

การศึกษาความสามารถในการตรวจวัดสารชีวโมเลกุล
โดยใช้พอลิเมอร์นำไฟฟ้าผสมกราฟีนออกไซด์

THE STUDY OF THE EFFICIENCY OF BIOMOLECULAR DETERMINATION
BASED ON CONDUCTING POLYMER/GRAPHENE OXIDE

อารยา เกิดอยู่ วริศรา เรืองน้อย และรพิพรรณ จันทร์มะณี*

Arraya Kertyoo, Waridsara Ruangnoiand and Rapihun Janmanee*

Science and Technology faculty, Pibulsonkram Rajapat University

*corresponding author e-mail: rapihun16@psru.ac.th

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ฟิล์มบางของวัสดุผสมพอลิไพโรล/กราฟีนออกไซด์ถูกสังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธีอิเล็กโทรพอลิเมอร์เซชันบนแผ่นกระจกเคลือบทินออกไซด์เจือฟลูออรีน โดยทำการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้าและกระบวนการได้ป/ดีได้ปของฟิล์มบางของวัสดุผสมพอลิไพโรล/กราฟีนออกไซด์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี จากนั้นนำวัสดุผสมที่สังเคราะห์ได้ไปศึกษาความสามารถในการตรวจวัดสารชีวโมเลกุลด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีและแอมเพโรเมตรีจากการศึกษาพบว่าฟิล์มบางวัสดุผสมพอลิไพโรล/กราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มีความเสถียรสามารถแสดงสมบัติทางไฟฟ้าเคมีได้ดีในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มีฤทธิ์เป็นกลาง และสามารถนำไปตรวจวัดสารชีวโมเลกุลได้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าพอลิเมอร์นำไฟฟ้าผสมกราฟีนออกไซด์ที่สามารถสังเคราะห์ขึ้นได้มีสมบัติที่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านไบโอเซนเซอร์ต่อไปได้ในอนาคต

คำสำคัญ: พอลิเมอร์นำไฟฟ้า สารชีวโมเลกุล อิเล็กโทรพอลิเมอร์เซชัน

Abstract

In this research, polypyrrole/graphene oxide (PPy/GO) composite thin film was synthesized by electropolymerization on fluorine doped tin oxide (FTO) coated glass slide. The electrochemical behaviour and doping-dedoping process of the PPy/GO composite thin film were investigated by cyclic voltammetry. Moreover, the obtained composite material was used to study the efficiency of biomolecular determination by cyclic voltammetry and amperometry. It was found that PPy/GO showed good electroactivity property in neutral PBS

solution and could be applied to the detection of biomolecule. Therefore, it can be concluded that an electrochemically fabricated PPy/GO composite material is a promising candidate as smart material for the biosensor applications in the future.

Keywords: Conducting polymer, Biomolecules, Electropolymerization

บทนำ

ปัจจุบันพอลิเมอร์นำไฟฟ้าได้รับความสนใจในการศึกษาทั้งด้านการสังเคราะห์และการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ อย่างกว้างขวางทั้งในงานด้านเคมี ฟิสิกส์ วัสดุศาสตร์ และวิศวกรรมศาสตร์ (Adhikari & Majumdar, 2004; Peng et al., 2005; Tam & Hieu, 2011) โดยพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ได้รับการศึกษาอย่างแพร่หลาย ได้แก่ พอลิอะนิลีน พอลิไทโอฟิน พอลิไพโรลและอนุพันธ์ เป็นต้น (Nathalie et al., 2007; Vidal et al., 2003) เนื่องจากมีคุณสมบัติพิเศษทางด้านเคมีและชีวเคมี สามารถนำไฟฟ้าที่ดี เสถียรต่อสภาวะแวดล้อม สังเคราะห์ได้ง่าย (Nathalie et al., 2007) โดยพบว่าความสามารถในการนำไฟฟ้าเกิดจากการที่พอลิเมอร์นำไฟฟ้ามีระบบคอนจูเกตทำให้อิเล็กตรอนที่เป็นพาหะนำไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ได้ในโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ งานวิจัยในปัจจุบันยังให้ความสนใจศึกษาการสังเคราะห์พอลิเมอร์นำไฟฟ้าโดยนำไปผสมวัสดุนาโนต่างๆ เช่น อนุภาคโลหะขนาดนาโน คาร์บอนนาโนทิวบ์ และกราฟีน เป็นต้น เพื่อเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าให้ดียิ่งขึ้น (Feng et al., 2015; Nia et al., 2015; Rafighi et al., 2016) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำมาประยุกต์มาใช้งานทางด้านไบโอเซนเซอร์ พอลิเมอร์นำไฟฟ้าผสมวัสดุนาโนสามารถเพิ่มความไว ความจำเพาะจง เสถียรภาพ ความเร็วในการตอบสนองของสัญญาณได้ดี สามารถใช้ตรวจวัดสารชีวโมเลกุลได้หลากหลายชนิด เช่น กลูโคส ฮอร์โมน สารส่งผ่านประสาท ดีเอ็นเอ แอนติบอดีและแอนติเจน เป็นต้น (Baba et al., 2010; Feng et al., 2015; Janmanee et al., 2011)

ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยจึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาการสังเคราะห์พอลิเมอร์นำไฟฟ้าผสมกราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยให้ความสนใจทำการสังเคราะห์พอลิเมอร์นำไฟฟ้าในกลุ่มของพอลิไพโรล รวมทั้งศึกษาคุณสมบัติและลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าผสมกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้นได้ เพื่อนำไปทดสอบความสามารถในการตรวจวัดสารชีวโมเลกุลและพัฒนาไปสู่การประยุกต์ใช้งานต่อไปในอนาคต

วิธีดำเนินการวิจัย

อุปกรณ์และสารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยเป็นสารเคมีเกรดสำหรับงานวิเคราะห์ คือ กลูโคส (Glucose; Sigma-Aldrich) กลูโคสออกซิเดส (Glucose oxidase; Sigma-Aldrich) กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid; Merck) ไพโรล (Pyrrole; Sigma-Aldrich) ผงกราไฟต์ (Graphite powder: Sigma-Aldrich) และแอสคอร์บิก (Ascorbic; AjaxFinechem) ส่วนเครื่องวิเคราะห์สารด้วยเทคนิคทางไฟฟ้าเคมีเป็นแบบตั้งโต๊ะ Potentiostat: Autolabmodel PGSTAT204 (Metrohm, Netherland)

การสังเคราะห์ฟิล์มบางพอลิไพโรลผสมกราฟีนออกไซด์

ฟิล์มบางพอลิไพโรลผสมกราฟีนออกไซด์ (PPy/GO) ถูกสังเคราะห์ด้วยวิธีอิเล็กโทรพอลิเมอไรเซชัน จากสารละลายมอนอเมอร์ของไพโรล (Py) ความเข้มข้น 10 mM และกราฟีนออกไซด์ (GO) หนัก 0.2 กรัม ที่สังเคราะห์อ้างอิงตามงานวิจัยของ Huang et al., (2011) โดยใช้ขั้วไฟฟ้าทำงาน คือ แผ่นกระจกเคลือบทินออกไซด์เจือฟลูออรีน (FTO) ขั้วไฟฟ้าช่วยงานและขั้วไฟฟ้าอ้างอิง คือ ลวดแพลทินัม (Pt) และขั้วไฟฟ้า Ag/AgCl ตามลำดับ ที่ต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์สารด้วยเทคนิคทางไฟฟ้าเคมี โดยมีสารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ความเข้มข้น 0.5 M เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์กำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าในการสังเคราะห์ในช่วง -0.3 ถึง 1.0 V ด้วยอัตราเร็วในการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ 20 mV/sec

การศึกษาคุณสมบัติและลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง PPy/GO

ทำการศึกษาคูณสมบัติทางไฟฟ้าเคมีของฟิล์มบาง PPy/GO ในสารละลายโพแทสเซียมเพอร์โรไซยาไนด์ ($Fe(CN)_6^{4-/3-}$) ความเข้มข้น 10 mM ที่เตรียมในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (PBS) pH 7.4 ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี กำหนดค่าความต่างศักย์ในช่วง -0.2 ถึง 0.8 V ด้วยอัตราเร็วในการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ 5, 10, 20, 50 และ 100 mV/sec ตามลำดับ

