

การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง  
ด้วยอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีสะอาด

คณาฐ โลหะเวช

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม  
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา  
มิถุนายน 2559  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา


คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้พิจารณา  
วิทยานิพนธ์ของ คชาวุธ โลหะเวช ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้


คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

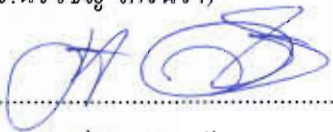
  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก  
(ดร.นรวิษณุ ไกรนรา)


  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ดร.พิศัญญ์ คำหน่อแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


  
..... ประธาน  
(ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์)

  
..... กรรมการ  
(ดร.นรวิษณุ ไกรนรา)

  
..... กรรมการ  
(ดร.พิศัญญ์ คำหน่อแก้ว)

  
..... กรรมการ  
(ดร.ณรงค์ อังกิมบัววน)

คณะวิทยาศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ของมหาวิทยาลัยบูรพา

  
..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกรัตน์ ศรีสุข)

วันที่ 3 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2559

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์จากมหาวิทยาลัยบูรพา  
ปีงบประมาณ 2559

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ดร.นรวิชญ์ ไกรนรา อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และดร.พิศิษฐ์ คำหน่อแก้ว (นักวิจัยศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ) อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางที่ถูกต้องเพื่อเป็นประโยชน์ต่อการวิจัย ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วนและเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมาจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่งจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ และดร.ณรงค์ อึ้งกิมบัวน เป็นอย่างยิ่งที่ได้เสียสละเวลามาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วนและเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) และภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่อำนวยความสะดวกทางด้านอุปกรณ์ สถานที่ และเครื่องมือต่าง ๆ สำหรับการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์แบบสียอมไวแสงและการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์เพื่อใช้ในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าต้องขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อสังเวียน คุณแม่ฉวีวรรณ โลหะเวช คุณตาคุณยาย คุณยายแหวน บุญจิตร คุณย่าหอม โลหะเวช และญาติพี่น้องของข้าพเจ้าทุกท่านที่ให้การช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านไม่ว่าจะเป็นคำปรึกษา คำปลอบใจและสนับสนุนทุนทรัพย์ให้แก่ข้าพเจ้าเพื่อใช้ระหว่างการศึกษาจนสำเร็จการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูคุณเวทิตแด่บุพการีบูรพาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน ทั้งในอดีตและปัจจุบันที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษาและประสบความสำเร็จมาจนตราบนานเท่าทุกวันนี้

กชวรุฑ โลหะเวช

56910054: สาขาวิชา: วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม; วท.ม. (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

คำสำคัญ: ซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์/ วิธีสะอาด/ เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

คณาจารย์ โลหะเวช: การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงด้วยอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีสะอาด (STUDY OF EFFICIENCY IMPROVEMENT OF DYE - SENSITIZED SOLAR CELL WITH ZINC CADMIUM SULFIDE NANOPARTICLE SYNTHESIZED BY A GREEN METHOD) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: นรวิษณุ ไกรนรา, ปร.ด. 146 หน้า. ปี พ.ศ. 2558.

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ภายใต้รังสีไมโครเวฟที่เปอร์เซ็นต์การปล่อยกำลังของรังสีไมโครเวฟ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่กำลังไฟฟ้า 700 วัตต์ ระยะเวลา 60 วินาที และ 180 วินาทีโดยใช้สารควบคุมขนาดอนุภาคคือ พอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดน กรดซิตริก และใช้ร่วมกันระหว่างพอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนและกรดซิตริก อนุภาคที่สังเคราะห์ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคและองค์ประกอบธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านและเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยรังสีเอกซ์ และวัดขนาดอนุภาคของสาร ผลการวิจัยพบว่า การสังเคราะห์ที่ควบคุมขนาดอนุภาคด้วยพอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดน จะมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 4 - 6 นาโนเมตร และมีอัตราส่วน (โมล) การแทนที่แคดเมียมด้วยซิงค์สูงที่สุดเท่ากับ 0.6:0.4:0.8 (ซิงค์:แคดเมียม:ซัลเฟอร์) อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์ได้ จะถูกนำมาศึกษาถึงผลการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงโดยเปรียบเทียบตำแหน่งการเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ลงด้านบนกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบผิวกระจกด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีนที่แตกต่างกัน ผลการวิจัยพบว่า อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่เคลือบลงตำแหน่งด้านบนผิวของกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบผิวกระจกด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีนสำหรับทำหน้าที่เป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นสารผสมระหว่างไททาเนียมออกไซด์และอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ (อัตราส่วน 50 ต่อ 50) มีเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพสูงที่สุดเท่ากับ 5.22 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้าต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด ค่ากระแสไฟฟ้างจร และค่าฟิลล์แฟกเตอร์ เป็นตัวกำหนดเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง ความปลอดภัยทางด้านสิ่งแวดล้อมจากผลการวิจัยจะเห็นว่า ปริมาณของแคดเมียมที่ใช้ในการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงลดลงอย่างมีนัยสำคัญและสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงได้สูงถึง 45 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์อ้างอิง

56910054: MAJOR: ENVIRONMENTAL SCIENCE; M.Sc. ( ENVIRONMENTAL SCIENCE)

KEYWORDS:  $Zn_{1-x}Cd_xS$ / GREEN METHOD/ DYE - SENSITIZED SOLAR CELL

KHATHAWUT LOHAWET: STUDY OF EFFICIENCY IMPROVEMENT OF DYE - SENSITIZED SOLAR CELL WITH ZINC CADMIUM SULFIDE NANOPARTICLE SYNTHESIZED BY A GREEN METHOD. ADVISORY COMMITTEE NORAWIT KRAINARA, Ph.D. 146 P. 2015.

$Zn_{1-x}Cd_xS$  nanoparticles were synthesized under 100% output, 700 W of microwave radiation during 60 sec and 180 sec. Polyvinylpyrrolidone (PVP), citric acid and mixing between PVP and citric acid were used as particles size controller. Transmission electron microscope (TEM) and energy dispersive x - ray spectrometer (EDX) analysis were used as properties and composition of nanocrystals structure of  $Zn_{1-x}Cd_xS$  nanoparticles. The result found that the particles size of  $Zn_{1-x}Cd_xS$  nanoparticles is 4 - 6 nm and the replacement of  $Cd^{2+}$  with  $Zn^{2+}$  was studied. The result found that the highest mol ratio is 0.6:0.4:0.8 (Zn:Cd:S) after using PVP as particles size controller.  $Zn_{1-x}Cd_xS$  nanoparticles were used to study the effect on performance of dye - sensitized solar cell. The position of  $Zn_{1-x}Cd_xS$  nanoparticles coating on fluorine doped thin oxide (FTO) were varied. The highest of efficiency percentage was found as 5.22% after coating Titanium oxide ( $TiO_x$ ) -  $Zn_{1-x}Cd_xS$  nanoparticles (50:50 ratio) mixing for electron transporting layer (ETL). The electrical parameter of solar cell such as  $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$  and  $FF$  were determined. In environmental safety, the amount of  $Cd^{2+}$  to produce solar cell decrease significantly and improve the performance of dye - sensitized solar cell about 45% of that of cell reference.

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	จ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
อักษรย่อ.....	ณ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	4
ขอบเขตของการวิจัย.....	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
อนุภาคนาโน.....	6
สารผสมซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์.....	7
โครงสร้างและคุณสมบัติเชิงอนุภาคของซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์.....	7
คุณสมบัติของซิงค์ซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟด์.....	9
การสังเคราะห์สาร โดยวิธีสะอาคด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	10
เซลล์แสงอาทิตย์.....	11
เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง.....	13
ชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน.....	19
เทคนิคการเคลือบฟิล์มบาง.....	19
เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	21

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
เทคนิคการวิเคราะห์สมบัติทางแสงของสารด้วยยูวี - วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์.....	24
เทคนิคการวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคและองค์ประกอบธาตุเชิงพลังงานของสารด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านและการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยรังสีเอกซ์.....	32
เทคนิคการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	33
การวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบสี่ข้อมไวแสง.....	34
ค่ามวลอากาศ.....	39
รายงานการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์และการประยุกต์ใช้.....	41
รายงานการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์แบบสี่ข้อมไวแสงที่ใช้สารกึ่งตัวนำและสี่ข้อมชนิดต่าง ๆ.....	42
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	48
เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี.....	48
การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์.....	52
การวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคและองค์ประกอบธาตุเชิงพลังงานของสารด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านและเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยรังสีเอกซ์.....	56
การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	57
การวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบสี่ข้อมไวแสงโดยเปรียบเทียบตำแหน่งการเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่แตกต่างกัน.....	58
การวิเคราะห์สมบัติทางแสงและค่าแถบช่องว่างพลังงานของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ด้วยเทคนิคยูวี - วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์.....	63



## สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
3	การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	64
4	ผลการวิจัย.....	66
	ผลการวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคและองค์ประกอบธาตุเชิงพลังงานของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านและเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยรังสีเอกซ์.....	66
	ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	70
	ผลการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง โดยเปรียบเทียบตำแหน่งการเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่แตกต่างกัน.....	72
	ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงและค่าแถบช่องว่างพลังงานของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ด้วยเทคนิค ยูวี - วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์	80
	ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	83
5	อภิปรายและสรุปผลการวิจัย.....	85
	อภิปรายผลการวิจัย.....	85
	เซลล์แสงอาทิตย์กับการลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม.....	100
	สรุปผลการวิจัย.....	102
	ข้อเสนอแนะ.....	103
	บรรณานุกรม.....	104
	ภาคผนวก.....	112
	ภาคผนวก ก.....	113
	ภาคผนวก ข.....	126
	ภาคผนวก ค.....	135
	ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	145

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2 - 1	คุณสมบัติของซิงค์ซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟด์..... 9
4 - 1	อัตราส่วน (โมล) ขององค์ประกอบธาตุเชิงพลังงานของธาตุซิงค์ต่อแคดเมียมเทียบกับซัลเฟอร์ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยรังสีเอกซ์ และขนาดของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์โดยใช้สารควบคุมขนาดอนุภาคและระยะเวลาที่แตกต่างกัน..... 67
4 - 2	ผลของค่าตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้าของแสงอาทิตย์แบบสี่ข้อมไวแสงตำแหน่งที่ 1 ที่เคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ (อัตราส่วน 75:25 50:50 และ 25:75) สำหรับทำหน้าที่เป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน..... 72
4 - 3	ผลของค่าตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสี่ข้อมไวแสงตำแหน่งที่ 2.1 ที่เคลือบสารผสมระหว่างไททานเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ อัตราส่วน 1:8 1:16 และ 1:32) โดยหยดลงด้านบนชั้นของไททานเนียมไดออกไซด์สำหรับทำหน้าที่เป็นชั้นสารกึ่งตัวนำ..... 74
4 - 4	ผลของค่าตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสี่ข้อมไวแสงตำแหน่งที่ 2.2 ที่เคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ระดับความเข้มข้น 0.5 1 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ ที่ผสมกับไททานเนียมไดออกไซด์ สำหรับทำหน้าที่เป็นชั้นสารกึ่งตัวนำ..... 76
4 - 5	ผลของค่าตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสี่ข้อมไวแสงตำแหน่งที่ 3 ที่เคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์โดยการหยด (ปริมาตร 20 40 และ 60 ไมโครลิตร) ลงด้านบนชั้นของสี่ข้อมไวแสง (N 719) สำหรับทำหน้าที่เป็นตัวรับแสง..... 78
4 - 6	ค่าแถบช่องว่างพลังงานของไททานเนียมออกไซด์ ซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ และไททานเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ (อัตราส่วน 75:25 50:50 และ 25:75) ที่ช่วงความยาวคลื่น 200 - 450 นาโนเมตร..... 82

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5 - 1	
อัตราส่วน (โมล) ขององค์ประกอบธาตุเชิงพลังงานของซิงค์ต่อแคดเมียมเทียบกับซัลเฟอร์ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยรังสีเอกซ์ ขนาดของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ และผลของค่าตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่เคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์แต่ละตำแหน่งที่แตกต่างกัน.....	87
ข. 1	
ผลการวัดขนาดอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์โดยใช้พอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนในการควบคุมขนาดอนุภาค (P - 100P60s).....	128
ข. 2	
ผลการวัดขนาดอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์โดยใช้พอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนในการควบคุมขนาดอนุภาค (P - 100P180s).....	129
ข. 3	
ผลการวัดขนาดอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์โดยใช้กรดซิตริกในการควบคุมขนาดอนุภาค (C - 100P60s).....	130
ข. 4	
ผลการวัดขนาดอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์โดยใช้กรดซิตริกในการควบคุมขนาดอนุภาค (C - 100P180s).....	131
ข. 5	
ผลการวัดขนาดอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์โดยใช้ร่วมกันระหว่างพอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนและกรดซิตริกในการควบคุมขนาดอนุภาค (PC - 100P60s).....	132
ข. 6	
ผลการวัดขนาดอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์โดยใช้ร่วมกันระหว่างพอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนและกรดซิตริกในการควบคุมขนาดอนุภาค (PC - 100P60s).....	133

## สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า	
2 - 1	อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	6
2 - 2	การเปรียบเทียบโครงสร้างของซิงค์ซัลไฟด์.....	8
2 - 3	หลักการทำงานของไมโครเวฟ.....	10
2 - 4	เซลล์แสงอาทิตย์.....	12
2 - 5	โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง.....	13
2 - 6	แถบช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ.....	15
2 - 7	การยึดเกาะกันระหว่างสารกึ่งตัวนำและสีย้อม (N 719).....	16
2 - 8	สูตรโครงสร้างเคมีและสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมมาตรฐาน (N 719)...	16
2 - 9	หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง.....	18
2 - 10	เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางแบบแรปิดคอนเวกทีฟเดโพสิชัน.....	20
2 - 11	เทคนิคการเคลือบฟิล์มแบบดอกเตอร์เบลด.....	21
2 - 12	การกระเจิงและการแทรกสอดของรังสีเอกซ์ที่จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	22
2 - 13	หลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....	24
2 - 14	ทิศทางของแสงที่ทะลุผ่านสาร.....	25
2 - 15	เส้นทางเดินของแสงเมื่อวัดฟิล์มแบบร้อยละการสะท้อน.....	27
2 - 16	ปรากฏการณ์การกระตุ้นอิเล็กตรอนหรือการเร้าอิเล็กตรอนด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง.....	28
2 - 17	สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ชนิดลำแสงเดี่ยว.....	31
2 - 18	สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ชนิดลำแสงคู่.....	31
2 - 19	กราฟฟิลล์แฟกเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้การส่องสว่าง.....	35
2 - 20	วงจรการทดสอบค่าทางไฟฟ้า.....	37
2 - 21	วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์.....	38
2 - 22	ผลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนั้ต่อค่าฟิลล์แฟกเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	39
2 - 23	สเปกตรัมของแสงมาตรฐานที่องค์กรเอเอสทีเฝ้ากำหนด.....	40

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3 - 1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์โดยใช้พอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนในการควบคุมขนาดอนุภาค.....	53
3 - 2 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์โดยใช้กรดซิตริกในการควบคุมขนาดอนุภาค.....	54
3 - 3 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์โดยใช้ร่วมกันระหว่างพอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนและกรดซิตริกในการควบคุมขนาดอนุภาค.....	55
3 - 4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน.....	56
3 - 5 ภาชนะใส่สารตัวอย่างสำหรับเทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	57
3 - 6 ตำแหน่งที่ 1 ชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน.....	58
3 - 7 ตำแหน่งที่ 2 ชั้นสารกึ่งตัวนำ.....	59
3 - 8 ตำแหน่งที่ 3 ชั้นสีย้อมไวแสง.....	60
3 - 9 เซลล์อ้างอิง.....	60
3 - 10 เทคนิคการวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเทคนิคยูวี - วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์.....	64
3 - 11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	65
4 - 1 ลักษณะอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่สังเคราะห์ภายใต้รังสีไมโครเวฟที่เปอร์เซ็นต์การปล่อยกำลังของรังสีไมโครเวฟ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่กำลังไฟฟ้า 700 วัตต์ ระยะเวลา 60 วินาที และ 180 วินาทีโดยใช้พอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดน (P) กรดซิตริก (C) และใช้ร่วมกันระหว่างพอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนและกรดซิตริก (PC) ในการควบคุมขนาดอนุภาค.....	66
4 - 2 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของอนุภาคนาโนไททานเนียมไดออกไซด์และอนุภาคนาโนซิงค์ซัลไฟด์ แคดเมียมซัลไฟด์ และซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์ภายใต้สังเคราะห์ภายใต้รังสีไมโครเวฟที่เปอร์เซ็นต์การปล่อยกำลังของรังสีไมโครเวฟ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่กำลังไฟฟ้า 700 วัตต์ ระยะเวลา 180 วินาทีโดยใช้พอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนในการควบคุมขนาดอนุภาค.....	62

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4 - 3 การเปรียบเทียบสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของอนุภาคนาโนซิงค์ซัลไฟด์ แคลเดเมียซัลไฟด์ และซิงค์แคลเดเมียซัลไฟด์ ที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ของศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (นาโนเทคฯ) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.).....	71
4 - 4 กราฟเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $J - V$ curve) แสดงเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงตำแหน่งที่ 1 ที่เคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคลเดเมียซัลไฟด์ สำหรับเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน.....	65
4 - 5 กราฟเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $J - V$ curve) แสดงเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงตำแหน่งที่ 2.1 ที่เคลือบสารผสมระหว่างอนุภาคนาโนซิงค์แคลเดเมียซัลไฟด์โดยการหยดลงบนชั้นของไททาเนียมไดออกไซด์สำหรับเป็นชั้นสารกึ่งตัวนำ.....	75
4 - 6 กราฟเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $J - V$ curve) แสดงเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงตำแหน่งที่ 2.2 ที่เคลือบสารผสมระหว่างไททาเนียมไดออกไซด์และซิงค์แคลเดเมียซัลไฟด์ที่มีลักษณะเป็นผงสำหรับเป็นชั้นสารกึ่งตัวนำ.....	77
4 - 7 กราฟเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $J - V$ curve) แสดงเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงตำแหน่งที่ 3 ที่เคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคลเดเมียซัลไฟด์โดยการหยดลงด้านบนชั้นของสีย้อมไวแสงสำหรับเป็นชั้นสารไวแสง.....	79
4 - 8 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงของสารด้วยเทคนิคยูวี - วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ของไททาเนียมออกไซด์ ซิงค์แคลเดเมียซัลไฟด์ และไททาเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคลเดเมียซัลไฟด์ อัตราส่วน 75:25 50:50 และ 25:75 ที่ช่วงความยาวคลื่น 200 - 450 นาโนเมตร.....	80

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4 - 9 ตัวอย่างการหาจุดตัดของความยาวคลื่นการส่องผ่านแสงเพื่อหาค่าแถบช่องว่างพลังงานของสาร.....	81
4 - 10 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางชั้นส่งผ่านอิเล็กทรอนิกส์ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	83
5 - 1 กราฟค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่มีเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพสูงสุดของแต่ละตำแหน่งการเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่แตกต่างกัน.....	93
5 - 2 กราฟค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่มีเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพสูงสุดของแต่ละตำแหน่งการเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่แตกต่างกัน.....	94
5 - 3 กราฟค่าฟิลล์แฟกเตอร์ ( $FF$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่มีเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพสูงสุดของแต่ละตำแหน่งการเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่แตกต่างกัน.....	95
5 - 4 กราฟเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $J - V$ curve) แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่มีเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพสูงสุดของแต่ละตำแหน่งการเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่แตกต่างกัน.....	96

## อักษรย่อ

A	Absorbance
AM	Air mass
C	Citric acid
°C	Degree celsius
CB	Conduction band
Cd <sup>2+</sup>	Cadmium II ion
CdS	Cadmium sulfide
Cell ref.	Cell reference
CIGS <sub>2</sub>	Copper indium gallium diselenide
DC	Direct current
DSSC	Dye sensitized solar cell
EDS	Energy dispersive spectrometry
EDX	Energy dispersive x - ray spectrometer
EELS	Electron energy loss spectrometry
Eff	Efficiency
<i>E<sub>g</sub></i>	Energy band gab
ETL	Electron transport layer
eV	Electron voltage
FESEM	Field emission scanning electron microscope
<i>FF</i>	Fill factor
FTO	Fluorine dope thin oxide
HTM	Hole transport material
HOMO	Highest occupied molecular orbital
ITO	Indium dope thin oxide
<i>J</i>	Current density
<i>J<sub>sc</sub></i>	Short circuit current
LUMO	Lowest unoccupied molecular orbital



## อักษรย่อ (ต่อ)

$\text{mA/cm}^2$	Milliampere per square centimeter
mg	Milligram
mL	Milliliter
nm	Nanometer ( $10^{-9}$ meter)
OPV	Organic photovoltaic cell
PVP	Polyvinylpyrrolidone
PC	Polyvinylpyrrolidone and citric acid
S	Sulfur
SEM	Scanning electron microscope
SDSSC	Solid state dye sensitized solar cell
TCO	Transparent conducting oxide
TEM	Transmission electron microscope
$\text{TiO}_x$	Titanium oxide
$\text{TiO}_2$	Titanium dioxide
$\mu\text{L}$	Microliter ( $10^{-6}$ Litter)
$\mu\text{m}$	Micrometer ( $10^{-6}$ meter)
V	Voltage
$V_{oc}$	Open circuit voltage
XRD	X - ray diffraction
$\text{Zn}^{2+}$	Zinc II ion
$\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{S}$	Zinc cadmium sulfide
ZnS	Zinc sulfide

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในยุคโลกาภิวัตน์พลังงานเป็นปัญหาที่สำคัญและส่งผลกระทบต่อ การพัฒนาของประเทศไทยเป็นอย่างมาก ช่วงกลางศตวรรษที่ 20 จนถึงปัจจุบัน พลังงานหลักที่ใช้ ในกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ล้วนมาจากน้ำมัน ก๊าซธรรมชาติและถ่านหินทั้งนั้น แต่เนื่องจากน้ำมัน ถือว่าเป็นทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดและอาจจะหมดไปในอนาคต นักเศรษฐศาสตร์ได้ทำการ พยากรณ์ไว้ว่าอีกประมาณ 50 ปี น้ำมันจะเป็นพลังงานที่มีราคาแพง ไม่คุ้มค่าต่อการนำมาเป็น พลังงานหลักในการผลิตกระแสไฟฟ้าและสินค้าที่มีความจำเป็นสำหรับมนุษย์ ทำให้ต้องหาแหล่ง พลังงานใหม่ที่มีราคาถูกเพื่อทดแทนวัตถุดิบต่าง ๆ ที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งนับวันพลังงานเหล่านี้มีแต่จะลดปริมาณเหลือน้อยลงและอาจจะต้องหมดสิ้นไป นอกจากนี้ราคา ของวัตถุดิบที่เป็นเชื้อเพลิงดังกล่าวยังมีความผันผวนและมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นตามสถานการณ์ทาง เศรษฐกิจและการเมืองของโลก ถึงแม้ว่าจะมีการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังน้ำเพื่อทดแทนการผลิต กระแสไฟฟ้าด้วยน้ำมันซึ่งเป็นพลังงานหมุนเวียนก็ตาม แต่ยังคงมีการผลิตที่น้อยมาก รวมทั้งแหล่ง น้ำที่สามารถจะพัฒนาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้านั้นยังคงมีน้อยและต้องประสบกับปัญหาการกีดกัน ขององค์กรกลุ่มต่าง ๆ อีกด้วย ดังนั้นจึงเกิดความพยายามที่จะคิดค้นแหล่งพลังงานใหม่ ๆ ที่ประหยัดและไม่มีวันหมดสิ้น เช่น พลังงานน้ำขึ้น - น้ำลง พลังงานคลื่น (ทะเล) พลังงานความร้อน จากมหาสมุทร พลังงานลม พลังงานความร้อนใต้พิภพ รวมถึงพลังงานแสงอาทิตย์ ฯลฯ เพื่อนำมาเป็นพลังงานทดแทนวัตถุดิบเชื้อเพลิงต่าง ๆ ที่ผลิตเป็นกระแสไฟฟ้า (การไฟฟ้าฝ่ายผลิต แห่งประเทศไทย, 2554)

พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar energy) เป็นแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วสามารถนำกลับมา ใช้ใหม่ได้เรียกว่า พลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) เป็นพลังงานที่สะอาด ใช้แล้วไม่มีวัน หมดสิ้นและไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบลงสู่พื้น โลกบนพื้นที่ 1 ตารางเมตร โดยเฉลี่ยจะมีพลังงานประมาณ 4 - 5 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อวัน หมายความว่า ในหนึ่งวันบนพื้นที่เพียง 1 ตารางเมตร จะมีพลังงานแสงอาทิตย์ ตกกระทบถึง 1,000 วัตต์ เป็น เวลานาน 4 - 5 ชั่วโมง สามารถแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ดังกล่าวมาเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อให้ สามารถนำมาใช้งานได้ (มณฑาลินี หอมหวาน, 2555)

เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ (หรือแสงจากหลอดแสงสว่าง) ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current) โดยพลังงานที่เกิดจากดวงอาทิตย์เป็นผลมาจากปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ฟิวชัน (Thermonuclear fusion) ซึ่งอยู่ห่างจากโลกเฉลี่ย  $1.496 \times 10^8$  กิโลเมตร ดวงอาทิตย์จะปลดปล่อยกำลังงาน  $3.85 \times 10^{23}$  กิโลวัตต์ และบรรยากาศบริเวณผิวโลกได้รับ  $1.725 \times 10^{18}$  กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง (ยุทธ อัครมาศ, 2530) เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นมานั้นจะมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานเท่ากับร้อยละ 15 หมายความว่า เซลล์แสงอาทิตย์ที่พื้นที่ 1 ตารางเมตร มีพลังงานแสงอาทิตย์ 1,000 วัตต์ ซึ่งสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 150 วัตต์ หรือเฉลี่ย 600 - 700 วัตต์ต่อชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อวัน (วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี, 2557)

เซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันมีมากมายหลายชนิด เช่น เซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอน (Silicon solar cell) เซลล์แสงอาทิตย์แบบสารอินทรีย์ (Organic photovoltaic cell; OPV) และเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำการศึกษาในครั้งนี่คือ เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง (Dye - sensitized solar cell) ซึ่งเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถผลิตได้ง่าย มีราคาต้นทุนการผลิตที่ต่ำและสามารถเตรียมเซลล์ได้เป็นจำนวนมาก

โครงสร้างโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงประกอบด้วย ขั้วนำไฟฟ้า (Electrode) สองขั้วคือ ขั้วโฟโตอิเล็กโทโรด (Photoelectrode) และขั้วเคาน์เตอร์อิเล็กโทโรด (Counter electrode) ขั้วโฟโตอิเล็กโทโรดจะประกอบด้วยกระจกนำไฟฟ้า (Transparent conducting oxide glass; TCO glass) ที่มีฟิล์มบางเคลือบอยู่เพื่อเป็นตัวช่วยลำเลียงอิเล็กตรอนให้กับเซลล์ (Electron transporting layer; ETL) มีฟิล์มของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เคลือบอยู่ด้านบน มีสีย้อม (Dye) เกาะอยู่บนอนุภาคของสารกึ่งตัวนำ ส่วนขั้วเคาน์เตอร์อิเล็กโทโรดจะประกอบด้วยกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox catalyst) และมีสารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) กั้นอยู่ตรงกลางระหว่างขั้วนำไฟฟ้าทั้งสองขั้ว

หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจะเริ่มจากแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบสู่เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ อิเล็กตรอนในระดับพลังงานออร์บิทัลสูงสุดที่มีอิเล็กตรอนของสีย้อมอยู่ (Highest occupied molecular orbital; HOMO) จากนั้นอิเล็กตรอนในระดับพลังงานนี้จะถูกกระตุ้นไปสู่ระดับพลังงานออร์บิทัลต่ำสุดที่ไม่มีอิเล็กตรอนอยู่ (Lower occupied molecular orbital; LOMO) ที่ระดับพลังงานนี้จะเกิดการฉีดอิเล็กตรอน (Electron injection) ไปยังแถบนำไฟฟ้า (Conduction band) ของสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้านี้จะไหลผ่านกระจกนำไฟฟ้าเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าไปทำงานให้กับวงจรภายนอก จากนั้นจึงวนกลับมาที่ขั้วเคาน์เตอร์

อิเล็กโตรดแล้วเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ภายในสารละลายอิเล็กโตรไลต์และกลับสู่ระดับพลังงานออร์บิทัลสูงสุดที่มีอิเล็กตรอนของสีย้อมอยู่จนครบวงจร

เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ณ ปัจจุบันนี้มีการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide;  $\text{TiO}_2$ ) เป็นขั้วโฟโตอิเล็กโตรด ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงถึง 12 เปอร์เซ็นต์ (Ito et al., 2008) อย่างไรก็ตามการพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้โดยใช้สารกึ่งตัวนำชนิดอื่นยังมีอยู่มาก อาทิเช่น แคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium sulfide; CdS) ก็เป็นสารกึ่งตัวนำในหลายชนิดนั้นที่นิยมนำมาใช้ในการพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง เนื่องจากมีค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Energy band gap) เท่ากับ 3.00 อิเล็กตรอนโวลต์ (Electron volte; eV) Dasa et al. (2010) ซึ่งใกล้เคียงกับไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีค่าแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.20 อิเล็กตรอนโวลต์ (Dette et al., 2014) แต่เมื่อนำแคดเมียมซัลไฟด์มาทดสอบประสิทธิภาพกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงพบว่า มีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่า (วัลย์ชัยพรมโนภาส, 2555) ดังนั้นการแก้ไขเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ที่มีแคดเมียมซัลไฟด์เป็นองค์ประกอบของขั้วโฟโตอิเล็กโตรดจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ

การรวมประจุ (Charge recombination) ของอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำก็เป็นปัญหาหนึ่งที่สำคัญสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ใช้แคดเมียมซัลไฟด์เป็นสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานออร์บิทัลต่ำสุดที่ไม่มีอิเล็กตรอนอยู่เกิดการรวมตัวกันและกลับลงมาที่ระดับพลังงานออร์บิทัลสูงสุดที่มีอิเล็กตรอนของสีย้อมอยู่หรือเกิดการรวมตัวกับสารละลายอิเล็กโตรไลต์โดยตรง อิเล็กตรอนที่อยู่ภายในเซลล์เหล่านี้ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ จึงทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพที่ต่ำ วิธีการที่จะช่วยลดปัญหาการรวมตัวของประจุคือ การสร้างชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (ETL) ขึ้นมาที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นผิวของกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (Fluorine doped tin oxide; FTO) และสารกึ่งตัวนำ แล้วนำมาเชื่อมด้วยสารไวแสงและเชื่อมเซลล์ด้วยสารอิเล็กโตรไลต์ ในงานวิจัยนี้ได้มีการสร้างชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนโดยการทำอัลลอยระหว่างสารแคดเมียมซัลไฟด์ และซิงค์ซัลไฟด์ (Zinc sulfide; ZnS) ซึ่งมีแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.88 อิเล็กตรอนโวลต์ (Borah & Sarma, 2008) เกิดเป็นสารชนิดใหม่คือซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ (Zinc cadmium sulfide;  $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{S}$ ) ทำให้ค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Energy band gap) ของสารมีค่าเพิ่มขึ้น (Ahandani & Yangjeh, 2010) สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับขั้วโฟโตอิเล็กโตรดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ

จากรายงานที่ผ่านมาพบว่ามีการศึกษาผลของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์เพื่อใช้สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบคอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมไคซีลีไนด์ (Copper indium gallium selenide; CIGS<sub>2</sub>) Kumar (2005) เป็นเซลล์ที่ประกอบด้วยชั้นฟิล์มบางที่แตกต่างกัน 5 ชั้น ได้แก่ อะลูมินัม/ซิงค์ออกไซด์/แคดเมียมซัลไฟด์/คอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมไคซีลีไนด์/โมลิบดีนัม (Al/ZnO/CdS/CIGS<sub>2</sub>/Mo) ซึ่งให้ประสิทธิภาพที่สูงถึง 16 เปอร์เซ็นต์ (วิรัชฐา ทองขำ, 2554) แต่จากรายงานที่ผ่านมาไม่พบการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงโดยมีการเปรียบเทียบตำแหน่งการเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่แตกต่างกัน จึงนำมาสู่การศึกษาวิจัยในครั้งนี้เพื่อพัฒนาให้เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นกระแสไฟฟ้าและสามารถนำมาเป็นพลังงานทดแทนการใช้วัตถุดิบเชื้อเพลิงต่าง ๆ ที่นำมาผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งอาจหมดสิ้นไปในอนาคตข้างหน้าต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาหลักการและวิธีการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง
2. เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงด้วยอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ที่สังเคราะห์ขึ้น โดยเปรียบเทียบตำแหน่งการเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่แตกต่างกัน
3. เพื่อทดสอบการตอบสนองและวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่สร้างขึ้น

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. ทราบถึงหลักการและวิธีการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง
2. ทราบถึงการตอบสนองและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่สร้างขึ้น
3. สามารถนำเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่สร้างขึ้นและมีประสิทธิภาพมาทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในอนาคตได้
4. เซลล์แสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนที่สะอาดชนิดหนึ่ง สามารถช่วยลดมลพิษที่เกิดขึ้นจากการใช้เชื้อเพลิง เช่น น้ำมัน ถ่านหิน ฯลฯ ในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้
5. ผลของการวิจัยอาจเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับหน่วยงาน นักวิชาการหรือนักศึกษาที่สนใจศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงและเพื่อประกอบการศึกษาค้นคว้าและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่อไป

#### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

สังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ภายใต้รังสีไมโครเวฟที่เปอร์เซ็นต์การปล่อยกำลังของรังสีไมโครเวฟ (output) 100 เปอร์เซ็นต์ ที่กำลังไฟฟ้า 700 วัตต์ ระยะเวลา 60 วินาที และ 180 วินาที โดยใช้สารควบคุมขนาดอนุภาคคือ พอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดน (Polyvinylpyrrolidone; PVP) กรดซิตริก (Citric acid) และใช้ร่วมกันระหว่างพอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนและกรดซิตริก อนุภาคที่สังเคราะห์ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคและองค์ประกอบธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope; TEM) และเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยรังสีเอกซ์ (Energy dispersive x - ray spectrometry; EDX) วัดขนาดอนุภาค (Particle size measurement) ด้วยโปรแกรมอิมเมจ วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X - ray diffraction; XRD) และวิเคราะห์สมบัติทางแสงเพื่อหาค่าแถบช่องว่างพลังงานของสาร (Energy band gap;  $E_g$ ) ด้วยเทคนิคยูวี - วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV - Visible spectrophotometer) เพื่อนำอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมมาใช้ในขั้วโพลีเอทิลีนทรานซอกรีตของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพ

ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง โดยเปรียบเทียบตำแหน่งการเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ที่แตกต่างกันลงด้านบนกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบผิวกระจกด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) จำนวน 3 ตำแหน่ง ได้แก่

1. ตำแหน่งที่เคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่มีลักษณะเป็นฟิล์มบาง (Thin film) ลงด้านบนผิวของกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบผิวกระจกด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีนสำหรับทำหน้าที่เป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน
2. ตำแหน่งที่เคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์โดยหยดลงด้านบนชั้นของไททาเนียมไดออกไซด์ และนำมาผสมกับไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นผง สำหรับทำหน้าที่เป็นชั้นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)
3. ตำแหน่งที่เคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์โดยหยดลงด้านบนชั้นของสีย้อมไวแสง (N 719) สำหรับทำหน้าที่เป็นสารไวแสง

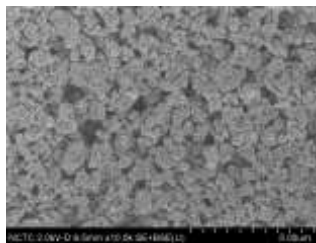
ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่สร้างขึ้นสามารถวัดได้ด้วยเครื่องเซลล์แสงอาทิตย์จำลอง (Solar simulator) ภายใต้ค่าของตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้าต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรมืด ( $V_{oc}$ ) มีหน่วยเป็นโวลต์ (V) ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) มีหน่วยเป็นมิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ ) ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ (FF) และค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพ (Eff) มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (%)

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 อนุภาคนาโน (Nanoparticles)

อนุภาคนาโนจัดเป็นอนุภาคระดับกล้องจุลทรรศน์ ไม่สามารถมองเห็นอนุภาคนั้น ๆ ได้โดยตรงด้วยตาเปล่า เพราะอนุภาคนาโนจะต้องมีขนาดในระดับนาโนเมตร (Nanometers) เท่านั้น โดยทั่วไปอนุภาคนาโนถูกสร้างมาจากวัตถุกึ่งตัวนำโดยอาจจะนำมาติดด้วยควอนตัมดอท (Quantum dot) ซึ่งหมายถึงผลึกของแข็งของสารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยขนาดของอะตอมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางราว 10 - 20 นาโนเมตร ประมาณ 10 - 50 อะตอม รวมทั้งมีอิเล็กตรอน (Electron) เป็นองค์ประกอบตั้งแต่ 100 - 1,000 อิเล็กตรอน อนุภาคนาโนเป็นอนุภาคที่สำคัญยิ่งในวงการวิทยาศาสตร์เนื่องจากเป็นสะพานเชื่อมของวัตถุ อะตอมและโครงสร้างระดับโมเลกุลได้เป็นอย่างดี วัตถุที่มีขนาดใหญ่จะมีคุณสมบัติที่ตามขนาดของวัตถุนั้น แต่ในวัตถุระดับนาโนจะมีคุณสมบัติอื่นเข้ามาาร่วมด้วย ได้แก่ ควอนตัมคอนฟิเมนต์ (Quantum confinement) และเซอร์เฟอพลาสมอนเรโซแนนซ์ (Surface plasmon resonance) เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติของวัตถุจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีขนาดเล็กลงในระดับนาโน โดยอนุภาคนาโนจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอะตอมกับพื้นที่ผิวของอนุภาคขนาดเล็ก ทั้งนี้ปริมาณของอะตอมที่พื้นที่ผิวจะมีนัยสำคัญกับขนาดของอนุภาคในระดับนาโน นอกจากนี้ยังสามารถอยู่ในรูปของสารแขวนลอยได้เช่นกัน เนื่องจากแรงระหว่างพื้นที่ผิวของอนุภาคนาโนในตัวทำละลายมีมากพอที่จะทำให้อนุภาคนาโนนี้ลอยตัวอยู่ได้ อนุภาคนาโนบางชนิดมีขนาดเล็กมากทำให้เกิดการสะท้อนของแสงที่เราสามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าได้ เช่น อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ดังภาพที่ 2 - 1 ซึ่งปรากฏให้เห็นเป็นสีขาว นอกจากนี้อนุภาคนาโนยังเกี่ยวข้องไปถึงกลุ่มเล็ก ๆ ของอะตอมหรือโมเลกุลอีกด้วย (โคโรที, 2549)



ภาพที่ 2 - 1 อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FESEM)

## 2.2 สารผสมซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ (Zinc cadmium sulfide; $Zn_{1-x}Cd_xS$ )

ซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ เป็นสารที่มีการผสมกันระหว่างซิงค์ซัลไฟด์ ( $ZnS$ ) และแคดเมียมซัลไฟด์ ( $CdS$ ) มีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Energy band gap) ของซิงค์ซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟด์ ให้มีค่าเพิ่มขึ้น โดยซิงค์ซัลไฟด์มีค่าแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.88 อิเล็กตรอน โวลต์ (Borah & Sarma, 2008) และแคดเมียมซัลไฟด์มีค่าแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.00 อิเล็กตรอน โวลต์ (Dasa et al., 2010) เมื่อนำสารทั้ง 2 ชนิดนี้มาผสมกันจะทำให้ค่าแถบช่องว่างพลังงานสูงอยู่ในช่วง 3.00 - 3.88 อิเล็กตรอน โวลต์ สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสียอมไวแสงในชั้นโพโตอิเล็กโทโรดได้ เนื่องจากมีค่าแถบช่องว่างการนำไฟฟ้าใกล้เคียงกับค่าแถบช่องว่างการนำไฟฟ้าของไททาเนียมไดออกไซด์ ( $TiO_2$ ) ที่เป็นสารกึ่งตัวนำเมื่อนำมาวัดเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสียอมไวแสงทำให้ค่าตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้าต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (Open circuit voltage;  $V_{oc}$ ) ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short circuit current;  $J_{sc}$ ) ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ (Fill factor;  $FF$ ) และค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพ (Efficiency;  $Eff$ ) มีค่าที่เพิ่มสูงขึ้น

## 2.3 โครงสร้างและคุณสมบัติเชิงอนุภาคของซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ( $Zn_{1-x}Cd_xS$ )

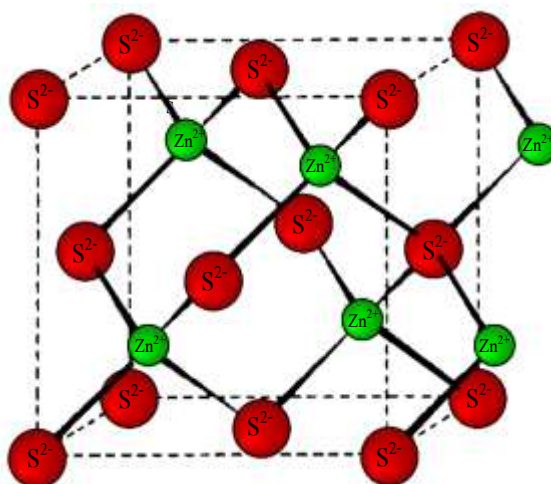
โครงสร้างที่น่าจะเป็นของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟด์ ( $CdS$ ) มีลักษณะเช่นเดียวกับโครงสร้างของฟลูออไรด์ (Fluoride) แต่การบรรจุไอออนของซิงค์ (Zinc;  $Zn^{2+}$ ) มีเพียงครึ่งหนึ่งของช่อง โครงสร้างปิรามิดฐานสามเหลี่ยม (Tetrahedron) ที่ประกอบด้วยด้าน (Face) สามเหลี่ยม 4 ด้าน มุม (Vertice) 4 มุม ขอบ (Edge) 6 ขอบ ที่อยู่รอบไอออนของซัลไฟด์ (Sulfide; S) ดังภาพที่ 2 - 2 แต่ละไอออนของซิงค์ ( $Zn^{2+}$ ) จะสัมผัสกับซัลไฟด์ (S) ไอออน 4 ไอออน และซัลไฟด์ไอออนจะสัมผัสกับซิงค์ไอออน 4 ไอออน ทำให้อัตราส่วนของเลขโคออร์ดิเนชัน (Coordination number) เท่ากับ 4 ต่อ 4 ทั้งไอออนของซิงค์และซัลไฟด์ จะมีการจัดเรียงตัวเพื่อล้อมรอบแบบทรงสี่หน้า โครงสร้างแบบนี้เรียกว่า โครงสร้างซิงค์เบลนด์ (Zinc blende structure)

ซิงค์ซัลไฟด์ ( $ZnS$ ) ยังมีโครงสร้างอีกแบบเรียกว่า โครงสร้างเวิร์ตไซต์ (Wurtzite structure) โครงสร้างทั้งสองแบบนี้มีส่วนที่คล้ายคลึงกันคือ แต่ละไอออนของซิงค์ ( $Zn^{2+}$ ) และซัลไฟด์ (S) ต่างล้อมรอบด้วยไอออนชนิดที่ตรงข้ามกันสี่ไอออนของลักษณะทรงสี่หน้าและมีอัตราส่วนเลขโคออร์ดิเนชันเป็น 4 ต่อ 4 เช่นเดียวกัน ดังภาพที่ 2 - 2 และโมเลกุลของสารประกอบเหล่านี้มีลักษณะเป็นแบบ AB สิ่งที่แตกต่างกันของโครงสร้างทั้งสองแบบนี้คือ โครงสร้างเวิร์ตไซต์จะมีซัลไฟด์ไอออนอยู่ตามตำแหน่งของโครงสร้างการบรรจุชิดสุดรูปทรงแปดหน้า (Hexagonal

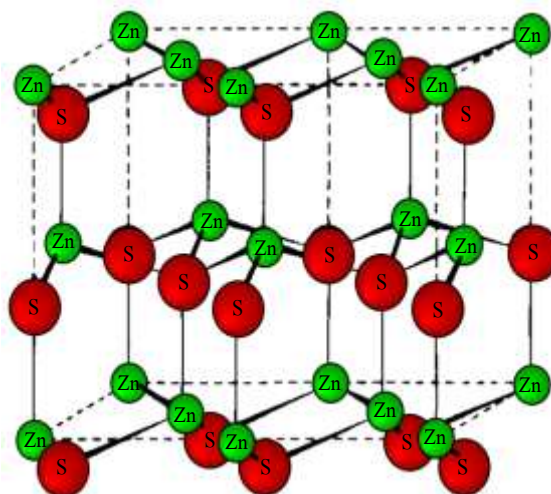


closest - packed structure; hcp) ส่วนโครงสร้างซิงค์เบลนด์จะมีซัลไฟด์ไอออนอยู่ตามตำแหน่งของโครงสร้างการบรรจุชิดสุดรูปลูกบาศก์ (Face centered cubic structure; fcc)

ดังนั้นโครงสร้างของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ จึงมีความน่าจะเป็นที่คล้ายคลึงกับโครงสร้างของซิงค์ซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟด์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าปริมาณของโลหะชนิดใดมีปริมาณมากกว่ากันตามสัดส่วนองค์ประกอบของโครงสร้างนั้น



(A) โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์



(B) โครงสร้างแบบเวิร์ตไซต์

ภาพที่ 2 - 2 การเปรียบเทียบโครงสร้างของซิงค์ซัลไฟด์ (Barron & Smith, 2010)

## 2.4 คุณสมบัติของซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) และแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS)

ตารางที่ 2 - 1 คุณสมบัติของซิงค์ซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟด์

คุณสมบัติ	ซิงค์ซัลไฟด์	แคดเมียมซัลไฟด์
1. แลตทิซพารามิเตอร์ของโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน	0.541 นาโนเมตร	0.582 นาโนเมตร
2. ระยะห่างระหว่างอะตอมที่อยู่ใกล้กันที่สุดของโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน	0.234 นาโนเมตร	0.252 นาโนเมตร
3. ความหนาแน่นของโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน	4.11 กรัม ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร	4.87 กรัม ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
4. แลตทิซพารามิเตอร์ของโครงสร้างแบบเวิร์ตไซต์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลวิน	0.3811 นาโนเมตร	0.4135 นาโนเมตร
5. ระยะห่างระหว่างอะตอมที่อยู่ใกล้กันที่สุดของโครงสร้างแบบเวิร์ตไซต์ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน	0.6234 นาโนเมตร	0.6749 นาโนเมตร
6. ความหนาแน่นของโครงสร้างแบบเวิร์ตไซต์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลวิน	3.98 กรัม ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร	4.82 กรัม ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
7. โครงสร้างที่มีความเสถียรที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน	ซิงค์เบลนด์และ เวิร์ตไซต์	เวิร์ตไซต์
8. จุดหลอมเหลว	1850 องศาเซลเซียส	1750 องศาเซลเซียส
9. แถบช่องว่างพลังงาน	3.68 อิเล็กตรอน โวลต์	2.5 อิเล็กตรอน โวลต์

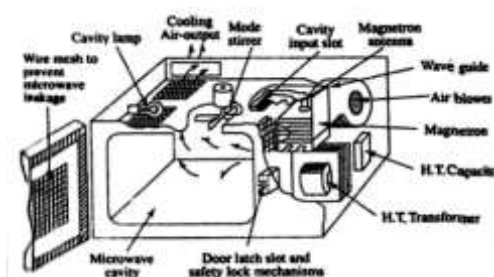
(Palmer, 2008)

ตารางที่ 2 - 1 แสดงคุณสมบัติของซิงค์ซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟด์ ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่าง ๆ ได้หลากหลาย อาทิเช่น เซลล์แสงอาทิตย์แบบคอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมไดซัลไฟด์ เซลล์แสงอาทิตย์แบบสารอินทรีย์และเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง เป็นต้น

## 2.5 การสังเคราะห์สารโดยวิธีระเหยด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave)

ไมโครเวฟ เป็นอุปกรณ์เครื่องครัวชนิดหนึ่งที่ทำให้ความร้อนแก่อาหารด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยปกติจะใช้ที่ช่วงความถี่ 2.45 จิกะเฮิร์ตซ์ (GHz) ผ่านเข้าไปในอาหาร โมเลกุลของน้ำ ไขมัน และน้ำตาลที่อยู่ในอาหารจะดูดซับพลังงานของคลื่นที่ผ่านเข้าไปและเกิดเป็นความร้อนขึ้นในกระบวนการที่เรียกว่า การเกิดความร้อนในสารไดอิเล็กตริก (Dielectric heating) เนื่องจากโมเลกุลส่วนใหญ่เป็นโมเลกุลที่มีขั้วไฟฟ้าคือ มีประจุบวก และประจุลบที่ขั้วตรงกันข้าม เมื่อคลื่นไมโครเวฟซึ่งเป็นสนามไฟฟ้าผ่านเข้าไปโมเลกุลเหล่านี้ก็จะถูกเหนี่ยวนำและหมุนขั้วเพื่อปรับเรียงตัวตามสนามไฟฟ้าของคลื่น คลื่นนี้จะเป็นสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงสลับกันส่งผลให้โมเลกุลเหล่านี้หมุนกลับไปมาทำให้เกิดความร้อนขึ้น การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟนี้จะมีประสิทธิภาพการเกิดความร้อนสูงสุดในการให้ความร้อนแก่น้ำและประสิทธิภาพต่ำเมื่อให้ความร้อนแก่ ไขมัน น้ำตาลและน้ำแข็ง ดังนั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการสังเคราะห์สารขนาดอนุภาคนาโนได้ เนื่องจากสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์มีเป็นตัวทำละลายน้ำ ซึ่งเหมาะสมต่อการทำงานที่มีประสิทธิภาพของไมโครเวฟ ทำให้การสังเคราะห์สารอนุภาคนาโนด้วยไมโครเวฟเป็นวิธีที่สะดวกและไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม

ไมโครเวฟ ไม่สามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดเป็นคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งไมโครเวฟที่พบโดยทั่วไปอาจจะกินไฟ 1,100 วัตต์ แต่ให้คลื่นไมโครเวฟที่มีกำลังงานเพียง 700 วัตต์ ส่วนอีก 400 วัตต์ ที่เหลือจะสูญเสียไปกับอุปกรณ์ภายในเครื่องในรูปของความร้อน โดยจุดที่มีการสูญเสียมากคือ ในท่อแมกนีตรอน ดังภาพที่ 2 - 3 ซึ่งความร้อนที่สูญเสียนี้ไม่ได้ส่งผ่านให้กับอาหารหรือสารที่สังเคราะห์ แต่จะถูกถ่ายเทออกทางช่องระบายความร้อนสู่ภายนอก ซึ่งพลังงานของคลื่นไมโครเวฟที่ถูกสร้างขึ้นจะสูญเสียไปในรูปความร้อนในอาหารที่อยู่ในช่องอบอาหาร ถ้าหากปริมาณอาหารสำหรับดูดซับคลื่นในช่องอบอาหารนั้นมีน้อยคลื่นไมโครเวฟจะถูกสะท้อนกลับสู่แมกนีตรอนและกลายเป็นความร้อนในอุปกรณ์ส่วนประกอบของแมกนีตรอนซึ่งทำให้เตาไมโครเวฟนั้นร้อนและอาจเสียหายได้ (วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี, 2558)



ภาพที่ 2 - 3 หลักการทำงานของไมโครเวฟ (Jain & Singla, 2011)

## 2.6 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell)

เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เมื่อได้รับพลังงานแสงจากดวงอาทิตย์หรือแสงจากหลอดไฟ เซลล์แสงอาทิตย์จะเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current; DC) ได้ ถือว่าพลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากเซลล์แสงอาทิตย์นี้เป็นพลังงานทดแทนชนิดหนึ่ง (Renewable energy) ซึ่งเป็นพลังงานที่สะอาดและไม่สร้างมลภาวะใด ๆ ให้กับสิ่งแวดล้อมในขณะใช้งาน ดังภาพที่ 2 - 4

เซลล์แสงอาทิตย์สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ ตามประเภทของสารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้เป็นตัวดูดกลืนแสงและส่งผ่านประจุ ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากสารอนินทรีย์ (Inorganic photovoltaic cell; IPV) และเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากสารอินทรีย์ (Organic photovoltaic cell; OPV) สามารถแบ่งยุคการพัฒนาของเซลล์แสงอาทิตย์ออกเป็น 3 ยุค ได้แก่

**ยุคที่หนึ่ง** ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์จากสารกึ่งตัวนำซิลิกอนแบบผลึกซึ่งให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูงกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ จึงเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมใช้ในท้องตลาดมากที่สุดแต่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ต้องสร้างในห้องที่สะอาดและมีกระบวนการผลิตที่ซับซ้อน ดังนั้นจึงมีราคาแพง

