



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนานาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโตรไลต์ชนิดใหม่โดยใช้พอลิเมอร์ผสม PEO/PVDF-HFP
เป็นเมทริกซ์เพื่อการประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีอ้อมไวแสง

โดย

นายสายันต์ แสงสุวรรณ

เมษายน 2559



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนานาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ชนิดใหม่โดยใช้พอลิเมอร์ผสม PEO/PVDF-HFP
เป็นเมทริกซ์เพื่อการประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

Development of Novel Nanocomposite Gel Electrolyte Based on PEO/PVDF-HFP Blend
as a Matrix Phase for Dye-sensitized Solar Cells (DSSCs)

คณะผู้วิจัย

สังกัด

นายสายันต์ แสงสุวรรณ

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ประจำปีงบประมาณ 2555-2556

ISBN (ถ้ามี)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย ม.อบ. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปผู้บริหาร

จากการเติบโตทางเศรษฐกิจที่รวดเร็วของตลาดที่กำลังเกิดใหม่ เช่น ประเทศจีนและอินเดีย และการเพิ่มขึ้นของประชากรในกลุ่มประเทศกำลังพัฒนา ทำให้คาดการณ์ว่าโลกจะมีความต้องการด้านพลังงานเพิ่มขึ้นเรื่อยๆทุกปีจนถึงปี 2030 (เพิ่มประมาณ 50% ของความต้องการในปัจจุบัน) และเมื่อเร็วๆนี้ ทั่วโลกได้รับผลกระทบอย่างมาก จากการเปลี่ยนแปลงสภาวะอากาศอันเนื่องมาจากสภาวะโลกร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิงและอื่นๆ ประกอบกับพลังงานจากฟอสซิลที่กำลังจะหมดภายในศตวรรษนี้ จากเหตุดังกล่าว ทำให้ทั่วโลกตื่นตัวที่จะหาพลังงานทดแทนที่ยั่งยืนและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยแหล่งพลังงานที่ใช้ไม่มีวันหมดและน่าสนใจอย่างยิ่ง คือ พลังงานจากดวงอาทิตย์ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่สะอาด ไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่สำคัญในอนาคต เนื่องจากสามารถนำมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าได้โดยตรง โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ ในปัจจุบันการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในเชิงพาณิชย์ส่วนใหญ่เป็นชนิดรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำอินทรี ซึ่งให้ประสิทธิภาพเฉลี่ยอยู่ที่ 15% แต่กระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูง และต้องการสารกึ่งตัวนำที่มีความบริสุทธิ์สูงมาก จึงทำให้อุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีราคาแพงเกินไปที่จะนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในบ้านเรือนทั่วไป ดังนั้นนักวิจัยจึงได้พยายามพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรี เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (dye-sensitized solar cell, DSSC) ขึ้นมา และกำลังได้รับความสนใจอย่างมากทั้งด้านวิชาการและอุตสาหกรรม เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพีเอ็น (ประมาณ 11%) และยังสามารถพัฒนาประสิทธิภาพให้สูงขึ้นไปอีกเพราะยังห่างจากค่าที่คำนวณทางทฤษฎีมาก แต่มีกระบวนการผลิตที่ง่าย และมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่ามาก ตลอดจนยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมีองค์ประกอบที่สำคัญอยู่ 4 ส่วน คือ ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง ชั้นอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ สีย้อมไวแสง และอิเล็กโทรไลต์ หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์นี้จะคล้ายกับกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช โดยโมเลกุลสีย้อมไวแสงที่เกาะอยู่บนอนุภาคโลหะออกไซด์ทำหน้าที่ดูดกลืนแสงส่งผลให้อิเล็กตรอนภายในโมเลกุลสีย้อมถูกกระตุ้นและส่งไปยังชั้นโลหะออกไซด์ จากนั้นจะถูกส่งผ่านไปที่ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงแอโนดและออกสู่วงจรโหลดภายนอก โมเลกุลสีย้อมที่อยู่สถานะกระตุ้นจะถูกรีดิวส์กลับมาที่สถานะพื้นโดยการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากอิเล็กโทรไลต์ และอิเล็กโทรไลต์จะถูกชดเชยอิเล็กตรอนกลับคืนจากขั้วไฟฟ้าแคโทด

จากการศึกษา พบว่าประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ เช่น โมเลกุลสีย้อมไวแสง จะต้องมีส่วนดูดกลืนแสงกว้าง และมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูง มีสมบัติของสภาวะพื้นและกระตุ้นที่เหมาะสม มีเสถียรภาพสูงในภาวะถูกออกซิไดส์ โลหะออกไซด์ ต้องมีแถบช่องว่างพลังงานกว้าง (>3 eV) และมีพื้นที่ผิวมาก และ อิเล็กโทรไลต์ ซึ่งมีทำหน้าที่ชดเชยอิเล็กตรอนให้กับโมเลกุลสีย้อมหรือรับประจุบวกจากขั้วไฟฟ้าแคโทด จะต้องสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายและไม่ดูดกลืนแสงอาทิตย์ในช่วงแสงตามมองเห็น ตลอดจนต้องมีอายุการใช้งานยาวนาน เป็นต้น จากที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่านักวิจัยสามารถพัฒนาองค์ประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงได้สามแนวทาง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของเซลล์แสงอาทิตย์ แต่สำหรับในงานวิจัยนี้ มุ่งเน้นเรื่องการพัฒนาาระบบอิเล็กโทรไลต์เป็นหลัก

ถึงแม้ว่าจะมีรายงานว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงสามารถให้ประสิทธิภาพได้สูงถึงประมาณ 11% โดยใช้ระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลว แต่ระบบนี้ประสบปัญหาที่สำคัญอย่างยิ่ง คือ เกิดการรั่วไหลของระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลวและปัญหาการปิดเซลล์ (sealing) ที่ยุ่งยากซึ่งทำให้อายุการใช้งานของเซลล์

แสงอาทิตย์นี้ไม่ยาวนาน จึงทำให้นักวิจัยได้พยายามคิดค้นระบบอิเล็กทรอนิกส์ชนิดใหม่มาทดแทน ตั้งแต่ใช้ระบบของเหลวไอออนิก อิเล็กทรอนิกส์ของแข็ง เจลอิเล็กทรอนิกส์ และตัวส่งผ่านประจุบวก เป็นต้น โดยในระหว่างระบบอิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ พบว่าเจลอิเล็กทรอนิกส์ให้การนำไฟฟ้าที่สูงกว่าระบบอื่นๆและให้อายุยาวนานมากกว่า อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพที่ยังต่ำกว่าระบบอิเล็กทรอนิกส์ของเหลวอยู่ (ปัจจุบันประมาณ 7%) แต่ยังสามารถพัฒนาให้ได้สูงขึ้นไปเทียบเท่ากับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพีเอ็นของสารอินทรีย์ได้ จึงทำให้นักวิจัยสนใจศึกษาระบบเจลอิเล็กทรอนิกส์กันอย่างมาก

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจพัฒนาระบบเจลอิเล็กทรอนิกส์ชนิดใหม่ขึ้นมา เรียกว่า *นาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กทรอนิกส์* โดยเจลอิเล็กทรอนิกส์ที่จะพัฒนาขึ้นจะประกอบด้วยพอลิเมอร์เมทริกซ์สองชนิดมาผสมกัน คือ PEO และ PVDF-HFP (PEO/PVDF-HFP blend) ที่อัตราส่วนต่างๆ และจากนั้นจึงจะทดลองเติมอนุภาคนาโน 2 ชนิด (TiO_2 , SiO_2) ที่ความเข้มข้นต่างๆ ลงไปผสมเพื่อสร้างเป็น *นาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กทรอนิกส์* ซึ่งระบบนาโนคอมพอสิตเจลที่เตรียมโดยใช้พอลิเมอร์ผสมแบบใหม่นี้ยังไม่มีรายงานวิจัยมาก่อน สำหรับการนำไปใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสียอมไวแสง (จากความรู้ที่มีขณะนี้) และผู้วิจัยคาดว่าระบบอิเล็กทรอนิกส์ชนิดใหม่ที่เตรียมได้นี้จะมีความคงทนนานและสามารถดูดซับอิเล็กทรอนิกส์ของเหลวไอออนิกได้มากยิ่งขึ้น พร้อมทั้งมีสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อนที่ดียิ่งกว่าการใช้พอลิเมอร์เมทริกซ์เพียงชนิดเดียว ซึ่งคาดว่าจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมและระยะเวลาการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสียอมไวแสงที่ใช้ *นาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กทรอนิกส์* ที่เตรียมขึ้นใหม่นี้ดีมากยิ่งขึ้นจนเทียบเท่ากับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสียอมไวแสงที่ใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์ของเหลวได้ นอกจากนี้แล้วระบบนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กทรอนิกส์ชนิดใหม่นี้ยังมีความสามารถนำไปประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสียอมไวแสงได้หลากหลายรูปแบบ เช่น สามารถเป็นแผ่นพลาสติกที่มีความโค้งงอได้ และสุดท้ายสามารถพัฒนาไปสู่การผลิตในเชิงพาณิชย์ได้

1. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเตรียมนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กทรอนิกส์ชนิดใหม่โดยใช้พอลิเมอร์ผสม PEO/PVDF-HFP เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ สำหรับปรับปรุงอายุการใช้งาน (long-term stability) และเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสียอมไวแสง
2. เพื่อพิสูจน์เอกลักษณ์และศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้า สมบัติทางความร้อน และการกระจายตัวไอออนของนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กทรอนิกส์ที่เตรียมได้
3. เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้เตรียมเป็นพอลิเมอร์เจลอิเล็กทรอนิกส์ต่อประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสียอมไวแสง
4. เพื่อศึกษาชนิดและปริมาณของอนุภาคนาโนที่เติมลงไปในพอลิเมอร์เจลอิเล็กทรอนิกส์ ต่อประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสียอมไวแสง

2. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของคู่พอลิเมอร์ผสมที่ใช้เตรียมเป็นพอลิเมอร์เจลอิเล็กทรอนิกส์
2. ทราบชนิดและปริมาณที่เหมาะสมของอนุภาคนาโนที่ทำให้ประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสียอมไวแสงดีที่สุด
3. ทราบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ ชนิดและปริมาณของอนุภาคนาโน ประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสียอมไวแสงที่เตรียมได้

4. ได้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงต้นแบบที่มีความคงทนในการใช้งานที่ยาวนานและมีประสิทธิภาพสูง
5. การนำเสนอผลงานวิจัยต่อที่ประชุมสัมมนาในระดับชาติและนานาชาติอย่างน้อย 2 เรื่อง
6. ผลิตและเสริมสร้างทักษะทางวิทยาศาสตร์แก่นักศึกษาปริญญาโทและปริญญาตรี จำนวน 1 และ 2 คน ตามลำดับ อันจะเป็นการเพิ่มขีดความสามารถด้านกำลังคนและแหล่งความรู้ในการแข่งขันของประเทศกับนานาชาติต่อไป

3. แนวทางการทำวิจัย

ขั้นที่ 1. ศึกษาการเตรียมชั้นโลหะออกไซด์และปรับปรุงผิวหน้าของชั้นโลหะออกไซด์บนกระจกไฟฟ้าโปร่งแสง FTO (working electrode) เพื่อหาจำนวนของชั้นโลหะออกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับนำไปศึกษากับระบบอิเล็กโทรไลต์แบบนาโนคอมพอสิตเจลซึ่งจะได้เตรียมในขั้นตอนที่ 2 ต่อไป

1.1 เคลือบ Commercial TiO_2 paste (T20) ติดบนกระจก FTO โดยกำหนดพื้นที่ใช้งานเป็น 0.20 cm^2 ด้วยเทคนิค screen-printing แล้วนำไปทำให้แห้งบน hot plate แล้วนำมา screen-printing ชั้นต่อไป จนได้จำนวนชั้นที่ต้องการ จากนั้น นำกระจกที่เคลือบแล้วไปอบ (calcined) เพื่อกำจัดตัวทำละลาย ที่อุณหภูมิ $450 \text{ }^\circ\text{C}$ เวลา 30 นาที

1.2 สำหรับการปรับปรุงด้วยชั้น scattering layer ก็ดำเนินการด้วยวิธีการเดียวกัน

1.3 ศึกษาจำนวนชั้น (ความหนา) และลักษณะพื้นผิว TiO_2 electrode ด้วยเทคนิค SEM

1.4 ศึกษาโครงสร้างผลึกของ TiO_2 electrode ด้วยเทคนิค XRD

ขั้นที่ 2 การเตรียมระบบอิเล็กโทรไลต์

2.1 อิเล็กโทรไลต์ของเหลว

นำ 0.1 M LiI , 0.05 M I_2 , 0.4 M TBP และ 1.0 M PMIMBr มาละลายในตัวทำละลายที่เป็นของผสมระหว่าง GBL:NMP:ACN จำนวน 28 ml (อัตราส่วน 7:7:14 ml) กวนสารละลายให้เป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2.2 อิเล็กโทรไลต์ของเหลวไอออนิก (Ionic liquid electrolyte, ILE)

ในการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบหาระบบของเหลวไอออนิกที่เหมาะสม โดยศึกษาระบบอิเล็กโทรไลต์จำนวนสองชนิด คือชนิด ILE A และชนิด ILE B สำหรับอิเล็กโทรไลต์ชนิด ILE A เตรียมโดยนำของผสมระหว่าง 0.6 M PM(II) และ 0.45 M MBI มาละลายในตัวทำละลาย 3-methoxypropionitrile เพียงชนิดเดียว ส่วนอิเล็กโทรไลต์ชนิด ILE B เตรียมโดยนำของผสมละลายในตัวทำละลายของผสมระหว่าง 3-methoxypropionitrile กับ Vareonitrile ในอัตราส่วนอัตราส่วน 85:15 %v/v โดยกวนสารละลายให้เป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2.3 พอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์

เตรียมพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์ของ PEO (MW. $100,000 \text{ g/mol}$) และ PVDF-HFP (MW. $10,000 \text{ g/mol}$) ที่ความเข้มข้น 5 และ 10 wt% ปริมาตร 2.0 ml โดยทำการละลายพอลิเมอร์ PEO และ PVDF-HFP ทั้งสองความเข้มข้นด้วยสารอิเล็กโทรไลต์ของเหลว (ILE) จำนวน 2.0 ml แล้วกวนสารละลายให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ $80 \text{ }^\circ\text{C}$ เวลา 7 ชั่วโมง ก่อนนำไปใช้

เป็นอิเล็กโทรไลต์ในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง นอกจากนี้ยังได้เตรียมพอลิเมอร์ เจลอิเล็กโทรไลต์ผสม PEO/PVDF-HFP จำนวน 3 อัตราส่วนโดยน้ำหนักดังนี้ 2:8, 5:5, และ 8:2 ตามลำดับ

2.4 นาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์

นำพอลิเมอร์ผสม PVDF-HFP/PEO อิเล็กโทรไลต์ อัตราส่วน 2:8 ความเข้มข้น 10 wt% ปริมาณ 2.0 กรัม จำนวน 8 ตัวอย่าง มาเติม TiO_2 และ SiO_2 nanoparticles ที่ความเข้มข้น 0.5, 1, 2, และ 5 wt% ตามลำดับ แล้วเติมไอออนิกอิเล็กโทรไลต์ของเหลวชนิด ILE B ตัวอย่างละ 2.0 ml กวนให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 ชั่วโมง

ขั้นที่ 3 พิสูจน์เอกลักษณ์และศึกษาสมบัติต่างๆของอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมได้

3.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์และนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ ด้วยเทคนิค ATR-FTIR เพื่อศึกษาอันตรกิริยาที่เกิดจากพอลิเมอร์ผสมและระบบอิเล็กโทรไลต์

3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโน TiO_2 ด้วยเทคนิค XRD

3.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโน TiO_2 ด้วยเทคนิค SEM

3.4 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของ พอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์ และนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ ด้วยเทคนิค DSC และ TGA

ขั้นที่ 4 การเตรียมขั้วไฟฟ้า Pt (counter electrode) และการดูดซับสีย้อมบน TiO_2 electrode

4.1 เตรียม Pt counter electrode ด้วยวิธี deposition technique ซึ่งเตรียมดังนี้ ใช้ 0.4 M H_2PtCl_6 ในตัวทำละลาย isopropanol หยดลงบนกระจก FTO แล้วทำให้กระจายไปทั่วแผ่น จากนั้นนำกระจกไปเผา sintering ที่อุณหภูมิ 450 °C 30 นาที

4.2 เตรียมสารละลายสีย้อม N719 ความเข้มข้น 3×10^{-4} M ในตัวทำละลาย Acetonitrile/3-butanol (1:1) จากนั้นนำกระจก FTO ที่เคลือบติดด้วย TiO_2 electrode ที่เตรียมได้ในขั้นที่ 1.1 และ 1.2 มาจุ่ม (dip die process) ในสารละลายเป็นเวลา 24 ชม. เพื่อให้โมเลกุลสีย้อมไวแสงเข้าไปยึดเกาะติดกับชั้นอนุภาคของ TiO_2 electrode

- **ขั้นที่ 5** การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSC cell fabrication) [15]

5.1 ทำการเจาะรู 1 รูบนกระจก FTO ด้านที่ไม่เคลือบด้วย Pt เพื่อใช้สำหรับเติมอิเล็กโทรไลต์เข้าไป ด้วยระบบปั๊มสุญญากาศ

5.2 ตัดแผ่นเรซิน Surlyn ความหนาประมาณ 25-50 นาโนเมตร เพื่อให้ล้อมรอบพื้นที่ TiO_2 electrode ที่เคลือบด้วยสีย้อมไวแสง เพื่อป้องกันขั้วไฟฟ้าช็อตกัน

5.3 ประกอบขั้วไฟฟ้าทั้งคู่เข้าด้วย จากนั้นให้ความร้อนแก่ Surlyn เพื่อให้ขั้วไฟฟ้าทั้งสองติดกัน

5.4 จากนั้นให้ความร้อนแก่ พอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์และนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ ประมาณ 80 °C จนเจลหลอมเหลว จากนั้นนำอิเล็กโทรไลต์เหลวดังกล่าวไปฉีด

เข้าไปรูที่เจาะไว้ โดยใช้ระบบดูดอากาศเข้าช่วย เมื่ออิเล็กทรอนิกส์เข้าไปเซลล์สมบูรณ์แล้ว ทำการปิดรูที่เจาะไว้ด้วยแผ่น Surlyn

- **ขั้นที่ 6** การทดสอบประสิทธิภาพและคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์
 - 6.1 ศึกษา I-V curves ประสิทธิภาพของเซลล์ และสมบัติต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมได้ ภายใต้แสงอาทิตย์เทียม AM 1.5 (100 mWcm^{-2})
 - 6.2 ศึกษา IPCE ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมได้
 - 6.3 ศึกษา Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) ของเซลล์เพื่อหาพฤติกรรมการถ่ายเทประจุภายในเซลล์
 - 6.4 ศึกษาความเสถียรของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมได้โดยการวัดประสิทธิภาพเปรียบเทียบกับระบบของเหลวไอออนิกที่เวลาต่างๆ

4. ระยะเวลาทำการวิจัย

ระยะเวลาทำการวิจัย จำนวน 2 ปี เริ่มต้นจาก 1 ตุลาคม 2554 สิ้นสุด 30 กันยายน 2556 และ ได้ขยายเวลา ถึง 28 ก.ย. 2557

5. งบประมาณการวิจัย

งบประมาณการวิจัยรวมเท่ากับ **502,700** บาท โดยเป็นงบประมาณในปี 2555 จำนวน 235,400 บาท และ ในปีงบประมาณ 2556 จำนวน 267,300 บาท

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมและสมบัติของนาโนคอมพอลิเมอร์เจลอิเล็กโตรไลต์ที่เตรียมจากพอลิเมอร์ผสม Poly(vinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene) (PVDF-HFP) และ Polyethylene oxide (PEO) ซึ่งใช้เป็นเมทริกซ์เฟส อนุภาคนาโนที่ใช้ในการเติมเข้าไปพอลิเมอร์เจลอิเล็กโตรไลต์มีสองชนิดคือ TiO_2 และ SiO_2 นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการเตรียมขั้วไฟฟ้าทำงานที่เหมาะสมเพื่อใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงด้วย และศึกษาหาอัตราส่วนและความเข้มข้นที่เหมาะสมของระบบพอลิเมอร์เจล ตลอดจนความเข้มข้นของอนุภาคนาโนอีกด้วย จากการศึกษาพบว่าขั้วไฟฟ้าทำงานที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปชั้นฟิล์มบาง TiO_2 คือ 6+2L ชั้น (6L ชั้นโปร่งแสงและ 2L ชั้นกระเจิงแสง) ซึ่งให้ค่าประสิทธิภาพสูงถึง 6.04% ในระบบอิเล็กโตรไลต์ของเหลว ความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับเตรียมพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ผสม PVDF-HFP/PEO คือ 10 wt% อัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 2:8 โดยน้ำหนัก และสำหรับนาโนคอมโพสิตเจลอิเล็กโตรไลต์ที่เติมอนุภาคนาโน TiO_2 และ SiO_2 พบว่าการเติม TiO_2 และ SiO_2 เพียง 1 wt% ดีที่สุดโดยให้ค่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุดเท่ากับ 3.92% และ 4.13% ตามลำดับ สำหรับความเสถียรของเซลล์แสงอาทิตย์พบว่าให้ความคงทนยาวนานกว่า 700 ชั่วโมงในเซลล์ที่ดีที่สุด นอกจากนี้แล้วยังพบว่าพอลิเมอร์เจลอิเล็กโตรไลต์ที่เตรียมได้มีจุดหลอมเหลวที่สูงมากขึ้นกว่าพอลิเมอร์เดี่ยวและมีความเสถียรทางความร้อนดีกว่าอิเล็กโตรไลต์ของเหลวและของเหลวไอออนิกด้วย

Abstract

In this work, the preparation and physical properties of nanocomposite polymer gel electrolytes based on blend of poly(vinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene) (PVDF-HFP)/polyethylene oxide (PEO) as a matrix phase were studied. Nanoparticles used to blend with polymer gel electrolyte consisted of TiO_2 and SiO_2 . Also, the optimization of working electrodes (TiO_2) was also examined to apply in dye sensitized solar cells (DSSCs). The composition and concentration of blend pair polymers and nanoparticle concentrations were investigated. Results revealed that the optimum working electrode was fabricated using 6+2L layers (6L layers of transparent TiO_2 and 2L layers of light scattering TiO_2). This working electrode yielded the cell efficiency (η) of 6.04% using liquid electrolyte. The optimum concentration of PVDF-HFP/PEO blends was 10 wt% with composition of 2:8 by weight. In addition, to prepare nanocomposite gel electrolyte, the suitable concentration of TiO_2 and SiO_2 nanoparticles was 1 wt% which yielded the cell efficiency of 3.92 and 4.13%, respectively. Moreover, for long-term stability of DSSCs cells, the best cells provided long life over 700 hours. Finally, the prepared polymer gel electrolytes provided the higher melting temperatures and higher thermal stability than that of liquid and ionic electrolytes.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถเสร็จสมบูรณ์ได้เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากนักศึกษาปริญญาโท นางสาวนิภา รัตน์ ทิอุทิศ และนักศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาเคมี ของคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้ ร่วมกันช่วยทำงานเป็นอย่างดีอันเป็นส่วนหนึ่งของโครงการพิเศษ (special project) ในหลักสูตรสาขาเคมีซึ่ง ประกอบด้วย นายสนธิ พานพินิจ และ นางสาวชนม์นิภา ปุราณเน

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่/อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี สำหรับความอนุเคราะห์/สนับสนุน อุปกรณ์ เครื่องมือและสารเคมีต่างๆ ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.อรัญญา พิมพ์มงคล และเจ้าหน้าที่ประจำเครื่องที่กรุณาให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่อง SEM เพื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใย

ขอขอบคุณบุคลากร ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) เพื่อใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกของเส้นใย

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณแหล่งทุนที่สนับสนุนให้งานวิจัยนี้เกิดขึ้น คือ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้

ผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทสรุปผู้บริหาร.....	iii
บทคัดย่อภาษาไทย.....	viii
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ix
กิตติกรรมประกาศ	x
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย)	1
1.2 วัตถุประสงค์หลักของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
2. ทฤษฎีและแนวคิด	
2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-Sensitizer Solar Cells, DSSCs)	4
2.2 ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์	6
2.3 การพัฒนาระบบอิเล็กทรอนิกส์	8
2.4 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง	11
3. การทดลอง	
3.1 เครื่องมือ	13
3.2 วัสดุ	14
3.3 สารเคมี	14
3.4 การศึกษาจำนวนชั้นที่เหมาะสมของฟิล์มบางของไทเทเนียม(IV) ไดออกไซด์	15
3.5 การเตรียมอิเล็กทรอนิกส์	15
3.6 การเตรียมฟิล์มบางของไทเทเนียม(IV) ไดออกไซด์และฟิล์มบางของแพลทินัม	17
3.7 การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSC Fabrication)	17
3.8 การพิสูจน์เอกลักษณ์และวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์	18
4. ผลการทดลองและวิจารณ์	
4.1 การศึกษาการเตรียมชั้นโลหะออกไซด์ TiO_2 ที่เหมาะสม	20
4.1.1 การศึกษาจำนวนชั้นฟิล์มบาง TiO_2 โดยเทคนิค screen printing	20
4.1.2 การพัฒนาประสิทธิภาพของชั้นฟิล์มบาง TiO_2 โดยการเพิ่มชั้นฟิล์ม ชนิดกระเจิงแสง (Light Scattering)	26
4.2 การศึกษาการเตรียมระบบอิเล็กทรอนิกส์ของเหลวไอออนิก พอลิเมอร์อิเล็กทรอนิกส์ และนาโนคอมโพสิตเจลอิเล็กโทรไลต์	27
4.2.1 การศึกษาระบบอิเล็กทรอนิกส์ของเหลวไอออนิก	27
4.2.2 การศึกษาระบบพอลิเมอร์เจลผสมอิเล็กทรอนิกส์	30
4.2.3 การศึกษาระบบนาโนคอมโพสิตเจลอิเล็กโทรไลต์	34
4.2.3.1 การศึกษาประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (IPCE) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้นาโนคอมโพสิตเจลอิเล็กโทรไลต์	38
4.2.3.2 การศึกษา Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้นาโนคอมโพสิตเจลอิเล็กโทรไลต์	39

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.4 การศึกษาความเสถียรของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมโดยระบบ อิเล็กโทรไลต์ต่างๆ	41
4.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์และศึกษาสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ เจลอิเล็กโทรไลต์	43
4.3.1 ผลการศึกษาการดูดกลืนคลื่นแสงอินฟราเรดโดยใช้เทคนิค FT-IR	43
4.3.2 การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC และ TGA	47
5. สรุปผลการทดลอง	53
เอกสารอ้างอิง	55
ภาคผนวก	57

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

จากการเติบโตทางเศรษฐกิจที่รวดเร็วของตลาดที่กำลังเกิดใหม่ เช่น จีนและอินเดีย และการเพิ่มขึ้นของประชากรในกลุ่มประเทศกำลังพัฒนา ทำให้คาดการณ์ว่าโลกจะต้องการพลังงานเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆทุกปีจนถึงปี 2030 (เพิ่มประมาณ 50% ของความต้องการในปัจจุบัน) และเมื่อเร็วๆนี้ทั่วโลกได้รับผลกระทบอย่างมากจากสภาวะโลกร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ น้ำมัน เชื้อเพลิงและอื่นๆ ประกอบกับพลังงานจากฟอสซิลที่กำลังจะหมดภายในศตวรรษนี้ ด้วยเหตุดังกล่าวทำให้ทั่วโลกตื่นตัวที่จะหาพลังงานทดแทนที่ยั่งยืนและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยแหล่งพลังงานที่ไม่มีวันหมดที่นำเสนออย่างยั่งยืน คือพลังงานจากดวงอาทิตย์ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่สะอาด ไม่เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่สำคัญในอนาคต เนื่องจากสามารถนำมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าได้โดยตรง โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ ในปัจจุบันการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในเชิงพาณิชย์ส่วนใหญ่เป็นชนิดรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำอนินทรีย์ซึ่งมีประสิทธิภาพเฉลี่ยอยู่ที่ 15% แต่กระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูงและสารกึ่งตัวนำที่มีความบริสุทธิ์สูงมากจึงทำให้อุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีราคาแพงเกินไปที่จะนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในบ้านเรือนทั่วไป ดังนั้นนักวิจัยจึงได้ทำการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (dye-sensitized solar cell, DSSC) ขึ้นมา และกำลังได้รับความสนใจอย่างมากทั้งด้านวิชาการและอุตสาหกรรม เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพีเอ็น (ประมาณ 11%) และยังสามารถพัฒนาประสิทธิภาพให้สูงขึ้นไปได้อีกเพราะยังห่างจากค่าที่คำนวณทางทฤษฎีมาก แต่มีกระบวนการผลิตที่ง่ายและมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่ามาก ตลอดจนถึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

DSSC มีองค์ประกอบสำคัญอยู่ 4 ส่วน คือ ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง ชั้นอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ สีย้อมไวแสง และอิเล็กโทรไลต์ หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์นี้จะคล้ายกับกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช โดยโมเลกุลสีย้อมไวแสงที่เกาะอยู่บนอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ทำหน้าที่ดูดกลืนแสงส่งผลให้อิเล็กตรอนภายในโมเลกุลสีย้อมถูกกระตุ้นและส่งไปยังชั้นโลหะออกไซด์ จากนั้นจะถูกส่งผ่านไปให้ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงแอโนดและออกสู่วงจรโหลดภายนอก โมเลกุลสีย้อมที่อยู่สถานะกระตุ้นจะถูกรีดิวซ์กลับมาที่สถานะพื้นโดยการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากอิเล็กโทรไลต์ และอิเล็กโทรไลต์จะถูกชดเชยอิเล็กตรอนกลับคืนจากขั้วไฟฟ้าแคโทด

จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ เช่น โมเลกุลสีย้อมไวแสง จะต้องมีส่วนประกอบดูดกลืนแสงกว้างและมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูง มีสมบัติของสถานะพื้นและกระตุ้นที่เหมาะสม มีเสถียรภาพสูงในภาวะถูกออกซิไดส์ โลหะออกไซด์ ต้องมีแถบช่องว่างพลังงานกว้าง ($>3\text{eV}$) และมีพื้นที่ผิวมาก และอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งมีทำหน้าที่ชดเชยอิเล็กตรอนให้กับโมเลกุลสีย้อมหรือรับประจุบวกจากขั้วไฟฟ้าแคโทด จะต้องสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายและไม่ดูดกลืนแสงอาทิตย์ในช่วงแสงตามมองเห็นตลอดจนต้องมีอายุการใช้งานยาวนาน เป็นต้น จากที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่านักวิจัยสามารถพัฒนาองค์ประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงได้สามแนวทาง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของเซลล์แสงอาทิตย์ แต่สำหรับในงานวิจัยนี้ มุ่งเน้นเรื่องการพัฒนากระบวนการผลิตอิเล็กโทรไลต์เป็นหลัก

ถึงแม้จะมีรายงานว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงสามารถให้ประสิทธิภาพได้สูงถึงประมาณ 11% โดยใช้ระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลว แต่ระบบนี้ประสบปัญหาที่สำคัญอย่างยิ่ง คือ เกิดการรั่วไหลของ

ระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลวและปัญหาการปิดเซลล์ (sealing) ที่ยุ่งยาก ซึ่งทำให้อายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์นี้ไม่ยาวนาน จึงทำให้นักวิจัยได้พยายามคิดค้นระบบอิเล็กโทรไลต์ชนิดใหม่มาทดแทน ตั้งแต่ใช้ระบบของเหลวไอออนิก อิเล็กโทรไลต์ของแข็ง เจลอิเล็กโทรไลต์ และตัวส่งผ่านประจุบวก เป็นต้น โดยในระหว่างระบบอิเล็กโทรไลต์เหล่านี้ พบว่าเจลอิเล็กโทรไลต์ให้การนำไฟฟ้าที่สูงกว่าระบบอื่นๆและให้อายุยาวนานมากกว่า อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพที่ได้ยังต่ำกว่าระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลวอยู่ แต่ยังสามารถพัฒนาให้ได้สูงขึ้นไปเทียบเท่ากับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพีเอ็นของสารอินทรีย์ได้ จึงทำให้นักวิจัยสนใจศึกษาระบบเจลอิเล็กโทรไลต์กันอย่างมาก

