

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงต้นทุนต่ำโดยใช้วัสดุคอมโพสิตระหว่างพอลิไพโรลและวัสดุคาร์บอนที่แกนกลางเป็นท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังหลายชั้นและมีแผ่นกราฟีนที่มีโครงสร้างเป็นริบบิ้นล้อมรอบเป็นขั้วแคโทดอิเล็กโทรด

ปณิทัต หาสิน^{1*} และ เหมือนฝัน กลัดแก้ว¹

วันที่รับ 7 พฤศจิกายน 2562 วันที่แก้ไข 24 พฤศจิกายน 2562 วันที่ตอบรับ 25 พฤศจิกายน 2562

บทคัดย่อ

ไพโรล (Py) ที่ถูกพอลิเมอร์ไรซ์บนวัสดุคาร์บอนที่แกนกลางเป็นท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังหลายชั้นและมีแผ่นกราฟีนที่มีโครงสร้างเป็นริบบิ้นล้อมรอบ (MWCNT@rGNR) ได้ถูกนำมาใช้เป็นขั้วแคโทดอิเล็กโทรดที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านได้แสดงถึงรายละเอียดสัณฐานวิทยาของวัสดุคอมโพสิต PPy/MWCNT@rGNR ที่ประกอบด้วยแผ่นฟิล์มของ PPy ที่เป็นแผ่นเรียบและความหนาแน่นสูงบนแผ่นกราฟีนที่ปกคลุมพื้นผิวของ MWCNT นอกจากนี้เทคนิคทางรามานยังได้ถูกนำมาใช้เพื่อยืนยันการเกิดแผ่นกราฟีนและปริมาณข้อบกพร่องบนพื้นผิวของวัสดุคอมโพสิต PPy/MWCNT@rGNR เทคนิคไซคลิกโวลเทมเมตริกถูกนำมาใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาเชิงเคมีไฟฟ้าของแผ่นฟิล์ม MWCNT, GONR, rGNR, PPy และ PPy/MWCNT@rGNR และจากผลการทดลองที่ได้จะพบว่าวัสดุคอมโพสิตที่ได้มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาการรับอิเล็กตรอนของไตรโอโดต์ที่ดีตามลำดับต่อไปนี้ PPy/MWCNT@rGNR > rGNR > GONR > MWCNT > PPy ยิ่งไปกว่านั้นประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ PPy/MWCNT@rGNR เป็นขั้วแคโทดอิเล็กโทรดมีค่าสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้วัสดุคาร์บอนชนิดอื่นเป็นขั้วแคโทดอิเล็กโทรด โดยประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาการรับอิเล็กตรอนของไตรโอโดต์ที่ดีของวัสดุคอมโพสิตดังกล่าวนี้เป็นผลมาจากการที่ PPy มีค่าการนำไฟฟ้าสูงและมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาเชิงเคมีไฟฟ้าที่ดี นอกจากนี้ยังมาจากการที่ rGNR มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนสูง มีพื้นผิวขรุขระมากและมีพื้นที่ผิวสูงที่สามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาการรับอิเล็กตรอนของไตรโอโดต์ได้ดี

คำสำคัญ : เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง, พอลิไพโรล, แผ่นกราฟีน, ขั้วแคโทดอิเล็กโทรด

¹ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900 ประเทศไทย

* ผู้แต่ง, อีเมล: fscipths@ku.ac.th

Economical Dye-sensitized Solar Cells Based on Polypyrrole/ Multiwalled Carbon Nanotube@Reduced Graphene Oxide Nanoribbon Counter Electrode

Panitat Hasin^{1*} and Maeunfan Kladkaew ¹

Abstract

Pyrrole (Py) polymerized on multiwalled carbon nanotube@reduced graphene nanoribbon (MWCNT@rGNR) was reported as an efficient counter electrode (CE) for dye-sensitized solar cell (DSSC). Field-emission scanning electron microscopy (SEM) and Transmission electron microscopy (TEM) showed the microstructure detail of PPy/MWCNT@rGNR composite with the dense and flat pristine PPy film deposited on graphene sheet covering on a MWCNT and Raman spectroscopy were used to further confirm the formation of reduced graphene nanosheets and the degree of defect on the surface of PPy/MWCNT@rGNR composite. Cyclic voltammetry (CV) was used to study the electrocatalytic activities of the films of MWCNT, GONR, rGNR, PPy, and PPy/MWCNT@rGNR. The CV measurement revealed that resultant composites exhibited a superior electrocatalytic performance for tri-iodide reduction in the order of PPy/MWCNT@rGNR > rGNR > GONR > MWCNT > PPy. The efficiency of a solar cell with PPy/MWCNT@rGNR CE was superior to those with the other CEs. Such excellent electrocatalytic ability for the reduction of I_3^- ions can be attributed to the fact that PPy has high conductivity and superior electrocatalytic activity as well as rGNR has high electron transfer, surface roughness, and surface area to promote the reduction and regeneration of I_3^- ions.

Keywords : Dye-sensitized solar cells, Polypyrrole, Graphene, Counter electrode

¹ Department of Chemistry and Center of Excellence for Innovation in Chemistry (PERCH-CIC), Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author, E-mail: fscipths@ku.ac.th

1. บทนำ (Introduction)

