

วัสดุโพลีเมอร์-ฟูลเลอร์อินคอมโพสิตสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์

Polymer-Fullerene Composite Solar Cells

วารุณี อริยวิริยะนันท์¹ โยชิกาว่า ชูซุมุ²

¹ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

²สถาบันพลังงานขั้นสูง มหาวิทยาลัยเกียวโต ต.อุจิ เมืองเกียวโต 11-001 ญี่ปุ่น

E-mail: warunee.a@en.rmutt.ac.th

เซลล์แสงอาทิตย์แบบอินทรีย์ (Organic solar cells) จัดเป็นเซลล์โฟโตโวลตาอิกประเภทหนึ่งที่ทำหน้าที่แปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic) แสงจากดวงอาทิตย์มีทั้งแสงที่มองเห็นได้ (Visible light) ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400-700 นาโนเมตร และแสงที่ไม่สามารถมองเห็นได้ (Ultraviolet light) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 100-400 นาโนเมตร สั้นกว่าแสงที่มองเห็นได้ เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีอยู่ในปัจจุบันเป็นการเปลี่ยนพลังงานจากแสงที่มองเห็นได้เท่านั้น โดยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอินทรีย์จะมีคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Electron-hole pairs) ที่แข็งแรงมากซึ่งมันจะเกิดขึ้นหลังจากที่มีการกระตุ้นด้วยแสง [1] ดังนั้นเพื่อให้เกิดกระแสทางไฟฟ้า (Photocurrent) ในเซลล์ดังกล่าวอย่างมีประสิทธิภาพจึงต้องมีการเลือกชนิดของคู่ให้-รับอิเล็กตรอน (Donor-acceptor pairs) และโครงสร้างอุปกรณ์อย่างเหมาะสม

เมื่อ 20 ปีที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์อย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นไฟฟ้า (Energy conversion efficiency, η) ได้สูงสุดอยู่ที่ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์และมีอายุการใช้งานยาวนาน 20,000 ชั่วโมง [2-5] ข้อดีอีกอย่างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอินทรีย์เมื่อเทียบกับเซลล์อาทิตย์ที่ทำจากสารอนินทรีย์ เช่น ซิลิคอน คือ การใช้งานได้ในพื้นที่ที่มีแสงน้อย เช่น การใช้งานภายในอาคาร [6] มีแนวทางหลักในการพัฒนาอุปกรณ์ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบอินทรีย์ คือ ชั้นของตัวให้และรับอิเล็กตรอน (donor-acceptor bilayer) สามารถละลายสารโพลีเมอร์ให้อยู่ในรูปสารละลาย และขึ้นโดยใช้สูญญากาศหรือที่เรียกว่าบัลค์เฮเทอโรจังชัน (Bulk heterojunctions, BHJ) [7] ทำให้เกิดเป็นคอมโพสิตที่มีเฟสของตัวให้และรับต่อเนื่องกัน (bicontinuous composite) ส่งผลให้ปัญหาด้านพื้นที่ระหว่างผิวหน้าของตัวให้และรับหมดไป ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากที่ผ่านมามพบว่าในเซลล์แสงอาทิตย์ โพลีเมอร์ชนิดฟูลเลอร์อินให้ประสิทธิภาพในการเป็นตัวและรับอิเล็กตรอนได้ดีที่สุด ขึ้นรูปในรูปสารละลายได้ มีอิเล็กตรอนหนาแน่นและมีความสามารถในการส่งอิเล็กตรอนสูง ทำให้สารฟูลเลอร์อินเป็นที่นิยมทำเป็นตัวรับอิเล็กตรอน (acceptor) ในอุปกรณ์ต่างๆ มากที่สุดในปัจจุบัน