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจพัฒนาระบบเจลอิเล็กโทรไลต์ชนิดใหม่ขึ้นมา เรียกว่า *นาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์* โดยเจลอิเล็กโทรไลต์ที่จะพัฒนาขึ้นจะประกอบด้วยพอลิเมอร์เมทริกซ์สองชนิดมาผสมกัน คือ PEO และ PVDF-HFP (PEO/PVDF-HFP) ที่อัตราส่วนต่างๆ และจะทดลองเติมอนุภาคนาโน (TiO_2 , SiO_2) ลงไปผสมเพื่อสร้างเป็น *นาโนคอมพอสิตเจล* ซึ่งระบบนาโนคอมพอสิตเจลที่เตรียมโดยใช้พอลิเมอร์ผสมแบบใหม่นี้ยังไม่มีรายงานวิจัยมาก่อน สำหรับการนำไปใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง และผู้วิจัยคาดว่าระบบอิเล็กโทรไลต์ชนิดใหม่ที่เตรียมได้นี้จะมีความคงทนนานและสามารถดูดซับอิเล็กโทรไลต์ของเหลวไอออนิกได้มากยิ่งขึ้น พร้อมทั้งมีสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อนที่ดียิ่งกว่าการใช้พอลิเมอร์เมทริกซ์เพียงชนิดเดียวซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมและระยะเวลาใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้นาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมขึ้นใหม่นี้ดีมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้แล้วระบบนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ชนิดใหม่นี้ยังมีความสามารถนำไปประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงได้หลากหลายรูปแบบ เช่น สามารถเป็นแผ่นพลาสติกที่มีความโค้งงอได้ และสุดท้ายสามารถพัฒนาไปสู่การผลิตในเชิงพาณิชย์ได้

1.2 วัตถุประสงค์หลักของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเตรียมนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ชนิดใหม่ (novel nanocomposite gel electrolyte) โดยใช้พอลิเมอร์ผสม PEO/PVDF-HFP เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ สำหรับปรับปรุงอายุการใช้งาน (long-term stability) และเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง
2. เพื่อพิสูจน์เอกลักษณ์และศึกษาสมบัติพื้นฐานวิทยา โครงสร้างผลึก สมบัติทางความร้อน สมบัติการนำไฟฟ้าและการกระจายตัวไอออนของนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมได้
3. เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้เตรียมเป็นพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์ ต่อประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง
4. เพื่อศึกษาชนิดและปริมาณของอนุภาคนาโน (nanoparticles) ที่เติมลงไปในพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์ ต่อประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง
5. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ (relationship) ของอัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ ชนิดและปริมาณของอนุภาคนาโน สมบัติกายภาพต่างๆของนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์กับประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมชนิดไวแสงที่เตรียมได้

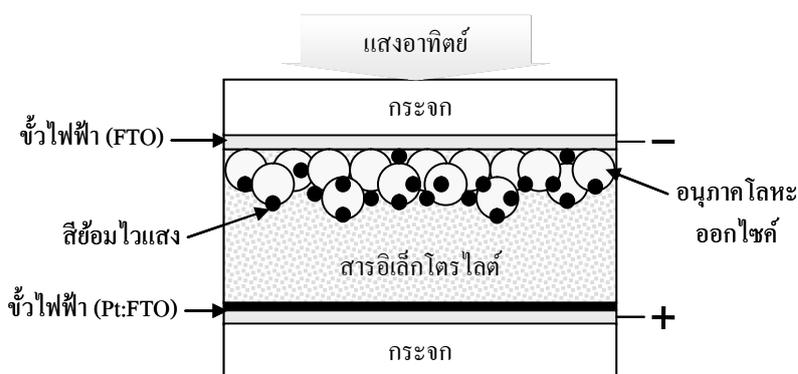
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ศึกษาการเตรียมนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโตรไลต์ชนิดใหม่โดยใช้พอลิเมอร์ผสม PEO/PVDF-HFP เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ สำหรับปรับปรุงอายุการใช้งานและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง
2. พิสูจน์เอกลักษณ์ของนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโตรไลต์ที่เตรียมได้
3. ศึกษาสัณฐานวิทยา โครงสร้างผลึก สมบัติทางความร้อนของนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโตรไลต์
4. ศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้าและการกระจายตัวไอออนของนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโตรไลต์
5. ศึกษาอัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้เตรียมเป็นพอลิเมอร์เจลอิเล็กโตรไลต์ ต่อประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง
6. ศึกษาชนิดและปริมาณของอนุภาคนาโน (TiO_2 , SiO_2) ที่ใช้ผสมในพอลิเมอร์เจลอิเล็กโตรไลต์ ต่อประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง
7. ศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนผสม ชนิดและปริมาณของอนุภาคนาโน สมบัติกายภาพต่างๆของนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโตรไลต์กับประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมชนิดไวแสง

บทที่ 2 ทฤษฎีและแนวคิด

2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-Sensitizer Solar Cells, DSSCs)

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงถึง 10% เป็นครั้งแรกโดยทีมวิจัยของศาสตราจารย์เกรทเซล^[1] อาจเรียกเซลล์แสงอาทิตย์ลักษณะแบบนี้ว่า “เซลล์แกรทเซล (Grätzel Cells)” ดังแสดงในรูปที่ 1 สำหรับประสิทธิภาพสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่มีการรายงานในปัจจุบันนี้อยู่ที่ประมาณ 11% ^[2-4] ขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพีเอ็นมีประสิทธิภาพรวมเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 15%



รูปที่ 1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงแบบเซลล์แกรทเซล

เซลล์แกรทเซล ประกอบด้วย^[2-4]

1. โฟโตอิเล็กโทรดหรือเวิร์กอิเลกโทรด (Photoelectrode or working electrode) มีชั้นไฟฟ้าโปร่งแสงที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์และโมเลกุลสีย้อมไวแสงยึดเกาะบนผิวของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์อีกชั้นหนึ่ง สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ ต้องมีแถบช่องว่างพลังงานกว้าง ($> 3\text{eV}$) มีลักษณะเป็นรูพรุนหรือมีพื้นที่ผิวมาก เพื่อสามารถดูดซับโมเลกุลสีย้อมไวแสงได้ดี สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ที่นิยมใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นต้น

โมเลกุลสีย้อมไวแสง (Dye-sensitizer) ทำหน้าที่ดูดกลืนแสงอาทิตย์แล้วถ่ายเทอิเล็กตรอนไปให้กับอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ ดังนั้นเพื่อให้เซลล์อาทิตย์มีประสิทธิภาพสูง โมเลกุลสีย้อมไวแสงต้องสามารถดูดกลืนแสงอาทิตย์ได้ตลอดความยาวคลื่นแสงวิสิเบิล จนถึงช่วงใกล้อินฟราเรด มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูง และต้องมีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโมเลกุลในสถานะกระตุ้น $E^0(S^*/S^+)$ เป็นลบมากกว่าค่าขอบเขตล่างของแถบการนำของโลหะออกไซด์ เพื่อให้เกิดการส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังสารกึ่งตัวนำได้ดี และต้องมีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโมเลกุลในสถานะพื้น $E^0(S/S^+)$ เป็นบวกมากพอที่จะสามารถรับคืนอิเล็กตรอนจากอิเล็กโทรไลต์ได้ ต้องมีเสถียรภาพสูง สามารถยึดเกาะบนผิวโลหะออกไซด์ได้ดี และควรมีราคาถูกและสังเคราะห์ง่าย

2. อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) หรือตัวส่งผ่านประจุบวก (Hole conductor) ทำหน้าที่ขดเซยอิเล็กตรอนให้แก่โมเลกุลสีย้อมไวแสง สมบัติที่ดีของอิเล็กโทรไลต์ คือ ต้องไม่ดูดกลืนแสงในช่วงแสงตามมองเห็น มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย อาจอยู่ในรูปของสารละลายเจล หรือของแข็ง สำหรับระบบอิเล็กโทรไลต์ที่นิยมใช้ คือ ระบบสารละลายไอโอดีน/ไตรไอโอดีน (I^-/I_3^-) โดย I^- มีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนแก่โมเลกุลสีย้อมไวแสงที่อยู่ในรูปของตัวออกซิไดซ์ที่สถานะพื้นได้ดี และขณะเดียวกัน I_3^- สามารถรับอิเล็กตรอนจากเคาน์เตอร์อิเล็กโทรไลต์ได้ดีเช่นกัน

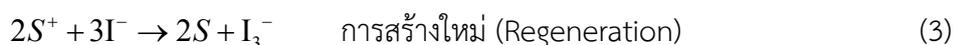
3. เคาน์เตอร์อิเล็กโทรด (Counter electrode, CE) ทำหน้าที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่มาจากวงจรภายนอกกลับคืนสู่อิเล็กโทรไลต์ ต้องมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดี มีพื้นที่ผิวมาก และมีค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัว (over voltage) สำหรับการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของสารประกอบอิเล็กโทรไลต์ต่ำ ตัวอย่างเคาน์เตอร์อิเล็กโทรดที่นิยมใช้ คือ โลหะแพลตินัม (Pt) และคาร์บอน (C)

กลไกการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงแสดงดังรูปที่ 2 เมื่อแสงอาทิตย์มาตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ (1) โมเลกุลสีย้อมไวแสงในสถานะพื้น (S) ที่เกาะยึดที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) จะดูดกลืนแสง แล้วมีพลังงานขึ้นไปอยู่ในสถานะเร้า (S^*) จากนั้น (2) โมเลกุลสีย้อมไวแสงในสถานะเร้า (S^*) จะส่งผ่านอิเล็กตรอนไปสู่แถบการนำของ TiO_2 จากนั้น (3) อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านจาก TiO_2 ไปยังขั้วแอโนดแล้วออกสู่วงจรภายนอกต่อไป สำหรับที่ขั้วแคโทดหรือเคาน์เตอร์อิเล็กโทรด (4) ไตรไอโอดีน (I_3^-) จะถูกรีดิวซ์ไปเป็นไอโอดีน (I^-) และ (5) โมเลกุลสีย้อมที่สูญเสียอิเล็กตรอน (S^+) จะถูกออกซิไดซ์โดยไอโอดีนกลับไปเป็นโมเลกุลสีย้อมไวแสงสถานะพื้น ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดสูงสุดตามทฤษฎี (theoretical open circuit voltage) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงคำนวณได้จากผลต่างระหว่างระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi energy, E_F) ของโลหะออกไซด์กับศักย์ไฟฟารีดักชันของอิเล็กโทรไลต์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงแสดงดังสมการ (1) ถึง (5)

ขั้วแอโนด



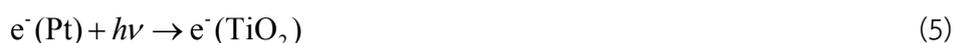
(2)

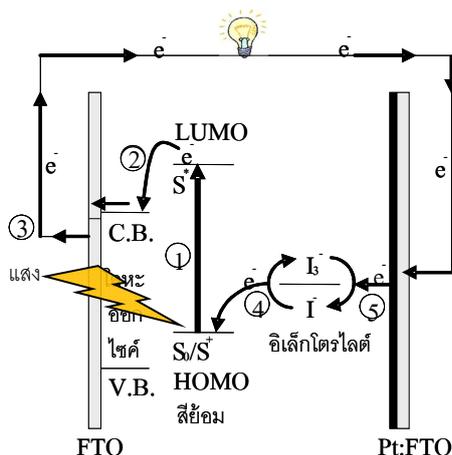


ขั้วแคโทด



ปฏิกิริยารวม

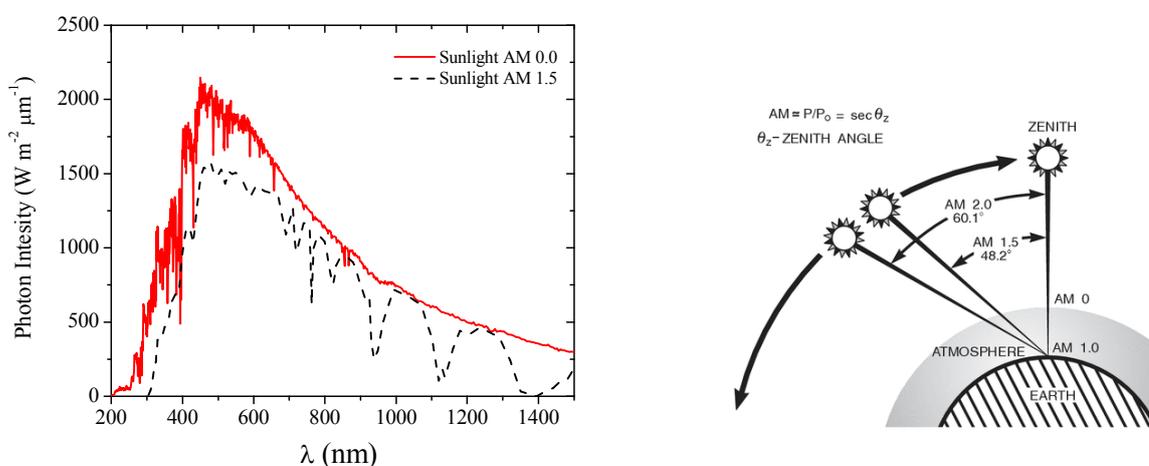




รูปที่ 2 กลไกการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

2.2 ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ [2-4]

ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ จะถูกกำหนดโดยความเหมาะสมของลักษณะของสเปกตรัมแสงอาทิตย์ และสมบัติขององค์ประกอบของตัวเซลล์แสงอาทิตย์เอง สำหรับสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ที่วัดได้บนพื้นโลกเปลี่ยนแปลงได้ตามเงื่อนไขต่างๆ เช่น ตำแหน่งบนพื้นโลก เวลา สภาพภูมิอากาศ และสภาพแวดล้อมอื่นๆ และเนื่องจากโลกมีชั้นบรรยากาศห่อหุ้ม ดังนั้นแสงอาทิตย์บางส่วนจึงถูกดูดกลืนไว้ก่อนที่จะเดินทางมาถึงผิวโลก โดยความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบถึงผิวโลก ณ ตำแหน่งต่างๆ สามารถอธิบายได้ในรูป Air mass (AM) โดยค่า $AM = \sec \theta_z$ เมื่อ θ_z คือมุมระหว่างแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบกับพื้นผิวโลก เช่น ในเวลา 12.00 นาฬิกา ดวงอาทิตย์อยู่ตรงศีรษะพอดี หรือมีค่า $\theta_z = 90^\circ$ ดังนั้นแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวโลก จะมี AM เท่ากับ 1.0 เป็นต้น สเปกตรัมของแสงอาทิตย์ ที่ AM 0 (แสงอาทิตย์ในอวกาศ) และ AM 1.5 แสดงดังรูปที่ 3 สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์จะศึกษาภายใต้สภาวะมาตรฐาน (Standard Testing Condition, STC) ที่ AM 1.5 ความเข้มแสงเท่ากับ 100 mW/cm^2



รูปที่ 3 สเปกตรัมความเข้มแสงอาทิตย์ ณ AM ต่างๆ (จาก <http://redc.nrel.gov/>)

เนื่องจากความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลก จะไม่เท่ากันตลอดทุกความยาวคลื่นแสง ทำให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จึงขึ้นกับความยาวคลื่นแสงด้วย ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (Incident Photon to Current Conversion Efficiency, IPCE) หรือบางครั้งเรียกว่า ประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก สามารถคำนวณได้จาก

$$IPCE(\lambda) = \frac{1240 \times J_{sc} (\text{A/cm}^2)}{\lambda(\text{nm}) \times I_{inc} (\text{W/cm}^2)} \quad (6)$$

เมื่อ J_{sc} คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่โพโตอิเล็กโทรด (short circuit current density)

$\lambda(\text{nm})$ คือ ความยาวคลื่นของแสงที่ตกกระทบ I_{inc} คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่โพโตอิเล็กโทรดที่สภาวะมาตรฐาน

ถ้าพื้นที่ของแสงความเข้ม P ที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับพื้นที่ของโพโตอิเล็กโทรด จะได้

$$IPCE(\lambda) = \frac{1240 \times J_{sc} (\text{A})}{\lambda(\text{nm}) \times P(\text{W})} \quad (7)$$

สำหรับประสิทธิภาพรวมของเซลล์แสงอาทิตย์ (η_{global}) สามารถคำนวณได้จาก

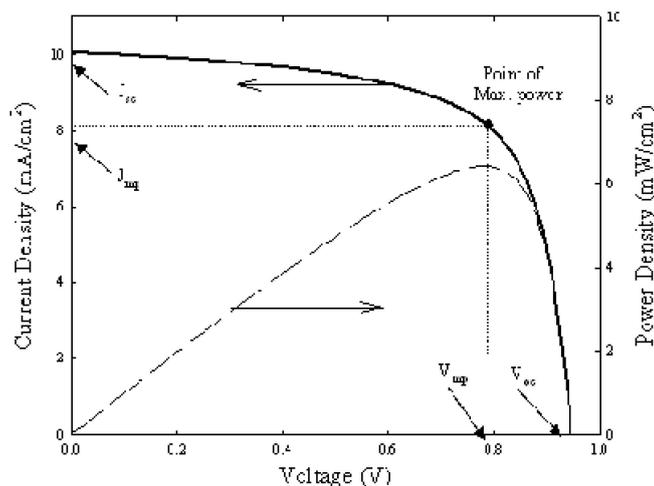
$$\eta_{global} = \frac{J_{ph} \times V_{oc} \times ff}{I_{inc}} \quad (8)$$

เมื่อ J_{ph} คือ ความหนาแน่นกระแสโฟโตอินทิกรัลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่โพโตอิเล็กโทรด (Integral photocurrent density), V_{oc} คือ แรงดันไฟฟ้าวงจรถัด ff คือ ค่าฟิลล์แฟคเตอร์ (Fill factor) คำนวณจาก

$$ff = \frac{P_{max}}{J_{sc} \times V_{oc}} \quad (9)$$

เมื่อ P_{max} คือ ค่ากำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ คำนวณจากพื้นที่ใต้เส้นกราฟความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (J-V curve) ดังรูปที่ 4

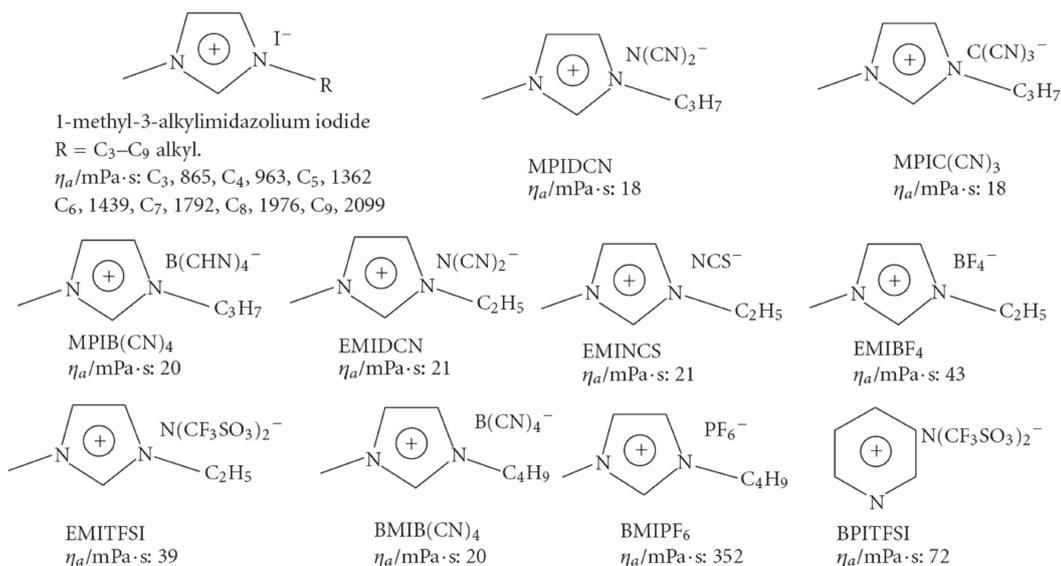
แนวทางการพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์ไฟฟ้าชนิดสีย้อมไวแสง สามารถทำได้หลายส่วน ได้แก่ การพัฒนาตัวแผ่นรองรับ อาจเปลี่ยนจากกระจกใสเป็นแผ่นพลาสติกหรือแผ่นโลหะบาง การปรับเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงจาก $\text{SnO}_2:\text{F}$ เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงชนิดอื่น การเปลี่ยนชนิดของแคโทดอิเล็กโทรด การพัฒนาโมเลกุลสีย้อมไวแสง การพัฒนาระบบอิเล็กโทรไลต์ การพัฒนาชั้นอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ หรือแม้แต่การออกแบบลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ แต่ในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาระบบอิเล็กโทรไลต์เป็นหลัก



รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (J-V curve) ของเซลล์แสงอาทิตย์

2.3 การพัฒนาระบบอิเล็กทรอนิกส์

ระยะเริ่มแรก นิยมใช้อิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นของเหลวเพราะเตรียมได้ง่าย โดยมีส่วนประกอบของคู่อิทธิกริยารีดอกซ์ของไอโอดีน/ไตรไอโอดีน (I^-/I_3^-) ที่ละลายอยู่ในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น อะซิโตน ไนโตร โพรพิโอนไนโตร เมทริกซ์อะซิโตนไนโตร และโพพิลีนคาร์บอนเนต เป็นต้น ในปัจจุบัน ระบบอิเล็กทรอนิกส์ของเหลวให้ประสิทธิภาพรวมสูงกว่า 11%^[2-4] เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการขนส่งของไอออนที่รวดเร็ว แต่มีข้อเสีย คือ ตัวทำละลายสารอินทรีย์ที่ใช้ระเหยง่าย ทำให้เกิดปัญหาการหายไปหรือรั่วซึมของสารละลายออกจากเซลล์แสงอาทิตย์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวม อายุการใช้งาน และความคงทนของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงลดลงอย่างมากและยังมีปัญหาในการปิดเซลล์ที่ดีด้วย ซึ่งถือว่าเป็นปัญหาที่สำคัญที่ต้องได้รับการแก้ไข ก่อนที่จะผลักดันเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงไปสู่การผลิตในเชิงพาณิชย์ต่อไป จากปัญหาดังกล่าวนำไปสู่ระบบอิเล็กทรอนิกส์ของเหลวไอออนิกที่มีจุดเดือดสูง มีการนำไฟฟ้าที่ดี มีความเสถียรต่อสารเคมีและความร้อนที่ดี และไม่ติดไฟ ตัวอย่างสารที่ใช้เป็นของเหลวไอออนิกแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ตัวอย่างสารที่นิยมใช้เป็นของเหลวไอออนิกซึ่งระบุความหนืดด้วย^[5]

สารที่นิยมใช้เป็นของเหลวไอออนิก คือ สารประกอบของ Imidazolium ถึงแม้ว่าระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่นี้จะสามารถแก้ไขปัญหาการระเหยได้ แต่ยังมีปัญหาการรั่วซึมอยู่ และให้กระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่ำกว่าระบบอิเล็กทรอนิกส์ของเหลว เพราะมีความหนืดสูงส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์ที่ได้ยังไม่สูงมากนัก (2-4%) ต่อมา มีรายงานว่า ระบบอิเล็กทรอนิกส์ 1-methyl-3-propylimidazolium iodide, 1-methyl-3-ethylimidazolium dicyanamide และ lithium iodide^[6,7] สามารถให้ประสิทธิภาพรวมสูงขึ้นเป็น 6.6% เมื่อนำไปประกอบรวมกับเซลล์ที่ใช้สีย้อมไวแสงกลุ่มสารประกอบเชิงซ้อนโลหะรูทีเนียม การเติมลิเทียมไอโอไดด์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพรวมอย่างมาก เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการฉีดอิเล็กตรอน (electron injection yield) และอัตราการคืนสภาพของสีย้อมไวแสง (dye regeneration rate) ทำให้อิเล็กทรอนิกส์นำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าระบบอิเล็กทรอนิกส์ของเหลวที่ไม่ระเหยส่วนใหญ่จะใช้ไอโอไดด์ แต่ประสิทธิภาพรวมที่ได้ก็ยังไม่สูงมากนัก ทำให้ยังมีการพัฒนาระบบอิเล็กทรอนิกส์อย่างต่อเนื่อง เช่น ระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ปราศจากตัวทำละลายของคู่ปฏิกิริยารีดอกซ์ SeCN⁻/(SeCN)^{3- [8]} ซึ่งมีความหนืดที่ต่ำกว่าระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ imidazolium iodide มาก (ประมาณ 45 เท่า) สามารถให้ประสิทธิภาพรวมสูงถึง 7.5-8.3% ภายใต้แสงอาทิตย์เทียม AM 1.5

เมื่อเร็วๆ นี้ นักวิจัยมุ่งให้ความสำคัญในการพัฒนาระบบพอลิเมอร์เจลอิเล็กทรอนิกส์เป็นอย่างมากเพื่อแก้ไขปัญหาของการรั่วซึมของอิเล็กทรอนิกส์ของเหลว เนื่องจากพอลิเมอร์เจลอิเล็กทรอนิกส์มีจุดเด่นสำคัญในเรื่องการนำพาไอออนที่สูงกว่าของไหลและสามารถแข็งตัวได้ง่ายจึงทำให้ช่วยแก้ปัญหการรั่วซึมของอิเล็กทรอนิกส์ของเหลวได้ โดยตัวพอลิเมอร์เจลอิเล็กทรอนิกส์มีโครงสร้างแบบร่างแหสามมิติ เพื่อเพิ่มผิวสัมผัสระหว่างอิเล็กทรอนิกส์แบบกึ่งแข็งและชั้นรูพรุนระดับนาโนของอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ นอกจากนี้สามารถขึ้นรูปได้ง่ายและไม่ขึ้นตอนซับซ้อน โดยพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ได้รับการศึกษาในการนำมาทำเป็นพอลิเมอร์เจลมีหลายชนิด เช่น poly(ethylene oxide) (PEO)^[9,10], poly(oligoethyleneglycol methacrylate)^[11], poly(acrylonitrile) (PAN)^[12], polymethyl methacrylate (PMMA)^[13], polyvinylidene fluoride (PVDF)^[14] และ poly(vinylidene fluoride-co-hexafluoro propylene) (PVDF-HFP)^[15] และ พวก chemically

cross-linked กับสารพลาสติกไซเซอร์^[16] ตารางที่ 1 แสดงชนิดต่างๆของเจลที่ใช้ในการทำพอลิเมอร์ เจลอิเล็กโทรไลต์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

ตารางที่ 1 Photovoltaic performance of quasi-solid-state DSC with different gelators and ionic liquid electrolytes. ^[5]

Composition	Gelator	Dye	$\eta/\%$
HMII, I ₂ et al.	Low-molecular-weight gelator	N719	5.01
I ₂ , MP11, NMBI	PVDF-HFP	Z907	5.3
I ₂ and NMBI in MP11	Silica Nanoparticles	Z907	6.1
I ₂ , GuSCN, NMBI in PM11/EMINCS (13:7v/v)	Low-molecular-weight gelator	K-19 DPA	6.3
EM1ml, I ₂ , Lil, TBP in EMITFSA	PVDF-HFP	N3	3.8 (45cm ²)
TMS-PM11/I ₂ in 10:1 ratio	Self-gelation	N3	3.2
I ₂ , Lil, TBP in MP11	Agarose	N719	2.93
I ₂ , Lil, TBP, DM11 in EMIDCA	Agarose	N719	3.89
EM11, Lil, I ₂ , and TBP in EMITFSI	Nanoparticles	N3	4.57~5.00

จากพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่กล่าวมาข้างต้นสำหรับการทำเป็นพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์นั้น พบว่า อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ PVDF-HFP เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์แสดงการนำพาไอออนที่สูงกว่าพอลิเมอร์อื่นๆ ณ อุณหภูมิห้อง และยังสามารถผสมรวมกับของเหลวไอออนิกได้อย่างดีด้วยซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้แล้วพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันฟลูออไรด์มีความเสถียรต่อ TiO₂ และ Pt ซึ่งทำให้พอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมได้สามารถใช้ได้เป็นระยะเวลาเวลานานมากขึ้น

นอกจากนี้แล้วก็ยังพบว่ามี การนำเอาสารอนุภาคนาโนของสารอนินทรีย์ (เช่น TiO₂, CNT, SiO₂, AlN, และ Clay เป็นต้น) ไปผสมกับพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์เพื่อสร้าง นาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์^[15] (ดูตารางที่ 2) ซึ่งการผสมอนุภาคนาโนเข้าไป ประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าของไอออนเพิ่มขึ้นอย่างมาก ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก (7.18%) ถึงแม้ว่ายังต่ำกว่าระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลว แต่นาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์เหล่านี้สามารถยืดอายุการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ให้ยาวนานมากขึ้น โดยประสิทธิภาพนั้นตกลงเพียงเล็กน้อย แม้จะใช้เวลาทดสอบนานกว่า 1000 ชั่วโมงก็ตาม ในขณะที่ระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลวนั้นลดลงกว่า 90% ในเวลาไม่นาน ด้วยเหตุนี้ทำให้นักวิจัยยังคงต้องพัฒนาระบบเจลอิเล็กโทรไลต์อย่างต่อเนื่องเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงเทียบเท่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอนินทรีย์ที่ใช้กันในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพัฒนาระบบนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ เนื่องจากให้ประสิทธิภาพสูง ราคาต่ำ และยังสามารถขึ้นรูปเซลล์แสงอาทิตย์ได้หลายหลายรูปร่าง เช่น เป็นแบบ flexible compact, เป็นแผ่นแบบชั้นๆ และเป็นแผ่นพลาสติกโค้งงอได้

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้นาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์^[17]

Electrolyte	V_{oc}/mV	$J_{sc}/mA\ cm^{-2}$	$\eta/\%$	FF
Ionic liquid	648	11.57	4.21	0.56
MWCNTs composite gel	706	12.02	4.79	0.57
CB composite gel	672	11.02	4.83	0.65
TiO ₂ composite gel	675	11.45	5.00	0.65
SWCNTs composite gel	695	10.78	4.60	0.62
CFs composite gel	688	11.11	4.97	0.65
Graphic composite gel	681	10.60	4.57	0.63

MWCNTs: multi-walled carbon nanotubes, CB: carbon black, SWCNTs: single-walled carbon nanotubes, CFs: carbon fibers.

