



ความก้าวหน้าของงานวิจัยด้านเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์

Recent Progress in Organic Solar Cells

สมพิศ วันวงษ์¹

¹กลุ่มวิจัยและพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์เพื่อการประยุกต์ด้านพลังงานสิ่งแวดล้อมและเทคโนโลยี สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

E-mail: sompit.wan@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

ความต้องการพลังงานทดแทนจากแหล่งพลังงานธรรมชาติโดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์เป็นเรื่องที่จำเป็นอย่างยิ่ง ด้วยเป็นพลังงานที่มีอยู่มหาศาล สะอาด และสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งอาจจำแนกออกได้หลายชนิดตามประเภทของสารกึ่งตัวนำ อันได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน ชนิดสารประกอบตัวนำ ชนิดอินทรีย์และชนิดสีย้อมไวแสง เป็นต้น และเนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์เป็นอุปกรณ์ที่มีต้นทุนในการผลิตต่ำ ใช้วัสดุปริมาณน้อย มีน้ำหนักเบา ทั้งยังสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นขนาดต่างๆ ได้ง่าย ทว่าประสิทธิภาพและเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ยังด้อยกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอื่นๆ จึงได้รับความสนใจที่จะพัฒนาคุณภาพและประสิทธิภาพให้สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์มีประสิทธิภาพสูงเพียง 11.5 % และเมื่อพิจารณาผลการศึกษาและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไปในอนาคต ในกรณีนี้ผู้เขียนจึงสนใจที่จะศึกษา ความเป็นมา โครงสร้าง หลักการทำงาน การวิจัยและพัฒนาสารกึ่งตัวนำ และการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ รวมทั้งการใช้ประโยชน์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาต่อไป

ABSTRACT

Increased consumption of petroleum and natural gas over several decades has led to the energy shortage concern. To meet a growing need for electrical energy, solar energy which is abundant and clean, has been widely employed. Solar radiation can be directly converted to electricity using photovoltaic devices or solar cells. Depending on the types of semiconductor, solar cells can be classified into four categories that are silicon solar cells, III-V solar cells, organic solar cells and dye-sensitized solar cells. Among these solar cells, the organic solar cells

have gaining attention due to the low cost of materials, light-weight, ease of fabrications and processes. However, the power conversion efficiency (PCE) and the stability of organic photovoltaics are considering low. The highest recorded efficiency of single-junction organic solar cells is 11.5 %. Therefore, improvement of the device efficiency has remained the challenge. In this review, we focused on the principle of organic photovoltaics, the recent progress of organic semiconductors, the advanced in large scaled fabrication and the future directions of organic solar cells research.

คำสำคัญ: เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน วัสดุกึ่งตัวนำพีและเอ็น เซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่

Keywords: Organic solar cells, Device operation, Power conversion efficiency, P-type and N-type semiconductors, Large-scaled solar cells

บทนำ

สืบเนื่องจากสถานการณ์ปัจจุบันที่มีการขยายตัวอย่างรวดเร็วทั้งด้านเศรษฐกิจควบคู่กับจำนวนประชากรที่มากขึ้นของประเทศไทย ยังผลให้ความจำเป็นในการใช้พลังงานไฟฟ้าภายในประเทศมีปริมาณมากขึ้นเป็นลำดับ กล่าวคืออัตราการใช้ไฟฟ้าทวีสูงขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 4 ตั้งแต่ช่วง พ.ศ. 2555-2557 (การไฟฟ้าฝ่ายผลิต, (2558)) โดยสัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าในปี 2557 ได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ 64 % ถ่านหินลิกไนต์ 21 % พลังงานน้ำ 3 % พลังงานหมุนเวียน 2 % น้ำมันเตาและน้ำมันดีเซล 1 % ร่วมกับการนำเข้าพลังงานไฟฟ้าจากประเทศลาวและมาเลเซียอีก 7 % (ศูนย์พยากรณ์และสารสนเทศพลังงาน (2557)) จึงทำให้ตระหนักกันดีว่า แหล่งทรัพยากรอันเป็นเชื้อเพลิงธรรมชาติสำคัญภายในประเทศเช่น ก๊าซธรรมชาติและน้ำมันล้วนมีปริมาณจำกัดไม่เพียงพอต่อความต้องการของภาคอุตสาหกรรมและภาคครัวเรือน ส่งผลให้จำเป็นต้องเร่งรัดพัฒนาการสร้างเสริมพลังงานทดแทนหรือพลังงานหมุนเวียนให้เพียงพอกับความต้องการ รวมทั้งสรรค

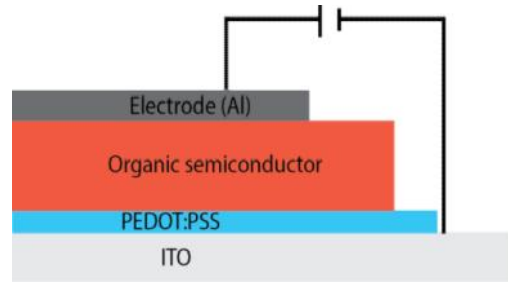
สร้างการเพิ่มปริมาณความมั่นคงทางพลังงานของชาติ ให้งอกงามขึ้นต่อไป สอดคล้องกับอัตราการบริโภคและมีปริมาณเพียงพอต่อความมั่นคงทางพลังงานของประเทศ

อย่างไรก็ตามย่อมเป็นที่ประจักษ์กันดีว่า ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานธรรมชาติขนาดใหญ่ที่ไม่มีวันหมด เป็นพลังงานที่ไม่สิ้นเปลือง มีอยู่ทั่วไป และเป็นพลังงานสะอาด สามารถนำมาแปรเปลี่ยนเป็นกระแสไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยอาศัยเซลล์แสงอาทิตย์เป็นปัจจัยหลักในการผลิต และเพื่อลดภาระการใช้ไฟฟ้าของภาครัฐกับประชาชนให้พึ่งพาตนเองได้ นักวิจัยจึงได้พยายามศึกษา ค้นคว้า เกี่ยวกับพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานทดแทน สอดรับกับนโยบายการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนและแผนพลังงานทางเลือกจากภาครัฐ ในการนี้ทำให้สามารถจำแนกกลุ่มเซลล์แสงอาทิตย์ออกได้ 4 กลุ่ม (วรรณช, 2553; วินิช, 2550; Hegedus et al., 2011) ได้แก่ กลุ่มเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน (silicon solar cells) อันเป็นกลุ่มที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถนำมาใช้ประกอบเป็นแผงโซลาร์เซลล์ผลิตกระแสไฟฟ้าในอาคารบ้านเรือนได้ดี

ว่ามีข้อจำกัดคือราคาแพง เนื่องจากกระบวนการผลิตซิลิกอนที่บริสุทธิ์มากต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูงและต้นทุนสูง เซลล์กลุ่มที่สองเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารประกอบกึ่งตัวนำ (III-V solar cells) เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ผลึกแกเลียมอาร์เซไนด์ ที่นิยมใช้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าให้กับดาวเทียม สำหรับเซลล์อีกสองกลุ่มได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (dye-sensitized solar cells) และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ (organic solar cells) เซลล์สองกลุ่มนี้มีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่า ทว่าราคาต่ำกว่า จึงเป็นที่สนใจศึกษาพัฒนาเพื่อเพิ่มศักยภาพและประสิทธิผลของเซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มนี้ให้มากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นเพื่อความชัดเจนในการศึกษาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงเลือกที่จะศึกษาเฉพาะเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ เนื่องจากก่อก่อไปด้วยแรงจูงใจหลายประการ อาทิ ใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำ ใช้วัสดุปริมาณน้อย วัสดุที่ใช้ประกอบเซลล์สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงแสงและเชิงไฟฟ้าเคมีได้ตามต้องการ ทั้งยังสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นขนาดต่างๆ ได้ง่าย และมีน้ำหนักเบา เป็นต้น การประยุกต์ใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ จึงเหมาะสมสำหรับใช้เป็นแหล่งพลังงานให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเคลื่อนที่ รวมทั้งการประกอบเป็นแผงโซลาร์เซลล์ขนาดใหญ่เพื่อพัฒนาในเชิงพาณิชย์ต่อไปในอนาคต

ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ขั้วไฟฟ้า (electrodes) และสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ (organic semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยแต่ละองค์ประกอบมีหน้าที่และคุณสมบัติที่สำคัญ ดังนี้ (วรรณช, 2553; Lin et al., 2012; Scharber et al., 2013)



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์

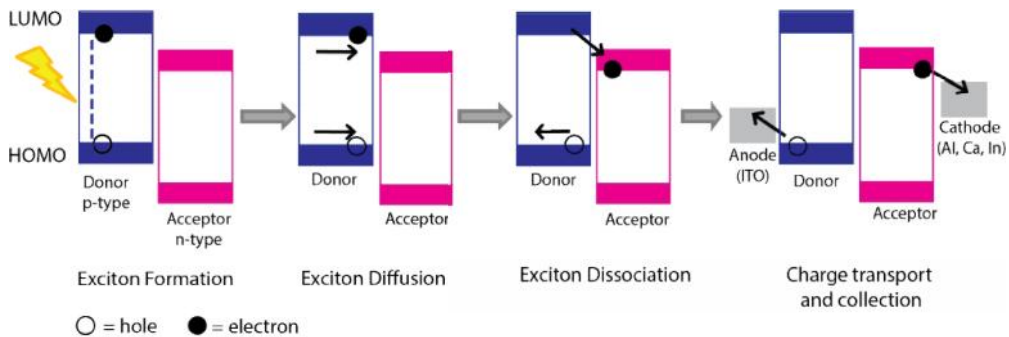
1. ขั้วไฟฟ้า ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าแคโทด ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนแล้วถ่ายโอนไปให้วงจรไฟฟ้าภายนอก นิยมใช้โลหะอลูมิเนียม (Al) หรือทอง (Au) และขั้วไฟฟ้าแอโนดทำหน้าที่รับประจุบวก (hole) นิยมใช้กระจกนำไฟฟ้าโปร่งแสงชนิด indium-tin-oxide (ITO) ที่เคลือบด้วย poly (3,4-ethylenedioxythiophene) ผสมกับ poly(styrene sulfonate) (PEDOT:PSS) เพื่อเพิ่มการยึดเกาะของกระจกนำไฟฟ้ากับสารกึ่งตัวนำอินทรีย์

2. สารกึ่งตัวนำอินทรีย์เป็นสารที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบหลัก จำแนกเป็น สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) ซึ่งมีสมบัตินำโฮลได้ดี และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) ซึ่งมีสมบัตินำอิเล็กตรอนได้ดี สารกึ่งตัวนำทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์แล้วส่งผ่านอิเล็กตรอนและโฮลให้กับขั้วแคโทดและแอโนด อนึ่ง สมบัติสำคัญของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ ก็คือ สามารถดูดกลืนแสงในช่วงสเปกตรัมที่กว้าง เพื่อให้ดูดกลืนโฟตอนได้ปริมาณมากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (molar absorptivity coefficient) สูง พร้อมทั้งมีค่าการนำประจุสูง (high charge mobility)

หลักการการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์มีกลไกการทำงาน 4 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2 (Cheng et al., 2009; Uy et al., 2012) ดังนี้

1. เมื่อแสงตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ แสงจะเดินทางทะลุผ่านกระจกโปร่งแสงมายังสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2 กลไกการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ (ภาพดัดแปลงจาก Cheng et al., 2009)

2. คู่เอ็กซิตอนจะเคลื่อนที่และแพร่ไปยังรอยต่อ (interface) ระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) หรือ donor และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) หรือ acceptor

3. อิเล็กตรอนเคลื่อนไปที่ชั้นพลังงาน LUMO ที่ต่ำกว่าของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ขณะที่โฮลยังคงอยู่ในสารกึ่งตัวนำชนิดพีเช่นเดิม ขั้นตอนนี้เรียกว่าเกิด exciton dissociation

4. อิเล็กตรอนและโฮลถูกถ่ายโอนผ่านสารกึ่งตัวนำไปที่แคโทดและแอโนดตามลำดับ แล้วออกสู่วงจรไฟฟ้าภายนอก ขั้นตอนนี้เรียกว่า charge carrier collection

นอกจากนั้น หลักการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นกลไกการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ในเชิงอุดมคติ ทว่าการสูญเสียพลังงานระหว่างกระบวนการยอมเกิดขึ้นได้

อินทรีย์แล้วเกิดการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มากกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ออกจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้น ส่งผลให้เกิดโฮล (hole, h^+) ที่สถานะพื้น และมีอิเล็กตรอนอยู่ที่สถานะกระตุ้น คู่ของโฮลและอิเล็กตรอนนั้นเรียกว่า เอ็กซิตอน (exciton)

อันส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นลดลง โดยที่การสูญเสียพลังงานนั้นอาจเกิดจาก สาเหตุ 4 ประการ (Cheng et al., 2009; Scharber et al., 2013) ได้แก่

1. การได้รับพลังงานแสงอาทิตย์หรือจำนวนโฟตอนปริมาณน้อย อันเนื่องมาจากความสามารถดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ได้น้อย สารกึ่งตัวนำเหล่านี้มักมีค่าช่องว่างระดับพลังงาน (E_g) ที่กว้างมาก

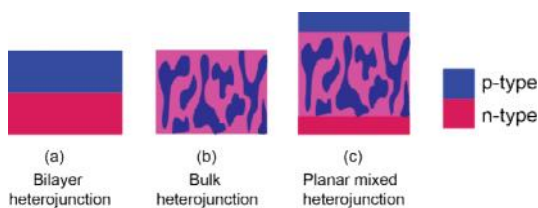
2. การการสูญเสียคู่เอ็กซิตอน เนื่องจากช่วงชีวิตของเอ็กซิตอนนั้นสั้นมากและมีระยะทางการแพร่ (diffusion length หรือ LD) เพียง 10 นาโนเมตร (Günes et al., 2007) กรณีที่ความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำมีค่ามากกว่าค่า LD แล้วจะทำให้เอ็กซิตอนเคลื่อนที่ไม่ถึงรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำพีและเอ็น

3. การเกิดประจุอิสระ (free charge) อันได้แก่อิเล็กตรอนและโฮลลดลง เนื่องจากเกิดการรวมตัว (recombination) ของอิเล็กตรอนและโฮลที่บริเวณรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ

4. วัสดุกึ่งตัวนำพีและเอ็นมีค่าการเคลื่อนที่ของประจุน้อย (low charge mobility) ทำให้เกิดการชนส่งอิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโทรดได้น้อย ส่งผลให้ปริมาณประจุที่เข้าไปในวงจรรไฟฟ้าลดลงไปด้วย

ลักษณะรอยต่อระหว่างชั้นสารกึ่งตัวนำ (heterojunction architectures)

โดยทั่วไปแล้วลักษณะรอยต่อระหว่างชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) สามารถจำแนกโครงสร้างออกได้ 3 แบบ (Lu et al., 2015; Scharber et al., 2013; Xue et al., 2005) ได้แก่ โครงสร้างแบบรอยต่อสองชั้น (bilayer heterojunction) แบบรอยต่อรวม (bulk heterojunction) และแบบรอยต่อผสม (planar mixed heterojunction) ดังแสดงในรูปที่ 3



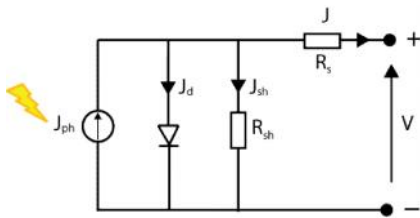
รูปที่ 3 ลักษณะโครงสร้างรอยต่อระหว่างชั้นสารกึ่งตัวนำ