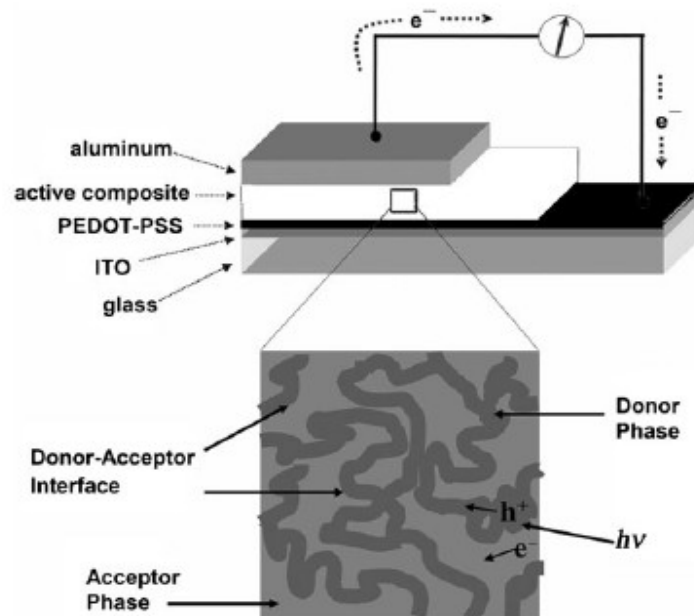
ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์แบบบัลค์เฮเทอโรจังชันในโฟโตโวลตาอิกที่ทำจากสารอินทรีย์ที่ดีที่สุดคือจะทำจากโพลี (3-เฮกซิลไทโอเฟน)(3-hexylthiophene, P3HT) และอนุพันธ์ของฟูลเลอร์อินคือ 6,6-ฟีนิล-C61-บิวไทริกแอซิด เมทิลเอสเทอร์ ([6,6]-phenyl-C61-butyric acid methyl ester, PCBM) มีประสิทธิภาพอยู่ที่ประมาณ 5% [4-5] เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพเข้าใกล้ 10% ในเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากสารโพลีเมอร์ ดังนั้นงานวิจัยที่เรียบเรียงนี้

จะพูดถึงปฏิกิริยาพื้นฐานทางอิเล็กทรอนิกส์ระหว่างตัวให้อิเล็กตรอนที่เป็นสารโพลีเมอร์กับตัวรับอิเล็กตรอนที่เป็นสารฟูลเลอร์รวมไปถึงลักษณะโครงสร้างของแต่ละชั้นในอุปกรณ์ไฟฟ้า

2. เนื้อหา

2.1 หลักกลไกพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอินทรีย์ (Organic Solar Cells on the Basic of Mechanistic Principles)

รูปที่ 1 แสดงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ BHJ ที่ประกอบด้วยส่วนของตัวรับและให้อิเล็กตรอนเป็นโพลีเมอร์คอมโพสิต กระบวนการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าประกอบด้วย 4 ขั้นตอนคือ 1) การดูดกลืนแสงจากโพลีเมอร์ที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Donor : Conjugated Polymer) เพื่อเปลี่ยนให้อยู่ในสถานะเอ็กซิตอน (Excitons) 2) การแพร่ของเอ็กซิตอน 3) การกระจายของเอ็กซิตอนพร้อมด้วยการถ่ายเทพลังงานไปยังตัวรับอิเล็กตรอน (Acceptor: PCBM) และ 4) การเคลื่อนที่และการเก็บประจุ (Charge transfer) [8-10] ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบ BHJ นี้ ชั้นที่เป็นตัวทำหน้าที่รับและให้อิเล็กตรอน (active layer) จะเป็นชั้นทำจาก โพลีเมอร์คอมโพสิตนั่นเอง ซึ่งครอบคลุมกระบวนการต่างๆ ดังกล่าวข้างต้น ยกเว้นการเก็บของประจุ และจากกระบวนการดังกล่าวจะพบว่ามีค่าทางไฟฟ้า เช่น ค่าแรงดันขณะเปิดวงจร (Open circuit voltage, V_{oc}) จะขึ้นอยู่กับค่าความสัมพันธ์ของพลังงานระหว่างตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอนมากกว่าขึ้นอยู่กับการทำงานของขั้วคาโทดและแอโนด ดังนั้นการเลือกชนิดของ active layer จึงเป็นจุดสำคัญในการพัฒนางานด้านอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารอินทรีย์ ในบทความนี้จะกล่าวถึงการหาความสัมพันธ์และจุดสมดุลและความเข้าใจเกี่ยวกับปฏิกิริยาทางกายภาพและทางอิเล็กทรอนิกส์ระหว่างโพลีเมอร์ที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนและตัวรับที่เป็นสารฟูลเลอร์ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบ BHJ

