calculations, The 13<sup>th</sup> Annual Symposium on Computational Science and Engineering, Kasetsart University, Thailand, 25-27 March 2009.
5. Darinee Sae-Tang, Masayoshi Takayanagi, Masataka Nagaoka and Supa Hannongbua. Solvation Models: A Correction Binding Energy on Mycolic acid Cyclopropane Synthase Cofactor Binding Site by MD-ONIOM Calculations, Annual Meeting of TRF Senior Research Scholars, Mahasarakham University, 19 – 21 October 2009.
6. Jitapa Sumranjit, Pratoomrat Tongkate, and Darinee Sae-tang: Metal ion-sensing mechanism of 2,5-phenylene vinylene derivatives: Syntheses and theoretical calculations, 241<sup>st</sup> ACS National Meeting, USA, North America, 27-31 March 2011.
7. Darinee Sae-Tang, Masayoshi Takayanagi, Masataka Nagaoka and Supa Hannongbua. Solvation Models: A Correction Binding Energy on Mycolic acid Cyclopropane Synthase Cofactor Binding Site by MD-ONIOM Calculations, The 15<sup>th</sup> Annual Symposium on Computational Science and Engineering, Bangkok University, Thailand, 30 March -1 April 2011.
8. Nissorn Pavarinpong, Wirat Jarernboon, Sirapat Pratontep, Darinee S. Phromyothin. Effect of Solvents Extraction of Achiote Seeds for Dye-sensitized Solar Cells, Structural and Electronic Properties, based on DFT calculations, 14<sup>th</sup> Asian Chemical Congress 2011, Thailand, 5-8 September 2011.
9. Pakawat Chittratan, Wirat Jarernboon, Darinee Sae-tang Phromyothin. Theoretical Investigation of Phenol as an Electron Donor of Dye sensitizer Using DFT calculation. Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON2012), Thailand, 11-13 January 2012.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. Nissorn Pavarinpong, Wirat Jarernboon, Sirapat Pratontep, Darinee Sae-tang Phromyothin. Theoretical Investigation on Achiote Dyes Structure for Dye-sensitized Solar Cell, Geometries and Electronic, based on DFT calculations. Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON2012), Thailand, 11-13 January 2012
11. Prawonwan Thanakit, Sirapat Pratontep, Darinee Sae-tang Phromyothin. Theoretical Study of the Photophysical Properties of Novel Fluorescent Thieno-Pyrrole Derivatives. Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON2012), Thailand, 11-13 January 2012.
12. P. Chittratan, W. Jarernboon, D. Sae-Tang Phromyothin. Effects of Donor Moieties of Triphenylamine Based Organic Dyes: Application in Dye-Sensitized Solar Cells. Siam Physics Congress SPC2012, 9-12 May 2012.
13. P. Thanakit, S. Pratontep and D. Sae-Tang Phromyothin. Carbazole Derivatives Chemosensor: Synthesis and Quantum Chemical Calculations. Siam Physics Congress SPC2012, 9-12 May 2012.
14. N. Pavarinpong, S. Saekow, W. Maiakree, S. Pimanpang, S. Pratontep, D.Sae-tang Phromyothin, W. Jarernboon and V. Amornkitbamrung. Polymer Electrolyte Based on Polyethylene Oxide for Dye-Sensitized Solar Cells Application. Siam Physics Congress SPC2012, 9-12 May 2012.
15. Chompoonuch Tancharoen, Kanokorn Sudto, Ratsupa Thammaphorn, Darinee Phromyothin, Yan Hua Qin, Pachareenart Saparpakorn, Srunya Vajrodaya, Supanna Techasakul, Kornkanok Ingkaninan, Hui-Ming Ge, Ren Xiang Tan, Supa Hannongbua, Search for Bioactive Compounds from Dipterocarpaceae Plant in Thailand, Against HIV-1 Reverse Transcriptase, Acetylcholinesterase and Antimicrobial Activities, IOCD International Conference on Functional Molecules in Nature, Nanjing, PR China, 22-24 September 2012.
16. Kanokorn Sudto, Chompoonuch Tancharoen, Darinee Phromyothin, Yan Hua Qin, Srunya Vajrodaya, Supanna Techasaku, , Hui-Ming Ge, Ren Xiang Tan, Supa Hannongbua, Antimicrobial activity of Hopeahainol C from stem bark of Shorea roxburghii G. Don, 2012 IOCD International Conference on Functional Molecules in Nature, Nanjing, PR China, 22-24 September 2012.
17. P. Thanakit, P. Chittratan, W. Jarernboon, S. Pratontep, and D. Sae-Tang Phromyothin Dithieno-pyrroles Derivative Organic Dye for Dye-sensitized Solar Cells. Siam Physics Congress SPC2013, 21-23 March 2013.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