**ยุคที่สอง** ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์จากสารกึ่งตัวนำซิลิกอนที่ไม่เป็นผลึก (โครงสร้างอสัณฐาน) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่ใช้กระบวนการผลิตที่ง่ายขึ้น สร้างบนวัสดุโค้งงอและยืดหยุ่นได้แต่ประสิทธิภาพก็ลดลง นอกจากนั้นยังมีความสำเร็จในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จากสารประกอบกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์แบบแกเลียมอาร์เซไนด์ (Gallium arsenide; GaAs) เซลล์แสงอาทิตย์แบบคอปเปอร์อินเดียมแกเลียมซีลีไนด์ (Copper indium gallium selenide; CIGS<sub>2</sub>) และเซลล์แสงอาทิตย์แบบแคดเมียมเทลลูไรด์ (Cadmium telluride; CdTe) เป็นต้น เซลล์เหล่านี้สามารถผลิตได้ง่ายกว่าเซลล์ที่ผลิตจากซิลิกอนแบบผลึกแต่ควรคำนึงถึงสารประกอบกึ่งตัวนำบางตัวที่อาจเป็นอันตราย เช่น สารประกอบแคดเมียม ฯลฯ ทำให้ผู้ใช้บางส่วนกังวลในเรื่องดังกล่าวซึ่งปัจจุบันมีการศึกษาจำนวนมากที่ระบุว่าการผลิตและใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มนี้จะไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมกับผู้ใช้และสิ่งแวดล้อม

**ยุคที่สาม** มีการใช้สารกึ่งตัวนำที่เป็นสารอินทรีย์มาใช้เป็นส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น สีในเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง (Dye - sensitized solar cell; DSSC) และเซลล์แสงอาทิตย์แบบพอลิเมอร์นำไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์แบบสารอินทรีย์ (Organic photovoltaic cell; OPV) เป็นต้น การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มนี้ทำได้ง่ายด้วยกระบวนการทางสารละลายและมีราคาการผลิตที่ไม่แพง แต่ประสิทธิภาพของเซลล์ก็ยังอยู่ในระดับที่ต่ำคือเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง มีประสิทธิภาพประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ และเซลล์แสงอาทิตย์

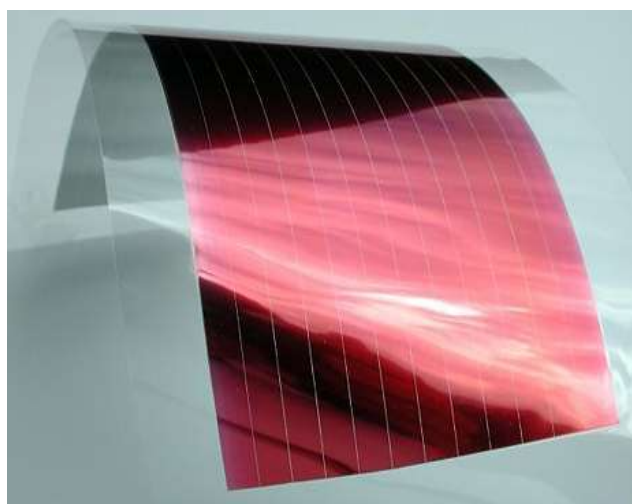
แบบสารอินทรีย์ มีประสิทธิภาพประมาณ 5 - 8 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงต้องมีการวิจัยและพัฒนาต่อไป (สุรวุฒิ ช่วง โชติ, 2556)

### 2.6.1 คุณสมบัติพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ ประกอบด้วย 3 ประการ ดังนี้

2.6.1.1 การดูดซึมของแสงเพื่อสร้างคู่อิเล็กตรอน - โฮลหรือเอ็กซิตอนอย่างไร  
อย่างหนึ่ง

2.6.1.2 การแยกต่างหากของตัวขนส่งประจุที่ต่างชนิดกัน

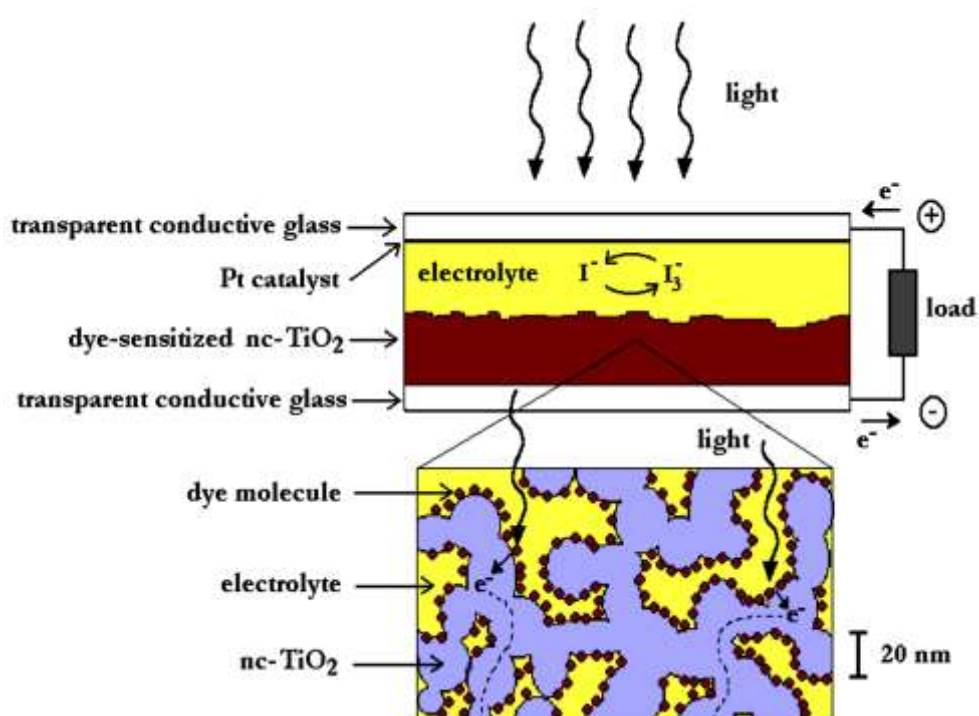
2.6.1.3 การสกัดการแยกออกจากกันของตัวขนส่งเหล่านั้นไปยังวงจรรภายนอก



ภาพที่ 2 - 4 เซลล์แสงอาทิตย์ (<http://plastic.oie.go.th/ReadArticle.aspx?id=4629>)

## 2.7 เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง (Dye - sensitized solar cell; DSSC)

เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง (DSSC) เป็นอุปกรณ์สำหรับการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นกระแสไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำแล้วเชื่อมด้วยสารไวแสง มีสารส่งผ่านประจุหรือเรียกว่า อิเล็กโทรไลต์ และขั้วไฟฟ้า ดังภาพที่ 2 - 5 โดยสามารถแปลงพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดถึง 10 เปอร์เซ็นต์ ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงกำลังได้รับความสนใจในด้านวิชาการและด้านพาณิชย์เชิงการค้า เนื่องจากมีราคาถูกกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำซิลิกอนที่มีขายอยู่ในปัจจุบัน (ชานู โภธิพิทักษ์, 2556)



ภาพที่ 2 - 5 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง (Halme, 2002)

### 2.7.1 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่สำคัญ ประกอบด้วย

#### 2.7.1.1 ขั้วกระจกนำไฟฟ้า (Transparent conducting oxide glass; TCO glass)

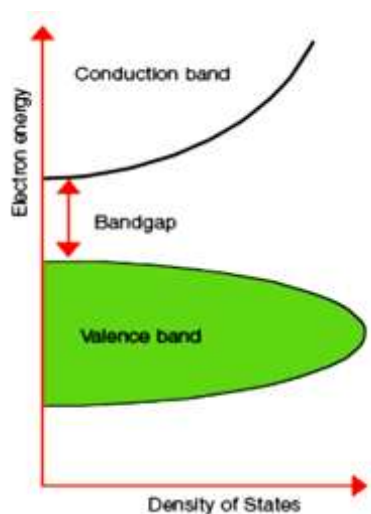
มี 2 ขั้ว ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าแอโนด (Anode) และขั้วไฟฟ้าแคโทด (Cathode) โดยขั้วไฟฟ้าแอโนด เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง เป็นส่วนประกอบไว้สำหรับให้แสงผ่านและทำหน้าที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนออกนอกเซลล์ มีลักษณะเป็นฟิล์มบางเคลือบอยู่ด้านบนบนกระจกเพื่อเป็นขั้วไฟฟ้า ส่วนขั้วไฟฟ้าแคโทดหรือขั้วไฟฟ้าตรงข้าม (Counter electrode) จะทำหน้าที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนกลับคืนเข้ามายังเซลล์ซึ่งนิยมใช้โลหะแพลทินัมหรือแกรไฟต์เคลือบอยู่บนกระจกเป็นขั้วไฟฟ้านี้

ฟิล์มบางออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสงเป็นฟิล์มบางที่นำมาใช้กันมากในอุปกรณ์สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (Optoelectronic device) เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ที่แสดงผลอย่างรวดเร็ว (Flat display solar cell) และอื่น ๆ ซึ่งฟิล์มชนิดนี้เป็นฟิล์มที่มีสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสงที่ดีควบคู่กัน โดยฟิล์มต้องมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ดีและแสงสามารถทะลุผ่านได้มาก ดังนั้นการเลือกสารตั้งต้นเพื่อนำมาเตรียมฟิล์มต้องพิจารณาคุณสมบัติทั้งสองข้อนี้เป็นสำคัญ โดยทั่วไปสารที่จะนำมาใช้ควรเป็นสารที่มีแถบช่องว่างพลังงานสูง สภาพต้านทานต่ำและแสงสามารถทะลุผ่านได้ดีซึ่งฟิล์มบางที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ ฟิล์มบางทिनออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) ฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) อินเดียมทिनออกไซด์ (ITO) และฟิล์มบางทिनออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) เป็นต้น (สรรเพชญ นิลผาย, 2551)

**2.7.1.2 อนุภาคโลหะออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)** เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่อยู่ระหว่างตัวนำและฉนวน เป็นวัสดุที่นิยมใช้ทำอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์มักมีเจอร์เมเนียม (Germanium) ซีลีเนียม (Selenium) และซิลิกอน (Silicon) ฯลฯ เป็นตัวประกอบ มีลักษณะเป็นผลึกเนื้อแข็งพวกหนึ่งที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำหรือสื่อทางไฟฟ้าที่ก้ำกึ่งระหว่างโลหะกับอโลหะหรือฉนวน ความเป็นตัวนำไฟฟ้าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความไม่บริสุทธิ์ของสารซึ่งวัสดุพวกนี้จะทำหน้าที่เป็นชั้นให้โมเลกุลของสีย้อมไวแสงยึดเกาะรวมทั้งรับอิเล็กตรอนจากสีย้อมและส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังขั้วแอโนด จึงควรเป็นอนุภาคที่มีพื้นที่ผิวมากและนำอิเล็กตรอนได้ดี นิยมใช้อนุภาคของโลหะออกไซด์ที่มีแถบช่องว่างพลังงานกว้างมากกว่า 2.50 - 4.00 อิเล็กตรอนโวลต์ (Electron volt; eV) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ซิงค์ออกไซด์ ( $\text{ZnO}$ ) และทिनออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) เป็นต้น (วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี, 2558)

ลักษณะแถบช่องว่างพลังงาน (Energy band gap;  $E_g$ ) โดยทั่วไปจะประกอบด้วยแถบวาเลนซ์ (Valence band; VB) และแถบการนำไฟฟ้า (Conduction band; CB) มีช่องว่างพลังงาน (Energy gap) ที่มีความกว้างไม่เกิน 4 อิเล็กตรอนโวลต์ กั้นระหว่างแถบทั้งสองนี้ ดังภาพที่ 2 - 6

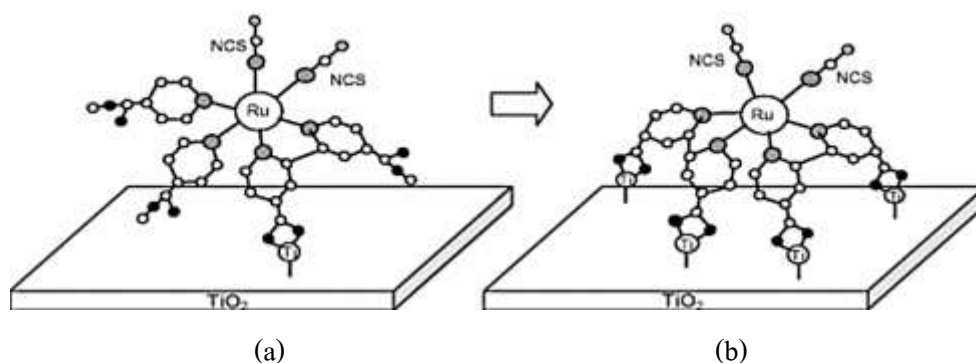
หน่วยของพลังงานอิเล็กตรอนโวลต์ (eV) หมายถึง พลังงานที่ใช้งานในการทำให้อิเล็กตรอนหนึ่งตัววิ่งผ่านสนามศักย์ไฟฟ้า 1 โวลต์ เมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์อิเล็กตรอนได้รับพลังงานมากพอจะสามารถข้ามช่องว่างพลังงานไปยังแถบการนำ และทำให้เกิดการนำกระแสได้



ภาพที่ 2 - 6 แถบช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ (Dharma & Pisal, 2009)

**2.7.1.3 สีย้อมไวแสง (Dye - sensitized)** เป็นส่วนประกอบที่เป็นที่มาของชื่อ เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง โดยยึดเกาะอยู่ที่ผิวของอนุภาคโลหะออกไซด์หรืออนุภาคสารกึ่งตัวนำด้วยพันธะแบบโควาเลนต์ (Covalent bond) จะทำหน้าที่ดูดกลืนแสงอาทิตย์ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นแล้วส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังอนุภาคโลหะออกไซด์ สีย้อมไวแสงที่ดีควรมีคุณสมบัติดูดกลืนแสงได้มากในหลายช่วงความยาวคลื่น มีความเสถียรและยึดเกาะบนผิวของอนุภาคโลหะออกไซด์ได้ดี ดังภาพที่ 2 - 7 สีย้อมที่นิยมใช้ เช่น สีย้อมไวแสงจำพวกสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียม (Ruthenium complexes; Ru) เช่น N 719 และอีโอซินวาย (Eosin Y) หรือสารสี (Pigment) จากพืช เช่น คลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) และแอนโทไซยานิน (Anthocyanin) เป็นต้น ซึ่งสีย้อมเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง เนื่องจากทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนให้กับเซลล์ เมื่อสีย้อมได้รับพลังงานจากแสงโมเลกุลของสีย้อมที่อยู่ระดับพลังงานออร์บิทัลสูงสุดที่มีอิเล็กตรอนของสีย้อมอยู่ (Highest occupied molecular orbital; HOMO) จะถูกกระตุ้นให้ไปอยู่ที่ระดับพลังงานออร์บิทัลต่ำสุดที่ไม่มีอิเล็กตรอนอยู่ (Lowest unoccupied molecular orbital; LUMO) จากนั้นอิเล็กตรอนจากตัวรับแสงจะถูกฉีดเข้าไปในชั้นแถบนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ในการเลือกสีย้อมนั้นจำเป็นต้องเลือกสีย้อมที่เหมาะสมกับสารกึ่งตัวนำ โดยต้องเลือกสีย้อมที่มีระดับพลังงานออร์บิทัลต่ำสุดที่ไม่มีอิเล็กตรอนอยู่ให้สูงกว่าชั้นแถบนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ แต่ถ้าเลือกสารกึ่งตัวนำที่มีชั้นแถบนำไฟฟ้าที่สูงกว่าระดับพลังงานออร์บิทัลต่ำสุดที่ไม่มีอิเล็กตรอนของสีย้อมอยู่ อิเล็กตรอนจากสีย้อมในสถานะกระตุ้นไม่สามารถฉีดเข้าไปในชั้นแถบนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำได้ (สรรเพชญ นิลผาย, 2551)

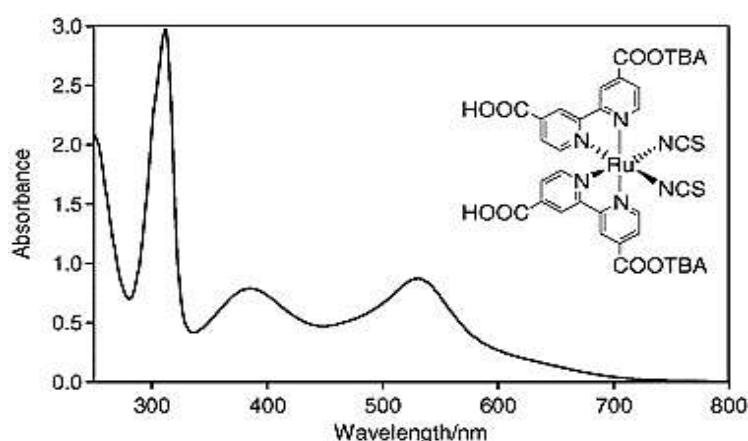




ภาพที่ 2 - 7 การยึดเกาะกันระหว่างสารกึ่งตัวนำและสีย้อม N 719 (Electrochemical and Solid - State (ECS), 2015)

- การยึดเกาะกันระหว่างสารกึ่งตัวนำและ N 719 เมื่อไม่มีสารอิเล็กโทรไลต์
- การยึดเกาะกันระหว่างสารกึ่งตัวนำและ N 719 เมื่อมีสารอิเล็กโทรไลต์

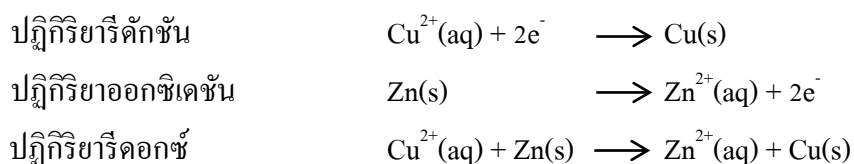
ในรูปแบบของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงมีหลักการทำงานคล้ายคลึงกับกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช เซลล์แสงอาทิตย์แบบนี้จะใช้เม็ดสีย้อมทำหน้าที่เป็นตัวดูดกลืนแสงซึ่งสีย้อมมาตรฐานที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือสีย้อม (N 719) เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียม (Ru) และมีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่เหมาะสม ดังภาพที่ 2 - 8 ซึ่งการใช้สารกึ่งตัวนำของโลหะออกไซด์ เช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นรูพรุนและมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร จะใช้ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าทางแสงเพื่อรับอิเล็กตรอนจากเม็ดสีย้อม (สำนักงานกลางศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์, 2557)



ภาพที่ 2 - 8 สูตรโครงสร้างเคมีและสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมมาตรฐาน N 719 (Wang et al., 2004)

**2.7.1.4 สารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)** เป็นชั้นส่งผ่านประจุที่มีอยู่ในรูปของเหลวทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทดเพื่อชดเชยอิเล็กตรอนให้กับโมเลกุลสีย้อมไวแสงโดยอาศัยปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox) อธิป เฟ็งพัต (2553)

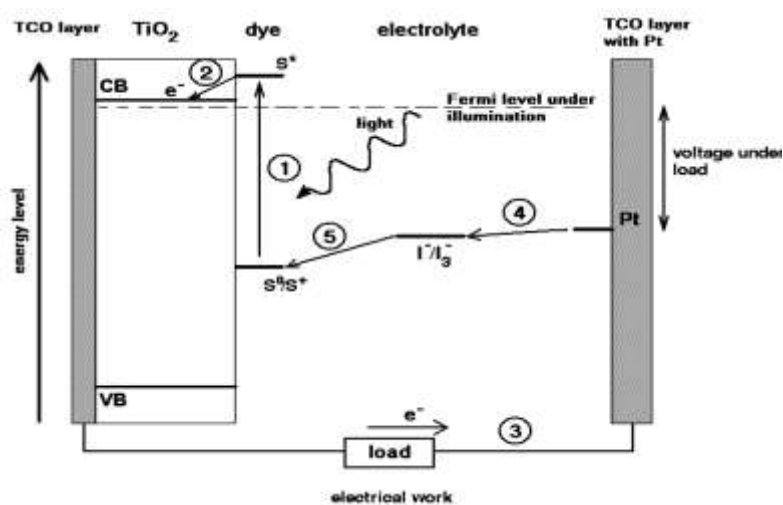
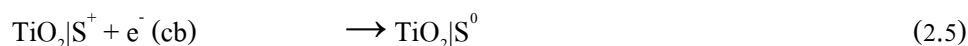
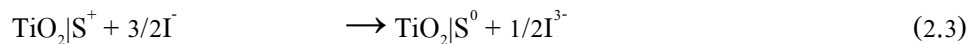
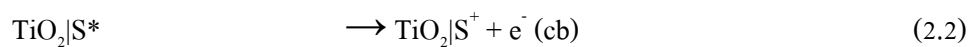
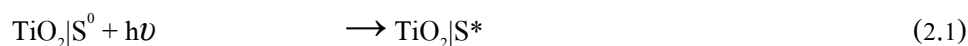
ปฏิกิริยารีดอกซ์ คือ ปฏิกิริยาเคมีที่มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างสารตั้งต้นทำให้เลขออกซิเดชันมีการเปลี่ยนแปลงไปซึ่งจะทำให้มีอะตอมของธาตุบางตัวสูญเสียหรือได้รับอิเล็กตรอนจะเรียกปฏิกิริยาที่เกิดการเสียอิเล็กตรอนว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) และเรียกปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอนว่า ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ตัวอย่างเช่น



(สำราญ พฤกษ์สุนทร, 2544)

## 2.7.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

เมื่อแสงตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์โมเลกุลสีย้อมไวแสงที่เกาะบนผิวของอนุภาคโลหะออกไซด์ ตัวอย่างเช่น ไททานเนียมไดออกไซด์ ดังภาพที่ 2 - 9 จะเกิดการดูดกลืนแสงด้วยพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ( $h\nu$ ) ทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะพื้น (Ground state;  $S^0$ ) จะถูกเร้าให้ขึ้นไปอยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited state;  $S^*$ ) ดังสมการที่ 2.1 จากนั้นอิเล็กตรอนในสถานะกระตุ้นจะถูกส่งผ่านไปที่แถบการนำไฟฟ้าของอนุภาคโลหะออกไซด์ ดังสมการที่ 2.2 แล้วอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านจากสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ไปยังขั้วแอโนดแล้วออกสู่วงจรภายนอกเซลล์กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในวงจรภายนอกเซลล์ จากนั้นอิเล็กตรอนจะวิ่งกลับเข้าสู่เซลล์ที่ขั้วแคโทด ที่ขั้วนี้มีสารอิเล็กโทรไลต์ (ตัวอย่างเช่น ไอโอไดด์/ไตรไอไดด์) เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์โดยให้อิเล็กตรอนกับสีย้อมไวแสงที่สูญเสียอิเล็กตรอน ( $S^+$ ) ทำให้โมเลกุลสีย้อมกลับสู่สถานะพื้น ( $S^0$ ) ดังสมการที่ 2.3 ในขณะที่เดียวกันสารอิเล็กโทรไลต์จะรับอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทด (ตัวอย่างเช่น โลหะแพลทินัม) ดังสมการที่ 2.4 แต่ในกระบวนการทำงานอาจมีปฏิกิริยาที่ให้ผลเชิงลบประกอบด้วย การรวมกันใหม่ของอิเล็กตรอนที่กำลังเข้าสู่แถบการนำไฟฟ้าของอนุภาคโลหะออกไซด์กับสีย้อมไวแสงที่สูญเสียอิเล็กตรอนไปทำให้สีย้อมไวแสงกลับสู่สถานะพื้นโดยไม่มีอิเล็กตรอนออกไปนอกเซลล์จึงไม่เกิดกระแสไฟฟ้า ดังสมการที่ 2.5 และการพบกันของอิเล็กตรอนที่กำลังเข้าสู่แถบการนำไฟฟ้าของอนุภาคโลหะออกไซด์กับสารอิเล็กโทรไลต์ทำให้อิเล็กตรอนที่ไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ ดังสมการที่ 2.6 (Halme, 2002)



ภาพที่ 2 - 9 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง (Halme, 2002)

### 2.7.3 ข้อดีและข้อเสียของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

#### ข้อดี

- ราคาถูก ไม่ต้องใช้พลังงานสูงและสูญญากาศในการผลิตเหมือนแบบซิลิกอน
- สามารถใช้กับพื้นผิววัสดุที่สามารถยึดหยุ่นได้นอกเหนือจากแก้ว
- สามารถออกแบบให้มีรูปร่างทางสถาปัตยกรรมเหมาะสมกับใช้ตกแต่งอาคารบ้านเรือนหรือนำมาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ ในชีวิตประจำวันได้
- มีความคงทนภายใต้สภาวะหนึ่ง ๆ ของแสงที่นานกว่า 10,000 ชั่วโมง

#### ข้อเสีย

- มีประสิทธิภาพที่ต่ำจึงทำให้ไม่สามารถเป็นคู่แข่งทางการค้ากับเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอนได้
- เสื่อมสภาพได้ง่ายที่อุณหภูมิสูง
- ขนาดของการผลิตยังอยู่ในระดับเล็ก (สุภาวดี เกียรติเสวี, 2555)

## 2.8 ชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (Electron transporting layer; ETL)

ชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน คือ ชั้นของสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะเป็นฟิล์มบางเคลือบอยู่บนพื้นผิวของวัสดุเพื่อให้เกิดความโปร่งแสง และสามารถดูดกลืนแสงอาทิตย์ได้มากขึ้นซึ่งมีคุณสมบัติในการช่วยส่งผ่านอิเล็กตรอนให้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงมีเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสารที่นิยมใช้เคลือบฟิล์มบางสำหรับเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนให้กับเซลล์ ได้แก่ กลุ่มของสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น อนุพันธ์ของโลหะไททาเนียม (Titanium) หรือไททาเนียมออกไซด์ ( $\text{TiO}_x$ ) ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคโซล - เจล (Sol - gel technique) Khantha et al. (2015) เป็นวิธีการสังเคราะห์ทางเคมีแบบเปียก (Wet - process) ชนิดหนึ่งที่ได้รับคามนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากการสังเคราะห์สารที่อุณหภูมิต่ำและมีราคาถูก โดยไททาเนียมออกไซด์ที่เตรียมได้จากเทคนิคโซล - เจล จะมีอนุภาคขนาดระดับนาโนเมตร อย่างไรก็ตามการปรับสภาวะในการเตรียมด้วยวิธีโซล - เจล เช่น ชนิดของกรด ความเข้มข้นของกรด อุณหภูมิในการเผา ก็มีผลทำให้ได้อนุภาคไททาเนียมออกไซด์ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันด้วย เป็นต้น (สุรวุฒิ ช่วงโชติ, 2556)

## 2.9 เทคนิคการเคลือบฟิล์มบาง (Thin film technique)

เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางเป็นการเคลือบผิวของวัสดุต่าง ๆ (งานวิจัยนี้จะเคลือบฟิล์มลงบนผิวกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน) เพื่อปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุตามความต้องการได้โดยเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ

### 2.9.1 เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางแบบการนำพาการระเหย (Rapid convective deposition)

เป็นเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางโดยการพาสารที่มีลักษณะเป็นของเหลวขนาดอนุภาคนาโนให้เคลือบลงบนพื้นผิวของวัสดุ สามารถปรับขนาดความหนาฟิล์มที่เคลือบลงบนผิวของวัสดุได้เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสให้กับสิ่งประดิษฐ์ กลไกพื้นฐานของเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางวิธีนี้จะใช้สารที่มีขนาดอนุภาคนาโนในการเคลือบฟิล์มบางแทนการใช้สารเคมีที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์เพื่อป้องกันสารไหลมารวมกัน เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางวิธีนี้จะมีผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาและความไม่เสถียรของสารแขวนลอยที่ลักษณะความโค้งเป็นแบบขั้นเดียว (Unimodal) และสองขั้น (Bimodal) ซึ่งจะทําให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและคุณสมบัติของฟิล์มบางระหว่างการเคลือบฟิล์มลงบนพื้นผิวของวัสดุ ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงการเปลี่ยนแปลงรูปแบบลักษณะทางสัณฐานวิทยาต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นการเกิดเป็นเส้นคลื่นหรือรอยแตกของฟิล์มซึ่งมีผลต่อการศึกษา การที่จะ

ทำให้เทคนิคนี้มีประสิทธิภาพที่ดี เช่น การเพิ่มขนาดของอนุภาคนาโนและลดการสั่นสะเทือนจากภายนอกจะช่วยให้การเคลือบฟิล์มมีประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นและสามารถนำวัสดุที่เคลือบได้มาประยุกต์ใช้กับงานต่าง ๆ ได้ เช่น ใช้เป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนให้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงเพื่อให้สามารถลำเลียงอิเล็กตรอนเข้าสู่เซลล์ได้มากขึ้นทำให้เซลล์ที่ได้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 2 - 10 (พิศิษฐ์ คำหน่อแก้ว และอนุศิษย์ แก้วประจักษ์, 2558)



ภาพที่ 2 - 10 เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางแบบการนำพาการระเหย

### 2.9.2 เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางแบบดอกเตอร์เบลด (Doctor blade)

เป็นเทคนิคการเคลือบฟิล์มที่ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสารอินทรีย์ เป็นเทคนิคที่มีหลักการค่อนข้างง่ายโดยการนำกระจกสไลด์แบบเรียบวางลงบนผิวของวัสดุที่มีสารเคมีที่จะใช้เคลือบอยู่โดยทำมุมเอียงประมาณ 45 องศา แล้วปาดไปในระยะทางที่คงที่เพื่อให้ฟิล์มเคลือบลงบนพื้นผิวของวัสดุตามขนาดพื้นที่ที่ต้องการ ดังภาพที่ 2 - 11 สารเคมีที่หยดลงไปในนั้นจะหยดลงด้านหน้าหรือด้านหลังของกระจกสไลด์ก็ได้ แล้วนำกระจกสไลด์มาปาดตามการหยดสารเคมีลงไปเพื่อให้ฟิล์มเรียบและทั่วถึงบริเวณพื้นที่ที่ต้องการเคลือบ ซึ่งต้องมีความสัมพันธ์กับความเร็วที่ใช้ในการปาดสารเพื่อไม่ให้ฟิล์มเกิดการขรุขระหรือเป็นรอยหยักซึ่งไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ สารที่จะนำมาใช้เคลือบลงบนพื้นผิวของวัสดุต้องมีลักษณะเป็นของเหลว ทั้งนี้ความหนาของฟิล์มที่ได้จะขึ้นอยู่กับระยะความห่างระหว่างกระจกสไลด์และพื้นผิวของวัสดุทำให้ระดับพลังงานบนพื้นผิวของวัสดุมีความแตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ ดังนั้นควรจะกำหนดช่องความห่างระหว่างกระจกสไลด์กับพื้นผิวของวัสดุให้มีความเหมาะสมซึ่งจะทำให้ขนาดความหนาของฟิล์มที่ได้เกิดความเหมาะสมเช่นกัน (Tang, 2010)



ภาพที่ 2 - 11 เทคนิคการเคลือบฟิล์มแบบดอกเตอร์เบลด

## 2.10 เทคนิคการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X - ray diffraction; XRD)

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เป็นเทคนิคการวิเคราะห์สารแบบไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non - destructive analysis) ซึ่งนำมาใช้ในการตรวจวิเคราะห์ชนิดของเฟสที่ปรากฏในวัสดุเบื้องต้น ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จะประกอบด้วยข้อมูลของชุดค่าระยะห่างระหว่างระนาบขนานที่ติดกัน (d - spacing) และความเข้มของรังสีที่ตรวจจับได้ซึ่งสามารถนำไปใช้การคำนวณค่าแลตทิซพารามิเตอร์ (Lattice parameters) ของโครงสร้างผลึก (Crystal structure) อย่างคร่าว ๆ ชนิดของเฟสที่ปรากฏ ขนาดของเกรน (Grain size) และในบางกรณียังสามารถใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะการจัดเรียงของส่วนประกอบของโครงสร้าง (Texture analysis) ได้อีกด้วย

รังสีเอกซ์ เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีค่าความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 10 นาโนเมตร เมื่อรังสีเอกซ์เกิดอันตรกิริยากับสสารจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่าง ๆ เช่น การเปล่งแสง การดูดกลืนการกระเจิงแสงหรือการเลี้ยวเบนซึ่งปรากฏการณ์เหล่านี้จะมีลักษณะเฉพาะที่ขึ้นอยู่กับสารตัวอย่างแต่ละชนิดเนื่องจากของแข็งที่เป็นผลึกจะมีการจัดเรียงอะตอมอย่างเป็นระเบียบในสามมิติและมีหลายชุดระนาบ เมื่อรังสีเอกซ์มาตกกระทบบนผิวของชุดระนาบต่าง ๆ ด้วยมุมที่เหมาะสมจะทำให้เกิดพฤติกรรมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ขึ้น

ความเข้ม (Intensity; I) ของรังสีเอกซ์ ขึ้นกับกระแสไฟฟ้าที่ใช้ (Current; i) ความต่างศักย์ (Voltage; V) และเลขอะตอมของธาตุที่เป็นเป้า (Z) ตัวแปรทั้งหมดมีความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 2.7

$$I = kiZU^2 \text{ เมื่อ } k \text{ เป็นค่าคงที่} \quad (2.7)$$

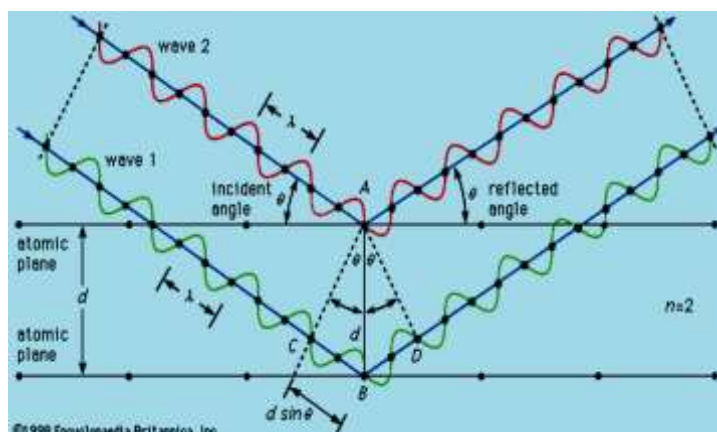
ส่วนความถี่ของรังสีเอกซ์แบบเฉพาะจะเป็นฟังก์ชันกับเลขอะตอมตามกฎของมอสลีย์ (Moseley's law) ดังสมการที่ 2.8

$$v = k(z - 1)^2 \text{ เมื่อ } k \text{ เป็นค่าคงที่} \quad (2.8)$$

**2.10.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แบ่งออกเป็น 2 แบบ** คือ การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สำหรับตัวอย่างที่เป็นผง (Powder x - ray diffraction) และการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สำหรับตัวอย่างที่เป็นผลึกเดี่ยว (Single - crystal x - ray diffraction)

**2.10.1.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สำหรับตัวอย่างที่เป็นผง (Powder x - ray diffraction)** ซึ่งสามารถวิเคราะห์ชนิดของวัสดุได้เนื่องจากการเกิดรังสีเอกซ์จะให้สเปกตรัมที่มีลักษณะเฉพาะของแต่ละธาตุสามารถบอกวิฤภาคเชิงผลึกของวัสดุได้ว่ามีความเป็นผลึกหรืออสัณฐาน เทคนิคนี้มีประโยชน์ในการวิเคราะห์ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalysis) เพราะสามารถบอกชนิดของสารที่อยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยารวมทั้งวิฤภาคของวัสดุได้

**2.10.1.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สำหรับตัวอย่างที่เป็นผลึกเดี่ยว (Single - crystal x - ray diffraction หรือ X - ray crystallography)** สามารถหาโครงสร้างของโมเลกุลได้คือสามารถบอกการจัดเรียงตัวของอะตอม ความยาวพันธะและมุมระหว่างอะตอมในโมเลกุลได้เนื่องจากวัสดุตัวอย่างสำหรับเทคนิคนี้ต้องเป็นผลึกเดี่ยว ดังนั้นขั้นตอนการตกผลึกจึงมีความสำคัญมากในการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์นั้น ขนาดความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์จะอยู่ในช่วงเดียวกับระยะห่างระหว่างอะตอมในผลึกของของแข็งซึ่งทำให้งรังสีเอกซ์สามารถเกิดการเลี้ยวเบนได้



ภาพที่ 2 - 12 การกระเจิงและการแทรกสอดของรังสีเอกซ์ที่จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (Poppe et al., 2002)

การเลี้ยวเบนประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรก คือ การกระเจิง (Scattering) ของรังสีตกกระทบซึ่งทำมุมที่  $\theta$  กับผิวหน้าของของแข็ง มุมของรังสีกระเจิงจะเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบซึ่งในแต่ละระนาบของโครงสร้างผลึกจะมีการกระเจิงของรังสีเอกซ์ ขั้นตอนที่สอง คือ การเกิดการแทรกสอด (Interference) ของรังสีกระเจิงที่เกิดขึ้นจากระนาบต่าง ๆ ดังภาพที่ 2 - 12 ถ้าการแทรกสอดเป็นแบบเสริม (Constructive interference) เนื่องจากตำแหน่งของคลื่นจากต่างระนาบตรงกันจะทำให้รังสีกระเจิงสูงมีค่าของคลื่นเพิ่มขึ้นซึ่งเมื่อนำฟิล์มมารองรับจะเห็นเป็นจุดสว่างใหญ่ขึ้นถ้าการแทรกสอดเป็นแบบหักล้าง (Destructive interference) เนื่องจากตำแหน่งของคลื่นต่างเฟสกันรังสีกระเจิงจะมีค่าแอมพลิจูดลดลง ถ้านำฟิล์มมารองรับจะเห็นเป็นจุดที่เล็กกว่าหรือไม่เห็นเลย ถ้าเกิดการหักล้างอย่างสมบูรณ์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์กับระยะห่างระหว่างระนาบผลึกและมุมตกกระทบสามารถอธิบายโดยใช้กฎของแบรกก์ (Bragg' law) ดังสมการที่ 2.9

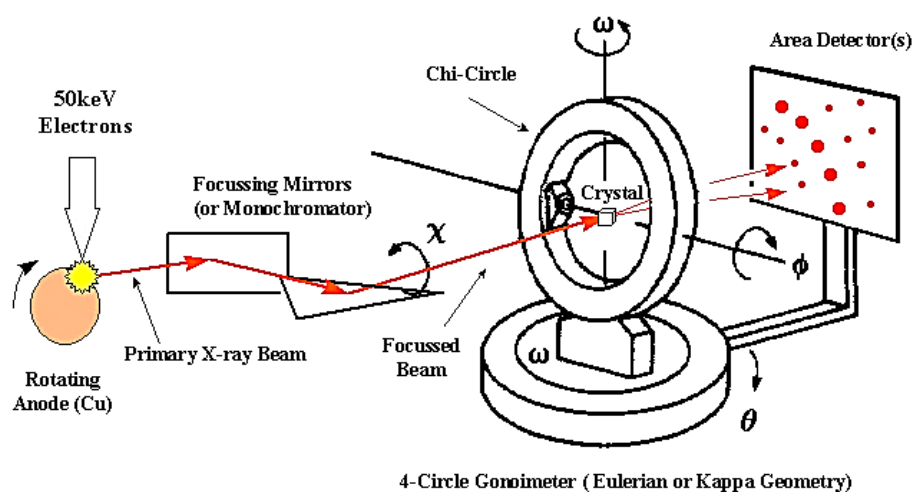
$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (2.9)$$

- เมื่อ  $n$  คือ จำนวนเต็มที่เรียกว่าอันดับของการสะท้อน  
 $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีที่ใช้  
 $d$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบขนานที่ติดกันของผลึก  
 $\theta$  คือ มุมระหว่างรังสีตกกระทบกับระนาบผลึก

เครื่องมือที่วัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ คือ เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X - ray diffractometer) โดยมีหลักการทำงานคือ เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังขั้วแคโทดซึ่งเป็นเส้นลวดให้ความร้อนเพื่อให้ไส้หลอดร้อนขึ้นหรือมีพลังงานสูงพอทำให้อิเล็กตรอนพลังงานสูงหลุดออกมาจากขั้วแคโทดและพุ่งเข้าชนขั้วแอโนดซึ่งเป็นโลหะที่นำความร้อนได้ดี (โลหะที่นิยมใช้เป็นขั้วแอโนดคือ ทองแดงและ โมลิบดีนัม โดยหลอดที่ใช้ทองแดงจะเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่เหมาะสมกับผลึกขนาดเล็กหรือมีขนาดหน่วยเซลล์ใหญ่ ส่วน โมลิบดีนัมเหมาะสำหรับผลึกขนาดใหญ่หรือผลึกที่มีการดูดกลืนรังสีเอกซ์ได้ดี) จึงทำให้อิเล็กตรอนวงในหลุดออกมา เมื่ออิเล็กตรอนชั้นอื่นเข้าไปแทนที่ออร์บิทัลที่ว่างขั้วแอโนดจะคายพลังงานออกมาในรูปรังสีเอกซ์และความร้อน โดยทั่วไปรังสีเอกซ์จะเกิดขึ้นปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ ของพลังงานที่คายออกมาทั้งหมด รังสีเอกซ์ที่คายออกมามีทั้งรังสีเอกซ์แบบเฉพาะตัว (Characteristic) ที่เป็น  $K_{\alpha}$  และ  $K_{\beta}$  จากนั้นจึงใช้แผ่นกรองแสงซึ่งเป็นตัวดูดกลืนความยาวคลื่นที่ไม่ต้องการกำจัดเอาฟลักของ  $K_{\beta}$  ออกไปเพื่อให้เหลือรังสี



เอกซ์ที่มีการเลี้ยวเบนจะถูกตรวจวัดโดยดีเทกเตอร์ (Detector) ซึ่งสามารถวัดรังสีกระเจิงได้ ณ มุมต่าง ๆ ทำให้หาค่า  $2\theta$  ที่ต่ำ ได้ ดังภาพที่ 2 - 13 ข้อมูลที่บันทึกผลออกมาแสดงในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้ม (Intensity) และค่ามุม  $2\theta$  ที่ต่ำ โดยสารแต่ละชนิดจะให้รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่แตกต่างกัน โดยสามารถทำการตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ได้โดยการนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่อยู่ในแฟ้มข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กรเจซีพีดีเอส (Joint committee on powder diffraction standard; JCPDS)

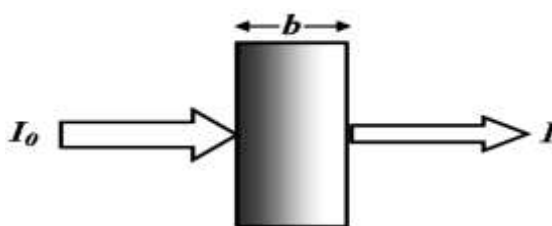


ภาพที่ 2 - 13 หลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (<http://www.stolaf.edu>)

## 2.11 เทคนิคการวิเคราะห์สมบัติทางแสงของสารด้วยยูวี - วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV - Visible spectrophotometer; UV - VIS)

2.11.1 ยูวี - วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในวิเคราะห์สารโดยอาศัยหลักการดูดกลืนรังสีของสารที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (Ultra violet; UV) และวิสิเบิล (Visible; VIS) ที่ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 190 - 1,000 นาโนเมตร โดยใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปี (Spectroscopy) สารที่นำมาวิเคราะห์ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ (Organic compound) สารประกอบเชิงซ้อน (Complex compound) หรือสารอนินทรีย์ (Inorganic compound) ทั้งที่มีสีและไม่มีสี สารตัวอย่างที่นำมาศึกษาอาจเป็นสารละลายหรือฟิล์มก็ได้ ซึ่งสารแต่ละชนิดที่นำมาวิเคราะห์จะมีความการดูดกลืนรังสีในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกันและปริมาณการดูดกลืนรังสีจะขึ้นอยู่กับความเข้มของสารซึ่งค่าการดูดกลืนแสงของสารจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารนั้น ๆ สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ เป็นเทคนิคที่รวดเร็วและใช้กันอย่างแพร่หลาย

เทคนิคสเปกโทรสโกปี มีกฎที่เกี่ยวข้องกับการดูดกลืนแสงที่เรียกว่า กฎของเบียร์ - แลมเบิร์ต หรือเรียกว่า กฎของเบียร์ “คือ สัดส่วนของรังสีที่มีความยาวคลื่นเดียวที่ถูกดูดกลืนโดยตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกัน กราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นแบบฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียล (Exponential function) ของความเข้มข้นของสารที่ดูดกลืนรังสีและความยาวของเส้นทางที่รังสีผ่านสารตัวอย่าง” หรืออาจกล่าวได้ว่าเมื่อผ่านลำแสงที่มีความเข้ม  $I_0$  ไปยังเนื้อสารที่มีความหนาเท่ากับ  $b$  เซนติเมตร โฟตอนของคลื่นแสงจะเกิดอันตรกิริยากับอะตอมหรือโมเลกุลของสารทำให้ความเข้มของคลื่นแสงลดลงจาก  $I_0$  เป็น  $I$  ( $I$  เป็นพลังงานของคลื่นแสงที่เหลือออกมา) ดังภาพที่ 2 - 14



ภาพที่ 2 - 14 ทิศทางของแสงที่ทะลุผ่านสาร (สมศักดิ์ แดงดีป, 2551)

สมการที่ 2.10 ความสัมพันธ์ของค่าการส่งผ่านแสงของสาร

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (2.10)$$

$$A = \log \frac{I_0}{I} = \epsilon b C \quad (2.11)$$

- เมื่อ  $A$  คือ ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance หรือ Optical density)  
 $T$  คือ ค่าการส่งผ่านแสงของสาร (Transmittance)  
 $I$  คือ ความเข้มของรังสีที่ผ่านตัวกลางแล้ว (Intensity of transmitted light)  
 $I_0$  คือ ความเข้มของรังสีที่กระทบตัวกลาง (Intensity of incident light)  
 $b$  คือ ความหนาของสารละลาย หน่วยเป็นเซนติเมตร (Path length of sample)  
 $C$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายหน่วยเป็น โมลต่อลิตร (mol/L)  
 $\epsilon$  คือ โมลาร์ แอบซอปติวิตี (Molar absorptivity) เป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของโมเลกุล คำนี้อาจจะระบุว่า สารแต่ละตัวมีพื้นที่ที่จะดูดกลืนรังสีได้มากหรือน้อยต่อ 1 โมล (mol)

การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน (Electron transition) จะมีค่า  $\epsilon$  อยู่ในช่วง  $0 - 10^6$  ถ้า  $\epsilon$  มีค่าตั้งแต่ 104 ขึ้นไปหมายความว่า สารประเภทนั้นความเข้มของรังสีที่ดูดกลืนมีค่าสูง (Strong absorption) แต่ถ้า  $\epsilon$  มีค่าต่ำกว่า 104 จัดว่าดูดกลืนรังสีปานกลาง (Medium absorption) และถ้า  $\epsilon$  มีค่าต่ำกว่า 10 - 100 จัดว่าดูดกลืนรังสีน้อย (Weak absorption) สำหรับการเปลี่ยนสถานะของสารประกอบคาร์บอนิล (Forbidden transition) จะมีค่า  $\epsilon$  อยู่ระหว่าง 100 - 1,000

เนื่องจากเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer) อาจจะวัดค่าออกมาเป็นค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance; A) หรือเปอร์เซ็นต์ค่าการส่องผ่านแสง (Transmittance; %T) จึงอาจใช้สมการต่อไปนี้คำนวณได้คือ

กำหนดให้

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (2.12)$$

และ %T เท่ากับ

$$\%T = \frac{I}{I_0} \times 100 \quad (2.13)$$

ดังนั้น

$$A = \log \frac{I_0}{I} = \log \frac{1}{T} = \epsilon bc \quad (2.14)$$

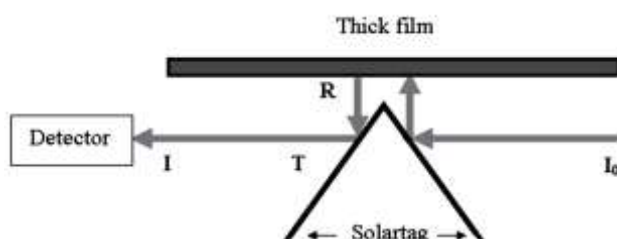
ถ้า A เปลี่ยนค่าจาก  $\infty$  ถึง 0 ค่า T จะเปลี่ยนค่าจาก 0 ถึง 1 และ %T จะเปลี่ยนค่าจาก 0 ถึง 100 อาจเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง A และ %T ได้เป็น

$$A = \log \frac{100}{\%T} \quad (2.15)$$

และ

$$\%A = 100 - \%T \quad (2.16)$$

กรณีที่สารตัวอย่างเป็นฟิล์มที่หนามากจนแสงไม่สามารถทะลุผ่านได้จะใช้การวัดร้อยละของแสงที่สะท้อนออกจากสารตัวอย่าง ดังภาพที่ 2 - 15



ภาพที่ 2 - 15 เส้นทางเดินของแสงเมื่อวัดฟิล์มแบบร้อยละการสะท้อน (เพอซา เสงตระกุล, 2550)

สำหรับแสงที่ตกกระทบและสะท้อนกลับ (Reflectance) สามารถวัดเป็นค่า R ส่วนแสงที่ทะลุฟิล์มออกไป (Transmittance) จะเป็นค่า T และแสงที่ถูกดูดกลืนไปโดยฟิล์มตัวอย่าง (Absorbance) จะวัดเป็นค่า A ได้ ดังสมการที่ 2.17

$$R + T + A = I \quad (2.17)$$

ค่าแสงที่ตกกระทบและสะท้อนกลับของฟิล์มตัวอย่าง จะหมายถึงค่าแสงที่ทะลุฟิล์มออกไปที่เครื่องวัดได้ สามารถเขียนสมการได้ ดังสมการที่ 2.18

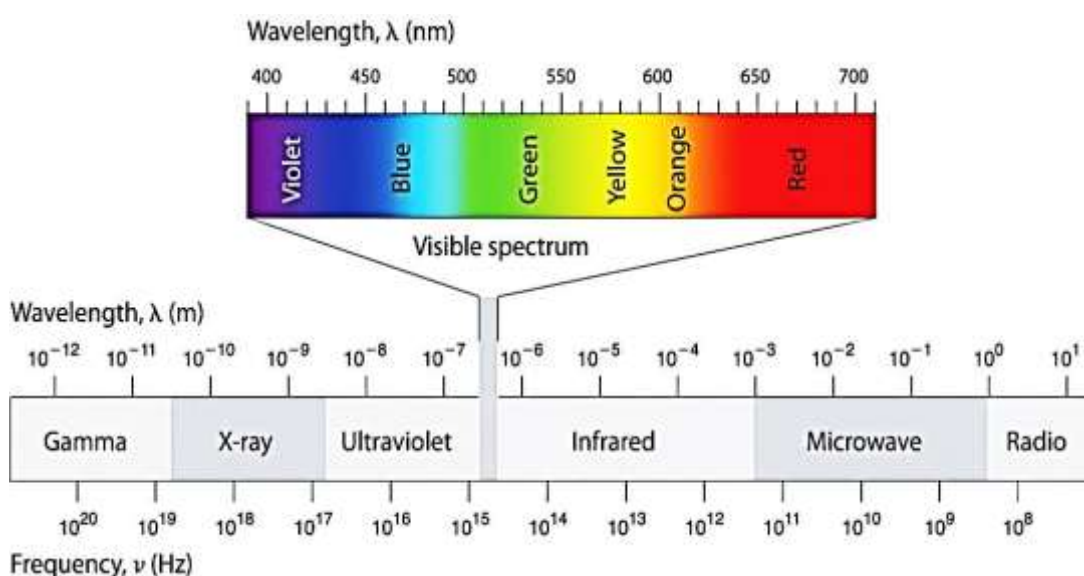
$$A = -\log R \quad (2.18)$$

ดังนั้นสามารถแปลงค่า %R เป็นค่าของแสงที่ถูกดูดกลืนโดยฟิล์มตัวอย่าง สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ ดังสมการที่ 2.19

$$A = -\log \left[ \frac{\%R}{100} \right] \quad (2.19)$$

เทคนิคสเปกโทรสโกปี เป็นการวัดพลังงานที่ถูกดูดกลืนเข้าไปเมื่ออิเล็กตรอนถูกเลื่อนไปอยู่ในระดับชั้นพลังงานที่สูงขึ้น (Electronic transition) เนื่องจากเป็นปรากฏการณ์การกระตุ้นอิเล็กตรอนบางครั้งจึงเรียกว่า การเร้าอิเล็กตรอน (Electronic excitation) ซึ่งเป็นการทำให้