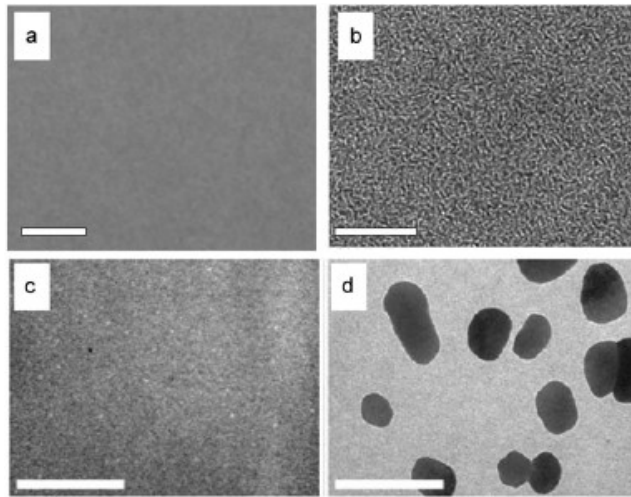


รูปที่ 1 โพลีเมอร์-ฟูลเลอร์เซลล์แสงอาทิตย์แบบ BHJ ที่มีการขยายลักษณะโครงสร้างภายในของชั้นที่เป็น active layer และส่วนประกอบอื่น เช่น ITO คือ Indium tin oxide และ PEDOT-PPS คือ poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-polystyrene sulfonate

2.2 ลักษณะ โครงสร้างของโพลีเมอร์คอมโพสิต (Morphology)

ลักษณะโครงสร้างของชั้น active layer ที่ผลิตจากโพลีเมอร์คอมโพสิตมีความสำคัญต่อการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ BHJ ในเซลล์ดังกล่าวแบบอุดมคติลักษณะโครงสร้างภายในจะต้องมีความต่อเนื่องของตัวให้และรับอิเล็กตรอน (Bicontinuous composite) มีพื้นที่ผิวหน้าสูงสุดในการทำให้เอ็กซิตอนแตกตัวและค่าเฉลี่ยขนาดในการแพร่ของเอ็กซิตอนอยู่ระหว่าง 5-10 nm ส่งผลให้เซลล์ดังกล่าวรับแสงได้ดีและมีประสิทธิภาพสูงสุด ลักษณะโครงสร้างของโพลีเมอร์คอมโพสิตจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ปัจจัยภายใน ได้แก่ ความสามารถในการละลายในตัวทำละลาย (solvent) ลักษณะของการเกิดผลึกของโพลีเมอร์และฟูลเลอร์ ความเข้ากันได้ของโพลีเมอร์ทั้งสองชนิด รวมไปถึงปัจจัยภายนอก ได้แก่ การเลือกชนิดของตัวละลาย ความเข้มข้นของอัตราส่วนในการผสมกัน กระบวนการขึ้นรูป (deposition technique) เช่น การ สปิน (spin coating) การพริ้นซ์แบบหัวฉีด (ink-jet printing) หรือการเทด้วยลูกกลิ้ง (roller casting) เป็นต้น อัตราการระเหยของตัวทำละลาย รวมไปถึงการเพิ่มอุณหภูมิ (annealing) เป็นต้น