2.4 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

การใช้พอลิเมอร์นำไฟฟ้าเป็นอิเล็กโทรไลต์ ในทางทฤษฎีได้มีการกล่าวถึงมานานแล้ว ตั้งแต่ปลายทศวรรษ 1960 แต่การนำมาประยุกต์ใช้ในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงเพิ่งเริ่มต้นได้ไม่นานนักในปี ค.ศ. 2001 Kubo และคณะ^[18] พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้พอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์ให้ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเท่ากับ 0.67V ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรเท่ากับ 12.8 mA/cm² และให้ประสิทธิภาพรวมภายใต้แสงอาทิตย์เทียม AM 1.5 เท่ากับ 5.91% และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ต่อมา Stathatos และคณะ^[19] ใช้ระบบอิเล็กโทรไลต์ ureasil precursor oligomer และ sulfolane รวมเข้ากับคูรีดอกซ์ I³/I⁻ เพื่อป้องกันการตกผลึกของ KI ทำให้เซลล์ใช้งานได้ยาวนานมากขึ้นและให้ประสิทธิภาพรวมมากกว่า 5% Usui และคณะ^[20] ได้ทำการเตรียม ionic nanocomposite gel electrolytes โดยได้ทำการผสมอนุภาคนาโนของ คาร์บอนนาโนทิวบ์ คาร์บอนแบล็ค ไทเทเนียมไดออกไซด์ ซิลิกา คาร์บอนไฟเบอร์ ลงไปผสมกับของเหลวไอออนิกชนิด 1-ethyle-3-methylimidazolium bis(trifluoromethylsulfonyl) imide (EMIm-TFSI) แม้ว่าการเติมอนุภาคนาโนลงไปทำให้เพิ่มความหนืดของอิเล็กโทรไลต์ แต่ก็ให้สมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้นด้วย จึงทำให้ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มสูงขึ้นอย่างมากและสูงมากกว่าระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลว (4.21%) ที่เตรียมด้วยวิธีการเดียวกัน โดยประสิทธิภาพรวมสูงสุดเท่ากับ 5.0% ในเซลล์ตัวอย่างที่ใช้ระบบอิเล็กโทรไลต์ที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ ขณะที่ระบบอนุภาคนาโนอื่นๆก็ให้ประสิทธิภาพสูงกว่า 4.60% Chatzivasiloglou และคณะ^[21] ได้ศึกษาอิทธิพลของโลหะไอออนและอนุภาคนาโนที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงซึ่งใช้อิเล็กโทรไลต์ระบบนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ โดยใช้ PEO เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ ผลการศึกษาพบว่าระบบอิเล็กโทรไลต์ PEO-TiO₂-PC(CsI⁻/I³⁺) ให้ประสิทธิภาพของเซลล์สูงที่สุด (2.87%) Huo และคณะ^[15] ได้ศึกษาการเตรียมนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ โดยใช้ PVDF-HFP เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์และอนุภาคนาโนเป็น TiO₂ จากการศึกษาพบว่า การเติม 10wt% TiO₂ ลงไปสามารถเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์จาก 5.72% ไปเป็น 7.18% ในขณะที่ประสิทธิภาพจากระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลวให้เพียงแค่ 7.01% เท่านั้น ซึ่งการเติมอนุภาคนาโนลงไป พบว่าเพิ่มสัมประสิทธิ์ของการแพร่ได้ดีมากยิ่งขึ้นจนเทียบเท่ากับระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลว ต่อมา Lee และคณะ^[22] ได้ศึกษาการผลการเติมอนุภาค SiO₂ ลงไปในพอลิเมอร์เมทริกซ์ PVDF-HFP เพื่อเตรียมเป็นนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ จากการศึกษา พบว่าการเติม 1wt% SiO₂ ลงไปเจลอิเล็กโทรไลต์ ให้ประสิทธิภาพเซลล์สูงที่สุดที่ 5.97% และยังให้ประสิทธิภาพ

คงทนนาน โดยใช้ไป 50 วัน เซลล์ก็ยังคงให้ประสิทธิภาพคงเหลือ 80% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมอนุภาคนาโนเข้าไปเจลอิเล็กโทรไลต์ สามารถเพิ่มอายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ และเมื่อเร็ว ๆ นี้ Huang และคณะ^[23] ได้ทำการศึกษาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมด้วย PVDF-HFP (MW=400,000) เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์และอนุภาคนาโนเป็นอลูมิเนียมไนไตรด์ (AlN) พบว่าสามารถให้ประสิทธิภาพของเซลล์สูงที่สุดเท่ากับ 5.27% ซึ่งสูงกว่าประสิทธิภาพของเซลล์ที่ใช้ระบบเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่ได้เติม AlN ลงไป (4.75%) และยังให้ประสิทธิภาพคงทนนานกว่าระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลวมาก

นอกจากนี้ Lim และคณะ [24] ได้ทำการศึกษาของแข็งเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เตรียมด้วย PEI-PEGDE (50:50 by weight) เป็นเจลพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ เทียบกับอิเล็กโทรไลต์ของเหลว พบว่าเจลพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ให้ค่ากระแสไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) ที่เพิ่มขึ้นและลดความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าลัดวงจร เมื่อเติมอนุภาคนาโน SiO_2 ลงไปในเจลพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ พบว่าสามารถให้ประสิทธิภาพของเซลล์สูงที่สุดเท่ากับ 6.24% ที่ 100 mV cm^{-2} ยังให้ประสิทธิภาพคงทนนาน และสามารถเพิ่มอายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ และต่อมา Kang และคณะ [25] ได้ทำการเตรียมเจลพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์โดยใช้ polyacrylonitrile (PAN) และ ammonium salt (PSQAS) ในสารละลายผสมระหว่าง เอทิลีนคาร์บอนเนต (EC) กับ โพรพิลีนคาร์บอนเนต (PC) เปรียบเทียบกับเตรียมอิเล็กโทรไลต์ของเหลวระหว่าง KI กับ PSQAS ในตัวทำละลาย EC : PC พบว่า เจลพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ให้ค่ากระแสไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) เท่ากับ 0.6 V. กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (J_{sc}) เท่ากับ 7.5 mA cm^{-2} ภายใต้อัตรา 60 mW cm^{-2} ค่า fill factors (FF) เท่ากับ 0.56 และสามารถให้ประสิทธิภาพของเซลล์สูงที่สุดเท่ากับ 4.40%

จากที่กล่าวมาข้างต้น โดยทั่วไปแล้ว พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงด้วยพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์จะให้ประสิทธิภาพของเซลล์ต่ำกว่าเซลล์ที่ใช้อิเล็กโทรไลต์ของเหลว สาเหตุมาจากการเคลื่อนที่ของไอออนต่ำกว่าของสปีชีส์ I^-/I^{3-} ในตัวกลางพอลิเมอร์ ซึ่งส่งผลกระทบต่อจลพลศาสตร์ของกระบวนการทั้งหมดของเซลล์รวมทั้งในกระบวนการของเซลล์ แม้จะยังให้ประสิทธิภาพที่ต่ำกว่า แต่ผลประโยชน์ของการแทนที่อิเล็กโทรไลต์ของเหลวให้ความคุ้มค่ามากกว่า ด้านการเพิ่มอายุการใช้งานที่ยาว โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเติมอนุภาคนาโนเข้าไปผสมพบว่าสามารถช่วยเพิ่มทั้งประสิทธิภาพและอายุการใช้งาน มากกว่าระบบเจลอิเล็กโทรไลต์ทั่วไป และอีกสิ่งหนึ่งคือ มีศักยภาพสูงในการพัฒนาพอลิเมอร์ที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ให้มีสภาพการนำไฟฟ้าที่สูงกว่า การปรับแต่งความเสถียรทางสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน และหาวัสดุตัวเติมชนิดใหม่ ก็จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ระบบอิเล็กโทรไลต์แบบพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์ให้สูงขึ้นไป เทียบเคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพีเอ็นของสารอินทรีย์ได้ จึงทำให้การวิจัยทางด้านนี้ยังคงเปิดกว้างอย่างมาก

บทที่ 3 การทดลอง

3.1 เครื่องมือ

ตารางที่ 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

Instruments	Model	Company
ARC Lamp Power Supply	69907	Newport
Atomic Force Microscope (AFM)	XE-100	PARK
Calibration Silicon Photodiode	818-UV	Newport
Differential Scanning Calorimeter (DSC)	DSC823°	Mettler Toledo
Drill Bit (1.0 mm)	ST-1.00	SPC multicomn
Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)	Z100	eDAQ Pty Ltd.
Electrometer	617 Programmable Electrometer	
Filter RD	FSR-KG5 Colored Glass	Newport
Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)	Spectrum RX 1	Perkin Elmer
1/8m Monochromator	74000	Newport
Photo-optic Filters	FPE 1250	UQG (OPTICS) LTD
Picoammeter	6485	Keithley
Potentiostat	EA 161	eDAQ, Australia
Scanning Electron Microscope (SEM)	JSM 5410-LV	JEOL
Source Meter Unit	2400	Keithley
Standard Silicon Photodiode	BS-520	
150W Sun simulator (Xe-Lamp)	9640	Newport
Thermal Gravimetric Analysis (TGA)	TG8120	Rigaku
150W Xe OF	6255	Newport
X-ray Diffractometer (XRD)	Philips X 'pert MPD	Philips

3.2 วัสดุ (Materials)

ตารางที่ 3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

Materials	Specific properties	Company
Fluorine doped Tin oxide (FTO-glass TEC15)	Thickness: 3.2 mm; $\rho \sim 15 \Omega/\text{sq}$	Pilkington
Scattering titanium paste (TiO ₂ , PST-400C)	Particle size ~400nm	JGC catalysts and Chemical Ltd
Silver Paint	High Purity	SPI supplies
Surlyn; Hot melt film	Thickness: 30 μm	Solaronix S.A.
Tape adhesive Copper	Thickness: 0.088 mm	3M
Titanium(IV) oxide	titanium nanoxide D/SP	Solaronix
Transparent titanium paste (TiO ₂ , PST-18NR)	Particle size ~20nm	JGC catalysts and Chemical Ltd

3.3 สารเคมี (Chemicals)

ตารางที่ 3 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

Chemicals	Grade	Company
$\begin{array}{c} \text{CN} \\ \\ \text{(-CH}_2\text{-CH-)}_n \end{array}$ Poly(acrylonitrile) (PAN, ($\text{(-CH}_2\text{-CH-)}_n$)		Aldrich
$\begin{array}{c} \text{OH} \\ \\ \text{(-CH}_2\text{-CH-)}_n \end{array}$ Poly(vinyl alcohol) (PVA, ($\text{(-CH}_2\text{-CH-)}_n$)		Acros Organics
Poly(vinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene (PVDF-HFP, ($\text{(-CH}_2\text{-CF}_2\text{-)}_n \text{(-CF}_2\text{-CF(CF}_3\text{)-)}_n$)		Aldrich
Acetic acid (CH ₃ CO ₂ H)	Glacial for analysis	CARLO ERBA
Acetonitrile (CH ₃ CN)	ACS-For analysis	CARLO ERBA
Acetylactone (2,4-pentane dione, C ₅ H ₈ O ₂)	99.5%	CARLO ERBA
1, 2-dimethyl-3-propylimidazolium iodide (lonLic DMPII, C ₈ H ₁₅ N ₂ I)	R&D	Solaronix
Ethanol (C ₂ H ₆ O)	ACS-for analysis	CARLO ERBA
Guanidinium Thiocyanate (GuNCS, C ₂ H ₆ N ₄ S)	99%	Acros Organics
Hydrogen hexachloro platenate (H ₂ PtCl ₆)	40% Pt	Acros
Iodine (I ₂)	ACS-for analysis	CARLO ERBA
Isopropanol (C ₃ H ₈ O)	ACS-for analysis	CARLO ERBA

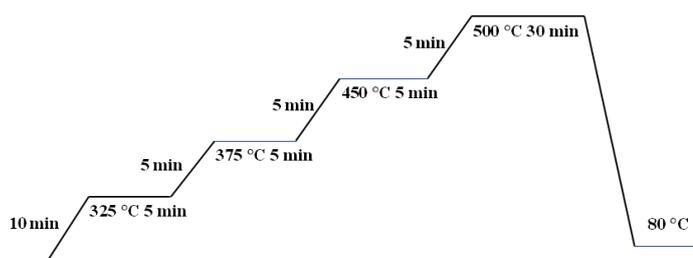
3.4 การศึกษาจำนวนชั้นที่เหมาะสมของฟิล์มบางของไทเทเนียม(IV) ไดออกไซด์

ศึกษาการเตรียมชั้นโลหะออกไซด์และปรับปรุงผิวหน้าของชั้นโลหะออกไซด์บนกระจกไฟฟ้า โปร่งแสง FTO (working electrode) เพื่อหาจำนวนของชั้นโลหะออกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับนำไปศึกษา กับระบบอิเล็กโทรไลต์แบบนาโนคอมพอสิตเจล

นำกระจกนำไฟฟ้า (FTO) ตัดให้มีขนาด $1.3 \times 2.0 \text{ cm}^2$ แล้วล้างให้สะอาด จากนั้นนำ สารละลายคอลลอยด์ของไทเทเนียม(IV) ไดออกไซด์ มาเคลือบลงบนกระจกโดยใช้เทคนิคสกรีนปริ้นท์ ซึ่ง active area บนกระจกจะกำหนดให้มีขนาด 0.25 cm^2 ทำการสกรีนเป็นจำนวน 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, และ 12L ชั้น โดยใช้ TiO_2 paste ชนิด Transparent PSI-18NR โดยผ่านบล็อกสกรีน T225

ส่วนกรณีการเตรียมชั้นโลหะออกไซด์ที่มีการเติมชั้นการกระเจิงแสงเข้าไปด้วย เขียนแทนด้วย 4+2L, 6+2L ชั้น โดยตัวเลขด้านหน้า หมายถึง จำนวนชั้นของการสกรีนพื้นผิวที่ใช้ TiO_2 paste ชนิด Transparent PSI-18NR โดยผ่านบล็อกสกรีน T225 ส่วนหมายเลขด้านหลัง หมายถึง จำนวนชั้นของการสกรีนพื้นผิวที่ใช้ TiO_2 paste ชนิด Light scattering No. PST-400c โดยผ่านบล็อกสกรีน T120 ตัวอย่างเช่น 4+2L แสดงว่า ประกอบด้วย TiO_2 paste ชนิด Transparent PSI-18NR จำนวน 4L ชั้น และ สกรีนปิดทับด้วย TiO_2 paste ชนิด Light scattering No. PST-400c จำนวน 2L ชั้น ในแต่ละชั้น สกรีนนั้นจะต้องทิ้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้องนาน 5 นาทีก่อน จากนั้นนำไปเผาที่ 125 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที แล้วค่อยนำมากรีนชั้นถัดไป

เมื่อได้จำนวนชั้นตามต้องการแล้วนำไปเผาในเตาเผาอากาศ ตามขั้นตอนดังรูปที่ 3.1 แล้วปล่อยให้เย็นตัวลง แล้วนำไปแช่ในสารละลาย Titanium tetrachloride (TiCl_4) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำ DI และ Ethanol แล้วปล่อยให้แห้ง แล้วนำไปเผาตามขั้นตอน ดังรูปที่ 3.1 ซ้ำอีกครั้ง เมื่อเผาเสร็จแล้ว นำกระจกที่ได้ ไปแช่ในสีย้อมไวแสง N719 ความเข้มข้น $3 \times 10^{-3} \text{ M}$ จำนวน 100 ml โดยใช้ Ethanol เป็นตัวทำละลาย เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมา ประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยใช้อิเล็กโทรไลต์ของเหลวในการทดสอบหา ประสิทธิภาพเครื่องจำลองแสงความเข้ม 1.5 AM



รูปที่ 3.1 ลำดับขั้นการเผาฟิล์มบางของไทเทเนียม(IV) ไดออกไซด์บนกระจก

3.5 การเตรียมอิเล็กโทรไลต์

3.5.1 อิเล็กโทรไลต์ของเหลว

นำ 0.1 M LiI , 0.05 M I_2 , 0.4 M TBP และ 1.0 M PMIMBr มาละลายในตัวทำละลายที่เป็นของผสมระหว่าง GBL:NMP:ACN จำนวน 28 ml (อัตราส่วน 7:7:14 ml) กวนสารละลายให้เป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งจะต้องชั่ง LiI, I_2 , Py และ PMIMBr มาจำนวน 0.3640, 0.3528, 1.512 และ 0.5320 กรัม ตามลำดับ

3.5.2 อิเล็กโทรไลต์ของเหลวไอออนิก (Ionic liquid electrolyte, ILE)

ในการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบหาระบบของเหลวไอออนิกที่เหมาะสม โดยศึกษาระบบอิเล็กโทรไลต์จำนวนสองชนิด คือชนิด ILE A และชนิด ILE B

สำหรับอิเล็กโทรไลต์ชนิด ILE A เตรียมโดยนำของผสมระหว่าง 0.6 M PM(II) และ 0.45 M MBI มาละลายในตัวทำละลาย 3-methoxypropionitrile เพียงชนิดเดียว ส่วนอิเล็กโทรไลต์ชนิด ILE B เตรียมโดยนำของผสมละลายในตัวทำละลายของผสมระหว่าง 3-methoxypropionitrile กับ Vareonitrile ในอัตราส่วนอัตราส่วน 85:15 %v/v โดยกวนสารละลายให้เป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [21, 30]

ตารางที่ 3.3 ปริมาณการเตรียมอิเล็กโทรไลต์ของเหลวไอออนิก (ILE ชนิด A, ILE ชนิด B)

สารเคมี	ปริมาณการเตรียม (กรัม/มิลลิลิตร)	
	ILE A	ILE B
PM (II) (g)	0.1185	0.1190
MBI (g)	0.3059	0.3032
3-methoxypropionitrile (ml)	2.00	1.70
Vareonitrile (ml)	-	0.30

3.5.3 พอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์

เตรียมพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์ของ PEO (MW. 1,000,000 g/mol) และ PVDF-HFP (MW. 10,000 g/mol) ที่ความเข้มข้น 5 และ 10 wt% ปริมาตร 2.0 ml โดยทำการละลายพอลิเมอร์ PEO และ PVDF-HFP ทั้งสองความเข้มข้นด้วยสารอิเล็กโทรไลต์ของเหลว (ILE) จำนวน 2.0 ml แล้วกวนสารละลายให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 ชั่วโมง ก่อนนำไปใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง นอกจากนี้ยังได้เตรียมพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์ผสม PEO/PVDF-HFP จำนวน 3 อัตราส่วนโดยน้ำหนักดังนี้ 2:8, 5:5, และ 8:2 ตามลำดับ ปริมาณพอลิเมอร์ที่ใช้ในการเตรียมอิเล็กโทรไลต์แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ปริมาณพอลิเมอร์ที่ใช้เตรียมพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ในตัวทำละลาย 2 ml

Sample names	ความเข้มข้น (wt%)	น้ำหนักรวมที่ใช้ (g)	
		PVDF-HFP	PEO
PV1	5	0.10	-
PE1	5	-	0.10
PV2	10	0.20	-
PE2	10	-	0.20
PV2:PE2 a (2:8)	10	0.04	0.16
PV2:PE2 b (5:5)	10	0.10	0.10
PV2:PE2 c (8:2)	10	0.16	0.04

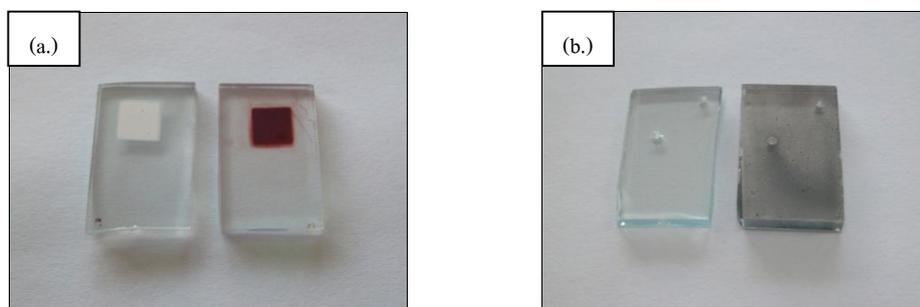
3.5.4 นาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์

นำพอลิเมอร์ผสม PVDF-HFP/PEO อิเล็กโทรไลต์ อัตราส่วน 2:8 ความเข้มข้น 10 wt% ปริมาณ 2.0 กรัม จำนวน 8 ตัวอย่าง มาเติม TiO_2 และ SiO_2 nanoparticles ที่ความเข้มข้น 0.5, 1, 2, และ 5 wt% ตามลำดับ แล้วเติมไอออนิกอิเล็กโทรไลต์ของเหลวชนิด ILE B ตัวอย่างละ 2.0 ml กวนให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 ชั่วโมง

3.6 การเตรียมฟิล์มบางของไทเทเนียม(IV) ไดออกไซด์และฟิล์มบางของแพลททินัม

รูปที่ 3.2 (a) แสดงรูปฟิล์มบางของไทเทเนียม(IV) ไดออกไซด์ที่เตรียมได้และหลังจุ่มในสารละลายสีย้อม N719 ซึ่งการเตรียมขั้วแอโนดก็เตรียมวิธีการเดียวกับข้อ 3.4 ซึ่งจะเห็นว่าฟิล์มบางของไทเทเนียม(IV) ไดออกไซด์ที่เตรียมได้เป็นสีขาวนวล และเมื่อนำไปจุ่มในสีย้อมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ฟิล์มบางเป็นสีม่วงแดงดังรูป

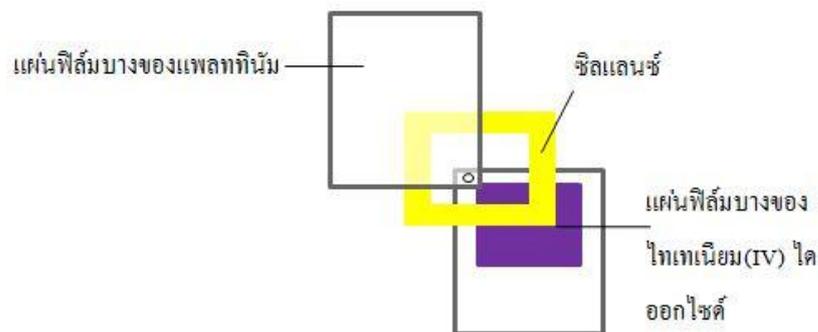
สำหรับการเตรียมขั้วไฟฟ้าแคโทดจากชั้นแพลททินัมนั้น ทำโดยนำกระจกนำไฟฟ้า (FTO) มาตัดให้มีขนาดเดียวกันกับกระจกที่ใช้เตรียมขั้วแอโนด ($1.3 \times 2.0 \text{ cm}^2$) แล้วล้างให้สะอาดด้วยน้ำกลั่น จากนั้นหยดสารละลาย Potassiumhexachloroplatinate ลงบนกระจกที่วางในแนวระนาบเอียงทำมุมประมาณ 15° ปล่อยให้สารละลายไหลจากด้านบนของกระจกให้ทั่วแผ่น ทิ้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 385°C เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งจะได้ฟิล์มบางที่สังเคราะห์ได้เป็นสีดำ แต่อาจมองไม่เห็นในบางส่วน เนื่องจากแพลททินัมที่สังเคราะห์ได้บนฐานกระจกเกิดขึ้นน้อย และยังพบว่าชั้นฟิล์มบางแพลททินัมที่เตรียมได้บนกระจกมีความหนาไม่สม่ำเสมอ ดังรูปที่ 3.2 (b)



รูปที่ 3.2 : (a.) ฟิล์มบางของไทเทเนียม(IV) ไดออกไซด์ก่อนและหลังจุ่มในสีย้อม N719 และ (b.) ฟิล์มบางของแพลททินัมก่อนและหลังเผา

3.7 การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSC Fabrication)

นำกระจกที่แช่ในสีย้อมไวแสงเป็นเวลา 24 ชั่วโมง มาล้างด้วย ethanol แล้วปล่อยให้แห้งในอากาศ จากนั้นตัดซิลแลนซ์เป็นช่อง วางลงบนแผ่นฟิล์มบางของไทเทเนียม(IV) ไดออกไซด์ แล้วนำแผ่นฟิล์มบางของแพลททินัมมาประกบปิด ดังแสดงในรูปที่ 3.3 แล้วทำการฉีดยาละลายอิเล็กโทรไลต์เข้าไปในเซลล์ พร้อมทั้งทำการปิดเซลล์ด้วยการให้ความร้อนที่ ประมาณ 80°C จากนั้นทำการต่อขั้วเข้ากับเซลล์ และนำเซลล์ที่เตรียมได้ไปวัดประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าต่อไป



รูปที่ 3.3 การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

สำหรับอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้เติมในเซลล์แสงอาทิตย์ ประกอบด้วย อิเล็กโทรไลต์ของเหลว พอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ PVDF-HFP และ PEO ความเข้มข้น 5 และ 10 wt% พอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์ผสมและพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์ผสมอัตราส่วนต่างๆ ที่เติม TiO_2 , SiO_2 nanoparticles 0.5, 1, 2 และ 5 wt% ตามลำดับ

3.8 การพิสูจน์เอกลักษณ์และวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

3.8.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์การเกาะติดของชั้นไทเทเนียม(IV) ไดออกไซด์โดยใช้เทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)

วิเคราะห์การเกาะติดของไทเทเนียม(IV) ไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้าที่เตรียมได้ ซึ่งมีชั้นของไทเทเนียม(IV) ไดออกไซด์แตกต่างกัน ตั้งแต่ 1L จนถึง 12L ชั้นและระบบ 4+2L และ 6+2L ชั้น จากนั้นการศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางของไทเทเนียม (IV) ไดออกไซด์ เพื่อใช้เตรียมเป็นขั้วไฟฟ้าทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงทั้งที่เป็นโครงสร้างจุลภาคพื้นที่ผิวและความหนาฟิล์มบางของไทเทเนียม(IV) ไดออกไซด์

3.8.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียม(IV) ไดออกไซด์ ด้วยเทคนิค X-ray diffraction spectrometer (XRD)

วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD วัดการเลี้ยวเบนในช่วง $10^\circ \leq 2\theta \leq 45^\circ$, Step scan 0.02° และ Counting time = 0.05 s/step โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็น $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda_{\text{CuK}\alpha 1} = 1.546 \text{ \AA}$) ที่กำลังไฟฟ้า 1,400 วัตต์ กระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 35 mA และ 40 kV โดยศึกษาโครงสร้างผลึกอัญรูปต่างๆ ที่เป็นไปได้ของ TiO_2 ทั้งรูปอะนาเทสและรูไทน์ ตั้งแต่ 1L ชั้นจนถึง 12L, 4+2L, 6+2L ชั้นของฟิล์มบางของไทเทเนียม(IV) ไดออกไซด์

3.8.3 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์ด้วยเทคนิค DSC และ TGA

ทดสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimetry, DSC) ยี่ห้อ METTLER TOLEDO รุ่น DSC 823[°] โดยการชั่งน้ำหนักสารตัวอย่างประมาณ 3-5 mg ในช่วงอุณหภูมิ 25-250 °C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ที่อัตราการให้ความร้อน 10

°C/min และทดสอบสมบัติความเสถียรทางความร้อนด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลซิส (Thermogravimetric Analysis, TGA) ยี่ห้อ RIGAKU รุ่น Thermoplus TG 8120 โดยการชั่งน้ำหนักสารตัวอย่างประมาณ 3-5 mg ในช่วงอุณหภูมิ 25-650 °C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ที่อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min

3.8.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์ด้วยเทคนิค FT-IR

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมได้ โดยใช้เครื่อง FT-IR spectrometer รุ่น Spectrum RXI ในช่วงเลขคลื่น 4,000 ถึง 400 cm^{-1} ทำการสแกน 16 ครั้ง โดยใช้ค่า Resolution เท่ากับ 4.0 cm^{-1} โดยเตรียมตัวอย่างในลักษณะฟิล์มบาง

3.8.5 การวัด I-V curves ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

ทำการวัด I-V curves ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยใช้อิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมขึ้นด้วยเครื่อง sun simulator ภายใต้ความเข้มแสงจำลอง 100 mW/cm^2 (AM 1.5) ข้อมูลถูกบันทึกผ่านโดย COEV I-V Solar Cell Test Version (ซอฟต์แวร์สำหรับวัดสมบัติกระแส-ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง) แล้วทำการแปรผลให้ค่าประสิทธิภาพ (η) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เตรียมได้ ในการวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงในโครงการวิจัยนี้จะทำการวัดจากทั้งหมด 4 เซลล์ แล้วรายงานค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นค่าเฉลี่ยพร้อมทั้งค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานด้วย

3.8.6 การศึกษาประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (Incident Photon to Current Conversion Efficiency, IPCE)

ศึกษาประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสง โดยศึกษาตั้งแต่ 1L ขึ้น จนถึง 12L, 4+2L, 6+2L ชั้นของฟิล์มบางของไทเทเนียม (IV) ไดออกไซด์และ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ขึ้นรูปโดยใช้ระบบอิเล็กโทรไลต์นาโนคอมพอสิตเจล โดยวัดด้วยเครื่องวัด IPCE (a 150W Xenon arc lamp (6255 Newport) กรองตัว 1/8m Monochromator, 74000 Newport))

3.8.7 การศึกษาการแพร่ของไอออนด้วยเทคนิค Electrophoto impedance Spectroscopy (EIS)

ทำการศึกษาการขนส่งไอออนและอิเล็กตรอนในระบบอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ โดยวัดภายใต้ความเข้มแสง 1 sun illumination และ open-circuit = 0.6 - 0.7 V และช่วง frequency range จาก 10^{-5} - 10^1 Hz ที่ amplitude = 10 mV จากนั้นข้อมูลที่ได้นำไปวิเคราะห์ต่อด้วยโปรแกรม ZIVE ZMAN 2.2

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์

ในการศึกษาวิจัยนี้มีเป้าหมายในการศึกษาถึงองค์ประกอบต่างๆที่จะช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSCs) ดังนั้นจึงได้มองเห็นถึงความสำคัญในการพัฒนาขั้วไฟฟ้าแอโนดหรือการพัฒนาชั้นโลหะออกไซด์ที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าใน DSSCs ด้วย และศึกษาพัฒนาการเตรียมระบบอิเล็กโทรไลต์ที่ให้การส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ดีและสามารถทำให้เซลล์ DSSCs สามารถใช้งานได้ยาวนานอีกด้วย ด้วยเหตุนี้ในบทที่ 4 นี้ จึงจะเสนอผลการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน คือ 4.1 การศึกษาพัฒนาการเตรียมชั้นโลหะออกไซด์ TiO_2 ที่เหมาะสม 4.2 การศึกษาการเตรียมนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมตลอดจนปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง และ 4.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์และการวิเคราะห์สมบัติต่างๆของพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมได้

4.1 การศึกษาการเตรียมชั้นโลหะออกไซด์ TiO_2 ที่เหมาะสม

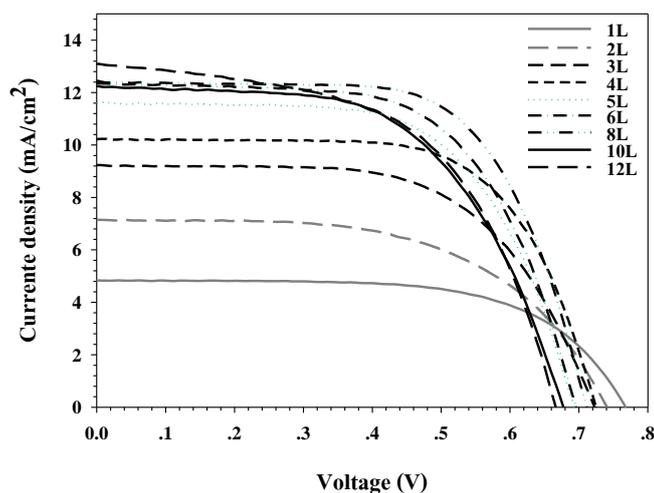
4.1.1 การศึกษาจำนวนชั้นฟิล์มบาง TiO_2 โดยเทคนิค screen printing

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงชั้นโลหะออกไซด์บนกระจกไฟฟ้าโปร่งแสง FTO (working electrode) เพื่อหาจำนวนของชั้นโลหะออกไซด์ที่เหมาะสม โดยขั้นแรกจะหาจำนวนชั้นที่เหมาะสมของฟิล์มบาง TiO_2 paste ชนิดโปร่งแสง (Transparent PSI-18NR, 20 nm) เดี่ยวๆ และชั้นที่สอง จะทำการปรับปรุงผิวหน้าของชั้น TiO_2 paste ชนิดโปร่งแสงด้วย TiO_2 paste ชนิดกระเจิงแสง (scattering, 400 nm) เพื่อให้ได้ชั้นโลหะออกไซด์ที่สามารถส่งผ่านกระแสที่เหมาะสมที่สุด เพื่อนำไปศึกษาที่ระบบนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ต่อไป โดยขั้นแรก ได้เตรียมชั้นฟิล์มบางจำนวนตั้งแต่ 1L-12L ชั้น โดยใช้ TiO_2 paste ชนิดโปร่งแสงแล้วนำไปขึ้นรูปเป็นเซลล์ DSSCs โดยใช้สีย้อมมาตรฐาน N719 และใช้อิเล็กโทรไลต์ของเหลว เป็นตัวทดสอบประสิทธิภาพหาจำนวนชั้นฟิล์มบางที่เหมาะสมที่เตรียมได้

อิทธิพลของจำนวนชั้นฟิล์มบางของ TiO_2 ต่อ I-V curves ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSCs) แสดงดังรูปที่ 4.1 จากรูปจะเห็นว่าความหนาแน่นกระแส (photocurrent density, J_{sc}) ของ DSSCs เพิ่มขึ้นกับจำนวนชั้นฟิล์มบางที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะเมื่อจำนวนชั้นฟิล์มบางมากขึ้น โมเลกุลของสีย้อมก็จะเกาะติดได้มากขึ้นทำให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสสูงตามไปด้วย สำหรับค่าประสิทธิภาพของเซลล์ DSSCs รูปที่ 4.2 และ 4.3 และค่าสมบัติอื่นๆ แสดงดังตารางที่ 4.1 จากรูปที่ 4.2 จะพบว่า เมื่อจำนวนชั้นของ TiO_2 เพิ่มขึ้น ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมได้ (PCE, $\eta\%$) ก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย โดยค่า PCE ของเซลล์สูงสุดได้เท่ากับ 5.79% ซึ่งพบในเซลล์ DSSC ที่ขึ้นรูปด้วยชั้นฟิล์มบาง TiO_2 จำนวน 8 ชั้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นฟิล์มบาง TiO_2 ขึ้นไปเป็น 10 และ 12 ชั้น พบว่าค่าประสิทธิภาพของเซลล์ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการแตกของพื้นผิว TiO_2 ดังรูปที่ (รูปที่ 4.5)

การเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์มบาง TiO_2 จะทำให้การกักเก็บแสงอาทิตย์ได้มากขึ้น เนื่องจากมีโมเลกุลของสีย้อมไปเกาะติดบนอนุภาค TiO_2 ได้มากขึ้นนั่นเอง จึงทำให้ค่า J_{sc} เพิ่มขึ้น และค่า V_{oc} ของเซลล์ลดลง เนื่องจากเกิดการรวมตัว (recombination) มากขึ้นในชั้นฟิล์มบางที่หนามากขึ้น^[26-27] อย่างไรก็ตาม การลดลงของอนุภาคพร้อมๆกับการเพิ่มขึ้นของจำนวนขอบเขตเม็ดขนาดใหญ่ (grain boundaries) จะนำไปสู่การรวมตัวกันที่มากขึ้นและทำให้ V_{oc} ลดลง^[27] (ดูรูปที่ 4.3)

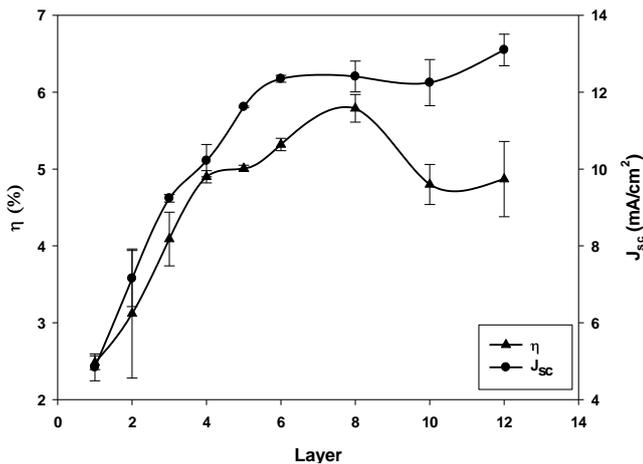
รูปที่ 4.4 แสดงค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้า (IPCE) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ขึ้นรูปด้วยชั้นฟิล์มบาง TiO_2 จำนวนหลายๆชั้น จากรูปจะเห็นว่า ค่า IPCE ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนชั้นของ TiO_2 จนถึงจำนวน 8 ชั้น (80%) แล้วจะมีแนวโน้มไม่เพิ่มขึ้นมากนักหลังจากนี้ ซึ่งสอดคล้องกับค่าประสิทธิภาพของเซลล์อันเนื่องมาจากการแตกของผิวหน้าของชั้น TiO_2 ทำให้การส่งผ่านอิเล็กตรอนไม่ต่อเนื่องนั่นเอง



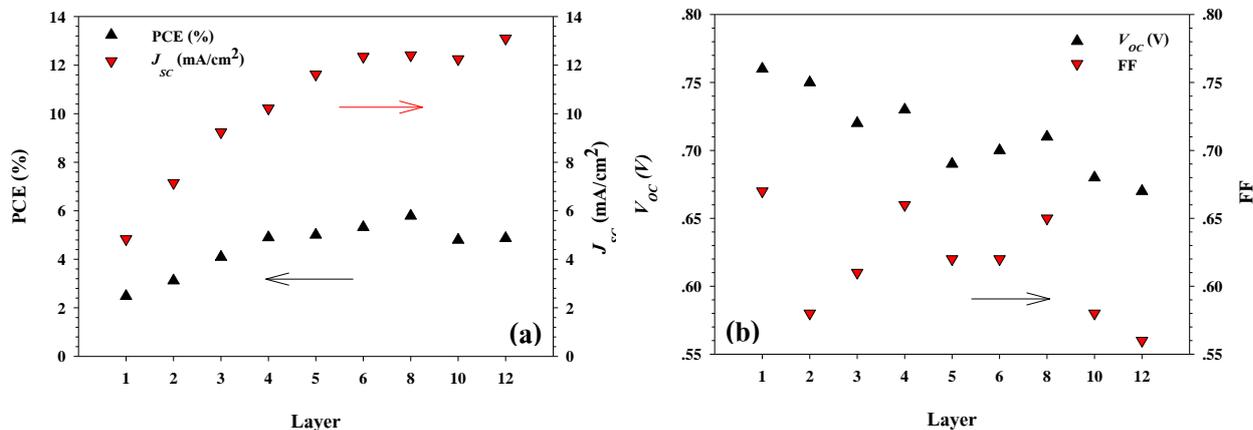
รูปที่ 4.1 Current-voltage characteristics of DSSCs with working electrode (WE) of different layers, measured at 100 mW/cm_2 illumination.