เมื่อวิเคราะห์โดยละเอียดจะพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีรอยต่อสารกึ่งตัวนำแบบสองชั้นนั้นยังมีข้อจำกัดของระยะเวลาการแพร่ของเอ็กไซตอนที่สูง ดังนั้นหากชั้นของสารกึ่งตัวนำหนาเกินกว่าระยะเวลาการแพร่ของเอ็กไซตอน จะจำกัดจำนวนเอ็กไซตอนที่

สามารถเคลื่อนที่มายังบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นของสารกึ่งตัวนำ ส่งผลให้เกิดประจุอิสระ ลดลง ส่วนโครงสร้างแบบรอยต่อรวมจะเป็นการผสมสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดเข้าด้วยกัน ซึ่งมีข้อดีของโครงสร้างนี้ก็คือ การเพิ่มพื้นที่ผิวรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำ ทำให้ลดอัตราการรวมตัว ระหว่างโฮลและอิเล็กตรอน และการผสมรวมของสารกึ่งตัวนำมักเหนี่ยวนำให้เกิด self-organization หรือ phase separation เกิดเป็นโครงสร้างเชื่อมต่อกันในลักษณะเป็นร่างแห (network) อันเป็นผลดีต่อการแพร่ของประจุบวกและลบ ส่วนโครงสร้างแบบ planar mixed heterojunction ก็คือการผสมผสานระหว่างรอยต่อสองชั้นและรอยต่อรวมเข้าด้วยกัน โดยข้อดีของโครงสร้างนี้คือสามารถเพิ่มความหนาของเซลล์เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการดูดกลืนแสง ทว่าประสิทธิภาพของการแพร่ เอ็กไซตอนและการสร้างประจุอิสระไม่ลดลงเหมือนในกรณีของรอยต่อแบบสองชั้น

ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (Power conversion efficiency, PCE)

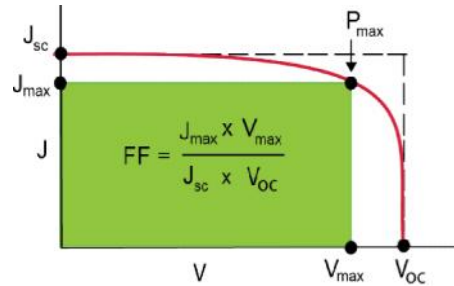
สมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์สามารถอธิบายได้จากจากวงจรสมมูลไฟฟ้า (equivalent circuit) ของเซลล์ซึ่งเป็นการต่อขนานระหว่างแหล่งกำเนิดแสง ไดโอด และความต้านทานขนาน (shunt resistance หรือ R_{sh}) แล้วต่ออนุกรมกับความต้านทานอนุกรม (series resistance หรือ R_s) ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 วงจรสมมูลไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ (ภาพดัดแปลงจาก Qi et al., 2013)

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาดที่ต่างกันจึงนิยมแสดงค่ากระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนของกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ของเซลล์ (current density, J) โดยผลลัพธ์ของกระแสต่อพื้นที่จากเซลล์แสงอาทิตย์เกิดมาจากค่ากระแสต่อพื้นที่ของแหล่งกำเนิดแสง (J_{ph}) หักลบด้วยค่ากระแสต่อพื้นที่ที่ไหลผ่านไดโอด (J_d) และผ่านความต้านทานขนาน (J_{sh}) (Qi et al., 2013; Winder et al., 2004)

พารามิเตอร์ที่บ่งบอกประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วย กระแสลัดวงจรต่อขนาดพื้นที่เซลล์ (short circuit current density หรือ J_{sc}) แรงดันวงจรถัดเปิด (open circuit voltage หรือ V_{oc}) และฟิลต์แฟกเตอร์ (fill factor หรือ FF) ค่ากระแสไฟฟ้าขณะที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์คือ ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดต่อพื้นที่ (maximum current density หรือ J_{max}) ส่วนค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (maximum potential หรือ V_{max}) คือค่าแรงดันไฟฟ้าขณะที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าเป็นศูนย์นั่นเอง ส่วนฟิลต์แฟกเตอร์เป็นสัดส่วนระหว่างผลคูณแรงดันกับกระแสไฟฟ้าสูงสุดกับผลคูณของกระแสลัดวงจรกับแรงดันวงจรถัดเปิด ค่าพารามิเตอร์ที่กล่าวข้างต้น ได้แก่ V_{oc} , J_{sc} และ FF สามารถอ่านได้จากกราฟ J-V curve (Qi et al., 2013; Winder et al., 2004) ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ลักษณะของกราฟ J-V curve

แม้กระนั้นก็ตีประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สามารถคำนวณได้จาก ผลคูณของค่าแรงดันวงจรถัดเปิด (V_{oc}) ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่อพื้นที่ (J_{sc}) และค่าฟิลต์แฟกเตอร์ (FF) ทหารด้วยค่าพลังงานแสงที่ให้กับเซลล์ (incident light power, P_{in}) (Qi et al., 2013; Winder et al., 2004) ดังแสดงในสมการที่ 1

$$PCE (\eta) = (V_{oc} \times J_{sc} \times FF) / P_{in} \quad (1)$$

งานวิจัยและพัฒนาที่เกี่ยวข้อง

1. สารกึ่งตัวนำ

สารกึ่งตัวนำ เป็นสารอินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงสเปกตรัมที่กว้างตั้งแต่ช่วง visible ถึง near infrared เพื่อให้ดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ได้ปริมาณมากที่สุด มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูง และมีค่าการเคลื่อนที่ของประจุหรือค่าการนำไฟฟ้าสูง พร้อมทั้งมีค่าช่องว่างของแถบพลังงาน (E_g) ที่เหมาะสมต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮล (Dou et al., 2013) ดังนั้นชนิดของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในโซลาร์เซลล์ชนิดอินทรีย์จึงแบ่งออกได้ตามการนำโฮลหรืออิเล็กตรอน กล่าวคือ สารกึ่งตัวนำที่สามารถให้อิเล็กตรอน คือสารกึ่งตัวนำชนิดโฮลหรือสารกึ่งตัวนำชนิดพี และสารกึ่งตัวนำที่รับอิเล็กตรอนซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สารกึ่งตัวนำชนิดพี ยังสามารถแบ่งตามขนาดของสารประกอบอินทรีย์ ได้แก่ สารประกอบอินทรีย์ขนาดเล็กและพอลิเมอร์ ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิด

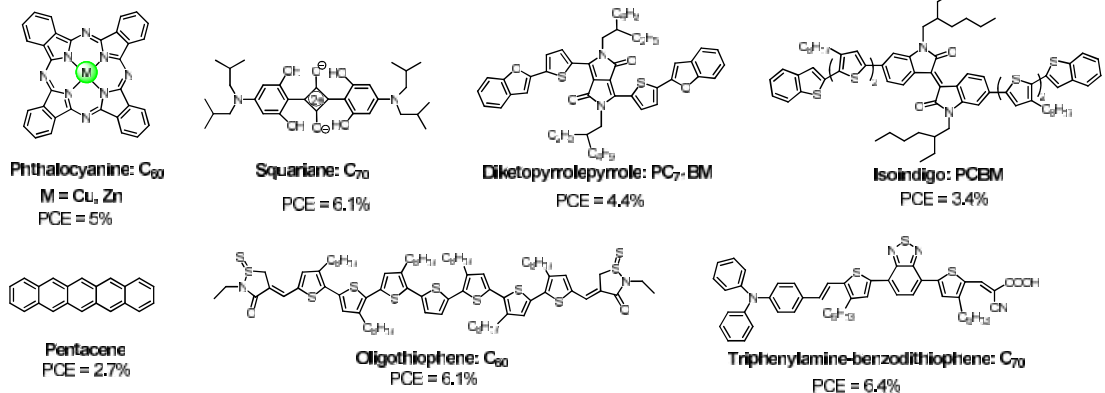
เอ็นสามารถแบ่งออกเป็นสารอนุพันธ์ฟูลเลอรีนและสารอื่นๆ (Lin et al., 2012) ดังนี้