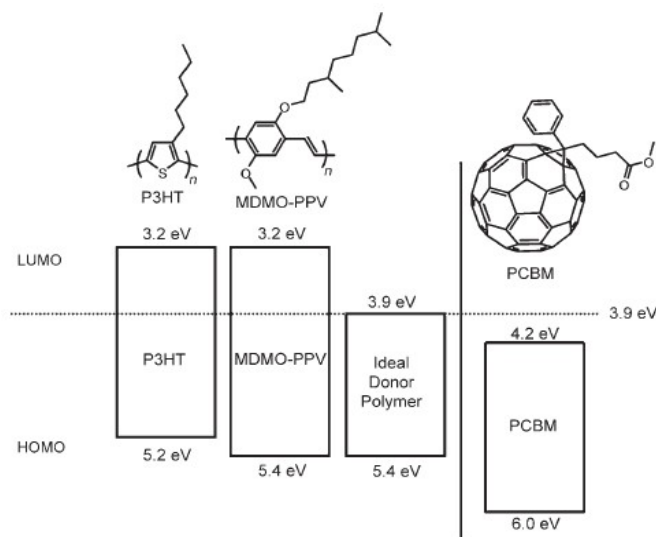
คู่โพลีเมอร์-ฟูลเลอร์ที่ใช้ใน เซลล์แสงอาทิตย์แบบ BHJ คือระบบของ P3HT/PCBM เซลล์ดังกล่าวมีประสิทธิภาพ (η) ในการแปลงรังสีจากดวงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงถึง 4-5% ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพจะน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนที่มีประสิทธิภาพสูงสุดปัจจุบัน ประมาณ 12% การเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากวัสดุโพลีเมอร์สามารถพัฒนาต่อได้อีกมากขึ้นอยู่กับการควบคุมปัจจัยต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น การเตรียมเซลล์ดังกล่าวสามารถทำได้โดยละลาย P3HT 10 mg/ml และ PCBM 0.8 mg/ml (อัตราส่วน 1:0.8) ในตัวละลายคลอโรเบนซีน เพราะว่าโพลีเมอร์ทั้งสองชนิดละลายได้ดี ก่อนจะนำไปทำ spin coating บนแผ่นรองเพื่อสร้างแผ่นฟิล์มซึ่งมีความหนาประมาณ 100-150 นาโนเมตร [3-4, 11-13] นอกจากนี้ยังมีเทคนิคอื่นที่นำมาใช้เพื่อให้ได้ฟิล์มโพลีเมอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เช่น การเพิ่มอุณหภูมิหรือการใช้ความร้อน งานวิจัยที่ผ่านมามีการให้ความร้อนแก่ชั้น active layer ให้มีอุณหภูมิมากกว่าค่าการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature, T_g) ของ P3HT (ค่า T_g ของ P3HT คือ 110 °C) ดังแสดงลักษณะโครงสร้างภายในด้วยเครื่อง Transmission Electron Microscope (TEM) ในรูปที่ 2a และ 2b พบว่าการ annealing แผ่นฟิล์มโพลีเมอร์คอมโพสิตผสมระหว่าง P3HT/PCBM อัตราส่วน 1:1 ที่ 150 °C ส่งผลให้เกิดการแยกเฟสอย่างต่อเนื่องระดับนาโนสเกล ต่างจากรูปที่ 2c และ 2d เมื่อใช้อุณหภูมิที่ 140 °C ฟิล์มเกิดการแยกเฟสระดับเมโครสเกล ดังนั้นลักษณะทางโครงสร้างมีความสำคัญอย่างมากถ้าต้องการเตรียมฟิล์มโพลีเมอร์เพื่อนำมาใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2 ภาพ TEM ของโพลีเมอร์คอมโพสิตผสมระหว่าง P3HT/PCBM อัตราส่วน 1:1 a) ผสมด้วย P3HT บริสุทธิ์ 92 % ก่อนให้ความร้อน b) ตัวอย่างเดียวกันแต่ annealing ที่ 150 °C c) ผสมด้วย P3HT บริสุทธิ์ 96 % d) ตัวอย่างเดียวกันแต่ annealing ที่ 140 °C

2.3 การหาวัสดุชนิดใหม่ในการใช้งานในโพลีเมอร์-ฟูลเลอร์ีน BHJ เซลล์แสงอาทิตย์ (New materials for optimization of polymer-fullerene BHJ solar cells)