18. N. Khemasiri, S. Porntheeraphat, D. Phromyothin, W. Bunjongpru, S. Pratontep, and J. Nukeaw. Effect of Reactive Gas-timing on Physical and Chemical Corrosion Property of Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Thin Film Grown by R.F. Magnetron Sputtering . Siam Physics Congress SPC2013, 21-23 March 2013.
19. Prawonwan Thanakit, Thanawee Chodjarusawad, Pakawat Chittratan, Sirapat Pratontap and Darinee Phromyothin. A Study of Fluorescent Chemosensor for Fe(II) Based On Cyanoacrylic Derivatives. International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST 2013) 21-24 August 2013.
20. Narathon Khemasiri, Chanunthorn Chananonawathorn, Mati Horprathum, Yossawat Rayanasukha, Darinee Phromyothin, Win Bunjongpru, Supanit Porntheeraphat and Jiti Nukeaw. Effect of Operated Pressure on Anticorrosive Behavior of Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Thin Film Grown by D.C. Reactive Magnetron Sputtering System. International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST 2013) 21-24 August 2013.
21. Pakawat Chittratan, Prawonwan Thanakit, Wirat Jarernboon and Darinee Phromyothin Efficiency Improvement of Triphenylamine-Based Organic Dyes in DSSCs, An Effects of Linker Moiety. International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST 2013) 21-24 August 2013.
22. N. Khemasiri, S. Porntheeraphat, M. Horprathum, C.Chananonawathorn , W. Bunjongpru, D. Phromyothin, S. Pratontep and J. Nukeaw. Tantalum Oxide Bio-Photonics Thin Film grown by Gas-Timing Innovation Technique. The International Conference on Photonics Solutions (ICPS 2013) 26-28 May 2013
23. R. Puingam, A. Chindaduang, G. Tumcharem, D. Sae-Tang Phromyothin, S. Pratontep. Theoretical Investigation of Rhodamine6G Derivative as Fluorescence Metal Ion Sensor. 7th Conference of the Asian Consortium on Computational Materials Science (ACCMS-7), 23-28 July 2013
24. P. Chittratan, P. Thanakit, W. Jarernboon, D. Phromyothin. Effect of Moieties to Improve Efficiency of Organic Dyes Based Triphenylamine as a Donor in Application of Dye-sensitized Solar Cells. 7th Conference of the Asian Consortium on Computational Materials Science (ACCMS-7), 23-28 July 2013
25. P. Thanakit, P. Chittratan, S. Pratontap, D. Sae-Tang Phromyothin. Effect of Functional Chemosensor Based on Dithienopyrrole Derivatives: A DFT Study. 7th Conference of the Asian Consortium on Computational Materials Science (ACCMS-7), 23-28 July 2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติคณะผู้วิจัย

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายสิรพัฒน์ ประโทนเทพ

(ชื่อ-สกุล ภาษาอังกฤษ) Mr. Sirapat Pratontep

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

หมายเลขติดต่อ 02-329-8000 ต่อ 3077 โทรสาร 02-329-8265

ประวัติการศึกษา

ปริญญาตรี-โท สาขาวิชา ฟิสิกส์ สถาบัน The University of Birmingham, UK ปีที่สำเร็จ พ.ศ. 2541

ปริญญาเอก สาขาวิชา ฟิสิกส์ สถาบัน The University of Birmingham, UK ปีที่สำเร็จ พ.ศ. 2546