อิเล็กตรอนตัวหนึ่งไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่าเดิม โดยปกติช่วงยูวี จะมีความยาวคลื่นประมาณ 10 - 380 นาโนเมตร แต่การวิเคราะห์โดยยูวี - สเปกตรัม (UV - Spectrum) จะใช้ความยาวคลื่นในช่วง 200 - 380 นาโนเมตร (Near - Ultraviolet region) ในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 200 นาโนเมตร อากาศจะดูดกลืนรังสีในช่วงนี้จึงต้องวัดแถบสีหรือเส้นสีที่ได้จากการส่องผ่านแสง (Spectrum) ภายใต้อากาศ (Vacuum - Ultraviolet Region) ส่วนความยาวคลื่นที่เราสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Visible region) จะเป็นแถบสีหรือเส้นสีที่ได้จากการส่องผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 380 - 780 นาโนเมตร ซึ่งจะปรากฏให้เห็นเป็นสีต่าง ๆ ดังภาพที่ 2 - 16



ภาพที่ 2 - 16 ปรากฏการณ์การกระจัดอิเล็กตรอนหรือการเร่งอิเล็กตรอนด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (<http://iphotopick.com>)

**2.11.2 สเปกตรัม (Spectrum)** หมายถึง แถบสีหรือเส้นสีที่ได้จากการส่องผ่านแสง เช่น แสงขาวเข้าไปในสเปกโตรสโคปแล้วทำให้แสงแยกออกเป็นแถบสีที่เรียงกันตามความยาวคลื่นหรือเส้นสีที่มีค่าความยาวคลื่นค่าใดค่าหนึ่ง

สเปกตรัมแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

**2.11.2.1 สเปกตรัมต่อเนื่อง** หมายถึง สเปกตรัมที่ประกอบด้วยแถบของสีที่มีค่าความถี่หรือค่าความยาวคลื่นต่อเนื่องกัน เช่น สเปกตรัมที่เกิดจากแสงอาทิตย์

**2.11.2.2 สเปกตรัมไม่ต่อเนื่อง** หมายถึง สเปกตรัมที่มีลักษณะเป็นเส้นหรือแถบสีเล็ก ๆ ที่ไม่ต่อเนื่องกัน (ความถี่ไม่ต่อเนื่องกัน) มีช่องว่างระหว่างเส้น เส้นที่เกิดขึ้นเรียกว่าเส้นสเปกตรัม เช่น สเปกตรัมที่เกิดจากแสงซึ่งเกิดจากหลอดไฟฟ้าที่บรรจุธาตุไฮโดรเจน

ถ้าให้แสงขาวผ่านปริซึม แสงขาวจะเบนกระจายออกเป็นแสงสีต่าง ๆ ได้แก่ ม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง ส้ม แดง แสงทุกสีจะต่อเนื่องกันไปเรียกแถบแสงทั้ง 7 สีที่ต่อเนื่องกันว่า สเปกตรัมแสงขาวและจัดเป็นสเปกตรัมชนิดต่อเนื่อง การที่แสงขาวแยกออกเป็นแถบสเปกตรัมเมื่อผ่านปริซึมเกิดเนื่องจากเมื่อแสงขาวเดินทางจากอากาศผ่านตัวกลางจะเกิดการหักเหและกระจาย ออกเป็นแสงสีต่าง ๆ ตามความยาวคลื่นของแสงโดยแสงสีที่มีความยาวคลื่นสั้นจะหักเหได้มากกว่า แสงสีที่มีความยาวคลื่นยาว เช่น แสงสีม่วงมีความยาวคลื่นสั้นที่สุดจึงหักเหได้มากที่สุด ในขณะที่ แสงสีแดงมีความยาวคลื่นยาวที่สุดจึงหักเหได้น้อยที่สุด

ปี พ.ศ. 2443 มัคซ์ พลังค์ (Max Planck) นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันได้ศึกษาเกี่ยวกับ พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่ของคลื่นนั้น สามารถเขียนสมการ ความสัมพันธ์ได้ ดังสมการที่ 2.20

$$E = h\nu \quad (2.20)$$

เมื่อ  $E$  คือ พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีหน่วยเป็นจูล (Joule; J)

$h$  คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) มีค่าเท่ากับ  $6.626 \times 10^{-34}$  จูลต่อวินาที (J.s)

$\nu$  คือ ความถี่ (Frequency) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ( $s^{-1}$ ) หรือ เฮิรตซ์ (Hz)

ดังนั้นถ้าทราบค่าความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถหาค่าพลังงานหาค่าพลังงานของ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ ดังสมการที่ 2.21

$$c = \lambda\nu \quad (2.21)$$

เมื่อ  $c$  คือ ความเร็วของแสง (Speed of light) ในสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ  $3.0 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ ดังสมการที่ 2.22

$$\nu = c/\lambda \quad (2.22)$$

เมื่อ  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่น (Wavelength) การดูดกลืนแสง (นาโนเมตร หรือ  $10^{-9}$  เมตร) เมื่อ นำค่าความถี่ ( $\nu$ ) มาแทนในสมการของพลังค์จะได้ ดังสมการที่ 2.23

$$E = hc/\lambda \quad (2.23)$$

ดังนั้นเมื่อทราบความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ สามารถคำนวณหา ค่าพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ ได้ และเมื่อพิจารณาจากสมการจะเห็นว่าคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น ( $\lambda$  มีค่าน้อย) จะมีพลังงานมาก และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มี ความยาวคลื่นยาว ( $\lambda$  มีค่ามาก) จะมีพลังงานน้อย เช่น แสงสีม่วงมีความยาวคลื่นสั้นกว่าแสงสีแดง ดังนั้นแสงสีม่วงจึงมีพลังงานมากกว่าแสงสีแดงเป็นต้น (สำราญ พุกฤษ์สุนทร, 2544)

### 2.11.3 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง UV - Visible spectrophotometer ประกอบด้วย

**2.11.3.1 แหล่งกำเนิดรังสี (Light source)** เป็นส่วนที่ให้รังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ ต้องการออกมาอย่างต่อเนื่องและคงที่ รวมทั้งมีความเข้มแสงที่มากพอ หลอดกำเนิดรังสีมีหลาย ชนิดตามความยาวคลื่นรังสีที่เปล่งออกมา เช่น ช่วงอัลตราไวโอเล็ต จะใช้หลอดเอชทู (H<sub>2</sub>) และดีทู (D<sub>2</sub>) ซึ่งให้ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 160 - 380 นาโนเมตร และช่วงไวโอเล็ต ใช้หลอดทังสเตน (Tungsten) หรือ ฮาโลเจน (Halogen) ให้ความยาวคลื่นในช่วง 240 - 2,500 nm เป็นต้น

**2.11.3.2 ตัวแยกแสง (Monochromator)** เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมแสงโดยจะทำให้แสงที่ ออกมาจากต้นกำเนิดแสง ซึ่งเป็นพอลิโครเมติก ให้เป็นแสงโมโนโครเมติก ซึ่งเป็นแถบแสงแคบ ๆ หรือมีความยาวคลื่นเดียวใช้ฟิลเตอร์ปริซึมหรือเกรตติ้ง

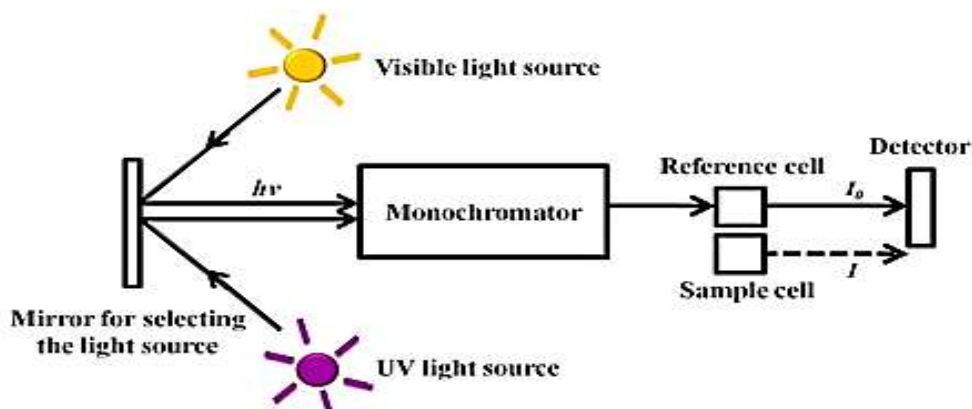
**2.11.3.3 สารตัวอย่าง (Cell sample)** เซลล์ที่ใช้บรรจุสารละลายตัวอย่างบางครั้งอาจ เรียกว่า Cuvettes ที่ใช้กันทั่วไปได้แก่เซลล์ที่ทำด้วยแก้วจะใช้ได้เฉพาะช่วงวิสิเบิล เพราะแก้วจะ ดูดกลืนรังสีในช่วงยูวีได้ และเซลล์ที่ทำด้วยซิลิกา และควอร์ตซ์ซึ่งใช้ได้ทั้งช่วงยูวี และวิสิเบิล

**2.11.3.4 ตัววัดความเข้มของรังสี (Detector)** ทำหน้าที่ในการที่ถูกดูดกลืน โดยการ แปลงพลังงานคลื่นรังสีเป็นพลังงานไฟฟ้า เครื่องวัดรังสีมีหลายชนิดที่นิยม ได้แก่ หลอดโฟโตมัลติ พลายเออร์ (Photomultiplier tube) และเครื่องวัดแสงชนิดซิลิกอนไดโอด (Silicon diode detector)

### 2.11.4 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ใช้โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

**2.11.4.1 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ชนิดลำแสงเดี่ยว (Single - beam spectrophotometer)** เมื่อลำรังสีออกจากแหล่งกำเนิดรังสีจะผ่านเลนส์โมโนโครเมเตอร์ที่เป็นเกรตติ้ง (Grating) ซึ่งเป็น อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบชนิดของแสงโดยอาศัยคุณสมบัติการแทรกสอดของคลื่นผ่านสาร

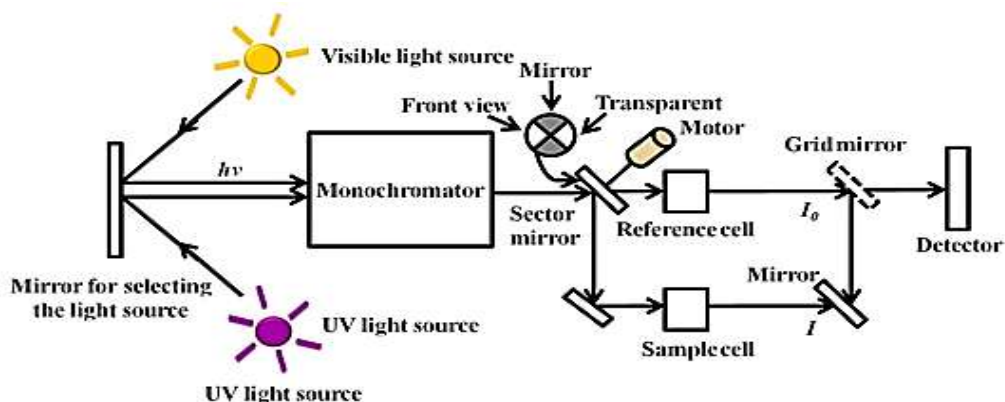
ตัวอย่างแล้วจึงเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจรับสัญญาณ เนื่องจากสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ประเภทนี้ใช้ลำรังสีเพียงลำเดียวผ่านจากโมนโครเมเตอร์ไปสู่สารละลายที่ต้องการวัดลำรังสีนี้จะเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจรับสัญญาณ การวัดแต่ละครั้งจึงต้องใช้เซลล์ 2 เซลล์ให้ลำรังสีผ่านสลับกัน ดังภาพที่ 2 - 17



ภาพที่ 2 - 17 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ชนิดลำแสงเดี่ยว (Trivedi & Chaudhary, 2009)

#### 2.11.4.2 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ชนิดลำแสงคู่ (Double - beam spectrophotometer)

ลำรังสีจะผ่าน โมนโครเมเตอร์ 2 ครั้งด้วยกันทำให้ได้ลำรังสีความยาวคลื่นเดี่ยวอย่างมีประสิทธิภาพ และความละเอียดมากขึ้น เมื่อออกจากช่องแสงออก (Exit slit) แล้ว ลำรังสีจะเข้าสู่อุปกรณ์ตัดลำรังสี (Beam chopper) ก็จะสะท้อนไปผ่านสารตัวอย่างในขณะเดียวกันลำรังสีจะผ่านไปผ่านสารอ้างอิงด้วยวิธีนี้ลำรังสีลำเดี่ยวที่ผ่านโมนโครเมเตอร์จะถูกอุปกรณ์ตัดลำรังสีแยกออกเป็นลำรังสีสองลำที่มีความเข้มเท่ากันตลอดเวลา เมื่อลำรังสีทั้งสองนี้ไปตกกระทบกับโฟโตทิวบ์ (Phototube) ความแตกต่างของความเข้มจะกลายเป็นสัญญาณส่งต่อไปยังอุปกรณ์บันทึกสัญญาณต่อไปในการใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบลำรังสีคู่ ดังภาพที่ 2 - 18



ภาพที่ 2 - 18 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ชนิดลำแสงคู่ (Trivedi & Chaudhary, 2009)



## 2.12 เทคนิคการวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคและองค์ประกอบธาตุเชิงพลังงานของสารด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscopy; TEM) และการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยรังสีเอกซ์ (Energy dispersive x - ray spectrometry; EDX)

การวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคของสารที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ โดยการใช้ลำอิเล็กตรอนผ่านชิ้นงานและศึกษาลำอิเล็กตรอนที่เกิดการเลี้ยวเบนจากระนาบต่าง ๆ ในชิ้นงานและผ่านออกมาทางด้านล่างของชิ้นงาน สามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคอื่น ๆ ได้ เช่น เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยรังสีเอกซ์ (EDX) หรือเทคนิคสเปกโทรสโกปีแบบการสูญเสียพลังงานอิเล็กตรอนของธาตุ (Electron energy loss spectrometry; EELS) ซึ่งเทคนิคเหล่านี้ล้วนเป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุทั้งหมด

ลักษณะการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านจะมีลักษณะคล้ายกับกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงเพียงแต่ใช้อิเล็กตรอนแทนแสงและเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lenses) โดยการทำงานของเครื่องมือจะเริ่มจากลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิที่มีพลังงานและความเข้มสูงผ่านเลนส์รวมแสงกลายเป็นลำอิเล็กตรอนที่ขนานกันเข้ากระทบกับตัวอย่าง การลดลงของความเข้มแสงที่ผ่านออกมาจะขึ้นอยู่กับความเข้มของอิเล็กตรอนปฐมภูมิและความหนาของตัวอย่างซึ่งอิเล็กตรอนที่ผ่านออกมาจะทำให้เกิดภาพฉาย (Projection) แบบสองมิติขึ้น ซึ่งจะถูกขยายต่อไปด้วยออปติกส์อิเล็กตรอน (Electron optics) ทำให้เกิดภาพที่เรียกว่า ภาพสนามสว่าง (Bright field image) ส่วนภาพสนามมืด (Dark field image) นั้นจะเกิดจากอิเล็กตรอนที่เลี้ยวเบนซึ่งจะมีมุมต่างจากอิเล็กตรอนสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

สภาวะการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ส่วนใหญ่จะใช้ลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงาน 100 - 200 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ความเป็นสุญญากาศ  $10^{-6}$  บาร์ และความละเอียด 0.5 นาโนเมตร โดยมีกำลังขยายประมาณ  $3 \times 10^5$  ถึง  $10^6$  เท่า ลักษณะความเปรียบต่างหรือคอนทราสต์ (Contrast) ของภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านเกิดจากความเข้มของอิเล็กตรอนปฐมภูมิ ความหนาของตัวอย่าง รวมถึงการเลี้ยวเบนและการแทรกสอดด้วยตัวอย่างเช่น อนุภาคในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน จะแสดงคอนทราสต์ที่น้อยกว่าอนุภาคที่เหมือนกันทุกประการถ้าอยู่ในทิศทางที่ทำให้เกิดการเลี้ยวเบน (Bragg diffraction) ได้ดี เนื่องจากการเบนอิเล็กตรอนจะไม่เกี่ยวข้องกับการทำให้เกิดภาพและการเอียงเพื่อปรับมุมของตัวอย่างจะทำให้เกิดคอนทราสต์มากขึ้น (วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา, 2543)

### 2.13 เทคนิคการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field emission scanning electron microscopy; FESEM)

การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางซึ่งเป็นองค์ประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FESEM) เป็นเครื่องมือที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology) หรือโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) เป็นเครื่องมือที่มีกำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่า จนถึงมากกว่า 100,000 เท่า โดยการแจกแจงรายละเอียดของภาพที่มีความเป็นไปได้ถึงประมาณ 1 นาโนเมตร จึงเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นตัวอย่าง เนื่องจากสามารถใช้ศึกษาวิเคราะห์ลักษณะของชิ้นตัวอย่างในระดับเล็กที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าและจำแนกรายละเอียดได้ ไม่ว่าจะเป็นการใช้งานทางด้านการแพทย์ ชีววิทยา เคมี วัสดุศาสตร์และอื่น ๆ อีกจำนวนมาก อีกทั้งกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยังสามารถนำไปใช้เชื่อมโยงกับเทคนิคในการวิเคราะห์แบบอื่น ๆ ได้อีก เช่น เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุเชิงพลังงานด้วยรังสีเอกซ์ (Energy dispersive spectroscope; EDX) เป็นต้น

ส่วนประกอบและหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ประกอบด้วยส่วนบนสุดของเครื่องเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนเรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) ทำหน้าที่ผลิตลำอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้สแกนลงบนชิ้นงานตัวอย่างที่บรรจุอยู่ในห้องสุญญากาศลำอิเล็กตรอนนี้เรียกว่า อิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron) อิเล็กตรอนปฐมภูมิลำนี้จะไปตกกระทบที่บริเวณพื้นผิวหน้าของตัวอย่างซึ่งมีสภาพสุญญากาศด้วยความต่างศักย์เร่ง (Accelerating voltage) ให้เคลื่อนที่ลงมาตามแนวด้านซ้ายไปขวา โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) และปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยช่องเปิด (Aperture) ซึ่งมีขนาดไม่เท่ากันตามลักษณะการใช้งาน โดยกลุ่มอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าที่เรียกว่าเลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) กลายเป็นลำอิเล็กตรอน (Electron beam) เลนส์คอนเดนเซอร์นับว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดต่อการควบคุมแสงอิเล็กตรอน (Electron optics) เพราะเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากแหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลงหลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะวิ่งผ่านเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่จับโฟกัสของลำอิเล็กตรอนให้ไปตกบนผิวของตัวอย่างโดยมีสแกนคอยล์ (Scan coil) ทำหน้าที่กราดลำอิเล็กตรอนไปบนผิวของตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็ก ๆ

หลักการเกิดภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดซึ่งขณะที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนกระทบผิวตัวอย่างจะเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมธาตุในวัตถุและเกิดการถ่ายโอนพลังงานที่ขึ้นความลึกจากพื้นผิวที่ระดับต่าง ๆ ทำให้เกิดการปลดปล่อยสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดต่าง ๆ ออกมา กล้องชนิดนี้มีประโยชน์ในการศึกษาลักษณะผิวของตัวอย่างและวิเคราะห์ธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ตามลักษณะสัญญาณภาพที่ได้จากสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นได้แก่ สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron image; SEI) สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattered Electron Image; BEI) และสัญญาณภาพจากรังสีเอกซ์ (X - ray image; XRI) (วีระศักดิ์ อุคมกิจเดชา, 2543)

## 2.14 การวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบสี่ขั้ววงแสง

เมื่ออิเล็กตรอนเกิดการสูญเสียพลังงานจากวงจรภายนอกเซลล์จะกลับคืนเข้าสู่เซลล์ผ่านทางขั้ว Counterelectrode ซึ่งถูกเชื่อมกับวงจรภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ ผลรวมของกระแสไฟฟ้า ( $J$ ) ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของสองขั้วไฟฟ้า ดังสมการที่ 2.24

$$J_{SC} = J_p + J_D \quad (2.24)$$

เมื่อ  $J_p$  คือ Photo generated current และ

$J_D$  คือ Dark current กระแสรวมสูงสุด

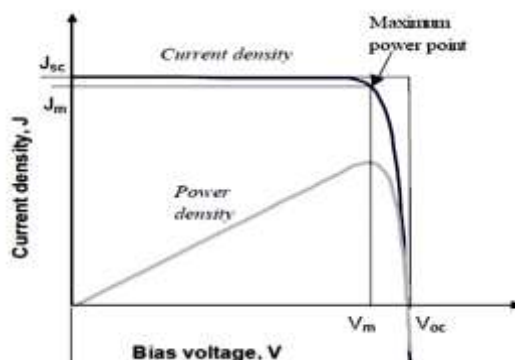
$J_{SC}$  คือ ค่าที่ได้รับมาจากเงื่อนไขของการลัดวงจร (Short circuit) ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ลัดวงจรต่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด ( $\Delta E$ ) = ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด = 0 ซึ่งเห็นได้จากกราฟเส้นโค้งความสัมพันธ์

ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ลัดวงจรและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด ( $J - V$  curve) ภายใต้งแสง ดังภาพที่ 2 - 19

โดย ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) เป็นปฏิกิริยากับพลังงานที่แตกต่างระหว่างระดับพลังงานศักย์ของอิเล็กตรอนภายในของแข็งแบบผลึกในสมมุติฐานทางทฤษฎี (Fermi) ของสารกึ่งตัวนำและระดับพลังงานของสารอิเล็กโทรไลต์ที่เชื่อมด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์ (Electrolyte redox couple) ค่ากำลังสูงสุดที่สามารถคำนวณได้จาก  $P_{max} = J_{max} \times V_{max}$  ซึ่งเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยม ดังภาพที่ 2 - 19 จากจุดที่มีกำลังสูงสุด ซึ่งค่าฟิลแฟกเตอร์ (Fill factor) เป็นข้อมูลจากการ

วัดของคุณภาพของอุปกรณ์ที่ใช้โดยพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสของกราฟเส้นโค้งของค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 2.25

$$FF = \frac{J_{max} V_{max}}{J_{sc} V_{oc}} \quad (2.25)$$



ภาพที่ 2 - 19 กราฟฟิลล์แฟกเตอร์ ( $FF$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้การส่องสว่าง (Nelson, 2003)

#### 2.14.1 ลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

พารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้อธิบายลักษณะเอาต์พุต (Output characteristics) ผลการวัดเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงมีดังนี้

##### 2.14.1.1 ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Energy conversion efficiency; $\eta$ )

คือ อัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดต่อพลังงานของแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (%) มีสัญลักษณ์เป็น  $\eta$  สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 2.26

$$\eta = \frac{P_{max} (W)}{Area (cm^2) \times P_{in} (W)} \times 100\% \quad (2.26)$$

เมื่อ  $\eta$  คือ ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

$P_{max}$  คือ กำลังไฟฟ้า มีหน่วยเป็นวัตต์ (W)

Area คือ พื้นที่รับแสง มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร ( $cm^2$ )

$P_{in}$  คือ ผลรวมกำลังของแสงที่แผ่รังสีตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ต่อตารางเซนติเมตร

### 2.14.1.2 กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short Circuit Current; $J_{sc}$ )

ถ้าเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในสภาพลัดวงจรจะเรียกกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรว่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร มีหน่วยเป็นมิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ ) มีสัญลักษณ์เป็น  $J_{sc}$  หรือ  $I_{sc}$  สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 2.27

$$J_{sc} = qR = \int (F) (n_{ext}) (d) \quad (2.27)$$

- เมื่อ R คือสัมประสิทธิ์สะท้อนแสงที่ผิวของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสี่ข้อมไวแสง ( $\lambda$ )  
 F คือ จำนวนโฟตอนต่อหน่วยพื้นที่ และหน่วยเวลาที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์แบบสี่ข้อมไวแสง ( $\lambda$ )  
 q คือประจุอิเล็กตรอน  
 $n_{ext}$  คือประสิทธิภาพการรวบรวมพาหะในกรณีที่ผิวด้านรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสี่ข้อมไวแสงมีการสะท้อนแสง  
 d คือประสิทธิภาพการรวบรวมพาหะในกรณีที่ผิวด้านรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสี่ข้อมไวแสงไม่มีการสะท้อนแสง

### 2.14.1.3 ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (Open Circuit Voltage; $V_{oc}$ )

ถ้าเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในสภาพวงจรเปิด (Open Circuit) ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้เรียกว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดไฟฟ้าวงจรเปิด มีหน่วยเป็นโวลต์ (V) มีสัญลักษณ์เป็น  $V_{oc}$  สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 2.28

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left( \frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (2.28)$$

### 2.14.1.4 ฟิล์แฟกเตอร์ (Fill factor; $FF$ )

เป็นเอาต์พุตพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งคือ อัตราส่วนของพื้นที่ของ  $J_{max} \times V_{max}$  ต่อพื้นที่ของ  $J_{sc} \times V_{oc}$  มีสัญลักษณ์เป็น  $FF$  สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 2.29

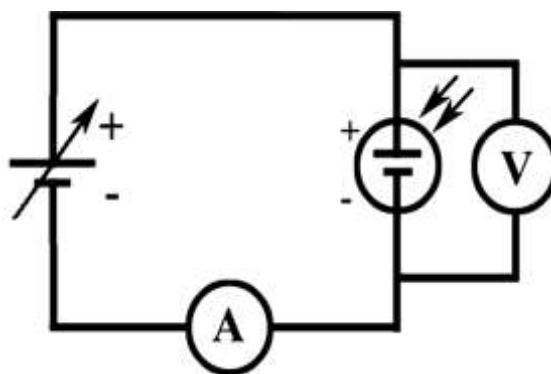
$$FF = \frac{J_{max} V_{max}}{J_{sc} V_{oc}} \quad (2.29)$$

การทราบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้นสามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ดังสมการที่ 2.30

$$\eta = \frac{J_{max} V_{max}}{P_{in}} = \frac{J_{sc} V_{oc} FF}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.30)$$

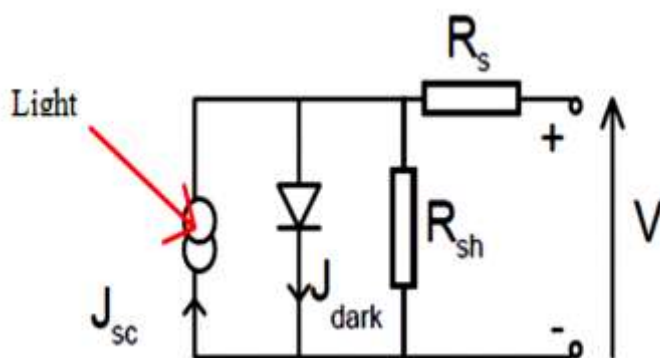
- เมื่อ  $P_{in}$  คือ ผลรวมของกำลังของแสงที่แผ่รังสีตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์  
 $J_{sc}$  คือ ความหนาแน่นกระแสแสงจรเปิด  
 $V_{oc}$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด  
 $J_{max}$  คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ทำให้มีกำลังสูงสุด  
 $V_{max}$  คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด

เมื่อทดสอบเซลล์ภายใต้เงื่อนไขค่ามวลอากาศ 1.5 (AM 1.5) โดยแสงมีความเข้มเท่ากับ 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร หรือ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร ตกกระทบบนตั้งฉากกับระนาบของเซลล์ซึ่งสามารถวัดค่ากระแสไฟฟ้า ( $J$ ) และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $V$ ) ตามวงจรการทดสอบค่าทางไฟฟ้า ( $J$ - $V$  Tester) ดังภาพที่ 2 -20



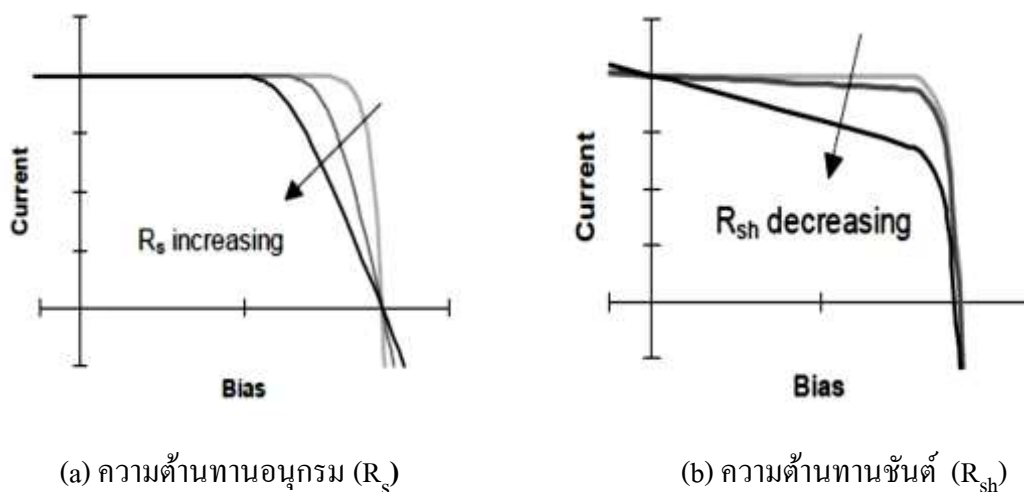
ภาพที่ 2 - 20 วงจรการทดสอบค่าทางไฟฟ้า (อชิบ เฟ็งพัด, 2553)

ในความเป็นจริงแล้วเซลล์แสงอาทิตย์มีการสูญเสียพลังงานอันเนื่องมาจากความต้านทานที่ผิวสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำกับสายล่อและการสูญเสียของกระแสอิเล็กตรอนแก่ขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น ดังนั้นต้องพิจารณาความต้านทานภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ ความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) และความต้านทานขนั้ด ( $R_{sh}$ ) ที่เรียกว่าวงจรมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังภาพที่ 2 - 21



ภาพที่ 2 - 21 วงจรมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ (Nelson, 2003)

สำหรับความต้านทานอนุกรมนั้นเกิดขึ้นเนื่องมาจากสารแต่ละชนิดมีค่าสภาพการนำกระแสไฟฟ้าที่ต่างกัน โดยเฉพาะที่ผิวของสารนั้นและเกิดขึ้นเนื่องมาจากรอยต่อระหว่างอนุภาคของสาร โดยความต้านทานนี้จะมีผลกระทบอย่างมากต่อเซลล์ที่มีกระแสไฟฟ้าสูง สำหรับความต้านทานขนั้ดนั้นเกิดจากการสูญเสียกระแสให้แก่ขั้วไฟฟ้าและบริเวณรอยต่อของสารที่มีขั้วต่างกัน ดังนั้นทั้งความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนั้ด มีผลทำให้ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ลดลง สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้องการประสิทธิภาพสูงจำเป็นต้องมีค่าความต้านทานอนุกรมน้อย ๆ และมีค่าความต้านทานขนั้ดมาก ๆ ซึ่งจะเป็นผลทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีค่าฟิลล์แฟกเตอร์มาก ดังภาพที่ 2 - 22



ภาพที่ 2 - 22 ผลของความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) และความต้านทานขนัณฑ์ ( $R_{sh}$ ) ต่อค่าฟิลล์แฟกเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ (Nelson, 2003)

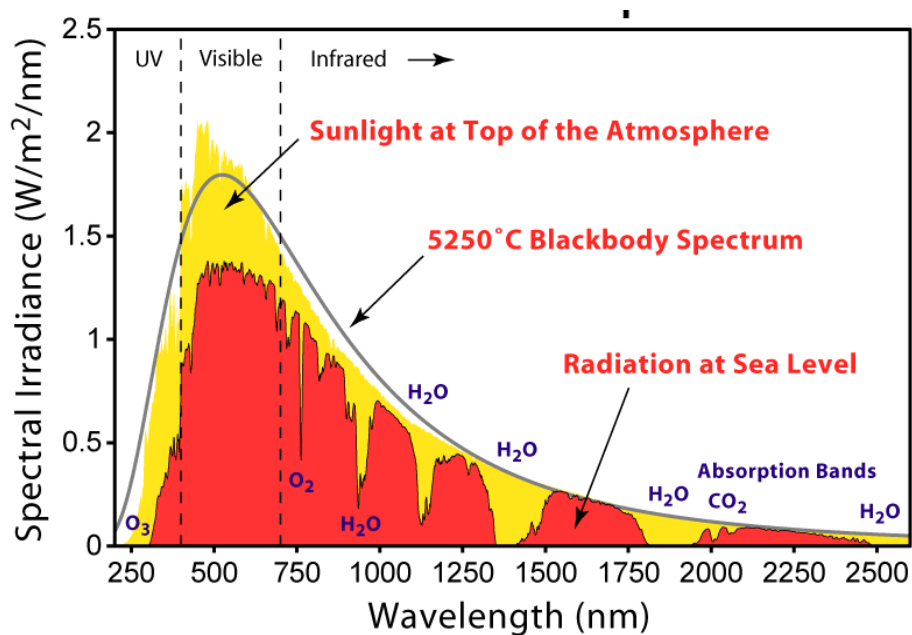
## 2.15 ค่ำมวลอากาศ (Air mass)

ปริมาณค่าคงของแสงอาทิตย์ (Solar constant) ที่วัดได้ในอากาศมีค่าเท่ากับ 1,365 วัตต์ต่อตารางเมตร ( $W/m^2$ ) เมื่อแสงอาทิตย์ผ่านชั้นบรรยากาศของโลก 30 เปอร์เซ็นต์ จะเกิดการสะท้อนกลับ และอีก 20 เปอร์เซ็นต์ จะถูกดูดกลืนด้วยเมฆ ฟุ้ง ก๊าซเรือนกระจก คาร์บอนไดออกไซด์และชั้น โอโซน เมื่อแสงอาทิตย์เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศเป็นระยะทางมากขึ้นความเข้มแสงก็จะลดลงเป็นลำดับ โดยตามทฤษฎีแล้วจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ส่งผลให้ในวันเดียวกันเราจะสังเกตเห็นความเข้มของแสงเปลี่ยนไปทั้งนี้ความเข้มของแสงจะมีค่ามากที่สุดเมื่อดวงอาทิตย์อยู่ตรงกลางฟ้าพอดีเราสามารถบอกลักษณะความเข้มของแสงได้ตามระยะทางที่แสงเดินทางผ่านบรรยากาศ โดยค่าความเข้มแสงที่สูงที่สุดสังเกตได้บนผิวโลกเรียกว่า ค่ำมวลอากาศ 1 (Air mass 1 = AM 1) ดังนั้นแสงอาทิตย์ที่ไม่ผ่านบรรยากาศโลกจะเรียกว่า ค่ำมวลอากาศ

เนื่องจากกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นสัดส่วน โดยตรงกับความเข้มแสง เมื่อความเข้มแสงสูงกระแสที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะสูงขึ้นในขณะที่แรงดันไฟฟ้าแทบจะไม่แปรตามความเข้มแสงมากนักแต่จะแปรตามอุณหภูมิ ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดค่าความเข้มแสงมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์คือ ความเข้มแสงที่วัดได้บนโลกในสภาพอากาศปลอดโปร่ง ปราศจากเมฆหมอก และวัดที่ระดับน้ำทะเลในสภาพที่แสงอาทิตย์ตั้งฉากกับพื้นโลก ซึ่งความเข้มของแสงมีค่าเท่ากับ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร ซึ่งเท่ากับค่ำมวลอากาศ 1.5



องค์กรเอเอสทีเอ็ม (American society for testing and materials; ASTM) เป็นองค์กรสากลที่ด้งขึ้นมาเพื่อดูแลและกำหนดมาตรฐานการทดสอบวัสดุ ผลิตภัณฑ์ ระบบและบริการ ได้กำหนดมาตรฐานความเข้มของสเปกตรัมของแสง ดังภาพที่ 2 - 23 โดยกำหนดให้ที่ขณะอากาศปลอดโปร่งปราศจากเมฆหรือหมอก วัดค่าความเข้มของแสงมีค่าเท่ากับ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร ซึ่งเท่ากับค่ามวลอากาศ 1.5 ที่ระดับน้ำทะเลในสภาพที่แสงอาทิตย์ตั้งฉากกับพื้น โลกเพื่อกำหนดสเปกตรัมแสงมาตรฐาน



ภาพที่ 2 - 23 สเปกตรัมของแสงมาตรฐานที่องค์กรเอเอสทีเอ็ม (ASTM) กำหนด (วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี, 2558)

## 2.16 รายงานการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ( $Zn_{1-x}Cd_xS$ ) และการประยุกต์ใช้

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ได้มีผู้สนใจศึกษาเป็นจำนวนมาก เนื่องจากเป็นสารที่มีอนุภาคระดับนาโนสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานต่างๆ ได้หลากหลาย ในปี ค.ศ. 2005 Kumar ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ซัลไฟด์ แคดเมียมซัลไฟด์ และซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์เพื่อนำมาประยุกต์ใช้สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบคอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมไดซัลไฟด์ ( $GICs_2$ ) พบว่า เซลล์แสงอาทิตย์แบบคอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมไดซัลไฟด์ที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ให้เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพเท่ากับ 7.95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งต่ำกว่าเมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบคอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมไดซัลไฟด์ที่เคลือบด้วยแคดเมียมซัลไฟด์ ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงถึง 8.75 เปอร์เซ็นต์ ปีถัดมา Ahandani & Yangjech (2010) ศึกษาวิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ที่กำหนดให้ค่าเอกซ์ (x) มีค่าตั้งแต่ 0 - 1 โดยอาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่างซิงค์อะซิเตต ( $Zn(AC)_2$ ) แคดเมียมอะซิเตต ( $Cd(AC)_2$ ) และไทโออะเซตาไมด์ (TAA) นำไปฉายรังสีไมโครเวฟ 6 นาที พบว่า อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ( $Zn_{0.8}Cd_{0.2}S$ ) จะให้ค่าการสลายตัวด้วยแสง (photocatalysis) และค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ (%yield) มากที่สุดเมื่อเทียบกับสัดส่วนโมลอื่น ๆ และเมื่อนำอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์มาตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า อนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลม มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมออยู่ในช่วง 100 - 300 นาโนเมตร บางส่วนเกิดการรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ และในปี ค.ศ. 2011 Wu et al. ได้ทำการศึกษาท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังหลายชั้น (multi-walled carbon nanotubes; MWCNTs) ที่หุ้มด้วยอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ซึ่งมีโครงสร้างแบบเวิร์ดไซต์ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางและโครงสร้างขนาดเล็ก เหมาะสำหรับการเตรียมเซเทอโรซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ที่คล้ายกับการเอาท่อเล็ก ๆ ซ้อนกันในท่อใหญ่หลาย ๆ ชั้น ( $Zn_{1-x}Cd_xS$  - MWCNTs) โดยการทำให้ปฏิกิริยาระหว่างซิงค์อะซิเตต แคดเมียมอะซิเตตและไทโออะเซตาไมด์ด้วยรังสีไมโครเวฟ จากนั้นนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) และโฟโตลูมิเนสเซน (photoluminescence) พบว่า ขนาดและโครงสร้างของซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่คล้ายกับการเอาท่อเล็ก ๆ ซ้อนกันในท่อใหญ่หลาย ๆ ชั้น ที่กำหนดให้เอกซ์ มีค่าเท่ากับ 0 0.2 0.5 0.8 และ 1 มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ขณะที่ความเข้มข้นของซิงค์แตกต่างกันแสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการดูดกลืนแสงในช่วงยูวี - วิสิเบิล (UV - Visible) ที่แตกต่างกัน และในปี พ.ศ. 2557 วิชริณี สว่างจันทร์ ศึกษาการสังเคราะห์

อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์โดยอาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่างซิงค์อะซิเตต แคดเมียมอะซิเตตและไทโออะเซตาไมด์ แล้วนำไปฉายรังสีไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 70 210 350 และ 490 วัตต์ ระยะเวลา 10 - 15 นาที จากนั้นนำมาตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาและวิเคราะห์ปริมาณของธาตุที่เหลืออยู่ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยรังสีเอกซ์ (Energy dispersive x - ray spectrometer; EDX) พบว่าอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่ได้มีขนาดอนุภาคประมาณ 200 - 300 นาโนเมตร จากนั้นนำมาทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียชนิดเอสเชอริเชีย โคลิ (*Escherichia coli*; *E. coli*) หลังจากได้รับการฉายด้วยแสงยูวี - ซี (UV - C) พบว่า อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์โดยการฉายรังสีไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 490 วัตต์ แสดงคุณสมบัติเป็นตัวยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียชนิดเอสเชอริเชีย โคลิ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 2.17 รายงานการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ใช้สารกึ่งตัวนำและสีย้อมชนิดต่าง ๆ

ปัจจุบันมีการศึกษาและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมากเนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งของพลังงานทดแทนที่สามารถเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง เป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่สะอาดและไม่สร้างมลภาวะขณะใช้งาน รวมถึงไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม ในปี พ.ศ. 2546 พงศธร อมรพิทักษ์สุขและนราธิภรณ์ หลีสกุล ศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงโดยอาศัยหลักการทำงานที่คล้ายกับการสังเคราะห์แสงของพืชโดยมีตัวเซนซิไทเซอร์ทำหน้าที่ดูดกลืนแสงและส่งผ่านไปยังสารกึ่งตัวนำของโลหะออกไซด์พบว่าสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะที่นิยมกับลิแกนด์ในกลุ่ม โพลีพรีดีให้ประสิทธิภาพของเซลล์สูงที่สุดประมาณร้อยละ 10 ที่มวลอากาศ เท่ากับ 1.5 ต่อมาในปี ค.ศ. 2004 Green ได้พัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงโดยมีแคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) เป็นสารกึ่งตัวนำแทนการใช้สารกึ่งตัวนำพวกอะมอร์ฟัสซิลิกอน เนื่องจากมีช่องว่างพลังงาน (Band gap) เท่ากับ 1.5 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งทำให้มีประสิทธิภาพสูงถึง 16 เปอร์เซ็นต์ แต่จุดด้อยของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้คือ การใช้แคดเมียมซึ่งเป็นโลหะที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม จึงได้มีการพัฒนาโดยการใช้คอปเปอร์อินเดียมแกเลียมเซลีนไนด์ แทนการใช้แคดเมียมพบว่า ให้ประสิทธิภาพสูงถึง 18.8 เปอร์เซ็นต์ แต่มีราคาที่สูงกว่าการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้พลังงานเชื้อเพลิงในปัจจุบัน ต่อมา Schmidt - Mende et al. (2005) ได้ทำการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงชนิดที่มีลักษณะเป็นแบบของแข็ง (Solid - state) ที่ย้อมด้วยสีย้อม D 102 มีพอลิไทรเฮกซิลไทโอฟีน (Poly (3 - hexylthiophene); P3HT) เป็นสารส่งผ่านประจุและใช้ทอง

เป็นข้าวแกนเตอร์อเล็กโทรดพบว่า ให้ประสิทธิภาพเท่ากับ 2.65 เปอร์เซ็นต์ ต่อมา Hao et al. (2006) ได้รายงานผลของการนำข้าวเหนียวดำ (black rice) ดอกปาริฉัตร ดอกโรซาแซนทีนา (Rosa xanthina) ฟริก และสาหร่ายทะเล มาสกัดด้วยแอลกอฮอล์โดยใช้วิธีโครมาโทกราฟีเพื่อใช้เป็นสีย้อมสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงพบว่า สีย้อมจากข้าวเหนียวดำให้ประสิทธิภาพดีที่สุดเนื่องจากข้าวเหนียวดำมีสารแอนโทไซยานิน (Anthocyanin) ซึ่งเป็นสารที่สามารถยึดเกาะฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ได้ดี จึงทำให้มีประสิทธิภาพดีที่สุดและในปีเดียวกันนั้น Chiba et al. (2006) ได้ศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่เคลือบฟิล์มด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ ที่ระดับความหนาแตกต่างกัน นำมาทดสอบในสภาวะที่มีแสงและไม่มีแสงพบว่า แสงที่ตกกระทบมายังเซลล์แสงอาทิตย์มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้า แต่จะลดลงในช่วงที่ไม่มีแสง โดยเฉพาะอย่างยิ่งแสงที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นใกล้กับช่วงอินฟราเรดสามารถแปลงประสิทธิภาพได้เท่ากับ 11.1 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าความหนาชั้นไททาเนียมไดออกไซด์ที่เป็นขั้วไฟฟ้ามีผลต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง ถัดมาในปี พ.ศ. 2550 ทวนทอง ธนนิมิต ได้ทำการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมจากคลอโรฟิลล์ของใบมะนาว เพื่อใช้สำหรับเป็นตัวเซนซิไทเซอร์ โดยสร้างขึ้นมา 3 ชนิด แต่ละชนิดจะแตกต่างกันที่การเลือกใช้สารอิเล็กโทรไลต์โดยชนิดที่ 1 ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ชนิดที่ 2 ใช้ไอโอดีน (I<sub>2</sub>) และชนิดที่ 3 ใช้เหล็กคลอไรด์ (FeCl<sub>3</sub>) และทำการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นกับค่าการส่องสว่าง 1,000 ลักซ์ (Lux) และ 0 ลักซ์ พบว่า เซลล์ที่ใช้สารอิเล็กโทรไลต์ชนิดที่ 2 ให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดสูงสุดเท่ากับ 93.5 และ 273 มิลลิโวลต์ (mV) ตามลำดับ และพบว่า ได้ประสิทธิภาพเท่ากับ  $1.2259 \times 10^{-5}$  เปอร์เซ็นต์ ต่อมา Lee et al. (2007) ได้ศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่เทียบกับพื้นที่ขนาดมาตรฐานด้วยเทคนิคการสกรีนปรินต์ติ้ง (Screen printing) ตามรูปแบบของเซลล์แสงอาทิตย์มาตรฐานพบว่า พื้นที่ที่มีขนาดใหญ่เท่ากับ 5 x 5 ตารางเซนติเมตร สามารถแปลงพลังงานได้เพียง 5.52 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเซลล์ที่มีพื้นที่ขนาดมาตรฐานสามารถแปลงพลังงานได้มากกว่าเท่ากับ 6.16 เปอร์เซ็นต์ ถัดมาในปี พ.ศ. 2551 สรรเพชญ์ นิลผาย ได้ศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงโดยใช้ผงซิงก์ออกไซด์ เส้นเชื่อมขั้วนาโนซิงก์ออกไซด์ และซิงก์ออกไซด์นาโนเตตระพอด เป็นชั้นสารกึ่งตัวนำที่เตรียมด้วยวิธีปฏิบัติกรยาออกซิเดชันพบว่า เซลล์ที่เคลือบด้วยผงซิงก์ออกไซด์จะมีค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด ค่าฟิล์มเพกเตอร์ และเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สูงที่สุดเท่ากับ 1.25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร 0.45 โวลต์ 0.65 และ 0.68 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในปีเดียวกันนั้น Ito et al. (2008) ศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงโดยใช้เทคนิคการเคลือบฟิล์มไททาเนียม

ไดออกไซด์แบบขั้นต่อขั้น (step - by - step) ด้วยวิธีสกรีนปรินต์ตั้งที่มีความหนาฟิล์มประมาณ 12 - 14 ไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ ) สำหรับเป็นขั้วไฟโตอิเล็กโทรด เพื่อนำมาทดสอบการกระเจิงแสงของฟิล์มไททานเนียมไดออกไซด์ที่มีต่อสิ่งประดิษฐ์โดยทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อนำมาผลิตในเชิงการค้าพบว่า เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพสูงมากกว่าถึง 10 เปอร์เซ็นต์ ต่อมาชวณพิศ คณะพัฒนา (2552) ศึกษาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ใช้สีย้อมจากเปลือกไม้ 5 ชนิด ได้แก่ เปลือกกระโดน (Tummy - wood's bark) เปลือกเขลงหรือเก็ง (Velvet tamarind's bark) เปลือกสะเดา (Neem's bark) เปลือกมะม่วง (Mango's bark) และเปลือกประคู้ (Burma padauk's bark) เป็นตัวเซนซิไทเซอร์พบว่า ค่าฟิลล์แฟกเตอร์และเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเปลือกเขลงมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 0.45 และ 2.52 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในปีเดียวกันนั้น Han et al. (2009) ได้พัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่มีลักษณะเป็นแบบของแข็งด้วยเทคนิคการปิดช่องว่างนาโนด้วยแรงดันสุญญากาศต่ำ (Low vacuum nanopore filling) โดยมีโพลีเอททิลีนออกไซด์ (poly ethylene oxide; PEO)/โพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (poly vinylidene fluoride; PVDF) เป็นสารส่งผ่านประจุของระบบและใช้แพลทินัมเป็นขั้วแคโทดรีเล็กโทรดแล้วนำมาทดสอบประสิทธิภาพพบว่า มีประสิทธิภาพเท่ากับ 3.65 เปอร์เซ็นต์ ต่อมา Kashyout et al. (2010) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงโดยใช้ไททานเนียมไดออกไซด์ที่มีลักษณะโครงสร้างอนุภาคระดับนาโน (Nano - sized) ที่เตรียมด้วยวิธีโซลเจล (Sole - gel) นำมาอบด้วยความร้อน (Autoclaving) ที่อุณหภูมิแตกต่างกันและนำมาทดสอบประสิทธิภาพกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงพบว่า ตัวอย่างที่อบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 450 องศาเซลเซียส มีเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพสูงถึง 8.5 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ตัวอย่างที่อบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 250 องศาเซลเซียส มีเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพเท่ากับ 7.29 เปอร์เซ็นต์ และในปีเดียวกันนั้น Park (2010) ศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่มีโครงสร้างของเซลล์ประกอบด้วยชั้นฟิล์มไททานเนียมไดออกไซด์ที่มีลักษณะโครงสร้างแบบนาโนคริสตัลไลน์ (Nanocrystalline) แล้วย้อมด้วยสารไวแสง มีไอโอดีนเป็นสารอิเล็กโทรไลต์และมีแพลทินัมเป็นขั้วแคโทดรีเล็กโทรด นำมาทดสอบการกระเจิงแสงของเซลล์เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพพบว่า ฟิล์มไททานเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบอยู่ด้านบนเพื่อเป็นตัวรับแสงต้องมีขนาดอนุภาคเป็นแบบไมครอน (Micron - sized) เพื่อลดการกระเจิงแสงของเซลล์ทำให้ได้ประสิทธิภาพโดยรวมของเซลล์เท่ากับ 11 เปอร์เซ็นต์ ในปีถัดมาจางงัก บุนยอลอยและสุริชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ (2554) ศึกษาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงโดยเทคนิคการสกรีนเพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าพบว่า ความหนาของฟิล์มไททานเนียมไดออกไซด์มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงเมื่อผ่านการทดสอบภายใต้แสงอาทิตย์ค่ามวลอากาศเท่ากับ 1.5 ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์แบบ

สีย้อมไวแสงจะมีประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีความหนาของฟิล์มเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) ความหนาของฟิล์มที่ดีที่สุดคือ (15.72 ไมโครเมตร) ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ได้มีค่าเท่ากับ 3.28 เปอร์เซ็นต์ (โดยมีค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรเท่ากับ 7.31 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเท่ากับ 0.73 โวลต์ และค่าฟิลล์แฟกเตอร์เท่ากับ 0.61) ปีเดียวกันนั้น สุธรรค์ แสนทวีสุข ศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่มีไททานเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบเป็นชั้นสารกึ่งตัวนำ และเคลือบด้วยสารอิเล็กโทรไลต์ที่มีลักษณะเป็นแบบกึ่งของแข็ง 4 ชนิด ประกอบด้วย 1 2 4 5 - เตตระบรอมโทลีน (Tetrakisbromomethyl benzene; TB) บิวทีโรแลคโตน (Butyrolactone; GBL) โพรพิลีนคาร์บอเนต (Propylene carbonate; PC) และเอทิลีนคาร์บอเนต (Ethylene carbonate; EC) พบว่า สามารถแปลงประสิทธิภาพได้เท่ากับ 0.052 0.123 0.121 และ 0.125 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และพบว่า การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงด้วยอิเล็กโทรไลต์ที่มีลักษณะเป็นแบบกึ่งของแข็งมีประสิทธิภาพดีกว่าสารอิเล็กโทรไลต์ที่มีลักษณะเป็นแบบของเหลว ในปีเดียวกันนั้น รัฐพงษ์ นาคาไชยและคณะ ได้ศึกษาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ประกอบด้วยกระจกนำไฟฟ้า 2 แผ่น ประกบกัน โดยกระจกแผ่นแรกจะนำมาเคลือบด้วยสารกึ่งตัวนำไททานเนียมไดออกไซด์ และแผ่นที่สองจะเคลือบด้วยแพลทินัมใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์คือ ไอโอดีน และย้อมด้วยสีย้อมอินทรีย์พบว่า มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าประมาณ 0.63 โวลต์ จากนั้นศึกษาการสร้างและการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากพืชในประเทศไทย โดยใช้คลอโรฟิลล์ของพืชเป็นตัวดูดกลืนแสงเพื่อเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าแต่ประสิทธิภาพที่ได้ยังมีประสิทธิภาพที่ต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ใช้สีย้อมได้จากสังเคราะห์ทางเคมี ในปีเดียวกันนี้ กิรติ ทองร่วงและณัฐภัทร์ เสงี่ยมชัย ได้ศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงด้วยสีธรรมชาติที่สกัดจากไพลพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของมวลผงไพลเป็น 15 - 20 กรัม จะได้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ความเป็นกรด - เบสของสีสกัดไพลต่อกำลังไฟฟ้าสูงสุดพบว่า กำลังไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อมีค่าพีเอช (pH) 7.00 - 9.45 ต่อมา Wang et al. (2011) ได้ศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่มีลักษณะเป็นแบบของแข็งที่ย้อมด้วยสีย้อม D 102 และมีพอลิไตรเฮกซิลไทโอฟีน (P3HT) เป็นสารส่งผ่านประจุ (Hole transporter) และใช้คาร์บอนเป็นขั้วแคโทดอิเล็กโทรด โดยเซลล์ที่สร้างขึ้นจะมีลักษณะเป็นแบบของแข็งทั้งหมดพบว่า มีประสิทธิภาพเท่ากับ 3.11 เปอร์เซ็นต์ และในปีเดียวกันนั้น Zhang et al. (2011) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่มีลักษณะเป็นแบบของแข็ง ที่ย้อมด้วยสีย้อม D 131 โดยมีพอลิไตรเฮกซิลไทโอฟีนเป็นตัวส่งผ่านประจุพบว่า ประสิทธิภาพของเซลล์ที่สร้างขึ้นได้เท่ากับ 3.85 เปอร์เซ็นต์ ในปีถัดมา วลัยชัย พรหมโนภาส (2555) ได้ทำการสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำ

บริสุทธิ์ชนิดพีและชนิดเอ็น ได้แก่ แคดเมียมซัลไฟด์ แคดเมียมเทลลูไรด์ ซิงค์เทลลูไรด์ (ZnTe) และซิงค์ออกไซด์ (ZnO) จากปฏิกิริยาของของแข็งด้วยเทคนิคไมโครเวฟพลาสมา ซึ่งเป็นสารที่มีแถบพลังงานชนิดแบบตรง ซึ่งมีความกว้างของช่องว่างพลังงานสอดคล้องกับความยาวคลื่นแสง ดังนั้นจึงมีความสำคัญต่อการนำมาประยุกต์ใช้พบว่า เมื่อผสมแคดเมียมเทลลูไรด์ที่ 0.10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักลงในสารอิเล็กโทรไลต์แบบเจล จะให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงสูงสุดที่ 0.093 เปอร์เซ็นต์ และหากผสมซิงค์เทลลูไรด์ที่ 0.20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ลงในสารอิเล็กโทรไลต์แบบเจลจะให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงสูงสุดเท่ากับ 0.318 เปอร์เซ็นต์ ต่อมาเถกิงศักดิ์ ชูโตสง (2555) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง โดยมีซิงค์ออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำและนำมาเชื่อมด้วยสีย้อมธรรมชาติที่สกัดได้จากพืชท้องถิ่นของประเทศไทยพบว่า อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เชื่อมด้วยสีย้อมธรรมชาติที่สกัดได้จากลูกกระดุกอึ้งให้ประสิทธิภาพที่สูงที่สุดเท่ากับ 0.14 เปอร์เซ็นต์ ในบรรดาสีย้อมจากพืชที่ใช้ทั้งหมด ในปีเดียวกันนั้น Shi et al. (2012) ได้ทำการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่มีลักษณะเป็นของแข็งด้วยเทคนิคเดียวกับ Han et al. (2009) ที่พัฒนาในปี ค.ศ. 2009 แต่เพิ่มขนาดของพื้นที่เซลล์ที่ใหญ่ขึ้นและมีองค์ประกอบภายในเซลล์เป็นแบบเดียวกันพบว่า ให้ประสิทธิภาพเท่ากับ 2.57 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้อยกว่าการพัฒนาของ Han et al. (2009) และในปีเดียวกันนั้น Lin et al. (2012) ศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่มีความสามารถในการโค้งงอเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยมีฟิล์มที่เคลือบเป็นชั้นสารกึ่งตัวนำพวกซิงค์ออกไซด์นาโนรอด (ZnO nanorods) เป็นชั้นแรก และมีอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เคลือบเป็นชั้นที่ 2 ซึ่งแต่ละชั้นจะมีความหนาประมาณ 6 ไมโครเมตร จากนั้นนำมาเคลือบลงบนไททานเนียมฟลอยด์เพื่อเป็นขั้วโพโตอิเล็กโทรด และเคลือบแพลทินัมลงบนกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบผิวด้วยสารอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) เพื่อเป็นขั้วแคโทดอิเล็กโทรด สามารถแปลงพลังงานได้เท่ากับ 2.19 เปอร์เซ็นต์ ต่อมา Xu et al. (2013) ได้ทำการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่มีลักษณะเป็นแบบของแข็ง โดยใช้คาร์บอนเป็นขั้วแคโทดอิเล็กโทรด เนื่องจากมีต้นทุนราคาการผลิตที่ต่ำ ใช้สไปโร โอมิเทด (spiro - OMeTAD) เป็นตัวส่งผ่านประจุที่มีลักษณะเป็นแบบการผสมเข้าด้วยกันคือ แคโทดอิเล็กโทรด/ตัวส่งผ่านประจุ/แคโทดอิเล็กโทรด (CE/HTM/CE) ซึ่งโครงสร้างของขั้วแคโทดอิเล็กโทรดลักษณะนี้จะสามารถช่วยลดความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ได้พบว่า ให้ประสิทธิภาพสูงกว่า 4.03 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่มีลักษณะเป็นแบบของแข็งทั่วไปที่มีขั้วแคโทดอิเล็กโทรดเป็นแพลทินัม ในปีถัดมา Xue et al. (2014) ได้ศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่มีลักษณะเป็นแบบของแข็งที่เชื่อมด้วยสีย้อม D 102 และเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ที่มี

ลักษณะเป็นโซลเจลที่ตกลงไปด้วยเทคนิคสเปรย์ไพโรลิซิส (Spray pyrolysis) จะทำให้เซลล์เกิดความโปร่งแสงและทนต่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเผาได้มากขึ้นพบว่า มีประสิทธิภาพโดยรวมเท่ากับ 1.2 เปอร์เซ็นต์

จากรายงานการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ใช้สารกึ่งตัวนำและสีย้อมชนิดต่าง ๆ ดังกล่าวที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่า เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงสามารถใช้เป็นอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ใช้ในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นกระแสไฟฟ้าและสามารถนำมาเป็นพลังงานทดแทนการใช้วัตถุดิบเชื้อเพลิงต่าง ๆ ที่นำมาผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งอาจหมดสิ้นไปในอนาคตข้างหน้าต่อไปได้ ดังนั้นจึงต้องได้รับการศึกษาค้นคว้า วิจัยและพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ต่อไป



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

##### 3.1.1 เครื่องมือ

- 3.1.1.1 เครื่องทำความสะอาดความถี่สูง (Ultrasonic cleaner); รุ่น SONICA 5300 EP ผลิตโดยบริษัท Vitronics soltec ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.1.2 เครื่องลดขนาดของอนุภาคความถี่สูง (High intensity ultrasonic processor); รุ่น VCX 500 750 ผลิตโดยบริษัท Sonic ผลิตโดยบริษัท Sonics & Materials Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.1.3 เครื่องเขย่าสาร (Vortex mixer GENIE 2); รุ่น G560E ผลิตโดยบริษัท Scientific industries, Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.1.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field emission scanning electron microscope; FESEM); รุ่น SU 8030 ผลิตโดยบริษัท Hitachi high - technologies corporation ประเทศญี่ปุ่น
- 3.1.1.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope; TEM); รุ่น Tecnai 20 ผลิตโดยบริษัท FEI ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.1.6 เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางแสงของสาร (UV - Vis - NIR spectrophotometer); รุ่น Cary 5000 ผลิตโดยบริษัท Agilent technologies. ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.1.7 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X - ray diffraction; XRD); รุ่น D8 advance ผลิตโดยบริษัท Bruker axs ประเทศเยอรมัน
- 3.1.1.8 เครื่องวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์หรือเซลล์แสงอาทิตย์จำลอง (Solar simulator); รุ่น SN 258 ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.1.9 เครื่องเคลือบฟิล์มบางแบบพาสารด้วยการระเหยอย่างรวดเร็วในสุญญากาศ (Rapid convective deposition); รุ่น Ezi - SERVO EzM42L - A ผลิตโดยบริษัท FASTECH AMERICA LLC. ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.1.10 ไมโครปิเปต (Micropipette) ขนาด 10 200 และ 1,000 ไมโครลิตร; รุ่น Eppendorf pipettors ผลิตโดยบริษัท Sigma - Aldrich. ประเทศสหรัฐอเมริกา

- 3.1.1.11 ปิเปตคอนโทรลเลอร์ (Pipette controller); รุ่น Midi plus pipette controller  
ผลิตโดยบริษัท Pipette supplies Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.1.12 เครื่องมิลลิ่ง (Micro miller) สำหรับเจาะกระจก; รุ่น MF70 ผลิตโดย  
บริษัท Proxxon tool ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.1.13 เครื่องชั่งไฟฟ้าเชิงวิเคราะห์ ทศนิยม 5 ตำแหน่ง; รุ่น XP - 105 ผลิตโดย  
บริษัท Mettler - toled AG 2006. ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
- 3.1.1.14 เครื่องเป่าลมร้อน (Heat gun); รุ่น HG 6003 ผลิตโดยบริษัท MAKITA  
Industrial power tools. ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.1.15 เครื่องตัดกระจก; ยี่ห้อ Cuttermate ผลิตโดยบริษัท Dolphin logistics Inc.  
ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.1.16 เตาเผาอุณหภูมิสูง (Muffle furnace); รุ่น CWF11/13/301 ผลิตโดยบริษัท  
Fisher scientific. ประเทศอังกฤษ
- 3.1.1.17 เครื่องกวนสาร (Hotplate stirrer); รุ่น C - MAG HS10 ผลิตโดยบริษัท  
Sigma - Aldrich. ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.1.18 ชุดกรองสุญญากาศ (Vacuum pumps); รุ่น DOA - P504 - NB ผลิตโดย  
บริษัท Gast manufacturing, INC. ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.1.19 เตาไมโครเวฟ (Microwave oven); รุ่น Sharp r3556 ผลิตโดยบริษัท ชาร์พ  
แอฟพลายแอนซ์ จำกัด ประเทศไทย

### 3.1.2 อุปกรณ์

- 3.1.2.1 กระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (Fluorine  
doped tin oxide; FTO); ยี่ห้อ Pilkington glass ผลิตโดยบริษัท Pilkington group  
limited ประเทศอังกฤษ
- 3.1.2.2 แผ่นพาราฟิล์ม; ยี่ห้อ Parafilm M Laboratory Film ผลิตโดยบริษัท Ted pella  
Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.2.3 กระจกสไลด์ (Glass slide); ยี่ห้อ Marienfeld glass slide ผลิตโดยบริษัท  
Marienfeld - superior ประเทศเยอรมัน
- 3.1.2.4 กระดาษคิมไวปัส (Kimwipes); ยี่ห้อ Kimtech ผลิตโดยบริษัท Kimberly -  
clark professional. ประเทศสหรัฐอเมริกา

- 3.1.2.5 เทปกาวขุ่น; ยี่ห้อ Scotch magic tape 810 ผลิตโดยบริษัท 3M Scotch ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.2.6 เทปกาวกันความร้อนการกักร้อน (Kapton tape); ยี่ห้อ Kapton tape GT ผลิตโดยบริษัท Dupont ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.2.7 Surlyn; ผลิตโดยบริษัท Custom product ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.2.8 อลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminium foil); ยี่ห้อ Diamond
- 3.1.2.9 ขวดแก้วแบ่งสารขนาด 20 และ 30 มิลลิลิตร
- 3.1.2.10 อ่างแก้วสำหรับย้อมสีเซลล์ (Staining jar)

### 3.1.3 สารเคมี

- 3.1.3.1 ซิงค์อะซิเตท (Zinc acetate); สูตรทางเคมี  $(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2\text{Zn}$  ความบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักโมเลกุล 183.48 กรัมต่อโมล (g/mol) ผลิตโดยบริษัท Ajax frinchem pty Ltd. ประเทศออสเตรเลีย
- 3.1.3.2 แคดเมียมอะซิเตท (Cadmium acetate); สูตรทางเคมี  $\text{Cd}(\text{OCOCH}_3)_2$  ความบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักโมเลกุล 230.50 กรัมต่อโมล ผลิตโดยบริษัท Asia pacific specialty chemical limited. ประเทศออสเตรเลีย
- 3.1.3.3 โพลีไวนิลไพโรลิโดน (Polyvinylpyrrolidone, PVP); สูตรทางเคมี  $(\text{C}_6\text{H}_9\text{NO})_n$  ผลิตโดยบริษัท Sigma - Aldrich. ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.3.4 กรดซิตริก (Citric acid); สูตรทางเคมี  $\text{HOC}(\text{COOH})(\text{CH}_2\text{COOH})_2$  ความบริสุทธิ์ 99.0 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักโมเลกุล 192.12 กรัมต่อโมล ผลิตโดยบริษัท Sigma - Aldrich. ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.3.5 ไทโออะเซตามิด (Thioacetamide); สูตรทางเคมี  $\text{CH}_3\text{CSNH}_2$  ความบริสุทธิ์ 99.0 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักโมเลกุล 75.13 กรัมต่อโมล ผลิตโดยบริษัท Sigma - Aldrich. ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.3.6 ไททานเนียมไดออกไซด์ อนาเทส (Titanium (IV) oxide anatase); สูตรทางเคมี  $\text{TiO}_2$  (ขนาดอนุภาค < 25 นาโนเมตร) ความบริสุทธิ์ 99.7 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักโมเลกุล 79.87 กรัมต่อโมล ผลิตโดยบริษัท Sigma - Aldrich. ประเทศสหรัฐอเมริกา

- 3.1.3.7 ไททาเนียมไอโซพรอกไซด์ (Titanium (IV) isopropoxide); สูตรทางเคมี  $(\text{Ti}(\text{OCH}(\text{CH}_3)_2)_4$  ความบริสุทธิ์ 97 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักโมเลกุล 284.22 กรัมต่อโมล ผลิตโดยบริษัท Sigma - Aldrich. ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.3.8 ไททาเนียมบิวโทออกไซด์ (Titanium (IV) butoxide); สูตรทางเคมี  $\text{Ti}(\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3)_4$  ความบริสุทธิ์ 97 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักโมเลกุล 340.32 กรัมต่อโมล ผลิตโดยบริษัท Sigma - Aldrich. ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.3.9 เอทิลอะซิโตอะซิเตท (Ethyl Acetoacetate); สูตรทางเคมี  $\text{CH}_3\text{COCH}_2\text{COOC}_2\text{H}_5$  ความบริสุทธิ์ 98 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักโมเลกุล 130.14 กรัมต่อโมล ผลิตโดยบริษัท Sigma - Aldrich. ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.3.10 อะซิติกอะซิโตน (Acetyl acetone 2 4 Pentanedione); สูตรทางเคมี  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COCOCH}_3$  ความบริสุทธิ์ 97 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักโมเลกุล 100.12 กรัมต่อโมล ผลิตโดยบริษัท Sigma - Aldrich. ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.3.11 ไบอะซิติก ไตรอะซิติก (2 3 Butanedione); สูตรทางเคมี  $\text{CH}_3\text{COCOCH}_3$  ความบริสุทธิ์ 97 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักโมเลกุล 86.09 กรัมต่อโมล ผลิตโดยบริษัท Sigma - Aldrich. ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.3.12 เอทานอลแอบโซลูทแอลกอฮอล์ (Ethanol absolute alcohol); สูตรทางเคมี  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$  ความบริสุทธิ์ 99.5 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักโมเลกุล 46.07 กรัมต่อโมล ผลิตโดยบริษัท Sigma - Aldrich. ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.3.13 ไอโซโพรพานอลแอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol หรือ 2 - Propanol); สูตรทางเคมี  $(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$  ความบริสุทธิ์ 99.7 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักโมเลกุล 60.10 กรัมต่อโมล ผลิตโดยบริษัท Sigma - Aldrich. ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.3.14 บิวทิลแอลกอฮอล์ (Butyl alcohol); สูตรทางเคมี  $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$  ความบริสุทธิ์ 99.5 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักโมเลกุล 74.12 กรัมต่อโมล ผลิตโดยบริษัท Sigma - Aldrich. ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.3.15 เตอร์ทิวทิลแอลกอฮอล์ (Tertbutyl alcohol); สูตรทางเคมี  $(\text{CH}_3)_3\text{COH}$  ความบริสุทธิ์ 99.7 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักโมเลกุล 74.12 กรัมต่อโมล ผลิตโดยบริษัท Sigma - Aldrich. ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.3.16 บิวทานอลแอลกอฮอล์ (2 - Butanol alcohol); สูตรทางเคมี  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$  ความบริสุทธิ์ 99.5 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักโมเลกุล 74.12 กรัมต่อโมล ผลิตโดยบริษัท Sigma - Aldrich. ประเทศสหรัฐอเมริกา

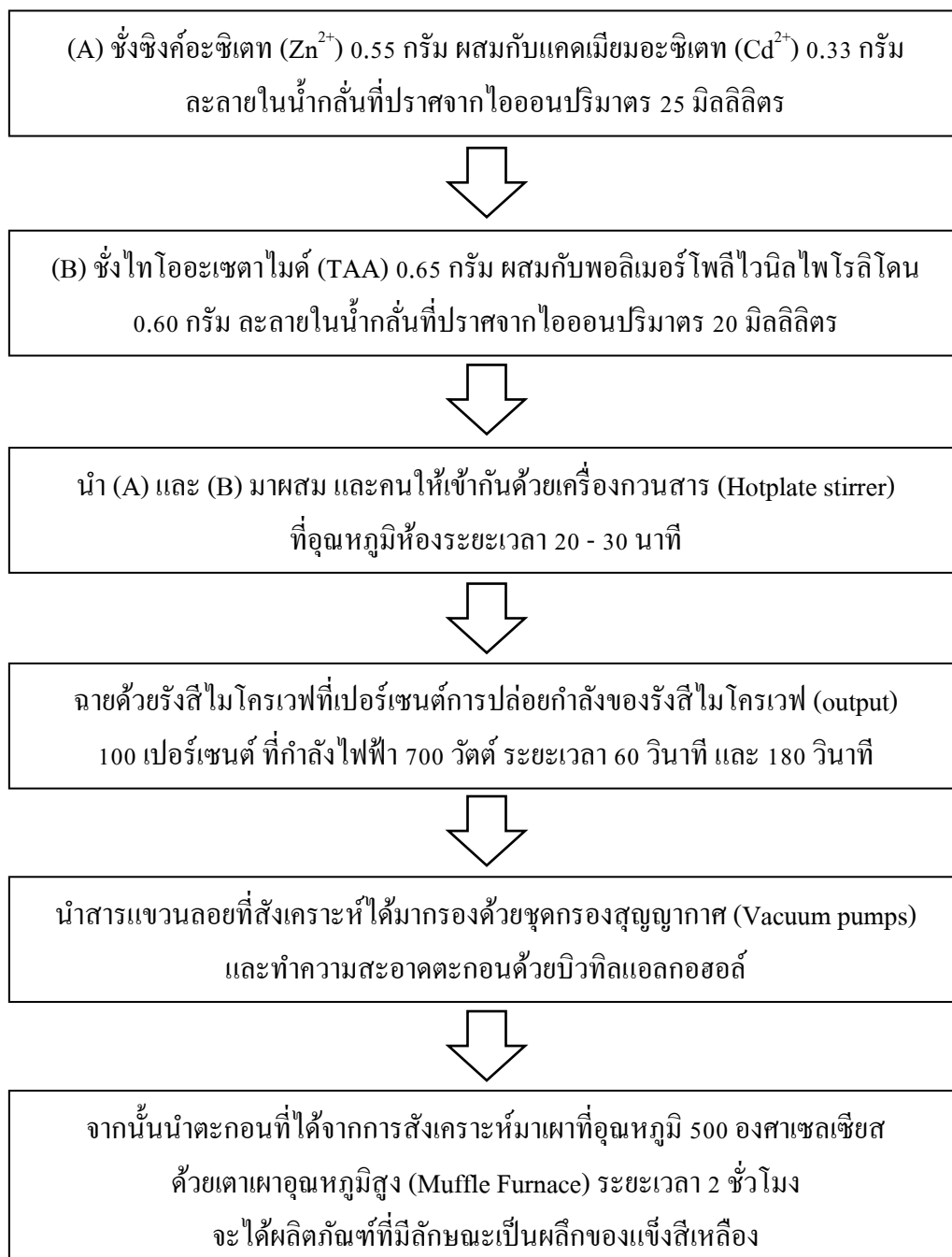
- 3.1.3.17 อะซิโตไนล์แอนไฮไดรอส (Acetonitrile anhydrous); สูตรทางเคมี (CH<sub>3</sub>CN) ความบริสุทธิ์ 99.8 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักโมเลกุล 41.05 กรัมต่อโมล ผลิตโดยบริษัท Sigma - Aldrich. ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.3.18 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid); สูตรทางเคมี HCl ความบริสุทธิ์ 37 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักโมเลกุล 36.46 กรัมต่อโมล ผลิตโดยบริษัท Sigma - Aldrich. ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.3.19 สารรูทีโนเซออร์ (Ruthenizer 535 - bisTBA Dye N 719); ผลิตโดยบริษัท Solaronix ประเทศสวีตเซอร์แลนด์
- 3.1.3.20 สารไอโอดไลต์ (Iodolyte HI - 30 Solvent - based electrolytes); ผลิตโดยบริษัท Solaronix ประเทศสวีตเซอร์แลนด์
- 3.1.3.21 แพลทีซอล (Platisol); ผลิตโดยบริษัท Solaronix ประเทศสวีตเซอร์แลนด์
- 3.1.3.22 น้ำกลั่น (De - ionized water)

## 3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

### 3.2.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ (Zn<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>S)

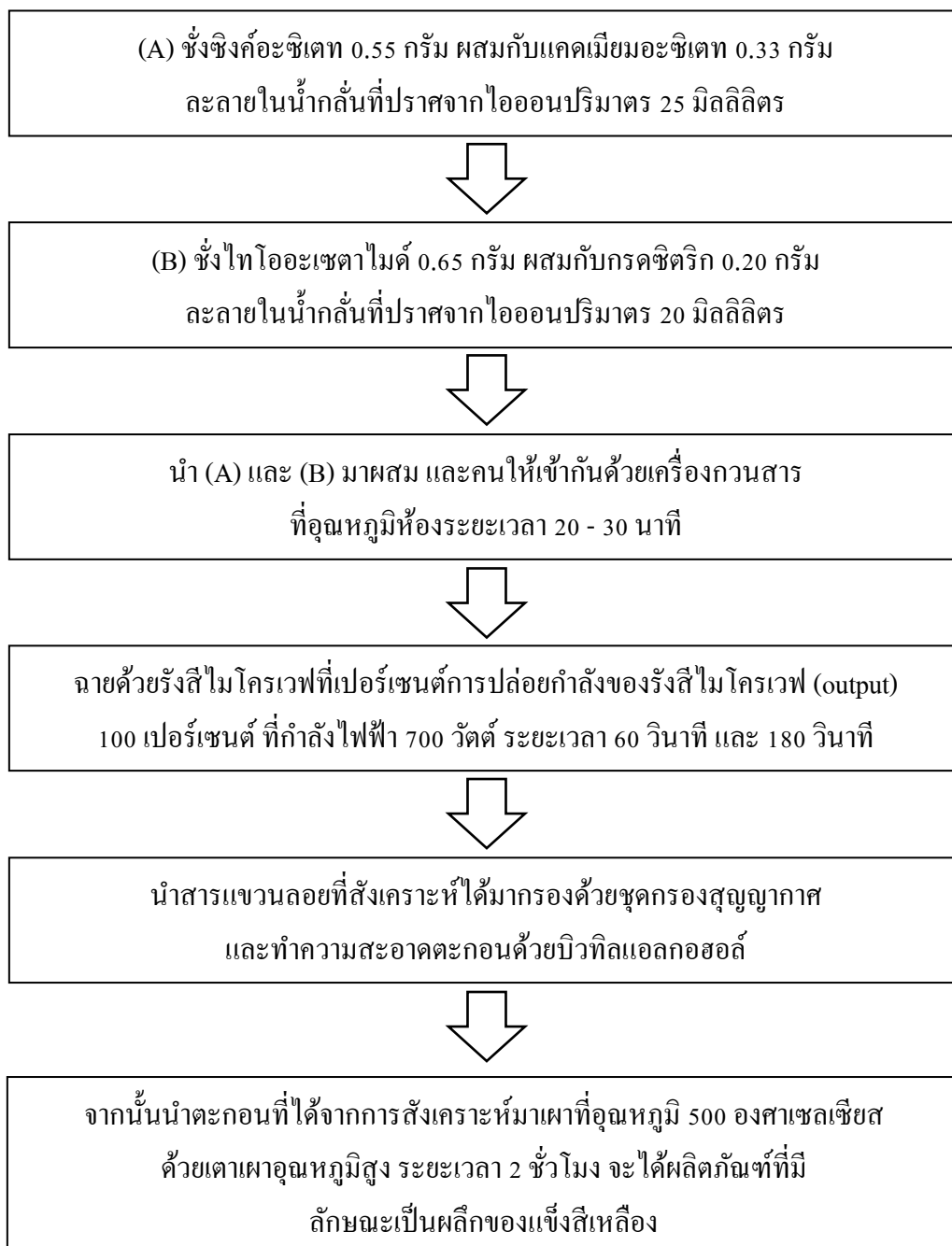
การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ จะสังเคราะห์ภายใต้รังสีไมโครเวฟที่เปอร์เซ็นต์การปล่อยกำลังของรังสีไมโครเวฟ (output) 100 เปอร์เซ็นต์ ที่กำลังไฟฟ้า 700 วัตต์ ระยะเวลา 60 วินาที และ 180 วินาที โดยใช้สารควบคุมขนาดอนุภาค 3 แบบ ได้แก่

3.2.1.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์โดยใช้พอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดน (PVP) ในการควบคุมขนาดอนุภาค ดังภาพที่ 3 - 1



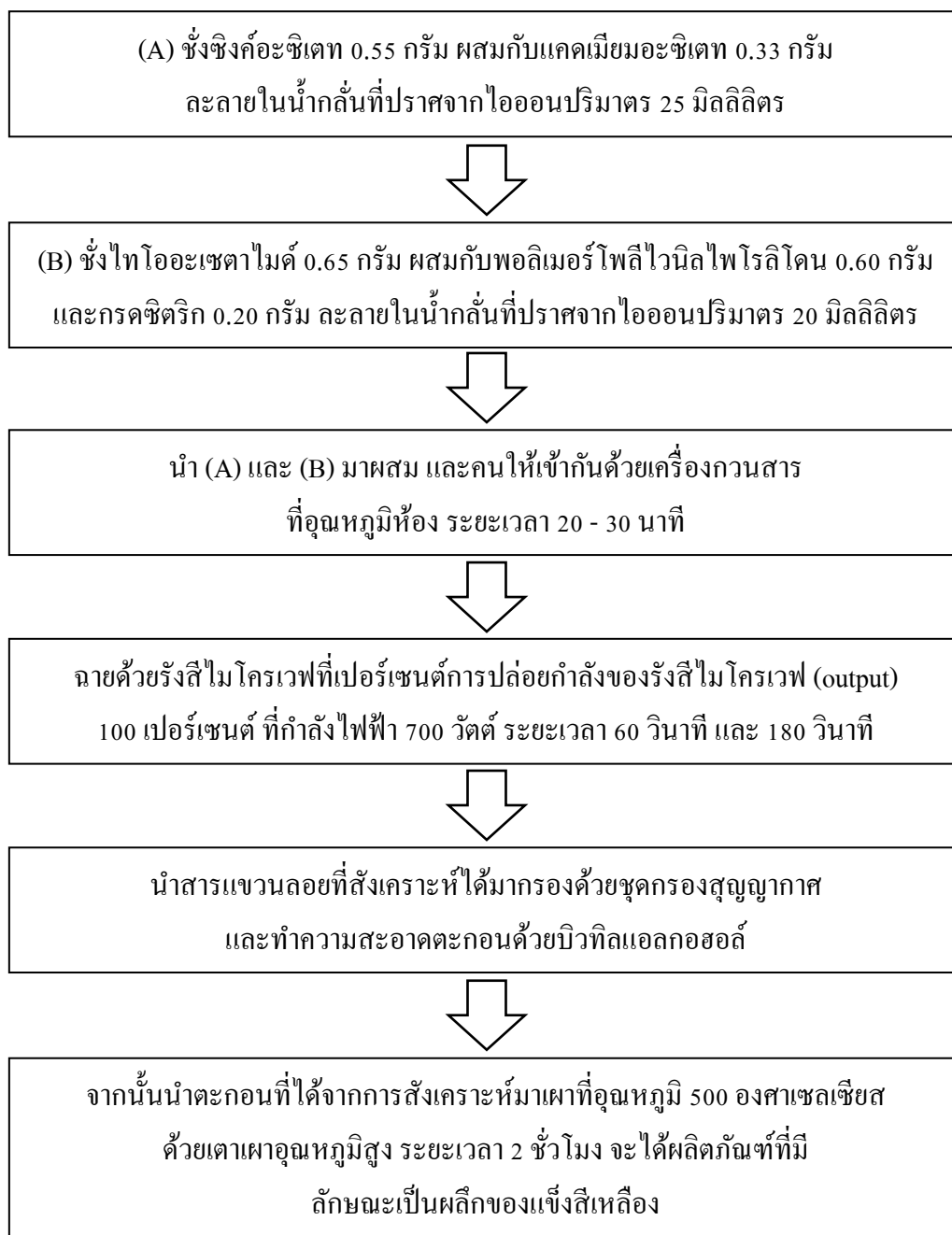
ภาพที่ 3 - 1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์โดยใช้พอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดน (PVP) ในการควบคุมขนาดอนุภาค

3.2.1.2 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์โดยใช้กรดซिटริกในการควบคุมขนาดอนุภาค ดังภาพที่ 3 - 2



ภาพที่ 3 - 2 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์โดยใช้กรดซิทริกในการควบคุมขนาดอนุภาค

3.2.1.3 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์โดยใช้ร่วมกันระหว่างพอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนและกรดซिटริกในการควบคุมขนาดอนุภาค ดังภาพที่ 3 - 3



ภาพที่ 3 - 3 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์โดยใช้ร่วมกันระหว่างพอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนและกรดซิทริกในการควบคุมขนาดอนุภาค



### 3.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคและองค์ประกอบธาตุเชิงพลังงานของสารด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope; TEM) และเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยรังสีเอกซ์ (Energy dispersive x - ray spectrometry; EDX)

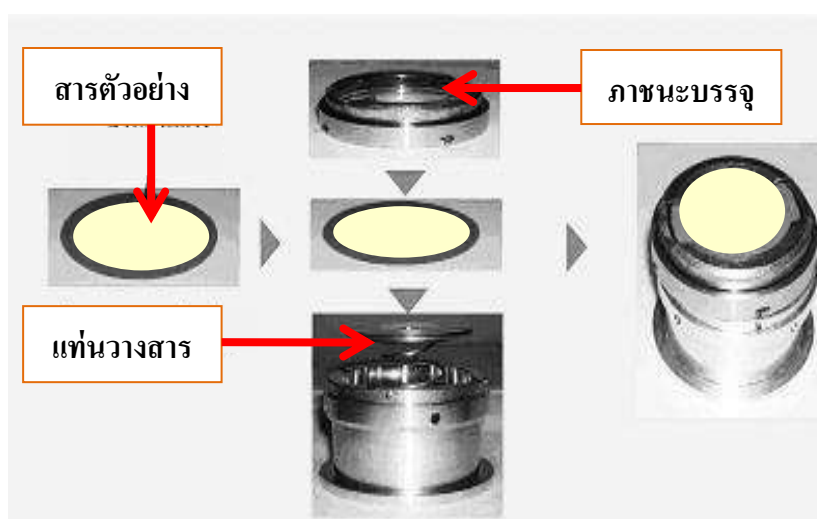
การวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคและองค์ประกอบธาตุเชิงพลังงานของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์สังเคราะห์ขึ้นเพื่อนำมาใช้เป็นองค์ประกอบสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยรังสีเอกซ์ เพื่อศึกษาลักษณะอนุภาคและองค์ประกอบธาตุเชิงพลังงาน อัตราส่วน (โมล) ของสารที่สังเคราะห์ขึ้นโดยใช้พอลิเมอร์โพลิไวนิลไพโรลิโดน กรดซิตริก และใช้ร่วมกันระหว่างพอลิเมอร์โพลิไวนิลไพโรลิโดนและกรดซิตริกในการควบคุมขนาดอนุภาคที่ฉายด้วยรังสีไมโครเวฟที่เปอร์เซ็นต์การปล่อยกำลังของรังสีไมโครเวฟ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่กำลังไฟฟ้า 700 วัตต์ ระยะเวลา 60 วินาที และ 180 วินาที สามารถเตรียมสารตัวอย่างเพื่อนำมาวิเคราะห์ได้โดยนำอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ละลายในเอทานอลแอบโซลูทแอลกอฮอล์ปริมาตร 0.4 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ทำให้ขนาดอนุภาคของสารเกิดการแตกตัว (Sonicated) ด้วยเครื่องทำความสะอาดความถี่สูง (Ultrasonic cleaner) ระยะเวลา 15 นาที จากนั้นนำมาส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านที่วิเคราะห์ร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยรังสีเอกซ์ เพื่อศึกษาลักษณะอนุภาคและองค์ประกอบธาตุเชิงพลังงานของสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ ดังภาพที่ 3 - 4



ภาพที่ 3 - 4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) รุ่น Tecnai 20 (มหาวิทยาลัยบูรพา, 2558)

### 3.2.3 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ( $Zn_{1-x}Cd_xS$ ) ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X - ray diffraction; XRD)

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เทคนิคนี้แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สำหรับสารตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผง และเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สำหรับสารตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผลึกเดี่ยว ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์สำหรับใช้ในการวิจัยครั้งนี้มีลักษณะเป็นผง จึงต้องใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สำหรับตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผงในการวิเคราะห์ ซึ่งจะให้สเปกตรัมที่มีความจำเพาะต่อธาตุแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน สามารถบอกวิฤภาคเชิงผลึกของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ได้ว่ามีความเป็นโครงสร้างผลึกหรืออสัณฐาน (ไม่เป็นโครงสร้างผลึก) เทคนิคนี้มีประโยชน์ในการวิเคราะห์ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalysis) เพราะสามารถบอกชนิดของสารที่อยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยารวมทั้งวิฤภาคของสารได้ สามารถเตรียมตัวอย่างที่จะวิเคราะห์ได้โดยนำอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ที่มีลักษณะเป็นผงมาบดให้ละเอียด จากนั้นใส่ลงในภาชนะสำหรับใส่สารตัวอย่างแล้วเกลี่ยให้ทั่วเพื่อให้ผิวของสารตัวอย่างเรียบและเสมอกับขอบของแผ่นที่บรรจุ จากนั้นนำตัวอย่างที่เตรียมไว้ใส่ที่ตำแหน่งตัวอย่างของตัวเครื่องแล้วทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์การเลี้ยวเบน ดังภาพที่ 3 - 5

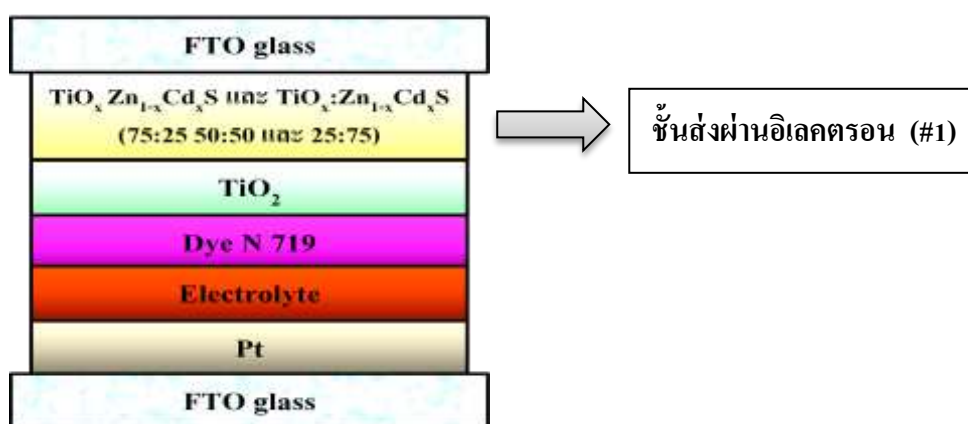


ภาพที่ 3 - 5 ภาชนะใส่สารตัวอย่างสำหรับเทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) (สุภาวดี มุกดาพันธ์ และคณะ, 2553)

### 3.2.4 การวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงโดยเปรียบเทียบตำแหน่งการเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ( $Zn_{1-x}Cd_xS$ ) ที่แตกต่างกัน

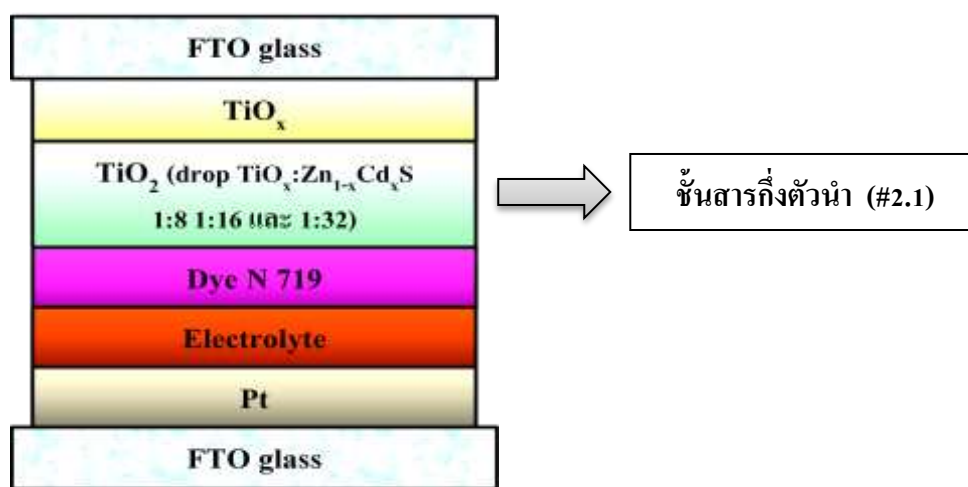
การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงโดยเปรียบเทียบตำแหน่งการเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่ต่างกันซึ่งแต่ละตำแหน่งสามารถบอกถึงประสิทธิภาพ (Efficiency) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ที่สูงที่สุดได้ สามารถวัดได้ด้วยเครื่องเซลล์แสงอาทิตย์จำลอง (Solar simulator) ภายใต้อำนาจของตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้าต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรมืด ( $V_{oc}$ ) มีหน่วยเป็นโวลต์ (V) ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) มีหน่วยเป็นมิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ( $mA/cm^2$ ) ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ ( $FF$ ) และค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพ (Eff) มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (%) จากที่ทราบมาแล้วว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงมีองค์ประกอบหลักๆ 2 ส่วนคือ ขั้วโฟโตอิเล็กโทรดและขั้วแคโทดอิเล็กโทรด ในงานวิจัยนี้จะศึกษาถึงส่วนของขั้วโฟโตอิเล็กโทรดเป็นหลักโดยศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงด้วยการเคลือบตำแหน่งของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีสะอาดที่ต่างกันลงด้านบนกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีนเพื่อเป็นขั้วโฟโตอิเล็กโทรดจำนวน 3 ตำแหน่ง ได้แก่

3.2.4.1 ตำแหน่งที่เคลือบลงด้านบนผิวของกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีนสำหรับทำหน้าที่เป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนด้วยไททาเนียมออกไซด์ (Titanium oxide;  $TiO_x$ ) ที่มีลักษณะเป็นแบบ โซล - เจล (Sol - gel) ซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ( $Zn_{1-x}Cd_xS$ ) ที่ละลายในทิวิวทานอลแอลกอฮอล์ปริมาตร 0.4 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร (mg/mL) และไททาเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ( $TiO_x:Zn_{1-x}Cd_xS$ ) อัตราส่วน 75:25 50:50 และ 25:75 เพื่อให้สามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนได้มากขึ้น

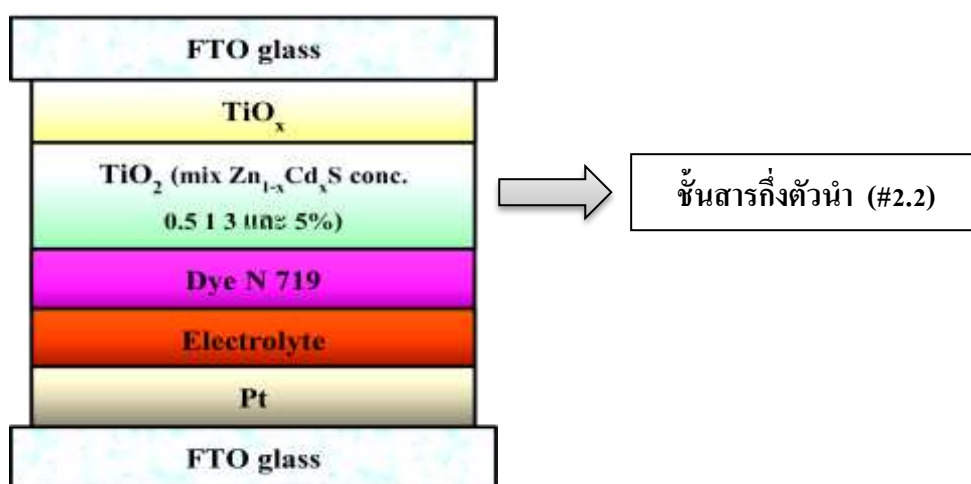


ภาพที่ 3 - 6 ตำแหน่งที่ 1 ชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (ETL)

3.2.4.2 ตำแหน่งที่เคลือบลงด้านบนชั้นของไททาเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ที่เป็นสารกึ่งตัวนำโดยหยดสารผสมระหว่างไททาเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่ละลายในทิวบิวทิลแอลกอฮอล์ปริมาตร 0.4 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร อัตราส่วน 1:8 1:16 และ 1:32 ปริมาตร 40 ไมโครลิตร (ส่วนที่ 1) และนำอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่มีลักษณะเป็นผงผสมกับไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นผงเช่นกัน ระดับความเข้มข้น 0.5 1 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ สำหรับเป็นชั้นสารกึ่งตัวนำ (ส่วนที่ 2)



(a)

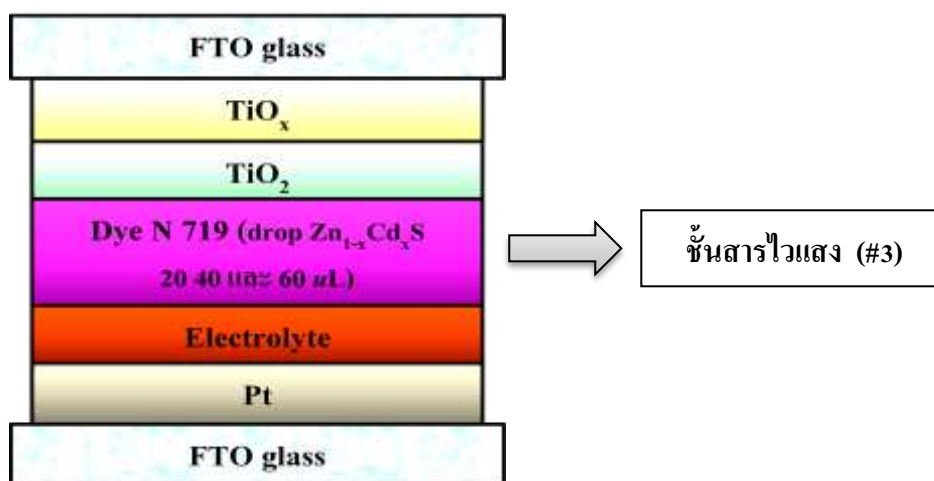


(b)

ภาพที่ 3 - 7 ตำแหน่งที่ 2 ชั้นสารกึ่งตัวนำ

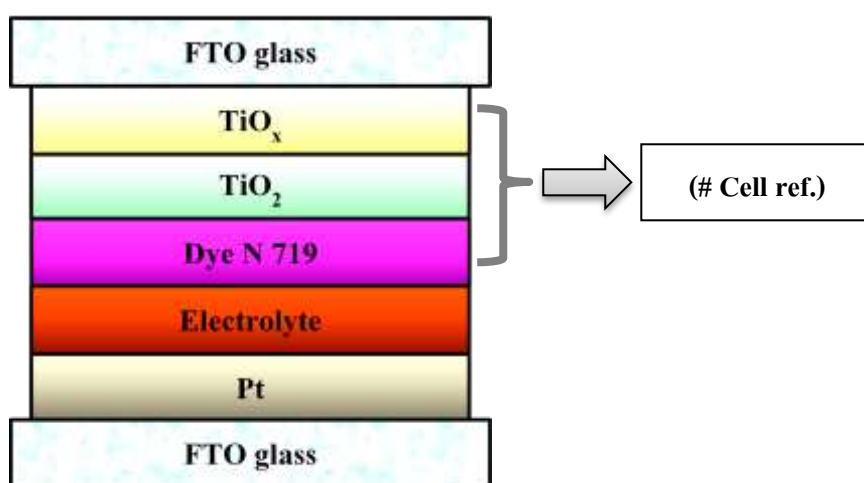
a. ตำแหน่งที่ 2.1 (หยดบนชั้นสารกึ่งตัวนำ) b. ตำแหน่งที่ 2.2 (ผสมกับสารกึ่งตัวนำ)

3.2.4.3 ตำแหน่งที่เคลือบลงด้านบนชั้นของสีย้อมไวแสง (N 719) โดยหยดอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่ละลายในทิวทานอลแอลกอฮอล์ปริมาตร 0.4 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรปริมาตร 20 40 และ 60 ไมโครลิตร ลงไป สำหรับทำหน้าที่เป็นสารไวแสง



ภาพที่ 3 - 8 ตำแหน่งที่ 3 ชั้นสีย้อมไวแสง

ขั้นตอนการเตรียมเซลล์เพื่อวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่เป็นเซลล์อ้างอิง (Cell reference) และเปรียบเทียบตำแหน่งการเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่แตกต่างกันสำหรับเป็นขั้วโฟโตอิเล็กโทรดประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้



ภาพที่ 3 - 9 เซลล์อ้างอิง (Cell reference; Cell ref.) ไม่ผสมซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์

### ขั้นที่ 1 การเตรียมขั้วโฟโตอิเล็กโทรด (Photoelectrode)

1. ตัดกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีนให้มีขนาด 2.5 x 2.5 ตารางเซนติเมตร ตามจำนวนที่ต้องการ
2. ทำความสะอาดด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ (M) ปริมาตร 15 มิลลิลิตร (mL) โดยใช้เครื่องทำความสะอาดความถี่สูง ระยะเวลา 15 นาที แล้วเทกรดไฮโดรคลอริกลงไปในภาชนะบรรจุของเสียอันตราย (Waste) เพื่อไม่ให้สารปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม จากนั้นทำความสะอาดกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีนด้วยน้ำกลั่น (De - ionized water) แล้วเททิ้งโดยทำซ้ำอีก 3 ครั้ง ๆ ละ 10 นาที เช็ดให้สะอาดด้วยไอโซโพรพานอลแอลกอฮอล์ (IPA) และเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน (Nitrogen gas)
3. เคลือบฟิล์มบางลงบนกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีนด้วยไททานเนียมออกไซด์ (สำหรับเป็นเซลล์อ้างอิง) ซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ และไททานเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่อัตราส่วน 75:25 50:50 และ 25:75 จะกำหนดให้เป็นตำแหน่งที่ 1 โดยหยดสารที่เตรียมไว้ลงบนกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน ปริมาตร 10 ไมโครลิตร เคลือบที่ระดับความเร็ว 1,250 ไมโครเมตรต่อวินาที ( $\mu\text{m}/\text{sec}$ ) โดยใช้เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางแบบการนำพาการระเหยด้วยโปรแกรมอีซิโมชันพลัสอาร์ (Ezimoto plus R) จากนั้นเช็ดบริเวณขอบกระจกด้วยไอโซโพรพานอลแอลกอฮอล์และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ( $^{\circ}\text{C}$ ) ระยะเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสารที่เป็นออร์แกนิกคอนเทนท์และสารที่เป็นตัวทำละลายออก
4. เคลือบชั้นที่เป็นสารกึ่งตัวนำด้วยไททานเนียมไดออกไซด์ (สำหรับเป็นเซลล์อ้างอิง) ลงบนขนาดพื้นที่ 0.4 x 1 ตารางเซนติเมตร ปริมาตร 150 ไมโครลิตร แล้วนำกระจกสไลด์มาปาดให้เรียบโดยใช้วิธีคอกเตอร์เบลคจำนวน 5 ครั้ง เพื่อให้เคลือบลงบนผิวของกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน ซึ่งมีชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนเคลือบอยู่ก่อนแล้ว จากนั้นหยดสารผสมระหว่างไททานเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่อัตราส่วน 1:8 1:16 และ 1:32 ปริมาตร 40 ไมโครลิตร โดยจะกำหนดให้เป็นตำแหน่งที่ 2.1 และตำแหน่งที่ 2.2 จะนำไททานเนียมไดออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นผงมาผสมกับอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่มีลักษณะเป็นผงเช่นกัน ระดับความเข้มข้น 0.5 1 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แล้วเคลือบลงบนผิวของกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน ซึ่งมีชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนเคลือบอยู่ก่อนแล้วเช่นเดียวกับการเคลือบชั้นที่เป็นสารกึ่งตัวนำด้วยไททานเนียมไดออกไซด์ จากนั้นเช็ดสารส่วนที่เกินออกด้วยไอโซโพรพานอลแอลกอฮอล์ ทิ้งไว้ให้แห้งและนำไปเผาที่อุณหภูมิ

500 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสารที่เป็นออร์แกนิกคอนเทนท์และสารที่เป็นตัวทำละลายออก

5. นำเซลล์ที่เคลือบชั้นสารกึ่งตัวนำแล้วมาข้อมด้วยสี่ข้อมไวแสง (N 719) สำหรับเป็นเซลล์อ้างอิง จากนั้นปิดฝาอ่างสำหรับข้อมสีให้สนิทและซิลว์ด้วยแผ่นพาราฟิล์ม นำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 15 นาที แล้วแช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 12 - 24 ชั่วโมง (ข้ามคืน) จากนั้นหยดอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ลงไปปริมาตร 20 40 และ 60 ไมโครลิตร โดยจะกำหนดให้เป็นตำแหน่งที่ 3 และนำไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที เพื่อกำจัดความชื้นออกจากเซลล์

### ขั้นที่ 2 การเตรียมขั้วแคโทดอิเล็กโทรด (Counter electrode)

1. ตัดกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีนให้มีขนาด 2.5 x 2.5 ตารางเซนติเมตร ตามจำนวนที่ต้องการและเจาะรูลงบนกระจก 2 รู ด้วยเครื่องเจาะกระจกสำหรับหยอดสารอิเล็กโทรไลต์

2. ทำความสะอาดด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ (M) ปริมาตร 15 มิลลิลิตร โดยใช้เครื่องทำความสะอาดความถี่สูง ระยะเวลา 15 นาที แล้วเทกรดไฮโดรคลอริกลงไปในภาชนะบรรจุของเสียอันตราย เพื่อไม่ให้สารปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม จากนั้นทำความสะอาดกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน ด้วยน้ำกลั่น แล้วเททิ้งโดยทำซ้ำอีก 3 ครั้ง ๆ ละ 10 นาที เช็ดให้สะอาดด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์และเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน

3. หยดแพลทินัม (Platinum) ลงไปปริมาตร 100 ไมโครลิตร และนำกระจกสไลด์มาปาดให้เรียบโดยใช้วิธีคอกเตอร์เบลคจำนวน 3 ครั้ง เพื่อให้เคลือบลงบนผิวของกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน แล้วเช็ดสารส่วนที่เกินออกด้วยไอโซโพรพานอล แอลกอฮอล์ จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1 ชั่วโมง

### ขั้นที่ 3 การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบสี่ข้อมไวแสง

1. ตัดแผ่นเซอร์ลีน (Surlyn) ให้มีขนาดครึ่งหนึ่งของกระจกและตัดบริเวณส่วนตรงกลางออกให้เป็นช่องว่างสำหรับหยอดสารอิเล็กโทรไลต์ จากนั้นนำมาวางซ้อนทับกัน 2 ชั้น เพื่อเพิ่มความหนาของเซอร์ลีนให้สามารถหยอดสารอิเล็กโทรไลต์ได้มากขึ้น จากนั้นนำมาวางลงบนกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีนซึ่งมีด้วยแพลทินัมเคลือบอยู่

2. นำขั้วโพโตอิเล็กโทรดที่เตรียมไว้วางซ้อนทับกับกระจกที่เป็นขั้วแคโทดอิเล็กโทรดให้ได้ประมาณครึ่งหนึ่งของกระจกแต่ละแผ่น จากนั้นเป่าด้วยเครื่องเป่าลมร้อนเพื่อให้เซอร์ลีนละลายประมาณ 25 วินาที แล้วทิ้งไว้ให้เย็น

3. ทำการหยอดสารอิเล็กโทรไลต์ลงไป เพื่อให้ทำหน้าที่เป็นตัวส่งผ่านประจุให้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง
4. ปิดรูสำหรับหยอดสารอิเล็กโทรไลต์ด้วยเทปกาวกันความร้อน (Kaptal tape) เพื่อป้องกันสารอิเล็กโทรไลต์ระเหยออกจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นเบื้องต้น
5. นำมาวัดเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงด้วยเครื่องเซลล์แสงอาทิตย์จำลอง (Solar simulator)