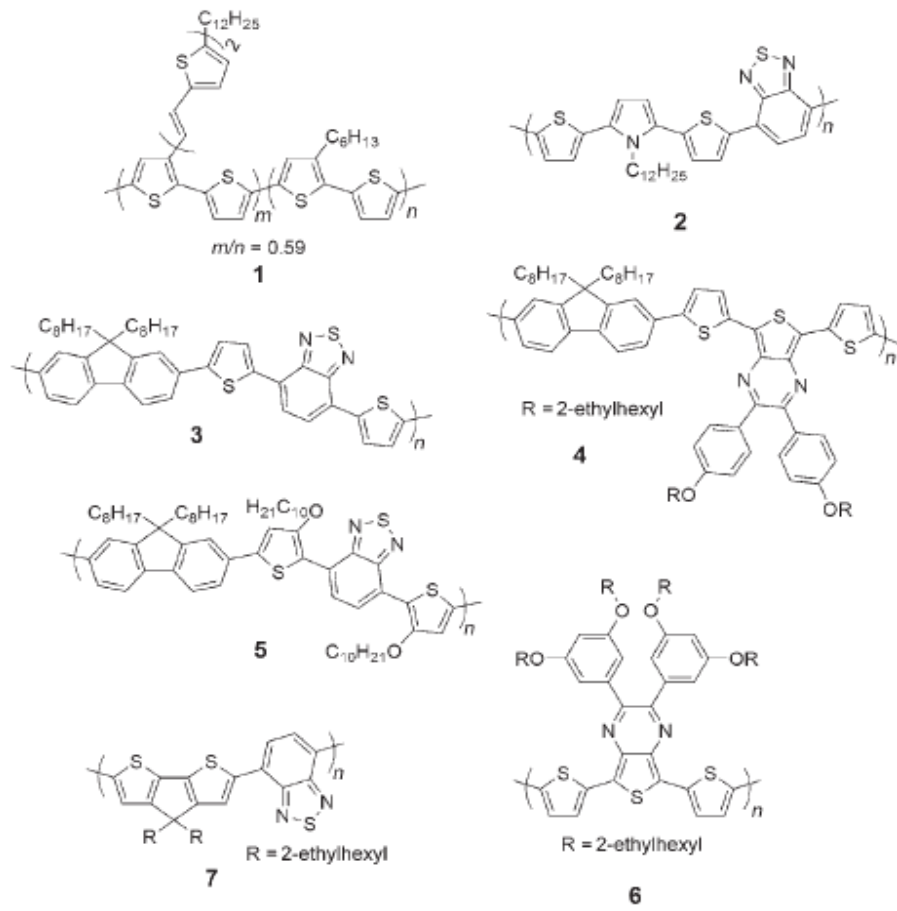
ต้นแบบของโพลีเมอร์-ฟูลเลอร์ีน BHJ เซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตจาก MDMO-PPV (Poly[2-methoxy-5-(3,7-dimethyloctyloxy)-1,4-phenylene]-*alt*-(vinylene)) /PCBM และ P3HT/PCBM โพลีเมอร์คอมโพสิต โครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3 สาเหตุที่นิยมใช้คู่โพลีเมอร์คอมโพสิตดังกล่าวเนื่องมาจากมีโพลีเมอร์ band gap ที่แคบ ทำให้อิเล็กตรอนสามารถส่งถ่ายได้ง่ายนั่นเอง



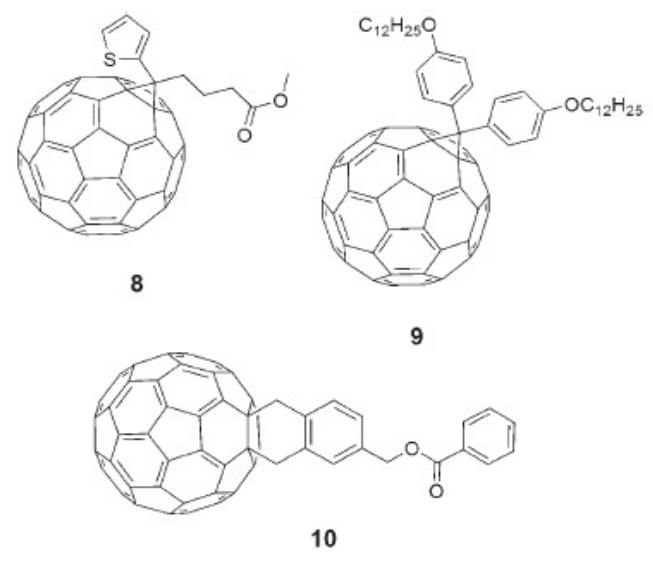
รูปที่ 3 โครงสร้าง band energy ของ MDMO-PPV, P3HT และตัวให้อิเล็กตรอนในอุดมคติ กับการสัมพันธ์กับโครงสร้างและระดับพลังงานของ PCBM; LUMO คือ Lowest Unoccupied Molecular Orbital, HOMO คือ Highest Occupied Molecular Orbital