1.1 สารกึ่งตัวนำชนิดโฮลหรือชนิดพี

ดังได้กล่าวแล้วว่า สารกึ่งตัวนำชนิดพีต้องมีสมบัติดูดกลืนแสงอาทิตย์ได้ดี มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงรวมทั้งค่าการเคลื่อนที่ของโฮล (h^+) สูง โดยสามารถจำแนกสารกึ่งตัวนำชนิดนี้ออกได้ดังนี้

1.1.1 สารประกอบอินทรีย์ขนาดเล็ก สารอินทรีย์ที่นิยมสังเคราะห์เพื่อใช้เป็นสารกึ่งตัวนำเป็นสารโครงสร้างประกอบด้วยวงอะโรมาติกหรือมีพันธะเดี่ยวสลับคู่ต่อกัน ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูง สารที่มีโครงสร้างแบนราบ (planar) จะเกิดการซ้อนเหลื่อมกันเป็นสองมิติ ส่งผลให้มีค่าการเคลื่อนที่โฮล (h^+) สูงมาก สามารถทำให้บริสุทธิ์และ

คำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลได้ง่ายกว่าพอลิเมอร์ การปลูกฟิล์มของสารกึ่งตัวนำขนาดเล็กจะใช้วิธีการขึ้นรูปแบบสุญญากาศ (vacuum deposit processing) ซึ่งสามารถจำแนกสารออกเป็นกลุ่มต่างๆ ได้แก่ กลุ่มสีย้อม (dye) เช่น ทาโลไซยานิน (phthalocyanine) สควาเรอิน (squaraine) ไอโซอินดิโก้ (isoindigo) และไดคีโตไพโรลไพโรล (diketopyrrolopyrrole เป็นต้น กลุ่มเอเซ็นผสม (fused acenes) เช่น เพนตาซีน (pentacene) กลุ่มโอลิโกไทโอเฟน (oligothiophene) และกลุ่มไตรฟีนิลเอมีน (triphenylamine) (Chen et al., 2015; Dou et al., 2013; Li et al., 2012; Lin et al., 2012; Qu et al., 2012; Ren et al., 2014; Tang et al., 2010; Xue et al., 2004; Yoo et al., 2004) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6



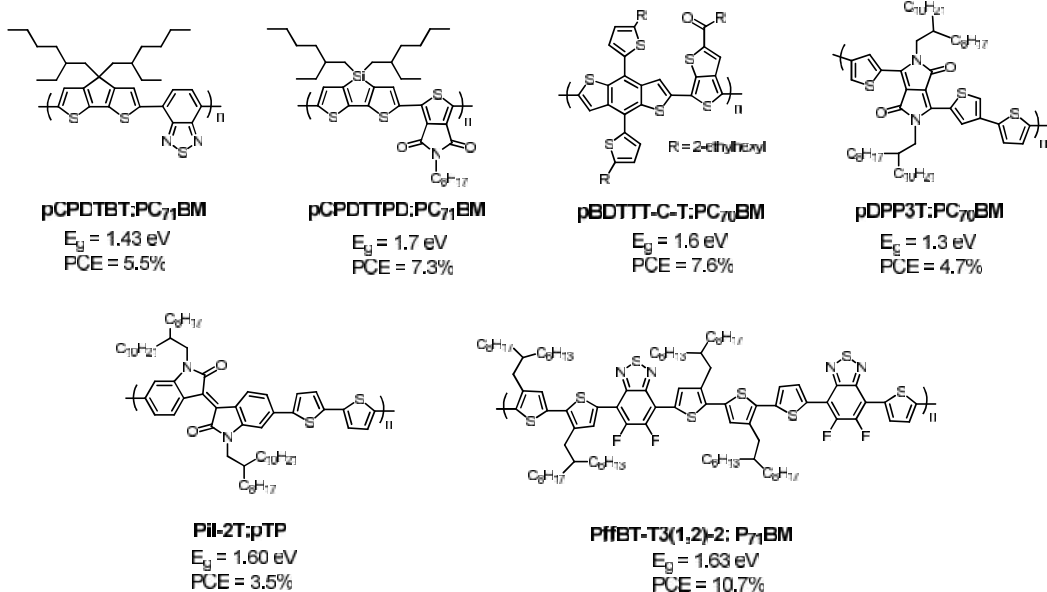
รูปที่ 6 โครงสร้างของสารประกอบอินทรีย์ขนาดเล็กที่ใช้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

1.1.2 พอลิเมอร์ ในช่วงปลายศตวรรษที่ 19 คอนจูเกตพอลิเมอร์ (conjugated polymers) ถูกนำมาใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องด้วยสารกึ่งตัวนำที่เป็นพอลิเมอร์นั้นมีข้อดีหลายประการ กล่าวคือ มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าและสามารถดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็น (visible light) อีกทั้งนำมาขึ้นรูปแบบต่างๆ ได้ง่ายและสามารถผลิตได้ในปริมาณมาก กลุ่มพอลิฟีนิลลีน ไวนิลลีน (polyphenylene

vinylene, PPV) เป็นคอนจูเกตพอลิเมอร์กลุ่มแรกที่ถูกนำมาทดสอบโดยการผสมกับ $PC_{61}BM$ (สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น) แบบรอยต่อรวม (BHJ) และให้ค่า PCE คือ 3.3% (Cheng et al., 2009) ต่อมา Heeger และคณะค้นพบว่าการเตรียมสัณฐานวิทยา (morphology) ที่เหมาะสมของฟิล์มผสมแบบ BHJ ระหว่างพอลิธีโอเฟนซิลโธฟีนิล (poly-3-hexylthiophene, P3HT) กับ $PC_{61}BM$ สามารถเพิ่มค่า PCE เป็น 5% (Heeger et

al., 2005) ทว่าการเพิ่มค่า PCE ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบด้วย PPV และ P3HT ยังมีข้อจำกัดของค่า E_g ที่ค่อนข้างกว้าง (2.3 และ 2.1 eV) ทำให้พอลิเมอร์ดูดกลืนแสงในช่วงสเปกตรัมแสงอาทิตย์ที่แคบ การวิจัยที่เกี่ยวกับสารกึ่งตัวนำชนิดพอลิเมอร์ในระยะหลังจึงมุ่งเน้นพัฒนาพอลิเมอร์ที่มีค่า E_g น้อยกว่า 1.8 eV เพื่อให้วัสดุพอลิเมอร์มีความสามารถดูดกลืนแสงในช่วงสเปกตรัมที่กว้างขึ้น โดยมีแนวทางหนึ่งซึ่งนักวิจัยนิยมใช้ในการออกแบบโครงสร้างของพอลิเมอร์คือ โครงสร้างแบบ donor-acceptor (D-A) ที่มีหมู่ให้อิเล็กตรอนและหมู่รับอิเล็กตรอนเรียงต่อสลับกันเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ โครงสร้างลักษณะนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุภายในโมเลกุลพอลิเมอร์ (intramolecular charge transfer) ส่งผลให้ค่า E_g ลดลง เมื่อเทียบกับการใช้โครงสร้างแบบ โฮโมพอลิเมอร์ (Uy et al., 2012) ดังตัวอย่างโครงสร้างของ

พอลิเมอร์แบบ donor-acceptor (Peet et al., 2007; Amb et al., 2011; Huo et al., 2011; Bijleveld et al., 2009; Zhou et al., 2014; Hu et al., 2015) ดังแสดงในรูปที่ 7 ในปัจจุบันห้องปฏิบัติการพลังงานทดแทนแห่งชาติ (national renewable energy laboratory) หรือ NREL ซึ่งเป็นหน่วยงานมาตรฐานสากลที่ออกใบรับรองค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของโซลาร์เซลล์ (PCE) หน่วยงานนี้กระทรวงพลังงาน ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้รายงานค่า PCE ของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ซึ่งเป็นผลงานวิจัยของ Yan และคณะ จากมหาวิทยาลัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีฮ่องกง (Hong Kong University of Technology) คือ 11.5% (NREL (2015), Best Research Cell-Efficiencies) ซึ่งจัดว่าเป็นค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงสุดในขณะนี้