มนุษย์กับพลังงานและสิ่งแวดล้อมแยกกันไม่ได้ นอกจากเพื่อการอยู่รอดของชีวิตแล้ว พลังงานยังเอื้ออำนวยความสะดวกสบายในด้านการคมนาคมขนส่ง อุตสาหกรรม เกษตรกรรม อาคารพาณิชย์ บ้านพักอาศัย ซึ่งล้วนต้องพึ่งพาพลังงานทั้งสิ้น โดยเฉพาะพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเป็นพลังงานแปรรูปได้จากทรัพยากรธรรมชาติที่ใช้แล้วหมดสิ้น หรือพลังงานสิ้นเปลือง ได้แก่ น้ำมัน ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติซึ่งในอนาคตทรัพยากรเหล่านี้ก็ต้องหมด ดังนั้นการพัฒนาพลังงานทดแทนจึงเป็นทางเลือกอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ พลังงานแสงอาทิตย์จัดเป็นพลังงานหมุนเวียนที่สำคัญที่สุดของโลกและเป็นพลังงานสะอาดไม่ทำปฏิกิริยาใด ๆ อันจะทำให้สิ่งแวดล้อมเป็นพิษ ตั้งแต่ O'Regan และ Grätzel ได้คิดค้นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใหม่ที่เรียกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-sensitized solar cell, DSC) ในปี 1991 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมีราคาถูก มีกระบวนการผลิตที่ไม่ซับซ้อน และยังมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าสูงอีกด้วย [1] โดยทั่วไปเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ๆ คือ (1) สีย้อมที่ถูกดูดซับบนชั้นทำงานของ TiO_2 (2) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (I^-/I_3^-) และ (3) ขั้วแคโทดอิเล็กโทรดของแพลทินัม (Platinum, Pt) เนื่องจากประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาการให้และรับอิเล็กตรอน

(Redox reaction) ตรงบริเวณรอยต่อระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์และขั้วแคโทดอิเล็กโทรด ดังนั้น ขั้วแคโทดอิเล็กโทรดจึงมีบทบาทสำคัญในการเร่งปฏิกิริยาการรับอิเล็กตรอนของ I_3^- (Tri-iodide reduction reaction) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า [2] ในปัจจุบัน แพลทินัม (Platinum, Pt) มักถูกนำมาใช้เป็นวัสดุเพื่อใช้ทำเป็นขั้วแคโทดอิเล็กโทรดในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง เนื่องจาก Pt มีค่าการนำไฟฟ้าสูงและมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาการรับอิเล็กตรอนของ I_3^- ที่ดี แต่อย่างไรก็ตาม I_3^- ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์สามารถกัดกร่อน Pt ได้ และนอกจากนี้ Pt ยังมีราคาแพง (~ 6,000 บาทต่อกรัม) อีกด้วย จึงทำให้ไม่สามารถผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดใหญ่ได้ และยังทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมีอายุการใช้งานสั้นลงอีกด้วย ดังนั้น การนำวัสดุชนิดอื่นที่มีราคาถูกมาใช้แทน Pt ยกตัวอย่างเช่น พอลิเมอร์นำไฟฟ้า [3] สารประกอบโลหะทรานซิชัน [4] หรือวัสดุคาร์บอนชนิดต่าง ๆ [5] จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการลดต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในเชิงอุตสาหกรรม และเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า รวมทั้งอายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์อีกด้วย

วัสดุคาร์บอนหลายชนิด ยกตัวอย่างเช่น คาร์บอนก่อกัมมันต์ (Activated carbon) [6] คาร์บอนดำ

(Carbon black) [7] แกรไฟต์ (Graphite) [8] ท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังหลายชั้น (Multi-walled carbon nanotube, MWCNT) หรือท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังชั้นเดียว (Single-walled carbon nanotubes, SWCNT) [9] สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทน Pt ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีราคาถูก มีค่าการนำไฟฟ้าสูง และมีประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาการรีดออกซิเดชันของ I_3^- ที่ดี และตั้งแต่ Prof. Novoselov และ Prof. Geim ซึ่งเป็นนักวิทยาศาสตร์ที่ได้รับรางวัล Nobel ได้เตรียมกราฟีน (Graphene) ในปี ค.ศ. 2004 [10] จากนั้นไม่นานกราฟีนก็ได้มีการนำไปใช้ในอุปกรณ์เชิงเคมีไฟฟ้าหลายชนิด ยกตัวอย่างเช่น ตัวรับรู้ (Sensors) [11] แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (Lithium-ion batteries) [12] และตัวเก็บประจุ (Capacitors) [13] เพราะกราฟีนมีสมบัติเชิงไฟฟ้า เชิงแสง เชิงความร้อน และเชิงกลที่ดี นอกจากนี้กราฟีนยังมีพื้นที่ผิวสูงอีกด้วย ($\sim 2630 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) [14] เนื่องจากสมบัติที่โดดเด่นของกราฟีนดังที่กล่าวไว้ข้างต้น จึงมีนักวิจัยหลายท่านได้นำเอากราฟีนไปทำเป็นขั้วแคโทดรีดออกซิเดชันไฮโดรเจนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า เมื่อเร็ว ๆ นี้ กราฟีนที่มีโครงสร้างเป็นริบบิ้นที่มีขนาดในระดับนาโน (Graphene nanoribbons, GNR) ที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นมาจากท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube) ได้รับความนิยมในการนำมาใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็น

อย่างมาก [15] เนื่องจากกราฟีนที่มีโครงสร้างดังกล่าว มีพื้นที่ผิวสูง มีสัณฐานวิทยาที่เป็นลักษณะเฉพาะตัว และมีค่าการนำไฟฟ้าสูง นอกจากนี้การที่โครงสร้างของกราฟีนที่มีโครงสร้างเป็นริบบิ้นนั้นมีลักษณะกลวง (Hollow geometry) จึงเหมาะต่อการนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงและตัวเก็บประจุ หรือเหมาะต่อการนำมาใช้เป็นตัวเร่งเชิงเคมีไฟฟ้า (Electrocatalysts) ในปฏิกิริยาการรีดออกซิเดชันของออกซิเจน ไฮโดรเจน หรือไตรโอไดด์เป็นอย่างมาก จากการศึกษาต่อมาพบว่าประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาการรีดออกซิเดชันของ I_3^- นั้นขึ้นอยู่กับบริเวณบกพร่อง (Defect) และหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบที่อยู่บนพื้นผิวของกราฟีน แต่อย่างไรก็ตามกราฟีนในแต่ละชั้นมักจะจับกันเป็นกลุ่มก้อนเนื่องมาจากอันตรกิริยาระหว่างพันธะไพ (π - π stacking) จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาของกราฟีนต่ำลง เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังหลายชั้นมีขนาดใหญ่ ดังนั้น การนำเอาท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังหลายชั้นไปแทรกระหว่างชั้นของกราฟีน จึงเป็นการลดอันตรกิริยาระหว่างพันธะไพ ส่งผลให้กราฟีนในแต่ละชั้นจับกันเป็นกลุ่มก้อนน้อยลง จึงทำให้วัสดุคาร์บอนที่ได้มีความพรุนสูงและมีพื้นที่ผิวที่ขรุขระซึ่งสัณฐานวิทยา (Morphology) ที่กล่าวไปข้างต้นนั้น จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาของกราฟีนดีขึ้น นอกจากนี้ท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังหลายชั้นยังทำ