บทความนี้ขอเสนอแนวทางการพัฒนาสารที่สังเคราะห์จากวัสดุโพลีเมอร์อินทรีย์ชนิดใหม่ๆ นอกเหนือจาก MDMO-PPV /PCBM และ P3HT/PCBM ตัวต้นแบบ ก่อนอื่นจะกล่าวถึงโพลีเมอร์ที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน โดยการพัฒนาจะเน้นไปที่วัตถุประสงค์การเพิ่มความกว้างของการดูดกลืนแสงทั้งช่วงยูวีและวิสิเบิล ตัวอย่างที่สารที่สังเคราะห์ได้คือ สารที่ 1 (Poly-3-vinylthiophenes) พบว่าการผสมสารที่ 1 กับ PCBM ให้ค่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจาก 2.4 % เป็น 3.5 % เทียบกับการผสม P3HT กับPCBM [14] สารที่ 2 คือ Poly[(N-dodecyl-2,5-bis-(2-thienyl)pyrrole)-alt-[2,1,3-benzothiadiazole]] (PTPTB) เมื่อผสมกับ PCBM ที่อัตราส่วน 1:3 พบว่ามี bandgap ต่ำและสามารถรับแสงได้กว้างถึงช่วงใกล้ 800 nm [15] สารที่ 3-5 อยู่ในประเภท APFO polymer (poly-2,7-(9,9)-dialkylfluorene)-alt-(5,5-(4,7-di-2-thiethyl-2,1,3-benzothiadiazole))) มีการใช้งานไม่กว้างขวาง ให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ 2.8 % [16-18] สารที่ 6 คือ Thienopyrazine-based polymer สารตัวนี้เมื่อผสมกับ PCBM จะมีค่า band gap ต่ำที่สุด คือ 1.2 eV สารที่ 7 คือ poly(2,6-(4,4-bis(2-ethylhexyl-4H-cyclopental[2,1-b;3-4-b]dithiophene)-alt-(4,7-(2,1,3-benzothiadiazole))) ความพิเศษของสารตัวให้อิเล็กตรอนนี้คือมีการใช้การในช่วงการดูดกลืนแสงที่กว้างกว่าตัวอื่นๆ [19]

นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาเพื่อสังเคราะห์สารอนุพันธ์ฟูลเลอรีนที่ละลายได้ง่าย (Soluble C₆₀ derivatives) และนำมาใช้ใน BHJ เซลล์แสงอาทิตย์ ดังสารที่ 8-10 วัตถุประสงค์การสังเคราะห์สารดังกล่าวนี้ไม่ได้ต้องการจะเพิ่มการดูดกลืนแสงที่มองเห็นได้แต่จะเน้นไปที่การพัฒนาด้านการเข้ากันได้ การละลายในตัวทำละลาย การเคลื่อนไหวของประจุที่เป็นตัวพาอิเล็กตรอน ดังนั้นการแทนที่หมู่ที่ละลายไปบนโครงสร้างของฟูลเลอรีนจะช่วยให้การละลายของสาร C₆₀ นี้ดีขึ้น พบว่าการผสมสารที่ 8 (Thienyl analogue of PCBM, ThCBM) กับ P3HT อัตราส่วน 1:1 ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ 3.0% [20] อีกจุดที่น่าสนใจคือสารที่ 9 (Diphenylfullerene DPM-12) นั้นสามารถละลายได้ดีที่สุดกับ MDMO-PPV และ PCBM เทียบกับ สาร C₆₀ ปกติเนื่องจากหมู่ที่มาเกาะส่งผลให้การเข้ากันได้และการเคลื่อนไหวของประจุสูงแต่ไม่เป็นผลดีมากนักเพราะจะทำให้เกิดการรวมตัวกัน (recombination) ของประจุทำให้ประสิทธิภาพการแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าต่ำลง [21] และสารที่ 10 (Dihydronaphthylfullerene) เนื่องจากมีอนุพันธ์ของ benzoate ผสมอยู่ทำให้สารนี้เมื่อผสมกับ P3HT อัตราส่วน 1:0.82 ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ 4.5% [22]