ตารางที่ 4.1 Photovoltaic performance parameters of DSSCs prepared with WE of different layers.

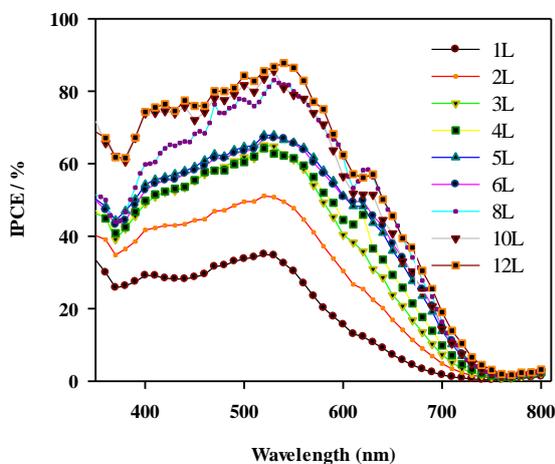
Sample (Layer)	PCE (%)	I_{sc} (mA)	J_{sc} (mA/cm^2)	V_{oc} (V)	FF
1	2.48 ± 0.09	0.77 ± 0.06	4.84 ± 0.35	0.76 ± 0.02	0.67 ± 0.06
2	3.12 ± 0.84	1.14 ± 0.12	7.15 ± 0.73	0.75 ± 0.02	0.58 ± 0.11
3	4.09 ± 0.35	1.48 ± 0.02	9.24 ± 0.10	0.72 ± 0.01	0.61 ± 0.05
4	4.90 ± 0.08	1.63 ± 0.07	10.22 ± 0.42	0.73 ± 0.01	0.66 ± 0.02
5	5.01 ± 0.04	1.86 ± 0.00	11.62 ± 0.02	0.69 ± 0.00	0.62 ± 0.01
6	5.32 ± 0.08	1.98 ± 0.01	12.35 ± 0.09	0.70 ± 0.00	0.62 ± 0.01
8	5.79 ± 0.18	1.99 ± 0.06	12.41 ± 0.40	0.71 ± 0.01	0.65 ± 0.01
10	4.80 ± 0.26	1.96 ± 0.10	12.25 ± 0.60	0.68 ± 0.00	0.58 ± 0.05
12	4.87 ± 0.49	2.10 ± 0.06	13.10 ± 0.41	0.67 ± 0.02	0.56 ± 0.04



รูปที่ 4.2 Photovoltaic performance efficiency (PCE, $\eta\%$) and J_{sc} of DSSCs prepared with WE of different layers at 144 h.



รูปที่ 4.3 Photovoltaic performance parameters of DSSCs: (a) PCE (%) and J_{sc} (mA/cm²) and (b) V_{oc} (V) and FF with WE of various layers at 144 h.



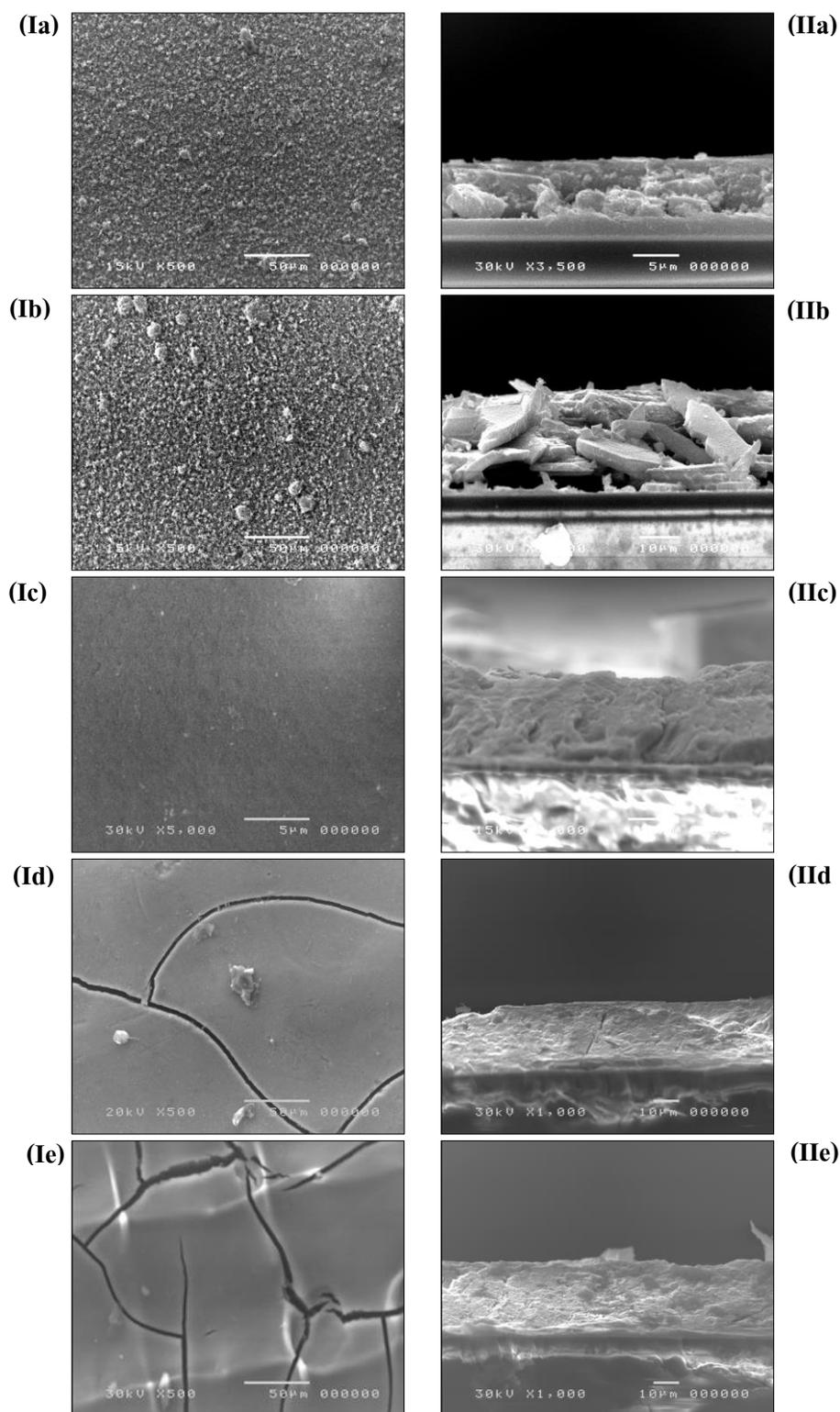
รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้า (IPCE) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เตรียมด้วยชั้นฟิล์มบาง TiO₂ ที่ความหนาต่างๆ

สำหรับสัณฐานวิทยาของพื้นผิวและภาคตัดขวางของชั้นฟิล์มบาง TiO_2 แสดงดังรูปที่ 4.5 และข้อมูลความหนาของแต่ละชั้นแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งจะเห็นว่าความหนาของฟิล์มบาง TiO_2 จำนวน 1 ชั้นจะประมาณ $1.85 \mu\text{m}$ และความหนาของฟิล์มบาง TiO_2 จะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆตามจำนวนชั้นของ TiO_2 ความขรุขระของพื้นผิว TiO_2 จะเพิ่มขึ้นตามความหนาของชั้นฟิล์มบาง TiO_2 ด้วย (ดูรูปที่ 4.5) การแตกของพื้นผิวหน้าของ TiO_2 จะเริ่มเกิดขึ้นในจำนวนชั้นที่ 10 เป็นต้นไป (ดังรูปที่ 4.5) การแตกของของพื้นผิวหน้าของชั้นฟิล์มบางทำให้เกิดผลกระทบ 2 ประการต่อเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง คือ 1). การยึดติดระหว่างชั้นฟิล์มบาง TiO_2 กับกระจกนำไฟฟ้าลดลง และ 2). เนื่องจากหมู่ฟังก์ชัน $-\text{COOH}$ ของอนุภาคสีย้อมที่จะต้องเกิดอันตรกิริยากับหมู่ฟังก์ชัน $-\text{OH}$ ของ TiO_2 โมเลกุลของสีย้อมที่ไม่เชื่อมต่อในรอยแตกจะสูญเสียไปในอิเล็กโตรไลต์ ซึ่งจะทำให้จำนวนอิเล็กตรอนที่ส่งผ่านไปยังชั้นสารกึ่งตัวนำลดลง^[28-29] ดังนั้น ในการศึกษานี้จึงสามารถสรุปได้ว่า ความหนาที่เหมาะสมของชั้น TiO_2 transparent layer ควรประมาณ $19 \mu\text{m}$ (ดูรูปที่ 4.6) เนื่องจากให้ประสิทธิภาพเซลล์สูงที่สุด

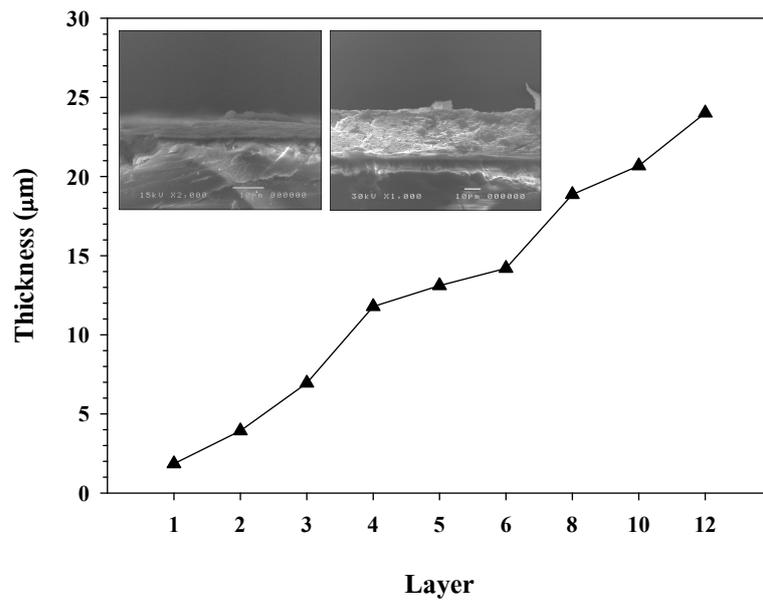
X-Ray diffraction (XRD) patterns ของชั้นฟิล์มบาง TiO_2 ที่ความหนาต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.7 โดยที่เฟส Anatase และเฟส Rutile จะระบุแสดงด้วยสัญลักษณ์ “A” และ “R” ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่า XRD patterns ของชั้นฟิล์มบาง TiO_2 แสดงลักษณะทั้งสองเฟส และทุกพิกัดที่แสดง Anatase phase จะมีความเข้มสูง นั่นแสดงว่าอนุภาค TiO_2 มีความเป็นผลึกสูง

ตารางที่ 4.2 Thickness of working electrode compared with electrical performance.

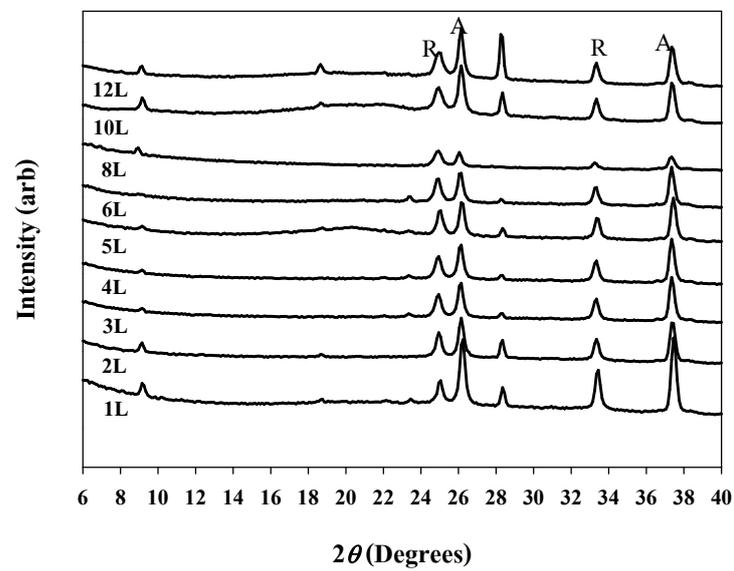
Sample (Layer)	PCE (%)	Thickness (μm)
1L	2.48±0.09	1.85±0.05
2L	3.12±0.84	3.93±0.60
3L	4.09±0.35	6.95±1.10
4L	4.90±0.08	11.79±1.27
5L	5.01±0.04	13.11±0.47
6L	5.32±0.08	14.20±1.01
8L	5.79±0.18	18.87±1.23
10L	4.80±0.26	20.68±1.29
12L	4.87±0.49	24.02±1.10



รูปที่ 4.5 SEM images of the surface and cross-section of WE different layer (a) 4L, (b) 6L, (c) 8L, (d) 10L and (e) 12L layers.



รูปที่ 4.6 Relationship of thickness and layers of working electrode.



รูปที่ 4.7 XRD patterns of TiO₂ transparent film with different layers.

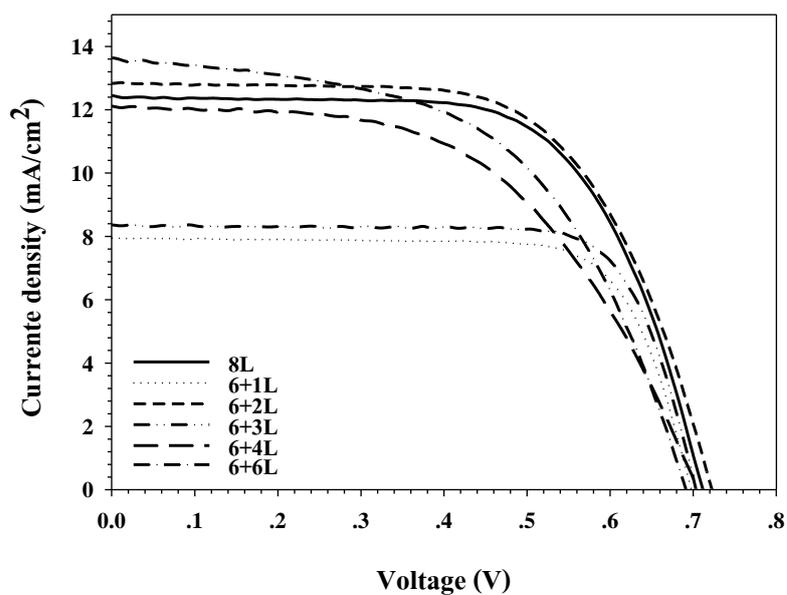
4.1.2 การพัฒนาประสิทธิภาพของชั้นฟิล์มบาง TiO_2 โดยการเพิ่มชั้นฟิล์มชนิดกระเจิงแสง (Light Scattering)

การเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์ DSSCs มักจะถูกจำกัดโดยความไม่มีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงของชั้นฟิล์มผลึกนาโน (nanocrystalline film) เนื่องจากมีการกระเจิงแสงที่ต่ำและเกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนกลับจากชั้นฟิล์มบางไปยังอิเล็กโทรไลต์ ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอนุภาคนาโน TiO_2 ในการเป็นขั้วไฟฟ้าแสง (photoelectrode) ที่ดีมากขึ้น จึงได้มีการศึกษาโลหะออกไซด์อื่น ๆ จำนวนมาก เช่น ZnO , MgO และ CaCO_3 และเพื่อลดต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด DSSCs และทางเลือกอีกทางหนึ่ง คือ การเติมชั้นกระเจิงแสง (light scattering layer) เข้าไปบนชั้นอนุภาคนาโน TiO_2 ^[30, 31] เพื่อช่วยกระเจิงแสงให้ดีมากขึ้น อันจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงได้ดีมากขึ้น อย่างไรก็ตาม มีรายงานวิจัยที่รายงานถึงผลกระทบของชั้นกระเจิงแสงว่าจำนวนที่ชั้นที่เตรียมโดยเทคนิคสกรีนพริ้นค่อนข้างน้อย^[32] โดยก่อนหน้านี้ Ito S. และคณะ ได้ขึ้นรูปฟิล์ม TiO_2 สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงโดยการหาความหนาที่เหมาะสมของชั้นฟิล์ม TiO_2 ต่อค่ากระแสและค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ พวกเขาพบว่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าสูงของเซลล์ที่เหมาะสมให้ค่าสูงกว่า 10%^[33]

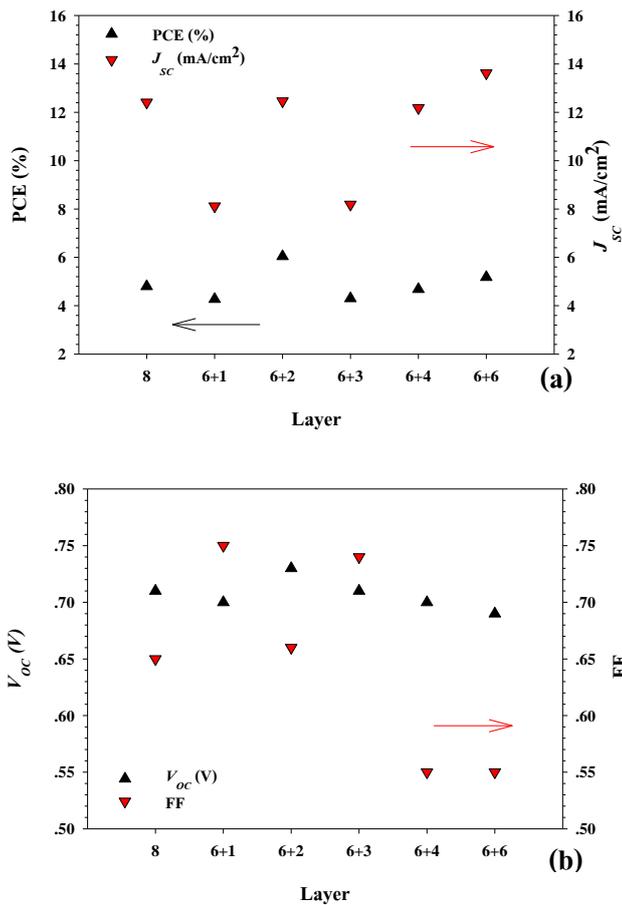
ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้ จึงได้มีความสนใจในการพัฒนาชั้นฟิล์มบางบวกกับชั้นกระเจิงแสง โดยจะเริ่มต้นจากการเตรียมชั้นฟิล์มบาง TiO_2 จำนวน 6L ชั้นและเติมชั้นกระเจิงแสงที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 400 nm เข้าไปจำนวนชั้นต่างๆ ซึ่งจะเขียนสัญลักษณ์เป็น 6+2L, 6+4L โดยตัวเลขด้านหน้าแทนจำนวนชั้นฟิล์มบาง TiO_2 และตัวเลขด้านหลังแทนชั้นกระเจิงแสง เช่น 6+2L หมายถึง มีจำนวนชั้นฟิล์มบาง TiO_2 จำนวน 6L ชั้นและจำนวนชั้นกระเจิงแสงจำนวน 2L ชั้น ตามลำดับ สำหรับเหตุผลที่เลือกใช้ 6L ชั้นเป็นจุดเริ่มต้น เนื่องจากว่าความหนาที่เหมาะสมของชั้นอิเล็กโทรดที่หาได้ในหัวข้อ 4.1.1 นั้นเท่ากับ 19 μm หากไปเริ่มต้นที่ 8L ชั้น พอเติมชั้นกระเจิงแสงเข้าไป จะทำให้ความหนามากเกินไป และจะทำให้ฟิล์มเกิดการแตกได้ และยังคงต้องปิดทับด้วยชั้นกระเจิงแสงอีกด้วย ซึ่งพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.3 และกราฟ I-V characteristics ของเซลล์ที่ขึ้นรูปด้วยอิเล็กโทรดชนิดนี้แสดงในรูปที่ 4.8 จากรูปจะเห็นว่าประสิทธิภาพของเซลล์ (PCE) ที่ขึ้นรูปด้วยอิเล็กโทรดชนิดที่เติมชั้นกระเจิงแสงเข้าไปจำนวน 2L ชั้นด้วย เพิ่มสูงกว่าเซลล์ที่ไม่ได้เติมเข้าไป (เปรียบเทียบกับจำนวน 8L ชั้น เดิม) โดยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดที่เติมชั้นกระเจิงแสง 6+2L ให้ค่า J_{sc} , V_{oc} , FF และ PCE สูงกว่าเซลล์ที่ใช้ชั้นฟิล์มบาง TiO_2 จำนวน 8L ชั้นเพียงอย่างเดียว (เมื่อความหนาเท่ากัน) ดังรูปที่ 4.9 ทั้งนี้เนื่องมาจากสมบัตการกระเจิงของชั้นฟิล์ม TiO_2 ที่ดูดกลืนแสงได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเซลล์ที่ขึ้นรูปด้วยชั้นฟิล์มบาง TiO_2 ชนิด 6+2L ให้ประสิทธิภาพของเซลล์สูงที่สุดเท่ากับ $6.04 \pm 0.05\%$ ภายใต้ความเข้มแสงจำลอง AM 1.5 (100 mW cm^{-2})^[34] แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าเมื่อเติมชั้นกระเจิงแสงมากกว่า 2 ชั้นขึ้นไป จะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์ลดลง อาจเป็นเพราะมีความหนามากเกินไปจึงอาจทำให้พื้นผิวเซลล์แตก รูปที่ 4.10 แสดง IPCE ของเซลล์ DSSCs ที่เตรียมด้วยการเติมชั้นกระเจิงแสงเพิ่มเข้าไป จากรูปจะเห็นว่า IPCE ของเซลล์ DSSCs ที่เตรียมจาก 6+2L ชั้นสามารถให้ประสิทธิภาพได้เท่าเทียมกับกรณีการใช้ TiO_2 ชนิด transparent จำนวน 8L ชั้นได้ และยังให้ค่าประสิทธิภาพที่สูงกว่าอีกด้วยเล็กน้อย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกเตรียมเซลล์ที่ขึ้นรูปด้วยชั้นฟิล์มบาง TiO_2 ชนิด 6+2L ชั้น สำหรับการศึกษาในขั้นถัดไป

ตารางที่ 4.3 Electrical parameters of DSSCs using working electrodes of different scattering layers. The reported values were averaged from at least 4 DSSC samples.

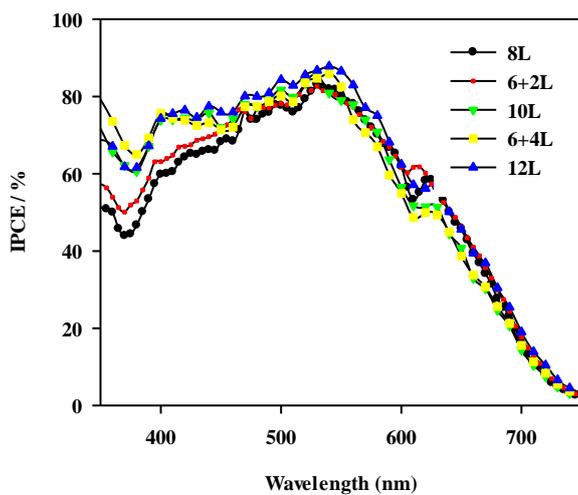
Sample(Layer)	PCE (%)	I_{SC} (mA)	J_{SC} (mA/cm ²)	V_{OC} (V)	FF
8	5.79±0.18	1.99±0.06	12.41±0.40	0.71±0.01	0.65±0.01
6+1	4.27±0.12	1.30±0.07	8.12±0.45	0.70±0.01	0.75±0.02
6+2	6.04±0.05	1.99±0.03	12.46±0.17	0.73±0.01	0.66±0.01
6+3	4.30±0.36	1.31±0.07	8.19±0.45	0.71±0.01	0.74±0.03
6+4	4.68±0.41	1.95±0.12	12.18±0.74	0.70±0.01	0.55±0.07
6+6	5.18±0.05	2.18±0.03	13.62±0.19	0.69±0.02	0.55±0.04



รูปที่ 4.8 I-V characteristics of DSSCs with working electrodes of different scattering layers, measured at 100 mW/cm² illumination.



รูปที่ 4.9 Photovoltaic performances of DSSCs compared between (a) PCE (%) and J_{sc} (mA/cm²) and (b) V_{oc} (V) and FF with WE at different scattering layers.

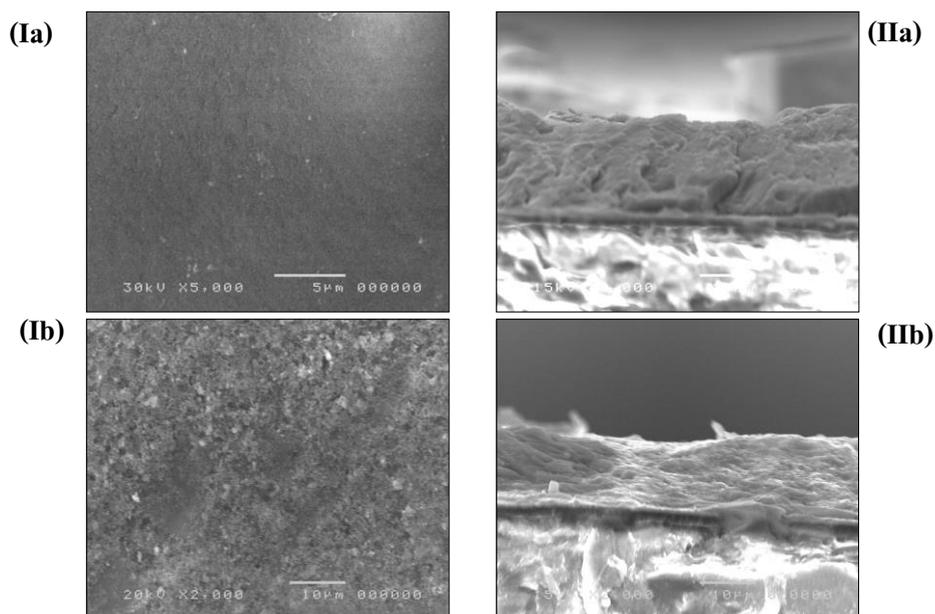


รูปที่ 4.10 IPCE spectra of DSSCs fabricated with WE at different scattering layers.

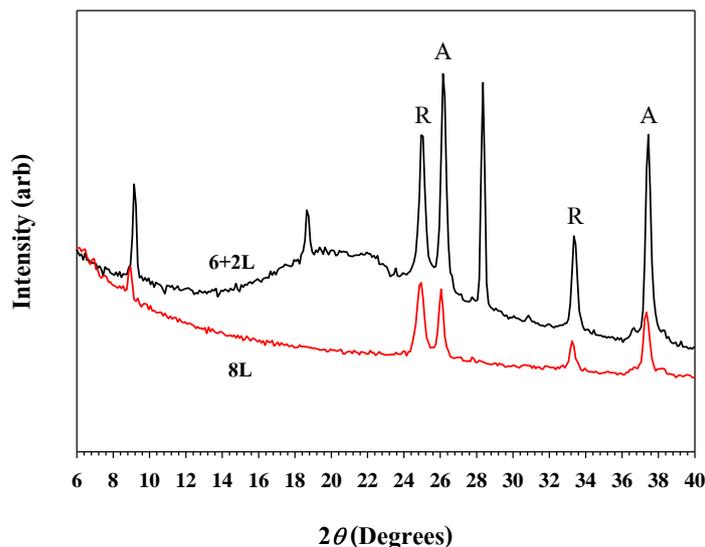
นอกจากนี้ จากการศึกษาสัณฐานวิทยาภาพตัดขวางของชั้นฟิล์มบาง TiO_2 ดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าชั้นฟิล์มบางที่เติมด้วยชั้นกระเจิงแสง (6+2L) นั้น ส่วนที่อยู่ด้านบนมีความเป็นรูพรุนที่สูงกว่าฟิล์มบางที่ไม่ได้เติมชั้นกระเจิงแสง (8L ชั้น) ซึ่งอาจทำให้เกิดการกระเจิงแสงได้มากขึ้นนั่นเอง โดยพบว่าความหนาของชั้นฟิล์มบาง TiO_2 จำนวน 8L ชั้น และ 6+2L ชั้นมีความหนาใกล้เคียงกัน คือ ~ 18.9 และ ~ 17.8 μm ตามลำดับ

และสำหรับข้อมูลทาง XRD patterns ของชั้นกระเจิงแสง TiO_2 ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.12 ยืนยันว่าชั้นกระเจิงแสงที่เติมเข้าไปด้านบนนั้นมีความเป็นเฟสออสตรูมเพิ่มขึ้น โดยมีโครงสร้างของผลึกชนิด Rutile และ Anatase ผสมกันอยู่ภายหลังการบ่มแช่ความร้อน (annealing) ขณะที่ patterns ของชั้นฟิล์มโปร่งแสง 8L นั้นแสดงโครงสร้างผลึกชนิด Anatase ผสมกับ Rutile เล็กน้อยเท่านั้น และมีความผลึกสมบูรณ์สูงกว่ามาก

ดังนั้น จากผลการทดลองนี้จึงสรุปได้ว่าขั้วไฟฟ้าทำงาน (working electrode, WE) ที่เหมาะสมและดีที่สุดสำหรับโครงการวิจัยนี้ คือ WE ที่เตรียมด้วยชั้นฟิล์มโปร่งใส TiO_2 (ขนาดอนุภาค 20 nm) จำนวน 6L ชั้นและปิดทับด้วยชั้นกระเจิงแสง TiO_2 (ขนาดอนุภาค 400 nm) อีกจำนวน 2L ชั้น เพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าทำงานสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงระบบที่มีการเติมด้วยอิเล็กโทรไลต์พอลิเมอร์ผสมต่อไป



รูปที่ 4.11 SEM images of the surfaces and cross sections of WE with (a) 8L layer (~ 18.9 μm) and (b) 6+2L layer (~ 17.8 μm)



รูปที่ 4.12 XRD patterns of TiO_2 film of 8L layers and 6+2L layers.

4.2 การศึกษาการเตรียมระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลวไอออนิก พอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ และนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์

หลังจากที่ได้วิธีการเตรียมขั้วไฟฟ้าทำงานที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการขึ้นรูปเซลล์แล้ว ขั้นตอนต่อไปของโครงการวิจัยคือ การศึกษาระบบอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการนำไปเตรียมเป็นพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ และระบบนาโนคอมพอสิตอิเล็กโทรไลต์ที่มีการเติมอนุภาคนาโนลงไป อย่างที่ทราบกันดีแล้วว่าระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลวจะให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุด^[2-4] แต่ก็มีปัญหาเรื่องความไม่เสถียรของเซลล์แสงอาทิตย์ เกิดการรั่วไหลของอิเล็กโทรไลต์และเกิดความดันสูงขณะใช้งาน ทำให้มีอายุการใช้งานที่ไม่ยาวนาน จึงได้มีการวิจัยต่างๆ เพื่อพัฒนาระบบอิเล็กโทรไลต์ชนิดใหม่ขึ้นมาเพื่อยืดอายุการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ให้มากขึ้นแต่ยังคงประสิทธิภาพที่สูง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้โครงการวิจัยนี้สนใจในการพัฒนาระบบนาโนคอมพอสิตอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งคาดหวังว่าจะทำให้ยืดอายุเซลล์แสงอาทิตย์ให้ยาวนานและให้ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีที่สุดด้วย

4.2.1 การศึกษาระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลวไอออนิก

ในการศึกษาระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลวไอออนิก ได้เลือกเตรียมระบบของเหลวไอออนิก (ILE) ประกอบด้วย อิเล็กโทรไลต์ 2 ชนิด คือ ของเหลวไอออนิกชนิด A (ILE A) และชนิด B (ILE B) โดยชนิด A จะใช้ PM(II) ผสมกับ MBI ในตัวทำละลาย 3-methoxypropionitrile เพียงอย่างเดียว ส่วนไอออนิกชนิด B ใช้ PM(II) ผสมกับ MBI ละลายในตัวทำละลายของผสมระหว่าง 3-methoxypropionitrile กับ vareonitrile ในอัตราส่วน 85:15 %v/v

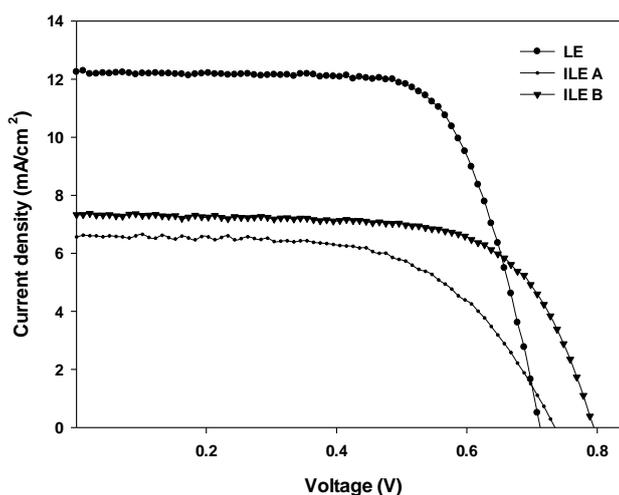
ตารางที่ 4.4 แสดงสมบัติทางไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลว (LE) ของเหลวไอออนิกชนิด A (ILE A) และของเหลวไอออนิกชนิด B (ILE B) ซึ่งจากการทดลองจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า เมื่อทำการเปลี่ยนมาใช้ระบบของเหลวไอออนิก ค่า I_{SC} และ J_{SC} ของเซลล์แสงอาทิตย์จะลด

ต่ำลงอย่างมากประมาณ 40-50% ของค่าที่ได้จากระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลว ทั้งนี้เนื่องจาก ระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลวไอออนิกจะมีความหนืดที่สูงกว่าระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลว ดังนั้นจึงส่งผลให้ได้ค่า I_{sc} , และ J_{sc} , มีค่าลดลงอย่างมาก และส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ลดต่ำจาก 6.04% ลงเป็น 3.12% และ 4.11% สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ระบบอิเล็กโทรไลต์ ILE A และ ILE B ตามลำดับ

รูปที่ 4.13 แสดง I-V characteristics ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ขึ้นรูปโดยใช้ระบบอิเล็กโทรไลต์ IE, ILE A และ ILE B จากรูปก็จะเห็นว่า J_{sc} ของระบบอิเล็กโทรไลต์ไอออนิกต่ำลงอย่างมากและพื้นที่ใต้กราฟก็ลดน้อยลงอย่างมากด้วยเช่นกันเมื่อเทียบกับกรณีที่ใช้ระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลว จากลักษณะดังกล่าวทำให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ระบบอิเล็กโทรไลต์ไอออนิกลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด

ตารางที่ 4.4 สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ของระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลว (LE) ของเหลวไอออนิกชนิด A (ILE A) และของเหลวไอออนิกชนิด B (ILE B) โดยค่าที่รายงานเป็นค่าเฉลี่ยมาจากการทดลอง 4 เซลล์

Electrolyte systems	I_{sc} (mA)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	ff	η (PCE) (%)
LE	1.99±0.03	12.46±0.17	0.73±0.01	0.66±0.01	6.04±0.05
ILE A	1.06±0.05	6.66±0.34	0.77±0.02	0.61±0.04	3.12±0.27
ILE B	1.22±0.03	7.63±0.24	0.79±0.01	0.70±0.08	4.11±0.13



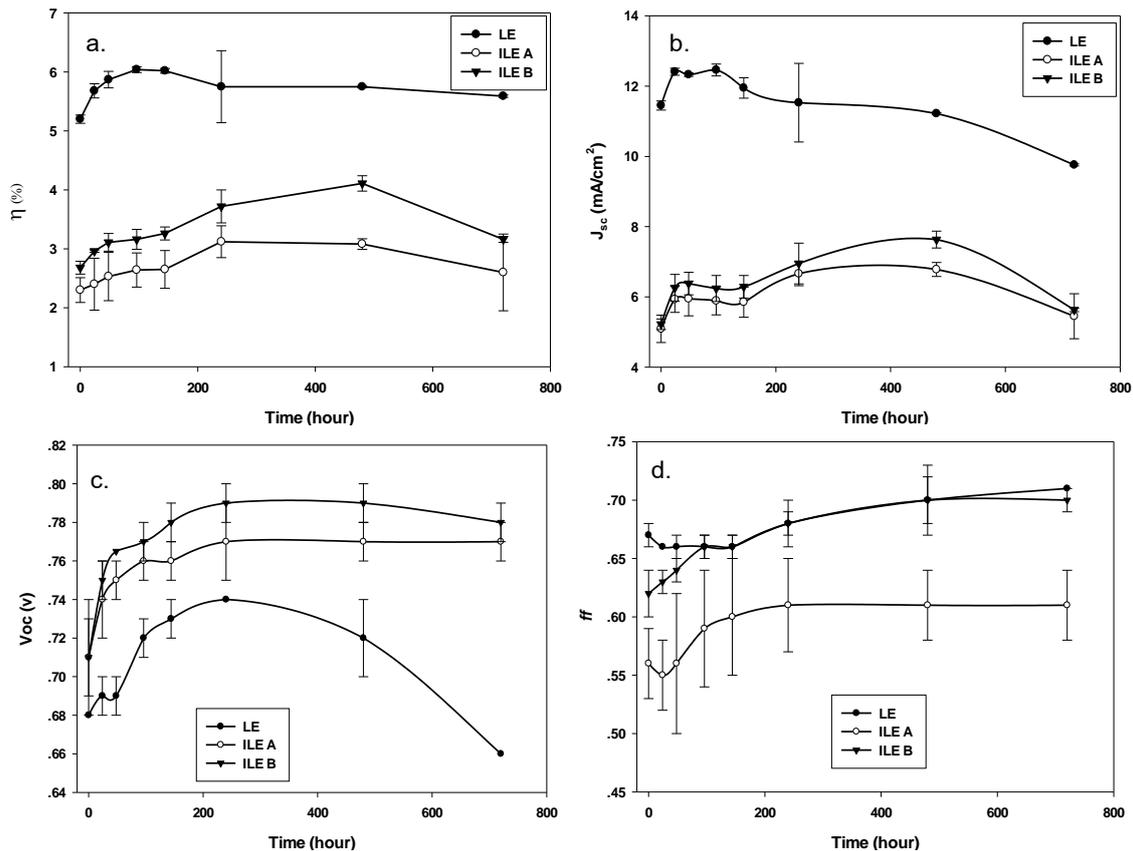
รูปที่ 4.13 I-V characteristics of DSSCs using liquid electrolyte (IE), ionic liquid type A (ILE A) and ionic liquid type B (ILE B), measured at 100 mW/cm² illumination

สาเหตุที่ระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลว สามารถให้ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีกว่าระบบไอออนิกของเหลว เนื่องจากระบบสารละลายไอโอดีนต่อไตรไอโอดีน (I/I_3^-) โดย I^- มีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนแก้มัลเลกุลสี่ข้อมไวแสงที่อยู่ในรูปของตัวออกซิไดซ์ที่สถานะพื้นได้ดี และขณะเดียวกัน I_3^- สามารถรับอิเล็กตรอนจากแคโทดอิเล็กโทรดได้ดีเช่นกัน จึงให้ค่าในการเปลี่ยนแปลงพลังงาน (% η) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ดี ส่วนในระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลวไอออนิก ซึ่งเตรียมได้โดยนำของผสมระหว่าง PM (II) และ MBI ซึ่งจะได้ระบบสารละลายเกลือไอออนิกของไอโอดีน/ไตรไอโอดีน (I/I_3^-) ที่มีความหนืดสูง จึงส่งผลต่อความสามารถของ I^- ในการให้อิเล็กตรอนแก้มัลเลกุลสี่ข้อมไวแสงได้ช้ากว่าระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลวหรือต้องใช้เวลาานานมากกว่าในการรับส่งอิเล็กตรอน จึงทำให้ได้ประสิทธิภาพของเซลล์ที่ต่ำกว่า

สำหรับสารละลายในตัวทำละลายพบว่าส่งผลต่อประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นของเซลล์แสงอาทิตย์เช่นกัน โดยในระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลวไอออนิกชนิด B พบว่าให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีกว่าระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลวชนิดไอออนิก A เนื่องจาก Varenitrile ที่เติมเข้าไปผสม นอกจากจะเป็นตัวทำละลายแล้ว ยังช่วยในการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของอิเล็กตรอน (electron recombination) ได้อีกด้วย

จากการศึกษาความเสถียร (cell durability) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสี่ข้อมไวแสงที่ใช้ระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลว ของเหลวไอออนิกชนิด A และของเหลวไอออนิกชนิด B เพื่อใช้เตรียมเป็นนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ พบว่า ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (J_{sc}) ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) และฟิลล์แฟกเตอร์ (ff) มีค่าเพิ่มขึ้นกับระยะเวลาของเซลล์ที่เตรียมในช่วง 0 - 144 ชั่วโมงแรก และหลังจากนั้นจะค่อยๆ ลดลง โดยช่วงเวลาที่มียุคสูงสุดของระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลว คือ ที่เวลา 144 ชั่วโมง ส่วนของเหลวไอออนิกชนิด A และของเหลวไอออนิกชนิด B ที่เวลา 240 ชั่วโมง และจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ เมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น ตามลำดับ (ดูรูปที่ 4.13)

จากสมบัติของระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลวไอออนิกที่มีความเสถียรต่อสารเคมีและความร้อน มีจุดเดือดที่สูงกว่าระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลวธรรมดา เราจึงได้เลือกใช้ระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลวชนิด B เพื่อใช้เตรียมเป็นตัวทำละลายในระบบพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์และนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ เนื่องจากต้องการให้เซลล์ที่เตรียมได้มีอายุการใช้งานที่คงทนกว่าระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลว



รูปที่ 4.14 Photovoltaic performances of DSSCs prepared using LE, ILE A and ILE B at different times (a) η (%), (b) J_{sc} (mA/cm²), (c) V_{oc} (V) and (d) ff.

4.2.2 การศึกษาระบบพอลิเมอร์เจลผสมอเล็กโตรไลต์

เพื่อค้นหาระบบพอลิเมอร์ผสมที่เหมาะสม (ความเข้มข้น) สำหรับเตรียมเป็นพอลิเมอร์เจลอเล็กโตรไลต์ ได้ทำการทดลองนำพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVDF-HFP และ PEO มาทดสอบโดยละลายในไอออนิกของเหลวชนิด B ที่ได้ผลจากหัวข้อ 4.1.1 แล้วทำการขึ้นรูปเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีอ้อมไวแสงเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์ที่ได้เตรียมจากระบบพอลิเมอร์เจลนั้นๆ ซึ่งได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.15

จากตารางที่ 4.5 จะเห็นว่าระบบอเล็กโตรไลต์ของเหลวไอออนิกชนิด B ให้ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ (PCE) เท่ากับ 4.11% ส่วนเมื่อเตรียมเป็นพอลิเมอร์เจลอเล็กโตรไลต์แล้ว พบว่าได้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์เป็นดังนี้ พอลิเมอร์อเล็กโตรไลต์ PV1 (5 wt% PVDF-HFP) เท่ากับ 4.07%, PV2 (10 wt% PVDF-HFP) เท่ากับ 4.35%, PE1 (5 wt% PEO) เท่ากับ 3.58% และ PE2 เท่ากับ 3.59% (10 wt% PEO) และยังพบว่าระบบอเล็กโตรไลต์พอลิเมอร์เจลชนิด PV2 และ PE2 ให้ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์มากกว่า PV1 และ PE1 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการใช้ PEO ละลายใน Acetonitrile เป็นอเล็กโตรไลต์พบว่าให้ค่าประสิทธิภาพสูงถึง 5.60% ซึ่งรายงานโดยกลุ่มของ Marisa Arunchaiya^[35] ซึ่งสูงกว่าในกรณีที่เราใช้ของเหลวไอออนิก แต่ความคงทนของเซลล์ในระบบ

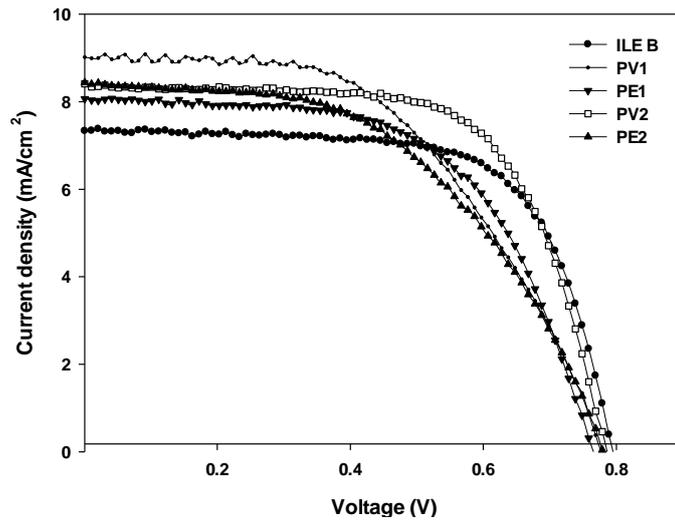
ดังกล่าวมีน้อยมาก ดังจะพบว่าค่าประสิทธิภาพตกจาก 5.60% ไปเป็น 2.2% ภายในเวลา 250 ชั่วโมงเท่านั้น

สำหรับในการศึกษาในโครงการวิจัยนี้ แม้จะได้ค่าประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าแต่ให้ประสิทธิภาพการคงอยู่คงทนมากกว่าที่รายงานโดย Marisa Arunchaiya^[35] นอกจากนี้แล้ว พบว่าจากตารางที่ 4.5 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์ อาจเกิดการขนส่งปริมาณไอออนได้มากขึ้นกว่ากรณีที่เติมพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า ทั้งนี้เพราะในโครงสร้างมอนอเมอร์ของพอลิเมอร์ทั้งสองที่นำมาใช้เป็นเจลพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์นั้นมีหมู่ฟังก์ชันที่มีความเป็นขั้วและมีความยืดหยุ่นสูงจึงใช้ในการส่งผ่านไอออนได้ดี ดังนั้นถ้ามีหมู่ฟังก์ชันพวกนี้เยอะมากขึ้นก็จะส่งผลให้เกิดการขนส่งไอออนได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม ถ้าเติมมากเกินไปก็จะทำให้ระบบอิเล็กโทรไลต์มีความหนืดสูงเกินไป และทำให้น้ำเข้าเซลล์แสงอาทิตย์ได้ยาก และจะทำให้เซลล์ที่ได้มีประสิทธิภาพลดต่ำลงแทนที่ ด้วยเหตุนี้ ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกที่จะเตรียมพอลิเมอร์ผสมที่มีความเข้มข้นเพียง 10 wt% เพราะได้ทดลองเตรียมที่ความเข้มข้น 12-15 wt% แล้ว พบว่าไม่สามารถอัดระบบอิเล็กโทรไลต์เหล่านี้เข้าไปในเซลล์แสงอาทิตย์ได้

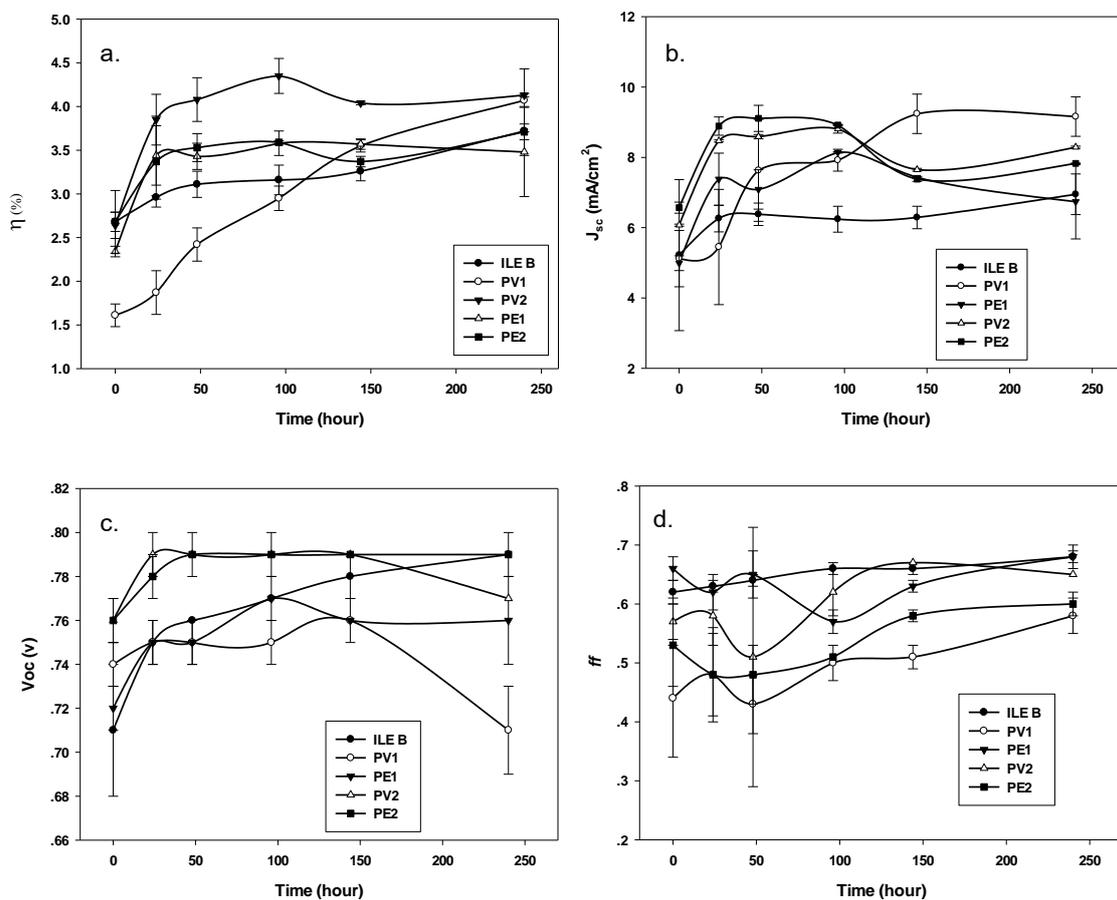
รูปที่ 4.15 แสดง I-V characteristics ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงใช้ระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลวไอออนิกชนิด B และพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ชนิด PV1, PV2, PE1 และ PE2 จากรูปจะเห็นว่า ลักษณะของ I-V characteristics มีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ระบบอิเล็กโทรไลต์ชนิด PV2 ให้ค่าพื้นที่ใต้กราฟมากที่สุดและให้ประสิทธิภาพสูงถึง 4.35% ซึ่งสูงกว่ากรณีใช้ระบบของเหลวไอออนิกประมาณ 5.8%

ตารางที่ 4.5 สมบัติทางด้านไฟฟ้าของเซลล์ของของเหลวไอออนิกชนิด B พอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ 5 wt% PVDF-HFP (PV1), 10 wt% PVDF-HFP (PV2), 5 wt% PEO (PE1) และ 10 wt% PEO (PE2)

Sample	I_{sc} (mA)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	ff	η (%)
ILE B	1.22±0.03	7.63±0.24	0.79±0.01	0.70±0.08	4.11±0.13
PV1 (5 wt%)	1.46±0.09	9.16±0.56	0.71±0.02	0.58±0.03	4.07±0.36
PV2 (10 wt%)	1.41±0.02	8.81±0.12	0.79±0.00	0.62±0.04	4.35±0.20
PE1 (5 wt%)	1.30±0.01	8.14±0.02	0.77±0.00	0.57±0.02	3.58±0.14
PE2 (10 wt%)	1.43±0.00	8.92±0.02	0.79±0.00	0.51±0.00	3.59±0.02



รูปที่ 4.15 I-V characteristics ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลวไอออนิกชนิด B และพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ PV1, PV2, PE1 และ PE2



รูปที่ 4.16 พารามิเตอร์ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ระบบอิเล็กโทรไลต์พอลิเมอร์เทียบกับเวลา; (a.) ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ (% η); (b.) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (J_{sc}); (c.) ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) และ (d.) ฟิล์ลแฟคเตอร์ (ff)

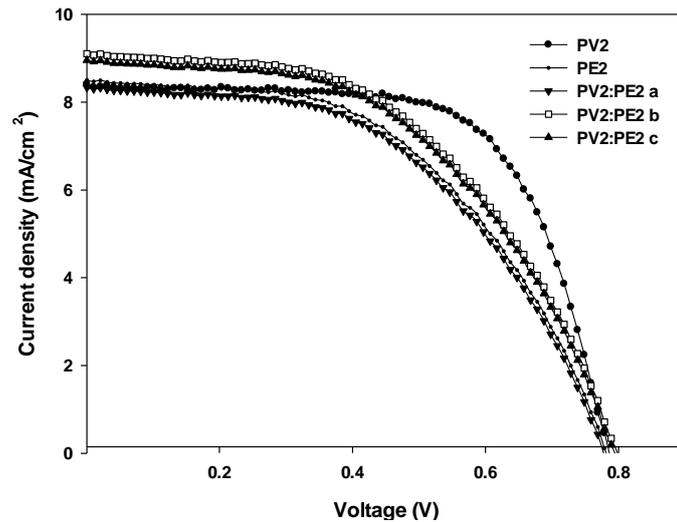
จากการศึกษาความเสถียรของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ระบบอิเล็กโทรไลต์เป็นพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์ พบว่าค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (J_{sc}) ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรถัด (V_{oc}) และฟิลล์แฟกเตอร์ (ff) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆกับเวลา โดยจะเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วง 24 ชั่วโมงแรกหลังจากขึ้นรูปเซลล์แล้วเสร็จ ซึ่งตรงส่วนนี้ไม่เคยมีนักวิจัยรายงานมาก่อน และหลังจากนั้นจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนได้ค่าสูงที่สุดที่ประมาณ 96 ชั่วโมง และหลังจากนั้นลดลงเล็กน้อยเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น (ดูรูปที่ 4.16) และยังพบว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (J_{sc}) ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรถัด (V_{oc}) และฟิลล์แฟกเตอร์ (ff) ของเซลล์ที่เตรียมด้วย PV2 และ PE2 ให้ค่าที่สูงกว่าการณของเซลล์ที่เตรียมด้วย PV1 และ PE1

หลังจากได้ความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์แต่ละชนิดแล้ว ขั้นตอนต่อไป คือ การเตรียมพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์ผสมระหว่าง PVDF-HFP กับ PEO โดยได้ทำการทดสอบหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของพอลิเมอร์เจลผสมอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งเริ่มจากการผสม 10 wt% PVDF-HFP (PV2) กับ 10 wt% PEO (PE2) ในอัตราส่วน 2:8 (a), 5:5 (b) และ 8:2 (c) โดยร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt) แล้วนำไปใช้เป็นระบบอิเล็กโทรไลต์ในเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งได้ผลดังในตารางที่ 4.6 และ รูปที่ 4.17

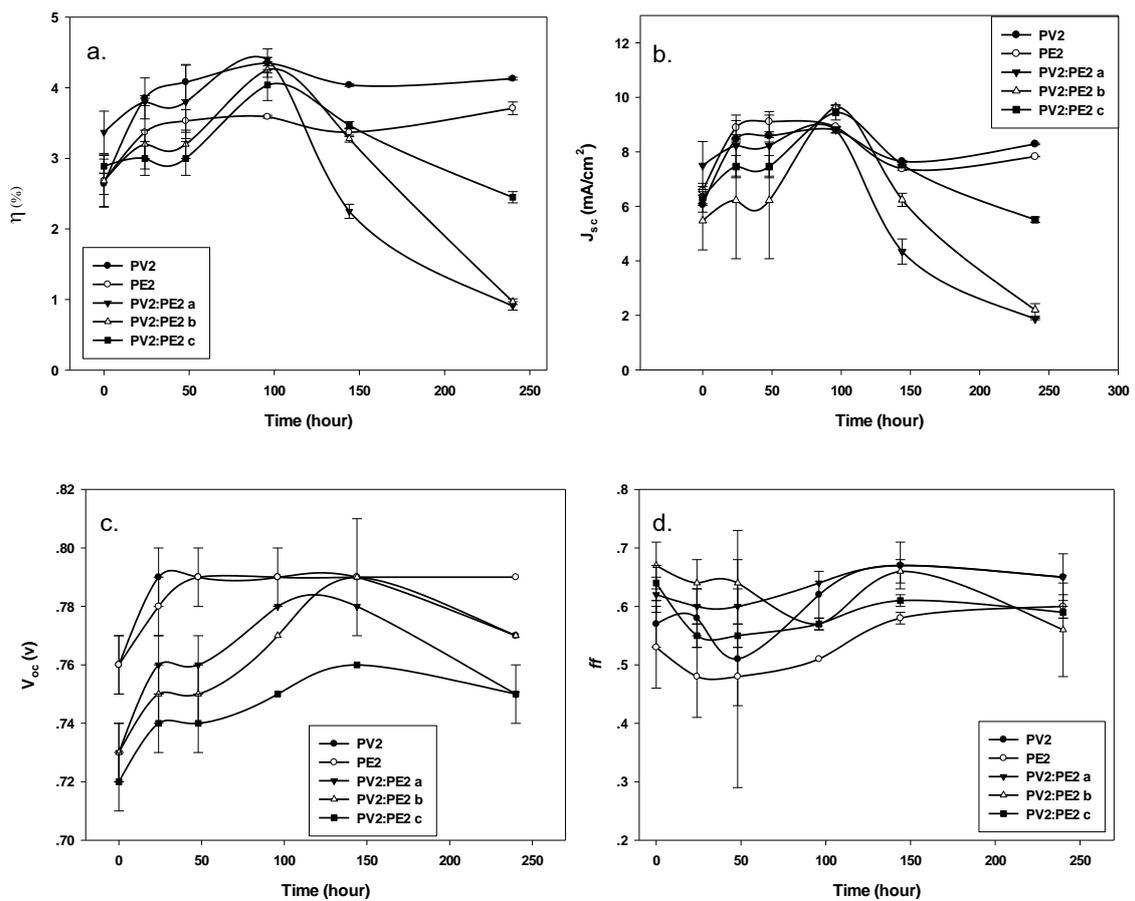
จากตารางที่ 4.6 พบว่าระบบพอลิเมอร์เจลผสมอิเล็กโทรไลต์อัตราส่วน 2:8 ให้ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 4.40% ซึ่งสูงกว่าพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์ผสมที่อัตราส่วน 5:5 และ 8:2 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าใกล้เคียงกันมาก ทั้งอาจเนื่องมาจากน้ำหนักโมเลกุลของ PEO ที่ใช้ค่อนข้างต่ำ จึงทำให้อิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้นต่างๆไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นจึงได้เลือกอัตราส่วน 2:8 เพื่อใช้เตรียมเป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์สำหรับนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ ในลำดับของการทดลองถัดไป

ตารางที่ 4.6 สมบัติทางด้านไฟฟ้าของเซลล์ของพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ 10 wt% PVDF-HFP (PV2), 10 wt% PEO (PE2) และพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ผสม 10 wt% PVDF-HFP/PEO (PV2:PE2 เมื่ออัตราส่วน a = 2:8, b = 5:5 และ c = 8:2 wt% ตามลำดับ)

Sample	I_{sc} (mA)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	ff	η (%)
PV2	1.41±0.02	8.81±0.12	0.79±0.00	0.62±0.04	4.35±0.20
PE2	1.43±0.00	8.92±0.02	0.79±0.00	0.51±0.00	3.59±0.02
PV2:PE2 a	1.41±0.02	8.81±0.11	0.78±0.00	0.64±0.00	4.40±0.03
PV2:PE2 b	1.54±0.01	9.65±0.04	0.77±0.00	0.57±0.01	4.26±0.05
PV2:PE2 c	1.51±0.04	9.45±0.28	0.75±0.00	0.57±0.01	4.04±0.22



รูปที่ 4.17 I-V characteristics ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงของพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ PV2, PEO PE2 พอลิเมอร์ผสมอิเล็กโตรไลต์ PV2:PE2 อัตราส่วน a = 2:8, b = 5:5 และ c = 8:2 wt% ตามลำดับ



รูปที่ 4.18 พารามิเตอร์ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ระบบอิเล็กโตรไลต์พอลิเมอร์ผสมเทียบกับเวลา; (a.) ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ (% η); (b.) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (J_{sc}); (c.) ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) และ (d.) ฟิลล์แฟคเตอร์ (ff)

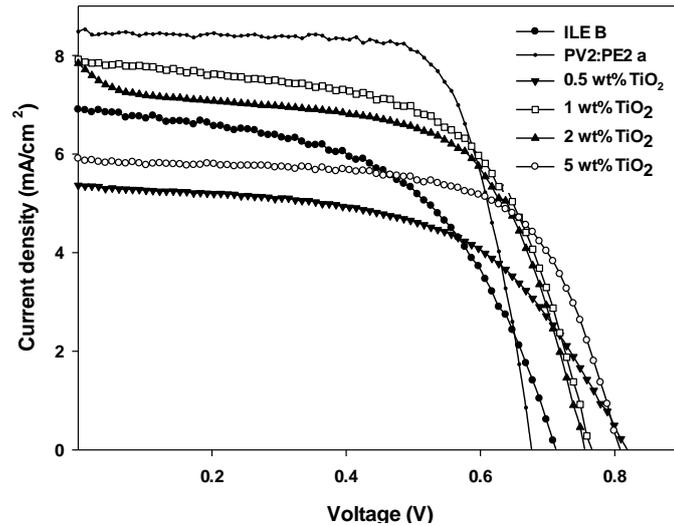
จากการศึกษาความเสถียรของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ระบบอิเล็กโทรไลต์เป็นพอลิเมอร์เจลผสม พบว่าค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (J_{sc}), ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรถัด (V_{oc}) และฟิลล์แฟคเตอร์ (ff) เพิ่มขึ้นกับเวลาอย่างมากในช่วง 24 ชั่วโมงแรกหลังขึ้นรูปเซลล์ และจากนั้นจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนได้ค่าสูงที่สุดที่เวลา 96 ชั่วโมง และหลังจากนั้นพารามิเตอร์เหล่านี้จะมีค่าลดลงเรื่อยๆเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ซึ่งความเสถียรของเซลล์ที่ได้จากระบบพอลิเมอร์เจลผสมมีค่าต่ำกว่าระบบพอลิเมอร์เจลเดี่ยวอย่างเห็นได้ชัดเจนโดยเฉพาะในช่วงเวลาหลังจาก 150 ชั่วโมงเป็นต้นไป ซึ่งสาเหตุน่าจะมาจากระบบประกอบเซลล์ที่ไม่ดีจึงทำให้ประสิทธิภาพตกลง