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

Nanodevices, Nanoelectronic, Thin film

ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำ

การวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละผลงานวิจัย

เกียรติประวัติ

นักเรียนทุนโครงการ พสวท. รุ่นที่ 6 เริ่มรับทุนตั้งแต่ พ.ศ. 2532

ผู้แทนประเทศไทยเข้าร่วมแข่งขันโอลิมปิกวิชาการสาขาฟิสิกส์ ปี พ.ศ. 2535 ที่ประเทศ  
ฟินแลนด์

รางวัล Nolan Merrill Prize (BNFL and School of Physics and Astronomy, the University of Birmingham) สำหรับโครงการวิจัยชั้นปีที่ 4 ดีเด่นเรื่อง "An in-situ investigation of the radiation inactivation in Firefly luciferase"

รางวัล S.W.J. Smith Prize (the Faculty of Science, the University of Birmingham) สำหรับคะแนนสูงสุดประจำหลักสูตร MSci (Physics)

รางวัล University Club Colour Award สำหรับกิจกรรมงานบริการในแก่สมาคมกีฬา Birmingham University Orienteering Club ของมหาวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กิจกรรมวิชาชีพอื่นๆ

คณะกรรมการสมาคมจุลทรรศน์แห่งประเทศไทย

คณะกรรมการสมาคมฟิสิกส์ไทย

คณะกรรมการโครงการโอลิมปิกวิชาการสาขาฟิสิกส์ (สสวท. และ สอวน.)

### ผลงานด้านการศึกษา

เฉลิมพล รุจินรินทร์ และ สิริพัฒน์ ประโชนเทพ “ถ้า การศึกษาไทยจะไร้ทางเหี่ยวยา” มูลนิธิ สอวน. 2554

Piers Biozny (เขียน) สิริพัฒน์ ประโชนเทพ (แปล) Science: The Definitive Guide คู่มือ ท่องโลกวิทยาศาสตร์ฉบับสมบูรณ์ (สำนักพิมพ์มติชน)

คณะกรรมการจัดทำข้อสอบโอลิมปิกวิชาการสาขาฟิสิกส์ระดับชาติ และระดับนานาชาติ (APhO X และ IPhO41)

คณะกรรมการจัดทำข้อสอบโอลิมปิกวิชาการสาขาดาราศาสตร์ระดับชาติ

คณะกรรมการจัดทำข้อสอบโอลิมปิกวิชาการสาขาวิทยาศาสตร์ระดับ ม.ต้น (ฟิสิกส์) (Junior Science)

คณะกรรมการจัดทำข้อสอบคัดเลือกนักเรียนเข้าโครงการ Asian Science Camp

คณะกรรมการจัดทำข้อสอบคัดเลือกทุนศึกษาต่อต่างประเทศสาขาฟิสิกส์สำหรับโครงการ พสวท.

คณะกรรมการจัดทำข้อสอบรับตรงวิชาฟิสิกส์ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ลาดกระบัง

คณะกรรมการวิชาการการประกวดนวัตกรรมนาโนเทคโนโลยีระดับประเทศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ทุนวิจัยที่เคยได้รับ

หัวหน้าโครงการวิจัย - เซ็นเซอร์ฟิล์มบางโมเลกุลอินทรีย์ (NANOTEC) งบประมาณ 2.9 ล้านบาท พศ. 2548-2551

ผู้ประสานงานโครงการความร่วมมือ Franco-Thai collaboration (organic semiconductor devices) (ทุนสกอ. และรัฐบาลฝรั่งเศส) หัวหน้าโครงการ ผศ.ดร. อีร์เกียร์ตี เกิดเจริญ (มหิดล) และ Dr. Martin Brinkmann (ICS-CNRS, Strasbourg) งบประมาณค่าเดินทางแลกเปลี่ยนรวม 39,000 ยูโร พศ. 2550-2551

หัวหน้าโครงการวิจัย - เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์ (สวทช.) 7.5 ล้านบาท พศ. 2549-2553

หัวหน้าโครงการวิจัย - การพัฒนาเครื่องจุ่มก๊อเล็กทรอนิกส์แบบพกพาสำหรับตรวจอากาศ (บริษัท UBE Chemicals) 0.9 ล้านบาท พศ. 2554-2556