รูปที่ 4 โครงสร้างทางเคมีของสารที่ 1-7



รูปที่ 5 โครงสร้างของสารที่ 8-10

3. สรุป

งานวิจัยด้านเซลล์แสงอาทิตย์แบบสารอินทรีย์ที่ผ่านมามีพบว่าระบบโฟโตโวลตาอิกที่ทำจากวัสดุคอมโพสิตโพลีเมอร์-ฟูลเลอร์ริน (P3HT และ PCBM) นั้นจะเป็นต้นแบบในการออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีและเหมาะสมต่อจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนอย่างแน่นอนถึงแม้ว่าปัจจุบันจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเพียง 5 % ก็ตาม โดยการพัฒนาต่อไปจะได้ทั้ง (1) การออกแบบให้โพลีเมอร์ทั้งตัวให้และรับอิเล็กตรอนมีช่องว่าง (band gap) ให้อิเล็กตรอนข้ามผ่านสั้นๆ (2) การทำให้โพลีเมอร์เป็นโครงข่ายสามมิติ (crosslink) และการเติมสารเชื่อมประสาน (compatibilizer) จะช่วยให้อุปกรณ์มีความเสถียรเมื่อใช้ในระยะเวลายาวนาน (3) การปรับปรุงโครงสร้างของฟูลเลอร์รินโดยการสังเคราะห์ให้มีหมู่มาเชื่อมต่อกันสามารถให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านได้ เช่นการใช้โครงสร้างของบล็อกโคโพลิเมอร์ เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] B. A. Gregg, "Excitonic Solar Cells" *J. Phys. Chem. B* 107, 4688-4698, **2003**.
- [2] F. C. Krebs, H. Spanggaard, "Significant Improvement of Polymer Solar Cell Stability", *Chem. Mater.* 17, 5235-5237, **2005**.
- [3] M. Reye-Reyes, K. Kim, J. Dewald, R. Lopez-Sandoval, A. Avadhanula, S. Curran, D. L. Carroll, "Meso-Structure Formation for Enhanced Organic Photovoltaic Cells", *Org. Letter.* 7, 5749-5752, **2005**.
- [4] W. L. Ma, C. Yang, X. Gong, K. Lee, A. J. Heeger, "Thermally Stable, Efficient Polymer Solar Cells with Nanoscale Control of The Interpenetrating Network Morphology", *Adv. Funct. Matter.* 15, 1617-1622, **2005**.
- [5] G. Li, V. Shrotriya, J. Huang, Y. Yao, T. Moriarty, K. Emery, Y. Yang, "High-Efficiency Solution Processable Polymer Photovoltaic Cells by Self-Organization of Polymer Blends", *Nat. Mater.* 4, 864-868, **2005**.
- [6] R. Gaudiana, R. Eckert, J. Cardone, J. Ryan, A. Montello, "Photovoltaic fibers", Proceeding of SPIE Volume 6334 : Novel Concepts, Structures, and Materials for OPVs, USA, California, August 15, **2006**.
- [7] G. Yu, A. J. Heeger, "Charge Separation and Photovoltaic Conversion in Polymer Composites with Internal Donor/Acceptor Heterojunctions", *J. Appl. Phys.* 78, 4510-4515, **1995**.
- [8] C. J. Brabec, N. S. Sariciftci, J.C. Hummelen, "Plastic Solar Cells", *Adv. Funct. Mater.* 11, 15-26, **2001**.
- [9] R. Koeppa, N. S. Sariciftci, "Photoinduced Charge and Energy Transfer Involving Fullerene Derivatives", *Photochem. Photobiol. Sci.* 5, 1122-1131, **2006**.
- [10] H. Hoppe, N. S. Sariciftci, "Organic solar cells: an overview" *J. Mater. Res.* 19, 1924-1945, **2004**.
- [11] K. Kim, J. Liu, M. A. G. Namboothiry, D. L. Carroll, "Roles of donor and acceptor nanodomains in 6% efficient thermally annealed polymer photovoltaics" *Apply. Phys. Lett.*, 90, 163511, **2007**.