หน้าที่เป็นสะพานเชื่อมที่ว่างระหว่างแผ่นกราฟีนในแต่ละชั้น เพื่อสร้างเป็นเครือข่ายเชื่อมโยงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (Conductive network) ส่งผลให้การแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนเกิดได้เร็วขึ้น จึงทำให้วัสดุคาร์บอนที่แกนกลาง (Cores) เป็นท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังหลายชั้นและมีแผ่นกราฟีนล้อมรอบมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงขึ้น และสามารถเหนี่ยวนำให้ออออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นอีกด้วย ดังนั้น วัสดุคาร์บอนที่มีโครงสร้างดังกล่าวจึงถือว่าเป็นวัสดุที่มีศักยภาพสูงในการนำมาทำเป็นขั้วแคโทดรีเล็กโตรดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

นอกจากนี้เพื่อเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าให้สูงขึ้น พอลิเมอร์นำไฟฟ้า (Conductive polymers) ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะพอลิไพโรล (Polypyrrole, PPy) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ถูกนำมาใช้เป็นเวลามากกว่า 1 ทศวรรษ เนื่องจากพอลิไพโรลเป็นพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ง่าย มีค่าการนำไฟฟ้าสูงและมีพื้นที่ผิวมาก ดังนั้น การเจือพอลิไพโรลลงในวัสดุคาร์บอนชนิดต่าง ๆ เพื่อทำเป็นขั้วไฟฟ้าจึงเป็นการเพิ่มเครือข่ายการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้มากขึ้น ส่งผลให้การกักเก็บอิเล็กตรอน (Electron collection) ของขั้วไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูงขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ข้ามผ่านขอบเขตระหว่างอนุภาค (Grain boundary) น้อยลง จึงส่งผลให้วัสดุคาร์บอนที่ถูกเจือด้วยพอลิไพโรลมีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้นกว่าเดิม

ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้มีจุดประสงค์ในการออกแบบตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงเคมีไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงของวัสดุคอมโพสิต (Composite) ระหว่างพอลิไพโรล (PPy) และวัสดุคาร์บอนที่แกนกลางเป็นท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนัง

หลายชั้นและมีแผ่นกราฟีนที่มีโครงสร้างเป็นริบบิ้นล้อมรอบ (MWCNT@GNR) เพื่อใช้เป็นขั้วแคโทดรีเล็กโตรดในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยที่ PPy ทำหน้าที่เป็นทั้งตัวนำไฟฟ้าและตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการรีดอิเล็กตรอน ในขณะที่ MWCNT@GNR จะเป็นวัสดุที่ช่วยให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้ดีขึ้นและเป็นตัวเหนี่ยวนำให้ออออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นอีกด้วย จึงส่งผลให้การเร่งปฏิกิริยาการรีดอิเล็กตรอนของ I_3^- ของขั้วแคโทดรีเล็กโตรดที่ทำมาจากวัสดุคอมโพสิตของ PPy/MWCNT@GNR มีประสิทธิภาพมากขึ้นและยังเป็นการลดความต้านทานการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน (Charge transfer resistance) ระหว่างพื้นผิวของวัสดุคอมโพสิตกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์อีกด้วย เมื่อพิจารณาถึงสมบัติที่ดีของวัสดุคอมโพสิตของ PPy/MWCNT@GNR จะเห็นได้ว่าวัสดุคอมโพสิตชนิดนี้เป็นวัสดุที่มีศักยภาพสูงที่จะนำมาใช้แทน Pt เพื่อลดต้นทุนในการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (~ 2,000 บาทต่อกรัม) แต่ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้ายังคงเทียบเท่ากับการใช้ Pt

2. วิธีการวิจัย/ทดลอง (Methods)

2.1 การสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนที่แกนกลางเป็นท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังหลายชั้นและมีแผ่นกราฟีนออกไซด์ที่มีโครงสร้างเป็นริบบิ้นล้อมรอบ (MWCNT@GNR)

วัสดุคาร์บอนที่แกนกลางเป็นท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังหลายชั้นและมีแผ่นกราฟีนออกไซด์ที่มีโครงสร้างเป็นริบบิ้นล้อมรอบ (MWCNT@GNR) จะถูกสังเคราะห์โดยใช้วิธี unzipping ของท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังหลายชั้น

โดยท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังหลายชั้นจำนวน 200 mg จะถูกกระจายตัวในกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เข้มข้นปริมาตร 45 mL และทำการคนสารละลายเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ได้สารละลายเนื้อเดียวจากนั้นทำการเติมกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ปริมาตร 6 mL ลงในสารละลายที่เตรียมได้ ทิ้งให้ตกตะกอน และทำการคนสารละลายเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากทำการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 70°C จะทำการเติมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) จำนวน 1 g อย่างช้า ๆ ลงในของผสม โดยจะทำการเติม KMnO_4 จำนวน 200 mg เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากทำให้ของผสมเย็นที่อุณหภูมิห้อง จะทำการเติมน้ำเย็นปริมาตร 250 mL และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) (30 wt %) ปริมาตร 10 mL แล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เสร็จแล้ว นำตะกอนที่ได้ไปกำจัดไอออนของโลหะโดยใช้วิธี dialysis เป็นเวลา 1 สัปดาห์ เสร็จแล้วจะได้สารละลายของวัสดุคาร์บอนที่แกนกลางเป็นท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังหลายชั้น และมีแผ่นกราฟีนออกไซด์ที่มีโครงสร้างเป็นรีบบินล้อมรอบ (MWCNT@GONR) ที่มีการกระจายตัวที่ดี