4.2.3 การศึกษาระบบนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์

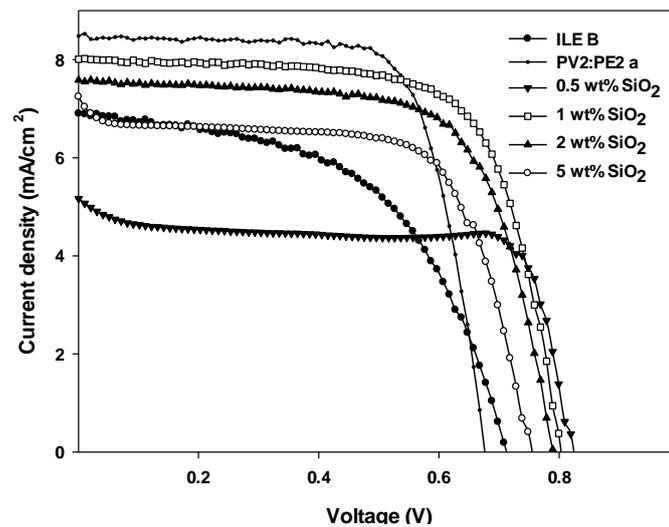
หลังจากได้อัตราส่วนที่เหมาะสมของระบบพอลิเมอร์ผสมแล้ว ขั้นตอนต่อไปเอาพอลิเมอร์ผสมที่เหมาะสมนี้เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ สำหรับเตรียมเป็นนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ต่อไป โดยจะมีการเติมอนุภาคนาโนเข้าไป ซึ่งในโครงการวิจัยนี้เลือกใช้อยู่ 2 ชนิด คือ อนุภาคนาโนของ TiO_2 (21 nm) และ SiO_2 (7 nm) ที่อัตราส่วนผสมตั้งแต่ 0.5 – 5.0 wt% แล้วทำการขึ้นรูปเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์ที่เตรียมได้ จากการศึกษาการเตรียมนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์เพื่อใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ได้ผลสมบัติทางด้านไฟฟ้าแสดงในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.19 - 4.22

ตารางที่ 4.7 สมบัติทางด้านไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากระบบนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์

Sample	I_{sc} (mA)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	ff	η (%)
ILE B	1.22±0.03	7.63±0.24	0.79±0.01	0.70±0.08	4.11±0.13
PV2:PE2 a	1.41±0.02	8.81±0.11	0.78±0.00	0.64±0.00	4.40±0.03
0.5 wt% TiO_2	0.91±0.00	5.67±0.01	0.81±0.00	0.67±0.00	3.08±0.01
1 wt% TiO_2	1.33±0.02	8.34±0.07	0.78±0.00	0.62±0.00	3.92±0.03
2 wt% TiO_2	1.35±0.02	8.47±0.08	0.77±0.00	0.59±0.00	3.89±0.01
5 wt% TiO_2	0.96±0.01	6.04±0.04	0.81±0.00	0.65±0.01	3.19±0.01
0.5 wt% SiO_2	1.25±0.03	7.78±0.17	0.75±0.00	0.66±0.01	3.87±0.02
1 wt% SiO_2	1.32±0.03	8.26±0.17	0.77±0.00	0.65±0.01	4.13±0.08
2 wt% SiO_2	1.25±0.04	7.78±0.20	0.79±0.01	0.56±0.25	4.03±0.08
5 wt% SiO_2	1.30±0.03	8.14±0.18	0.76±0.01	0.65±0.01	4.00±0.06



รูปที่ 4.19 I-V characteristics ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ระบบนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมอนุภาคนาโน TiO_2 ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 2.0 และ 5.0 wt%

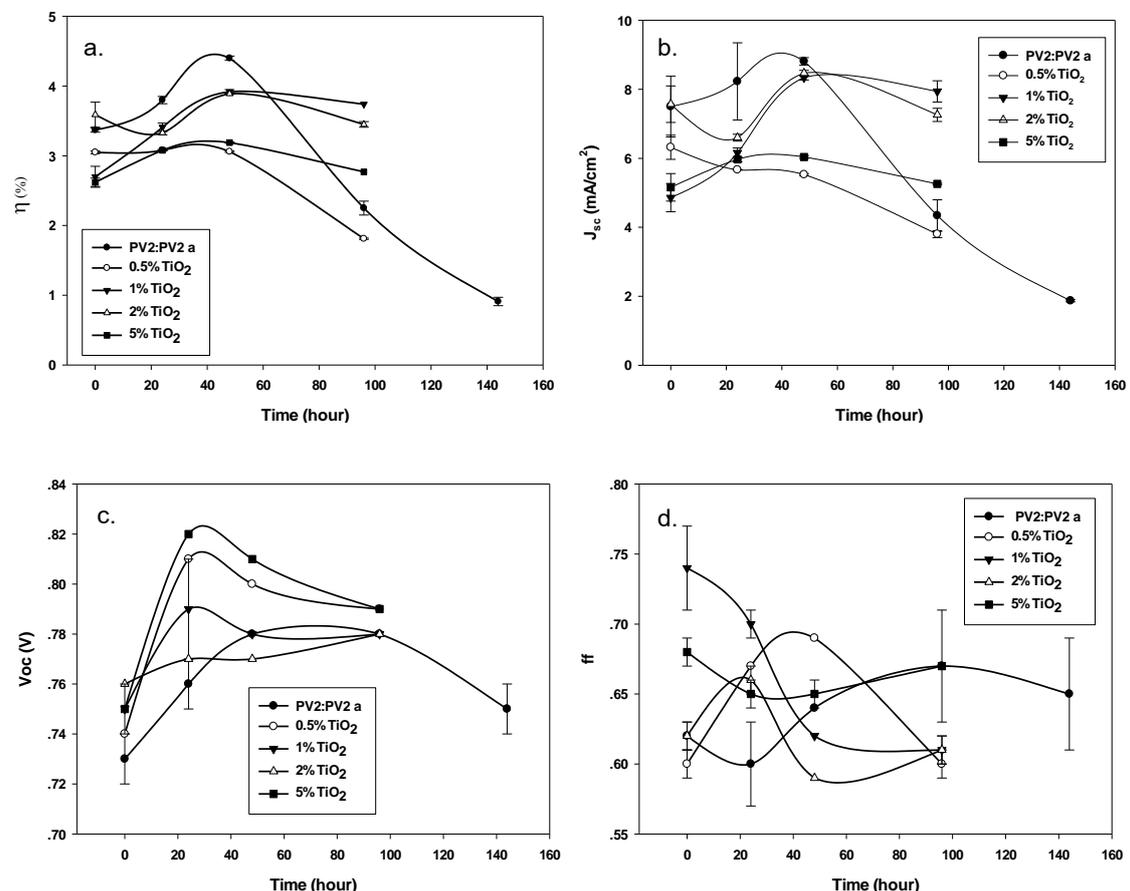


รูปที่ 4.20 I-V characteristics ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ระบบนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมอนุภาคนาโน SiO_2 ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 2.0 และ 5.0 wt%

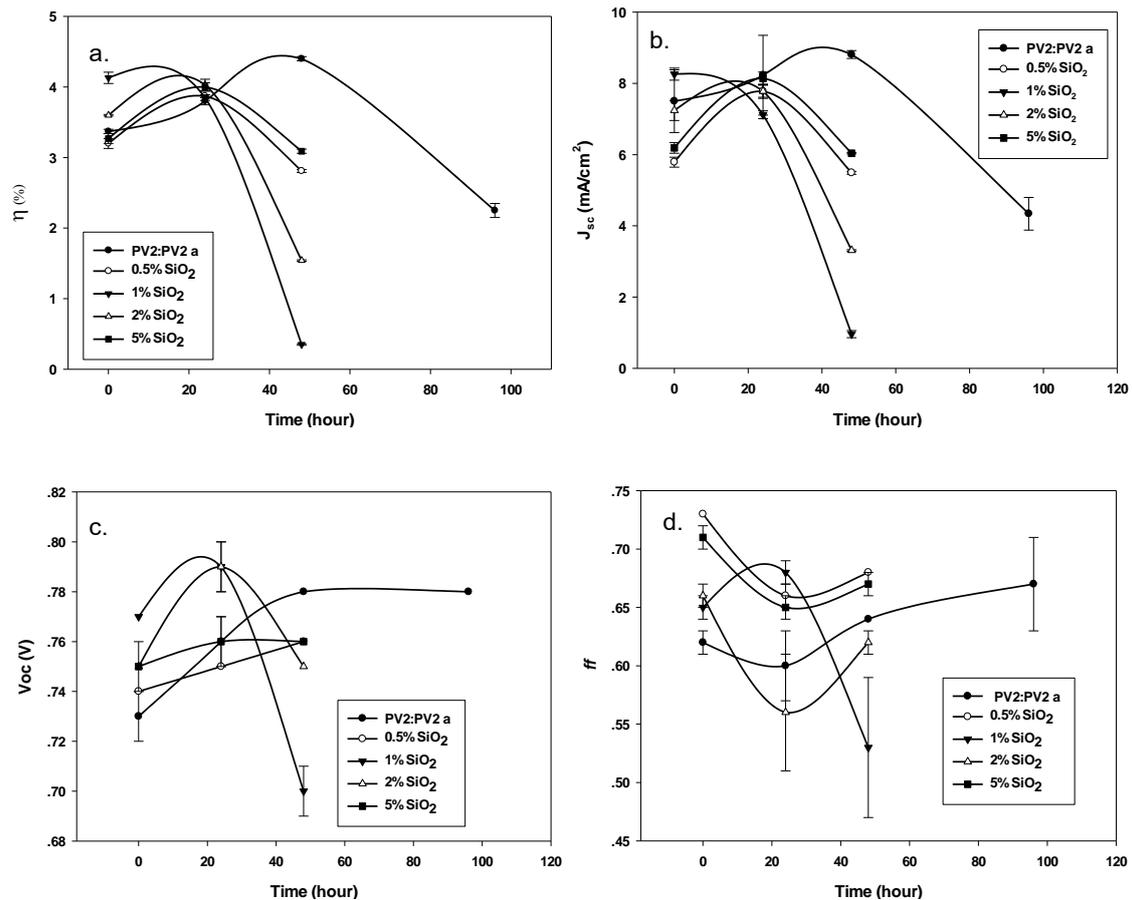
จากตารางที่ 4.7 พบว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ระบบนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ที่มีตัวเติมอนุภาคนาโนเป็น TiO_2 และ SiO_2 นั้น โดยภาพรวมแล้วจะมีให้ค่าประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าระบบพอลิเมอร์เจลผสมที่ไม่ได้เติมอนุภาคนาโนเล็กน้อย ซึ่งค่อนข้างขัดแย้งกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่มีรายงานว่า การเติมอนุภาคนาโนจะไปช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงได้ [26-28] จากตารางจะเห็นว่าในทั้งสองระบบของอนุภาคนาโน (TiO_2 และ SiO_2) แม้จะเติมเพียง 0.5 wt% เหมือนกรณีงานวิจัยอื่น ก็พบว่าประสิทธิภาพต่ำลงเล็กน้อย และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคนาโนขึ้นเป็น 1 wt% พบว่าให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์ดีขึ้นเล็กน้อย และเมื่อพยายามเพิ่มความเข้มข้นลงไปมากขึ้นไป 2.0 – 5.0 wt% กลับพบว่าค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ลดต่ำลงอีก

ครั้ง ซึ่งอาจเกิดเนื่องจากการเติมอนุภาคนาโนที่มากขึ้นจะไปขัดขวางความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ เจลอิเล็กโทรไลต์ ทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์เพิ่มมากขึ้นส่งผลทำให้ขนส่งไอออนได้ลดลง ค่าประสิทธิภาพของเซลล์จึงลดลง [36]

ในระบบนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ทั้งสองชนิดนั้น พบว่าค่าประสิทธิภาพของเซลล์ที่สูงที่สุดเท่ากับ 3.92% ในระบบ PVDF-HFP/PEO/1.0 wt% TiO_2 และเท่ากับ 4.13% ในระบบ PVDF-HFP/PEO/1.0 wt% SiO_2 โดยมีค่าประสิทธิภาพของเซลล์ต่ำกว่ากรณีที่ไม่ได้เติมอนุภาคนาโน (4.40%) ประมาณ 11% และ 6.5% ตามลำดับ ดังนั้น จากการศึกษาก่อนหน้านี้ การศึกษาการเตรียมนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมอนุภาคนาโน TiO_2 และ SiO_2 จึงพบว่าอนุภาคนาโน SiO_2 ที่ความเข้มข้น 1 wt% ให้ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีกว่าระบบนาโนคอมพอสิตเจลที่เติมอนุภาค TiO_2 ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคนาโนของ TiO_2 (21 nm) มีขนาดใหญ่กว่า SiO_2 (7 nm) จึงทำให้เกิดการขัดขวาง/ลดความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เจล อันส่งผลให้การส่งผ่านอิเล็กตรอนในการให้แกมโมเลกุลสีย้อมไวแสงที่อยู่ในแคโทดอิเล็กโทรดได้ช้ากว่า [37]



รูปที่ 4.21 พารามิเตอร์ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้นาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ของ TiO_2 เทียบกับเวลา; (a.) ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ (η); (b.) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (J_{sc}); (c.) ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) และ (d.) ฟิล์แฟคเตอร์ (ff)



รูปที่ 4.22 พารามิเตอร์ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้นาโนคอมโพสิตเจลลี่อิเล็กโตรไลต์ของ SiO₂ เทียบกับเวลา; (a.) ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ (% η); (b.) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (J_{sc}); (c.) ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจเปิด (V_{oc}) และ (d.) ฟิล์แฟคเตอร์ (ff)

นอกจากนี้ หากเมื่อนำประสิทธิภาพที่ได้จากเซลล์ทดสอบในโครงการวิจัยนี้ (ประมาณ 4%) ไปเทียบกับประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์การค้ำทั่วไปที่ขายตามท้องตลาดชนิด thin film ซึ่งมีประสิทธิภาพราวๆ 10% นั้น^[38] จะเห็นว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ยังต่ำกว่ามาก ซึ่งจะต้องมีการพัฒนาและวิจัยต่อเนื่องเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของเซลล์สูงขึ้นไปทัดเทียมหรือให้มากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขายทางการค้าในปัจจุบัน

จากการศึกษาความเสถียรของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ระบบนาโนคอมโพสิตเจลลี่อิเล็กโตรไลต์ของอนุภาคนาโน TiO₂ และ SiO₂ พบว่าค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (J_{sc}), ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจเปิด (V_{oc}) และฟิล์แฟคเตอร์ (ff) จะมีค่าเพิ่มขึ้นกับระยะเวลาในช่วง 48 ชั่วโมงแรกหลังการขึ้นรูปเซลล์ และให้ค่าพารามิเตอร์ของเซลล์สูงสุดของระบบนาโนคอมโพสิตเจลลี่อิเล็กโตรไลต์ TiO₂ คือ เวลา 48 ชั่วโมง และสำหรับระบบนาโนคอมโพสิตเจลลี่อิเล็กโตรไลต์ SiO₂ ที่เวลา 0 ชั่วโมง แล้วจะมีค่าลดลงเรื่อยๆเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น ตามลำดับ (ดูรูปที่ 4.20 และ 4.21)

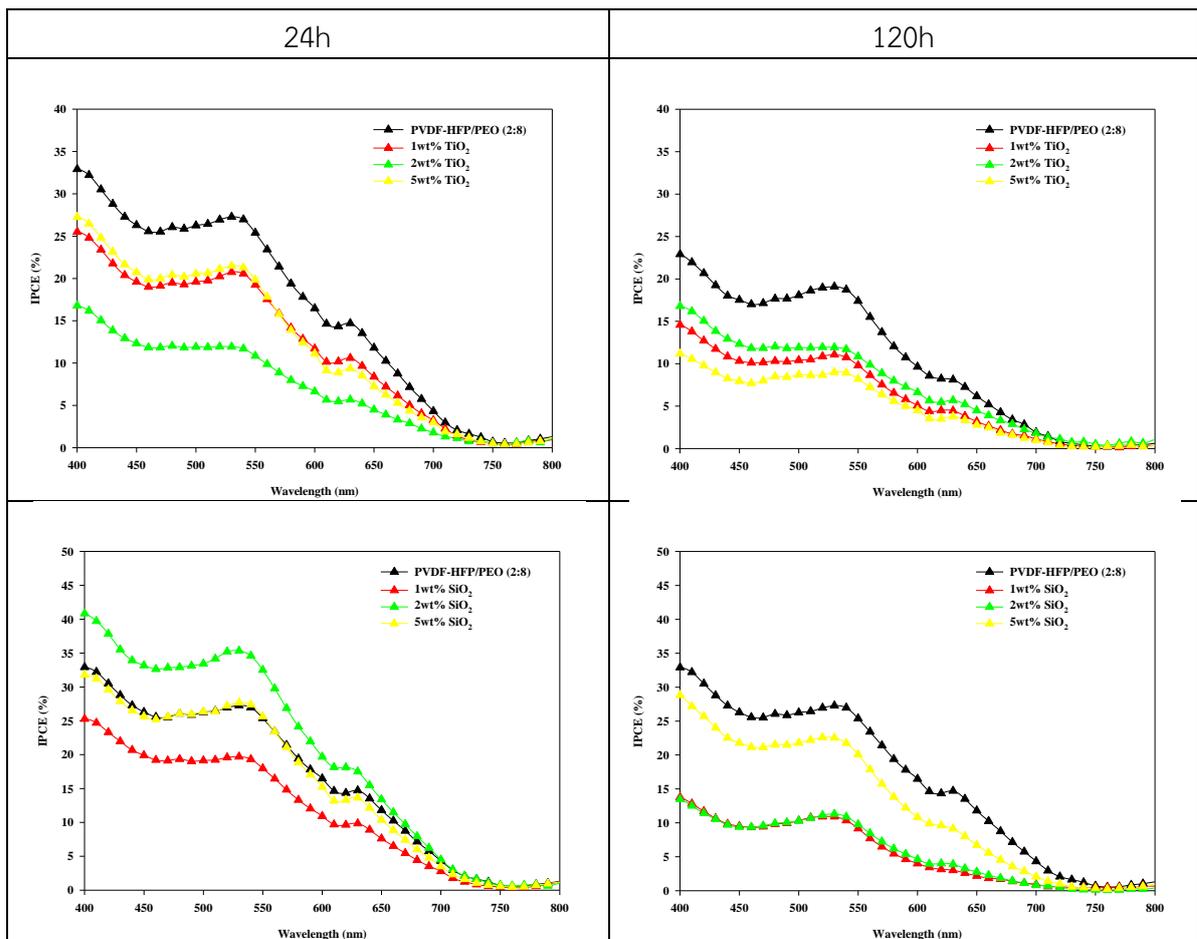
อย่างไรก็ตาม ความเสถียรของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงในทางทฤษฎีแล้วนั้น นาโนคอมโพสิตเจลลี่อิเล็กโตรไลต์และพอลิเมอร์เจลลี่อิเล็กโตรไลต์ จะต้องให้ความเสถียรของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีกว่า

ระบบอิเล็กโทรไลต์ของของเหลว แต่จากการทดลองปรากฏว่าให้ผลตรงกันข้าม เนื่องมาจากกระบวนการในการขึ้นรูปเซลล์ที่ใช้อิเล็กโทรไลต์ของเหลวทำได้ง่ายกว่าและสารมีความหนืดน้อยกว่า ส่วนนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์และพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์มีความยากในการขึ้นรูปเซลล์เป็นเพราะระบบอิเล็กโทรไลต์มีลักษณะเป็นเจลซึ่งมีความหนืดสูงและเคลื่อนที่ได้ช้าทำให้ไม่สามารถฉีดเจลเข้าไปในเซลล์ที่มีรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียง 0.1 mm ได้ง่ายและมักแข็งตัวที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นในการทดลองนี้ จึงได้ทำการทา (casting) เจลอิเล็กโทรไลต์ลงบนพื้นผิว active area ของชั้นฟิล์มบาง TiO_2 โดยตรงแล้วค่อยทำการปิดเซลล์ ซึ่งวิธีการนี้ทำให้มีเจลบางส่วนหลุดออกนอกกรอบของ active area และได้ความสูงที่ไม่สม่ำเสมอ เมื่อนำไปปิดผนึกเซลล์แล้วจึงทำให้เซลล์ติดกันได้ไม่คงทน และเกิดการรั่วไหลของระบบอิเล็กโทรไลต์ในที่สุด ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ประสิทธิภาพเซลล์ลดต่ำลงอย่างรวดเร็วและได้ค่าประสิทธิภาพที่ไม่สูงอย่างที่ควรจะเป็น ซึ่งในขณะที่ทำการทดลองนี้ เราได้พยายามทำหลายๆวิธีในการแก้ไขปัญหาก็ไม่สามารถทำได้ดีมากนักเนื่องจากติดขัดเรื่องเครื่องมือพิเศษที่จะทำให้ขึ้นคักรูปเซลล์ได้อย่างดีเยี่ยม ซึ่งในอนาคตจะต้องแก้ไขปัญหานี้ต่อไปจึงจะทำให้เซลล์มีความเสถียรมากกว่าระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลวได้นอกจากนี้แล้ว การที่มีปริมาณเจลอิเล็กโทรไลต์น้อย อาจเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์ไม่เพิ่มสูงขึ้นเหมือนงานวิจัยอื่นๆ

4.2.3.1 การศึกษาประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (Incident Photon to Current Conversion Efficiency, IPCE) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้นาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์

รูปที่ 4.23 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัม IPCE ของเซลล์ที่ใช้พอลิเมอร์ผสม PVDF-HFP/PEO (2:8) และนาโนคอมพอสิตเจลเป็นระบบอิเล็กโทรไลต์ ที่เวลา 24 และ 120 ชั่วโมงหลังการขึ้นรูปเซลล์จากรูปจะเห็นว่ามีการตอบสนองในช่วงที่กว้าง ระหว่าง 400-600 nm และลดต่ำลงในช่วงความยาวคลื่นสูงๆตั้งแต่ 600-800 nm นอกจากนี้จะเห็นว่าค่า IPCE ที่เวลา 24 ชั่วโมง มีค่าสูงกว่าที่เวลา 120 ชั่วโมง สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเกิดจากการรั่วไหลของระบบอิเล็กโทรไลต์ และค่า IPCE ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้อิเล็กโทรไลต์พอลิเมอร์ผสม PVDF-HFP/PEO (2:8) ให้ค่าสูงกว่า ค่า IPCE ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้นาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ทั้งสองชนิด ซึ่งสอดคล้องกับค่าประสิทธิภาพของเซลล์ที่ลดลงเมื่อเติมอนุภาคนาโนเข้าไป

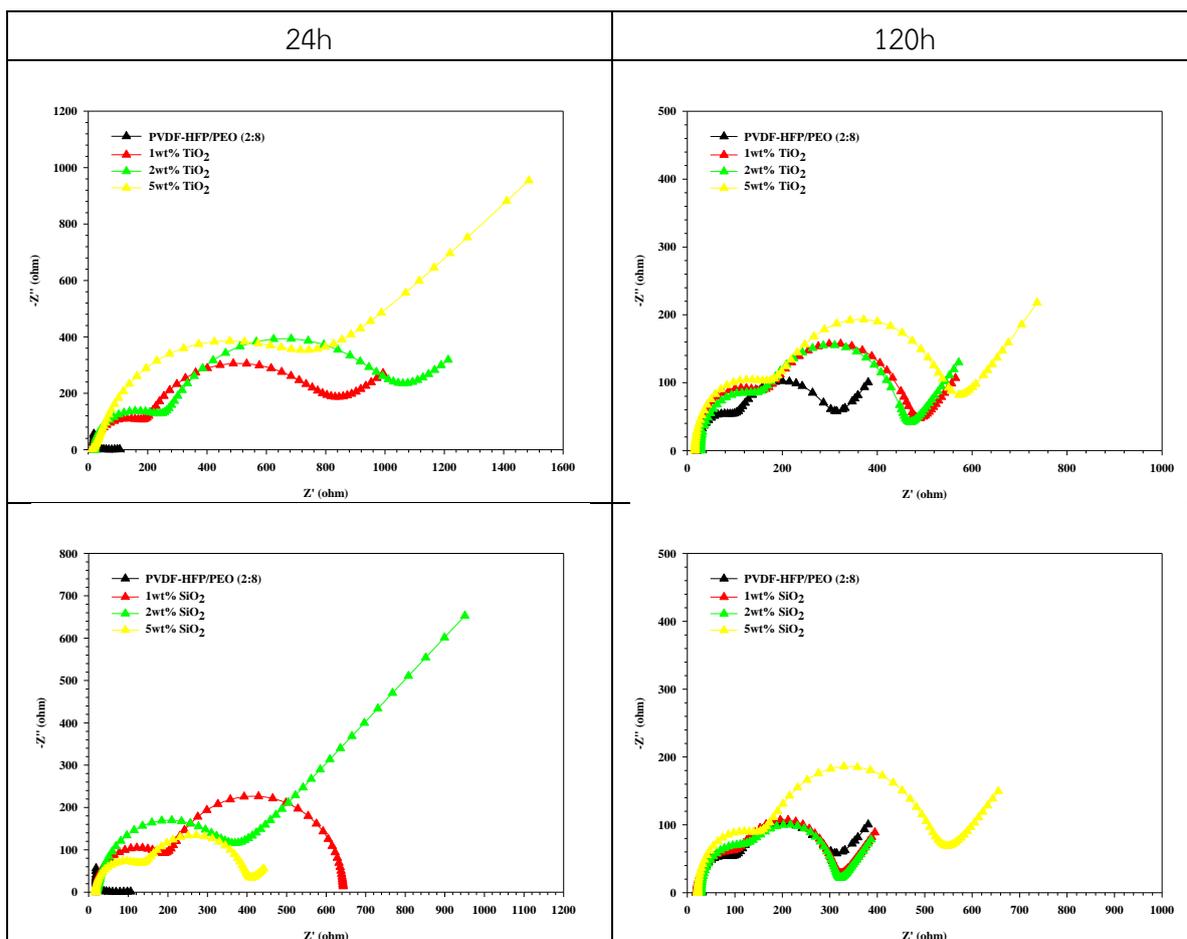
สำหรับระบบนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมด้วยอนุภาคนาโน TiO_2 ให้ค่า IPCE ของเซลล์สูงสุดที่ 22% เมื่อเติม TiO_2 เข้าไปที่ 5 wt% ขณะที่ค่า IPCE ของพอลิเมอร์ผสมเท่ากับ 28% ส่วนระบบนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมด้วยอนุภาคนาโน SiO_2 ให้ค่า IPCE ของเซลล์สูงสุดที่ 36% เมื่อเติม SiO_2 เข้าไปที่ 2 wt% ซึ่งจะใกล้เคียงกับค่า IPCE ของเซลล์ที่ใช้พอลิเมอร์ผสมเป็นอิเล็กโทรไลต์^[39] ค่าประสิทธิภาพ IPCE นี้จะบ่งบอกถึงกระบวนการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากโมเลกุลสีย้อมในสภาวะเร็ว ไปยังแถบตัวนำของโลหะออกไซด์ได้ดีมากแค่ไหน^[40] ซึ่งก็จะพบว่า นาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ที่เติมด้วย SiO_2 ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าการเติมด้วย TiO_2



รูปที่ 4.23 IPCE spectra of DSSCs using nanocomposite gel electrolytes containing various contents of TiO_2 and SiO_2 nanoparticles.

4.2.3.2 การศึกษา Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้นาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์

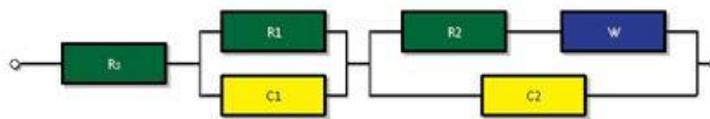
การศึกษา EIS ภายใต้แสงจำลองแสดง 3 semicircles ดังแสดงในรูปที่ 4.24 และค่าพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ได้จากโมเดลจำลองแสดงในตารางที่ 4.8 โดยในช่วงความถี่สูงจะเป็นตัวแทนของการส่งผ่านประจุที่ขั้วไฟฟ้าแพลตตินัม ($R_{ct,pt}$) ส่วนความถี่ช่วงกลางจะเกี่ยวข้องกับการขนส่งประจุ (R_t)/การเกิดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอน (R_{ct}) ที่รอยต่อระหว่าง TiO_2 กับอิเล็กโทรไลต์ และช่วงความถี่ต่ำจะบ่งบอกถึงการแพร่ของไอออนในอิเล็กโทรไลต์ โดยปกติแล้ว EIS สามารถจำลองแบบเทียบกับวงจรเทียบเท่าได้ (equivalent circuit) ดังรูปที่ 4.25 โดยอาศัยหลักการ transmission line model^[41-43] การมีค่าความต้านทานที่ต่ำก็จะมีผลต่อการขนส่งอิเล็กตรอนได้สูงมาก และจะทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์ที่สูงตามไปด้วย ส่วนค่า Ohmic serial resistance (R_s) จะเกี่ยวข้องกับค่าความต้านทานของกระจกนำไฟฟ้า FTO จากรูปที่ 4.24 จะเห็นว่าเซลล์ที่ใช้พอลิเมอร์เจลผสมเป็นอิเล็กโทรไลต์ให้ค่า R_{ct2} และ R_{diff} ที่ต่ำกว่าเซลล์ที่ใช้นาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ และค่า R_s ที่ต่ำกว่าด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.24 EIS of DSSCs using nanocomposite gel electrolytes containing various contents of TiO₂ and SiO₂ nanoparticles.