### ทุนวิจัยในปัจจุบัน

หัวหน้าโครงการวิจัย - ชุดตรวจอัจฉริยะจากวัสดุนาโนไฮบริดคอมโพสิตสำหรับวัดสารพิษในสิ่งแวดล้อม (สกอ.) 1.9 ล้านบาท พศ. 2554-2556

หัวหน้าโครงการวิจัย - เซ็นเซอร์จากวัสดุผสมไฮบริดนาโนสำหรับตรวจสารพิษโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม (ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์) 0.65 ล้านบาท พศ. 2553-2554

หัวหน้าโครงการวิจัย - การพัฒนาเครื่องจุ่มก๊อเล็กทรอนิกส์สำหรับตรวจอากาศ (บริษัท IRPC) 2.5 ล้านบาท พศ. 2554-2556

### ต้นแบบสิ่งประดิษฐ์ที่ได้รับการใช้งานในอุตสาหกรรม

จุ่มก๊อเล็กทรอนิกส์ E-nose (สวทช.) พศ. 2552

ระบบตรวจวัดคุณภาพอากาศโดยใช้จุ่มก๊อเล็กทรอนิกส์ E-nose Air Monitoring System (สจล.) พศ. 2555

งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว: ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่ และแหล่งทุน

1. Thanyarat Sawatsuk, Anon Chindaduang, Chaiyuth Sae-kung, Sirapat Pratontep and Gamolwan Tumcharern, "Dye-sensitized solar cells based on TiO<sub>2</sub>-MWCNTs composite electrodes: performance improvement and their mechanisms", *Diamond & Related Materials* 18, 524-427 (2009).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. W. Koetnuyom, A. Keawprajak, P. Piyakulawat, K. Jiramitmongkon, J. Nukeaw, S. Pratontep, U. Asawapirom, "Effect of trichlorobenzene additive on the performance and morphology of polyfluorene and fullerene derivative bulk heterojunction solar cells", *Canadian Journal of Chemical Engineering* 90 (4), 897-902 (2012)
3. J.K. Kasi, A.K. Kasi, N. Afzulpurkar, M. Hasan, S. Pratontep, A. Poyai, "Fabrications of three dimensional anodic aluminum oxide micro shapes", *Nanoscience and Nanotechnology Letters* 4 (5), 537-543 (2012)
4. S. Kladsomboon, S. Pratontep, T. Puntheeranurak, T. Kerdcharoen, "An artificial nose based on M-porphyrin (M = Mg, Zn) thin film and optical spectroscopy", *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* 11 (12), 10589-10594 (2011)
5. P. Jimlim And T. Bovornratanaraks, W. Chaimayo, S. Pratontep, "Effect of Nano Particle Sizes on High Pressure Raman Scattering in Nanocrystalline Cerium Dioxide", *Modern Physics Letters B* 25, 2399-2405 (2011).
6. C. Vergnat, S. Uttiya, S. Pratontep et al., "Oriented Growth of Zinc(II) Phthalocyanines on Polycarbonate Alignment Substrates: Effect of Substrate Temperature on in-Plane Orientation," *Synthetic Metals* 161 (3-4), 251-258 (2011)
7. A. Chindaduang, P. Duangkaew, S. Pratontep et al., "Performance Improvement of Zinc Oxide Photoanode-Based Dye-Sensitized Solar Cells by Multi-Walled Carbon Nanotube," *J. Nanosci. Nanotechnol.* 10 (11), 7217-7220. (2010)
8. Suranan Anantachaisilp, SiwapornMeejoo Smith, Alongkot Treetong, Sirapat Pratontep, Satit Puttipipatkachorn and Uracha Rungsardthong Ruktanonchai, "Chemical and structural investigation of lipid nanoparticles: drug-lipid interaction and molecular distribution", *Nanotechnology*, 21, 125102 (2010).
9. Annop Klamchuen and Sirapat Pratontep, Fabrication of superhydrophilic nanostructured surface by thermal annealing of titanium thin films in air, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* 9, 1509-1513 (2009).
10. Sureeporn Uttiya, Teerakiat Kerdcharoen, Santi Vatanayon, Sirapat Pratontep, "Effect of Structural Transformation to The Gas Sensing Properties of Phthalocyanine Thin Film", *Journal of the Korean Physical Society* 52, 1575\_1579 (2008).
11. Don Klaitabtim, Sirapat Pratontep, and Jiti Nukeaw, "Effect of gas-timing technique on structure and optical properties of sputtered zinc oxide films", *Ceramics International* 34 (2008), 1103-1107.