2.2. การสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนที่แกนกลางเป็นท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังหลายชั้นและมีแผ่นกราฟีนที่มีโครงสร้างเป็นรีบบินล้อมรอบ (MWCNT@GNR) และถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วยพอลิไพโรล (PPy) โดยใช้เทคนิคเชิงเคมีไฟฟ้า (Electrochemical reduction)

ในขั้นตอนแรกจะต้องทำการเจือพอลิไพโรล (PPy) บนพื้นผิวของวัสดุคาร์บอนที่แกนกลางเป็นท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังหลายชั้นและมีแผ่นกราฟีนออกไซด์ที่มีโครงสร้างเป็นรีบบินล้อมรอบ (MWCNT@GONR) ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้ขั้วทำงาน (Working electrode) เป็น FTO หรือ PEN/ITO, ขั้วเคาน์เตอร์อิเล็กโทรดเป็น

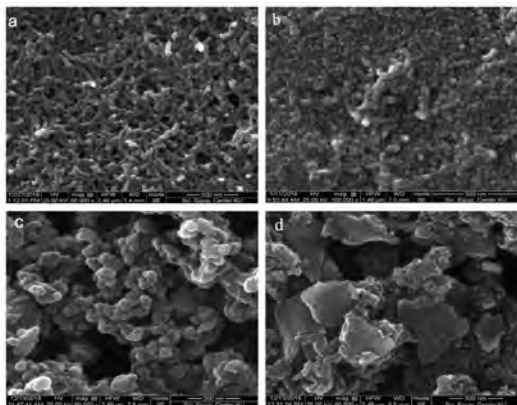
ขดลวด Pt และขั้วอ้างอิง (Reference electrode) เป็น Ag/AgCl โดยการทดลองนี้จะทำการเตรียมสารละลายที่อิ่มตัวด้วยแก๊สไนโตรเจนของ $1 \text{ mg mL}^{-1} \text{ MWCNT@GONR}$ ที่ประกอบด้วย 0.1 mol L^{-1} ไพโรล เสร็จแล้วทำสารละลายที่ได้ให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้คลื่นเสียงที่มีพลังงานสูง (Ultrasonication) เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นให้ความต่างศักย์ 0.8 V เป็นเวลา 150 วินาที หลังจากขั้นตอนนี้จะทำให้ได้พอลิไพโรลเคลือบอยู่บนวัสดุคาร์บอนที่แกนกลางเป็นท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังหลายชั้นและมีแผ่นกราฟีนออกไซด์ที่มีโครงสร้างเป็นรีบบินล้อมรอบ (PPy/MWCNT@GONR)

จากนั้นจะทำการรีดิวซ์แผ่นกราฟีนออกไซด์ที่มีโครงสร้างเป็นรีบบินโดยการให้ความต่างศักย์ในช่วง 0 ถึง -1 V ในสารละลาย $0.5 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$ ที่อิ่มตัวด้วยแก๊สไนโตรเจน เป็นเวลา 10 รอบ โดยใช้อัตราการกวาดความต่างศักย์ (Scan rate) เท่ากับ 50 mV s^{-1} หลังจากขั้นตอนนี้จะทำให้ได้พอลิไพโรลเคลือบอยู่บนวัสดุคาร์บอนที่แกนกลางเป็นท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังหลายชั้นและมีแผ่นกราฟีนที่มีโครงสร้างเป็นรีบบินล้อมรอบ (PPy/MWCNT@GNR)

3. ผลการวิจัย/ทดลอง (Results) วิเคราะห์อภิปรายผล (Discussion)

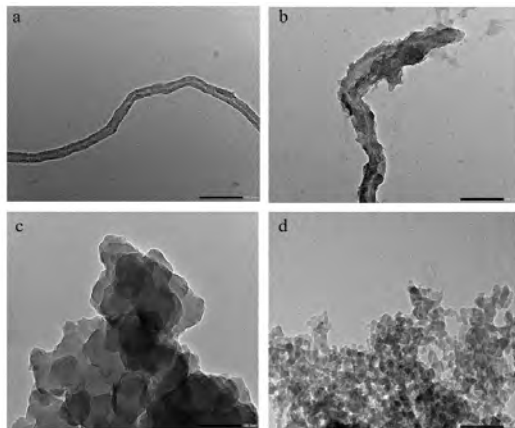
เพื่อที่จะยืนยันถึงสัญญาณวิทยาวัสดุ PPy/MWCNT@GNR ที่แกนกลางเป็นท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังหลายชั้นและมีแผ่นกราฟีนที่มีโครงสร้างเป็นรีบบินล้อมรอบ ดังนั้น สัญญาณวิทยาของ multiwalled carbon nanotubes (MWCNTs) จึงถูกนำมาตรวจสอบโดยใช้เทคนิค field-emission scanning electron

microscopy (FE-SEM) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ จากรูปที่ 1 (a) จะพบว่าสัณฐานวิทยาของ MWCNT จะมีโครงสร้างเป็นท่อและมีเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวเฉลี่ยประมาณ 10 nm และ 5 μm ตามลำดับ จากรูปที่ 1(b) จะพบว่าสัณฐานวิทยาของ GONR จะคล้ายคลึงกับ MWCNT แต่จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวเฉลี่ยน้อยกว่า MWCNT นั้นเป็นการยืนยันว่าวัสดุคาร์บอนที่แกนกลางเป็นท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังหลายชั้นและมีแผ่นกราฟีนออกไซด์ที่มีโครงสร้างเป็น รีบิ้นล้อมรอบ (GONR) สามารถถูกสังเคราะห์โดยใช้วิธี unzipping ของท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังหลายชั้น (MWCNT) จากรูปที่ 1 (c) จะพบว่าสัณฐานวิทยาของ PPy จะมีโครงสร้างเป็นเกล็ด ซึ่งมีขนาดในระดับนาโน จากรูปที่ 1(d) จะพบว่าสัณฐานวิทยาของ PPy/MWCNT@rGNR จะคล้ายคลึงกับ PPy นั้นเป็นการยืนยันว่า PPy ถูกเจืออยู่บนพื้นผิวของ MWCNT@rGNR