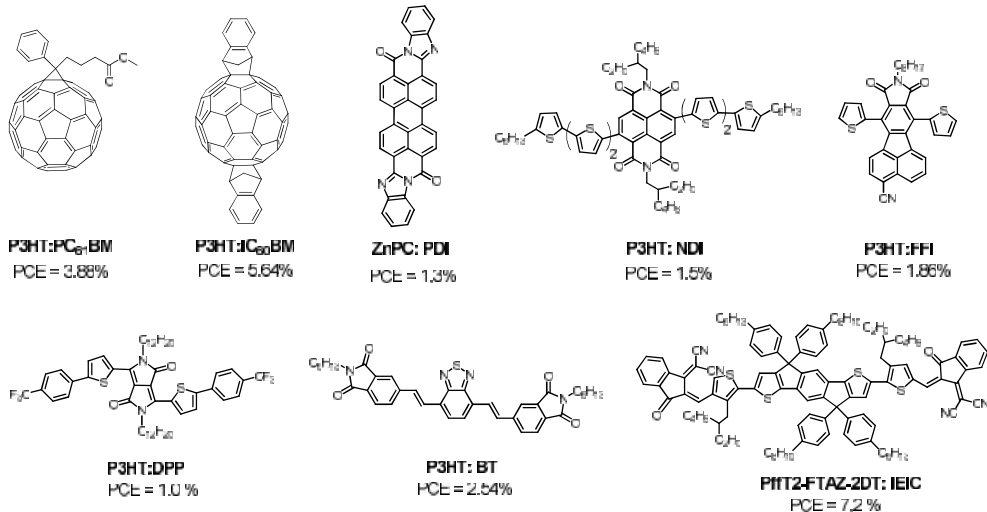
รูปที่ 7 โครงสร้างพอลิเมอร์ชนิด donor-acceptor

1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) สมบัติสำคัญของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น คือ ต้องมีระดับพลังงาน LUMO ที่ต่ำกว่าค่าระดับพลังงาน

LUMO ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี เพื่อให้สามารถรับอิเล็กตรอนอิสระจากสารกึ่งตัวนำพีได้ (รูปที่ 2) นอกจากนี้ต้องมีสมบัตินำอิเล็กตรอนหรือค่าการ

เคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่สูง เพื่อให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ต่อไปยังแคโทดได้ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายคือ ฟูลเลอร์รินและอนุพันธ์ ฟูลเลอร์ริน ซึ่งมีคุณสมบัติรับอิเล็กตรอนที่ดี เนื่องจากมีค่าพลังงานชั้น LUMO ที่ต่ำกว่าของสาร donor ค่อนข้างมาก ฟูลเลอร์รินสามารถแทรกอยู่ในชั้น donor เกิดเป็นโครงสร้างแบบร่างแห (Heeger et al., 2005) โดยทั่วไปฟูลเลอร์รินชนิด C_{60} และ C_{70} จะใช้สำหรับการขึ้นรูปฟิล์มแบบสุญญากาศ ขณะที่ phenyl C_{61} butyric acid methyl ester ($PC_{61}BM$) และ phenyl C_{71} butyric acid methyl ester ($PC_{71}BM$) นั้นละลายได้บ้างในตัวทำละลายอินทรีย์ จึงเหมาะสำหรับการขึ้นรูปฟิล์มแบบสารละลาย ในเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ (Lin et al., 2012) ในเวลาต่อมา Li และคณะ ได้ร่วมกันสังเคราะห์ indene- C_{60} bisadduct ($IC_{60}BA$) และ indene- $C_{70}BA$ ($IC_{70}BA$) เพื่อเพิ่มสมบัติการละลายในสารละลายอินทรีย์ให้ดียิ่งขึ้น และเพื่อเลื่อน (shift) ระดับพลังงาน LUMO ให้สูงขึ้นกว่าของ $PC_{61}BM$ และ $PC_{71}BM$ ข้อดีของการเพิ่มระดับพลังงาน

LUMO ได้แก่ การเพิ่มค่า V_{oc} ของ โซลาร์เซลล์ ทำให้ค่า PCE เพิ่มขึ้น และผลการศึกษาพบว่าค่าแปลงพลังงานของเซลล์ที่ประกอบด้วย P3HT ผสมกับ $IC_{60}BA$ เพิ่มขึ้นถึง 40% (Li et al., 2010) นอกจากนี้ สารอินทรีย์ในกลุ่มไรลีนไดอิมายด์ (rylene diimides) เช่น ไพริลลีน ไดอิมายด์ (PDI) และแนฟทาลีน ไดอิมายด์ (NDI) ฟลูโอแรนธิน อิมายด์ (FFI) ก็ได้รับความสนใจนำมาใช้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เนื่องจากมีสมบัติเชิงไฟฟ้าคล้ายกับฟูลเลอร์ริน ทว่าโครงสร้างทางเคมีนั้นมีอะตอมไนโตรเจนซึ่งสามารถเติมหมู่ฟังก์ชันนัลอื่นๆ ได้ง่ายกว่า สำหรับสารที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันนัลที่ดึงอิเล็กตรอนได้ดีมาก เช่น กลุ่มฟลูออรีน (-CF₃, -F-) และกลุ่มไซยาไนด์ (-CN-) ก็มีผลการศึกษาเพื่อใช้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเช่นกัน (Linac and Zhan, 2014; Erten et al., 2006; Ren et al., 2011; Zhou et al., 2012; Sonar et al., 2010; Bloking et al., 2011; Lin et al., 2015) ดังแสดงในรูปที่ 8

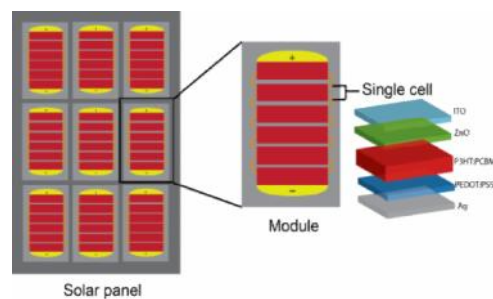


รูปที่ 8 โครงสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

2. การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ (Large scale organic solar cells) เพื่อการใช้งาน

งานวิจัยของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ที่กล่าวข้างต้นล้วนเป็นการศึกษาของเซลล์เดี่ยว (single junction cell) ที่มีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 ตารางเซนติเมตร การนำเซลล์เดี่ยวมาต่อวงจรไฟฟ้าเข้าด้วยกันให้ได้เป็นกลุ่มเซลล์หรือแผงเซลล์ที่ใหญ่ขึ้น และมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับเซลล์เดี่ยวนั้นจึงเป็นงานวิจัยที่น่าสนใจอย่างมาก โดยการพัฒนากระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์อินทรีย์ขนาดใหญ่ให้มีค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน 10% และมีอายุการใช้งานได้ 10 ปี เป็นเป้าหมายเพื่อการใช้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในระดับอุตสาหกรรม (Krebs et al., 2012) ในการนี้ผลการศึกษาพบว่าเมื่อนำเซลล์แสงอาทิตย์เซลล์เดี่ยวมาประกอบเซลล์ให้ใหญ่ขึ้นด้วยกระบวนการขึ้นรูปแผงเซลล์ขนาดใหญ่ อาทิ การรีดขึ้นรูป (roll to roll) การพ่นเคลือบ (spray coating) และการขึ้นรูปแบบดอกเตอร์เบลด (doctor bladed) นั้นให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานลดลงหลายเท่าเมื่อเทียบกับค่าการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ (Dou et al., 2013; Krebs et al., 2012) ทั้งนี้เพราะประเภทของอิเล็กโทรด สารกึ่งตัวนำ และ สารตัวเติม (additives) รวมทั้งการเรียงต่อกันของชั้นวัสดุ ล้วนส่งผลต่อประสิทธิภาพการแปลงพลังงานอย่างมาก กล่าวคือ การใช้ ITO เป็นขั้วอิเล็กโทรดมักเกิดความต้านทานไฟฟ้า (ohmic loss) ทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลง นอกจากนี้ขั้ว ITO ยังเปราะบางแตกหักง่าย จึงไม่เหมาะจะใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบยืดหยุ่น (flexible solar cell) ที่ผลิตจากกระบวนการรีดขึ้นรูป (roll to roll) ดังนั้นเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้ขั้ว ITO จึงผสมสารประกอบอื่น เช่น zinc oxide (ZnO) และ (SnO) กับขั้ว ITO (Dou et al., 2013)