ตารางที่ 4.8 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองแบบ EIS เทียบกับวงจรเทียบเท่า

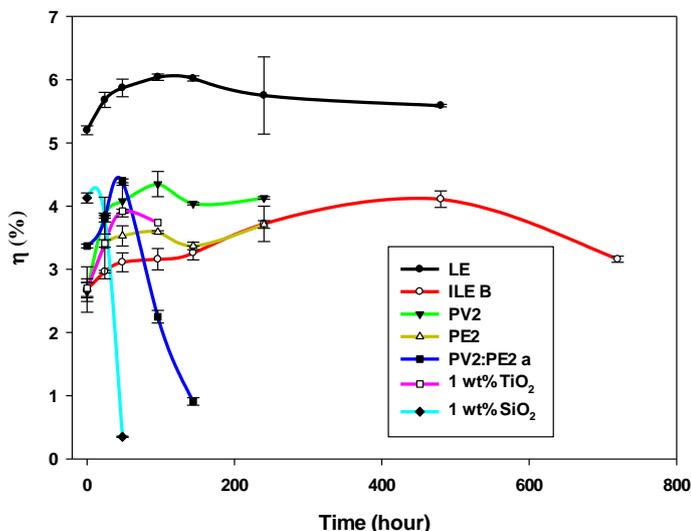
Sample (24h)	R^2	R_s	R_1	R_2	C_1	C_2	w
PVDF-HFP/PEO 2:8	0.991877	18.68	115.6	278.46	15.74×10^{-5}	1.4×10^{-6}	-9.2×10^{-5}
1wt% TiO ₂	0.979948	17.91	180.86	560.56	2.16×10^{-5}	2.2×10^{-4}	6.9×10^{-3}
2wt% TiO ₂	0.992507	20.33	664.51	233.22	2.9×10^{-4}	1.74×10^{-5}	5.8×10^{-3}
5wt% TiO ₂	0.868427	11.22	526.08	0.65	3.76×10^{-5}	2.22×10^{-16}	8.7×10^{-4}
1wt% SiO ₂	0.99004	18.37	182.34	442.57	2.43×10^{-5}	3.5×10^{-4}	-2.57×10^7
2wt% SiO ₂	0.934241	18.01	280.25	2.22×10^{-16}	3.52×10^{-5}	1.8×10^{-11}	2.4×10^{-3}
5wt% SiO ₂	0.994865	17.48	249.06	122.74	1.97×10^{-4}	1.6×10^{-5}	3.2×10^{-2}
Sample (120h)	R^2	R_s	R_1	R_2	C_1	C_2	w
PVDF-HFP/PEO 2:8	0.986354	19.92	84.85	184.11	1.81×10^{-5}	1.52×10^{-4}	0.011
1wt% TiO ₂	0.993035	18.33	150.14	293.14	1.6×10^{-5}	1.59×10^{-4}	0.023
2wt% TiO ₂	0.988241	27.57	283.32	131.94	8.93×10^{-5}	1.03×10^{-5}	0.018
5wt% TiO ₂	0.98733	16.13	337.73	167.39	1.44×10^{-4}	1.36×10^{-5}	0.01
1wt% SiO ₂	0.989235	20.45	88.25	198.71	1.62×10^{-5}	1.04×10^{-4}	0.027
2wt% SiO ₂	0.989718	28.49	101.38	179.79	1×10^{-5}	6.41×10^{-5}	0.028
5wt% SiO ₂	0.989475	21.71	147.37	348.07	1.73×10^{-5}	1.46×10^{-4}	0.015



รูปที่ 4.25 Equilibrium circuit (วงจรเทียบเท่า) ที่ใช้สำหรับการฟิตโมเดลในการศึกษา

4.2.4 การศึกษาความเสถียรของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมโดยระบบอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ

การศึกษาความเสถียรหรือความคงทนของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมได้ต่ออายุการใช้งาน แสดงดังรูปที่ 4.26 พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมขึ้นด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆกันจะให้ผลความเสถียรที่ต่างกัน โดยสาเหตุหลักที่ทำให้ได้ผลที่แตกต่างกันนี้เกิดเนื่องจากการประกอบเซลล์ที่ไม่สามารถปิดผนึกเซลล์ได้ดี อันเป็นผลมาจากการฉีดยาอิเล็กทรอนิกส์เข้าไปเซลล์นั้นทำได้ค่อนข้างยากและทำให้เกิดแรงดันต่อเซลล์ที่ค่อนข้างมาก เมื่อต้องให้ความร้อนแก่เซลล์ขณะที่ฉีดยาอิเล็กทรอนิกส์เข้าไปด้วย ทำให้ระบบกาวยึดติดของเซลล์ไม่คงทนมากนัก



รูปที่ 4.26 ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเตรียมด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ กับเวลา

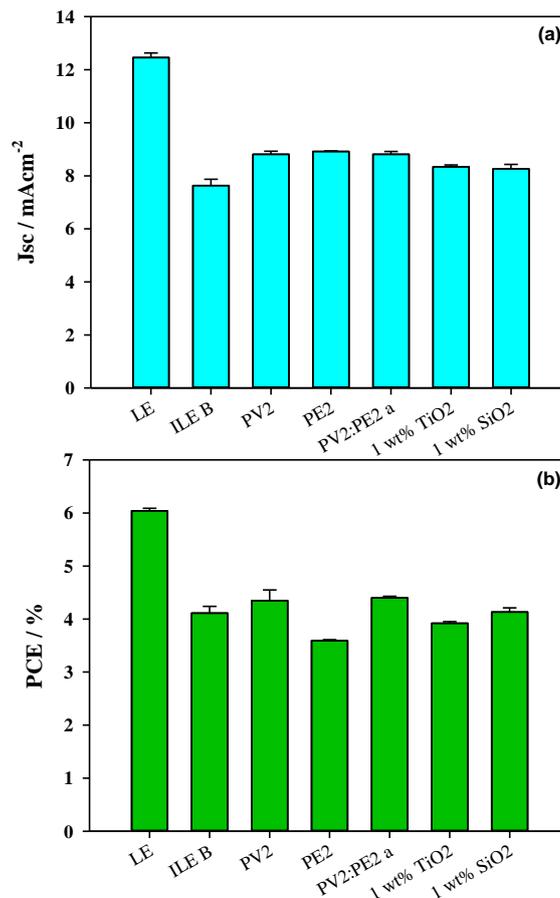
อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาครั้งนี้วิธีการที่ใช้ในการปิดผนึกเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ของเหลวไอออนิก (ILE B) สามารถให้ความคงทนของเซลล์ได้ยาวนานกว่า 700 ชั่วโมง โดยประสิทธิภาพของเซลล์ไม่ลดลงจากตอนเริ่มต้นขึ้นรูปเซลล์ใหม่ๆ ซึ่งช่วยยืนยันได้ว่า หากประกอบ/ขึ้นรูปเซลล์แสงอาทิตย์ได้นั้น เราสามารถยืดอายุการใช้งานเซลล์อาทิตย์ที่ใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์เป็นชนิดพอลิเมอร์เจลได้อย่างยาวนานโดยประสิทธิภาพยังคงใกล้เคียงเดิมกับเมื่อครั้งขึ้นรูปเสร็จใหม่ๆ แต่โดยส่วนมากแล้วระบบพอลิเมอร์เจลอิเล็กทรอนิกส์จะประกอบเซลล์ได้ค่อนข้างยากและมีปัญหาเรื่องการยึดติดกันของเซลล์

ทำให้เซลล์เสียเป็นส่วนมากเมื่อใช้เวลานานขึ้น จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพและความคงทนต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ดังนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพัฒนาการขึ้นรูปเซลล์แสงอาทิตย์ให้ดีกว่านี้

เมื่อนำเอาสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีที่สุดของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ระบบอิเล็กโทรไลต์ต่างๆมาเปรียบเทียบกับกัน จะได้ผลดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.26 จากตารางและรูปที่ได้ จะสังเกตเห็นได้ว่าค่า J_{sc} ของระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลวมีค่าสูงสุดที่ $12.46 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ และจะลดลงเป็น $7.6 - 8.9 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ เมื่อเป็นระบบของเหลวไอออนิก และพอลิเมอร์เจลผสม หรือนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ ทั้งนี้เนื่องมาจากว่า มีความหนืดที่สูงกว่าระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลว จึงส่งผลให้ได้ค่าประสิทธิภาพมีแนวโน้มเป็นไปในลักษณะเดียวกัน (ดูรูปที่ 4.27) โดยค่าประสิทธิภาพของเซลล์ที่ได้จากระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลวเท่ากับ 6.04% แต่เมื่อเปลี่ยนมาใช้ระบบอิเล็กโทรไลต์ไอออนิก พอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์ และนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ แล้วค่าประสิทธิภาพของเซลล์จะตกลงมาอยู่ในช่วงประมาณ 3.6 - 4.40% ซึ่งจะลดต่ำกว่าระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลวประมาณ 27 - 40% อันเนื่องมาจากความหนืดของระบบอิเล็กโทรไลต์ที่เพิ่มมากขึ้นและที่สำคัญคือ ผลของการฉีดพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์เข้าไปในขณะขึ้นรูปเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ทำให้อิเล็กโทรไลต์เจลเข้าไปในเซลล์ได้ค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลว อันอาจส่งผลให้ระบบอิเล็กโทรไลต์ทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ และขณะเดียวกันก็ทำให้เซลล์ที่ประกอบขึ้นหลุดออกจากกันได้ง่าย เนื่องมีการยึดติดต่ำเพราะพอลิเมอร์เจลเปื้อนเข้าไปอยู่ที่ผิวหน้าสัมผัสของ adhesive agent เซลล์ที่ขึ้นรูปได้จึงไม่เสถียรมากนัก

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบสมบัติทางด้านไฟฟ้าของเซลล์ที่มีประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ (η) ที่สูงที่สุดทั้งหมดของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

Sample	I_{sc} (mA)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (v)	ff	η (%)
LE	1.99±0.03	12.46±0.17	0.73±0.01	0.66±0.01	6.04±0.05
ILE B	1.22±0.03	7.63±0.24	0.79±0.01	0.70±0.08	4.11±0.13
PV2	1.41±0.02	8.81±0.12	0.79±0.00	0.62±0.04	4.35±0.20
PE2	1.43±0.00	8.92±0.02	0.79±0.00	0.51±0.00	3.59±0.02
PV2:PE2 a	1.41±0.02	8.81±0.11	0.78±0.00	0.64±0.00	4.40±0.03
1 wt% TiO ₂	1.33±0.02	8.34±0.07	0.78±0.00	0.62±0.00	3.92±0.03
1 wt% SiO ₂	1.32±0.03	8.26±0.17	0.77±0.00	0.65±0.01	4.13±0.08



รูปที่ 4.27 (a) ความหนาแน่นกระแส และ (b) ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีที่สุดในระบบอิลีกโตรไลต์ต่างๆ

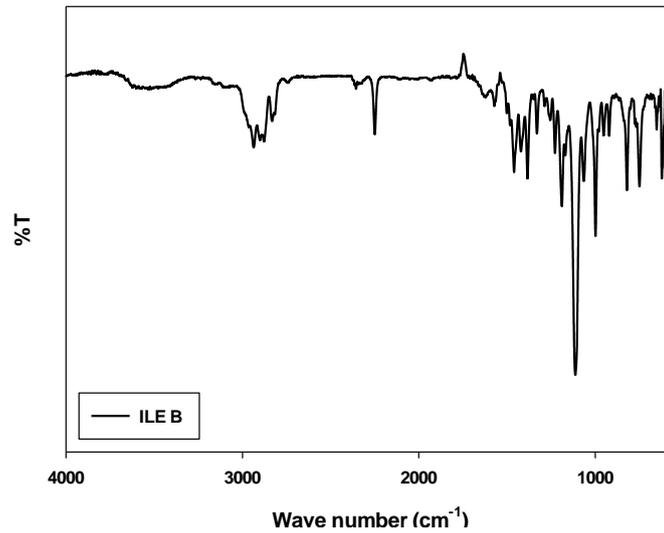
4.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์และศึกษาสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์เจลอิลีกโตรไลต์

4.3.1 ผลการศึกษาการดูดกลืนคลื่นแสงอินฟราเรดโดยใช้เทคนิค FT-IR

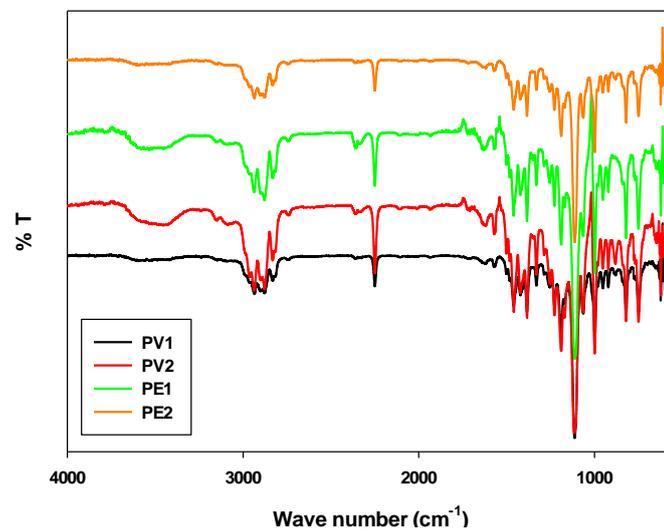
FT-IR spectra ของของเหลวไอออนิก (ILE) และพอลิเมอร์เจลอิลีกโตรไลต์ (PVDF-HFP (PV) และ PEO (PE)) ที่ความเข้มข้น 5 (1) และ 10 wt% (2) แสดงดังรูปที่ 4.28 และ 4.29 ตามลำดับ จากรูปพบว่า พีคการดูดกลืนที่ $\sim 2900 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นการสั่นแบบ stretching ของพันธะ C-H ของ PM (II) และ MBI ให้พีคการดูดกลืนที่ $\sim 2240 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเกิดจากการสั่นของ $\text{C}\equiv\text{N}$ ของโมเลกุล 3-Methoxypropionitrile และ Varenitrile ที่ใช้เป็นตัวทำละลาย สำหรับในช่วงที่ต่ำกว่า 2000 cm^{-1} มีพีคจำนวนมาก ระบุหมู่ฟังก์ชันก็ได้ค่อนข้างยาก แต่สำหรับของพอลิเมอร์เจลผสมอิลีกโตรไลต์ของ PVDF-HFP/PEO (ดูรูปที่ 4.30) พบพีคการดูดกลืนที่ $\sim 1180 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นการสั่นแบบ bending ของพันธะ C-F ของ PVDF-HFP และพบพีคการดูดกลืนของพันธะ C-O-C ที่ $\sim 1100 \text{ cm}^{-1}$ ของ PEO

รูปที่ 4.31 และ 4.32 แสดง FT-IR spectra ของนาโนคอมพอสิตเจลอิลีกโตรไลต์ที่เติมด้วยอนุภาคนาโน TiO_2 และ SiO_2 ตามลำดับ จากรูปจะพบว่าพีคการดูดกลืนที่ $\sim 950 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบ stretching ของ Ti-O และ Si-O ดังแสดงตัวอย่างการวิเคราะห์พีค FT-IR spectra ในรูปที่ 4.33

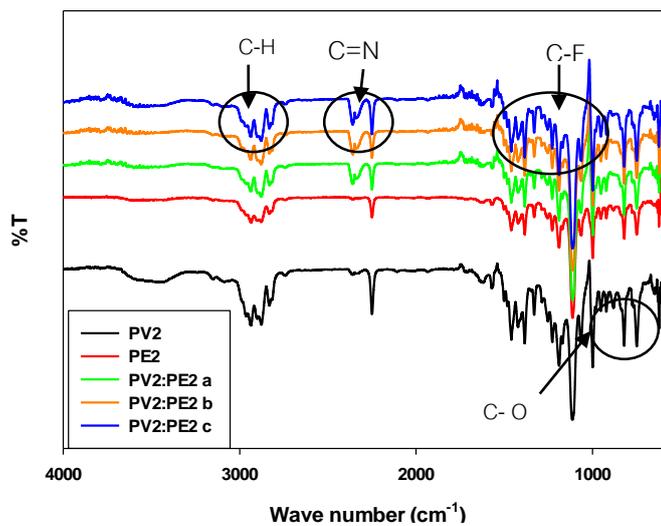
ซึ่งสอดคล้องกับผลของ FT-IR ของ PEO และ PVDF-HFP ที่มีนักวิจัยอื่นได้รายงานไว้ดังรูปที่ 4.34^[44] ดังนั้นจากวิเคราะห์พีคต่างๆที่เกิดขึ้นในระบบพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์และนาโนคอมพอสิต์อิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมขึ้น ช่วยยืนยันได้ว่าสามารถเตรียมพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์ได้ตามที่ต้องการ



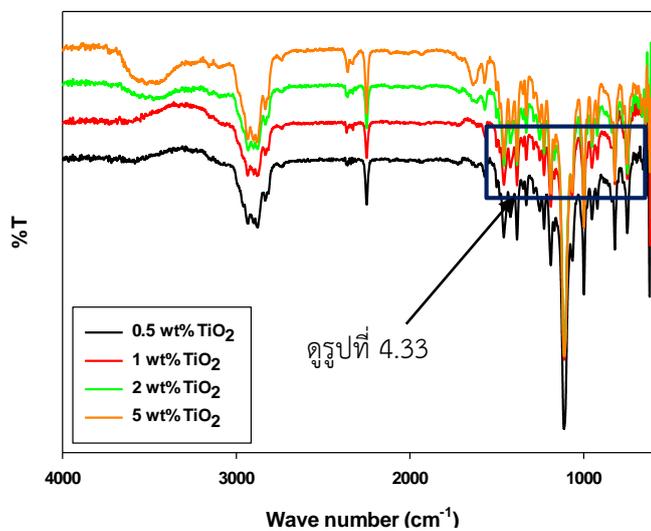
รูปที่ 4.28 FT-IR spectrum of ionic liquid electrolyte



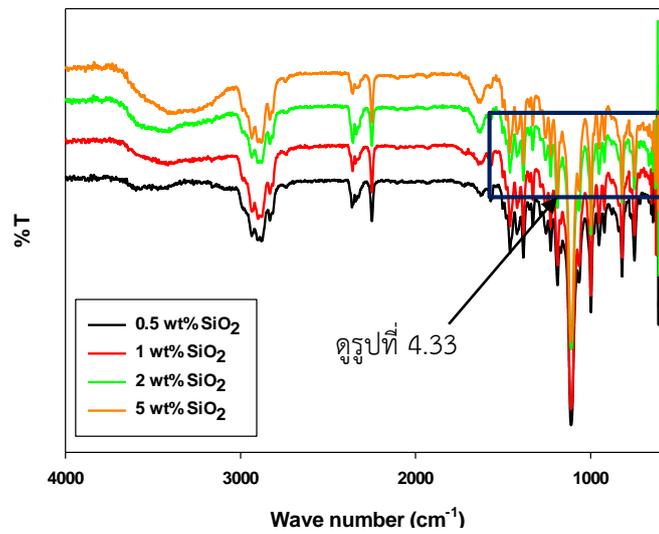
รูปที่ 4.29 FT-IR spectra of PVDF-HFP (PV) and PEO (PE) polymer gel electrolytes at 5 (1) and 10 wt% (2).



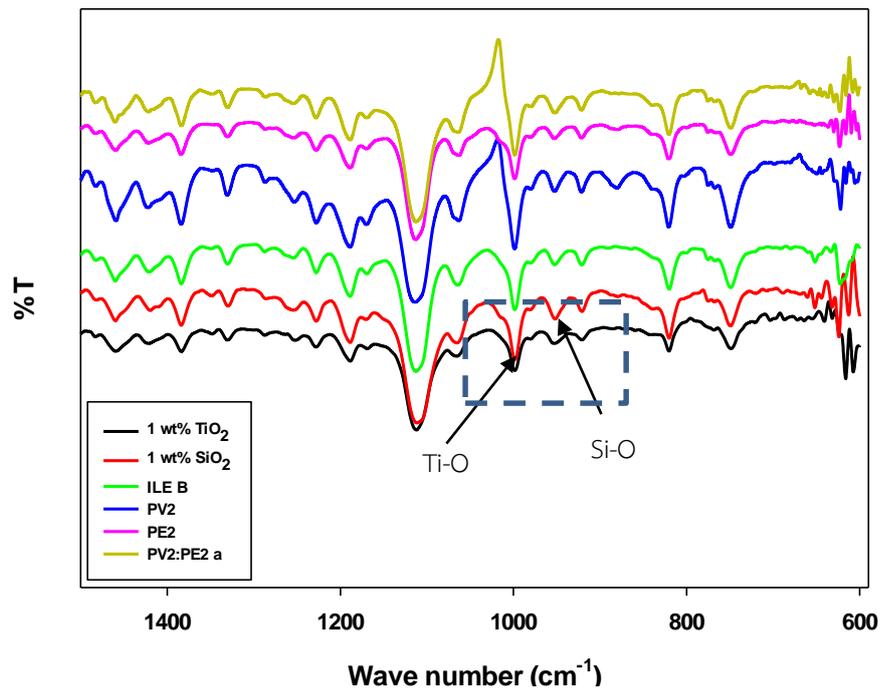
รูปที่ 4.30 FT-IR spectra of PVDF-HFP/PEO gel electrolytes at different compositions.



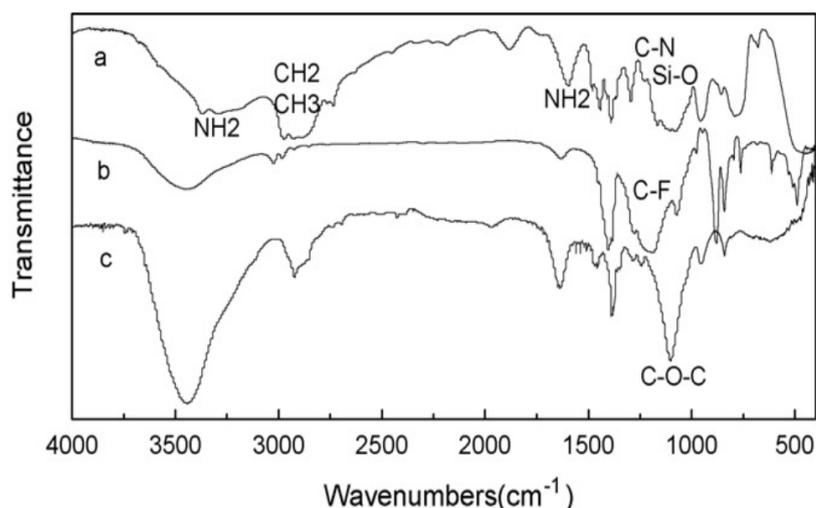
รูปที่ 4.31 FT-IR spectra of nanocomposite gel electrolyte containing TiO_2 nanoparticles at 0.5 - 5 wt%.



รูปที่ 4.32 FT-IR spectra of nanocomposite gel electrolyte containing SiO₂ nanoparticles at 0.5 - 5 wt%.



รูปที่ 4.33 FT-IR spectra of nanocomposite gel electrolytes containing 1 wt% TiO₂ and 1 wt% SiO₂



รูปที่ 4.34 FT-IR spectra ของการวิเคราะห์พอลิเมอร์ a. PVDF-HFP และ b. PEO^[44]

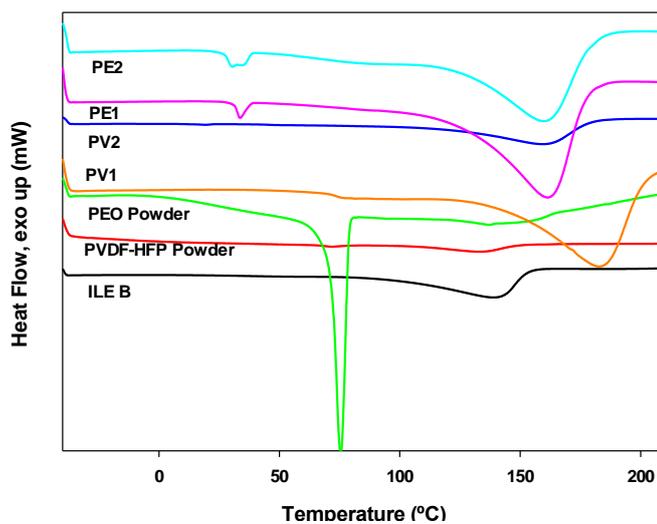
4.3.2 การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC และ TGA

4.3.2.1 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

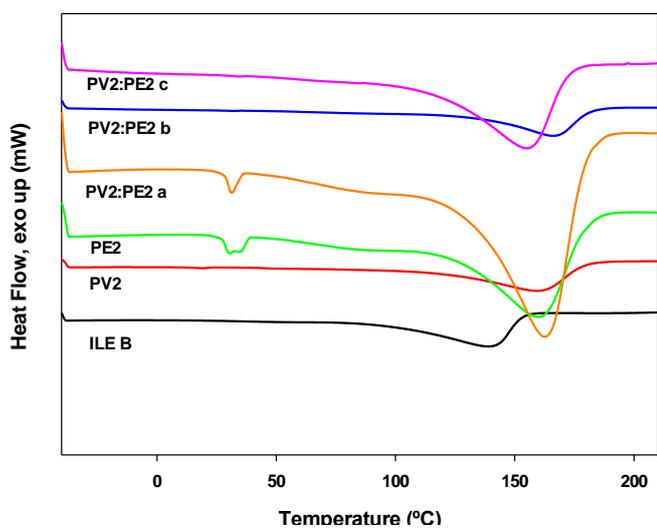
สมบัติทางความร้อนของอิเล็กโตรไลต์ของเหลวไอออนิก (ILE B) ของพอลิเมอร์บริสุทธิ์ PVDF-HFP (PV) และ PEO (PE) ความเข้มข้น 5 wt% PVDF-HFP (PV1), 10 wt% PVDF-HFP (PV2), 5 wt% PEO (PE1), 10 wt% PEO (PE2) และพอลิเมอร์เจลาผสมที่มีความเข้มข้น 10 wt% PVDF-HFP/PEO (PV2:PE2 อัตราส่วน a = 2:8, b = 5:5, c = 8:2) และนาโนคอมโพสิตเจลาอิเล็กโตรไลต์ของ TiO₂ และ SiO₂ ที่ความเข้มข้น 0.5, 1, 2, 5 wt% ตามลำดับ ได้รับการทดสอบด้วยเทคนิค DSC ในช่วงอุณหภูมิ -40 °C ถึง 220 °C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนและอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 °C/min

DSC เทอร์โมแกรมของตัวอย่างพอลิเมอร์บริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ แสดงดังรูปที่ 4.35 - 4.38 จากรูปที่ 4.35 พบว่า ILE B มีค่า $T_m = 139$ °C ขณะที่ PVDF-HFP และ PEO มี T_m อยู่ที่ 130 และ 135 °C ตามลำดับ และเมื่อเตรียมเป็นพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ที่มีความเข้มข้น 5 และ 10 wt% พบว่ามีค่า T_m เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 158 - 161 °C ซึ่งอาจเกิดจากอันตรกิริยาที่เพิ่มขึ้นหลังจากละลายในของเหลวไอออนิกแล้ว

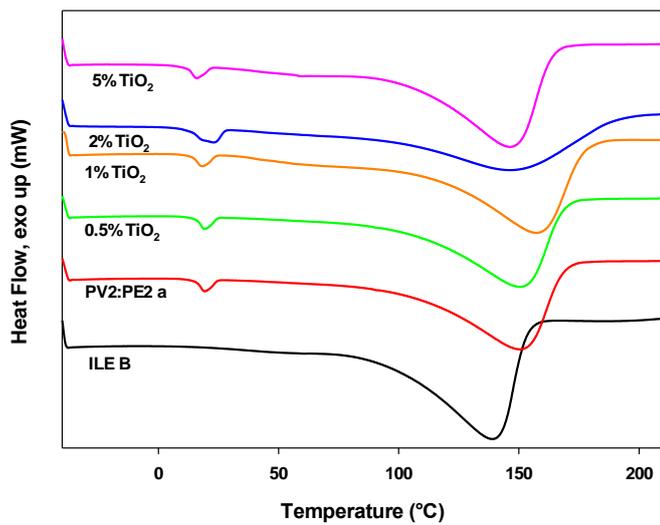
สำหรับระบบพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ผสมทั้ง 3 อัตราส่วน (2:8, 5:, 8:2) พบว่ามีค่า T_m เพิ่มขึ้นเล็กน้อยในตัวอย่างของผสมอัตราส่วน 2:8 (163 °C) และ 5:5 (167 °C) ส่วนอัตราส่วน 8:2 พบว่ามี T_m ลดลงกว่าพอลิเมอร์เจลาบริสุทธิ์ (154 °C) สำหรับตัวอย่างที่เติมอนุภาคนาโน TiO₂ พบว่าสารพอลิเมอร์เจลาอิเล็กโตรไลต์มี T_m ลดลงเล็กน้อย โดยมีค่าอยู่ในช่วง 147 - 157 °C ซึ่งต่ำกว่ากรณีที่ไม่เติมเล็กน้อย ส่วนตัวอย่างที่มีการเติมอนุภาคนาโน SiO₂ มีค่าอยู่ในช่วง 125 - 152 °C ซึ่งสาเหตุที่ T_m ของระบบนาโนคอมโพสิตเจลาอิเล็กโตรไลต์ต่ำกว่ากรณีพอลิเมอร์เจลาอิเล็กโตรไลต์เล็กน้อย อาจเนื่องมาจากอนุภาคนาโนเข้าขัดขวางการเกิดผลึกและไปลดอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างพอลิเมอร์เจลา จึงให้ T_m ที่ต่ำกว่า ข้อมูลทางความร้อนที่ได้วิเคราะห์ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมรวบรวมไว้ในตารางที่ 4.10



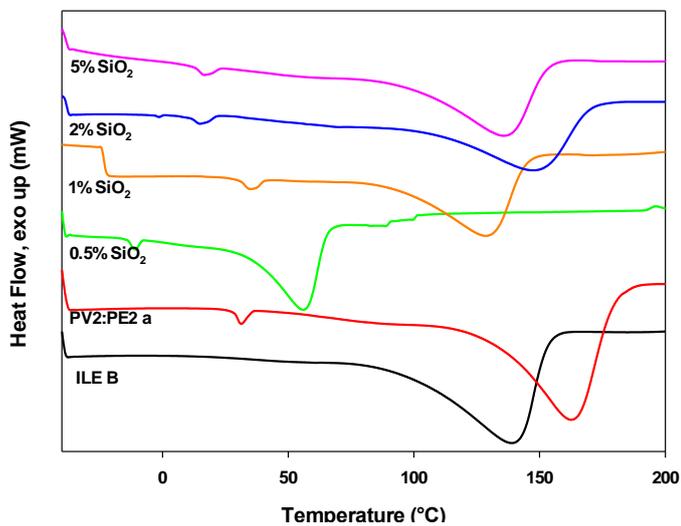
รูปที่ 4.35 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์บริสุทธิ์และพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์



รูปที่ 4.36 DSC เทอร์โมแกรม พอลิเมอร์ผสมอิเล็กโตรไลต์ที่อัตราส่วนต่างๆกัน



รูปที่ 4.37 DSC เทอร์โมแกรม TiO₂ นาโนคอมโพสิตพอลิเอทิลีนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ



รูปที่ 4.38 DSC เทอร์โมแกรม SiO₂ นาโนคอมโพสิตพอลิเอทิลีนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ตารางที่ 4.10 พารามิเตอร์ที่ได้จาก DSC thermograms ของอิเล็กโตรไลต์ของเหลวไอออนิก พอลิเมอร์บริสุทธิ์ พอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์และนาโนคอมโพสิตเจลอิเล็กโตรไลต์ ตามลำดับ

Sample	พารามิเตอร์ที่ได้จาก DSC Thermograms								
	Peak ที่ 1 (°C)			Peak ที่ 2 (°C)			Peak ที่ 3 (°C)		
	Onset	Peak	Endset	Onset	Peak	Endset	Onset	Peak	Endset
ILE	-	-	-	30.10	50.12	65.15	94.68	139.57	152.61
PV Powder	-	-	-	53.57	60.79	69.73	97.32	130.09	148.00
PE Powder	-	-	-	59.88	59.88	68.73	119.50	134.71	165.27
PV1	-	-	-	-	-	-	199.57	157.70	176.00
PV2	13.43	19.08	42.27	42.27	48.73	56.43	115.59	159.21	178.87
PE1	-	-	-	15.11	18.10	21.77	115.67	161.30	179.44
PE2	10.75	14.11	23.61	35.97	72.09	102.66	109.96	159.89	181.87
PV2:PE2 a	11.91	15.07	19.80	47.12	72.04	100.77	119.58	162.62	181.91
PV2:PE2 b	11.20	15.76	19.29	63.54	65.71	70.65	129.59	166.62	183.96
PV2:PE2 c	-	-	-	14.39	18.63	21.42	105.32	154.25	173.64
0.5 wt% TiO ₂	-	-	-	15.45	19.26	24.55	99.29	150.45	168.14
1 wt% TiO ₂	13.91	18.08	23.82	34.78	56.73	90.79	113.16	157.46	176.37
2 wt% TiO ₂	-	-	-	12.88	22.91	27.63	84.64	147.38	189.00
5 wt% TiO ₂	-	-	-	15.45	99.29	24.55	99.26	150.45	168.14
0.5 wt% SiO ₂	-	-	-	13.41	17.41	101.61	101.61	152.02	170.00
1 wt% SiO ₂	-	-	-	14.43	18.79	25.57	85.27	125.50	142.25
2 wt% SiO ₂	10.75	14.76	21.33	50.91	69.55	75.84	106.41	148.25	168.92
5 wt% SiO ₂	12.58	16.45	22.92	37.92	57.93	76.26	97.19	136.23	152.30

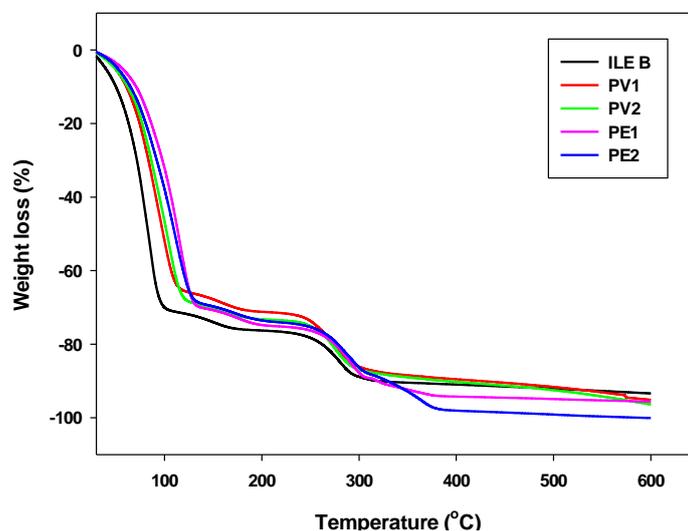
4.3.2.2 การทดสอบความเสถียรทางความร้อนด้วย Thermogravimetric Analysis (TGA)

ความเสถียรทางความร้อนของอิเล็กโตรไลต์ของเหลวไอออนิก (ILE) และพอลิเมอร์ผสมอิเล็กโตรไลต์ของเหลวไอออนิกที่ความเข้มข้น 5 wt% PVDF-HFP (PV1), 10 wt% PVDF-HFP (PV2), 5 wt% PEO (PE1), 10 wt% PEO (PE2), 10 wt% PVDF-HFP/PEO (PV2:PE2 อัตราส่วน a = 2:8, b = 5:5, c = 8:2 โดยน้ำหนัก) นาโนคอมโพสิตเจลอิเล็กโตรไลต์ของ TiO₂ และ SiO₂ ที่ความเข้มข้น 0.5, 1, 2, 5 wt% ตามลำดับ ได้รับการทดสอบด้วยเทคนิค TGA จากอุณหภูมิห้องถึง 700 °C ภายใต้บรรยากาศ N₂ อัตราการให้ความร้อนเป็น 10°C/min และได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.39 – 4.42 และตารางที่ 4.11 ซึ่งจากเทอร์โมแกรมของตัวอย่างอิเล็กโตรไลต์ทั้งหมด พบว่าตัวอย่าง ILE B, PV1, PE1, PE1, PE2, PV2:PE2 และนาโนคอมโพสิตเจลอิเล็กโตรไลต์ของ TiO₂ และ SiO₂ มีพฤติกรรมทางความร้อนที่คล้ายคลึงกันโดยสังเกตได้จาก TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ช่วงแรกอุณหภูมิ 90 - 100 °C น้ำหนักของพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์และอิเล็กโตรไลต์ของเหลวไอออนิกจะลดลงในช่วงอุณหภูมิเริ่มต้น -