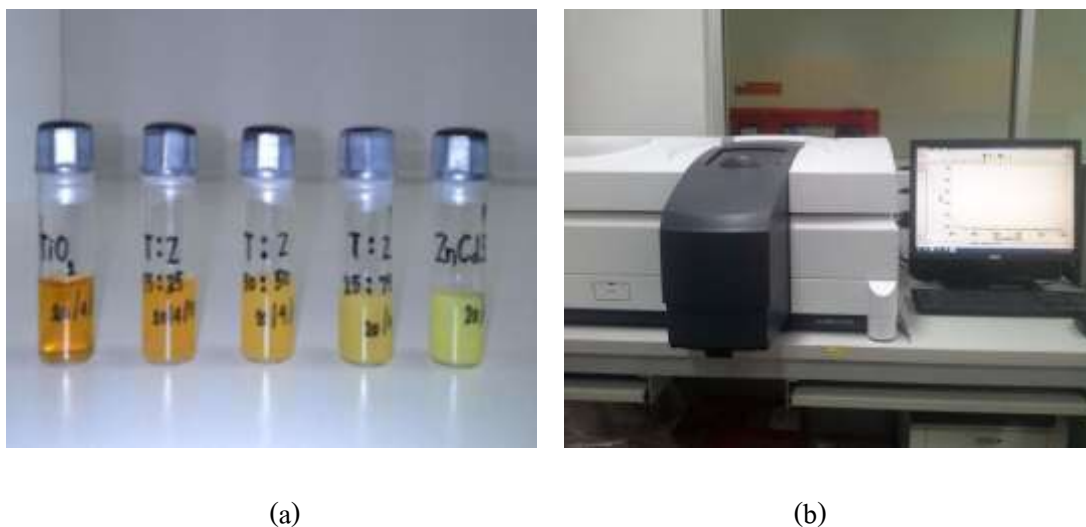
หมายเหตุ: ต้องทำเซลล์อ้างอิง (Cell reference) ทุกครั้งที่ทำการทดลอง

### 3.2.5 การวิเคราะห์สมบัติทางแสงและค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Energy band gap; $E_g$ ) ของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ( $Zn_{1-x}Cd_xS$ ) ด้วยเทคนิคยูวี - วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV - Visible spectrophotometer)

ยูวี - วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในวิเคราะห์สมบัติทางแสงของสารโดยอาศัยหลักการดูดกลืนรังสีในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (Ultra violet; UV) และวิสิเบิล (Visible; VIS) ที่ความยาวคลื่นประมาณ 190 - 1,000 นาโนเมตร ด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปี (Spectroscopy) สารตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนหรือสารอนินทรีย์ ทั้งที่มีสีและไม่มีสี อาจเป็นสารละลายหรือฟิล์มก็ได้ ซึ่งสารแต่ละชนิดที่นำมาวิเคราะห์จะมีค่าการดูดกลืนรังสีในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน

การวิเคราะห์สมบัติทางแสงของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์ขึ้น สำหรับการวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาค่าแถบช่องว่างพลังงานของสารที่เหมาะสม สามารถเตรียมตัวอย่างที่จะวิเคราะห์ได้โดยนำอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ละลายในทิวบานอล แอลกอฮอล์ปริมาตร 0.4 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ทำให้อนุภาคของสารแตกตัวด้วยเครื่องทำความสะอาดความถี่สูง ระยะเวลา 15 นาที แล้วนำมาผสมกับไททานเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วน 75:25 50:50 และ 25:75 เขย่าให้เข้ากัน นำมาเจือจาง (Dilute) ด้วยทิวบานอลแอลกอฮอล์ที่ 500 เท่า ปริมาตร 3 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารตัวอย่างใส่ลงในคิวเวทท์ (Cuvette) เพื่อวิเคราะห์สมบัติทางแสงของสารในช่วงความยาวคลื่น 200 - 800 นาโนเมตร แล้วนำกราฟที่ได้มาหาจุดตัด (Cut off) ของความยาวคลื่นการส่องผ่านแสงในช่วง 300 - 450 นาโนเมตร แล้วลากเส้นตัดระหว่าง แกนเอกซ์ (x) และแกนวาย (y) จากนั้นนำไปแทนในสมการหาค่าแถบช่องว่างพลังงาน





ภาพที่ 3 - 10 เทคนิคการวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเทคนิคยูวี - วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์

- a. อัตราส่วนของไททาเนียมออกไซด์ ซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ และไททาเนียมออกไซด์ ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่อัตราส่วน 75:25 50:50 และ 25:75
- b. เครื่องยูวี - วิส - เนอร์ สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV - Vis - NIR spectrophotometer); รุ่น Cary 5000 (สวทช, 2558)

### 3.2.6 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (ETL) ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field emission scanning electron microscopy; FESEM)

การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนซึ่งเป็นองค์ประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ช่วยทำหน้าที่ส่งผ่านอิเล็กตรอนให้กับเซลล์ สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FESEM) เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของลักษณะพื้นผิวกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน แล้วเคลือบด้วยไททาเนียมออกไซด์ และสารผสมระหว่างไททาเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ (อัตราส่วน 50:50) ซึ่งสามารถเตรียมตัวอย่างได้โดยนำไททาเนียมออกไซด์และสารผสมระหว่างไททาเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ (อัตราส่วน 50:50) มาเคลือบลงด้านบนผิวของกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน โดยหยดสารที่เตรียมไว้ลงไปปริมาตร 10 ไมโครลิตร เคลือบที่ระดับความเร็ว 1,250 ไมโครเมตรต่อวินาที ด้วยเทคนิคการนำพาการระเหยและนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสาร

ที่เป็นออร์แกนิกคอนเทนท์และสารที่เป็นตัวทำละลายออกจากตัวอย่าง จากนั้นนำมาวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

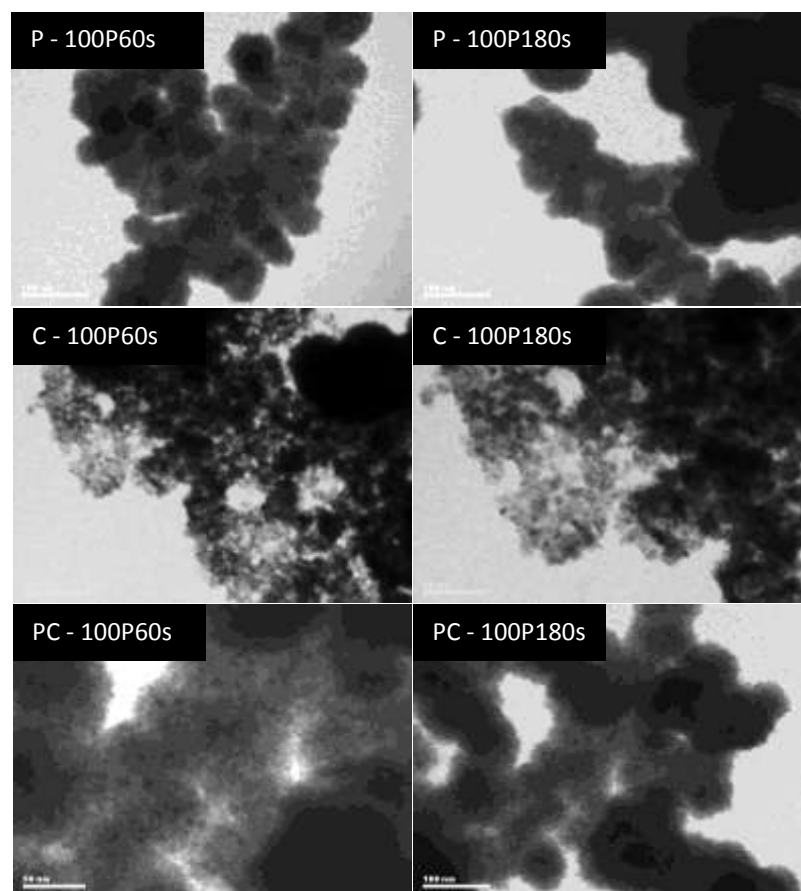


ภาพที่ 3 - 11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FESEM); รุ่น SU8030 (สวทช, 2558)

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคและองค์ประกอบธาตุเชิงพลังงานของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ( $Zn_{1-x}Cd_xS$ ) ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) และเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยรังสีเอกซ์ (EDX)



ภาพที่ 4 - 1 ลักษณะอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ( $Zn_{1-x}Cd_xS$ ) ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (TEM) ที่สังเคราะห์ภายใต้รังสีไมโครเวฟที่เปอร์เซ็นต์การปล่อยกำลังของรังสีไมโครเวฟ (output) 100 เปอร์เซ็นต์ ที่กำลังไฟฟ้า 700 วัตต์ ระยะเวลา 60 วินาที และ 180 วินาที โดยใช้พอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดน (P) กรดซิทริก (C) และใช้ร่วมกันระหว่างพอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนและกรดซิทริก (PC) ในการควบคุมขนาดอนุภาค

จากภาพที่ 4 - 1 อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ที่สังเคราะห์ภายใต้รังสีไมโครเวฟที่เปอร์เซ็นต์การปล่อยกำลังของรังสีไมโครเวฟ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่กำลังไฟฟ้า 700 วัตต์ ระยะเวลา 60 วินาที และ 180 วินาทีโดยใช้พอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดน ที่กำหนดให้มีสัญลักษณ์เป็นตัวพี (P) กรดซิตริก ที่กำหนดให้มีสัญลักษณ์เป็นตัวซี (C) และใช้ร่วมกันระหว่างพอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนและกรดซิตริกที่กำหนดให้มีสัญลักษณ์เป็นตัวพีซี (PC) ในการควบคุมขนาดอนุภาคของสาร ได้แก่ P - 100P60s P - 100P180s C - 100P60s C - 100P180s PC - 100P60s และ PC - 100P180s สารตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ทั้ง 6 ชนิดนี้จะถูกนำมาส่องใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (TEM) เพื่อวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคของสารพบว่า ลักษณะอนุภาคของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์โดยใช้พอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนในการควบคุมขนาดอนุภาค ได้แก่ P - 100P60s กับ P - 100P180s และ PC - 100P60s กับ PC - 100P180s อนุภาคมีการเกาะกลุ่มและรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดอนุภาคของสารที่สังเคราะห์ในสภาวะนี้มีขนาดเล็กมาก ส่วนลักษณะอนุภาคของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์โดยใช้กรดซิตริกในการควบคุมขนาดอนุภาค ได้แก่ C - 100P60s และ C - 100P180s อนุภาคมีการกระจายตัวและแยกออกจากกันอย่างเห็นได้ชัดเจน ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดอนุภาคของสารที่สังเคราะห์ในสภาวะนี้มีอนุภาคขนาดใหญ่ โดยผลการวิจัยครั้งนี้จะไม่ขึ้นกับเวลาในการสังเคราะห์ที่ระยะเวลา 60 วินาที และ 180 วินาที ตามลำดับ

ตารางที่ 4 - 1 อัตราส่วน (โมล) ขององค์ประกอบธาตุเชิงพลังงานของธาตุซิงค์ต่อแคดเมียมเทียบกับซัลเฟอร์ (Zn: Cd เทียบกับ S) ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยรังสีเอกซ์ (EDX) และขนาดของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์โดยใช้สารควบคุมขนาดอนุภาคและระยะเวลาที่แตกต่างกัน

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์	อัตราส่วน (โมล) (Zn: Cd เทียบกับ S)	ขนาดอนุภาค (นาโนเมตร)
P - 100P60s	0.4:0.6:0.8	6
P - 100P180s	0.6:0.4:0.8	5
C - 100P60s	0.3:0.7:0.6	20
C - 100P180s	0.6:0.4:0.7	30
PC - 100P60s	0.3:0.7:0.5	6
PC - 100P180s	0.3:0.7:0.6	4

ตารางที่ 4 - 1 ผลการวิเคราะห์อัตราส่วน (โมล) ขององค์ประกอบธาตุเชิงพลังงานเชิงค์ต่อแคดเมียมเทียบกับซัลเฟอร์ (Zn:Cd เทียบกับ S) ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยรังสีเอกซ์ (EDX) และขนาดของอนุภาคนาโนเชิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์โดยใช้สารควบคุมขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน สามารถบอกถึงความแตกต่างของอัตราส่วน (โมล) ปริมาณการแทนที่แคดเมียม ( $Cd^{2+}$ ) ด้วยซิงค์ ( $Zn^{2+}$ ) เมื่อเทียบกับซัลเฟอร์ (S) ได้ ซึ่งจากตารางที่ 4 - 1 พบว่าการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเชิงค์แคดเมียมซัลไฟด์โดยใช้พอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนในการควบคุมขนาดอนุภาคของสารที่สังเคราะห์ภายใต้รังสีไมโครเวฟที่เปอร์เซ็นต์การปล่อยกำลังของรังสีไมโครเวฟ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่กำลังไฟฟ้า 700 วัตต์ ระยะเวลา 60 วินาที และ 180 วินาที ได้แก่ P - 100P60s และ P - 100P180s จะได้อัตราส่วน (โมล) ของการแทนที่แคดเมียมด้วยซิงค์เมื่อเทียบกับซัลเฟอร์สูงที่สุดเท่ากับ 0.4:0.6:0.8 และ 0.6:0.4:0.8 ตามลำดับ การสังเคราะห์อนุภาคนาโนเชิงค์แคดเมียมซัลไฟด์โดยใช้กรดซิตริกในการควบคุมขนาดอนุภาคของสารที่สังเคราะห์ภายใต้รังสีไมโครเวฟที่เปอร์เซ็นต์การปล่อยกำลังของรังสีไมโครเวฟ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่กำลังไฟฟ้า 700 วัตต์ ระยะเวลา 60 วินาที และ 180 วินาที ได้แก่ C - 100P60s และ C - 100P180s จะได้อัตราส่วน (โมล) ของการแทนที่แคดเมียมด้วยซิงค์เมื่อเทียบกับซัลเฟอร์รองลงมาจากพอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนเท่ากับ 0.3:0.7:0.6 และ 0.6:0.4:0.7 ตามลำดับ และการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเชิงค์แคดเมียมซัลไฟด์โดยใช้ร่วมกันระหว่างพอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนและกรดซิตริกในการควบคุมขนาดอนุภาคของสารที่สังเคราะห์ภายใต้รังสีไมโครเวฟที่เปอร์เซ็นต์การปล่อยกำลังของรังสีไมโครเวฟ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่กำลังไฟฟ้า 700 วัตต์ ระยะเวลา 60 วินาที และ 180 วินาที ได้แก่ PC - 100P60s และ PC - 100P180s จะได้อัตราส่วน (โมล) ของการแทนที่แคดเมียมด้วยซิงค์เมื่อเทียบกับซัลเฟอร์ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.3:0.7:0.5 และ 0.3:0.7:0.6 ตามลำดับ

ขนาดอนุภาคนาโนเชิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์ขึ้นจะถูกนำมาวัดด้วยโปรแกรมอิมเมจ (ImageJ) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของสารด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) จากตารางที่ 4 - 1 สามารถแบ่งขนาดของอนุภาคนาโนเชิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์โดยใช้สารควบคุมขนาดอนุภาคที่แตกต่างกันออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

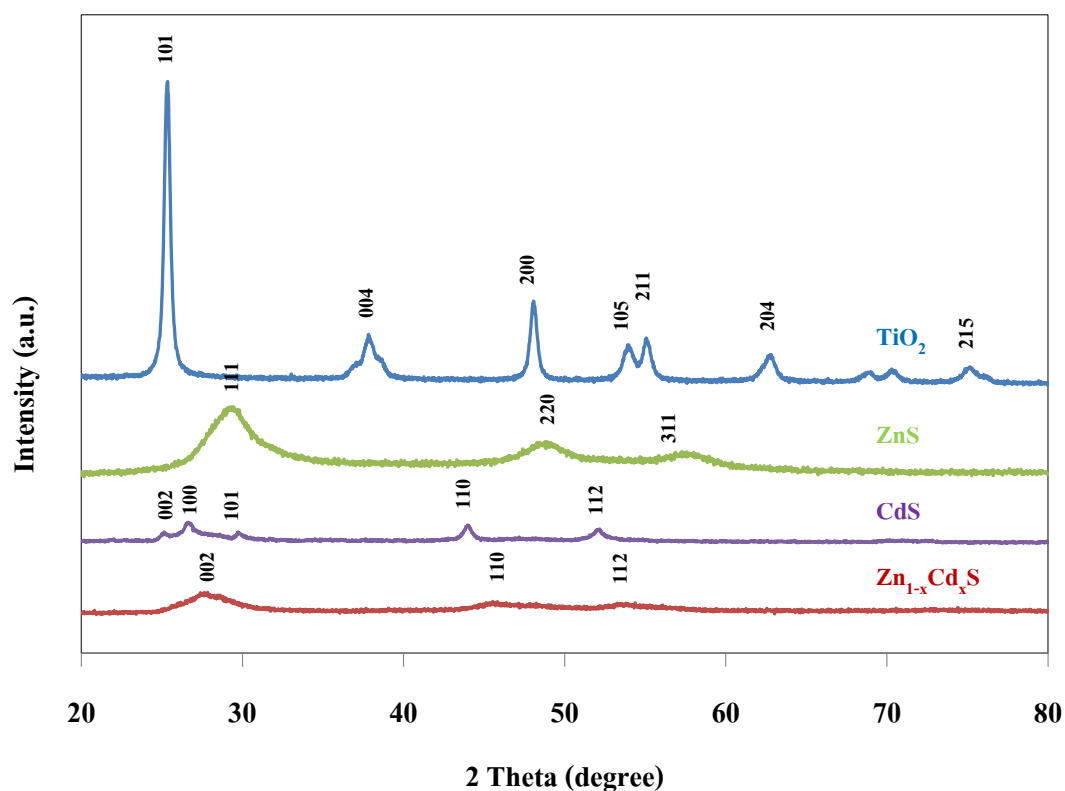
กลุ่มที่หนึ่ง เป็นกลุ่มที่สังเคราะห์โดยใช้พอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนและใช้ร่วมกันระหว่างพอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนและกรดซิตริกในการควบคุมขนาดอนุภาคของสารที่สังเคราะห์ภายใต้รังสีไมโครเวฟที่เปอร์เซ็นต์การปล่อยกำลังของรังสีไมโครเวฟ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่กำลังไฟฟ้า 700 วัตต์ ระยะเวลา 60 วินาที และ 180 วินาที ได้แก่ P - 100P60s P - 100P180s PC - 100P60s และ PC - 100P180s พบว่า ขนาดอนุภาคของสารที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้สารควบคุมขนาดอนุภาคทั้ง 2 แบบนี้ มีอนุภาคนาโนขนาดเล็กและใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 4 - 6 นาโนเมตร

ซึ่งเป็นวัสดุขนาดนาโนเมตร แต่จากตารางที่ 4 - 1 จะเห็นได้ว่าการสังเคราะห์ที่ใช้ร่วมกันระหว่าง พอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนและกรดซิตริกในการควบคุมขนาดอนุภาคของสาร ได้แก่ PC - 100P60s และ PC - 100P180s พบว่า ปริมาณซัลเฟอร์ของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ที่ได้จากสังเคราะห์นี้เกิดการลดลง ทั้งนี้เนื่องจากซัลเฟอร์เป็นธาตุองค์ประกอบหลักที่พบใน โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (Zinc blende) โดยอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์จะมีลักษณะ เป็นแบบซิงค์เบลนด์หรือแบบเวิร์ตไซต์นั้นสามารถอ้างเกิดได้จากสัดส่วนของซิงค์ที่มีมากกว่า แคดเมียมเมื่อเทียบกับซัลเฟอร์ และเมื่ออัตราส่วน (โมล) ของซัลเฟอร์เกิดการลดลงทำให้โครงสร้าง แบบซิงค์เบลนด์เกิดความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้าง และเมื่อนำอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ มาวัดประสิทธิภาพกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีข้อมไวแสง อาจทำให้เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพที่ได้ไม่ดีเท่าที่ควร

กลุ่มที่สอง เป็นกลุ่มที่สังเคราะห์โดยใช้กรดซิตริกในการควบคุมขนาดอนุภาคของสาร ที่สังเคราะห์ภายใต้รังสีไมโครเวฟที่เปอร์เซ็นต์การปล่อยกำลังของรังสีไมโครเวฟ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่กำลังไฟฟ้า 700 วัตต์ ระยะเวลา 60 วินาที และ 180 วินาที ได้แก่ C - 100P60s และ C - 100P180s จากตารางที่ 4 - 1 พบว่า มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 20 - 30 นาโนเมตร ซึ่งเป็นวัสดุขนาดนาโนเมตร เช่นกัน แต่อนุภาคของสารที่ได้จากกลุ่มนี้จะมีความใหญ่กว่ากลุ่มที่หนึ่ง และเมื่อนำอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์มาวัดประสิทธิภาพกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีข้อมไวแสง อาจทำให้ เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพที่ได้ไม่ดีเท่าที่ควร

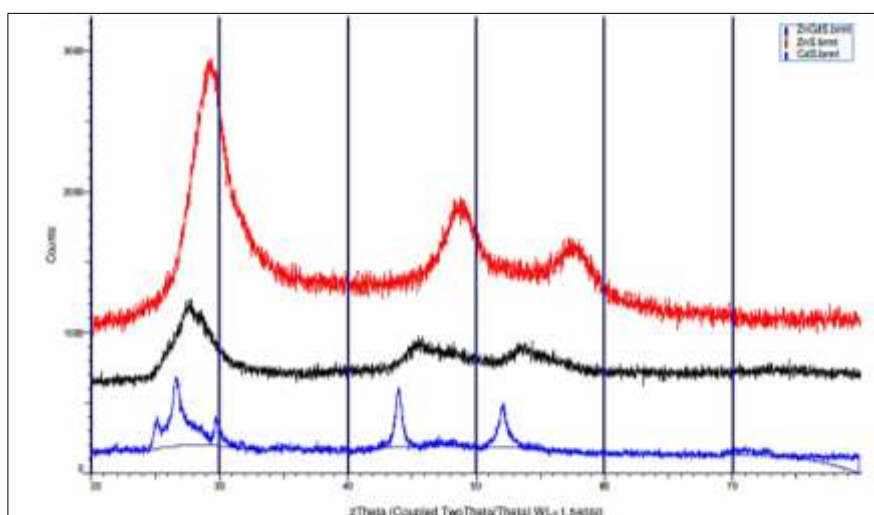
## 4.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ( $Zn_{1-x}Cd_xS$ ) ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X - ray diffraction; XRD)

การวิเคราะห์ลักษณะองค์ประกอบเฟส โครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) แบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สำหรับตัวอย่างที่เป็นผง ทั้งนี้เนื่องจากสารที่ได้จากสังเคราะห์มีลักษณะเป็นผง ดังนั้นจึงต้องใช้เทคนิคนี้ในการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ซึ่งการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะให้สเปกตรัมที่มีความจำเพาะต่อธาตุแต่ละชนิดแตกต่างกัน สามารถบอกวิฤภาคเชิงผลึกของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ได้ว่ามีความเป็นโครงสร้างผลึกหรืออสัณฐาน (ไม่เป็นโครงสร้างผลึก)



ภาพที่ 4 - 2 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของอนุภาคนาโนไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) และอนุภาคนาโนซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) และซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ( $Zn_{1-x}Cd_xS$ ) ที่สังเคราะห์ภายใต้สังเคราะห์ภายใต้รังสีไมโครเวฟที่เปอร์เซ็นต์การปล่อยกำลังของรังสีไมโครเวฟ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่กำลังไฟฟ้า 700 วัตต์ ระยะเวลา 180 วินาที โดยใช้พอลิเมอร์โพลิไวนิลไพโรลิโดนในการควบคุมขนาดอนุภาค

จากภาพที่ 4 - 2 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ และอนุภาคนาโนซิงค์ซัลไฟด์ แคลเซียมซัลไฟด์และซิงค์แคลเซียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์ภายใต้สังเคราะห์ภายใต้รังสีไมโครเวฟที่เปอร์เซ็นต์การปล่อยกำลังของรังสีไมโครเวฟ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่กำลังไฟฟ้า 700 วัตต์ ระยะเวลา 180 วินาที โดยใช้พอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนในการควบคุมขนาดอนุภาคพบว่า อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เกิดพีคที่เส้นสเปกตรัมของสารจำนวนมาก ลักษณะความสูงของพีคสูงที่สุดสังเกตได้จากมุม 2  $\theta$  (Theta) ที่ช่วง 20 ถึง 30 องศา ซึ่งจะแสดงความเป็นโครงสร้างผลึกอย่างเห็นได้ชัดเจนสังเกตได้จากภาพที่ 4 - 2 รองลงมาคือ อนุภาคนาโนแคลเซียมซัลไฟด์ เกิดพีคที่เส้นสเปกตรัมของสารจำนวนน้อยกว่าไททาเนียมไดออกไซด์แต่มากกว่าซิงค์ซัลไฟด์ และอนุภาคนาโนซิงค์ซัลไฟด์เกิดพีคที่เส้นสเปกตรัมของสารน้อยกว่าไททาเนียมไดออกไซด์และแคลเซียมซัลไฟด์ แต่ลักษณะความสูงของพีคสูงกว่าแคลเซียมซัลไฟด์ สังเกตได้จากมุม 2  $\theta$  ที่ช่วง 20 ถึง 30 องศา ส่วนเส้นสเปกตรัมของอนุภาคนาโนซิงค์แคลเซียมซัลไฟด์ เกิดพีคที่เส้นสเปกตรัมของสารน้อยมาก ลักษณะความสูงของพีคสูงที่สุดสังเกตได้จากมุม 2  $\theta$  ที่ช่วง 20 ถึง 30 องศา เช่นเดียวกัน ซึ่งอนุภาคนาโนซิงค์ซัลไฟด์ แคลเซียมซัลไฟด์และซิงค์แคลเซียมซัลไฟด์ทั้งหมดนี้ จะแสดงความเป็นอัญฐานหรือไม่เป็นโครงสร้างผลึกของสารอย่างเห็นได้ชัดเจนดังแสดงในภาพที่ 4 - 3



ภาพที่ 4 - 3 การเปรียบเทียบสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของอนุภาคนาโนซิงค์ซัลไฟด์ แคลเซียมซัลไฟด์ และซิงค์แคลเซียมซัลไฟด์ ที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ของศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (นาโนเทค ฯ) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)



#### 4.3 ผลการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงโดยเปรียบเทียบตำแหน่งการเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ( $Zn_{1-x}Cd_xS$ ) ที่แตกต่างกัน

การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงโดยเปรียบเทียบตำแหน่งการเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่ต่างกันกันลงด้านบนกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีนเพื่อเป็นขั้วโพโตอิเล็กโทโรดสำหรับเป็นองค์ประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจำนวน 3 ตำแหน่ง ซึ่งแต่ละตำแหน่งสามารถบอกถึงเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพ (Efficiency) สูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่สร้างขึ้นได้ สามารถวัดได้ด้วยเครื่องเซลล์แสงอาทิตย์จำลองภายใต้ค่าของตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้าต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรมืด ( $V_{oc}$ ) ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ ( $FF$ ) และค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพ (Eff) ดังนี้

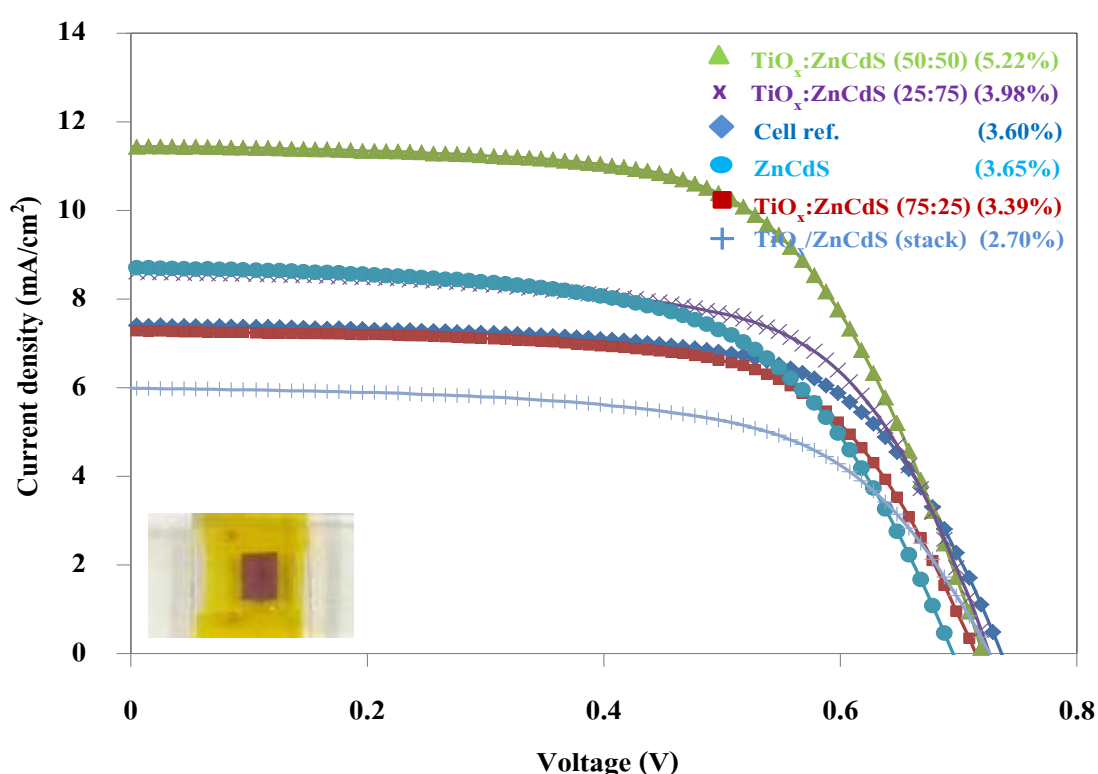
1. ตำแหน่งที่เคลือบลงด้านบนผิวของกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน สำหรับทำหน้าที่เป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนด้วยไททาเนียมออกไซด์ ( $TiO_x$ ) ซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ( $Zn_{1-x}Cd_xS$ ) และไททาเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ( $TiO_x:Zn_{1-x}Cd_xS$ ) อัตราส่วน 75:25 50:50 และ 25:75 เพื่อให้สามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนได้มากขึ้น

ตารางที่ 4 - 2 ผลของค่าตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้าของแสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงตำแหน่งที่ 1 ที่เคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ (อัตราส่วน 75:25 50:50 และ 25:75) สำหรับทำหน้าที่เป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (ETL)

เงื่อนไขการสร้างเซลล์	ค่าตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้า				
	ตำแหน่งที่ 1	$V_{oc}$ (Volt)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$FF$	Eff (%)
Cell (เซลล์อ้างอิง)		0.74	7.41	0.66	3.60
$TiO_x:Zn_{1-x}Cd_xS$ (75:25)		0.71	7.28	0.65	3.39
$TiO_x:Zn_{1-x}Cd_xS$ (50:50)		0.72	11.44	0.64	5.22
$TiO_x:Zn_{1-x}Cd_xS$ (25:75)		0.73	8.61	0.64	3.98
$Zn_{1-x}Cd_xS$		0.70	8.71	0.61	3.65

จากตารางที่ 4 - 2 แสดงผลของค่าตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงตำแหน่งที่ 1 ที่เคลือบด้วยไททาเนียมออกไซด์ ไททาเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ อัตราส่วน 75:25 50:50 และ 25:75 และซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ลงบนผิวของ

กระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีนสำหรับทำหน้าที่เป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน เพื่อให้สามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนได้มากขึ้นพบว่า มีค่าตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้าต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรถูกเปิด ( $V_{oc}$ ) เท่ากับ 0.74 0.71 0.72 0.73 และ 0.73 โวลต์ ตามลำดับ ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) เท่ากับ 7.41 7.28 11.44 8.61 และ 8.71 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ ( $FF$ ) เท่ากับ 0.66 0.65 0.64 0.64 และ 0.61 ตามลำดับ และเมื่อนำมาวัดเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงพบว่า มีค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพ ( $Eff$ ) เท่ากับ 3.60 3.39 5.22 3.98 และ 3.65 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



ภาพที่ 4 - 4 กราฟเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $J - V$  curve) แสดงเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงตำแหน่งที่ 1 ที่เคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์สำหรับเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน

จากภาพที่ 4 - 4 กราฟเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $J - V$  curve) แสดงเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงตำแหน่งที่ 1 ที่เคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ สำหรับเป็นชั้นส่งผ่าน

อิเล็กตรอน จะเห็นได้ว่า เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่เคลือบด้วยไททาเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ อัตราส่วน 50:50 มีเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สูงที่สุดเท่ากับ 5.22 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเซลล์อ้างอิงที่มีประสิทธิภาพเท่ากับ 3.60 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีประสิทธิภาพที่สูงกว่า

2. ตำแหน่งที่เคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ด้วยอัตราส่วนที่แตกต่างกันลงด้านบนชั้นของไททาเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) และใช้ร่วมกันระหว่างซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์และไททาเนียมไดออกไซด์ สำหรับทำหน้าที่เป็นชั้นสารกึ่งตัวนำ

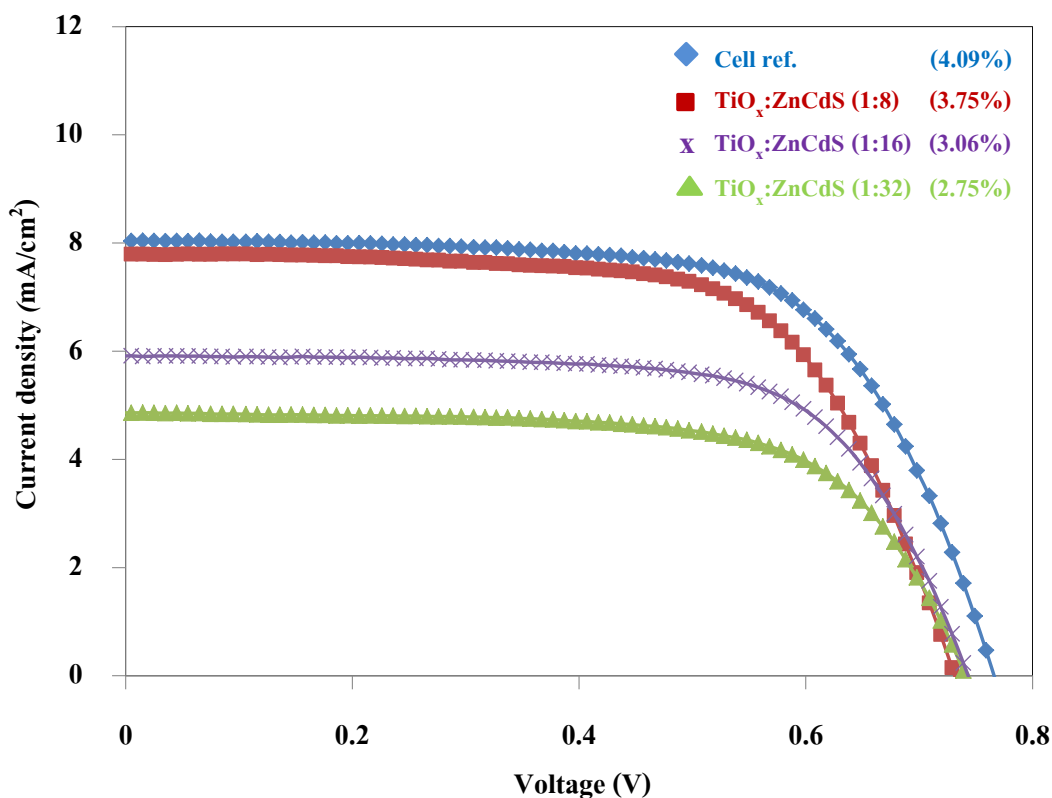
2.1 เคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่เป็นสารผสมระหว่างไททาเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ อัตราส่วน 1:8 1:16 และ 1:32 โดยหยดลงด้านบนชั้นของไททาเนียมไดออกไซด์ปริมาตร 40 ไมโครลิตร

ตารางที่ 4 - 3 ผลของค่าตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง ตำแหน่งที่ 2.1 ที่เคลือบสารผสมระหว่างไททาเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ อัตราส่วน 1:8 1:16 และ 1:32) โดยหยดลงด้านบนชั้นของไททาเนียมไดออกไซด์สำหรับทำหน้าที่เป็นชั้นสารกึ่งตัวนำ

เงื่อนไขการสร้างเซลล์	ค่าตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้า				
	ตำแหน่งที่ 2.1	$V_{oc}$ (Volt)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	Eff (%)
Cell (เซลล์อ้างอิง)		0.76	8.04	0.66	4.09
$\text{TiO}_x:\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{S}$ (1:8)		0.73	7.80	0.66	3.75
$\text{TiO}_x:\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{S}$ (1:16)		0.74	5.56	0.67	2.75
$\text{TiO}_x:\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{S}$ (1:32)		0.74	6.06	0.68	3.06

จากตารางที่ 4 - 3 แสดงผลของค่าตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงตำแหน่งที่ 2.1 ที่เคลือบสารผสมระหว่างไททาเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ อัตราส่วน 1:8 1:16 และ 1:32 โดยหยดลงด้านบนชั้นของไททาเนียมไดออกไซด์ปริมาตร 40 ไมโครลิตร สำหรับเป็นชั้นสารกึ่งตัวนำพบว่า มีค่าตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้าต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรมืด ( $V_{oc}$ ) เท่ากับ 0.76 0.73 0.74 และ 0.74 โวลต์ ตามลำดับ ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) เท่ากับ 8.04 7.80 5.56 และ 6.06 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

ลำดับ ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ เท่ากับ 0.66 0.66 0.67 และ 0.68 ตามลำดับ และเมื่อนำมาวัดเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงพบว่า มีค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพ (Eff) เท่ากับ 4.09 3.75 2.75 และ 3.06 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



ภาพที่ 4 - 5 กราฟเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $J - V$  curve) แสดงเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงตำแหน่งที่ 2.1 ที่เคลือบสารผสมระหว่างอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์โดยการหยดลงบนชั้นของไททานเนียมไดออกไซด์สำหรับเป็นชั้นสารกึ่งตัวนำ

จากภาพที่ 4 - 5 กราฟเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $J - V$  curve) แสดงเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงตำแหน่งที่ 2.1 ที่เคลือบสารผสมระหว่างอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์โดยการหยดลงบนชั้นของไททานเนียมไดออกไซด์สำหรับเป็นชั้นสารกึ่งตัวนำ จะเห็นได้ว่า เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่เคลือบด้วยสารผสมระหว่างไททานเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์อัตราส่วน 1:8 ลงด้านบนชั้นของไททานเนียมไดออกไซด์ มีเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์

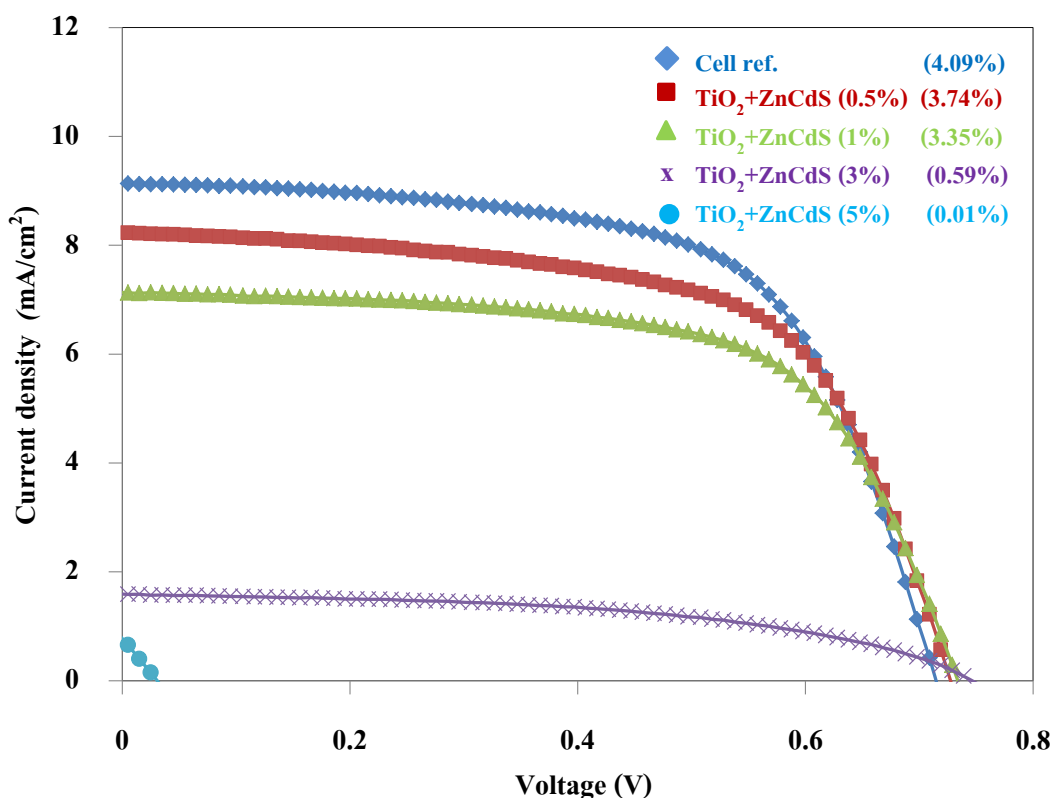
แสงอาทิตย์สูงสุดเท่ากับ 3.75 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเซลล์อ้างอิงที่มีประสิทธิภาพเท่ากับ 4.09 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่า

2.2 เคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ระดับความเข้มข้น 0.5 1 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ ที่ผสมกับไททานเนียมไดออกไซด์ สำหรับทำหน้าที่เป็นชั้นสารกึ่งตัวนำ

ตารางที่ 4 - 4 ผลของค่าตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง ตำแหน่งที่ 2.2 ที่เคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ระดับความเข้มข้น 0.5 1 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ ที่ผสมกับไททานเนียมไดออกไซด์ สำหรับทำหน้าที่เป็นชั้นสารกึ่งตัวนำ

เงื่อนไขการสร้างเซลล์ ตำแหน่งที่ 2.2	ค่าตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้า			
	$V_{oc}$ (Volt)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$FF$	Eff (%)
Cell (เซลล์อ้างอิง)	0.71	9.13	0.63	4.09
TiO <sub>2</sub> +Zn <sub>1-x</sub> Cd <sub>x</sub> S (0.5%)	0.72	8.22	0.63	3.74
TiO <sub>2</sub> +Zn <sub>1-x</sub> Cd <sub>x</sub> S (1%)	0.73	7.13	0.64	3.35
TiO <sub>2</sub> +Zn <sub>1-x</sub> Cd <sub>x</sub> S (3%)	0.74	1.60	0.50	0.59
TiO <sub>2</sub> +Zn <sub>1-x</sub> Cd <sub>x</sub> S (5%)	0.03	0.77	0.25	0.01

จากตารางที่ 4 - 4 แสดงผลของค่าตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงตำแหน่งที่ 2.2 ที่เคลือบสารผสมระหว่างไททานเนียมไดออกไซด์และซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ระดับความเข้มข้น 0.5 1 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ สำหรับทำหน้าที่เป็นชั้นสารกึ่งตัวนำพบว่า มีค่าตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้าต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรถัด ( $V_{oc}$ ) เท่ากับ 0.71 0.72 0.73 0.74 และ 0.03 โวลต์ ตามลำดับ ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) เท่ากับ 9.13 8.22 7.13 1.60 และ 0.77 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ ( $FF$ ) เท่ากับ 0.63 0.63 0.64 0.50 และ 0.25 ตามลำดับ และเมื่อนำมาวัดเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงพบว่า มีค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพ (Eff) เท่ากับ 4.09 3.74 3.35 0.59 และ 0.01 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



ภาพที่ 4 - 6 กราฟเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $J - V$  curve) แสดงเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงตำแหน่งที่ 2.2 ที่เคลือบสารผสมระหว่างไททาเนียมไดออกไซด์และซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่มีลักษณะเป็นผงสำหรับเป็นชั้นสารกึ่งตัวนำ

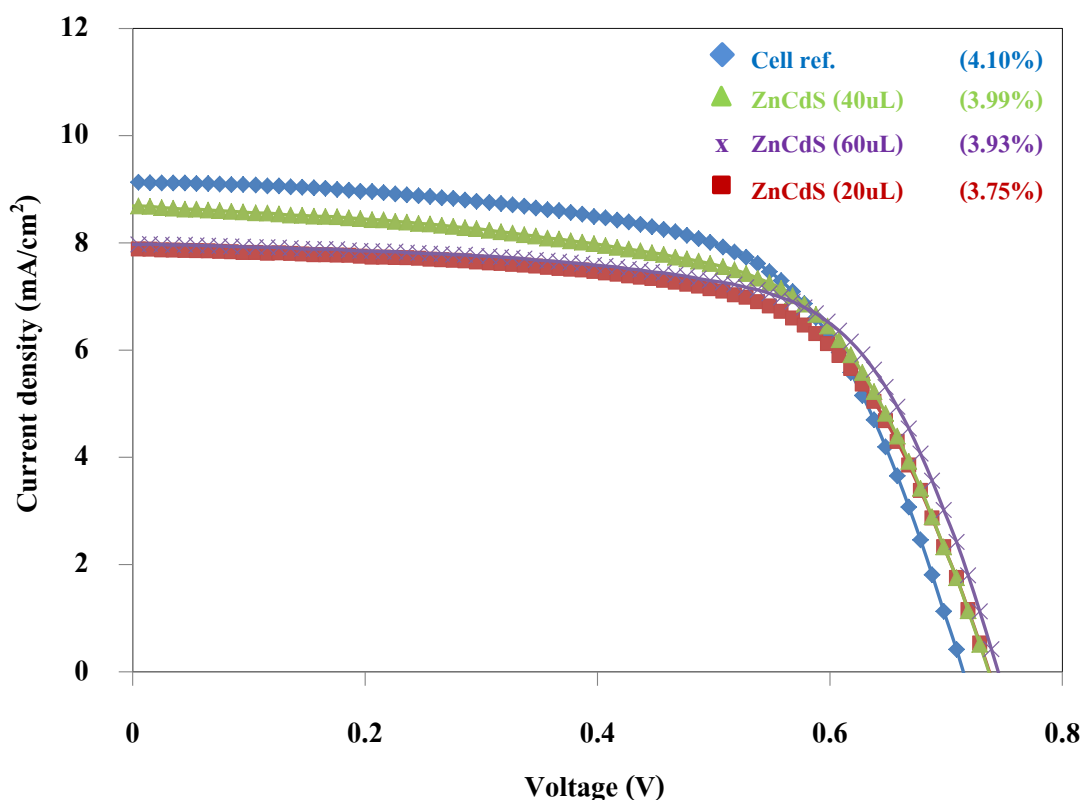
จากภาพที่ 4 - 6 กราฟเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $J - V$  curve) แสดงเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงตำแหน่งที่ 2.2 ที่เคลือบสารผสมระหว่างไททาเนียมไดออกไซด์และซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่มีลักษณะเป็นผงสำหรับเป็นชั้นสารกึ่งตัวนำ จะเห็นได้ว่า เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่เคลือบสารผสมระหว่างไททาเนียมไดออกไซด์และซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ระดับความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์ มีเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สูงที่สุดเท่ากับ 3.74 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเซลล์อ้างอิงที่มีประสิทธิภาพเท่ากับ 4.09 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่า

3. ตำแหน่งที่เคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์โดยการหยดที่ปริมาตร 20 40 และ 60 ไมโครลิตร ลงด้านบนชั้นของสีย้อมไวแสง (N 719) สำหรับทำหน้าที่เป็นตัวรับแสง

ตารางที่ 4 - 5 ผลของค่าตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง ตำแหน่งที่ 3 ที่เคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์โดยการหยด (ปริมาตร 20 40 และ 60 ไมโครลิตร) ลงด้านบนชั้นของสีย้อมไวแสง (N 719) สำหรับทำหน้าที่เป็นตัวรับแสง

เงื่อนไขการสร้างเซลล์ ตำแหน่งที่ 3	ค่าตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้า			
	$V_{oc}$ (Volt)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$FF$	Eff (%)
Cell (เซลล์อ้างอิง)	0.71	9.13	0.63	4.10
Zn <sub>1-x</sub> Cd <sub>x</sub> S (20 $\mu$ L)	0.74	7.89	0.66	3.75
Zn <sub>1-x</sub> Cd <sub>x</sub> S (40 $\mu$ L)	0.73	8.69	0.62	3.99
Zn <sub>1-x</sub> Cd <sub>x</sub> S (60 $\mu$ L)	0.74	7.97	0.66	3.93

จากตารางที่ 4 - 5 แสดงผลของค่าตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงตำแหน่งที่ 3 ที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ โดยการหยด (ปริมาตร 20 40 และ 60 ไมโครลิตร) ลงด้านบนชั้นของสีย้อมไวแสง (N 719) สำหรับทำหน้าที่เป็นตัวรับแสงและเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนให้กับเซลล์แสงอาทิตย์พบว่า มีค่าตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้าต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรถัด ( $V_{oc}$ ) เท่ากับ 0.71 0.74 0.73 และ 0.74 โวลต์ ตามลำดับ ค่ากระแสไฟฟ้ลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) เท่ากับ 9.13 7.89 8.69 และ 7.97 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ ( $FF$ ) เท่ากับ 0.63 0.65 0.62 และ 0.66 ตามลำดับ และเมื่อนำมาวัดเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงพบว่า มีค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพ(Eff) เท่ากับ 4.10 3.75 3.99 และ 3.93 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



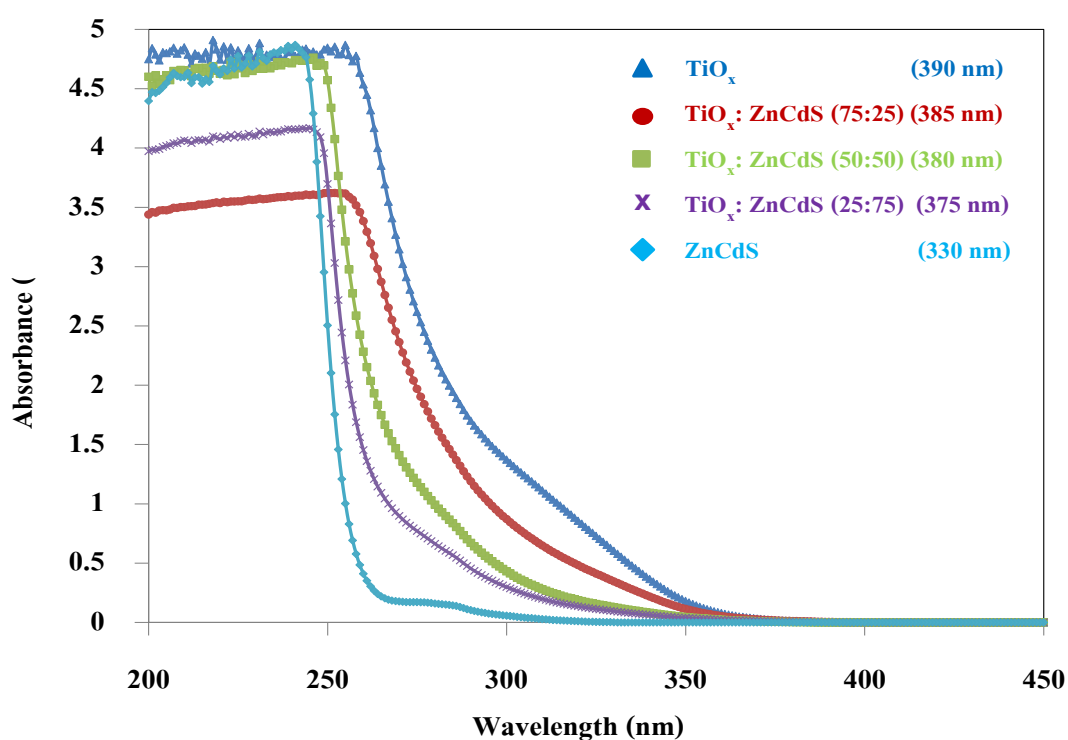
ภาพที่ 4 - 7 กราฟเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $J - V$  curve) แสดงเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงตำแหน่งที่ 3 ที่เคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์โดยการหยดลงด้านบนชั้นของสีย้อมไวแสงสำหรับเป็นชั้นสารไวแสง

จากภาพที่ 4 - 7 กราฟเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $J - V$  curve) แสดงเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงตำแหน่งที่ 3 ที่เคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์โดยการหยดลงด้านบนชั้นของสีย้อมไวแสง (N 719) สำหรับเป็นชั้นสารไวแสง จะเห็นได้ว่า เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่หยดอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ปริมาตร 40 ไมโครลิตร ลงด้านบนชั้นของสีย้อมไวแสงเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวรับแสงและเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนให้กับเซลล์ มีเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สูงที่สุดเท่ากับ 3.99 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเซลล์อ้างอิงที่มีประสิทธิภาพเท่ากับ 4.10 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่า