12. Don Klaitabtim, Sirapat Pratontep, and Jiti Nukeaw, "Growth and Characterization of Zinc Oxynitride Thin Films by Reactive Gas-Timing RF Magnetron Sputtering", *Japanese Journal of Applied Physics* 47, 653-656 (2008).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. Martin Brinkmann, Sirapat Pratontep, Christian Chaumont, and Jean-Claude Wittmann, "Oriented and Nanostructured Polycarbonate Substrates for the Orientation of Conjugated Molecular Materials and Gold Nanoparticles", *Macromolecules* 40, 9420-9426 (2007).
14. M. Brinkmann, S. Pratontep, C. Contal, "Correlated and non-correlated growth kinetics of pentacene in the sub-monolayer regime", *Surface Science* 600, 4712-4716 (2006).
15. F. Claeysens, S. Pratontep, C. Xirouchaki and R E Palmer, "Immobilization of large size-selected silver clusters on graphite", *Nanotechnology* 17 (3), 805-807 (2006).
16. S. Pratontep, F. Nüesch, L. Zuppiroli and M. Brinkmann, "Comparison between nucleation of pentacene monolayer islands on polymer and inorganic substrates", *Physical Review B* 72, art no. 085221 (2005).
17. S. Pratontep, S. J. Carroll, C. Xirouchaki, M. Streun and R. E. Palmer, "Size-selected cluster beam source based on RF magnetron plasma sputtering and gas condensation", *Review of Scientific Instruments* 76, 045103 (2005).
18. S. Pratontep, M. Brinkmann, F. Nüesch, M. Schaer and L. Zuppiroli, "Growth mechanism in ultra-thin pentacene films used in organic field effect transistors: Effect of deposition rate", *Physical Review B* 69, art. no. 165201 (2004).
19. S. Pratontep and M. Brinkmann, F. Nüesch and L. Zuppiroli, "Nucleation and growth of ultrathin pentacene films on silicon dioxide: effect of deposition rate and substrate temperature", *Synthetic Metals* 146, 387-391 (2004).
20. M. Brinkmann, B. Fite, S. Pratontep and C. Chaumont, "Structure and spectroscopic properties of the crystalline structures containing meridional and facial isomers of tris(8-hydroxyquinoline) Gallium (III)", *Chemistry of Materials* 16; 4627-4633 (2004).
21. M. Couillard, S. Pratontep and R. E. Palmer, "Metastable, ordered arrays of size-selected Ag clusters on graphite", *Applied Physics Letters* 82, 2595-2597 (2003).
22. R.E. Palmer, S. Pratontep and H.-G. Boyen, "Nanostructured surfaces from size-selected clusters for semiconductor fabrication and immobilisation of proteins", *Nature Materials* (Review article) 2, 443-448 (2003).
23. S. Pratontep, P. Preece, C. Xirouchaki, R. E. Palmer, C. F. Sanz-Navarro and R. Smith, "Scaling relations for implantation of size-selected Au, Ag and Si clusters into graphite", *Physical Review Letters* 90, art. no. 055503 (2003).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

24. C.F. Sanz-Navarro, R. Smith, D.J. Kenny, S. Pratontep and R.E. Palmer, "Scaling behaviour of the penetration depth of energetic silver cluster in graphite", *Physical Review B* 65, art. no. 165420 (2002).
25. N. Berovic, S. Pratontep, A. Bryant, A. Montouris and R.G. Green, "The kinetics of radiation damage to the protein luciferase and recovery of enzyme activity after irradiation", *Radiation Research* 157, 122-127 (2002).
26. S.J. Carroll, S. Pratontep, M. Streun, R.E. Palmer, S. Hobday and R. Smith, "Pinning of size-selected Ag clusters on graphite surfaces", *Journal of Chemical Physics* 113, 7723-7727 (2000). (Also reviewed in *Nature (news & view)* 408, p. 531, 23rd November 2000.)