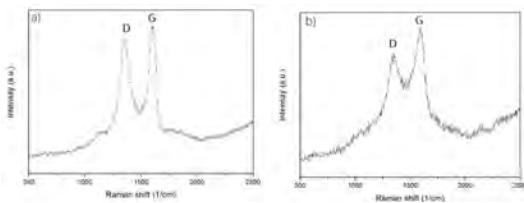
รูปที่ 1 ภาพถ่าย SEM ของ (a) MWCNT, (b) GONR, (c) PPy และ (d) PPy/MWCNT@rGNR

รูปที่ 2 แสดงภาพถ่าย transmission electron microscopy (TEM) ของ MWCNT, GONR, PPy และ PPy/MWCNT@rGNR จากรูปที่ 2 (a) จะพบว่าสัณฐานวิทยาของ MWCNT จะมีโครงสร้างเป็นท่อ ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่าย SEM ส่วนสัณฐานวิทยาของ MWCNT@GONR จะมีลักษณะคล้ายรีบิ้น ซึ่งจะปรากฏทั้ง 2 ด้านของท่อนาโนคาร์บอน ดังแสดงได้จากรูปที่ 2 (b) และจากรูปที่ 2 (c) จะพบว่าสัณฐานวิทยาของ PPy จะมีโครงสร้างเป็นเกล็ด ซึ่งมีขนาดในระดับนาโน ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่าย SEM นอกจากนี้ในรูปที่ 2 (d) ยังได้แสดงว่าโครงสร้างพื้นฐานของ PPy ในรูปที่ 2 (c) ยังคงสภาพอยู่ในวัสดุ PPy/MWCNT@rGNR นั้นเป็นการยืนยันว่า PPy ถูกเจืออยู่บนพื้นผิวของ MWCNT@rGNR ยิ่งไปกว่านั้นยังพบว่า PPy ที่เจืออยู่บนพื้นผิวของ MWCNT@rGNR ในวัสดุ PPy/MWCNT@rGNR นั้นจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า PPy ในรูปที่ 2 (c) ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า rGNR สามารถทำให้อนุภาคของ PPy เกิดการกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอ โดยไม่เกิดการหลอมรวมกันของอนุภาค



รูปที่ 2 ภาพถ่าย TEM ของ (a) MWCNT, (b) GONR, (c) PPy และ (d) PPy/MWCNT@rGNR

เทคนิค Raman spectroscopy เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบวัสดุที่ประกอบด้วยพันธะโคเวเลนต์ที่ไม่มีข้อขัดข้อง โดยจะให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับโครงสร้างของวัสดุคาร์บอน รูปที่ 3 แสดงตำแหน่งของพีก D (1355 cm^{-1} , sp^3 คาร์บอนอะตอม) และพีก G (1579 cm^{-1} , sp^2 คาร์บอนอะตอม) ของวัสดุ GONR และ PPy/MWCNT@rGNR พร้อมทั้งระบุอัตราส่วนความเข้มของพีก D ต่อพีก G (I_D/I_G) ของวัสดุคาร์บอนทั้ง 2 ชนิดอีกด้วย การที่ PPy/MWCNT@rGNR มีค่า I_D/I_G น้อยกว่า แสดงว่าโครงสร้างคาร์บอนของวัสดุ PPy/MWCNT@rGNR มีข้อบกพร่อง (defect) ต่ำ จึงทำให้วัสดุ PPy/MWCNT@rGNR มีค่าการนำไฟฟ้าสูง จากข้อมูลที่ได้จากเทคนิค Raman spectroscopy จึงสามารถสรุปได้ว่าวัสดุ PPy/MWCNT@rGNR สามารถนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงเคมีไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงได้

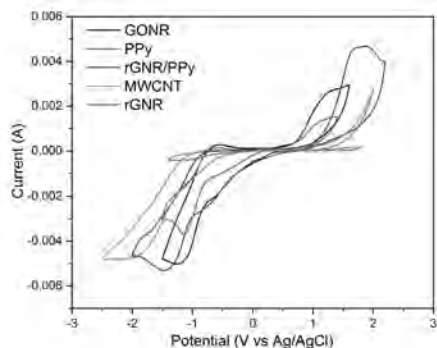


รูปที่ 3 กราฟ Raman spectra ของวัสดุ (a) GONR และ (b) PPy/MWCNT@rGNR

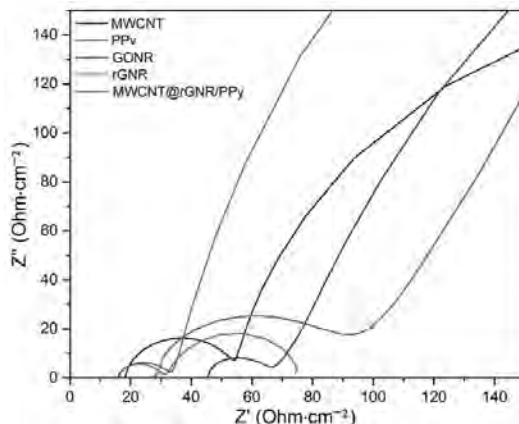
ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาเชิงเคมีไฟฟ้าของกระบวนการรับอิเล็กตรอนของ tri-iodide ในวัสดุคอมโพสิตจะถูกประเมินโดยใช้เทคนิค CV ในระบบสามขั้วไฟฟ้า ซึ่งกราฟ CV จะถูกแสดงในรูปที่ 4 โดยจะพบพีครีดอกซ์ 1 คู่ในทุกขั้วไฟฟ้า ซึ่งแสดงถึงปฏิกิริยาดังแสดงข้างล่างนี้