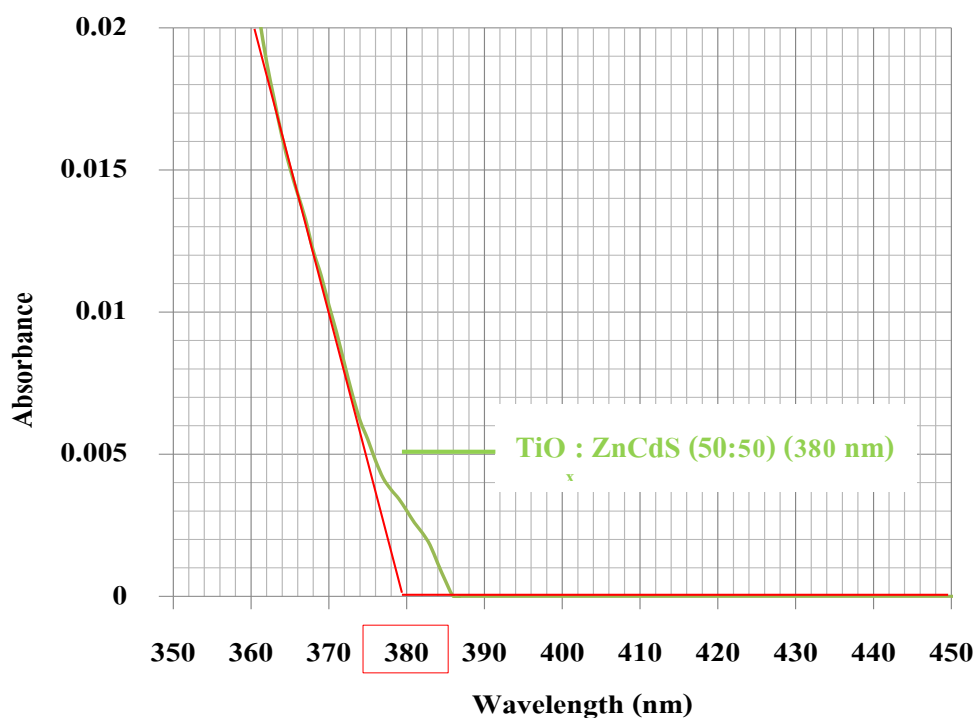
#### 4.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงและค่าแถบช่องว่างพลังงาน ( $E_g$ ) ของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ( $Zn_{1-x}Cd_xS$ ) ด้วยเทคนิคยูวี - วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV - Visible spectrophotometer)

ยูวี - วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติทางแสงของสาร โดยอาศัยหลักการดูดกลืนรังสีของสารที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิล ที่ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 190 - 1,000 นาโนเมตร สารแต่ละชนิดที่นำมาวิเคราะห์จะมีค่าการดูดกลืนรังสีในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์สมบัติทางแสงของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ มีจุดประสงค์เพื่อหาค่าแถบช่องว่างพลังงานที่เหมาะสมของสารสำหรับเป็นข้อมูลประกอบกับผลการวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบย้อมไวแสงโดยนำอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ละลายในทิวบ้านอลแอลกอฮอล์ปริมาตร 0.4 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ผสมกับไททานเนียมออกไซด์อัตราส่วน 75:25 50:50 และ 25:75 จากนั้นนำมาวิเคราะห์ในช่วงความยาวคลื่น 200 - 450 นาโนเมตร



ภาพที่ 4 - 8 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงของสารด้วยเทคนิคยูวี - วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ของไททานเนียมออกไซด์ ซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ และไททานเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ อัตราส่วน 75:25 50:50 และ 25:75 ที่ช่วงความยาวคลื่น 200 - 450 นาโนเมตร

จากภาพที่ 4 - 8 แสดงเปอร์เซ็นต์การวิเคราะห์สมบัติทางแสงของไททาเนียมออกไซด์ ซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ และไททาเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ อัตราส่วน 75:25 50:50 และ 25:75 เทียบกับช่วงความยาวคลื่นของแสงในช่วงยูวี - วิสิเบิล (200 - 700 นาโนเมตร) พบว่า สารที่มีช่วงความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงมากที่สุดคือ ไททาเนียมออกไซด์ มีค่าเท่ากับ 390 นาโนเมตร รองลงมาคือ ไททาเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ อัตราส่วน 75:25 50:50 และ 25:75 มีค่าเท่ากับ 385 380 และ 375 นาโนเมตร ตามลำดับ และสารที่มีช่วงความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงน้อยที่สุดคือ ซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ มีค่าเท่ากับ 330 นาโนเมตร นำค่าความยาวคลื่นมาคำนวณหาค่าแถบช่องว่างพลังงานของสารโดยหาจุดตัด (Cut off) ของความยาวคลื่นการส่องผ่านแสงในช่วง 200 - 450 นาโนเมตร และเปอร์เซ็นต์การดูดกลืนแสงในช่วง 0 - 0.02 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพที่ 4 - 9 แล้วลากเส้นตัดระหว่างแกนเอกซ์ (x) และแกนวาย (y) จากนั้นแทนลงในสมการหาค่าแถบช่องว่างพลังงาน (ตารางที่ 4 - 6)



ภาพที่ 4 - 9 ตัวอย่างการหาจุดตัด (Cut off) ของความยาวคลื่นการส่องผ่านแสงเพื่อหาค่าแถบช่องว่างพลังงานของสาร (ภาพขยายจากภาพที่ 4 - 8)

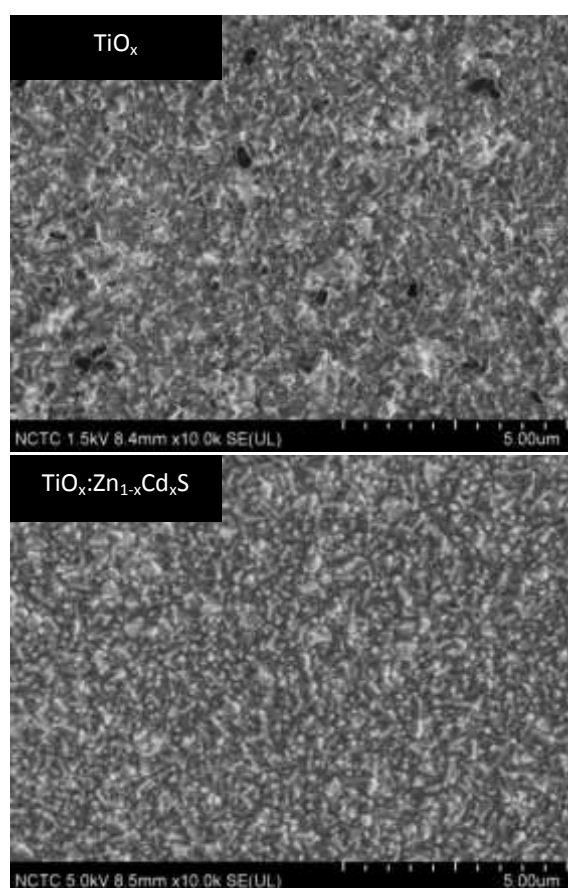
ตารางที่ 4 - 6 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของไททาเนียมออกไซด์ ซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ และไททาเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ (อัตราส่วน 75:25 50:50 และ 25:75) ที่ช่วงความยาวคลื่น 200 - 450 นาโนเมตร

สารตัวอย่าง ที่นำมาวิเคราะห์	ความยาวคลื่นการส่องผ่านแสง (นาโนเมตร)	ช่องว่างพลังงาน (อิเล็กตรอนโวลต์)
TiO <sub>x</sub>	390	3.19
TiO <sub>x</sub> :Zn <sub>1-x</sub> Cd <sub>x</sub> S (75:25)	385	3.23
TiO <sub>x</sub> :Zn <sub>1-x</sub> Cd <sub>x</sub> S (50:50)	380	3.27
TiO <sub>x</sub> :Zn <sub>1-x</sub> Cd <sub>x</sub> S (25:75)	375	3.32
Zn <sub>1-x</sub> Cd <sub>x</sub> S	330	3.77

จากตารางที่ 4 - 6 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของไททาเนียมออกไซด์ ซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ และไททาเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ (อัตราส่วน 75:25 50:50 และ 25:75) ที่ช่วงความยาวคลื่น 200 - 450 นาโนเมตร พบว่า อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์มีค่าแถบช่องว่างพลังงานสูงที่สุดเท่ากับ 3.77 อิเล็กตรอนโวลต์ รองลงมาคือ ไททาเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ (25:75 50:50 และ 75:25) มีค่าแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.32 3.27 และ 3.23 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ และไททาเนียมออกไซด์ มีค่าแถบช่องว่างพลังงานต่ำที่สุดเท่ากับ 3.19 อิเล็กตรอนโวลต์

#### 4.5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (Electron transport layer; ETL) ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FESEM)

เทคนิคการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FESEM) เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ เนื่องจากสามารถใช้ศึกษาวิเคราะห์ลักษณะของฟิล์มบางในระดับเล็กที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าและไม่สามารถจำแนกรายละเอียดได้ เพื่อใช้สำหรับเป็นข้อมูลประกอบผลการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง



ภาพที่ 4 - 10 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (ETL) ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FESEM)

จากภาพที่ 4 - 10 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (ETL) ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FESEM) จะเห็นได้ว่า ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนที่เคลือบด้วยไททานเนียมออกไซด์ และไททานเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ (อัตราส่วน 50:50) ลงบนกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบผิวกระจกด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน เพื่อเป็นองค์ประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงโดยใช้เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางแบบการนำพาการระเหยด้วยโปรแกรมอีซีโมชั้นพลัสটারที่ระดับความเร็ว 1,250 ไมโครเมตรต่อวินาที นำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำมาส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FESEM) ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า พบว่า ลักษณะของฟิล์มบางชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนที่เคลือบด้วยไททานเนียมออกไซด์และ ไททานเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ มีลักษณะที่แตกต่างกันคือ ชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนที่เคลือบด้วยไททานเนียมออกไซด์ มีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างขรุขระและเกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคค่อนข้างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนที่เคลือบด้วยไททานเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ (อัตราส่วน 50:50) จะเห็นได้ว่า มีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบสม่ำเสมอ และเกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคค่อนข้างน้อย เมื่อนำมาวัดประสิทธิภาพกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจึงทำให้มีประสิทธิภาพที่สูงกว่า

## บทที่ 5

### อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

#### 5.1 อภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้มีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ( $Zn_{1-x}Cd_xS$ ) ภายใต้รังสีไมโครเวฟที่เปอร์เซ็นต์การปล่อยกำลังของรังสีไมโครเวฟ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่กำลังไฟฟ้า 700 วัตต์ ระยะเวลา 60 วินาที และ 180 วินาที โดยใช้สารควบคุมขนาดอนุภาคคือ พอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดน กรดซิตริก และใช้ร่วมกันระหว่างพอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนและกรดซิตริก อนุภาคที่สังเคราะห์ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคและองค์ประกอบธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) และเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยรังสีเอกซ์ (EDX) และวัดขนาดอนุภาคของสารด้วยโปรแกรมอิมเมจ เพื่อนำอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมมาใช้กับขั้วโพลีเอทิลีนโพรพิลีน โดยนำมาเคลือบลงด้านบนกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีนในตำแหน่งที่แตกต่างกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง ซึ่งประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่สร้างขึ้นสามารถวัดได้ด้วยเครื่องเซลล์แสงอาทิตย์จำลองภายใต้ค่าของตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้าต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) ค่ากระแสไฟฟ้ลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ ( $FF$ ) และค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพ (EFF) เพื่อบอกถึงเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพสูงสุดของแต่ละตำแหน่งการเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ จำนวน 3 ตำแหน่ง ได้แก่

1. ตำแหน่งที่เคลือบลงด้านบนผิวของกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน สำหรับทำหน้าที่เป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (ETL) ด้วยไททานเนียมออกไซด์ ซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ และไททานเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่ละลายในทิวทานอลแอลกอฮอล์ อัตราส่วน 75:25 50:50 และ 25:75 เพื่อให้สามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนให้กับเซลล์ได้มากขึ้น

2. ตำแหน่งที่เคลือบลงด้านบนชั้นของไททานเนียมไดออกไซด์ที่เป็นสารกึ่งตัวนำ โดยหดยดสารผสมระหว่างไททานเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่ละลายในทิวทานอลแอลกอฮอล์ อัตราส่วน 1:8 1:16 และ 1:32 ปริมาตร 40 ไมโครลิตร (ส่วนที่ 1) และนำอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่มีลักษณะเป็นผง ระดับความเข้มข้น 0.5 1 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับไททานเนียมไดออกไซด์ สำหรับเป็นชั้นสารกึ่งตัวนำ (ส่วนที่ 2)

3. ตำแหน่งที่เคลือบลงด้านบนชั้นของสีย้อมไวแสง (N 719) โดยหยดอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่ละลายในทิวทานอลแอลกอฮอล์ ปริมาตร 20 40 และ 60 ไมโครลิตรลงด้านบนชั้นของสีย้อมไวแสง (N 719) สำหรับทำหน้าที่เป็นตัวรับแสง ดังตารางที่ 5 - 1

ตารางที่ 5 - 1 อัตราส่วน (โมล) ขององค์ประกอบธาตุเชิงพลังงานของซิงค์ต่อแคดเมียมเทียบกับซัลเฟอร์ (Zn: Cd เทียบกับ S) ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยรังสีเอกซ์ (EDX) ขนาดของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ และผลของค่าตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่เคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์แต่ละตำแหน่งที่แตกต่างกัน

ตำแหน่งที่	เงื่อนไขการสร้างเซลล์	ลักษณะอนุภาคและองค์ประกอบธาตุเชิงพลังงาน			ค่าตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้า				
		การสังเคราะห์อนุภาคนาโน	อัตราส่วน (โมล) (Zn: Cd: S)	ขนาดอนุภาค (นาโนเมตร)	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	Eff (%)	
								อ้างอิง	ทดสอบ
1	TiO <sub>x</sub> : Zn <sub>1-x</sub> Cd <sub>x</sub> S (50:50)	P - 100P180s	0.6:0.4:0.8	5	0.72	11.44	0.64	3.60	5.22
2	TiO <sub>x</sub> : Zn <sub>1-x</sub> Cd <sub>x</sub> S (1:8)	P - 100P180s	0.6:0.4:0.8	5	0.73	7.80	0.66	4.09	3.75
	TiO <sub>2</sub> +Zn <sub>1-x</sub> Cd <sub>x</sub> S (0.5%)	P - 100P180s	0.6:0.4:0.8	5	0.72	8.22	0.63	4.09	3.47
3	Zn <sub>1-x</sub> Cd <sub>x</sub> S (40 μL)	P - 100P180s	0.6:0.4:0.8	5	0.73	8.69	0.62	4.10	3.99



### 5.1.1 การวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคและองค์ประกอบธาตุเชิงพลังงานของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ( $Zn_{1-x}Cd_xS$ ) ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) และเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยรังสีเอกซ์ (EDX)

ผลการวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคและองค์ประกอบธาตุเชิงพลังงานจากอัตราส่วน (โมล) ของซิงค์ต่อแคดเมียมเทียบกับซัลเฟอร์ ( $Zn:Cd$  เทียบกับ  $S$ ) ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยรังสีเอกซ์ และขนาดอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์โดยใช้สารควบคุมขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน จากตารางที่ 5 - 1 พบว่า การสังเคราะห์โดยใช้สารควบคุมขนาดอนุภาคที่แตกต่างกันจะได้อัตราส่วน (โมล) ของสารแตกต่างกัน ซึ่งการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์โดยใช้พอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนในการควบคุมขนาดอนุภาคภายใต้รังสีไมโครเวฟที่เปอร์เซ็นต์การปล่อยกำลังของรังสีไมโครเวฟ 100 เปอร์เซ็นต์ที่กำลังไฟฟ้า 700 วัตต์ ระยะเวลา 60 วินาที และ 180 จะได้อัตราส่วน (โมล) ของการแทนที่แคดเมียมด้วยซิงค์เมื่อเทียบกับซัลเฟอร์สูงที่สุดเท่ากับ 0.4:0.6:0.8 และ 0.6:0.4:0.8 ตามลำดับ สอดคล้องกับการศึกษาของ Ahandani and Yangjeh (2010) ที่สังเคราะห์อนุภาคนาโนอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ภายใต้รังสีไมโครเวฟและใช้แสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการสังเคราะห์แบบไม่ใช้แผ่นต้นแบบพบว่า มีอัตราส่วน (โมล) ของการแทนที่แคดเมียมด้วยซิงค์ที่ได้จากการสังเคราะห์เท่ากับ 0.6:0.4:1 แต่การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์โดยใช้ร่วมกันระหว่างพอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนและกรดซิตริกในการควบคุมขนาดอนุภาคที่สังเคราะห์ภายใต้รังสีไมโครเวฟที่เปอร์เซ็นต์การปล่อยกำลังของรังสีไมโครเวฟ 100 เปอร์เซ็นต์ กำลังไฟฟ้า 700 วัตต์ ระยะเวลา 60 วินาที และ 180 จะได้อัตราส่วน (โมล) ของการแทนที่แคดเมียมด้วยซิงค์เมื่อเทียบกับซัลเฟอร์ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.3:0.7:0.6 และ 0.3:0.7:0.5 ตามลำดับ โดยปกติอัตราส่วน (โมล) ขององค์ประกอบธาตุเชิงพลังงานของซิงค์ต่อแคดเมียมเมื่อเทียบกับซัลเฟอร์ จะมีอัตราส่วน (โมล) ของ ซิงค์ต่อแคดเมียม ( $Zn:Cd$ ) เท่ากับ 1 และอัตราส่วน (โมล) ของซัลเฟอร์ เท่ากับ 1 แต่จากผลการวิจัยครั้งนี้พบว่า อัตราส่วน (โมล) ของซัลเฟอร์ ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้พอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนในการควบคุมขนาดอนุภาคภายใต้รังสีไมโครเวฟที่เปอร์เซ็นต์การปล่อยกำลังของรังสีไมโครเวฟ 100 เปอร์เซ็นต์ กำลังไฟฟ้า 700 วัตต์ ระยะเวลา 60 วินาที และ 180 วินาที มีอัตราส่วน (โมล) ของซัลเฟอร์ที่ลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอนุภาคของสารที่สังเคราะห์ได้มีอนุภาคขนาดเล็กมากระดับนาโนเมตร เมื่อนำมาผ่านการกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศและทำความสะอาดที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยตัวทำละลายคือ บิวทิลแอลกอฮอล์ อาจทำให้สารที่สังเคราะห์ได้ไหลออกมาพร้อมกับตัวทำละลายที่ใช้ทำความสะอาดเป็นเหตุทำให้ซัลเฟอร์หลุดออกจากโครงสร้างผลึกของสารที่เป็นแบบซิงค์เบลนด์ ดังนั้นอัตราส่วน (โมล) ของซัลเฟอร์จึงเกิดการ

ลดลง แต่การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์โดยใช้กรดซिटริก และใช้ร่วมกันระหว่างพอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนและกรดซिटริกในการควบคุมขนาดอนุภาคที่สังเคราะห์ภายใต้รังสีไมโครเวฟที่เปอร์เซ็นต์การปล่อยกำลังของรังสีไมโครเวฟ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่กำลังไฟฟ้า 700 วัตต์ ระยะเวลา 60 วินาที และ 180 วินาที ดังตารางที่ 4 - 1 มีอัตราส่วน (โมล) ของซัลเฟอร์ที่ลดลงมากกว่าการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่ใช้พอลิเมอร์พอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนในการควบคุมขนาดอนุภาค ซึ่งนอกจากจะมีผลมาจากขั้นตอนการทำความสะอาดสารด้วยตัวทำละลายบิวทิลแอลกอฮอล์แล้ว การนำกรดซिटริกมาใช้ในการสังเคราะห์ก็ส่งผลกระทบต่อลดลงของอัตราส่วน (โมล) ของซัลเฟอร์เป็นอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากกรดซिटริกมีคุณสมบัติที่สามารถละลายและทำปฏิกิริยาร่วมกับน้ำได้ดี เมื่อนำไปผ่านความร้อนด้วยรังสีไมโครเวฟจึงเกิดการระเหยออกมากกลายเป็นไอทำให้ซัลเฟอร์หลุดออกมาขณะที่สารกำลังเกิดปฏิกิริยา ทำให้อัตราส่วน (โมล) ของซัลเฟอร์เกิดการลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจนซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ขนาดอนุภาคของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์มีขนาดใหญ่ขึ้นตามมาด้วย

การวัดขนาดอนุภาคของสารที่สังเคราะห์ได้จะวัดด้วยโปรแกรมอิมเมจ ซึ่งเป็นโปรแกรมวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (TEM) จากตารางที่ 4 - 1 พบว่า กลุ่มที่ใช้พอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนและใช้ร่วมกันระหว่างพอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนและกรดซिटริกในการควบคุมขนาดอนุภาค จะเห็นว่ามีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 4 - 6 นาโนเมตร ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากและเป็นวัสดุขนาดนาโนเมตร สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Ahandani and Yangieh (2010) ที่ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ภายใต้รังสีไมโครเวฟและใช้แสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการสังเคราะห์แบบไม่ใช้แผ่นต้นแบบพบว่า มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 4.5 นาโนเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ คุณสมบัติความเป็นอนุภาคนาโนของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านสิ่งแวดล้อมได้หลากหลาย อาทิเช่น ใช้ยับยั้งอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียชนิดเอสเชอริเชีย โคลไล (วิชริณี สว่างจันทร์, 2557) ใช้เพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบคอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมไคซีลีไนต์ (Kumar, 2005) และที่สำคัญสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสียอมไวแสงของงานวิจัยนี้ได้ เนื่องจากอนุภาคระดับนาโนเมตรเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก เมื่อนำอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่มีอนุภาคขนาดเล็กเคลือบลงบนเซลล์แสงอาทิตย์แบบสียอมไวแสงทำให้คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสียอมไวแสงเกิดการเปลี่ยนแปลงทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสที่มากขึ้น ซึ่งอนุภาคนาโนจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอะตอมกับพื้นที่ผิวของอนุภาคขนาดเล็ก ยิ่งถ้ามีอนุภาคขนาดเล็กมากพื้นที่ผิวในการรับสัมผัสก็จะเพิ่มมากขึ้น สามารถช่วยส่งผ่านอิเล็กตรอนให้กับเซลล์ได้มากขึ้นทำให้เซลล์แสงอาทิตย์

แบบสี่ข้อมไวแสงที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพสูง โดยปริมาณของอะตอมที่พื้นที่ผิวนั้นจะมีนัยสำคัญกับขนาดของอนุภาคในระดับนาโน แต่จากตารางที่ 4 - 1 ถึงจะแม้การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์โดยใช้ร่วมกันระหว่างพอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนและกรดซิตริกในการควบคุมขนาดอนุภาคจะได้สารที่มีอนุภาคขนาดเล็กเช่นเดียวกับการสังเคราะห์โดยใช้พอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนก็ตาม แต่เมื่อพิจารณาอัตราส่วน (โมล) ของซัลเฟอร์ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยรังสีเอกซ์ (EDX) จะเห็นว่า อัตราส่วน (โมล) ของซัลเฟอร์เกิดการลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน ทำให้โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์เกิดความไม่สมบูรณ์ซึ่งอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสี่ข้อมไวแสงได้ และเมื่อพิจารณาอัตราส่วน (โมล) ของการแทนที่แคดเมียมด้วยซิงค์ที่สังเคราะห์โดยใช้พอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนในการควบคุมขนาดอนุภาค จะเห็นว่า มีอัตราส่วนปริมาณของการแทนที่แคดเมียมด้วยซิงค์ที่แตกต่างกันคือ 0.4:0.6 และ 0.6:0.4 ซึ่งสารที่มีอัตราส่วน (โมล) ของแคดเมียมเป็นองค์ประกอบที่มากเกินไปอาจส่งผลต่อความเป็นพิษต่อมนุษย์ และสิ่งแวดล้อมได้ เนื่องจากเป็นสารกลุ่มพวกโลหะหนัก เมื่อแคดเมียมได้รับสัมผัสกับอากาศที่มีความชื้นจะถูกออกซิไดซ์อย่างช้า ๆ เกิดเป็นแคดเมียมออกไซด์ ( $CdO_2$ ) เมื่อเกิดการปนเปื้อนต่อสิ่งแวดล้อมและเข้าสู่ร่างกายของมนุษย์ทำให้เกิดการสะสมพิษที่เพิ่มมากขึ้น อาจส่งผลต่อสุขภาพของมนุษย์ได้ (กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์, 2538) ดังนั้นจึงเลือกอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์โดยใช้สารควบคุมขนาดคือ พอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนที่สังเคราะห์ภายใต้รังสีไมโครเวฟที่เปอร์เซ็นต์การปล่อยกำลังของรังสีไมโครเวฟ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่กำลังไฟฟ้า 700 วัตต์ ระยะเวลา 60 วินาที และ 180 วินาที มาใช้สำหรับการศึกษาเพิ่มประสิทธิภาพของกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสี่ข้อมไวแสงของงานวิจัยครั้งนี้ ซึ่งเป็นสารที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมมากที่สุด

ในส่วนของระยะเวลาที่ใช้ในการฉายรังสีไมโครเวฟของแต่ละการสังเคราะห์โดยใช้สารควบคุมขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน ไม่มีผลต่อความแตกต่างของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่ระยะเวลา 60 วินาที และ 180 วินาที ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากระยะเวลาที่ช่วง 60 ถึง 180 วินาที สารพอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดน กรดซิตริก และใช้ร่วมกันระหว่างพอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนและกรดซิตริกที่ใช้ในการควบคุมขนาดอนุภาคมีการชะลอตัวต่ออัตราการเพิ่มขึ้นของอนุภาคไว้ เนื่องจากในช่วงระยะเวลา 60 ถึง 180 สารเกิดการทำปฏิกิริยากันได้อย่างสมบูรณ์ทำให้ขนาดอนุภาคของสารที่ได้จากการสังเคราะห์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำมาประยุกต์กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสี่ข้อมไวแสงของงานวิจัยนี้ แต่ถ้าเพิ่มระยะเวลาที่มากกว่า 180 วินาที ถึงแม้อนุภาคของสารที่ได้จากการสังเคราะห์จะมีขนาดเล็กลงมาตามลำดับก็ตาม แต่อัตราส่วน (โมล) ของซัลเฟอร์จากสารที่ได้จากการสังเคราะห์ก็จะลดลงตามมาด้วย ทำให้ลักษณะโครงสร้างแบบ

ซิงค์เบลนด์ ซึ่งเป็นโครงสร้างของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์เกิดความไม่สมบูรณ์เมื่อนำไปวัดประสิทธิภาพกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง อาจทำให้เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพที่ได้อาจไม่ดีเท่าที่ควร

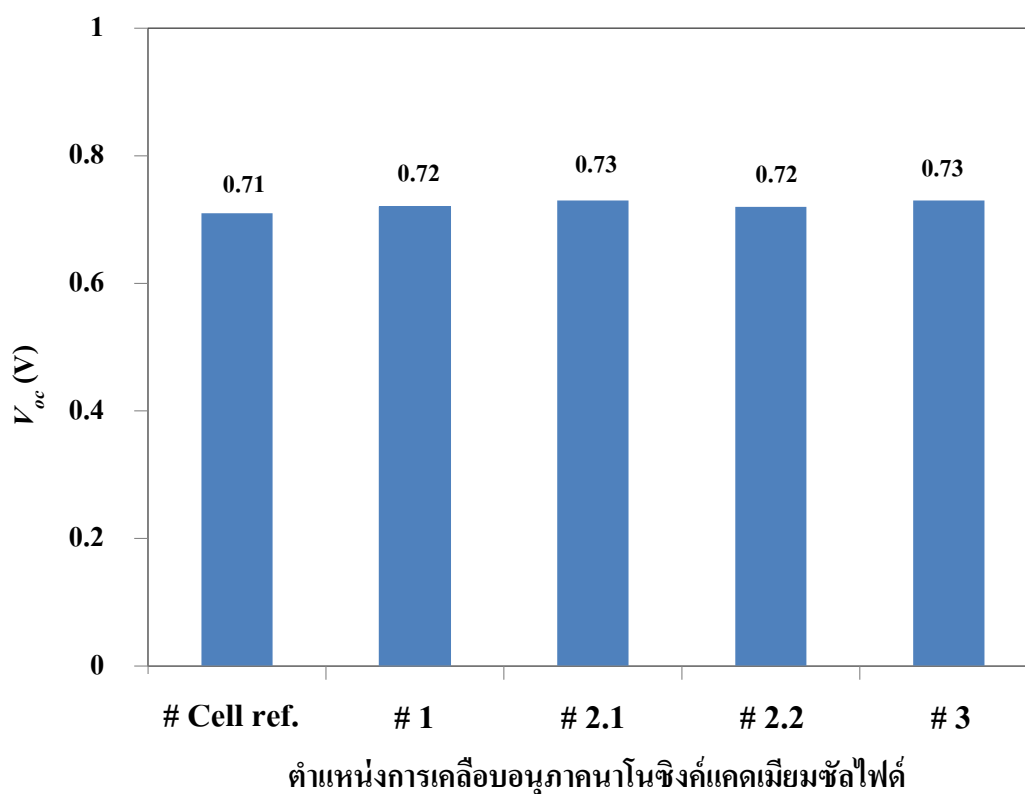
### 5.1.2 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ( $Zn_{1-x}Cd_xS$ ) ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD)

การวิเคราะห์ลักษณะองค์ประกอบเฟสความเป็น โครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) แบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สำหรับตัวอย่างที่เป็นผง ทั้งนี้เนื่องจากสารที่ได้จากสังเคราะห์มีลักษณะเป็นผง ดังนั้นจึงต้องใช้เทคนิคนี้ในการวิเคราะห์ ซึ่งการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะให้สเปกตรัมที่มีความจำเพาะต่อธาตุแต่ละชนิดที่ต่างกันซึ่งสามารถบอกวิฤภาคเชิงผลึกของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ได้ว่ามีความเป็น โครงสร้างผลึกหรืออสัณฐาน (ไม่เป็น โครงสร้างผลึก) ดังภาพที่ 4 - 2 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ แคดเมียมซัลไฟด์ และซิงค์ซัลไฟด์ ที่สังเคราะห์ที่สังเคราะห์ภายใต้รังสีไมโครเวฟที่เปอร์เซ็นต์การปล่อยกำลังของรังสีไมโครเวฟ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่กำลังไฟฟ้า 700 วัตต์ ระยะเวลา 180 วินาที โดยใช้สารควบคุมขนาดอนุภาคคือ พอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดน และอนุภาคนาโนไททานเนียมไดออกไซด์จากทางการค้า (Commercial) พบว่า ไททานเนียมไดออกไซด์เกิดฟิสิกส์เส้นสเปกตรัมของสารจำนวนมาก รังสีเอกซ์เกิดการเลี้ยวเบนได้ดี ลักษณะความสูงของพีกสูงสุดสังเกตได้จากมุม 2  $\theta$  ที่ช่วง 20 ถึง 30 องศา เนื่องจากอนุภาคของไททานเนียมไดออกไซด์มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรที่มีขนาดประมาณ 25 นาโนเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์ได้จากการวิจัยครั้งนี้ ดังนั้นจึงแสดงความเป็น โครงสร้างผลึกอย่างเห็นได้ชัดเจนสอดคล้องกับ (Kumar et al., 2012) ที่ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนไททานเนียมไดออกไซด์และนำมาตรวจสอบลักษณะ โครงสร้างผลึกของสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงพบว่า มีลักษณะความเป็น โครงสร้างผลึกที่สูงคล้ายกับไททานเนียมไดออกไซด์ที่นำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ส่วนเส้นสเปกตรัมของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์เกิดฟิสิกส์เส้นสเปกตรัมของสารน้อยมาก ลักษณะความสูงของพีกต่ำที่สุด สอดคล้องกับการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ของ (Kumar, 2005) ที่ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ภายใต้รังสีไมโครเวฟเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบคอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมไคซีลีไนด์ พบว่าให้ประสิทธิภาพที่สูงถึง 7.95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งความสูงพีกที่สูงที่สุดของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียม

ซัลไฟด์สามารถสังเกตได้จากมุม 2 ที่ต่ำ ที่ช่วง 20 ถึง 30 องศา เช่นเดียวกับไททาเนียมไดออกไซด์ จะเห็นได้ว่า ความสูงของพีคต่ำมากเมื่อเทียบกับอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ แสดงให้เห็นถึงความเป็นอัสฐาน (ไม่เป็นโครงสร้างผลึก) ของสาร และเมื่อนำเส้นสเปกตรัมของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์มาเทียบกับซิงค์ซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟด์ที่ใช้ในการทำอัลลอยด์ของการวิจัยครั้งนี้ จะแสดงความเป็นโครงสร้างผลึกค่อนข้างน้อยมาก ดังภาพที่ 4 - 2 และจะเห็นได้ว่าอนุภาคนาโนแคดเมียมซัลไฟด์มีลักษณะความเป็นโครงสร้างผลึกมากกว่าซิงค์ซัลไฟด์และซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์แต่ความสูงพีคของแคดเมียมซัลไฟด์ต่ำกว่าซิงค์ซัลไฟด์ และเมื่อนำเส้นสเปกตรัมของซิงค์ซัลไฟด์และซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์มาเปรียบเทียบกัน จะเห็นว่ามิลักษณะที่คล้ายคลึงกัน แต่ความสูงพีคของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ต่ำกว่า สังเกตได้จากมุม 2 ที่ต่ำ ที่ช่วง 20 องศา ถึง 60 องศา สาเหตุที่ความสูงพีคของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ต่ำที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของอนุภาคนาโนแคดเมียมซัลไฟด์เกิดการแทรกตัวเข้าไปอยู่ตามช่องว่างระหว่างอนุภาคของซิงค์ซัลไฟด์ เนื่องด้วยด้วยอนุภาคของอนุภาคนาโนซิงค์ซัลไฟด์แสดงความเป็นโครงสร้างผลึกที่น้อย แต่มีขนาดที่ใหญ่กว่าอนุภาคนาโนแคดเมียมซัลไฟด์ ดังนั้นจึงทำให้อนุภาคของแคดเมียมซัลไฟด์เกิดการแทรกตัวเข้าไปอยู่ตามช่องว่างระหว่างอนุภาคของซิงค์ซัลไฟด์ได้ดี ทำให้ความเป็นโครงสร้างผลึกและความสูงพีคของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์เกิดการลดลง และทำให้ขนาดอนุภาคของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์เล็กลงตามมาด้วย

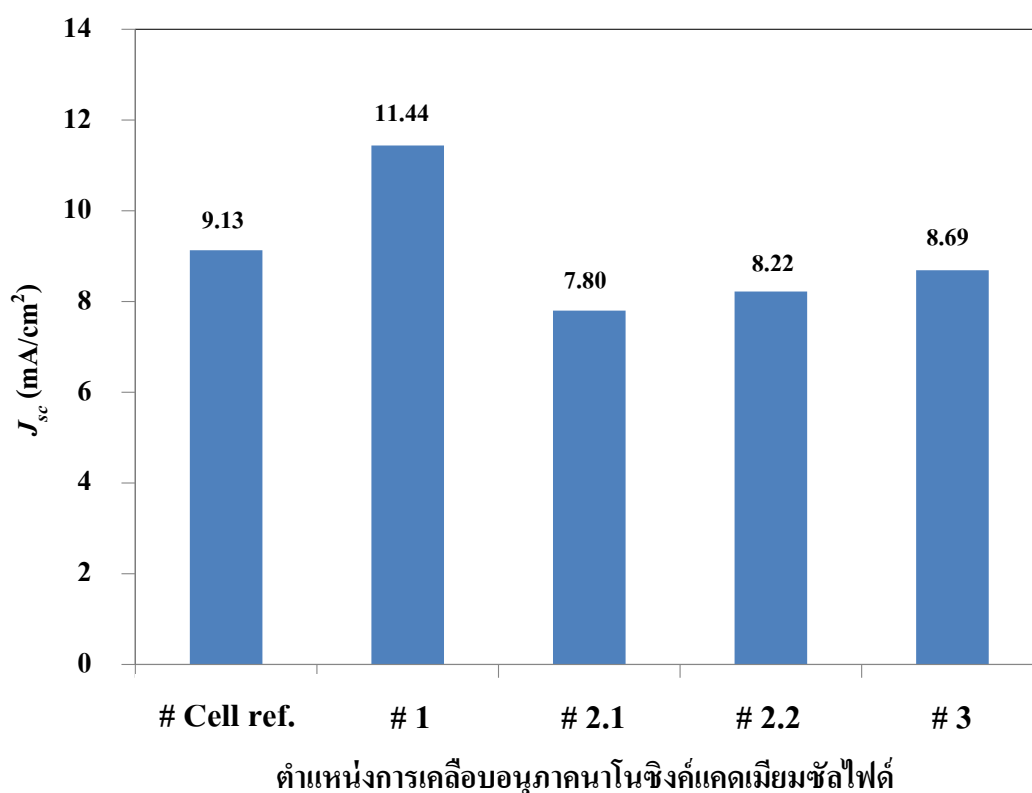
### 5.1.3 การวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงโดยเปรียบเทียบตำแหน่งการเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ( $Zn_xCd_xS$ ) ที่แตกต่างกัน

การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงโดยเปรียบเทียบตำแหน่งการเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่ต่างกันกันลงด้านบนกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน เพื่อเป็นขั้วโพโตอิเล็กโทรด์สำหรับเป็นองค์ประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง ซึ่งแต่ละตำแหน่งสามารถบอกถึงเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพ (Eff) สูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่สร้างขึ้นได้ สามารถวัดเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงได้ด้วยเครื่องเซลล์แสงอาทิตย์จำลอง ภายใต้ค่าของตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้าต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) มีหน่วยเป็นโวลต์ (V) ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) มีหน่วยเป็นมิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ( $mA/cm^2$ ) ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ (FF) และค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพ (Eff) มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (%) ดังนี้



ภาพที่ 5 - 1 กราฟค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่มีเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพสูงที่สุดของแต่ละตำแหน่งการเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่ต่างกัน

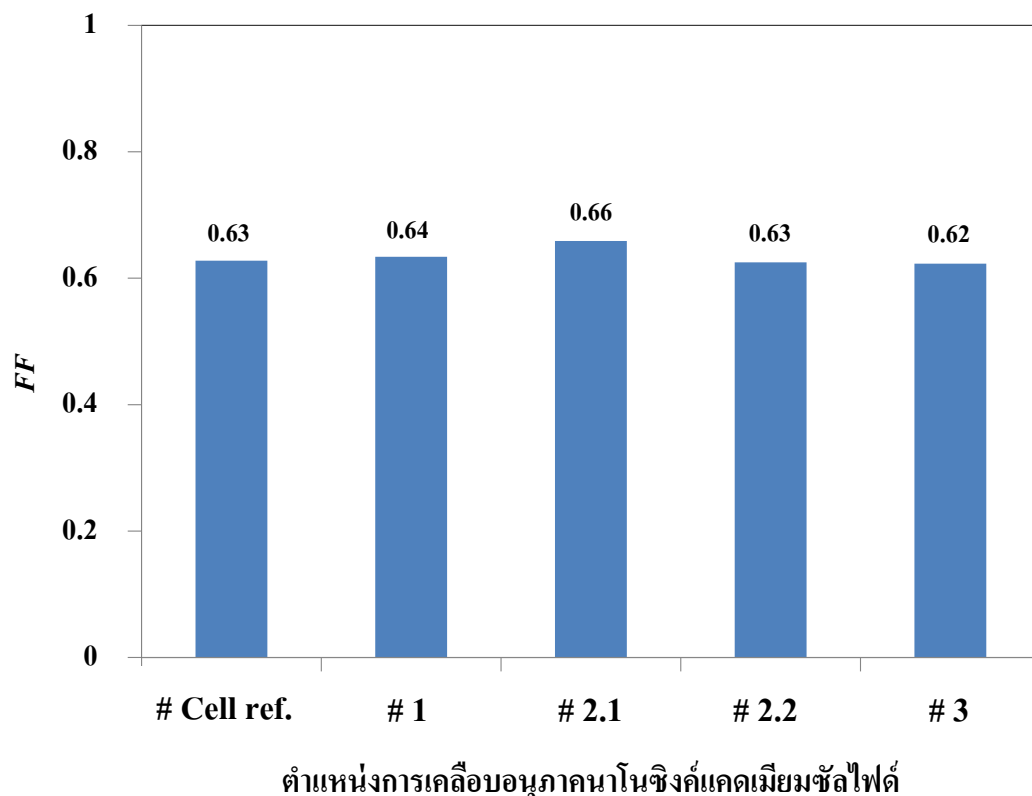
จากภาพที่ 5 - 1 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่มีเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพสูงสุดของแต่ละตำแหน่งการเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่แตกต่างกัน และเมื่อนำค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่มีเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพสูงสุดของแต่ละตำแหน่งมาเปรียบเทียบกับพบว่า มีค่าใกล้เคียงกันเท่ากับ 0.71 0.72 0.73 0.72 และ 0.73 โวลต์ ตามลำดับ



ภาพที่ 5 - 2 กราฟค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่มีเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพสูงสุดของแต่ละตำแหน่งการเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่แตกต่างกัน

จากภาพที่ 5 - 2 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่มีเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพสูงสุดของแต่ละตำแหน่งการเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่แตกต่างกัน และเมื่อนำค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่มีเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพสูงสุดของแต่ละตำแหน่งมาเปรียบเทียบกับพบว่า เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่เคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ลงบนตำแหน่งที่ 1 (อัตราส่วน 50:50) มีค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรสูงที่สุดเท่ากับ 11.44 มิลลิแอมแปร์ต่อตาราง

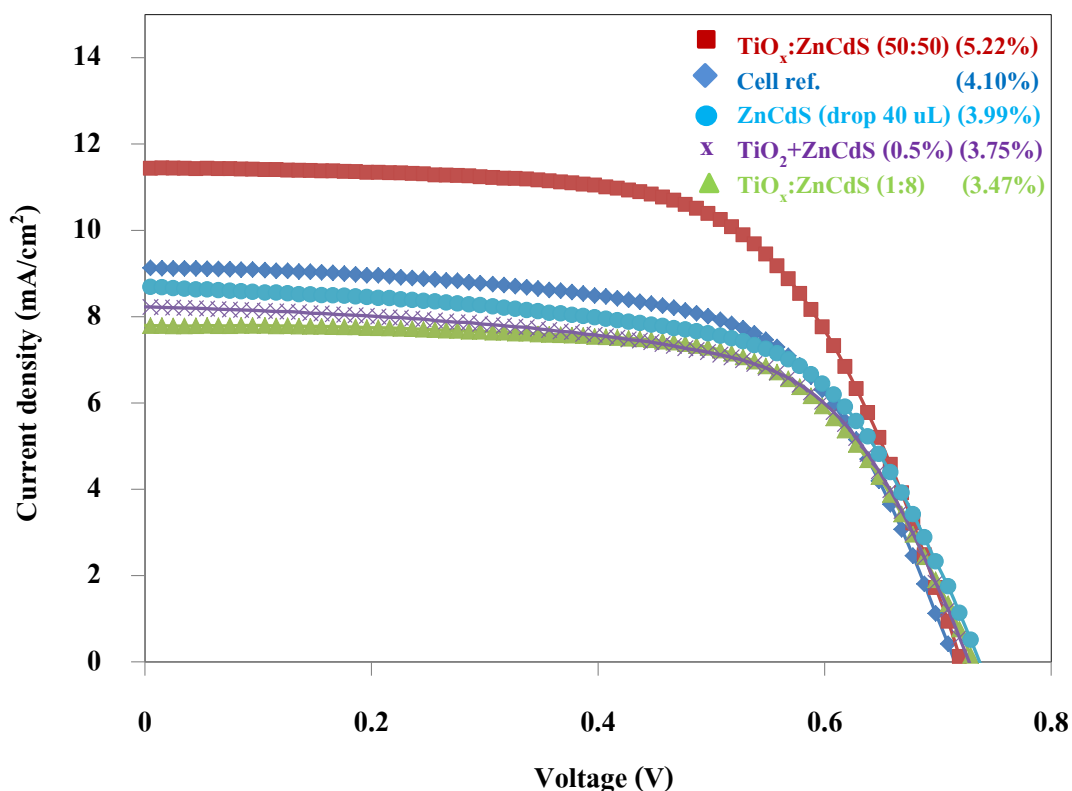
เซนติเมตร และเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่เคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ลงบนตำแหน่งที่ 2.1 (อัตราส่วน 1:8) มีค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่ำที่สุด เท่ากับ 7.80 มิลลิแอมแปร์ ต่อตารางเซนติเมตร



ภาพที่ 5 - 3 กราฟค่าฟิลล์แฟกเตอร์ ( $FF$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่มีเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพสูงที่สุดของแต่ละตำแหน่งการเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ที่แตกต่างกัน

จากภาพที่ 5 - 3 กราฟแสดงค่าฟิลล์แฟกเตอร์ ( $FF$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่มีเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพสูงที่สุดของแต่ละตำแหน่งการเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่ต่างกัน และเมื่อนำค่าฟิลล์แฟกเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่มีเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพสูงที่สุดของแต่ละตำแหน่งมาเปรียบเทียบกันพบว่า มีใกล้เคียงกันเท่ากับ 0.63 0.64 0.65 63 และ 0.62 ตามลำดับ





ภาพที่ 5 - 4 กราฟเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $J - V$  curve) แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสียอมไวแสงที่มีเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพสูงที่สุดของแต่ละตำแหน่งการเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่แตกต่างกัน

จากภาพที่ 5 - 4 กราฟเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $J - V$  curve) แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสียอมไวแสงที่มีเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพสูงที่สุดของแต่ละตำแหน่งการเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่แตกต่างกัน และเมื่อนำค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสียอมไวแสงที่มีเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพสูงที่สุดของแต่ละตำแหน่งมาเปรียบเทียบกันพบว่า เซลล์แสงอาทิตย์แบบสียอมไวแสงที่เคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ลงบนตำแหน่งที่ 1 (อัตราส่วน 50:50) มีค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพสูงที่สุดเท่ากับ 5.22 เปอร์เซ็นต์ และเซลล์แสงอาทิตย์แบบสียอมไวแสงที่เคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ลงบนตำแหน่งที่ 2.1 (อัตราส่วน 1:8) มีค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพต่ำที่สุดเท่ากับ 3.47 เปอร์เซ็นต์

เมื่อพิจารณาแนวโน้มจากภาพกราฟค่าของตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้าต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) ดังภาพที่ 5 - 1 ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) ดังภาพที่ 5 - 2 ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ ( $FF$ ) ดังภาพที่ 5 - 3 และค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพ ( $Eff$ ) ดังภาพที่ 5 - 4 พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพ ( $Eff$ ) มีความสัมพันธ์กับค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) มากที่สุด ถ้าค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรยิ่งสูง เปอร์เซนต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง ก็จะยิ่งเพิ่มมากขึ้น แต่ถ้าค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรยิ่งต่ำ เปอร์เซนต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงก็จะยิ่งต่ำลงมาด้วย ดังภาพที่ 5 - 4 ดังนั้นจะได้ว่าการเพิ่มขึ้นของ เปอร์เซนต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่เคลือบอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ลงด้านบนผิวของกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วย ฟลูออรีนสำหรับเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (ตำแหน่งที่ 1) นั้น เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร โดยที่ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจะมีความเป็นสัดส่วน โดยตรงกับความเข้มแสง เมื่อความเข้มแสงมีค่าสูงขึ้น ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงก็จะมีค่าสูงขึ้น ขณะที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด และค่าฟิลล์แฟกเตอร์ แทบจะไม่แปรผันตามค่าความเข้มแสงมากนัก แต่จะแปรผันตามอุณหภูมิและความชื้น เป็นต้น (วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี, 2558) ดังนั้นค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพ ( $Eff$ ) จึงมีความสัมพันธ์กับค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) มากที่สุด

#### 5.1.4 การวิเคราะห์สมบัติทางแสงและค่าแถบช่องว่างพลังงาน ( $E_g$ ) ของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ( $Zn_{1-x}Cd_xS$ ) ด้วยเทคนิคยูวี - วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV - Visible spectrophotometer)

การวิเคราะห์สมบัติทางแสงของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์ขึ้น ด้วยเทคนิคยูวี - วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยอาศัยหลักการดูดกลืนรังสีของสารที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 190 - 1,000 นาโนเมตร มีจุดประสงค์เพื่อหาค่าแถบช่องว่างพลังงานของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่เหมาะสมสำหรับเป็นข้อมูลประกอบผลของการวัดเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง ดังภาพที่ 4 - 7 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงของ ไททานเนียมออกไซด์ ซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ และไททานเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ (อัตราส่วน 75:25 50:50 และ 25:75) เทียบกับช่วงความยาวคลื่นของแสงในช่วงยูวี - วิสิเบิล (200 - 700 นาโนเมตร) พบว่า สารที่มีช่วงความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงมากที่สุดคือ ไททานเนียมออกไซด์มีค่าเท่ากับ 390 นาโนเมตร รองลงมาคือ ไททานเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ (75:25 50:50 และ 25:75) มีค่าเท่ากับ 385 380 และ 375 นาโนเมตร

ตามลำดับ และสารที่มีช่วงความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงน้อยที่สุดคือซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์มีค่าเท่ากับ 330 นาโนเมตร ซึ่งค่าแถบช่องว่างพลังงานโดยทั่วไปจะประกอบด้วยแถบวาเลนซ์ และแถบการนำไฟฟ้า มีช่องว่างพลังงาน ( $E_g$ ) ที่มีความกว้างไม่เกิน 4 อิเล็กตรอนโวลต์ กั้นระหว่างแถบทั้งสองนี้ เป็นพลังงานที่ใช้งานในการทำให้อิเล็กตรอนหนึ่งตัววิ่งผ่านสนามศักย์ไฟฟ้า 1 โวลต์ เมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ได้รับพลังงานมากพอจะสามารถข้ามแถบช่องว่างพลังงานไปยังแถบการนำจึงทำให้เกิดการนำกระแสไฟฟ้าได้ การหาค่าแถบช่องว่างพลังงานของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์สามารถหาได้จากจุดตัด (Cut off) ของความยาวคลื่นการส่องผ่านแสงในช่วง 200 - 450 นาโนเมตร แล้วลากเส้นตัดระหว่าง แกนเอกซ์ (x) และแกนวาย (y) จากที่ทราบมาแล้วว่าค่าพลังงานแสงจะมีความสัมพันธ์กับค่าความยาวคลื่นแสง ดังสมการที่ 5.1

$$E = hc/\lambda \quad (5.1)$$

- เมื่อ  $E$  คือ พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีหน่วยเป็นจูล (Joule, J)  
 $h$  คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) มีค่าเท่ากับ  $6.626 \times 10^{-34}$  จูลต่อวินาที  
 $c$  คือ ความเร็วแสง ( $3.0 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที)  
 $\lambda$  คือ จุดตัดแกน (Cut off) ของความยาวคลื่นการส่องผ่านแสง (นาโนเมตร)

แสงที่มีความยาวคลื่นมากจะมีพลังงานต่ำและถ้าค่าพลังงานนี้ต่ำกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงานของสารตัวอย่างจะทำให้แสงสามารถส่องผ่านสารตัวอย่างได้ ส่งผลให้ค่าการส่องผ่านแสงของสารมีค่าสูง แต่ถ้าแสงที่มีความยาวคลื่นน้อยจะมีพลังงานสูง และถ้าค่าพลังงานนี้สูงกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงานของสารตัวอย่างจะทำให้แสงไม่สามารถส่องผ่านสารตัวอย่างได้หรือส่องผ่านได้น้อย (มากกว่าหรือเท่ากับค่าแถบช่องว่างพลังงานของสารตัวอย่าง) แสงก็จะถูกดูดกลืนโดยสารตัวอย่างสังเกตได้จากการลดลงของค่าการส่องผ่านแสง ซึ่งการลดลงในส่วนนี้สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าแถบช่องว่างพลังงานของสารตัวอย่างได้พบว่า ไททานเนียมออกไซด์มีค่าแถบช่องว่างพลังงานต่ำที่สุดเท่ากับ 3.19 อิเล็กตรอนโวลต์ รองลงมาคือ ไททานเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ (อัตราส่วน 75:25 50:50 และ 25:75) มีค่าแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.23 3.27 และ 3.32 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ และอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์มีค่าแถบช่องว่างพลังงานสูงที่สุดเท่ากับ 3.77 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังตารางที่ 4 - 6 แต่ผลจากการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงพบว่า ไททานเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ (อัตราส่วน 50:50) มีเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงสูงที่สุด เมื่อสังเกตจาก