ผลงานวิชาการอื่น ๆ (ย้อนหลัง 5 ปี )

1. K. Saeteaw, G. Tumcharearn, P. Piyakulawat, U. Asawapirom, S. Porntheeraphat, P. Duangkaew, R. Maolanon, R. Piyananjaratsri, J. Nukeaw, S. Pratontep, "Heavy metal detection by electrochemical electronic tongue with poly(thiophene)-metal-oxide nanoparticle composite electrodes", 2011 IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference, (NMDC 2011), Article number 6155403, Pages 446-449
2. A. Chindaduang, P. Duangkaew, S. Pratontep, and G. Tumcharearn, "Composite Polymer Electrolyte for Dye-Sensitized Solar Cells: Role of Multi-Walled Carbon Nanotubes", *Advanced Materials Research* 93-94, 31-34 (2010).
3. A.Pankiew, W.Bunjongpru, N.Somwang1, S.Porntheeraphat, S.Pratontep, S.Sophitpan, J.Nukaew, C.Hruanun And A.Poyai, "The optimization of TiN film deposited by DC magnetron sputtering provided for Al diffusion barrier", *Advanced Materials Research* 93-94, 578-582 (2010).
4. T. Hongkachern, W. Suwannet, R. Jaisutti, S. Pratontep and T. Osotchan, "Feature Difference of Interaction Between Various Organic Solvent Vapors and Metal Phthalocyanines Coated on Quartz Crystal", *Advanced Materials Research* 55-57, 305-308 (2008).
5. O. Chamlek, S. Pratontep, T. Kerdcharoen and T. Osotchan, "Spectroscopys Studies of Iron Phthalocyanine Thin Films", *Advanced Materials Research* 55-57, 301-304 (2008).
6. Sakon Rahong, Annop Klumcheun, Apinan Soottitantawat, Keisuke Fukaya, Pisit Singjai and Sirapat Pratontep, "Synthesis of carbon nanofibers by chemical vapor deposition using polyoxometalates as catalysts", *Chiang Mai University Journal of Natural Sciences Special Issue on Nanotechnology* 7, 81-88 (2008)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. Don Klaitabtim, Sirapat Pratontep, Jiti Nukeaw, "Growth and characterization of zinc oxide thin films by gas-timing RF magnetron sputtering", Thai Journal of Physics 2, 78-82 (2007)
8. S. Nilphai, N. Hongstith, C. Sae-Kung, S. Pratontep, P. Mangkorntong, N. Mangkorntong, S. Choopun, "ZnO nanostructures as semiconducting photoelectrodes in dye-sensitized solar cells", Thai Journal of Physics 3, 66-68 (2008)
9. Anon Chindaduang, Thanyarat Sawatsuk, Waraporn Wongsukkab, Chaiyut Sae-kung, Gamolwan Tumcharern and Sirapat Pratontep, "Electron microscopy and optical spectroscopy analyses of carbon nanotube composite electrodes for dye-sensitized solar cells", Journal of Microscopy Society of Thailand 22, 24-26 (2008)
10. Sirapat Pratontep, Sureeporn Uttiya and Teerakiat Kerdcharoen, "In-situ AFM study of thermally activated structural transformation in zinc phthalocyanine gas sensors", Journal of Microscopy Society of Thailand 21, 31-35 (2007).
11. Gamolwan Tumcharern, Vichuta Lauruengtana, Annop Klamchuen, Sirapat Pratontep and Joydeep Dutta, "Bacteria Detection by ZnS:Mn<sup>2+</sup> Quantum Dots", Journal of Microscopy Society of Thailand 21, 333-336 (2007)
12. Sureeporn Uttiya, Anurak Udomvech, Sirapat Pratontep, Santi Vatanayon, Teerakiat Kerdcharoen, "Interaction between Alcohol and Zinc Phthalocyanine: Computational Modeling and Spectroscopy", The 10th Annual National Symposium on Computational Science and Engineering (ANSCSE10), Chiang Mai, Thailand, March 22-24, 2006.
13. Paisarn Doungjak na ayutthaya, Krisanadej Jaroensutasinee, Sirapat Pratontep and Teerakiat Kerdcharoen, "Classification of Thai instant coffees using electronic nose", The 31st Congress on Science and Technology of Thailand, Suranaree University of Technology, Nakornrachsrma, October 18-20, 2005.
14. S. Pratontep, A. Klamcheun, S. Uttiya and T. Kerdcharoen, "Characterization of Zinc Phthalocyanine Thin Films Prepared by Drop Casting Technique", The 23rd Annual Conference Microscopy Society of Thailand The Twin Tower Hotel, Bangkok, Thailand, February 22-24, 2006.
15. C.F. Sanz-Navarro, R. Smith, D.J. Kenny, S. Pratontep and R.E. Palmer, "Scaling behaviour of the penetration depth of energetic silver cluster in graphite", Physical Review B 65, art. no. 165420 (2002).
16. M. Couillard, S. Pratontep, M. Streun, R.E. Palmer and P.D. Nellist, "HRTEM studies of the aggregation of size-selected Ag clusters deposited onto graphite", Electron Microscopy and Analysis 1999, 545-548 (1999).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17. H.F. Poulsen, L.G. Anderson, T. Frello, S. Prantontep, N.H. Anderson, S. Garbe, J. Madsen, A. Abrahamsen, M.D. Bentzon and M. von Zimmermann, "In-situ study of equilibrium phenomena and kinetics in a BiSCCO Ag tape", PHYSICA C 315, 254-262 (1999).