โดย tri-iodide ion จะรับอิเล็กตรอนบนพื้นผิวของขั้วแคโทดรีดอกซ์ในกระบวนการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์อ้อมไวแสง จากรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากปฏิกิริยาการรับอิเล็กตรอนของขั้วไฟฟ้าต่างชนิดจะเพิ่มขึ้นตามลำดับต่อไปนี้ $PPy < MWCNT < GONR < rGNR < rGNR/PPy$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาการรับอิเล็กตรอนจะเกิดเร็วขึ้นเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจาก rGNR/PPy เนื่องจากโครงสร้างของแผ่นกราฟีนรีบินที่มีขนาดในระดับนาโนมีท่อนโนคาร์บอนเข้าไปแทรกและพื้นผิวของวัสดุกราฟีนนาโนรีบินยังถูกเจือด้วยพอลิไพโรลอีกด้วย นอกจากนี้วัสดุคอมโพสิต rGNR/PPy ที่ได้ยังมีสัญญาณวิทยุที่เป็นรูปพุ่ม จึงส่งผลให้วัสดุคอมโพสิตที่ได้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์สูงและมีบริเวณเร่งปฏิกิริยาการรับอิเล็กตรอนของ tri-iodide มาก โดย PPy จะทำหน้าที่เป็นสารที่ช่วยให้ rGNR นำไฟฟ้าได้มากขึ้น ยิ่งไปกว่านั้น PPy ยังทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการรับอิเล็กตรอนอีกด้วย จึงทำให้ขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากวัสดุคอมโพสิต rGNR/PPy มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาเชิงเคมีไฟฟ้าสูงที่สุด



รูปที่ 4 กราฟ CV ของขั้วไฟฟ้า 5 ขั้ว ที่เตรียมจาก MWCNT, GONR, rGNR, PPy และ rGNR/PPy ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของ tri-iodide



รูปที่ 5 Nyquist plot ของขั้วเคาน์เตอร์อิเล็กโทรดของ PPy, MWCNT, GONR, rGNR, และ PPy/MWCNT@rGNR

Nyquist plot ของขั้วเคาน์เตอร์อิเล็กโทรดจะประกอบด้วยครึ่งวงกลม 2 วง (รูปที่ 5) โดยความต้านทานการแลกเปลี่ยนประจุ (R_{CT}) ตรงบริเวณรอยต่อระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์และขั้วเคาน์เตอร์อิเล็กโทรดจะแสดงได้จากครึ่งวงกลมวงแรกในย่านความถี่กลาง ๆ (10^5 – 10 Hz) ในขณะที่ความต้านทานการเคลื่อนที่ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Z_d) tri-iodide ion จะแสดงได้จากครึ่งวงกลมวงที่สองในย่านความถี่ต่ำ (10 – 0.1 Hz) ของ Nyquist plot ส่วนความต้านทานภายในขั้วเคาน์เตอร์อิเล็กโทรด (R_s) จะหาได้จากในย่านความถี่สูง (10^6 – 10^5 Hz) เมื่อ phase มีค่าเป็นศูนย์

ขั้วเคาน์เตอร์อิเล็กโทรดของ PPy, MWCNT, GONR, rGNR, และ PPy/MWCNT@rGNR จะมีค่า R_s เท่ากับ 27.63, 18.24, 45.04, 16.12, และ 13.41 Ω cm^2 ตามลำดับ โดยค่า R_s ของขั้วเคาน์เตอร์อิเล็กโทรดที่ทำจาก PPy/MWCNT@rGNR จะมีค่าน้อยกว่าขั้วเคาน์เตอร์อิเล็กโทรดที่ทำจาก PPy, MWCNT, GONR และ rGNR เนื่องจากแผ่นฟิล์มของ rGNR/PPy จะมีการนำไฟฟ้ามากกว่าแผ่นฟิล์มที่ทำจาก PPy, MWCNT, GONR และ rGNR ซึ่งการที่ PPy/MWCNT@rGNR มีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงนั้น เนื่องมาจากวัสดุคาร์บอนดังกล่าวมีโครงสร้างที่มีแกนกลางเป็นท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังหลายชั้น โดยจะทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อช่องว่าง

ที่เกิดจากแผ่นกราฟีนที่มีโครงสร้างเป็นริบบิ้นล้อมรอบ จึงทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนแบบสามมิติอย่างต่อเนื่องในโครงสร้างของ PPy/MWCNT@rGNR นอกจากนี้ การเจือพอลิไพโรล (PPy) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าลงบนพื้นผิวของวัสดุ rGNR จะทำให้ค่า R_s ลดลงอย่างมีนัยสำคัญจาก 16.12 ลดลงเหลือ 13.41 $\Omega \text{ cm}^2$ โดยค่า R_s ที่ลดลงของ PPy/MWCNT@rGNR จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้นด้วย

ยิ่งไปกว่านั้นขั้วแคโทดรีดอกซ์ของ rGNR และ PPy/MWCNT@rGNR จะมีค่า R_{CT} เท่ากับ 7.74 และ 6.01 $\Omega \text{ cm}^2$ ตามลำดับ ในขณะที่ค่า R_{CT} ของขั้วแคโทดรีดอกซ์ที่ทำจาก PPy, MWCNT และ GONR มีค่าสูงกว่าวัสดุ rGNR และ PPy/MWCNT@rGNR อย่างเห็นได้ชัด การที่ค่า R_{CT} ของขั้วแคโทดรีดอกซ์ที่ทำจาก PPy/MWCNT@rGNR มีค่าต่ำกว่าเนื่องจากวัสดุคาร์บอนดังกล่าวมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาการรับอิเล็กตรอนของ I_3^- ไปเป็น I^- สูง นอกจากนี้การที่ขั้วแคโทดรีดอกซ์ของ PPy/MWCNT@rGNR มีค่า R_{CT} ต่ำ นั้นหมายความว่าวัสดุคาร์บอนดังกล่าวมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง (J_0) โดยค่า R_{CT} และ J_0 จะมีความสัมพันธ์ตามสมการ