ค่าแถบช่องว่างพลังงานที่คำนวณได้จากสมการข้างต้นพบว่า มีค่าเท่ากับ 3.27 อิเล็กตรอนโวลต์ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากไททานเนียมออกไซด์และอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ เมื่อนำมาผสมในอัตราส่วนที่เท่ากัน (50:50) ค่าแถบช่องว่างพลังงานของสารผสมนี้จะมีค่าอยู่ระหว่างกึ่งกลางของไททานเนียมออกไซด์และอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์พอดี เมื่อได้รับแสงจากดวงอาทิตย์ อิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับชั้นพลังงานออร์บิทัลสูงสุดที่มีอิเล็กตรอนของสีย้อมอยู่ จะถูกกระตุ้นไปสู่ระดับชั้นพลังงานออร์บิทัลต่ำสุดที่ไม่มีอิเล็กตรอนอยู่ หลังจากนั้นอิเล็กตรอนที่ระดับชั้นพลังงานออร์บิทัลต่ำสุด จะถูกฉีดเข้าไปในชั้นแถบนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่ทำงานร่วมกับสีย้อมไวแสงซึ่งต้องมีระดับพลังงานที่สูงและส่งต่อมายังชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนที่มีระดับพลังงานที่ต่ำกว่า ดังนั้นค่าแถบช่องว่างพลังงานของไททานเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ (อัตราส่วน 50:50) จึงเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดที่จะช่วยส่งผ่านอิเล็กตรอนให้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงได้ดีที่สุดเมื่อได้รับการกระตุ้นอย่างมีประสิทธิภาพจากแสง

#### 5.1.5 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (ETL) ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FESEM)

การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนซึ่งเป็นองค์ประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FESEM) เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบาง เนื่องจากสามารถใช้วิเคราะห์วัสดุขนาดนาโนเมตรที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าและไม่สามารถจัดจำแนกรายละเอียดต่าง ๆ ได้ ซึ่งลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนที่เคลือบด้วยไททานเนียมออกไซด์ และไททานเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ (อัตราส่วน 50:50) ลงด้านบนผิวของกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน และนำมาส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 50,000 เท่า พบว่า ลักษณะของฟิล์มบางชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนที่เคลือบด้วยไททานเนียมออกไซด์และไททานเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์มีลักษณะที่ต่างกัน โดยชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนที่เคลือบด้วยไททานเนียมออกไซด์มีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างขรุขระและเกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคค่อนข้างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนที่เคลือบด้วยไททานเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ (อัตราส่วน 50:50) มีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบสม่ำเสมอและเกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคค่อนข้างน้อย สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Kumar (2005) ที่เคลือบฟิล์มบางด้วยอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์สำหรับใช้เพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบคอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมไคซีลีไนด์พบว่า ลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบสม่ำเสมอ และเกิดช่องว่างระหว่างอนุภาค

ค่อนข้างน้อยเช่นเดียวกับการวิจัยครั้งนี้ เนื่องจากอนุภาคของไททานเนียมออกไซด์เป็นสารที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบอนาเทส (Anatase) ที่มีขนาดอนุภาค 25 นาโนเมตร ซึ่งเป็นสารที่มีอนุภาคขนาดใหญ่กว่าอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ เมื่ออนุภาคของไททานเนียมออกไซด์เกิดการรวมตัวกันทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคจำนวนมาก แต่เมื่อนำมาเคลือบลงด้านบนผิวของกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน อนุภาคของสารสามารถเกาะติดกันได้เพราะมีตัวทำละลายคือ เอทานอลแอมโซลูทแอลกอฮอล์เป็นตัวเชื่อมระหว่างโมเลกุลของไททานเนียมออกไซด์ เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ตัวทำละลายที่เป็นเอทานอลแอมโซลูทแอลกอฮอล์จะถูกเผาและหลุดออกไปจากโครงสร้างของไททานเนียมออกไซด์ จึงทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคจำนวนมาก แต่ชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนที่เคลือบด้วยไททานเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ (อัตราส่วน 50:50) จะเห็นได้ว่า มีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบสม่ำเสมอและเกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคค่อนข้างน้อย ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์เป็นสารที่มีอนุภาคขนาดเล็กประมาณ 4 - 6 นาโนเมตร เมื่อนำมาผสมกับไททานเนียมออกไซด์ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่กว่า ทำอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่มีขนาดเล็กนั้นสามารถแทรกตัวเข้าไปอยู่ตามช่องว่างระหว่างอนุภาคของไททานเนียมออกไซด์ได้ และเมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จึงทำให้มีช่องว่างระหว่างอนุภาคเกิดขึ้นค่อนข้างน้อย ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสให้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง เพื่อให้สามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนได้มากขึ้น และเมื่อนำมาวัดเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง ทำให้มีเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพที่สูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่เคลือบชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนด้วยไททานเนียมออกไซด์เพียงชนิดเดียว ดังภาพที่ 4 - 8

## 5.2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงกับการลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม

การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่มีประสิทธิภาพสูงมีความสำคัญต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงเป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำ เมื่อได้รับการกระตุ้นจากพลังงานแสงจากดวงอาทิตย์หรือแสงจากหลอดไฟจะเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงได้ เป็นพลังงานทดแทนชนิดหนึ่งที่สะอาดและไม่สร้างมลภาวะใด ๆ ให้กับสิ่งแวดล้อมในขณะที่ใช้งาน สามารถนำมาทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงต่าง ๆ ที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในอนาคตได้ สามารถช่วยลดมลพิษที่เกิดขึ้นจากการใช้เชื้อเพลิง เช่น น้ำมัน ถ่านหิน ฯลฯ ในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงมีส่วนช่วยในการลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) และไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) ที่เกิดจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าจากวัสดุที่เป็นเชื้อเพลิง

ในปัจจุบัน และช่วยลดค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการกำจัดสารมลพิษต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นดังกล่าวด้วย การนำพลังงานรูปแบบอื่น ๆ มาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น พลังงานไฟฟ้าจากนิวเคลียร์ จะมีค่าใช้จ่ายการลงทุนในการก่อสร้างและถอดทิ้งทำลายเตาปฏิกรณ์สูงมาก ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมคิดตามอย่างมากมาย เช่น มลพิษทางอากาศ ฝนกรดและสภาวะเรือนกระจก เป็นต้น มีผลกระทบเป็นลูกโซ่ต่อทั้งระบบนิเวศน์และความเป็นอยู่ของมนุษย์ อีกทั้งยังไม่สามารถสร้างความเชื่อมั่นในความปลอดภัยที่ประชาชนทั่วไปยอมรับได้ จะเห็นได้ว่า เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงมีความสำคัญต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมากและเมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายทั้งในด้านการลงทุนเพื่อให้ได้มาซึ่งพลังงานจะเห็นว่าต้นทุนพลังงานที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีราคาถูกกว่าแหล่งของพลังงานประเภทอื่น ๆ ประการสำคัญคือ พลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นหนึ่งในพลังงานที่มีความยั่งยืนไม่มีที่สิ้นสุด ถึงแม้ว่าการวิจัยครั้งนี้จะมีการนำแคดเมียมซึ่งเป็นสารพวกโลหะหนักที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์มาใช้เป็นองค์ประกอบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงก็ตาม แต่เป็นการนำมาใช้ในปริมาณที่น้อยมากประมาณ 0.4 มิลลิกรัมต่อมิลลิเมตร หรือประมาณ 0.0012 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานที่ระเบียบของ โรห์ส (RoHS) กำหนดไว้ว่า ปริมาณการใช้แคดเมียมอนุญาตให้มีการปนเปื้อนในสินค้าเครื่องใช้ไฟฟ้าและสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ได้ไม่เกิน 0.01 เปอร์เซ็นต์ หรือ 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร (100 ppm) โดยน้ำหนักในวัสดุเนื้อเดียวกัน (คณะผู้แทนไทยประจำประชุมยุโรป, 2549) ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยมาก ในทางกลับกันสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย

การเริ่มต้นร่วมมือกันเพื่อลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในวันนี้คงยังไม่สาย หากเราจะกลับไปสู่พลังงานที่ให้กำเนิดชีวิตและมีให้ใช้อย่างเหลือเฟือ ซึ่งเป็นอีกหนทางหนึ่งที่จะช่วยบรรเทาปัญหาการขาดแคลนพลังงานและช่วยลดปัญหาภาวะเป็นพิษที่เกิดขึ้นให้เบาบางลงไป อันหมายถึงคุณภาพชีวิตและสิ่งแวดล้อมที่ดีก็จะหวนกลับคืนมาสู่มวลมนุษย์และสรรพชีวิตบนดาวเคราะห์สีน้ำเงินใบนี้ได้

### 5.3 สรุปผลการวิจัย

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ( $Zn_{1-x}Cd_xS$ ) ภายใต้รังสีไมโครเวฟที่เปอร์เซ็นต์การปล่อยกำลังของรังสีไมโครเวฟ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่กำลังไฟฟ้า 700 วัตต์ ระยะเวลา 180 วินาที โดยใช้สารควบคุมขนาดอนุภาคคือ พอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดน (P-100P180s) อนุภาคที่สังเคราะห์ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคและองค์ประกอบธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) และการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยรังสีเอกซ์ (EDX) พบว่า ขนาดอนุภาคที่สังเคราะห์ได้จะอยู่ในช่วง 4 - 6 นาโนเมตร และมีอัตราส่วน (โมล) ของการแทนที่แคดเมียมด้วยซิงค์สูงสุดเท่ากับ 0.6:0.4:0.8 (Zn: Cd เทียบกับ S) โดยผลการวิจัยครั้งนี้จะไม่ขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ สารที่สังเคราะห์ได้นั้นจะถูกนำมาเคลือบที่ตำแหน่งชั้นต่าง ๆ ของขั้วโฟโตอิเล็กโทโรดเพื่อประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง พบว่า อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่เคลือบลงตำแหน่งด้านบนผิวของกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) สำหรับเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (ETL) มีค่าตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้าต่าง ๆ ที่วัดได้จากเครื่องเซลล์แสงอาทิตย์จำลอง (Solar simulator) ได้แก่ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) เท่ากับ 0.72 โวลต์ ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) เท่ากับ 11.44 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ ( $FF$ ) เท่ากับ 0.64 และมีเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพ (Eff) ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงเท่ากับ 5.22 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสูงขึ้นกว่าเซลล์อ้างอิงถึง 45 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพที่ 4 - 4 เนื่องจากมีค่าแถบช่องว่างพลังงานที่เหมาะสมเท่ากับ 3.27 อิเล็กตรอน โวลต์ ดังตารางที่ 4 - 6 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าแถบช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำไททานเนียมไดออกไซด์ ทำให้สามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนได้มากขึ้น เมื่อพิจารณาแนวโน้มจากภาพกราฟค่าของตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้าต่าง ๆ ทั้ง 4 ชนิด พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง (Eff) มีความสัมพันธ์กับค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) มากที่สุด ถ้าค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรยังมีค่าที่สูงขึ้น เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงก็จะยิ่งเพิ่มมากขึ้น แต่ถ้าค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรยังมีค่าที่ต่ำลง เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงก็จะยิ่งลดลงตามมาด้วย ดังภาพที่ 5 - 4 ดังนั้นจะเห็นว่า การเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ลงด้านบนผิวของกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (ตำแหน่งที่ 1) สำหรับเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรนั่นเอง

นอกจากนี้อนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์ได้จากการวิจัยครั้งนี้ มีปริมาณการใช้แคดเมียมที่น้อยลงอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยการแทนที่ด้วยซิงค์ ซึ่งจะช่วยลดความเป็นพิษของแคดเมียมที่เกิดจากการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงได้ถึง 0.0012 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์พลังงานสะอาด ไม่สร้างมลภาวะใด ๆ ให้กับสิ่งแวดล้อมในขณะที่ใช้งาน สามารถนำมาทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในอนาคตได้และที่สำคัญสามารถช่วยลดมลพิษที่เกิดขึ้นจากการใช้เชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ เฟอร์ริกออกไซด์ และไนโตรเจนออกไซด์ ที่เกิดจากโรงไฟฟ้าในปัจจุบันซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ได้

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาผลของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่เคลือบลงด้านบนผิวของกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีนแทนการเคลือบด้วยเพลทินัม สำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทดรีดอกซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

2. ควรนำอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์มาประยุกต์ใช้กับกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบอื่น ๆ บ้าง ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์แบบสารอินทรีย์และเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอโรฟสไกต์ (Perovskite) เป็นต้น



## บรรณานุกรม

- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.). (2554). *พลังงานทดแทน*. เข้าถึงได้จาก [www.egat.co.th/re/](http://www.egat.co.th/re/)
- กীরติ ทองรุ่ง และณัฐภัทร์ เสงมีชัย. (2554). *เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงด้วยสัณฐานชาติที่สกัดจากไหล*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยรังสิต.
- กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์. (2538). *ความรู้เกี่ยวกับสิ่งเป็นพิษ ตอนที่10*. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ข่าวพาณิชย์.
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน. (2558). *กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด*. เข้าถึงได้จาก <http://sor-por-chor.blogspot.com/2012/01/electron-microscope.html>.
- คณะผู้แทนไทยประจำประชาคมยุโรป. (2549). *กฎระเบียบ RoHS และ WEEE ของสหภาพยุโรป: ระเบียบว่าด้วยการจำกัดการใช้สารอันตรายในผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์*. เข้าถึงได้จาก [www.is.pcd.go.th/envecodb/download/eu/rohs.pdf](http://www.is.pcd.go.th/envecodb/download/eu/rohs.pdf).
- จ่านงค์ บุญลอย และสุวิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์. (2554). การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงโดยเทคนิคการสกรีน. ใน *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 49*. กรุงเทพฯ 1 - 4 ก.พ. 2554 (หน้า 130 - 137). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา; กระทรวงศึกษาธิการ; กระทรวงเกษตรและสหกรณ์; กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี; กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม; กระทรวงเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร; สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ; สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- ชานู โทธิพิทักษ์. (2558). *มารู้จักเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงกันเถอะ*. เข้าถึงได้จาก [www.scitech.dusit.ac.th/page/research/chanu.pdf](http://www.scitech.dusit.ac.th/page/research/chanu.pdf).
- ชวนพิศ คณะพัฒน. (2552). *การศึกษาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้สีย้อมจากเปลือกไม้*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาฟิสิกส์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี.
- โดโรที. (2549/23/04). *อนุภาคนาโน. นิตยสารรายสะดวก*. เข้าถึงได้จาก <http://www.noknoi.com/magazine/article>.

- เถกิงศักดิ์ ชุตโรสง. (2555). *ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงซึ่งก่อออกไซด์ที่ใช้สีย้อมธรรมชาติจากพืชท้องถิ่นของประเทศไทย*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ทวนทอง ธนนิมิต. (2550). *การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมจากคลอโรฟิลล์*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- พิณเนศ อุปชัย. (2552). *ผลของตัวกระตุ้นคอปเปอร์ฟทาโลไซยานีนต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- พิศิษฐ์ คำหน่อแก้ว และอนุศิษฐ์ แก้วประจักษ์. (2558). *รายงานต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการ: ต้นแบบการเคลือบฟิล์มบางสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสงโดยเทคนิคการนำพาการระเหย*. ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.). ปทุมธานี.
- พุดสุข ปรัชญานุสรณ์. (2553). *เคมีสิ่งแวดล้อม*. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์สาละ.
- เพอซา เสงตระกุล. (2550). *การสอบเทียบ (Calibrate) เครื่อง UV - VIS Spectrophotometer*. กรุงเทพฯ: สมาคมมาตรวิทยาแห่งประเทศไทย.
- พงศกร อมรพิทักษ์สุข และนรารักษ์ หลีสกุล. (2546). *เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใช้สีย้อมเป็นเซนซิไทเซอร์*. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสงขลานครินทร์*, 25(4), 235 - 551.
- มณฑาสินี หอมหวาน. (2555). *พลังงานทดแทน พลังงานทางเลือกใหม่สำหรับอนาคต (Renewable energy: A new way to save our environment)*. *วารสารนักบริหาร*, 32(1), 100 - 104.
- ยุทธ อัครมาศ. (2530). *ฟิสิกส์ของระบบเซลล์สุริยะ*. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รัฐพงษ์ นาคาไชย, ชีรวัดณ์ วัชรรัตนพล, สุวรรณา แซ่พ่าน, หิรัญกร สิริมณฑารักษ์, อัจจิภรณ์ เดชบุญ, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล และสมหมาย ปะติตังโง. (2555). *การศึกษาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง*. ใน *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 49* (หน้า 130 - 137). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา; กระทรวงศึกษาธิการ; กระทรวงเกษตรและสหกรณ์; กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี; กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม; กระทรวงเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร; สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ; สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.

- รัฐพงษ์ นาคาไชย, สุชาลินี ทองเอี่ยม, สุธิลัดดา นาคาไชย, สุนิสา สุริยะพันธ์, เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล และ สมหมาย ประดิษฐ์. (2554). การศึกษาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยสีย้อมจากพืชในประเทศไทย. ในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 49 (หน้า 427 - 433). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา; กระทรวงศึกษาธิการ; กระทรวงเกษตรและสหกรณ์; กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี; กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม; กระทรวงเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร; สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ; สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- วริษฐา ทองขำ. (2554). การประดิษฐ์เซลล์สุริยะชนิดฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมไดซัลไฟด์ในชั้นบนโลหะแผ่นบางชนิดงอได้. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาฟิสิกส์, คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วัลย์ชัย พรหมโนภาส. (2555). การหาค่ากัมมาเฉพาะของแคดเมียมและซิงก์ซาลโคจีไนต์โครงสร้างนาโนที่สังเคราะห์โดยเทคนิคไมโครเวฟพลาสมาสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง. วิทยานิพนธ์ดุษฎีบัณฑิต, สาขาวิชาฟิสิกส์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. (2558). *สเปกตรัมของแสงตามมาตรฐานที่ ATSM กำหนด*. เข้าถึงได้จาก <http://th.wikipedia.org/wiki/>.
- วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. (2558). *เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์*. เข้าถึงได้จาก <http://th.wikipedia.org/wiki/>.
- วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. (2558). *เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง*. เข้าถึงได้จาก <http://th.wikipedia.org/wiki/>.
- วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. (2558). *ไมโครเวฟ*. เข้าถึงได้จาก <http://th.wikipedia.org/wiki/>.
- วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. (2558). *สารกึ่งตัวนำ*. เข้าถึงได้จาก <http://th.wikipedia.org/wiki/>.
- วิชริณี สว่างจันทร์. (2557). ความสามารถของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์ภายใต้การฉายรังสีไมโครเวฟต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาเคมี, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา. (2543). *เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์: ทฤษฎีและหลักการทำงานเบื้องต้น*. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- สรรเพชญ์ นิลผาย. (2551). *โครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์สำหรับการประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อม*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สุภาวดี เกียรติเสวี. (2555). *เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง*. กรุงเทพฯ: ศูนย์พลังงานทางเลือก (Center of alternative energy), คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหิดล.
- สุภาวดี มุกดาพันธ์, ขนิษฐา จันทโสม, สุรีย์ จารุจิตร, และมาริยะ นิรันรัตน์. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีและมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. (2553). *ปฏิบัติการใช้เครื่อง X-ray diffractometer*. เข้าถึงได้จาก [www.nuc2010.wordpress.com](http://www.nuc2010.wordpress.com).
- สุรวุฒิ ช่างโชติ. (2556). *เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์. ข่าวนและบทความของ HyNAE*. เข้าถึงได้จาก <http://www.kmutt.ac.th/hynae/>.
- สุรวุฒิ ช่างโชติ. (2556). *มารู้จักเซลล์แสงอาทิตย์กันเถอะ. ข่าวนและบทความของ HyNAE*. เข้าถึงได้จาก <http://www.kmutt.ac.th/hynae/>.
- สุรศักดิ์ แสนทวีสุข. (2554). *การทำเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงไททานเนียมไดออกไซด์ด้วยสารอิเล็กโทรไลต์กึ่งของแข็ง*. สาขาวิชาฟิสิกส์, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร, เข้าถึงได้จาก [www.herp-nru.psu.ac.th/file/2.pdf](http://www.herp-nru.psu.ac.th/file/2.pdf).
- สมศักดิ์ แดงดีป. (2551). *การทดลองวัดสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของฟิล์มบาง ITO และ PEDOT-PSS*. คู่มือวิชา วทปส 320 (ปฏิบัติการฟิสิกส์ขั้นสูง II). กรุงเทพฯ: สาขาวิชาฟิสิกส์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหิดล.
- สำนักงานกลางศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์. (2557). *เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกนาโนเม็ดสี DSSC*. ขอนแก่น: ห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์ของแข็ง, สาขาวิชาฟิสิกส์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ตำราญ พฤษ์สุนทร. (2544). *เคมี ม. 4 เล่ม 1 - 2*. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ พ.ศ. พัฒนา จำกัด.
- อชิป เฟ็งพัค. (2553). *โฟโตอิเล็กโทรด ZnO/Mg<sub>x</sub>Zn<sub>1-x</sub>O สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาฟิสิกส์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- Ahandani, Z.P., & Yangjeh, A.H. (2010). Fast green and template - free method for preparation of Zn<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>S nanoparticles using microwave irradiation and their photocatalytic activities. *Physica E*, 43, 216 - 223.
- Barron, A.R., & Smith, C. (2010). Crystal structure. *OpenStax - CNX module: m16927*.

- Borah, J.P., & Sarma, K.C. (2008). Optical and optoelectronic properties of ZnS nanostructured thin film. *Acta physical polonica A*, 114, 715 - 719.
- Chiba, Y., Islam, A., Watanabe, Y., Komiya, R., Koide, N., & Han, L. (2006). Dye - sensitized solar cells with conversion efficiency of 11.1%. *Journal of applied physics*, 45(25), 638 - 640.
- Contributors worldwide. (2015). *An open platform for scientific image analysis (ImageJ)*. LOCI at the University of Wisconsin - Madison, USA.
- Dasa, N.S., Ghoshb, P.K., Mitrac, M.K., & Chattopadhyaya, K.K. (2010). Effect of film thickness on the energy band gap of nanocrystalline CdS thin films analyzed by spectroscopic ellipsometry. *Physica E: Low - dimensional Systems and Nanostructures*, 42(8), 2097 - 2102.
- Dette, C., Pérez - Osorio, M.A., Kley, C.S., Punke, P., Patrick, C.E., Jacobson, P., Giustino, F., Jung, S.J., & Kern, K. (2014). TiO<sub>2</sub> anatase with a band gap in the visible region. *Nano Letters*, 14 (11), 6533 - 6538.
- Dharma, J., & Pisal, A. (2009). *Simple method of measuring the band gap energy value of TiO<sub>2</sub> in the powder form using a UV/Vis/NIR spectrometer*. USA: PerkinElmer, Inc. Shelton, CT.
- Electrochemical and solid - state letters (ECS). (2015). *Atomic models of N 719 dye - sensitized solar cell*. Retrieved from. <http://www.esl.ecsdl.org>.
- Electronic excitation by UV - Visible spectroscopy. (2014). Retrieved from. <http://iphotopick.com>.
- Green, M. A. (2004). Recent development in photovoltaics. *Solar energy*, 76, 3 - 8.
- Halme, J. (2002). *Dye - sensitized nanostructured and organic photovoltaic cells: technical review and preliminary tests*. Master's thesis of Technology. Faculty of Engineering physics and mathematics, Helsinki University of Technology.
- Han, H., Bach, U., Cheng, Y.B., Caruso, R.A., & MacRae, C. (2009). A design for monolithic all - solid - state dye - sensitized solar cells with a platinized carbon counter electrode. *Applied Physics Letters*, 94(10), 103102-1 - 103102-3.
- Han, L.T., Fukui, A., Chiba, Y., Islam, A., Komiya, R., Fuke, N., Koide, N., Yamanaka, R., & Shimizu, M. (2009). Integrated dye - sensitized solar cell module with conversion efficiency of 8.2%. *Applied Physics Letters*, 94(1), 013305-1 - 013305-3.

- Hao, S., Wu, J., Huang, Y., & Lin, J. (2006). Natural dyes as photosensitizers for dye - sensitized solar cell. *Solar Cells and Solar Energy Materials*, 80(2), 209 - 214.
- Ito, S., Murakami, T.N., Comte, P., Liska, P., Gratzel, C., Nazeeruddin, M.K., & Gratzel, M. (2008). Fabrication of thin film dye sensitized solar cells with solar to electric power conversion efficiency over 10%. *Thin Solid Films*, 516, 4613 - 4619.
- Jain, A.K., & Singla, R.K., (2011). An Overview of Microwave assisted technique: Green synthesis. *Webmed Central*, 1 - 15.
- Kashyout, A.B., Soliman, M., & Fathy, M. (2010). Effect of preparation parameters on the properties of TiO<sub>2</sub> nanoparticles for dye sensitized solar cells. *Renewable Energy*, 35, 2914 - 2920.
- Khantha, C., Chonsut, T., Kaewprajak, A., Kumnorkaew, P., & Wootthikanokkhan, J. (2015). Enhanced performance of bulk heterojunction solar cells using double layers deposition of polymer: fullerene derivatives. *Synthetic metals*, 207, 72 - 78.
- Kumar, A., Shyla, J.M., & Xavier, F.P. (2012). Synthesis and characterization of TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> nano composites for solar cell applications. *Appl Nanosci*, 2, 429 - 436.
- Kumar, B. (2005). *Zinc cadmium sulphide and Zinc sulphide as alternative heterojunction partners for CIGS<sub>2</sub> solar cells*. Master's thesis of science. Faculty of Engineering and computer science, University of Central Florida Orlando.
- Kumnorkaew, P., & Gilchrist, J. (2009). Effect of nanoparticle concentration on the convective deposition of binary suspensions. *Advanced material and nanotechnology*, 25(11), 6070 - 6075.
- Lee, W.J., Ramasamy, E., Lee, D.Y., & Song, J.S. (2007). Dye - sensitized solar cells: Scale up and current - voltage characterization. *Solar energy materials & Solar cells*, 91, 1676 - 1680.
- Lin, L.Y., Yeh, M.H., Lee, C.P., Chou, C.Y., Vittal, R., & Ho, K., C. (2012). Enhanced performance of a flexible dye - sensitized solar cell with a composite semiconductor film of ZnO nanorods and ZnO nanoparticles. *Electrochemical acta*, 62, 341 - 347.
- Nelson, J. (2003). *The Physics of Solar Cells*. London: Imperial college press, copy right.
- Palmer, D.W. (2008). *Properties of the II - VI compound semiconductor*. Retrieved from. [www.semiconductors.co.uk](http://www.semiconductors.co.uk).

- Park, N. (2010). Light management in dye - sensitized solar cell. *Journal of chemical engineering*, 27(2), 375 - 384.
- Patel, J., Mighri, F., Ajji, A., & Chaudhuri, T.K. (2014). Solution processed approaches for bulk - heterojunction solar cells based on Pb and Cd chalcogenide nanocrystals. *Nano Energy*, 5, 36 - 51.
- Poppe, L.J., Paskevich, V.F., Hathaway, J.C., & Blackwood, D.S. (2002). A Laboratory Manual for x - ray powder diffraction. *U.S. Geological survey open - file report*, 1 - 41 . Retrieved from. <http://pubs.usgs.gov/openfile/of01 - 041/index.htm>.
- Shi, J., Chen, J., Chai, Z., Wang, H., Tang, R., Fan, K., Wu, M., Han, H., Qin, J., Peng, T., Li, Q., & Li, Z. (2012). High performance organic sensitizers based on 11, 12 - bis (hexyloxy) dibenzo [a, c] phenazine for dye - sensitized solar cells. *Journal of materials chemistry*, 22(36), 18830 - 18838.
- Schmidt - Mende, L., Bach, U., Humphry - Baker, R., Horiuchi, T., Miura, H., Ito, S., Uchida, S., & Gratzel, M. (2005). Organic dye for highly efficient solid state dye - sensitized solar cells. *Advanced materials*, 17(7), 813 - 815.
- Tang, Z. (2010). *Studies of inverted organic solar cells fabricated by doctor blading technique*. Department of physics, Chemistry and Biology, Linkoping University.
- Trivedi, V., & Chaudhary, N. (2009). *National programme on technology enhanced learning (NPTEL) - phase II, UV - Visible absorption spectroscopy - I*. Faculty of Biotechnology, Indian institute of technology guwahati, Assam, India.
- Wang, H., Liu, G.H., Li, X., Xiang, P., Ku, Z.L., Rong, Y.G., Xu, M., Liu, L.F., Hu, M., Yang, Y., & Han, H.W. (2010). Highly efficient poly (3 - hexylthiophene) based monolithic dye - sensitized solar cells with carbon CE. *Energy & Environmental sciences*, 4(6), 2025 - 2029.
- Wang, Z.S., Kawauchi, H., Kashima, T., & Arakawa, H. (2004). Significant influence of TiO<sub>2</sub> photoelectrode morphology on the energy conversion efficiency of N 719 dye - sensitized solar cell. *Coordination Chemistry reviews*, 248(13 - 24), 1381 - 1389.
- Wu, H., Yao, Y., Li, W., Zhu, L., Ni, N., & Zhang, X. (2011). Microwave - assisted synthesis of Zn<sub>x</sub>Cd<sub>1-x</sub>S - MWCNT heterostructures and their photocatalytic properties. *Journal of nanoparticle research*, 13(5), 2225 - 2234.

X - ray crystallography. (2014). Retrieved from. <http://www.stolaf.edu>.

Xu, M., Liu, G., Li, X., Wang, H., Rong, Y., Ku, Z., Hu, M., Yang, Y., Liu, L., Liu, T., Chen, J., & Han, H. (2013). Efficient monolithic solid - state dye - sensitized solar cell with a Low - cost mesoscopic carbon based screen printable counter electrode. *Organic electronics*, 14(2), 628 - 634.

Xue, Z., Wang, L., Liu, W., & Liu, B. (2014). Solid - state D 102 dye sensitized/poly (3 - hexylthiophene) hybrid solar cells on flexible Ti substrate. *Renewable energy*, 72, 22 - 28.

Zhang, W., Zhu, R., Li, F., Wang, Q., & Liu, B. (2011). High - Performance solid - state organic dye sensitized solar cells with P3 HT as hole transporter. *Journal of physical chemistry C*, 115, 7038 - 7043.



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

สูตรการเตรียมสารเคมีสำหรับขั้วโฟโตอิเล็กโทรด สีย้อม  
และวิธีการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง (อ้างอิง)

### ก - 1 สูตรการเตรียมสารเคมีสำหรับขั้วไฟฟ้าโพลีเมอร์

#### 1.1 ไททานเนียมออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) โขล - เจล

##### วิธีการเตรียม

(A) ปิเปตเอทิลอะซิโตะอะซิเตท ปริมาตร	564.5	ไมโครลิตร
เติมอะซิโตะอะซิโตน ปริมาตร	57.6	ไมโครลิตร
เติมไตรอะซิติก ปริมาตร	57.2	ไมโครลิตร
เติมเอทานอลแอบโซลูทแอลกอฮอล์ ปริมาตร	10.5	มิลลิลิตร
(B) ปิเปตไททานเนียมบิวโทออกไซด์ ปริมาตร	2.7	มิลลิลิตร
เติมเอทานอลแอบโซลูทแอลกอฮอล์ ปริมาตร	10.5	มิลลิลิตร
เท B ลงใน A (คนข้ามคืน)		

#### 1.2 ไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>)

##### วิธีการเตรียม

1. ชั่งไททานเนียมไดออกไซด์ อนาเทส จำนวน 1.75 กรัม  
    เติมเอทานอลแอบโซลูทแอลกอฮอล์ ปริมาตร 10.5 มิลลิลิตร  
    ปิเปตไททานเนียมไอโซพรอปอออกไซด์ ปริมาตร 25 ไมโครลิตร
2. ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าสาร ระยะเวลา 2 นาที
3. ทำให้ขนาดอนุภาคของสารแตกตัวด้วยเครื่องทำความสะอาดความถี่สูง ระยะเวลา 10 นาที
4. ทำให้ขนาดอนุภาคของสารแตกตัวอีกครั้งด้วยเครื่องเครื่องลดขนาดของอนุภาคด้วยความถี่สูง ระยะเวลา 1 ชั่วโมง

#### 1.3 ซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ (Zn<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>S)

##### วิธีการเตรียม

1. ชั่งซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ จำนวน 0.4 มิลลิกรัม  
    เติมทิวทานอลแอลกอฮอล์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร
2. ทำให้ขนาดอนุภาคของสารแตกตัวด้วยเครื่องทำความสะอาดความถี่สูง ระยะเวลา 30 นาที

#### 1.4 กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ (สำหรับล้างกระจก)

##### วิธีการเตรียม

- |   |      |           |
|---|------|-----------|
| 1. ปิเปตกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 12 โมลาร์ ปริมาตร | 0.25 | มิลลิลิตร |
| เติมน้ำกลั่นที่ปราศจากไอออน ปริมาตร                 | 15   | มิลลิลิตร |

#### ก - 2 สีย้อม (Dye)

##### 1.1 สีย้อม (N 719)

##### วิธีการเตรียม

- |   |   |           |
|---|---|-----------|
| 1. ชั่งสีย้อม (N 719) จำนวน   | 5 | มิลลิกรัม |
| เติมอะซิโตนไทรคลอโรเอทิลไฮดรอส ปริมาตร  | 5 | มิลลิลิตร |
| เติมเตตระฮิพทิลแอลกอฮอล์  | 5 | มิลลิลิตร |
| 2. ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าสาร ระยะเวลา 2 นาที                             |   |           |
| 3. ทำให้ขนาดอนุภาคของสารแตกตัวด้วยเครื่องทำความสะอาดความถี่สูง ระยะเวลา 30 นาที |   |           |

#### ก - 3 วิธีการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์

##### ขั้นที่ 1 การเตรียมกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน

- ตัดกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีนให้มีขนาด

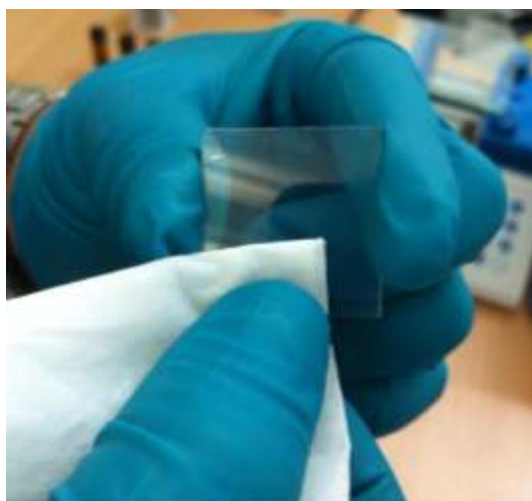
2.5 x 2.5 ตารางเซนติเมตร



2. ทำความสะอาดด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ปริมาตร 15 มิลลิลิตร โดยใช้เครื่องทำความสะอาดความถี่สูง ระยะเวลา 15 นาที จากนั้นทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่นที่ปราศจากไอออนอีก 2 ครั้ง ๆ ละ 10 นาที



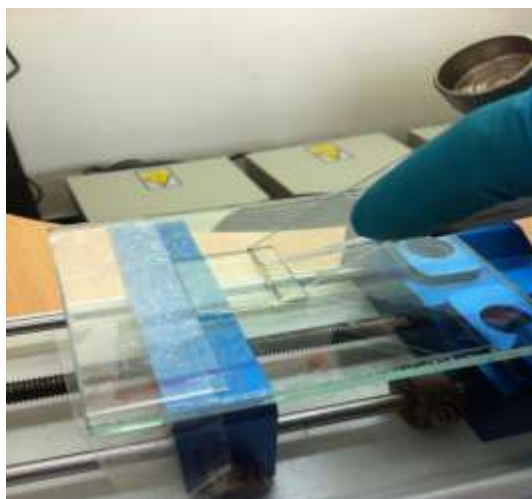
3. เช็ดให้สะอาดด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) และเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน



## ขั้นที่ 2 การเตรียมขั้วโฟโตอิเล็กโทรด

### การเตรียมชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (ETL)

1. หยดไททานเนียมออกไซด์ ปริมาตร 10 ไมโครลิตร ลงบนกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีนด้วยเทคนิคการนำพาการระเหย

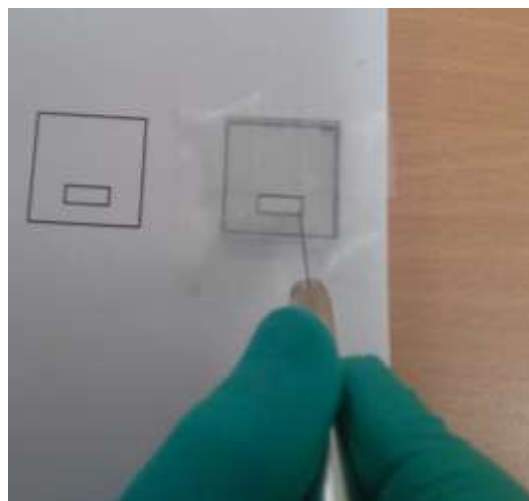
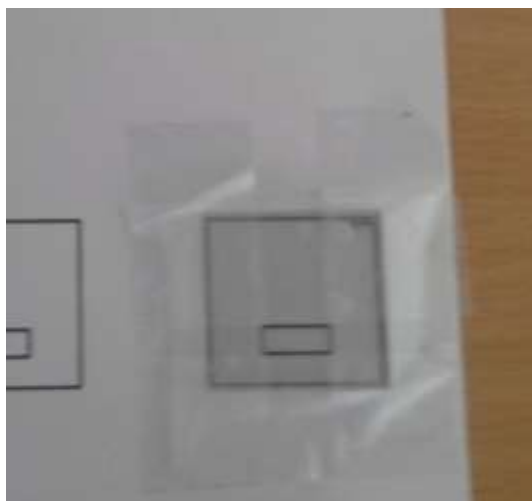


2. เช็ดบริเวณขอบกระจกให้สะอาดด้วยไอโซโพรพานอลแอลกอฮอล์และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1 ชั่วโมง



### การเคลือบฟิล์มชั้นสารกึ่งตัวนำไมมาเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>)

1. นำกระจกที่เคลือบชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนด้วยไททาเนียมออกไซด์เรียบร้อยแล้ว มาปิดด้วยเทปกาวเทปกาวชุ่นให้มีขนาดพื้นที่ 0.4 x 1 ตารางเซนติเมตร และกรีดเทปกาวชุ่นที่เกิด การซ้อนทับกันออก



2. ปิเปิดไททาเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมไว้ปริมาตร 150 ไมโครลิตร แล้วหยดลงบนพื้นที่ ที่เตรียมไว้ จากนั้นปาดให้เรียบโดยใช้เทคนิคดอกเตอร์เบลดจำนวน 5 ครั้ง ทิ้งไว้ให้แห้ง



3. ลอกเทปกาวยุ่นและเช็ดไททาเนียมไดออกไซด์ส่วนที่เกินออกด้วยไอโซโพรพานอลแอลกอฮอล์ จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1 - 2 ชั่วโมง



#### การย้อมสีฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์

1. นำฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีนเรียบร้อยแล้ว ใส่ในอ่างสำหรับย้อมสีเซลล์แสงอาทิตย์และเทสีย้อม (N 719) ที่เตรียมไว้ลงไป ปิดฝาให้สนิทและซิลว์ด้วยแผ่นพาราฟิล์ม

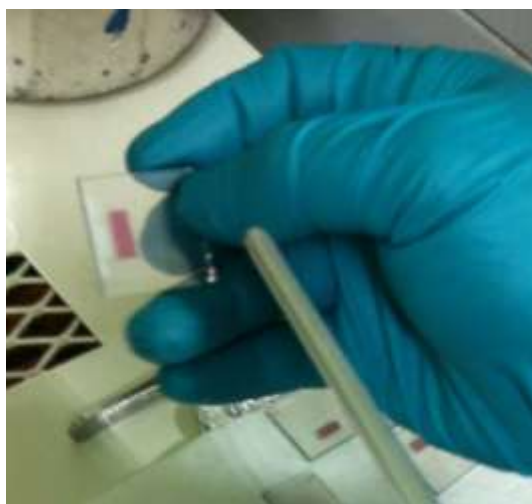




2. นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 15 นาที และตั้งทิ้งไว้ในตู้ดูดความชื้น ระยะเวลา 12 - 24 ชั่วโมง

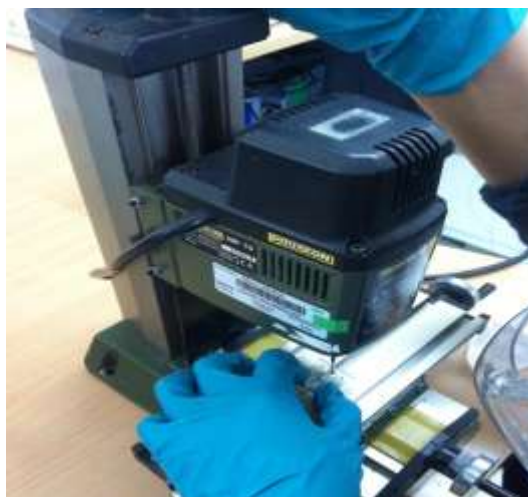
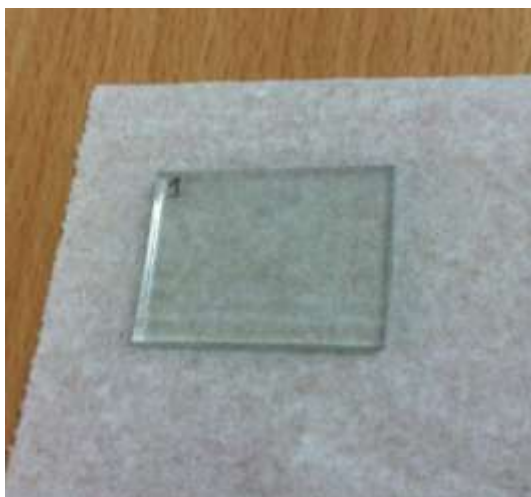


3. นำรีนด้วยอะซิโตนไนโตรเจนไฮดรอกไซด์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนและนำไปอบเพื่อกำจัดความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 15 นาที

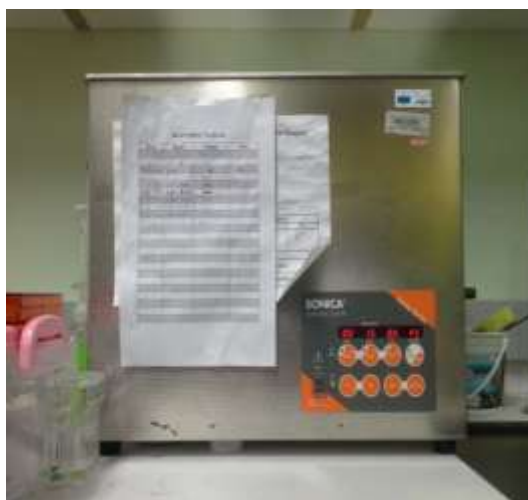


### ขั้นที่ 3 การเตรียมขั้วแคโทดอิเล็กโทรด

1. ตัดกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน ให้มีขนาด 2.5 x 2.5 ตารางเซนติเมตร และเจาะรู 2 รู ด้วยเครื่องเจาะกระจกสำหรับหยอดสารอิเล็กโทรไลต์



2. ทำความสะอาดด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ปริมาตร 15 มิลลิลิตร โดยใช้เครื่องทำความสะอาดความถี่สูง ระยะเวลา 15 นาที จากนั้นทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่นที่ปราศจากไอออน อีก 2 ครั้ง ๆ ละ 10 นาที



3. เช็ดให้สะอาดด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) และเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน



4. ปิดด้วยเทปกาวชุ่นให้มีขนาดพื้นที่ใหญ่กว่าฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ที่ทำกรข้อมสี่เหลี่ยมเรียบร้อยแล้ว จากนั้นหยดแพลทินัมลงบนกระจกที่เตรียมไว้แล้วปาดให้เรียบโดยใช้เทคนิคดอกเตอร์เบลดจำนวน 3 ครั้ง



5. ลอกเทปกาวยุ่่นออกจากกระจกและนำมาเผาที่อุณหภูมิ 400 - 450 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1 ชั่วโมง

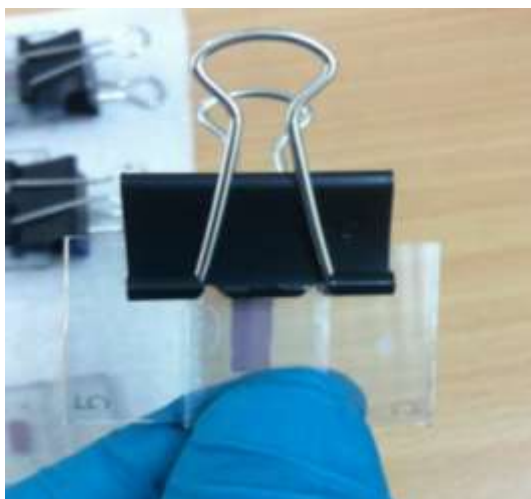


#### ขั้นที่ 4 การประกอบเซลล์

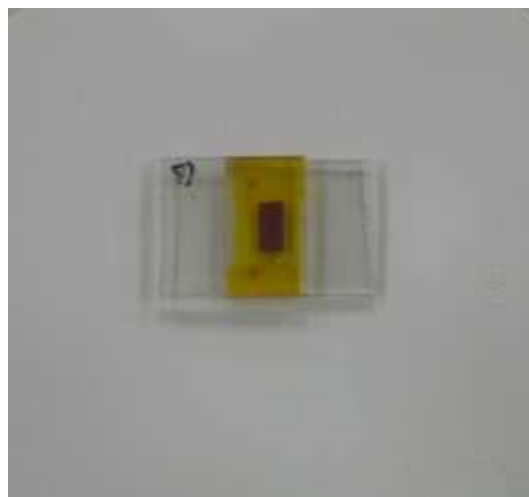
1. ตัดแผ่นเซอร์ลีนให้มีขนาดพื้นที่ 1 x 2.5 ตารางเซนติเมตร แล้วตัดพื้นที่ตรงกลางออกให้มีลักษณะเป็นช่องว่าง



2. นำแผ่นเซอร์ลีนมาวางลงบนขั้วไฟโตอิเล็กทรอนิกส์ที่เตรียมไว้ซ้อนทับกัน 2 ชั้น และนำขั้วเคาน์เตอร์อิเล็กทรอนิกส์มาวางทับบนแผ่นเซอร์ลีนให้ได้ประมาณครึ่งหนึ่งของกระจก นำไฟฟ้าแต่ละแผ่นแล้วเป่าด้วยเครื่องเป่าลมร้อน ระยะเวลา 20 วินาที ทิ้งไว้ให้เย็น



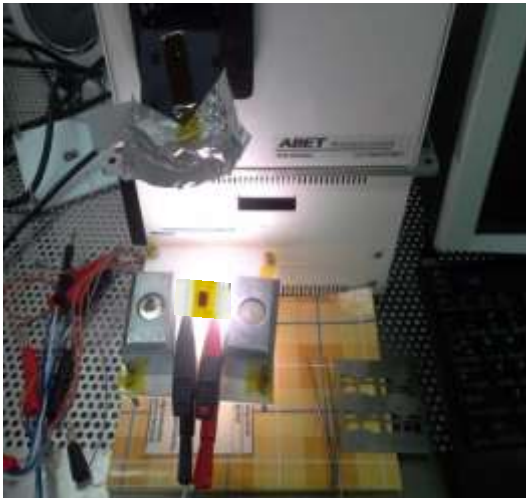
3. หยอดสารอิเล็กทรอนิกส์ลงไปและปิดรูด้วยเทปกาวกันความร้อนเพื่อป้องกันสารอิเล็กทรอนิกส์ระเหยออกเบื้องต้น





### ขั้นที่ 5 การวัดเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสี่ข้อมไวแสง

1. นำเซลล์แสงอาทิตย์แบบสี่ข้อมไวแสงที่สร้างขึ้นมาวัดเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสี่ข้อมไวแสงด้วยเครื่องเซลล์แสงอาทิตย์จำลอง (Solar simulator) ภายใต้ค่าของตัวแปรความสามารถทางไฟฟ้าต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ ( $FF$ ) และค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพ (Eff)



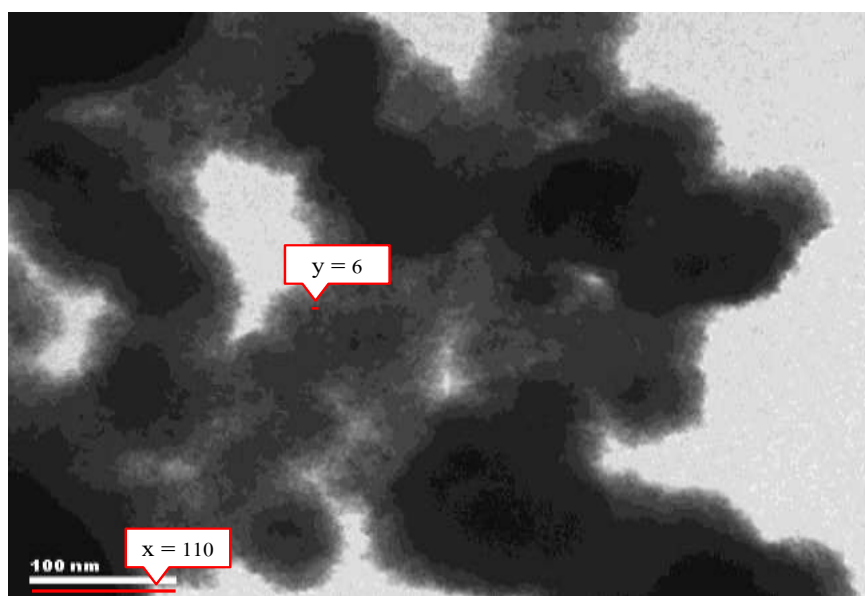
ภาคผนวก ข

การวัดขนาดอนุภาคนาโนและการคำนวณค่าแถบช่องว่างพลังงาน

### ข - 1 การวัดขนาดอนุภาคนาโนด้วยโปรแกรมอิมเมจ (Contributors worldwide, 2015)

#### ตัวอย่าง

การวัดขนาดของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์โดยใช้ร่วมกันระหว่างพอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนและกรดซิตริกที่สังเคราะห์ภายใต้รังสีไมโครเวฟที่เปอร์เซ็นต์การปล่อยกำลังของรังสีไมโครเวฟ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่กำลังไฟฟ้า 700 วัตต์ ระยะเวลา 180 วินาที ดังภาพ



#### กำหนดให้

x คือ ความยาวของเส้นสเกล 100 นาโนเมตร (วัดด้วยโปรแกรม) ที่กำหนดให้จากภาพ (หน่วย)

y คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ที่วัดด้วยโปรแกรม (หน่วย)

เช่น ถ้า x 110 หน่วย จะเท่ากับ	100 นาโนเมตร
y เท่ากับ	6 หน่วย
จะได้	5.45 นาโนเมตร

ดังนั้น ขนาดของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์โดยใช้ร่วมกันระหว่างพอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนและกรดซิตริกที่สังเคราะห์ภายใต้รังสีไมโครเวฟที่เปอร์เซ็นต์การปล่อยกำลังของรังสีไมโครเวฟ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่กำลังไฟฟ้า 700 วัตต์ ระยะเวลา 180 วินาที มีขนาดเท่ากับ 5.45 นาโนเมตร



ตารางที่ ข. 1 ผลการวัดขนาดอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์โดยใช้พอลิเมอร์  
โพลีไวนิลไพโรลิโดนในการควบคุมขนาดอนุภาค (P - 100P60s)

ลำดับที่	สถานะสารที่ สังเคราะห์	สเกล (นาโนเมตร)	x (หน่วย)	y (หน่วย)	ขนาดอนุภาค (นาโนเมตร)
1	P - 100P60s	100	110	6.15	5.60
2	P - 100P60s	100	110	6.21	5.64
3	P - 100P60s	100	110	6.15	5.60
4	P - 100P60s	100	110	6.11	5.55
5	P - 100P60s	100	110	6.50	6.00
6	P - 100P60s	100	110	6.15	5.60
7	P - 100P60s	100	110	7.00	6.36
8	P - 100P60s	100	110	7.15	6.5
9	P - 100P60s	100	110	6.23	5.67
10	P - 100P60s	100	110	6.80	6.20
11	P - 100P60s	100	110	7.05	6.41
12	P - 100P60s	100	110	6.37	5.80
13	P - 100P60s	100	110	6.81	6.21
14	P - 100P60s	100	110	7.1	6.45
15	P - 100P60s	100	110	6.53	5.93
16	P - 100P60s	100	110	7.10	6.45
17	P - 100P60s	100	110	6.51	5.92
18	P - 100P60s	100	110	6.98	6.34
19	P - 100P60s	100	110	6.15	5.60
20	P - 100P60s	100	110	7.00	6.36

ตารางที่ ข. 2 ผลการวัดขนาดอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์โดยใช้พอลิเมอร์  
โพลีไวนิลไพโรลิโดนในการควบคุมขนาดอนุภาค (P - 100P180s)