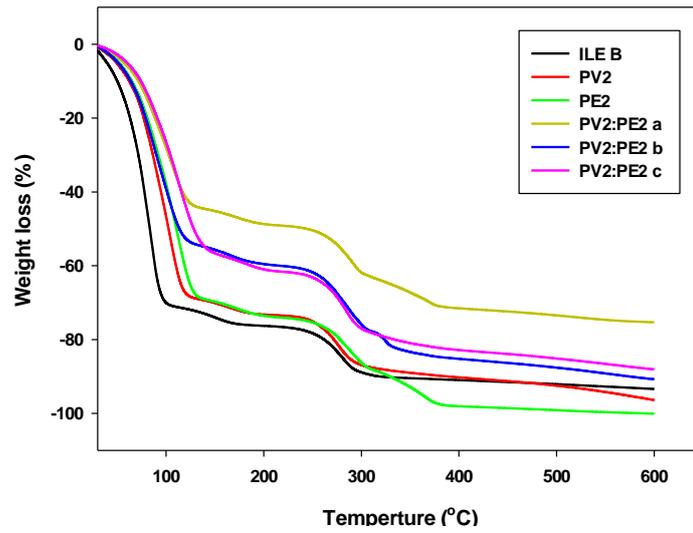
100 °C ซึ่งเกิดการสลายตัวตัวทำละลายของเหลวและอิเล็กโทรไลต์ของเหลวไอออนิก และในช่วงที่ 2 จะเป็นการสลายตัวของพอลิเมอร์ในช่วงอุณหภูมิ 250 - 350 °C ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบความเสถียรต่อความร้อนระหว่างพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์กับ ILE B พบว่าพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์มีความเสถียรต่อความร้อนสูงกว่า ILE B และพบว่าพอลิเมอร์เจลผสมก็มีความเสถียรต่อความร้อนสูงกว่าเจลพอลิเมอร์บริสุทธิ์ โดยเฉพาะพอลิเมอร์เจลผสมอัตราส่วน 2:8 แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าการเติมอนุภาคนาโน TiO_2 และ SiO_2 เข้าไปทำให้ความเสถียรต่อความร้อนของ นาโนคอมโพสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ลดลงเล็กน้อยซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากเทคนิค DSC

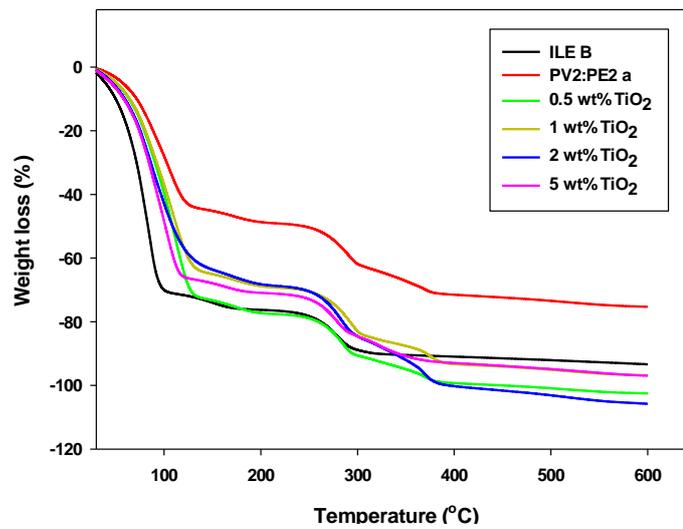
สำหรับข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ TGA Thermograms ทั้งหมดสรุปไว้ในตารางที่ 4.11 ซึ่งประกอบด้วย อุณหภูมิการสลายตัวที่น้ำหนักสารหายไป 5% (T_{d5}), 10% (T_{d10}), T_{onset} และอุณหภูมิที่มีอัตราเร็วสูงสุดในการสลายตัว (T_{max}) พบว่าค่าความเข้มข้นและอัตราส่วนผสมไม่มีผลความเสถียรต่อความร้อนอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากให้เทอร์โมแกรมที่คล้ายคลึงกัน



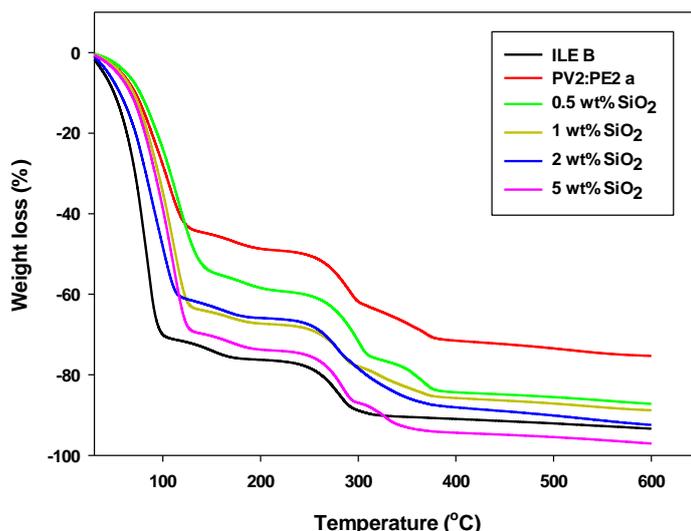
รูปที่ 4.39 TGA เทอร์โมแกรมอิเล็กโทรไลต์ของเหลวไอออนิกและพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์



รูปที่ 4.40 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์และพอลิเมอร์ผสมอิเล็กโตรไลต์ที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.41 TGA เทอร์โมแกรมของ TiO_2 นาโนคอมโพสิตเจลอิเล็กโตรไลต์



รูปที่ 4.42 TGA เทอร์โมแกรมของ SiO₂ นาโนคอมโพสิตเจลอิเล็กโตรไลต์

ตารางที่ 4.11 พารามิเตอร์ที่ได้จาก TGA thermograms ของอิเล็กโตรไลต์ของเหลวไอออนิก พอลิเมอร์ อิเล็กโตรไลต์และนาโนคอมโพสิตเจลอิเล็กโตรไลต์ ตามลำดับ

Sample	พารามิเตอร์ที่ได้จาก TGA Thermograms (°C)			
	T _{d5}	T _{d10}	T _{onset}	T _{max}
ILE	39.35	50.26	62.0, 254.3	86.4, 147.6, 281.6
PV1	49.39	60.67	67.6, 248.4	96.2, 158.9, 274.1
PV2	49.39	62.32	63.7, 247.0	96.0, 159.8, 269.7
PE1	56.45	70.96	77.7, 258.4	102.2, 172.9, 284.4, 314.6
PE2	52.00	65.05	67.9, 257.9	104.2, 166.1, 284.4, 353.2
PV2:PE2 a	57.34	71.84	64.5, 258.9	97.2, 166.8, 287.5, 358.2
PV2:PE2 b	50.69	64.14	61.5, 252.9	94.4, 162.7, 270.5, 282.7, 322.0
PV2:PE2 c	60.06	74.47	71.3, 255.8	106.3, 177.1, 279.5
0.5 wt% TiO ₂	50.69	64.12	68.4, 256.4	104.3, 169.4, 279.8, 367.6
1 wt% TiO ₂	51.13	65.05	64.54, 265.7	100.6, 170.3, 289.4, 372.5
2 wt% TiO ₂	46.78	59.61	56.5, 254.7	87.8, 275.6, 359.9
5 wt% TiO ₂	45.50	58.70	62.6, 252.2	95.8, 159.3, 274.6, 320.4
0.5 wt% SiO ₂	62.77	76.98	68.6, 269.9	108.4, 177.9, 295.6, 354.3
1 wt% SiO ₂	56.45	70.05	72.4, 257.3	104.6, 279.2, 318.1, 354.0
2 wt% SiO ₂	44.26	56.02	58.8, 242.3	91.1, 269.8
5 wt% SiO ₂	53.34	66.85	70.0, 259.3	103.5, 166.9, 278.4, 324.7

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมชั้นฟิล์มบาง TiO_2 และศึกษาการเตรียมนาโนคอมโพสิตเจลอิเล็กโทรไลต์โดยใช้พอลิเมอร์ผสม PVDF-HFP/PEO เป็นเมทริกซ์เฟส และเติมด้วยอนุภาคนาโนของ TiO_2 และ SiO_2 ซึ่งวัตถุประสงค์หลักของการศึกษาคือเพื่อปรับปรุงความเสถียรของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงให้มีมากขึ้นและสามารถใช้งานได้ยาวนานมากขึ้น พร้อมทั้งศึกษาสมบัติทางกายภาพต่างๆของพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์ที่ได้เตรียมขึ้น โดยได้ผลที่สามารถสรุปเป็นข้อๆได้ดังนี้

5.1 สามารถเตรียมจำนวนชั้นฟิล์มบางของ TiO_2 ที่เหมาะสำหรับการศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง คือ 6+2L ชั้น (20 nm TiO_2 transparent paste + 400 nm TiO_2 Light scattering paste) ซึ่งให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์ (PCE) เท่ากับ 6.04% เมื่อศึกษาประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งขึ้นกับความยาวคลื่นแสง (IPCE) พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ขึ้นรูปด้วยชั้นฟิล์มบาง TiO_2 แบบ 6+2L ชั้น ก็ให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์ที่กว้างและสูงใกล้เคียงกับกรณีเซลล์ที่ขึ้นรูปด้วย TiO_2 transparent paste จำนวน 8L ชั้น เนื่องจากชั้นกระเจิงแสงที่เติมเข้าไปนั้นสามารถดูดซับสีย้อมไวแสงได้มากที่สุดและช่วยดูดกลืนแสงเข้าสู่เซลล์ได้มากขึ้น

5.2 จากการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM พบว่าค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (PCE) เพิ่มขึ้นตามความหนาของชั้นฟิล์มบาง TiO_2 จนถึงความหนาประมาณ 19 μm (8L และ 6+2L ชั้น) จากนั้นพบว่าค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง เมื่อใช้ของฟิล์มบางมีความหนามากกว่า 19 μm ซึ่งเกิดรอยแตกบนผิวหน้าของชั้นฟิล์มบางจำนวน 10L (20 μm) และ 12L ชั้น (24 μm) จึงขัดขวางการส่งผ่านอิเล็กตรอนทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพต่ำลง การศึกษาโครงสร้างผลึกของ TiO_2 ที่อยู่บนชั้นฟิล์มบาง TiO_2 ด้วยเทคนิค XRD พบว่าฟิล์มบาง TiO_2 มีโครงสร้างผลึกในอัญรูปที่เป็นทั้งอะนาเทสและรูไทน์ ซึ่งพีคของอะนาเทสจะขึ้นที่ $2\theta = 25.18^\circ, 33.40^\circ$ และพีคของรูไทน์จะขึ้นที่ $2\theta = 26.29^\circ, 37.48^\circ$ โดยพีคของ Rutile ที่เกิดขึ้นสันนิษฐานว่าเป็นผลที่มาจากกาเผาฟิล์มบาง TiO_2 ที่อุณหภูมิสูงถึง 500 $^\circ\text{C}$ เป็นเวลานาน (30 นาที)

5.3 จากการศึกษาระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลวไอออนิก ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมขึ้นเท่ากับ 4.11% ส่วนค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมจากพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ 5 และ 10 wt% ของ PVDF-HFP เท่ากับ 4.07 และ 4.35% ตามลำดับ และส่วนค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมจากพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ 5 และ 10 wt% ของ PEO มีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 3.58 และ 3.59% ตามลำดับ ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมจากพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ผสม 10 wt% PVDF-HFP/PEO ที่อัตราส่วน 2:8, 5:5, และ 8:2 เท่ากับ 4.40, 4.26 และ 4.04% ตามลำดับ และค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมจากนาโนคอมโพสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ (PVDF-HFP/PEO 2:8) ที่เติมอนุภาคนาโน TiO_2 ความเข้มข้น 0.5, 1, 2 และ 5 wt% เท่ากับ 3.08, 3.92, 3.89 และ 3.19% ตามลำดับ และกรณีที่เติมอนุภาคนาโน SiO_2 ความเข้มข้น 0.5, 1, 2 และ 5 wt% มีค่าประสิทธิภาพของเซลล์เท่ากับ 3.87, 4.13, 4.03, และ 4.00% ตามลำดับ

5.4 จากการศึกษาความเสถียรหรือความคงทนของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เตรียมได้ โดยศึกษาพารามิเตอร์ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงเทียบกับเวลา พบว่า ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ (PCE) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (J_{SC}) ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{OC}) และฟิลล์แฟคเตอร์ (ff) ให้ความคงทนยาวนานกว่า 700 ชั่วโมง ยกเว้นบางเซลล์เท่านั้นที่ให้ผลไม่น่าเชื่อถือ เนื่องจากมีปัญหาในการปิดผนึกเซลล์ ทำให้มีการรั่วไหลของพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์ออกจากเซลล์ เช่น PV2:PE2 a และนาโนคอมโพสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งคาดว่าหากมีการปิดเซลล์ที่ดี น่าจะให้ความคงทนต่อการใช้งานได้ยาวนานเช่นกัน

5.5 จากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของอิเล็กโทรไลต์และพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมขึ้น โดยใช้เทคนิค FT-IR พบว่ามีพีคการดูดกลืนที่ $\sim 2900 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบ stretching ของพันธะ C-H ของ PM (II) และ MBI เกิดพีคการดูดกลืนที่ $\sim 2240 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเกิดจากการสั่นของ C-N ของโมเลกุล 3-Methoxypropionitrile และ Varenitrile สำหรับพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ของ PVDF-HFP เกิดพีคการดูดกลืนที่ $\sim 1180 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นการสั่นแบบ bending ของพันธะ C-F สำหรับของ PEO น่าจะพบการดูดกลืนของพันธะ C-O-C ที่ $\sim 1100 \text{ cm}^{-1}$ พีคการดูดกลืนที่ $\sim 950 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเกิดจากการสั่นของ Ti-O และ Si-O ซึ่งช่วยยืนยันว่าสามารถเตรียมนาโนคอมโพสิตเจลได้ประสบความสำเร็จ

5.6 จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่า ILE B มีค่า $T_m = 139 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ขณะที่ PVDF-HFP และ PEO มี T_m อยู่ที่ 130 และ $135 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ เมื่อเตรียมเป็นพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ที่ความเข้มข้น 5 และ 10 wt% พบว่ามีค่า T_m เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 158 ถึง $161 \text{ }^{\circ}\text{C}$ สำหรับระบบพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ทั้ง 3 อัตราส่วน (2:8, 5:5, 8:2) พบว่ามีค่า T_m เพิ่มขึ้นเล็กน้อยในตัวอย่างของผสมอัตราส่วน 2:8 ($163 \text{ }^{\circ}\text{C}$) และ 5:5 ($167 \text{ }^{\circ}\text{C}$) ส่วนอัตราส่วน 8:2 พบว่ามี T_m ลดลงกว่าพอลิเมอร์เจลเดี่ยว ($154 \text{ }^{\circ}\text{C}$) สำหรับตัวอย่างที่เติม TiO_2 nanoparticles พบว่าสารพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์มี T_m ลดลงเล็กน้อย โดยมีค่าอยู่ใน 147 ถึง $157 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งต่ำกว่ากรณีที่ไม่เติมเล็กน้อย ส่วนตัวอย่างที่มีการเติม SiO_2 nanoparticles โดยมีค่าอยู่ในช่วง 125 ถึง $152 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งคาดว่ากรณีที่ T_m ของระบบนาโนคอมโพสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ลดต่ำกว่ากรณีพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์ อาจเนื่องมาจากอนุภาคนาโนเข้าไปช่วยการเกิดการจัดเรียงตัวกันของผลึกของสายโซ่พอลิเมอร์ จึงทำให้เกิดผลึกที่ขนาดเล็กกว่าและแรงยึดเหนี่ยวต่ำกว่า

5.7 จากศึกษาความเสถียรทางความร้อนของพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์ด้วยเทคนิค TGA พบว่า ILE B, PV1, PE1, PE1, PE2, PV2:PE2 และนาโนคอมโพสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ของ TiO_2 และ SiO_2 มีพฤติกรรมทางความร้อนที่คล้ายคลึงกันโดยช่วงแรกอุณหภูมิ 90 ถึง $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ น้ำหนักของพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์และอิเล็กโทรไลต์ของเหลวไอออนิกจะลดลงในช่วงอุณหภูมิเริ่มต้น ถึง $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเกิดการสลายตัวของและอิเล็กโทรไลต์ของเหลวไอออนิกและในช่วงที่ 2 จะเป็นการสลายตัวของพอลิเมอร์ในช่วงอุณหภูมิ 250 ถึง $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบความเสถียรต่อความร้อนระหว่างพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์กับ ILE B และพบว่าพอลิเมอร์เจลผสมก็มีความเสถียรต่อความร้อนสูงกว่าเจลพอลิเมอร์เดี่ยวโดยเฉพาะเจลพอลิเมอร์ผสมอัตราส่วน 2:8 แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าการเติม TiO_2 และ SiO_2 nanoparticle เข้าไปทำให้ความเสถียรต่อความร้อนของ นาโนคอมโพสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ลดลงเล็กน้อย

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

- (1) ปรับเปลี่ยนหรือศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของตัวทำละลายของระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลวไอออนิก เช่น 3-methoxypropionitrile : Varenitrile อัตราส่วน 95/5, 90/10, 85/15, 80/20, 75/25, 50/50 %v/v ตามลำดับ
- (2) ปรับปรุงระบบพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์และนาโนคอมโพสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ให้มีประสิทธิภาพและมีความเสถียรเซลล์มากขึ้น โดยทดลองปรับเปลี่ยนความเข้มข้นที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ ผสมและนาโนคอมโพสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ ปรับเปลี่ยนตัวทำละลายที่ใช้ในการเตรียมอิเล็กโทรไลต์ ให้มีจุดเดือดสูงขึ้น เพื่อลดการระเหยของตัวทำละลาย หรือทดลองเติม carbon nanotubes ในระบบพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ เพื่อปรับปรุงค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ และเพิ่มความเป็นอสัณฐานของพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์

เอกสารอ้างอิง

1. B. O' Regan and M. Grätzel, Nature 1991, 353, 737.
2. M. Grätzel, Nature 2001, 414, 338.
3. M. Grätzel, J. Photochem. Photobio. A-Chem. 2004, 164, 3.
4. M.K. Nazeeruddin, I. Kay, A. Rodicio, R. Humphry-Baker, E. Müller, P. Liska, N. Vlachopoulos, M. Grätzel, J. Am. Chem. Soc. 1993, 115, 6382.
5. F.T. Kong, S.Y. Dai, K.J. Wang, Advances in OptoElectronics, 2007.
6. H. Matsui, K. Okada, T. Kawashima, T. Ezure, N. Tanabe, R. Kawano, M. Watanabe, J. Photochem. Photobiol. A-Chem. 2004, 164, 129.
7. R. Kawano, H. Matsui, C. Matsuyama, A. Sato, M.A.B.H. Susan, N. Tanabe, M. Watanabe, J. Photochem. Photobiol. A-Chem. 2004, 164, 87.
8. P. Wang, S.M. Zakeeruddin, J. Moser, R. Humphry-Baker, M. Gratzel, J. Am. Chem. Soc. 2004, 126, 7164.
9. J. Hagen, W. Schaffrath, P. Otschik, R. Fink, A. Bacher, H.W. Schmidt, D. Haarer, Synth. Met. 1997, 189, 215.
10. A.C. Arango, L.R. Johnson. V. N. Bliznyuk, Z.Schlesinger, S.A. Carter, H.H. Horhold, Adv. Mater. 2000, 12, 1689.
11. M. Masamitsu, M. Hiromitsu, M. Kikuo, K. Yoshimasa, T. Yoichi, Solid State Ion 1996, 89, 263.
12. J. Kang, W. Li, X. Wang, Y. Lin, X. Li, X. Xiao, S. Fang, J. Appl. Electrochem. 2004, 34, 301.
13. T. Stergiopoulos, I.M. Arabatzis, G. Katsaros, P. Falaras, Nano Lett. 2002, 2, 1259.
14. P. Wang, S.M. Xakeeruddin, J.E. Moser, M.K. Nazeeruddin, T. Sekiguchi, M. Gratzel, Nat. Mater. 2003, 2, 403.
15. Z. Huo, S. Dai, K. Wang, F. Kong, C. Zhang, Z. Pan, X. Fang, Solar Eng. Mat. Solar Cells 2007, 91, 1959.
16. M.S. Kang, J.H. Kim, J. Won, Y.S. Kang, J. Photochem. Photobio. A-Chem. 2006, 183, 15.
17. U. Bach, Y. Tachibana, J.E. Moser, S.A. Haque, J.R. Durrant, M. Graetzel, D.R. Klug, J. Am. Chem. Soc. 1999, 121, 7445.
18. W. Kubo, K. Murakoshi, T. Kitamura, Y. Wada, K. Hanabusa, H. Shirai, S. Yanagida, Chem. Lett. 1998, 1241.
19. E. Stathatos, P. Lianos, A.S. Vuk, B. Orel, Adv. Funct. Mater. 2004, 14, 45.
20. H. Usui, H. Matsui, N. Tanabe, S. Yanagida, J. Photochem. Photobio. A-Chem. 2004, 164, 97.

21. E. Chatzivasiloglou, T. Stergiopoulos, A.G. Kontos, N. Alexis, M. Prodromidis, P. Falaras, J. Photochem. Photobio. A-Chem. 2007, 192, 49.
22. K.M. Lee, C.W. Hu, H.W. Chen, K.C. Ho, Solar Energy Material & Solar Cell. 2008, 92, 1628.
23. K.C. Huang, P.Y. Chen, R. Vittal, K.C. Ho, Solar Energy Material & Solar Cell. 2011, 95(8), 1990.
24. S.J. Lim, Y.S. Kang, D.W. Kim, Electrochemistry Communications, 2010, 12(8), 1037.
25. Kang, J.; Li, W.; Wang, X.; Lin, Y.; Li, X.; Xiao, X.; Fang, S. J. Appl. Electrochem. 2004, 34,301.
26. Ito, S. et al., Advanced Materials. 18(9): 1202-1205; April, 2006.
27. Chou, T. P. et al., The Journal of Physical Chemistry C. 111(17): 6296-6302; 2007.
28. Wang, Y., Solar Energy Materials and Solar Cells. 93(8): 1167-1175, 2009.
29. Chang, H. et al., Solar Energy. 84(1): 130-136, 2010.
30. Wang, Z-S. et al., Coordination Chemistry Reviews. 248(13): 1381-1389, 2004.
31. Usami, A., Solar Energy Materials and Solar Cells. 62(3): 239-246, 2000.
32. Wang, P. et al., The Journal of Physical Chemistry B. 107(51): 14336-14341, 2003.
33. Ito, S. et al., Thin Solid Films. 516(14): 4613-4619, 2008
34. Cao, H. X. et al. Key Engineering Materials. 602: 884-887; March, 2014.
35. Arunchaiya, M. et al. Chiang Mai J. Sci.; 38(2): 223-230, 2011.
36. Tiutit, N., Saengsuwan, S. Energy Procedia, 56 378 – 385, 2014.
37. O'Regan, B. C. et al., The Journal of Physical Chemistry C. 111(37): 14001-14010, 2007.
38. <http://www.rmutphysics.com/charud/virtualexperiment/virtual2/solar-cell/index6.html> (accessed 27 April 2016).
39. Subramania, A. et al., Journal of Power Sources. 153(1): 177-182, 2006.
40. Yanagida, S., Comptes Rendus Chimie. 9(5): 597-604, 2006.
41. Wu, C. et al., ACS applied materials & interfaces. 5(16): 7886-7892, 2013.
42. Ileperuma, O. A. et al., Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 217(2): 308-312, 2011.
43. Scully, S. et al., Synthetic Metals. 144(3): 291-296, 2004.
44. Jing, Z.; Ying, Y.; Sujuan, W.; Sheng, X.; Conghua, Z.; Hao, H.; Bolei, C.; Hongwei, H.; Xingzhong, Z. J. Electrochem. Acta. 2008, 53, 5415-5422.

ภาคผนวก

1. การนำผลงานไปเผยแพร่

- Poster Presentation ในงานประชุมวิชาการนานาชาติ PURE AND APPLIED CHEMISTRY INTERNATIONAL CONFERENCE 2012 (PACCON 2012), เรื่อง Optimization of Multilayer TiO₂ Thin Films for Dye Sensitized Solar Cells
- Proceedings in PACCON 2012 เรื่อง Optimization of Multilayer TiO₂ Thin Films for Dye Sensitized Solar Cells, 624-627.
- Poster Presentation ในงานประชุมวิชาการนานาชาติ PURE AND APPLIED CHEMISTRY INTERNATIONAL CONFERENCE 2013 (PACCON 2013), เรื่อง Preparation and Physical Properties of PVDF-HFP/PEO Nanocomposite Gel Electrolytes for Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs)
- Poster and Proceedings in UBU Research Conference, 2013 ผลของชั้นกระจิงแสงต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง, Effect of light-scattering layers on the performance of dye sensitize solar cells.
- Effect of TiO₂ and SiO₂ nanoparticles on The Performances of Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs) Based on PVDF-HFP/PEO Nanocomposite Gel Electrolytes (In Preparation)

2. การผลิตนักศึกษาจากโครงการวิจัยนี้

1. นักศึกษาระดับปริญญาตรี จำนวน 2 คน (นายสนิท พานพินิจ และ น.ส ชนม์นิภา ปุราถาเน)
2. ระดับนักศึกษาระดับปริญญาโท จำนวน 1 คน (นางสาวนิภารัตน์ ทิอุทิศ)

3. ตารางเปรียบเทียบการดำเนินงานที่เสนอไว้ในแผนงานวิจัยกับงานวิจัยที่ได้

กิจกรรม (ตามแผน)	ผลที่คาดว่าจะได้รับ (ตามแผน)	ผลการดำเนินงาน	หมายเหตุ*
1. ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	1. ได้รับข้อมูลเกี่ยวกับการวิจัยเรื่องการเตรียมขั้วไฟฟ้าการเตรียมพอลิเมอร์ เจลอิเล็กโทรไลต์ 2. ได้รับความรู้เกี่ยวกับผลการเติมอนุภาคนาโน	1. ได้ข้อมูลใหม่ๆเกี่ยวกับการวิจัยเรื่องขั้วไฟฟ้าทำงาน การขึ้นรูปเซลล์ การเตรียมเจลอิเล็กโทรไลต์ อันประโยชน์ต่องานการพัฒนางานวิจัย 2. ได้รับความรู้เกี่ยวกับการสร้างเครื่องมืออิเล็กโทรสปินนิ่งและวัสดุอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องใช้ในการสร้างเครื่องมือ	-
2. การเตรียม TiO ₂ electrodes บนกระจก FTO -ศึกษาจำนวนชั้น (layer) ความหนา และ สัณฐานวิทยาด้วย SEM -ศึกษาโครงสร้างผลึกของ TiO ₂ ด้วย XRD	1. ได้จำนวนชั้นที่เหมาะสม และเทคนิคที่จะใช้ 2. ได้ทราบความหนาที่เหมาะสม 3. ได้ทราบสัณฐานวิทยา และลักษณะโครงสร้างผลึก	1. จำนวนชั้นที่เหมาะสมในการเตรียมขั้วไฟฟ้าทำงาน คือ 6 + 2 ชั้น และเตรียมด้วยเทคนิค screen printing 2. ทราบความหนาที่เหมาะสม ที่ประมาณ 19 um 3. พื้นผิวหน้าของชั้น TiO ₂ จะไม่ค่อยเรียบและจะแตกเมื่อเตรียมมากกว่า 8 ชั้น และมีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ Anatase กับ Rutile ปนกัน	-

<p>3. การศึกษาการเตรียมระบบอิเล็กโทรไลต์</p> <p>- อิเล็กโทรไลต์ของเหลวและของเหลวไอออนิก</p> <p>- พอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์ (อัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์เมทริกซ์ 2 ชนิด ความเข้มข้นของพอลิเมอร์ผสมสำหรับเตรียมเป็นเจล)</p> <p>- นาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ (ปริมาณของอนุภาคนาโน)</p>	<p>1. ได้ระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลว/ของเหลวไอออนิก</p> <p>2. ได้ทราบความเข้มข้นและอัตราผสมที่เหมาะสม</p> <p>3. ได้ทราบปริมาณและชนิดของอนุภาคนาโนที่เหมาะสม</p>	<p>1. ระบบอิเล็กโทรไลต์ของเหลวที่ใช้ คือ 0.1 M LiI, 0.05 M I₂, 0.4 M TBP และ 1.0 M PMIMBr ในตัวทำละลายผสม GBL:NMP:ACN</p> <p>ส่วนระบบของเหลวไอออนิก ได้แก่ ILE A (ผสม 0.6 M PM(II) กับ 0.45 M MBI ในตัวทำละลาย 3-methoxypropionitrile) และ ILE B (ผสม 0.6 M PM(II) กับ 0.45 M MBI ในตัวทำละลายผสม 3-methoxypropionitrile กับ Vaconitrile 85:15 %v/v)</p> <p>2. ได้ทราบความเข้มข้นพอลิเมอร์เจลที่เหมาะสมคือ 10 wt% และอัตราผสมที่เหมาะสม คือ PVDF-HFP: PEO (2:8)</p> <p>3. ได้ทราบปริมาณในการเติมอนุภาคนาโน คือ 1 wt% และชนิดของอนุภาคนาโนที่ผลดีคือ SiO₂</p>	-
<p>4. การพิสูจน์เอกลักษณ์และศึกษาสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์เจลและนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์</p> <p>- การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค ATR-FTIR</p> <p>- ศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์เจลและนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์</p>	<p>1. ยืนยันได้ว่าอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมได้ประสบความสำเร็จด้วยเทคนิค ATR-FTIR</p> <p>2. การศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์เจลและนาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์ด้วย DSC และ TGA</p>	<p>1. ประสบความสำเร็จในการเตรียมอิเล็กโทรไลต์ตามต้องการ</p> <p>2. จากการศึกษาพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์ด้วยเทคนิค DSC พบว่ามีจุดหลอมเหลวเพิ่มสูงขึ้นกว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์และเมื่อเติมอนุภาคนาโนลงไปพบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวลดลงเล็กน้อย จากการศึกษาความเสถียรต่อความร้อนด้วย TGA พบว่าพอลิเมอร์เจลอิเล็กโทรไลต์มีความเสถียรทางความร้อนดีกว่าอิเล็กโทรไลต์ของเหลว และของเหลวไอออนิก แต่ต่ำกว่าพอลิเมอร์เดี่ยว</p>	-
<p>5. การศึกษาการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง</p> <p>- ศึกษา I-V curves ภายใต้แสงอาทิตย์เทียม AM1.5</p> <p>- ศึกษา IPCE ของเซลล์ที่เตรียมได้</p> <p>- ศึกษาการนำไฟฟ้าภายในเซลล์ ด้วย EIS</p> <p>- ศึกษาความเสถียร/อายุใช้งานของเซลล์</p>	<p>1. ได้ I-V characteristics ของเซลล์ที่เตรียมได้</p> <p>2. ได้ทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมได้</p> <p>3. ได้ทราบ IPCE ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมได้</p> <p>4. ได้ทราบ EIS ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมได้</p> <p>5. ได้ทราบความเสถียร/อายุการใช้งานของเซลล์ที่เตรียมได้</p>	<p>1. ได้ I-V characteristics ของเซลล์ที่เตรียมได้และทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเซลล์จนบอกได้ว่าเจลอิเล็กโทรไลต์อันไหนดีที่สุด</p> <p>2. ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้ทำให้บอกได้ว่าระบบอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมได้ในแต่ละระบบแตกต่างกันอย่างไร อันไหนดีที่สุด</p> <p>3. ได้ศึกษาเฉพาะ IPCE ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ระบบอิเล็กโทรไลต์นาโนคอมพอสิตเจล ซึ่งให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานไปเป็นแสงอาทิตย์ประมาณ 28-34%</p> <p>4. ได้ทราบค่าความต้านทานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้นาโนคอมพอสิตเจลอิเล็กโทรไลต์</p> <p>5. ความเสถียร/อายุการใช้งานของเซลล์ที่เตรียมได้ที่สูงสุดประมาณ 700 ชั่วโมง ส่วนตัวอื่นๆพบว่าไม่เสถียรเนื่องมาจากการประกอบเซลล์ที่ไม่ดี</p>	-

4. รายงานการเงิน

ในปีงบประมาณ 2555 ใช้งบประมาณไปทั้งสิ้น 235,400 บาท

ในปีงบประมาณ 2556 ใช้งบประมาณไปทั้งสิ้น 267,300 บาท

รวมงบประมาณที่ใช้ทั้งหมดเท่ากับ 502,700 บาท (ห้าแสนสองพันเจ็ดร้อยบาทถ้วน)