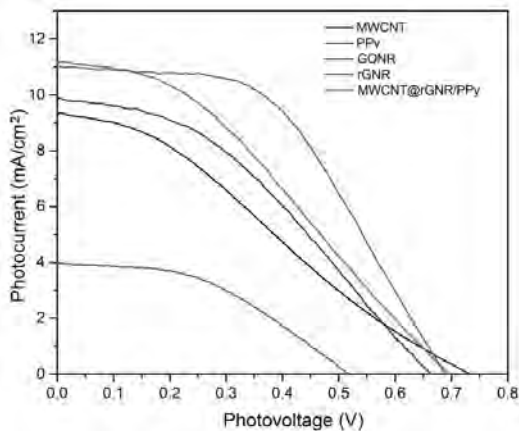
$$J_0 = RT/nFR_{CT} \quad \dots(1)$$

โดย J_0 คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า; R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส; T คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน; F คือ

ค่าคงที่ฟาราเดย์; n คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องในการเกิดปฏิกิริยาการรับอิเล็กตรอนของ I_3^- ไปเป็น I^- และ R_{CT} คือ ความต้านทานการแลกเปลี่ยนประจุ

ซึ่งค่า J_0 ที่สูงของขั้วแคโทดรีดอกซ์ที่ทำจาก PPy/MWCNT@rGNR จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้นด้วย เนื่องจาก PPy/MWCNT@rGNR มีพื้นที่ผิวสูงที่สามารถสัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้ดี และมีบริเวณเร่งปฏิกิริยา (active site) ปริมาณมากสำหรับเร่งปฏิกิริยาการรับอิเล็กตรอนของ I_3^- เพราะวัสดุคาร์บอนดังกล่าวมีแกนกลางเป็นท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังหลายชั้นและมีแผ่นกราฟีนที่มีโครงสร้างเป็นริบบิ้นล้อมรอบ นอกจากนี้วัสดุ PPy/MWCNT@rGNR ยังมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงและมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาที่ดี เนื่องจากการเจือพอลิไพโรล (PPy) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าลงบนพื้นผิวของวัสดุ rGNR นอกจากนี้การเจือพอลิไพโรล (PPy) ยังเป็นการเพิ่มขอบฟรอนต์ลงบนพื้นผิวของวัสดุ rGNR อีกด้วย

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ประกอบด้วยขั้วแคโทดรีดอกซ์ที่ทำจาก PPy, MWCNT, GONR, rGNR, และ PPy/MWCNT@rGNR รูปที่ 6 (a) จะถูกนำไปวัดประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (photovoltaic conversion efficiency (PCE) ภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง (100 mW cm^{-2}) ดังแสดงได้จากกราฟที่สร้างระหว่างกระแสไฟฟ้า-ความต่างศักย์ (I-V curve) ในรูปที่ 6 (b)



รูปที่ 6 (a) เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงที่ประดิษฐ์ขึ้น (b) กราฟที่สร้างระหว่างกระแสไฟฟ้า-ความต่างศักย์ (I-V curve) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ประกอบด้วยขั้วแคโทดอิเล็กโทรดที่ทำจาก PPy, MWCNT, GONR, rGNR, และ PPy/MWCNT@rGNR

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ประกอบด้วยขั้วแคโทดอิเล็กโทรดที่ทำจาก PPy จะมีค่า PCE ต่ำที่สุด (1.13%) โดยจะให้ค่า V_{OC} เท่ากับ 0.52 V, J_{SC} เท่ากับ 3.98 mA cm^{-2} และ FF เท่ากับ 44% เนื่องจากสัณฐานวิทยาของ PPy จะเป็นแผ่นหนาและไม่มีรูพรุน จึงทำให้มีปริมาณบริเวณเร่งปฏิกิริยาน้อย แต่หลังจากทำการเจือ PPy บนพื้นผิวของวัสดุ rGNR เพื่อให้ได้คอมโพสิตของ PPy/MWCNT@rGNR นั้น จะพบว่าเซลล์

แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ประกอบด้วยขั้วแคโทดอิเล็กโทรดที่ทำจาก PPy/MWCNT@rGNR จะมีค่า PCE ที่สูงขึ้น (4.71%) โดยจะให้ค่า V_{OC} เท่ากับ 0.69 V, J_{SC} เท่ากับ 11.04 mA cm^{-2} และ FF เท่ากับ 50% เนื่องจากวัสดุคาร์บอนชนิดนี้มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนที่ดี พื้นผิวของวัสดุคาร์บอนมีความขรุขระสูง และมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก ในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ประกอบด้วยขั้วแคโทดอิเล็กโทรดที่ทำจาก rGNR จะมีค่า PCE ที่ต่ำกว่า (3.41%) โดยจะให้ค่า V_{OC} เท่ากับ 0.69 V, J_{SC} เท่ากับ 11.14 mA cm^{-2} และ FF เท่ากับ 34% นอกจากนี้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ประกอบด้วยขั้วแคโทดอิเล็กโทรดที่ทำจาก MWCNT และ GONR จะมีค่า PCE อยู่ในช่วง 2.50–3.50% ซึ่งมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ประกอบด้วยขั้วแคโทดอิเล็กโทรดที่ทำจาก PPy/MWCNT@rGNR ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าวัสดุ PPy/MWCNT@rGNR เป็นวัสดุที่มีศักยภาพในการนำมาใช้แทนขั้วแคโทดอิเล็กโทรดที่ทำจากแพลทินัม ซึ่งมีราคาแพงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงได้

4. บทสรุป (Conclusions)

ไฟโรลที่ถูกพอลิเมอร์โรซบนวัสดุคาร์บอนที่แกนกลางเป็นท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังหลายชั้นและมีแผ่นกราฟีนที่มีโครงสร้างเป็นริบบิ้นล้อมรอบ (PPy/MWCNT@rGNR) ได้ถูกสังเคราะห์และนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงเคมีไฟฟ้าของขั้วแคโทดรีดอกซ์ไฮโดรเจนสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง จากภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านจะพบแผ่นฟิล์มของ PPy บนท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังหลายชั้นเป็นแกนกลางโดยมีแผ่นกราฟีนที่มีโครงสร้างเป็นริบบิ้นล้อมรอบ จากเทคนิคทางรามานจะพบว่าวัสดุ PPy/MWCNT@rGNR มีปริมาณข้อบกพร่องต่ำ จึงส่งผลให้วัสดุคาร์บอนดังกล่าวมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนสูง นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุ PPy/MWCNT@rGNR มีพื้นที่ผิวขรุขระมากกว่าและมีพื้นที่ผิวสูงกว่า rGNR, GONR, MWCNT และ PPy ซึ่งถูกยืนยันได้จากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและเทคนิคไซคลิกโวลเทมเมตริกตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ PPy/MWCNT@rGNR เป็นขั้วแคโทดรีดอกซ์ไฮโดรเจนจะมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าดีที่สุด ($\eta = 4.71\%$) เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ rGNR ($\eta = 3.41\%$), GONR ($\eta = 3.11\%$),