อย่างไรก็ดีปัจจัยสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ ได้แก่ การออกแบบโครงสร้างและลำดับชั้นวัสดุประกอบโซลาร์เซลล์ ดังนั้น Krebs และคณะ ได้ริเริ่มพัฒนากระบวนการผลิตแผงโซลาร์เซลล์ (panel) ขนาดใหญ่จากเซลล์แสงอาทิตย์อินทรีย์ขึ้น โดยแผงโซลาร์เซลล์นี้มีขนาด 1.7 ตารางเมตร ที่ประกอบด้วยหลายโมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งแต่ละโมดูลก็ประกอบไปด้วยเซลล์แสงอาทิตย์เดี่ยวหลายเซลล์ที่ต่อวงจรไฟฟ้าแบบอนุกรม โดยในเซลล์แสงอาทิตย์เซลล์เดี่ยวประกอบด้วยชั้น ITO/ZnO/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Ag (รูปที่ 9) เมื่อนำแผงโซลาร์เซลล์นี้ไปทดสอบภาคสนามเป็นเวลา 24 วัน แล้วพบว่าช่วงสัปดาห์แรกประสิทธิภาพการแปลงพลังงานลดลงถึง 80 เปอร์เซ็นต์ เพราะออกซิเจนในอากาศแพร่เข้าไปภายในโซลาร์เซลล์ได้โดยผ่าน polyethylene terephthalate (PET) ที่ใช้เป็นพลาสติกกั้นระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ และเมื่อเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ลามิเนต (laminante) พร้อมกับเติมกาว (adhesive) เพิ่มเข้าไป พบว่าอายุการใช้งานของแผงโซลาร์เซลล์เพิ่มขึ้นถึง 6 เดือน (Medford et al., 2010)



รูปที่ 9 แผงโซลาร์เซลล์ โมดูล และองค์ประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์เซลล์เดี่ยว (ดัดแปลงมาจาก Medford et al., 2010)

อนึ่งในปี ค.ศ. 2010 Krebs และคณะได้ทุนจากธนาคารโลกเพื่อนำร่องสาธิตการใช้โคมไฟแสงอาทิตย์ (solar lamp) ในพื้นที่ขาดแคลนไฟฟ้าของประเทศแซมเบีย ทวีปแอฟริกา ซึ่งโคมไฟแสงอาทิตย์ดังกล่าวถูกออกแบบโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์อินทรีย์ ขนาด 500 ตารางเซนติเมตร ผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อชาร์จลิเทียมแบตเตอรี่ที่ต่อกับหลอดไฟแอลอีดี ผลการศึกษาพบว่าเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ชาร์จแบตเตอรี่จนเต็มแล้ว สามารถให้แสงสว่างเพียงพอต่อการอ่านหนังสือได้ประมาณ 1 ชั่วโมง (Krebs et al., 2010) และในระยะ 5 ปีที่ผ่านมา ได้มีผู้วิจัยสนใจพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบทับซ้อน (tandem solar cell) อย่างแพร่หลาย ด้วยการใช้วิธีการเรียงเซลล์แสงอาทิตย์ซ้อนกันในแนวตั้ง โดยใช้สารกึ่งตัวนำที่มีค่า E_g สูงไว้ชั้นบนสำหรับดูดกลืนแสงที่มีพลังงานสูง แล้วให้สารกึ่งตัวนำที่มีค่า E_g ต่ำกว่าอยู่ชั้นล่าง เพื่อดูดกลืนแสงที่มีพลังงานต่ำ การซ้อนกันลักษณะนี้ ทำให้สามารถเพิ่มปริมาณโฟตอนและสามารถดูดกลืนแสงได้ในช่วงสเปกตรัมที่กว้างขึ้นมากกว่าการใช้เซลล์แสงอาทิตย์เซลล์เดี่ยว ส่งผลให้ค่า PCE โดยรวมเพิ่มสูงขึ้นด้วย (Ameri et al., 2013) ต่อมา Krebs และคณะ ได้พัฒนาการเรียงลำดับชั้นของ tandem solar cell ขนาดใหญ่ โดยประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะปกติ ซึ่งแตกต่างจากการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไปที่ต้องประกอบในระบบสุญญากาศ เพื่อป้องกันออกซิเจนและความชื้นเข้าไปทำลายเซลล์ ผลการศึกษาพบว่าเสถียรภาพของค่า V_{oc} มีค่าคงที่ถึง 800 ชั่วโมง ขณะที่ค่า J_{sc} ของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงทีละน้อย ทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมลดลง (Anderson et al., 2014) ถึงกระนั้นก็ตั้งงานวิจัยนี้ก็เป็นการศึกษาให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่จะนำเซลล์แสงอาทิตย์อินทรีย์ขนาดใหญ่เพื่อใช้งานในเชิงพาณิชย์ต่อไปในอนาคต

ในปี ค.ศ. 2015 Vat และคณะ ได้ริเริ่มนำเทคโนโลยีการพิมพ์แบบ 3 มิติ (3D-printing) มาประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการพัฒนาหัวฉีด (nozzle) ให้เหมาะสมต่อการพิมพ์สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีย์ ได้แก่ poly[carbazol-alt-(dithenylbenzothiadiazole)] (PCDTBT) ผสมกับ PC₇₀BM แบบสามมิติลงบนขั้วอิเล็กโทรด ITO ผลการศึกษาพบว่าการใช้เทคโนโลยีแบบสามมิติเพื่อพิมพ์เซลล์แสงอาทิตย์นั้นใช้ปริมาณวัสดุกึ่งตัวนำน้อยกว่าวิธีการขึ้นรูปแบบ roll to roll และสามารถควบคุมความหนาของชั้นวัสดุกึ่งตัวนำได้จากอัตราการฉีดเคลือบ (coating rate) เมื่อประกอบเซลล์แสงอาทิตย์เป็นหนึ่งโมดูล (ขนาด 47.3 ตารางเซนติเมตร) พบว่าประสิทธิภาพสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์คือ 4.57 % ซึ่งลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 0.0625 ตารางเซนติเมตร ที่ให้ค่า PCE สูงสุดอยู่ที่ 6 % (Vak et al., 2015)

ประโยชน์การใช้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์

ในการนำเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์มาใช้นั้นพบว่ามีทั้งข้อดีและข้อจำกัดบางประการ โดยจำแนกได้ดังนี้

ข้อดี

1. สารหลักที่ใช้คือ สารอินทรีย์ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนและธาตุอื่นที่เป็นธาตุหาง่าย ทำให้มีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน
2. สามารถออกแบบและสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำอินทรีย์ชนิดใหม่ ให้มีสมบัติเชิงแสงและเชิงไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ได้
3. สามารถขึ้นรูปเซลล์แสงอาทิตย์ได้ทั้งโครงสร้างแบบแข็ง โครงสร้างแบบอ่อนตัวและการประกอบ

เซลล์แบบฟิล์มบางสามารถทำให้เซลล์แสงอาทิตย์โค้งงอได้

4. มีน้ำหนักเบาจึงสามารถประยุกต์ใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับอุปกรณ์เคลื่อนที่ (portable device) และอุปกรณ์สวมใส่ (wearable device) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. กระตุ้นให้นักวิจัยที่สนใจศึกษาและวิจัยกันในวงกว้างมากขึ้นกล่าวคือ การพัฒนาวัสดุกึ่งตัวนำชีวอิเล็กทรอนิกส์ การพัฒนาเทคนิคหรือรูปแบบการเรียงชั้นต่างๆ ของเซลล์ และวัสดุห่อหุ้มเซลล์ เพื่อให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพที่สูงยิ่งขึ้น ทนต่อความชื้น ทนต่อสภาพอากาศ และมีเสถียรภาพ