#### คำขอสิทธิบัตร

1. Sirapat Pratontep, Kanjana Saeteaw, Gamolwan Tumchareem, Supanit Porntheeraphat, Patsuda Duangkaew, Rungroj Maolanon, Jitapa Samranjit, Jiti Nukeaw, "Electrodes for electronic tongue detection device of ions in water based on composites of metal oxide nanoparticles and semiconducting polymer and implementation of said electrodes", Thai patent application (Application no. 1201003184, June 2012)
2. Sirapat Pratontep, Rungroj Maolanon, "Methods for qualitative classification of color of objects and devices exploiting said methods", Thai patent application (Application no. 1001000739, May 2010).
3. Sirapat Pratontep, Pattaraluck Pattamang, Chinapat Srikomut, Rungroj Maolanon, Pimwipha Piyakulawat, Udom Asawapirom, Supanit Porntheeraphat, Amporn Poyai, "Composite Materials from Zinc Oxide Nanoparticles and Polymer Semiconductor Ultraviolet for uses in ultraviolet photodetectors", Thai patent application (Application no. 0901004648, Oct 2009).
4. Sirapat Pratontep, Rungroj Maolanon, Teerakiat Kerdcharoen, Paisal Doungjak na ayuthaya, "Methods for scent detection and portable devices exploiting said methods", Thai patent application (Application no. 0801004238, Aug 2008).
5. Sirapat Pratontep, Wittawat Saenrank, Yongyuth Wanna, Wiyong Kangwansupamonkon, "Process for preparation of natural rubber fibers", Thai patent application (Application no. 0801001730, Apr 2008).
6. Sirapat Pratontep, Anon Chindadaung, Gamolwan Tumcharoen, Chaiyuth Saekang, "Counter Electrodes of Dye-Sensitized Solar Cells Containing Multi-Walled Carbon Nanotubes and Platinum and the Method of Preparation Therein", Thai patent application (Application no. 0701006250, Dec 2007).
7. Sirapat Pratontep, Anon Chindadaung, Gamolwan Tumcharoen, Chaiyuth Saekang, "Method for Fabricating the Front Electrode of Dye-Sensitized Solar Cells containing Multi-Walled Carbon Nanotubes by using direct mixing methods", Thai patent application (Application no. 0701006249, Dec 2007).
8. Annop Klamcheun, Sirapat Pratontep, and Jiti Nukaew, "Process for coating titanium nitride and titanium oxynitride on substrate by plasma sputtering and thermal annealing in air", Thai patent application (Application no. 0701001915, Apr 2007).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. Jiti Nukeaw, Supanit Porntheeraphat, Don Klaitabtim, and Sirapat Pratontep. "Indium Tin Oxide Nitride Conductive Optical Filter", Thai patent application (Application no. 0601006624, 29 Dec 2006).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้