MWCNT ($\eta = 2.49\%$) และ PPy ($\eta = 1.13\%$) เป็นขั้วแคโทดรีดอกซ์ไฮโดรเจน ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ PPy มีค่าการนำไฟฟ้าสูงและมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาเชิงเคมีไฟฟ้าที่ดี นอกจากนี้ยังมาจากการที่ MWCNT@rGNR มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนสูงและมีความต้านทานการแลกเปลี่ยนประจุตรงบริเวณรอยต่อระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์และขั้วแคโทดรีดอกซ์ไฮโดรเจน ดังนั้น วัสดุ PPy/MWCNT@rGNR ที่มีราคาถูกจึงเป็นวัสดุที่มีศักยภาพสูงในการนำมาใช้แทน Pt ที่มีราคาแพงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงได้

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

แผนงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีจากการได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากทุนอุดหนุนโครงการวิจัยประจำปีงบประมาณ 2562 สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ และขอขอบพระคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในการให้ความอนุเคราะห์ทั้งอุปกรณ์สถานที่และเวลาในการทำงาน เพื่อให้คณะผู้วิจัยสามารถดำเนินงานได้อย่างคล่องตัว

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] O'REGAN, B.; GRÄTZEL, M., A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films. *Nature* 1991, 353, 737-740.
- [2] Papageorgiou, N.; Maier, W. F.; Grätzel, M., An iodine/triiodide reduction electrocatalyst for aqueous and organic media. *J. Electrochem. Soc.* 1997, 144, 876-884.
- [3] Saito, Y.; Kitamura, T.; Wada, Y.; Yanagida, S., Application of poly(3,4-ethylenedioxythiophene) to counter electrode in dye-sensitized solar cells. *Chemistry Letters* 2002, (10), 1060-1061.
- [4] Wu, M. X.; Lin, X.; Wang, Y. D.; Wang, L.; Guo, W.; Qu, D. D.; Peng, X. J.; Hagfeldt, A.; Gratzel, M.; Ma, T. L., Economical Pt-Free Catalysts for Counter Electrodes of Dye-Sensitized Solar Cells. *Journal of the American Chemical Society* 2012, 134, (7), 3419-3428.
- [5] Huang, Z.; Liu, X. H.; Li, K. X.; Li, D. M.; Luo, Y. H.; Li, H.; Song, W. B.; Chen, L. Q.; Meng, Q. B., Application of carbon materials as counter electrodes of dye-sensitized solar cells. *Electrochemistry Communications* 2007, 9, (4), 596-598.
- [6] Imoto, K.; Takahashi, K.; Yamaguchi, T.; Komura, T.; Nakamura, J.; Murata, K., High-performance carbon counter electrode for dye-sensitized solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2003, 79, (4), 459-469.
- [7] Murakami, T. N.; Ito, S.; Wang, Q.; Nazeeruddin, M. K.; Bessho, T.; Cesar, I.; Liska, P.; Humphry-Baker, R.; Comte, P.; Pechy, P.; Gratzel, M., Highly efficient dye-sensitized solar cells based on carbon black counter electrodes. *Journal of the Electrochemical Society* 2006, 153, (12), A2255-a2261.
- [8] Chen, J. K.; Li, K. X.; Luo, Y. H.; Guo, X. Z.; Li, D. M.; Deng, M. H.; Huang, S. Q.; Meng, Q. B., A flexible carbon counter electrode for dye-sensitized solar cells. *Carbon* 2009, 47, (11), 2704-2708.

- [9] Suzuki, K.; Yamaguchi, M.; Kumagai, M.; Yanagida, S., Application of carbon nanotubes to counter electrodes of dye-sensitized solar cells. *Chemistry Letters* 2003, 32, (1), 28-29.
- [10] Novoselov, K. S.; Geim, A. K.; Morozov, S. V.; Jiang, D.; Zhang, Y.; Dubonos, S. V.; Grigorieva, I. V.; Firsov, A. A.; , Electric Field in Atomically Thin Carbon Films. *Science* 2004, 306, 666-669.
- [11] Schedin, F.; Geim, A. K.; Morozov, S. V.; Hill, E. W.; Blake, P.; Katsnelson, M. I.; Novoselov, K. S.; , Detection of Individual Gas Molecules Adsorbed on Graphene. *Nat. Mater.* 2007, 6, 652-655.
- [12] Yoo, E. J.; Kim, J.; Hosono, E.; Zhou, H. S.; Kudo, T.; Honma, I., Large Reversible Li Storage of Graphene Nanosheet Families for Use in Rechargeable Lithium Ion Batteries *Nano Lett.* 2008, 8, 2277-2282.
- [13] Stoller, M. D.; Park, S.; Yanwu, Z.; An, J.; Ruoff, R. S., Graphene-Based Ultracapacitors. *Nano Lett.* 2008, 8, 3498-3502.
- [14] Peigney, A.; Laurent, C.; Flahaut, E.; Bacsá, R. R.; Rousset, A., Specific Surface Area of Carbon Nanotubes and Bundles of Carbon Nanotubes *Carbon* 2001, 39, (507-514).
- [15] Chen, Z. H.; Lin, Y. M.; Rooks, M. J.; Avouris, P., Graphene nano-ribbon electronics. *Physica E-Low-Dimensional Systems & Nanostructures* 2007, 40, (2), 228-232.