ข้อจำกัด

1. การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเริ่มตั้งแต่ขั้นการผสมสารกึ่งตัวนำพีและเอ็น การทำ plasma cleaning การเคลือบสารกึ่งตัวนำลงบนกระจก ITO การเคลือบอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นโลหะด้วยกระบวนการ thermal deposition รวมทั้งการวัดประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ ล้วนต้องทำในสุญญากาศ ปราศจากความชื้น จึงต้องทำในห้องปฏิบัติการที่มีความพร้อมเท่านั้น

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องส่วนมากเป็นการวิจัยพื้นฐานที่มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบวัสดุที่สังเคราะห์ใหม่ รวมทั้งการศึกษาโครงสร้างและปรับปรุงคุณสมบัติของชั้นสารกึ่งตัวนำในเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็กเท่านั้น

3. เซลล์แสงอาทิตย์อินทรีย์ขนาดใหญ่ยังมีประสิทธิภาพน้อยและใช้งานได้ในระยะเวลายาว ทำให้ไม่บรรลุเป้าหมายที่พึงประสงค์มากนัก

4. ความร่วมมือระหว่างกลุ่มวิจัยภายในประเทศไทยเพื่อบูรณาการองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับ

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์นั้นยังมีน้อย เนื่องด้วยทุนวิจัยที่จำกัด และต้องใช้ระยะเวลาวิจัยที่ยาวนาน

สรุป

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ คือ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สารกึ่งตัวนำอินทรีย์ที่ประกอบด้วยกลุ่มคาร์บอนเป็นหลัก อันปรากฏผลที่หลากหลายประการ ได้แก่ ใช้วัสดุปริมาณไม่มาก สามารถออกแบบและสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำให้มีสมบัติเชิงแสงและสมบัติการนำอิเล็กทรอนิกส์และโพลีเมอร์ได้ ใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำ มีน้ำหนักเบา สามารถนำมาขึ้นรูปได้หลากหลายเทคนิค รวมถึงการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์เป็นโมดูลหรือเป็นแผงขนาดต่างๆ ได้ง่าย ทว่าประสิทธิภาพและเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ยังน้อยกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนและเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารประกอบตัวนำ ส่งผลให้มีการศึกษาวิจัยอย่างต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ให้พอเพียงกับระดับอุตสาหกรรมได้ การพัฒนาวัสดุกึ่งตัวนำอินทรีย์ชนิดใหม่ หรือบูรณาการใช้ร่วมกับสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ การปรับปรุงชีวอิเล็กทรอนิกส์ รวมทั้งการพัฒนาเทคนิคการประกอบเซลล์หรือลำดับ การเรียงชั้นส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์ จึงเป็นแนวทางสำคัญที่จะเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ให้สูงขึ้น และทนทานต่อสภาพอากาศและความชื้นรวมทั้งมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นจึงเป็นเรื่องที่จำเป็นต้องศึกษาค้นคว้าเพื่อนำมาใช้ประโยชน์กันต่อไป

เอกสารอ้างอิง

การไฟฟ้าฝ่ายผลิต. (2558). ความต้องการใช้ไฟฟ้าของระบบ. แหล่งข้อมูล: http://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&layout=edit&id=353&Itemid=200. ค้นเมื่อวันที่ 25 พฤศจิกายน 2558.

- วรรณช แจงสว่าง (2553). ผลงานทุนเวียน. (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 50-51.
- วินิช พรหมอารักษ์, ทวีศักดิ์ สุดยอดสุขุม, สายันต์ แสงสุวรรณ และ ทินกร แก้วอินทร์ (2550). เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง. วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 2: 14-31.
- ศูนย์พยากรณ์และสารสนเทศพลังงาน (2558). สถานการณ์พลังงานไทย ปี 2557. แหล่งข้อมูล: http://www.eppo.go.th/info/Situation/quarterly/2014_Q4.pdf. ค้นเมื่อ วันที่ 20 พฤศจิกายน 2558
- Amb, C. M., Chen, S., Graham, K. R., Subbiah, J., Small, C. E., So, F. and Reynolds, J. R. (2011). Dithienogermole As a Fused Electron Donor in Bulk Heterojunction Solar Cells. *Journal of the American Chemical Society* 133: 10062–10065.
- Ameri, T., Khoram, P., Min, J. and Brabec, J. C. (2013). Organic Ternary Solar Cells: A Review. *Advanced Materials* 25: 4245-4266.
- Andersen, T. R., Dam, H. F., Hösel, M., Helgesen, M., Carlé, J. E., Larsen-Olsen, T. T., Gevorgyan, A. S., Andreasen, J. W., Adams, J., Li, N., Machui, F., Spyropoulos, G. D., Ameri, T., Lemaitre, N., Legros, M., Scheel, A., Gaiser, D., Kreul, K., Berny, S., Lozman, O. R., Nordman, S., Välimäki, M., Vilkmann, M., Søndergaard, R. R., Jørgensen, M., Brabec, C. J. and Krebs, F. C. (2014). Scalable, ambient atmosphere roll-to-roll manufacture of encapsulated large area, flexible organic tandem solar cell modules. *Energy & Environmental Science* 7: 2925-2933.
- Bijleveld, J. C., Zoombelt, A. P., Mathijssen, S. G. J., Wienk, M. M., Turbiez, M., de Leeuw, D. M. and Janssen, R. A. J. (2009). Poly(diketopyrrolopyrrole-terthiophene) for Ambipolar Logic and Photovoltaics. *Journal of the American Chemical Society* 131: 16616–16617.
- Bloking, J. T., Han, X., Higgs, A. T., Kastrop, J. P., Pandey, L., Norton, J. E., Risko, C., Chen, C. E., Brédas, J. L., McGehee, M. D. and Sellinger A. (2011). Solution-Processed Organic Solar Cells with Power Conversion Efficiencies of 2.5% using Benzothiadiazole/Imide-based Acceptors. *Chemistry Materials* 23: 5484–5490.
- Chen, G., Sasabe, H., Igarashi, T., Hong, Z. and Kido, J. (2015). Squaraine Dyes for Organic Photovoltaic Cells. *Journal of Materials Chemistry A* 3: 14517-14534.
- Cheng, Y., Yang, S. and Hsu, C. (2009). Synthesis of Conjugated Polymers for Organic Solar Cell Applications. *Chemical Reviews* 109: 5868-5923.
- Dou, L., You, J., Hong, Z., Xu, Z., Li, G., Street, R. A. and Yang, Y. (2013). 25th Anniversary Article: A Decade of Organic/Polymeric Photovoltaic Research. *Advanced Materials* 25: 6642-6671.
- Erten, S., Meghdadi, F., Güneş, S., Köpcke, R., Sariciftci, N. S. and Icli, S. (2006). Donor-acceptor heterojunction solar cells based on perylene dimide and perylene bisbenzimidazole. *The European Physical Journal Applied Physics* 36: 225-229.
- Günes, S., Neugebauer, H. and Sariciftci, N. S. (2007). Conjugated Polymer-Based Organic Solar Cells. *Chemical Reviews* 107: 1324-1338.
- Heeger, A. J., Ma, W., Yang, C., Gong, X., and Lee, K. (2005). Thermally Stable, Efficient Polymer Solar Cells with Nanoscale Control of the Interpenetrating Network Morphology. *Advanced Functional Materials* 15: 1617-1622.