ลำดับที่	สถานะสารที่ สังเคราะห์	สเกล (นาโนเมตร)	x (หน่วย)	y (หน่วย)	ขนาดอนุภาค (นาโนเมตร)
1	P - 100P180s	100	110	6.00	5.45
2	P - 100P180s	100	110	5.50	5.00
3	P - 100P180s	100	110	5.08	4.62
4	P - 100P180s	100	110	5.60	5.10
5	P - 100P180s	100	110	5.37	4.89
6	P - 100P180s	100	110	5.22	4.74
7	P - 100P180s	100	110	5.58	5.07
8	P - 100P180s	100	110	5.50	5.00
9	P - 100P180s	100	110	5.50	5.00
10	P - 100P180s	100	110	5.31	4.83
11	P - 100P180s	100	110	5.47	4.97
12	P - 100P180s	100	110	5.68	5.16
13	P - 100P180s	100	110	5.60	5.10
14	P - 100P180s	100	110	5.47	4.97
15	P - 100P180s	100	110	5.54	5.04
16	P - 100P180s	100	110	5.41	4.92
17	P - 100P180s	100	110	5.44	4.95
18	P - 100P180s	100	110	5.57	4.06
19	P - 100P180s	100	110	5.52	5.02
20	P - 100P180s	100	110	5.48	4.98

ตารางที่ ข. 3 ผลการวัดขนาดอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์โดยใช้กรดซิตริก  
ในการควบคุมขนาดอนุภาค (C - 100P60s)

ลำดับที่	สถานะสารที่ สังเคราะห์	สเกล (นาโนเมตร)	x (หน่วย)	y (หน่วย)	ขนาดอนุภาค (นาโนเมตร)
1	C - 100P60s	100	110	30.15	27.41
2	C - 100P60s	100	110	33.45	30.41
3	C - 100P60s	100	110	35.27	32.06
4	C - 100P60s	100	110	35	31.82
5	C - 100P60s	100	110	33.45	30.41
6	C - 100P60s	100	110	34.20	31.10
7	C - 100P60s	100	110	33.56	30.51
8	C - 100P60s	100	110	32.85	29.86
9	C - 100P60s	100	110	34.27	31.15
10	C - 100P60s	100	110	34.00	30.91
11	C - 100P60s	100	110	31.23	28.39
12	C - 100P60s	100	110	33.48	30.44
13	C - 100P60s	100	110	34.12	31.02
14	C - 100P60s	100	110	33.00	30.00
15	C - 100P60s	100	110	31.78	28.89
16	C - 100P60s	100	110	30.26	27.51
17	C - 100P60s	100	110	34.77	31.61
18	C - 100P60s	100	110	32.93	29.94
19	C - 100P60s	100	110	34.57	31.43
20	C - 100P60s	100	110	31.14	28.31

ตารางที่ ข. 4 ผลการวัดขนาดอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์โดยใช้กรดซิตริก  
ในการควบคุมขนาดอนุภาค (C - 100P180s)

ลำดับที่	สถานะสารที่ สังเคราะห์	สเกล (นาโนเมตร)	x (หน่วย)	y (หน่วย)	ขนาดอนุภาค (นาโนเมตร)
1	C - 100P180s	50	100	43.07	21.53
2	C - 100P180s	50	100	40.62	20.31
3	C - 100P180s	50	100	43.02	21.51
4	C - 100P180s	50	100	43.16	21.58
5	C - 100P180s	50	100	43.32	21.66
6	C - 100P180s	50	100	40.56	20.28
7	C - 100P180s	50	100	41.27	20.63
8	C - 100P180s	50	100	40.62	20.31
9	C - 100P180s	50	100	43.84	21.92
10	C - 100P180s	50	100	43.86	21.93
11	C - 100P180s	50	100	41.32	20.66
12	C - 100P180s	50	100	40.56	20.28
13	C - 100P180s	50	100	40.62	20.31
14	C - 100P180s	50	100	40.60	20.30
15	C - 100P180s	50	100	42.84	21.42
16	C - 100P180s	50	100	43.86	21.93
17	C - 100P180s	50	100	40.03	20.02
18	C - 100P180s	50	100	40.69	20.35
19	C - 100P180s	50	100	40.60	20.30
20	C - 100P180s	50	100	40.45	20.23

ตารางที่ ข. 5 ผลการวัดขนาดอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์โดยใช้ร่วมกันระหว่าง  
พอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนและกรดซิตริกในการควบคุมขนาดอนุภาค  
(PC - 100P60s)

ลำดับที่	สถานะสารที่ สังเคราะห์	สเกล (นาโนเมตร)	x (หน่วย)	y (หน่วย)	ขนาดอนุภาค (นาโนเมตร)
1	PC - 100P60s	50	100	10.75	5.37
2	PC - 100P60s	50	100	12.12	6.06
3	PC - 100P60s	50	100	12.28	6.14
4	PC - 100P60s	50	100	12.75	6.38
5	PC - 100P60s	50	100	12.20	6.10
6	PC - 100P60s	50	100	12.93	6.47
7	PC - 100P60s	50	100	12.27	6.14
8	PC - 100P60s	50	100	12.25	6.13
9	PC - 100P60s	50	100	11.92	6.00
10	PC - 100P60s	50	100	11.75	5.88
11	PC - 100P60s	50	100	11.69	5.85
12	PC - 100P60s	50	100	12.47	6.24
13	PC - 100P60s	50	100	11.98	6.00
14	PC - 100P60s	50	100	11.94	5.98
15	PC - 100P60s	50	100	11.85	5.92
16	PC - 100P60s	50	100	11.68	5.84
17	PC - 100P60s	50	100	11.92	5.96
18	PC - 100P60s	50	100	11.78	5.89
19	PC - 100P60s	50	100	12.50	6.25
20	PC - 100P60s	50	100	11.96	5.98

ตารางที่ ข. 6 ผลการวัดขนาดอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์โดยใช้ร่วมกันระหว่าง  
พอลิเมอร์โพลีไวนิลไพโรลิโดนและกรดซิตริกในการควบคุมขนาดอนุภาค  
(PC - 100P180s)

ลำดับที่	สถานะสารที่ สังเคราะห์	สเกล (นาโนเมตร)	x (หน่วย)	y (หน่วย)	ขนาดอนุภาค (นาโนเมตร)
1	PC - 100P180s	100	110	4.68	4.25
2	PC - 100P180s	100	110	4.60	4.18
3	PC - 100P180s	100	110	4.68	4.25
4	PC - 100P180s	100	110	4.61	4.19
5	PC - 100P180s	100	110	4.00	3.63
6	PC - 100P180s	100	110	4.52	4.11
7	PC - 100P180s	100	110	4.32	3.93
8	PC - 100P180s	100	110	4.46	4.05
9	PC - 100P180s	100	110	4.61	4.20
10	PC - 100P180s	100	110	4.72	4.29
11	PC - 100P180s	100	110	4.68	4.25
12	PC - 100P180s	100	110	4.40	4.00
13	PC - 100P180s	100	110	4.68	4.25
14	PC - 100P180s	100	110	4.34	3.95
15	PC - 100P180s	100	110	4.56	4.15
16	PC - 100P180s	100	110	4.32	3.93
17	PC - 100P180s	100	110	4.36	3.96
18	PC - 100P180s	100	110	4.34	3.93
19	PC - 100P180s	100	110	4.42	4.02
20	PC - 100P180s	100	110	4.41	4.01

## ข - 2 การคำนวณค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Dharma & Pisal, 2009)

การคำนวณหาค่าแถบช่องว่างพลังงานของอนุภาคนาโนไททาเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ (อัตราส่วน 50:50) ที่ช่วงความยาวคลื่นการดูดกลืนแสง 350 - 450 นาโนเมตร และที่เปอร์เซ็นต์การดูดกลืนแสง 0 - 0.02 เปอร์เซ็นต์

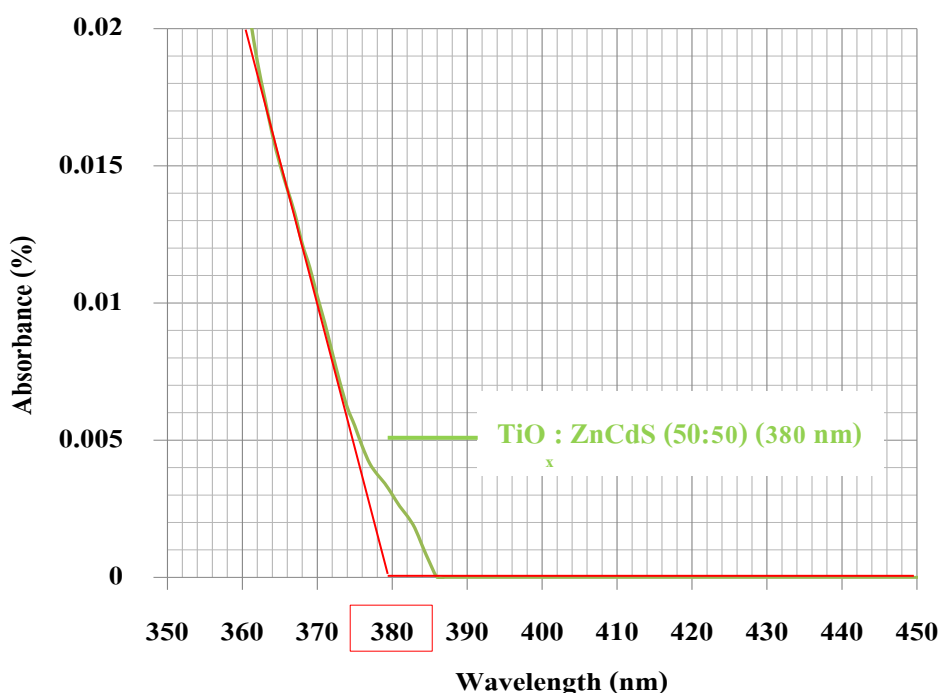
$$\text{สูตร } E = hc/\lambda$$

เมื่อ  $h$  คือ ค่าคงที่ของพลังค์เท่ากับ  $6.626 \times 10^{-34}$  จูลต่อวินาที

$C$  คือ ความเร็วแสงเท่ากับ  $3.0 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที

$\lambda$  คือ จุดตัดระหว่างแกน  $x$  และแกน  $y$  ของความยาวคลื่นการส่องผ่านแสง

(Cut off wavelength) มีหน่วยเป็นนาโนเมตร ซึ่งสามารถหาได้ ดังภาพ



$$\begin{aligned} \text{จะได้ } E &= \{(6.626 \times 10^{-34} \text{ จูลต่อวินาที})(3.0 \times 10^8 \text{ เมตรต่อวินาที})\} / 3.80 \times 10^{-9} \text{ เมตร} \\ &= 5.23 \times 10^{-19} \text{ จูล} \end{aligned}$$

$$\text{ถ้า 1 อิเล็กตรอนโวลต์} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ จูล}$$

$$\text{จะได้ว่า} \quad = 5.23 \times 10^{-19} \text{ จูล} / 1.60 \times 10^{-19} \text{ จูล}$$

$$= 3.27 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

ดังนั้น ไททาเนียมออกไซด์ต่อซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ (อัตราส่วน 50:50) ที่มีความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงเท่ากับ 380 นาโนเมตร จะมีค่าแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.27 อิเล็กตรอนโวลต์

**ภาคผนวก ค**  
**ผลงานเผยแพร่ทางวิชาการจากงานวิจัย**



# ผลกระทบของ $Zn_{1-x}Cd_xS$ ต่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจเปิดของโซลาร์เซลล์

## Effect of $Zn_{1-x}Cd_xS$ on The Open-Circuit Voltage of Solar Cell

ศทาวุธ โลหะเวช<sup>1</sup>, และ นรวิชญ์ ไกรนรา<sup>2\*</sup>

Khathawut Lohawet<sup>1</sup>, and Norawit Krainara<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

<sup>2</sup> ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

### บทคัดย่อ

อนุภาคนาโนเมตรของ  $Zn_{1-x}Cd_xS$  ถูกสังเคราะห์ขึ้นในสารละลายผสมด้วยวิธีกระตุ้นด้วยความร้อนจากการฉายรังสีไมโครเวฟที่สภาวะต่างๆ โดยใช้พอลิเมอร์ PVP และกรดซิตริกเป็นสารควบคุมขนาด ภาพ SEM และ TEM แสดงรูปร่างของสารสังเคราะห์เป็นแบบทรงกลมมีขนาดประมาณ 4-6 nm อัตราส่วนระหว่างสังกะสีและแคดเมียมถูกศึกษาจากการกำหนดความเข้มข้นของสารตั้งต้นซึ่งคืออะซิเตตและแคดเมียมอะซิเตตและเปอร์เซ็นต์กำลังของการฉายรังสีไมโครเวฟ อัตราส่วนของโลหะทั้งสองจะส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของอนุภาคที่สังเคราะห์นั้นๆ ซึ่งสามารถปรับค่าได้เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้ในโซลาร์เซลล์ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจเปิดของโซลาร์เซลล์ที่มี  $Zn_{1-x}Cd_xS$  เป็นองค์ประกอบจะถูกศึกษา ผลการวัดพบว่าได้ค่าสูงสุดอยู่ที่ 755 mV ซึ่งถือว่าเป็นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจเปิดที่สูงในระบบโซลาร์เซลล์ที่มีสารกึ่งตัวนำพวกโลหะสังกะสีและแคดเมียมผสมอยู่

**คำสำคัญ:** โซลาร์เซลล์ ไมโครเวฟ สังกะสี แคดเมียม ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจเปิด

### Abstract

$Zn_{1-x}Cd_xS$  nanoparticles were synthesized through a novel one-step solvothermal under microwave radiation using PVP and citric acid as size controller. SEM and TEM show that the particles are sphere and low distribution diameter in range of 4-6 nm. The compositions of  $Zn_{1-x}Cd_xS$  were varies depending upon initial concentrations and % output of microwave power. The result in tunable band gap energy indicated that this material is good for application in photovoltaic device such as solar cell. Additionally, a simple- homemade solar cell was carried out using  $Zn_{1-x}Cd_xS$  nanoparticles as absorber. The maximum  $V_{oc}$  of 755 mV confirmed that these nanoparticles gave higher efficiency than usual.

**Keywords:** Solar cell, Microwave, Zinc, Cadmium, The open-circuit voltage

\*Corresponding author. E-mail: [Norawit@buu.ac.th](mailto:Norawit@buu.ac.th)

## 1. บทนำ

สารกึ่งตัวนำไฟฟ้าขนาดนาโนเมตรกำลังเป็นที่สนใจของนักวิจัยอย่างมากเนื่องด้วยขนาดที่เล็กมาก มีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ ส่งผลให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าปรับเปลี่ยนไปได้ตามขนาดหรือตามลักษณะของการจัดเรียงตัวของอนุภาค<sup>1-3</sup> ในปัจจุบันนี้สารกึ่งตัวนำไฟฟ้าที่ศึกษาจะเป็นของผสมระหว่างโลหะกับสารอินทรีย์ สำหรับสารกลุ่ม  $Zn_{1-x}Cd_xS$  ที่มีขนาดระดับนาโนเมตรได้ถูกนำมาใช้พัฒนาประสิทธิภาพของโซลาร์เซลล์<sup>4-6</sup> ซึ่งค่าแถบช่องว่างพลังงาน (band gap) จะอยู่ในช่วง 2.43 eV ถึง 3.7 eV ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของโลหะสังกะสีกับแคดเมียม<sup>7</sup> ด้วยคุณสมบัติที่สามารถปรับค่าการนำไฟฟ้าได้นั้นเอง สารกึ่งตัวนำชนิดนี้จึงเป็นที่สนใจในการนำมาปรับปรุงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของโซลาร์เซลล์

กระบวนการสังเคราะห์เพื่อให้ได้สารที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรจะส่งผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางเคมีของสารที่สังเคราะห์ได้อย่างมาก<sup>8-9</sup> โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อการนำมาประยุกต์ใช้จะต้องผ่านการทำให้เป็นฟิล์มบาง สารที่สังเคราะห์ได้ควรมีขนาดเล็กกว่า 5 nm<sup>10</sup> จึงจะเหมาะสมที่สุด ดังนั้นในการสังเคราะห์อนุภาคของสารกึ่งตัวนำที่ต้องการนำมาประยุกต์ใช้ในโซลาร์เซลล์โดยผ่านกระบวนการเคลือบเป็นฟิล์มบางจะต้องมีขั้นตอนการสังเคราะห์ที่สอดคล้องกับค่าการนำไฟฟ้าที่ดีและมีขนาดอนุภาคที่ไม่ใหญ่จนเกินไป อย่างเช่นการสังเคราะห์ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาโดยการฉายรังสีไมโครเวฟเพื่อกระตุ้นการสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำที่เป็นโลหะผสมระหว่างสังกะสีและแคดเมียมตามความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน ค่ากำลังวัตต์และระยะเวลาของการฉายรังสีไมโครเวฟได้ถูกนำมาวิเคราะห์อีกด้วย อย่างไรก็ตามการควบคุมขนาดของอนุภาคของสารกึ่งตัวนำเป็นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึง การใช้สารพอลิเมอร์ PVP และกรดซิตริกมาช่วยควบคุมขนาดของอนุภาคจึงถูกนำมาใช้ ซึ่งมีผลงานวิจัยก่อนหน้าได้ศึกษาการนำสารลดแรงตึงผิวหรือตัวทำละลายมาช่วยในการควบคุมขนาดของสารที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการกระตุ้นด้วยความร้อน<sup>11-14</sup>

ในระบบโซลาร์เซลล์นั้นได้มีการนำสารกึ่งตัวนำพวก  $Zn_{1-x}Cd_xS$  มาปรับปรุงประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากโซลาร์เซลล์ หรือแม้กระทั่งการปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่เซลล์ สารกึ่งตัวนำชนิดนี้มักถูกนำมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางซึ่งอาจนำมาเป็นส่วนประกอบที่ตำแหน่งต่างๆ ของโซลาร์เซลล์ ตัวอย่างเช่น ส่วนบนสุดที่มีหน้าที่ดูดซับแสงอาทิตย์ให้ได้มากที่สุด หรือส่วนที่เป็นตัวเชื่อมคอยปรับสมดุลทางประจุให้กับเซลล์ และอาจเป็นส่วนที่เป็นตัวส่งประจุย้อนกลับเข้ามาภายในเซลล์เพื่อให้ระบบครบวงจรทางไฟฟ้า แนวทางเหล่านี้ยังเป็นที่น่าสนใจและควรนำมาศึกษาอย่างยิ่งในลำดับต่อไป นอกจากนี้ความสามารถในการปรับค่าการนำไฟฟ้าของอนุภาคที่สังเคราะห์ได้สามารถทำได้ด้วยการเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างโลหะทั้งสอง

งานวิจัยครั้งนี้จึงได้ศึกษาการสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำไฟฟ้า  $Zn_{1-x}Cd_xS$  โดยการกระตุ้นด้วยการฉายรังสีไมโครเวฟที่กำลังวัตต์และระยะเวลาต่างๆ โดยอัตราส่วนของสังกะสีและแคดเมียมจะถูกศึกษาเพื่อปรับค่าการนำไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดของโซลาร์เซลล์ โดยขนาดของอนุภาคที่สังเคราะห์ได้จะถูกควบคุมขนาดโดยการใส่สารพอลิเมอร์ PVP และกรดซิตริก ในส่วนของการเตรียมเซลล์จะเป็นการเคลือบสารกึ่งตัวนำแบบฟิล์มบางที่มีความโปร่งใสมากลงบนแผ่นกระจกนำไฟฟ้า จากนั้นเคลือบด้วยไททาเนียมในชั้นบนสุดเพื่อทำหน้าที่ดูดซับแสงอาทิตย์ นำมาประกอบเป็นเซลล์กับเซลล์ด้านล่างที่มีส่วนประกอบเป็นแกรไฟต์และผงถ่านคาร์บอนที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกนำไฟฟ้า และมีสารอิเล็กโทรไลต์เป็นตัวเชื่อมเพื่อรักษาสมดุลทางประจุแก่โซลาร์เซลล์ เซลล์ที่ได้จะถูกนำไปวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดที่สูงที่สุดเพื่อศึกษาผลของการใช้สารกึ่งตัวนำ  $Zn_{1-x}Cd_xS$  ที่ถูกสังเคราะห์ด้วยวิธีที่แตกต่างกัน

## 2. วิธีการ

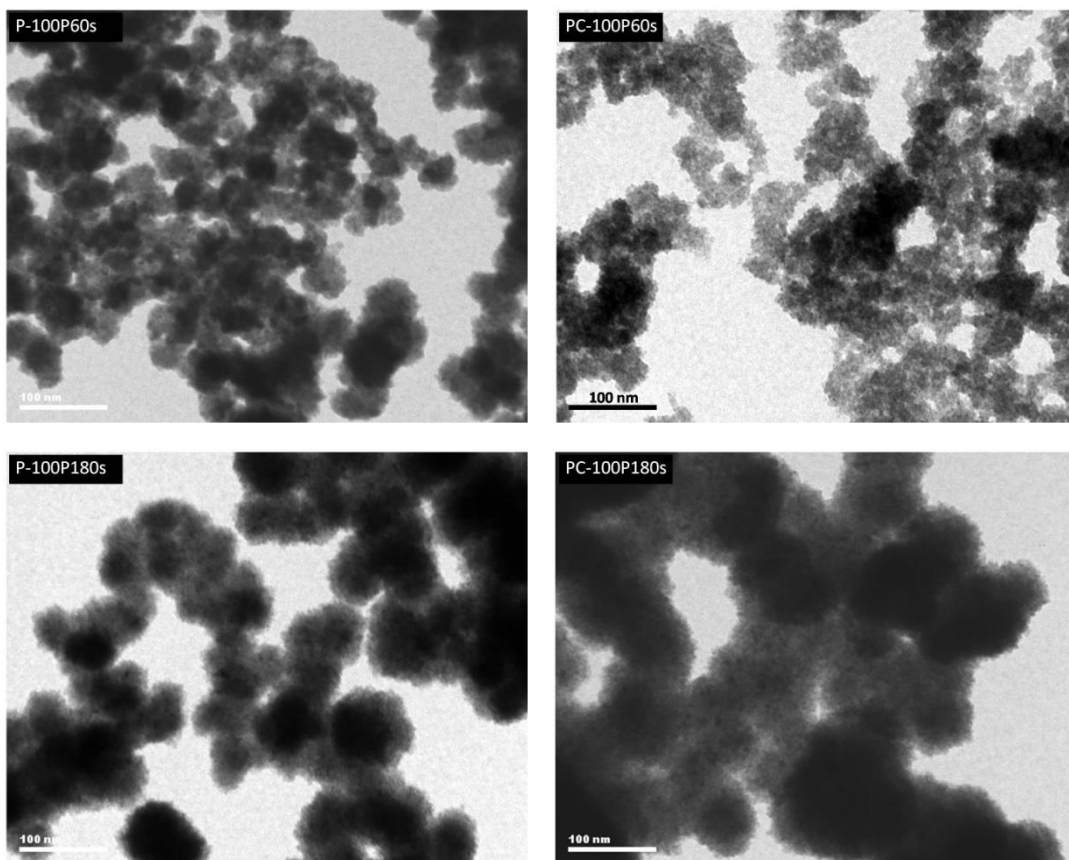
- นำสารตั้งต้นที่ประกอบไปด้วยสาร zinc acetate หนัก 0.55 กรัม สาร cadmium acetate 0.33 กรัม ละลายในน้ำกลั่นที่ปราศจากไอออนปริมาตร 25 มิลลิลิตร จนหมดที่อุณหภูมิห้อง ต่ไปเตรียมสารละลายในอีกส่วนหนึ่งโดยนำ thioacetamide 0.65 กรัมมาละลายน้ำกลั่นที่ปราศจากไอออนปริมาตร 20 มิลลิลิตร เติม PVP จำนวน 0.60 กรัม กับกรดซิตริก 0.20 กรัม จากนั้นนำทั้งสองส่วนมาผสมกันโดยการหมุนด้วยแท่งแม่เหล็ก เมื่อสารละลายทั้งสองเข้ากันได้ดีแล้ว นำมาฉายด้วยรังสีไมโครเวฟที่เปอร์เซ็นต์การปล่อยกำลังของรังสีไมโครเวฟตั้งแต่ระดับ 10% จนถึง 100% กำลังวัตต์ไฟฟ้าที่ใช้ประมาณ 700 W โดยศึกษาระยะเวลาในการฉายรังสีไมโครเวฟนานจาก 60 วินาทีถึง 180 วินาที ยกตัวอย่างเช่นสารที่สังเคราะห์ได้ให้สัญลักษณ์เป็น PC-100P60s หมายถึงสารสังเคราะห์ที่ใช้ PVP และกรด Citric เป็นตัวควบคุมขนาดโดยผ่านการฉายรังสีไมโครเวฟที่ 100% เป็นเวลา 60 วินาที เมื่อได้ผลิตภัณฑ์จากสารที่สังเคราะห์แล้วจะขจัดสารปนเปื้อนด้วยน้ำกลั่นหลายๆ ครั้ง ทำให้แห้งโดยการล้างด้วยเอทานอลและอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชม. นำสารที่ได้ไปศึกษาทางออสถุฐานด้วยเครื่อง SEM และ TEM

สารกึ่งตัวนำที่ได้จากการสังเคราะห์จะนำมาเคลือบเป็นฟิล์มบางบนแผ่นกระจกนำไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความโปร่งใสแล้วเคลือบด้วยไททาเนียมเพื่อเป็นตัวช่วยในการดูดซับแสง นำไปอบด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำเซลล์ที่ได้มาย้อม

ด้วยสีย้อมไวแสง N-719 นาน 12-24 ชั่วโมง อีกส่วนหนึ่งเป็นเซลล์ชั้นล่างจะเคลือบด้วยผงแกรไฟต์และผงถ่านคาร์บอนลงบนแผ่นกระจกนำไฟฟ้า จากนั้นนำเซลล์ทั้งสองส่วนมาประกบเข้าด้วยกันโดยเชื่อมด้วยอิเล็กโทรไลต์ KI/I<sub>3</sub><sup>-</sup> และนำเซลล์ที่สร้างขึ้นไปวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเพื่อหาค่าที่มากที่สุด

### 3. ผลและอภิปราย

จากผลการศึกษารูปร่างและขนาดของอนุภาคสารกึ่งตัวนำที่สังเคราะห์ได้ แสดงในรูปที่ 1 สารกึ่งตัวนำที่สังเคราะห์ขึ้นประกอบด้วยตัวอย่าง P-100P60s PC-100P60s P-100P180s และ PC-100P180s สารทั้งสี่ตัวอย่างจะมีขนาดของอนุภาคอยู่ที่ประมาณ 4-6 นาโนเมตร ดังนั้น จะเห็นได้ว่าการสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำด้วยการกระตุ้นจากการฉายคลื่นไมโครเวฟและควบคุมขนาดด้วยพอลิเมอร์ PVP อย่างเดียว (P-100P60s และ P-100P180s) หรือใช้ผสมระหว่าง PVP และกรดซิตริก (PC-100P60s และ PC-100P180s) จะได้ลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งระยะเวลาในการฉายคลื่นไมโครเวฟตามสภาวะในการสังเคราะห์นี้ไม่ส่งผลต่อความแตกต่างของอนุภาคเช่นกัน (60 วินาทีและ 180 วินาที)



รูปที่ 1 ภาพ TEM ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วย 100% output ของรังสีไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 700 W โดยควบคุมขนาดด้วยพอลิเมอร์ PVP อย่างเดียว (P-100P60s และ P-100P180s) หรือใช้การผสมระหว่าง PVP และกรดซิตริก (PC-100P60s และ PC-100P180s)

ข้อมูลในตารางที่ 1 แสดงอัตราส่วนอย่างต่ำขององค์ประกอบของธาตุ Zn: Cd เทียบกับ S 1 โมล ของสารที่สังเคราะห์ได้ในแต่ละสภาวะเช่น ตัวอย่าง P-10P180s เป็นสารที่ถูกสังเคราะห์โดยใช้พอลิเมอร์ PVP เพียงอย่างเดียวในการควบคุมขนาดอนุภาคนาโนเมตร และใช้เปอร์เซ็นต์ output ในการฉายรังสีไมโครเวฟที่ 10% เป็นเวลา 180 วินาที เป็นต้น ขนาดของอนุภาคได้รายงานออกมาเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มแรกสังเคราะห์ได้ขนาดอนุภาคช่วง 4-6 nm ซึ่งมีขนาดเล็กมากเหมาะสมอย่างยิ่งในการนำไปเคลือบเป็นฟิล์มบางบนแผ่นกระจกนำไฟฟ้า กลุ่มที่สองสังเคราะห์ได้ขนาดอนุภาค 20-30 nm ซึ่งสังเคราะห์ขึ้นโดยใช้กรดซิตริกเป็นตัวควบคุมขนาดอนุภาค ดังนั้นพบว่าเมื่อการสังเคราะห์

Zn<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>S ผ่านการฉายรังสีไมโครเวฟในสารควบคุมอนุภาคด้วยพอลิเมอร์ PVP เพียงอย่างเดียวหรือ PVP กับกรดซิติริกจะได้อนุภาคขนาดเล็กเหมาะต่อการเคลือบเป็นฟิล์มบางสร้างโซลาร์เซลล์เพื่อทดสอบหาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรถัด

**ตารางที่ 1** อัตราส่วน Zn: Cd: S ของสารตัวอย่างที่ถูกสังเคราะห์ได้ในสภาวะต่างๆ ขนาดของอนุภาค และผลการวัดค่าต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรถัดของโซลาร์เซลล์ที่นำสารตัวอย่างไปเคลือบฟิล์มบางบนแผ่นกระจกนำไฟฟ้า

Sample	mol ratio	particle size	V <sub>oc</sub>
	Zn: Cd: S	nm	mVolt
P-10P180s	0.3:0.9:1	<6	755
P-100P60s	0.4:0.8:1	<6	653
P-100P180s	0.7:0.5:1	<4	570
C-10P180S	0.7:0.9:1	>20	225
C-100P60S	0.5:1.1:1	>25	120
C-100P180S	0.8:0.6:1	>30	145
PC-100P60s	0.5:1.2:1	<4	600
PC-100P180s	0.5:1.1:1	<4	550

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรถัดจากโซลาร์เซลล์ที่เตรียมได้จากสารตัวอย่างในแต่ละสภาวะ ดังแสดงในตารางที่ 1 พบค่าสูงสุดที่ประมาณ 755 mV โดยเตรียมจากตัวอย่าง P-10P180s เคลือบเป็นฟิล์มบางบนแผ่นกระจกนำไฟฟ้า โดยมีการเคลือบไททาเนียมเพื่อเป็นชั้นที่เป็นตัวช่วยดูดซับแสง แล้วย้อมด้วยสี N-719 ซึ่งจะใช้สีย้อมชนิดนี้ทุกๆ ตัวอย่างโซลาร์เซลล์ประกอบขึ้นเป็นชั้นทำงาน ในส่วนของชั้นของการคืนประจุจะถูกเตรียมจากการเคลือบผสมระหว่างแกรไฟต์และผงถ่านคาร์บอน โดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ KI/I<sub>3</sub><sup>-</sup> เป็นตัวเชื่อมระหว่างชั้นทั้งสอง สำหรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรถัดที่ได้จากการเตรียมโซลาร์เซลล์จากสารตัวอย่างอื่นๆ ได้แสดงผลไว้ในตารางที่ 1 จะพบว่า C-10P180s C-100P60s และ C-100P180s จะให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรถัดค่อนข้างน้อยกว่าการเตรียมโซลาร์เซลล์ด้วยสารตัวอย่างอื่นๆ สอดคล้องกับขนาดของอนุภาคที่ใหญ่กว่าอนุภาคที่เคลือบ จากผลการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรถัดของโซลาร์เซลล์ที่ถูกรายงานไว้ก่อนหน้านี้ เกิดจากเซลล์ glass/graphene/ZnO/CdS/CdTe/(graphite paste) มีค่าอยู่ที่ 450 mV<sup>15</sup> จะเห็นได้ว่าการนำสาร Zn<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>S ที่สังเคราะห์ได้จากการกระตุ้นด้วยรังสีไมโครเวฟและใช้พอลิเมอร์ PVP เป็นสารควบคุมขนาดอนุภาคมาประกอบขึ้นเป็นโซลาร์เซลล์ จะให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรถัดที่สูงกว่าอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามเมื่อใช้ PVP ร่วมกับกรดซิติริก สารที่สังเคราะห์ได้ยังคงมีขนาดเล็กเหมาะสมต่อการทำฟิล์มบางและอีกทั้งให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรถัดที่สูงเช่นกัน

#### 4. บทสรุป

งานวิจัยครั้งนี้ได้รายงานผลของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรถัดที่วัดได้จากโซลาร์เซลล์ซึ่งประกอบขึ้นจากการนำ Zn<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>S ที่สังเคราะห์ได้โดยการฉายรังสีไมโครเวฟซึ่งมีพอลิเมอร์ PVP เพียงอย่างเดียวหรือ PVP ร่วมกับกรดซิติริกเป็นตัวกำหนดขนาดอนุภาคประกอบขึ้นเป็นโซลาร์เซลล์ในส่วนของชั้นทำงานที่เคลือบด้วยไททาเนียมบนกระจกนำไฟฟ้า ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรถัดสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 755 mV ซึ่งมีค่าที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโซลาร์เซลล์ที่มีรายงานก่อนหน้านี้ จึงสามารถสรุปได้ว่าการนำสารประกอบ Zn<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>S ที่ใช้วิธีการสังเคราะห์ดังที่กล่าวมาในงานวิจัยนี้มีส่วนช่วยเพิ่มค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรถัดของโซลาร์เซลล์และน่าจะนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา และศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

## 6. เอกสารอ้างอิง

1. Weller, H. (1998). Quantum size colloids: From size-dependent properties of discrete particles to self-organized superstructures. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 3, 194–199.
2. Eychmuller, A. (2000). Structure and Photophysics of Semiconductor Nanocrystals. *J. Phys. Chem*, 104(28), 6514-6528.
3. Green, M. and Brien, P. (1999). Recent advances in the preparation of semiconductors as isolated nanometric particles: new routes to quantum dots. *Chemical Communications*, 22, 2235-2241.
4. Roy, A., M. and De, G., C. (2003). Immobilisation of CdS, ZnS and mixed ZnS-CdS on filter paper: Effect of hydrogen production from alkaline  $\text{Na}_2\text{S}/\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  solution. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 157(1), 87-92.
5. Kumar, V., Sharma, A., Sharma, D., K. and Dwivedi, D., K. (2014). Effect of sintering aid ( $\text{CdCl}_2$ ) on the optical and structural properties of CdZnS screen-printed film. *Journal for Light and Electron Optics (OPTIK)*, 125(3), 1209- 1211.
6. Kumar, P., T., Saravanakumar, S. and Sankaranarayanan, K. (2011). Effect of annealing on the surface and band gap alignment of CdZnS thin films. *Applied Surface Science*, 257(6), 1923–1927.
7. Dzhaferov, T., D., Ongul, F. and Karabay, I. (2006). Formation of CdZnS thin films by Zn diffusion. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39(15), 39:3221-3225.
8. Poormohammadi-Ahandani, Z. and Habibi-Yangjeh, A. (2010). Fast, green and template-free method for preparation of  $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{S}$  nanoparticles using microwave irradiation and their photocatalytic activities. *Physica E*, 43(1), 216-223.
9. Tiwary, K., P., Choubey, S., K. and Sharma, K. (2013). Structural and optical properties of ZnS nanoparticles synthesized by Microwave irradiation method. *Chalcogenide Letters*, 10(9), 319-323.
10. Bensebaa, F., Durand, C., Aouadou, A., Scoles, L., Du, X., Wang, D. and Page, Y., L. (2010;). A new green synthesis method of  $\text{CuInS}_2$  and  $\text{CuInSe}_2$  nanoparticles and their integration into thin films. *Journal of Nanoparticle Research*, 12, 1897–1903.
11. Sakthi Sudar Saravanan, R., Pukazhselvan, D. and Mahadevan, C., K. (2011). Studies on the synthesis and characterization of  $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{S}$  and  $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{S}:\text{Mn}^{2+}$  semiconductor quantum dots. *Philosophical Magazine*, 91, 389–403.
12. Esmaili, E. and Habibi-Yangjeh, A. (2010). Microwave-assisted preparation and characterization of  $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{S}$  nanoparticles in presence of an ionic liquid and their photocatalytic activities. *Journal of Alloys and Compounds*, 496, 650–655.
13. Wang, X., Feng, Z., Fan, D., Fan, F. and Li, C. (2010). Shape-controlled synthesis of CdS nanostructures via a solvothermal method. *Cryst. Growth Des*, 10, 5312–5318.
14. Xu, J., Ge, J. and P, Li, Y., D. (2006). Solvothermal synthesis of monodisperse PbSe nanocrystals. *J. Phys. Chem*, 110, 2497–2501.
15. Yin, Z., Zhu, J., He, Q., Cao, X., Tan, C., Yan, Q. and Zhang, H. (2014). Graphene-Based Materials for Solar Cell Applications. *Advanced Energy Materials*, 4(1), 574.



คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร

- การประดิษฐ์
- การออกแบบผลิตภัณฑ์
- อนุสิทธิบัตร

ข้าพเจ้าผู้ลงลายมือชื่อในคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้  
ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ตามพระราชบัญญัติสิทธิบัตร พ.ศ. 2522  
แก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2535  
และพระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 3) พ.ศ. 2542

สำหรับเจ้าหน้าที่

วันรับคำขอ 15 ก.ย. 2558

วันยื่นคำขอ 15 ก.ย. 2558

เลขที่คำขอ 1501005548

สัญลักษณ์จำแนกการประดิษฐ์ระหว่างประเทศ

ใช้กับแบบผลิตภัณฑ์

ประเภทผลิตภัณฑ์

วันประกาศโฆษณา

เลขที่ประกาศโฆษณา

วันออกสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร

เลขที่สิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร

ลายมือชื่อเจ้าหน้าที่

1. ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์/การออกแบบผลิตภัณฑ์

“เซลล์แสงอาทิตย์แบบสารอินทรีย์ที่มีชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนและกระบวนการผลิตดังกล่าว”

2. คำขอรับสิทธิบัตรครอบคลุมแบบผลิตภัณฑ์นี้เป็นคำขอสำหรับแบบผลิตภัณฑ์เดียวกันและเป็นคำขอลำดับที่

ไม่จำนวน คำขอที่ยื่นในคราวเดียวกัน

3. ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร และที่อยู่ (เลขที่ ถนน ประเทศ)

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ อุตยาน

วิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถ.พหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง

จ.ปทุมธานี 12120

3.1 สัญชาติ ไทย

3.2 โทรศัพท์ 02-5647000 ต่อ 1314 - 1350

3.3 โทรสาร 02 564 7003

3.4 อีเมล ipm@mc.nstda.or.th

4. สิทธิในการขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร

ผู้ประดิษฐ์/ผู้ถือกรรมสิทธิ์ในสิทธิบัตร และประกาศคณะกรรมการสิทธิบัตร

ผู้ประดิษฐ์/ผู้ถือกรรมสิทธิ์ในสิทธิบัตร  ผู้รับโอน  ผู้ขอรับสิทธิโดยเหตุอื่น

5. ตัวแทน (ถ้ามี) ที่อยู่ (เลขที่ ถนน จังหวัด รหัสไปรษณีย์)

น.ส.อรุณศรี ศรีธนะอิทธิพล

อยู่ที่ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

111 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถ.พหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง

จ.ปทุมธานี 12120

5.1 ตัวแทนเลขที่ 1463

5.2 โทรศัพท์ 02 564 7000

5.3 โทรสาร 02 564 7003

5.4 อีเมล ipm@mc.nstda.or.th

6. ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์ และที่อยู่ (เลขที่ ถนน ประเทศ)

1.นายพิศิษฐ์ คำหน่อแก้ว 2.นายอนุศิษฐ์ แก้วประจักษ์ อยู่ที่บ้านโนนโพนหนองหวาย ต.บึงสามพัน อ.เมือง จ.ขอนแก่น

จังหวัดปทุมธานี 12120 3.นายธนวิทย์ ไกรนรา 4.นายศุภราช โลหะเวช 5.นางสาวกานต์ชญา ต้นสมรส อยู่ที่ ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา เลขที่ 169 ถนนลงหาดบางแสน ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

7. คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิม

ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ขอให้ถือว่าได้ยื่นคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ ในวันเดียวกับคำขอรับสิทธิบัตร

เลขที่ วันยื่น เพราะคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิมเพราะ

คำขอเดิมมีการประดิษฐ์หลายอย่าง  ถูกคัดค้านเนื่องจากผู้ขอไม่มีสิทธิ  ขอเปลี่ยนแปลงประเภทของสิทธิ

หมายเหตุ ในกรณีที่ไม่าจะบรรยายละเอียดได้ครบถ้วน ให้จัดทำเป็นเอกสารแนบท้ายแบบพิมพ์นี้โดยระบุหมายเลขกำกับข้อและหัวข้อที่แสดงรายละเอียดเพิ่มเติมดังกล่าวด้วย

8. การยื่นคำขออนุญาตราชอาณาจักร				
วันยื่นคำขอ	เลขที่คำขอ	ประเทศ	สัญลักษณ์จำแนกการ ประดิษฐ์ระหว่างประเทศ	สถานะคำขอ
8.1				
8.2				
8.3				

8.4  ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรขอสิทธิให้ถือว่าได้ยื่นคำขอนี้ในวันที่ได้ยื่นคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรในต่างประเทศเป็นครั้งแรกโดย  
 ได้ยื่นเอกสารหลักฐานพร้อมคำขอนี้  ขอยื่นเอกสารหลักฐานหลังจากวันยื่นคำขอนี้

9. การแสดงการประดิษฐ์ หรือการออกแบบผลิตภัณฑ์ ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรได้แสดงการประดิษฐ์ที่หน่วยงานของรัฐเป็นผู้จัด  
วันแสดง ..... วันเปิดงานแสดง ..... ผู้จัด .....

10. การประดิษฐ์เกี่ยวกับจุลชีพ

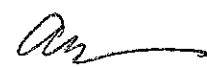
10.1 เลขทะเบียน ..... 10.2 วันที่ฝากเก็บ ..... สถาบันฝากเก็บ/ประเทศ .....

11. ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ขอยื่นเอกสารภาษาต่างประเทศก่อนในวันยื่นคำขอนี้ และจะจัดยื่นคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรที่จัดทำ  
เป็นภาษาไทยภายใน 90 วัน นับจากวันยื่นคำขอนี้ โดยขอยื่นเป็นภาษา  
 อังกฤษ  ฝรั่งเศส  เยอรมัน  ญี่ปุ่น  อื่น ๆ

12. ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ขอให้อธิบดีประกาศโฆษณาคำขอรับสิทธิบัตร หรือรับจดทะเบียนและประกาศโฆษณาอนุสิทธิบัตร  
หลังจากวันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....  
 ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรขอให้ใช้รูปเขียนหมายเลข ..... ในประกาศโฆษณา

13. คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ประกอบด้วย ก. แบบพิมพ์คำขอ 2 หน้า ข. รายละเอียดการประดิษฐ์ หรือคำพรรณนาแบบผลิตภัณฑ์ 12 หน้า ค. ข้อถ้อยสิทธิ 4 หน้า ง. รูปเขียน 5 รูป 3 หน้า จ. ภาพแสดงแบบผลิตภัณฑ์ <input type="checkbox"/> รูปเขียน - รูป - หน้า <input type="checkbox"/> ภาพถ่าย - รูป - หน้า ฉ. บทสรุปการประดิษฐ์ 1 หน้า	14. เอกสารประกอบคำขอ <input type="checkbox"/> เอกสารแสดงสิทธิในการขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร <input type="checkbox"/> หนังสือรับรองการแสดงการประดิษฐ์/การออกแบบ ผลิตภัณฑ์ <input type="checkbox"/> หนังสือมอบอำนาจ <input type="checkbox"/> เอกสารรายละเอียดเกี่ยวกับจุลชีพ <input type="checkbox"/> เอกสารการขอรับวันยื่นคำขอในต่างประเทศเป็นวันยื่น คำขอในประเทศไทย <input type="checkbox"/> เอกสารขอเปลี่ยนแปลงประเภทของสิทธิ <input checked="" type="checkbox"/> เอกสารอื่น ๆ เอกสารประกอบการยื่นคำขอรับสิทธิบัตร
--	---

15. ข้าพเจ้าขอรับรองว่า  
 การประดิษฐ์นี้ไม่เคยยื่นขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรมาก่อน  
 การประดิษฐ์นี้ได้พัฒนาปรับปรุงมาจาก .....

16. ลายมือชื่อ (  ผู้ขอรับสิทธิบัตร / อนุสิทธิบัตร;  ตัวแทน)  
  
  
(น.ส. อรุณศรี ศรีธนะอิทธิพล)  
ตัวแทนผู้รับมอบอำนาจ

หมายเหตุ บุคคลใดยื่นขอรับสิทธิบัตรการประดิษฐ์หรือการออกแบบผลิตภัณฑ์ หรืออนุสิทธิบัตร โดยการแสดงข้อความอันเป็นเท็จแก่พนักงานเจ้าหน้าที่  
เพื่อให้ได้ไปซึ่งสิทธิหรืออนุสิทธิบัตร ต้องระวางโทษจำคุกไม่เกินหกเดือน หรือปรับไม่เกินห้าพันบาท หรือทั้งจำทั้งปรับ



คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร

- การประดิษฐ์  
 การออกแบบผลิตภัณฑ์  
 อนุสิทธิบัตร

ข้าพเจ้าผู้ลงลายมือชื่อในคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้  
 ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ตามพระราชบัญญัติสิทธิบัตร พ.ศ. 2522  
 แก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2535  
 และพระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 3) พ.ศ. 2542

สำหรับเจ้าหน้าที่	
วันรับคำขอ 15 ก.ย. 2558	เลขที่คำขอ
วันยื่นคำขอ 15 ก.ย. 2558	1501005549
สัญลักษณ์จำแนกการประดิษฐ์ระหว่างประเทศ	
ใช้กับแบบผลิตภัณฑ์	
ประเภทผลิตภัณฑ์	
วันประกาศโฆษณา	เลขที่ประกาศโฆษณา
วันออกสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร	เลขที่สิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร
ลายมือชื่อเจ้าหน้าที่	

1. ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์/การออกแบบผลิตภัณฑ์

“เซลล์แสงอาทิตย์สียอมไวแสงที่มีชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนและกระบวนการผลิตดังกล่าว”

2. คำขอรับสิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์นี้เป็นคำขอสำหรับแบบผลิตภัณฑ์อย่างเดียวกันและเป็นคำขอลำดับที่  
 ในจำนวน คำขอ ที่ยื่นในคราวเดียวกัน

3. ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร และที่อยู่ (เลขที่ ถนน ปรเทศ) และที่อยู่ (เลขที่ ถนน ปรเทศ) ของผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ 111 อุทยาน  
 วิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถ.พหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง  
 จ.ปทุมธานี 12120

3.2 โทรศัพท์ 02-564-7000 ต่อ 1314-1350  
 3.3 โทรศัพท์ 02-564-7000 ต่อ 1350  
 3.4 อีเมล tmc@tmc.nstda.or.th

4. สิทธิในการขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร และประเภทคณะผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์

ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบ  ผู้รับโอน  ผู้ขอรับสิทธิโดยเหตุอื่น

5. ตัวแทน (ถ้ามี) ที่อยู่ (เลขที่ ถนน จังหวัด รหัสไปรษณีย์)

น.ส.อรุณศรี ศรีธนอิทธิพล  
 อยู่ที่ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ  
 111 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถ.พหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง  
 จ.ปทุมธานี 12120

5.1 ตัวแทนเลขที่ 1463  
 5.2 โทรศัพท์ 02 564 7000  
 5.3 โทรสาร 02 564 7003  
 5.4 อีเมล ipm@tmc.nstda.or.th

6. ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์ และที่อยู่ (เลขที่ ถนน ประเทศ)

1. นายพิศิษฐ์ คำหน่อแก้ว 2. นายอนุศิษฐ์ แก้วประจักษ์ อยู่ที่ ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง  
 จังหวัดปทุมธานี 12120 3. นายธนวิทย์ ไกรธนา 4. นายศุภวรุณ โลหะเวช 5. นางสาวกานต์ชนา ต้นสมรส อยู่ที่ ภาควิชาเคมี  
 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา เลขที่ 169 ถนนลงหาดบางแสน ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

7. คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิม

ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ขอให้ถือว่าได้ยื่นคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ ในวันเดียวกับคำขอรับสิทธิบัตร  
 เลขที่ วันยื่น เพราะคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิมเพราะ

คำขอเดิมมีการประดิษฐ์หลายอย่าง  ถูกคัดค้านเนื่องจากผู้ขอไม่มีสิทธิ  ขอเปลี่ยนแปลงประเภทของสิทธิ

หมายเหตุ ในกรณีที่ไม้อาจจะบรรยายละเอียดได้ครบถ้วน ให้จัดทำเป็นเอกสารแนบท้ายแบบพิมพ์นี้โดยระบุหมายเลขกำกับข้อและหัวข้อที่แสดงรายละเอียดเพิ่มเติมดังกล่าวด้วย



8. การยื่นคำขออนุญาตออกนอกราชอาณาจักร				
วันยื่นคำขอ	เลขที่คำขอ	ประเทศ	สัญลักษณ์จำแนกการ ประดิษฐ์ระหว่างประเทศ	สถานะคำขอ
8.1				
8.2				
8.3				
8.4 <input type="checkbox"/> ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรขอสิทธิให้ถือว่าได้ยื่นคำขอในวันที่ได้ยื่นคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรในต่างประเทศเป็นครั้งแรกโดย <input type="checkbox"/> ได้ยื่นเอกสารหลักฐานพร้อมคำขอนี้ <input type="checkbox"/> ขอยื่นเอกสารหลักฐานหลังจากวันยื่นคำขอนี้				
9. การแสดงการประดิษฐ์ หรือการออกแบบผลิตภัณฑ์ ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรได้แสดงการประดิษฐ์ที่หน่วยงานของรัฐเป็นผู้จัด วันแสดง วันเปิดงานแสดง ผู้จัด				
10. การประดิษฐ์เกี่ยวกับจุลชีพ				
10.1 เลขทะเบียน		10.2 วันที่ฝากเก็บ		สถาบันฝากเก็บ/ประเทศ
11. ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ขอยื่นเอกสารภาษาต่างประเทศก่อนในวันยื่นคำขอนี้ และจะจัดยื่นคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรที่จัดทำ เป็นภาษาไทยภายใน 90 วัน นับจากวันยื่นคำขอนี้ โดยขอยื่นเป็นภาษา <input type="checkbox"/> อังกฤษ <input type="checkbox"/> ฝรั่งเศส <input type="checkbox"/> เยอรมัน <input type="checkbox"/> ญี่ปุ่น <input type="checkbox"/> อื่น ๆ				
12. ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ขอให้อธิบดีประกาศโฆษณาคำขอรับสิทธิบัตร หรือรับจดทะเบียนและประกาศโฆษณาอนุสิทธิบัตรนี้ หลังจากวันที่ เดือน พ.ศ. <input type="checkbox"/> ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรขอให้ใช้รูปเขียนหมายเลข ในประกาศโฆษณา				
13. คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ประกอบด้วย			14. เอกสารประกอบคำขอ	
ก. แบบพิมพ์คำขอ	2	หน้า	<input type="checkbox"/> เอกสารแสดงสิทธิในการขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร	
ข. รายละเอียดการประดิษฐ์ หรือคำพรรณนาแบบผลิตภัณฑ์	9	หน้า	<input type="checkbox"/> หนังสือรับรองการแสดงการประดิษฐ์/การออกแบบ ผลิตภัณฑ์	
ค. ข้อดีสิทธิ	4	หน้า	<input type="checkbox"/> หนังสือมอบอำนาจ	
ง. รูปเขียน	4	รูป 3 หน้า	<input type="checkbox"/> เอกสารรายละเอียดเกี่ยวกับจุลชีพ	
จ. ภาพแสดงแบบผลิตภัณฑ์			<input type="checkbox"/> เอกสารการขอนับวันยื่นคำขอในต่างประเทศเป็นวันยื่น คำขอในประเทศไทย	
<input type="checkbox"/> รูปเขียน	-	รูป - หน้า	<input type="checkbox"/> เอกสารขอเปลี่ยนแปลงประเภทของสิทธิ	
<input type="checkbox"/> ภาพถ่าย	-	รูป - หน้า	<input checked="" type="checkbox"/> เอกสารอื่น ๆ เอกสารประกอบการยื่นคำขอรับสิทธิบัตร	
ฉ. บทสรุปการประดิษฐ์	1	หน้า		
15. ข้าพเจ้าขอรับรองว่า <input checked="" type="checkbox"/> การประดิษฐ์นี้ไม่เคยยื่นขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรมาก่อน <input type="checkbox"/> การประดิษฐ์นี้ได้พัฒนาปรับปรุงมาจาก				
16. ลายมือชื่อ ( <input type="checkbox"/> ผู้ขอรับสิทธิบัตร / อนุสิทธิบัตร; <input checked="" type="checkbox"/> ตัวแทน)				
			 (น.ส.อรุณศรี ศรีธนะฉิทธิพล) ตัวแทนผู้รับมอบอำนาจ	

หมายเหตุ บุคคลใดยื่นขอรับสิทธิบัตรการประดิษฐ์หรือการออกแบบผลิตภัณฑ์ หรืออนุสิทธิบัตร โดยการแสดงข้อความอันเป็นเท็จแก่พนักงานเจ้าหน้าที่  
เพื่อให้ได้ไปซึ่งสิทธิหรืออนุสิทธิบัตร ต้องระวางโทษจำคุกไม่เกินหกเดือน หรือปรับไม่เกินห้าพันบาท หรือทั้งจำทั้งปรับ