- [12] C. J. Ko, Y. K. Lin, F. C. Chem, C. W. Chu, "Modified buffer layers for polymer photovoltaic devices", *Apply. Phys, Lett.*, 90, 063509, **2007**.
- [13] J.I. Nakamura, K. Murata, K. Takahashi, "Relation between Carrier Mobility and Cell Performance in Bulk Heterojunction Solar Cells Consisting of Soluble Polythiophene and Fullerene Derivatives" *Apply. Phys, Lett.*, 87, 132105, **2005**.
- [14] J. Hou, Z. Tan, Y. Yan, Y. He, C. Yang, Y. Li, *J. Am. Chem. Soc.* 128, 4911-4916, **2006**.
- [15] C. J. Brabec, C. Winder, N. S. Sariciftci, J. C. Hummelen, *Adv. Funct. Mater.* 12, 709-712, **2002**.
- [16] F. Zhang, K. G. Jespersen, C. Njorstrom, M. Svensson, M. R. Andersson, V. Sundstrom, K. Magnusson, E. Moons, A. Yartsev, O. Inganas, *Adv. Funct. Mater.* 16, 667-674, **2006**.
- [17] F. Zhang, W. Mammo, L. M. Andersson, S. Admassie, M. R. Andersson, O. Inganas, *Adv. Mater.* 18, 2169-2173, **2006**.
- [18] C. Shi, Y. Yao, Y. Yang, O. Pei, *J. Am. Chem. Soc.* 128, 8980-8986, **2006**.
- [19] D. Muhlbacher, M. Scharber, M. Morana, Z. Zhu, D. Waller, R. Gaudiana, C. Brabec, *Adv. Mater.* 18, 2884-2889, **2006**.
- [20] L. M. Popescu, P. Van't Hof, A.B. Sieval, H. T. Jonkman, J. C. Hummelen, *Apply. Phys, Lett.*, 89, 213507, **2006**.
- [21] I. Riedel, E.von Hauffl, J. Parisi, N. Martin, F. Giacalone, V. Dyakonov, *Adv. Funct. Mater.* 15, 1979-4987, **2005**.
- [22] P. J. Brown, D. S. Thomas, A. Kohler, J. S. Wilson, J. S. Kim, C. M. Ramsdale, H. Sirringhaus, R. H. Friend, *Phys. Res. B.* 67, 064203, **2003**.

ภาคผนวก

Fullerene (ฟูลเลอร์) : เป็นอีกรูปหนึ่งของการ์บอนที่เพิ่งค้นพบ โดยตั้งชื่อตามผู้ค้นพบชาวอเมริกันคือ ริชาร์ด บักมินสเตอร์ ฟูลเลอร์ (Richard Buckminster Fuller) ฟูลเลอร์ประกอบด้วยโมเลกุลของธาตุคาร์บอนทั้งหมด โดยมีรูปทรงเป็นทรงกลมกลวง ทรงรี หรือท่อ ฟูลเลอร์ทรงกลมนั้นบางครั้งก็เรียกว่า "บั๊กกี้บอล" (buckyballs) รูป C_{60} (Buckminsterfullerene) นั้นมักจะถูกเปรียบเทียบกับลูกฟุตบอลสีขาวดำ สำหรับฟูลเลอร์ทรงกระบอกนั้น เรียกว่า "บั๊กกี้ทิว" (buckytubes) หรือ "คาร์บอนนาโนทิว" ฟูลเลอร์นั้นมีโครงสร้างคล้ายกับแกรไฟต์ ซึ่งประกอบด้วยแผ่นวงแหวนหกเหลี่ยม แต่มีวงแหวนห้าเหลี่ยม (หรือบางครั้งก็เป็นวงแหวนเจ็ดเหลี่ยม) ซึ่งกันมิให้แผ่นวงแหวนนั้นกลายเป็นแผ่นเรียบ

ที่มา : <http://en.wikipedia.org/wiki/Fullerene>

Photovoltaic (PV) (โฟโตโวลตาอิก) : กระบวนการผลิตไฟฟ้าจากการตกกระทบของแสงบนวัตถุที่มีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง

ที่มา : วารสารประสิทธิภาพพลังงานไฟฟ้า เล่มที่ 46 ปีที่ 9 หน้า 25-32

Organic photovoltaic cells (เซลล์โฟโตโวลตาอิกแบบอินทรีย์) : เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหนึ่งที่ผลิตจากวัสดุส่วนใหญ่คือโมเลกุลของธาตุคาร์บอน โดยเฉพาะในส่วนของชั้นที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์นั้นๆ จะทำจากวัสดุอินทรีย์

ที่มา : Organic-based photovoltaic, MRS Bull. Special Issue 5 (2005) 1