- Hegedus, S. and Luque, A. (2011). Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Second Edition. John Wiley & Sons, Ltd. pp. 1-38.
- Hu, H., Jiang, K., Yang, G., Liu, J., Li, Z., Lin, H., Liu, Y., Liu, Y., Zhao, J., Zhang, J., Huang, F., Qu, Y., Ma, W. and Yan, H. (2015). Terthiophene-Based D–A Polymer with an Asymmetric Arrangement of Alkyl Chains That Enables Efficient Polymer Solar Cells. *Journal of the American Chemical Society* 137: 14149-14157.
- Huo, L., Zhang, S., Guo, X., Xu, F., Li, Y. and Hou, J. (2011). Replacing Alkoxy Groups with Alkylthienyl Groups: A Feasible Approach to Improve the Properties of Photovoltaic Polymers. *Angewandte Chemie International Edition* 50: 9697–9702.
- Krebs, F. C., Nielsan, T.D., Fyenbo, J., Wasdström, M. and Pedersen, M. S. (2010). Manufacture, integration and demonstration of polymer solar cells in a lamp for the “Lighting Africa”. *Energy & Environmental Science* 3: 512–525.
- Krebs, F. C. Søndergaard, R. R., Hösel M., Angmo, D., and Larsen-Olsen, T. T. (2012) Roll-to-roll fabrication of polymer solar cell. *Materials-today* 15(1-2): 37-49.
- Krebs, F. C., Espinosa, N., Hösel M., Søndergaard, R. R. and Jørgensen M. (2014) 25th Anniversary Article: Rise to Power – OPV-Based Solar Parks. *Advanced Materials* 26: 29-39.
- Li, Y., He, Y., Chen, H., and Hou, J. (2010). Indene–C60 Bisadduct: A New Acceptor for High-Performance Polymer Solar Cells. *Journal of the American Society* 132: 1377-1382.
- Li, Z., He, G., Wan, X., Liu, Y., Zhou, J., Long, G., Zuo, Y., Zhang, M. and Chen, Y. (2012). Solution Processable Rhodanine-Based Small Molecule Organic Photovoltaic Cells with a Power Conversion Efficiency of 6.1%. *Advanced Energy Materials* 2: 74-77.
- Lin, H., Chen, S., Li, Z., Lai, L., Yang, G., McAfee, T., Jiang, K., Li, Y., Hu, H., Zhao, J., Ma, W., Ade, H. and Yan, H. (2015). High-Performance Non-Fullerene Polymer Solar Cells Based on a Pair of Donor–Acceptor Materials with Complementary Absorption Properties. *Advanced Materials* 27: 7299-7304.
- Lin, Y., Lia, Y. and Zhan, X. (2012). Small Molecule Semiconductors for High-efficiency Organic Photovoltaics. *Chemical Society Reviews* 41: 4245-4272.
- Linac, Y. and Zhan, X. (2014). Non-fullerene Acceptors for Organic Photovoltaics: An Emerging Horizon. *Materials Horizons*. 1: 470-488.
- Lu, L., Zheng, T., Wu, Q., Schneider, A. M., Zhao, D. and Yu, L. (2015). Recent Advances in Bulk Heterojunction Polymer Solar Cells. *Chemical Reviews*. 115: 12666-12731.
- Medford, A. J., Lilliedal, M. R., Jørgensen M., Aaro, D., Pakalsi, H., Fyenbo, J. and Krebs., F. C. Grid. (2010). Connected Polymer Solar Panels: Initial Considerations of Cost, Lifetime, and Practicality. *Optics Express*. 18 (S3): A272-A285.
- National renewable energy laboratory. (2015). Best Research Cells-Efficiencies. แหล่งข้อมูล: http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg. ค้นเมื่อวันที่ 15 ธันวาคม 2558.
- Peet, J., Kim, J. Y., Coates, N. E., Ma, W. L., Moses, D., Heeger, A. J. and Bazan, G. C. (2007) Efficiency Enhancement in Low-bandgap Polymer Solar Cells by Processing with Alkane Dithiols. *Nature Materials* 6: 497-500.

- Qi, B. and Wang, J. (2013). Fill Factor in Organic Solar Cells. *Physical Chemistry Chemical Physics* 15: 8972-8982.
- Qu, S. and Tian, H. (2012). Diketopyrrolopyrrole (DPP)-based Materials for Organic Photo-voltaics. *Chemical Communications* 48: 3039–3051.
- Ren, G., Ahmed, E. and Jenekhe, S. A. (2011). Non-Fullerene Acceptor-Based Bulk Heterojunction Polymer Solar Cells: Engineering the Nanomorphology via Processing Additives. *Advanced Energy Materials* 1: 946-953.
- Ren, Y., Hailey, A.K., Hiszpanski, A. M. and Loo, Y. (2014). Isoindigo-Containing Molecular Semiconductors: Effect of Backbone Extension on Molecular Organization and Organic Solar Cell Performance. *Chemistry of Materials* 26: 6570-6577.
- Scharber, M.C. and Sariciftci, N.S. (2013). Efficiency of Bulk-heterojunction Organic Solar Cells. *Progress in Polymer Science* 38: 1929– 1940.
- Sonar, P., Ng, G., Lin, T. T., Dodabalapur, A. and Chen, Z. (2010). Solution Processable Low Bandgap Diketopyrrolopyrrole (DPP) based Derivatives: Novel Acceptors for Organic Solar Cells. *Journal of Materials Chemistry* 20: 3626–3636.
- Tang, Z., Lei, T., Prof. K., Prof, Y., Prof, J. (2010). Benzothiadiazole Containing D- π -A Conjugated Compounds for Dye-Sensitized Solar Cells: Synthesis, Properties, and Photovoltaic Performances. *Chemistry an Asian Journal* 5(8): 1911-1917.
- Uy, R. L., Price, S. C. and You, W. (2012). Structure-Property Optimizations in Donor Polymers via Electronics, Substituents, and Side Chains toward High Efficiency Solar Cells. *Macromolecular Rapid Communications* 33: 1162-1177.
- Vak, D., Hwang, K., Faulks, A. Jung, Y., Clark, N., Kim, D., Wilson, G. and Watkins, S. E. (2015). 3D Printer Based Slot-Die Coater as a Lab-to-Fab Translation Tool for Solution-Processed Solar Cells. *Advanced Energy Materials* 5(1401539): 1-8.
- Winder, C. and Sariciftci, N. Z. (2004). Low Bandgap Polymers for Photon Harvesting in Bulk Heterojunction Solar Cells. *Journal of Materials Chemistry* 14: 1077-1086.
- Xue, J., Uchida, S., Rand, B. P. and Forrest, S. R. (2004). Asymmetric Tandem Organic Photovoltaic Cells with Hybrid Planar-mixed Molecular Heterojunctions. *Applied Physics Letters* 85: 5757-5759.
- Xue, J., Rand, B. P., Uchida, S. and Forrest, S. R. (2005). Mixed Donor-acceptor Molecular Heterojunctions for Photovoltaic applications. II. Device Performance. *Journal of Applied Physics*. 98(124903): 1-9.
- Yoo, S., Domercq, B. and Kippelen, B. (2004). Efficient Thin-film Organic Solar Cells based on Pentacene/C60 Heterojunctions. *Applied Physics Letters* 85: 5427-5429.
- Zhou, Y., Ding, L., Shi, K., Dai, Y., Ai, N., Wang, J. and Pei, J. (2012). A Non-Fullerene Small Molecule as Efficient Electron Acceptor in Organic Bulk Heterojunction Solar Cells. *Advanced Materials* 24 : 957–961
- Zhou, Y., Kurosawa, T., Ma, W., Guo, Y., Fang, L., Vandewal, K., Diao, Y., Wang, C., Yan, Q., Reinspach J., Mei, J., Appleton, A. L., Koleilat, G. I., Gao, Y., Mannsfled, S. C. B., Salleo, A., Ade, H., Zhao, D. and Bao, Z. (2014). High Performance All-Polymer Solar Cell via Polymer Side-Chain Engineering Efficiency of bulk-heterojunction organic

solar cells. *Advanced Materials* 26: 3767-3772.

Zhong, Y., Trinh, M. T., Chen, R., Purdum, E. G., Khylyabich, P. P., Sezen, M., Oh, S., Zhu, H., Fowler, B., Zhang, B., Wang, W., Nam, C.,

Sfeir, M. Y., Black, C. T., Steiger, M. L., Loo, Y., Ng, F., Zhu, X. Y. and Nuckolls, C. (2015) Molecular Helices as Electron Acceptors in High-performance Bulk Heterojunction Solar Cells. *Nature Communications* 6: 8242.