การศึกษาความสามารถในการตรวจวัดสารชีวโมเลกุล

นำฟิล์มบาง PPy/GO ที่สังเคราะห์ได้มาทดสอบความสามารถในการตรวจวัดสารชีวโมเลกุลได้แก่ แอสคอร์บิกและกลูโคสโดยศึกษาความสามารถในการตรวจวัดสารละลายแอสคอร์บิกของฟิล์มบาง PPy/GO ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี กำหนดค่าความต่างศักย์ในช่วง -0.2 ถึง 0.8 V ด้วยอัตราเร็วในการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ 20 mV/sec โดยใช้สารละลายแอสคอร์บิกที่ความเข้มข้นต่างๆ ได้แก่ 10, 20, 30, 40 และ 50 mM ตามลำดับ

จากนั้นนำฟิล์มบาง PPy/GO มาศึกษาความสามารถในการตรวจวัดสารละลายกลูโคสด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีและเทคนิคแอมเพโรเมตรี โดยนำฟิล์มบางของวัสดุผสมมาตรึงด้วยเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส (GOx) ปริมาณ 1 mg/mL เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นทำการศึกษา

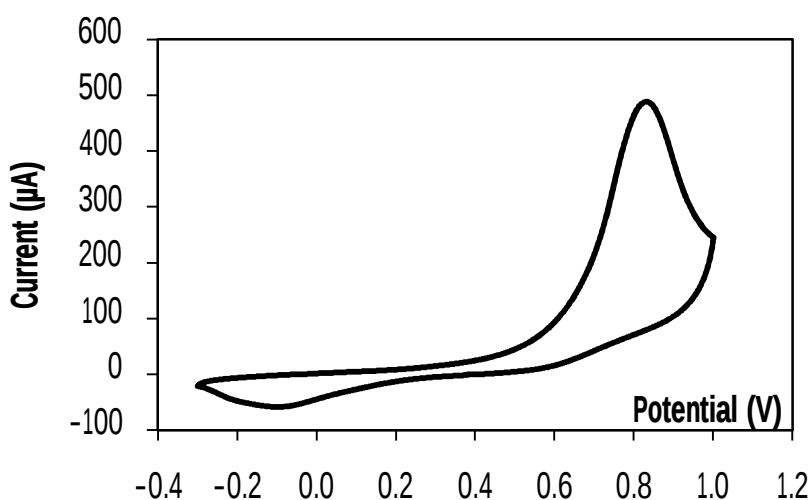
ความสามารถในการตรวจวัดกลูโคส โดยใช้สารละลายกลูโคสที่มีความเข้มข้นต่างๆ ได้แก่ 10, 20, 30, 40 และ 50 mM ตามลำดับและกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 0.6 V

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการสังเคราะห์ฟิล์มบางของวัสดุผสม PPy/GO

จากการสังเคราะห์ฟิล์มบาง PPy/GO บนขั้วไฟฟ้า FTO ด้วยวิธีอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชัน เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะของขั้วไฟฟ้า FTO ก่อนและหลังการสังเคราะห์ พบว่าเกิดฟิล์มบางสีน้ำตาลอ่อนขึ้นบนขั้วไฟฟ้า FTO หลังจากการสังเคราะห์ด้วยวิธีอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชัน

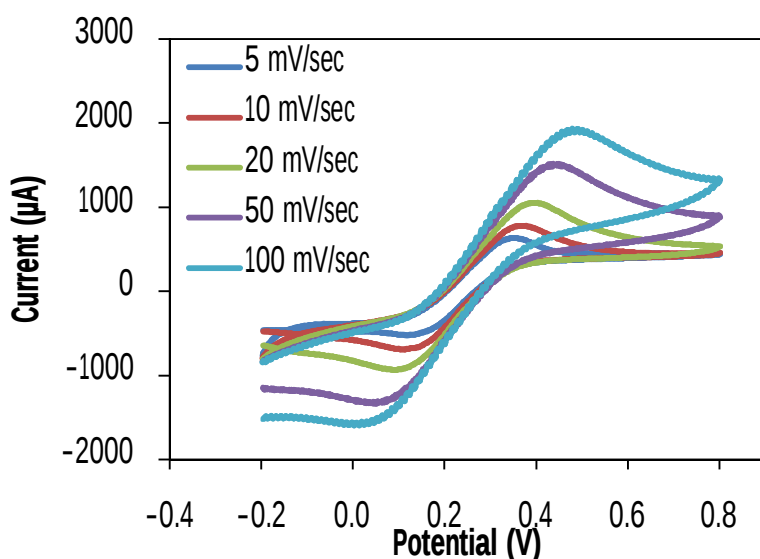
ผลการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและกระบวนการโด๊ป/ดีโด๊ปของฟิล์มบาง PPy/GO ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (CV) สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 1 โดยสามารถสังเกตเห็นการเพิ่มขึ้นของกระแส anodic scan ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าประมาณ 0.45 V ซึ่งสามารถอธิบายได้ถึง การเปลี่ยนจากมอนอเมอร์เกิดเป็นฟิล์มบางพอลิเมอร์ขึ้นบนผิวขั้วไฟฟ้า FTO โดยมีค่าศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยาออกซิเดชันประมาณ 0.8 V ส่วนการลดลงของกระแส cathodic scan ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าประมาณ 0.2 V แสดงถึงการเกิดกระบวนการดีโด๊ป (dedoping) ของฟิล์มบางพอลิเมอร์บนผิว FTO โดยมีค่าศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยารีดักชันประมาณ -0.1 V ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Janmanee et al., (2013) ที่อธิบายว่าในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยวิธีอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชัน จะเกิดการเพิ่มขึ้นของกระแส anodic scan เนื่องจากการเกิดฟิล์มบางพอลิเมอร์และเกิดการลดลงของกระแส cathodic scan เนื่องจากกระบวนการดีโด๊ปของพอลิเมอร์ที่เกิดบนขั้วไฟฟ้า ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าสามารถสังเคราะห์ PPy/GO ได้โดยวิธีอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชัน



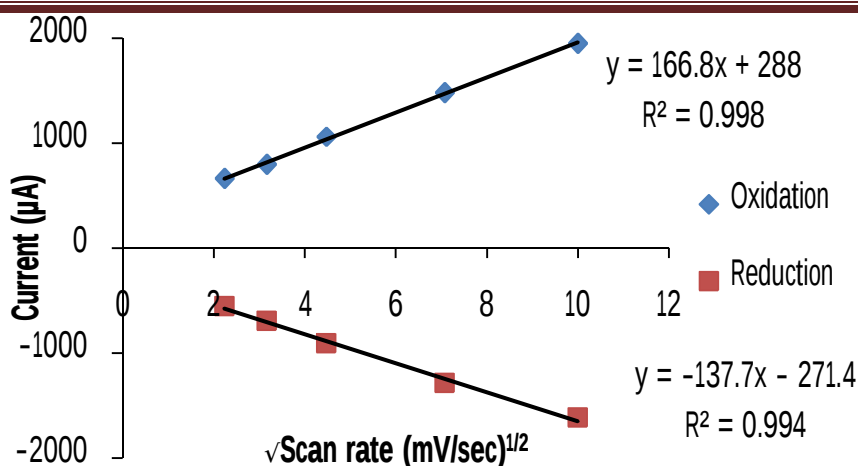
รูปที่ 1 แสดง CV ของฟิล์มบาง PPy/GO ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชัน

การศึกษาความสามารถทางเคมีไฟฟ้าของฟิล์มบาง PPy/GO

จากการพิจารณากราฟ CV ของฟิล์มบาง PPy/GO ในสารละลาย $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-/3-}$ ที่เตรียมด้วยสารละลาย PBS (pH 7.4) โดยใช้ค่าความต่างศักย์ในช่วง -0.2 ถึง 0.8 V ที่อัตราเร็วในการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ 5, 10, 20, 50 และ 100 mV/sec ตามลำดับ ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 2 พบว่าฟิล์มบาง PPy/GO เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ในทุกอัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ โดยค่าสัญญาณกระแสมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบค่าสัญญาณกระแสในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันกับอัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์พบว่ามีความเป็นเส้นตรงเท่ากับ 0.9989 และ 0.9944 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3 จึงอาจกล่าวได้ว่าฟิล์มบาง PPy/GO สามารถแสดงสมบัติทางเคมีไฟฟ้าได้ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มีฤทธิ์เป็นกลาง ซึ่ง Ruiyi et al., (2013) ได้อธิบายว่าเกิดเนื่องจากการส่งผ่านอิเล็กตรอนระหว่างผิวอิเล็กโทรดกับวัสดุผสมและสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ด้วยเหตุนี้ฟิล์มบาง PPy/GO ที่มีสมบัติทางเคมีไฟฟ้าที่ดีในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มีฤทธิ์เป็นกลางจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านไบโอเซนเซอร์เพื่อตรวจวัดสารชีวโมเลกุลด้วยเทคนิคทางไฟฟ้าเคมีต่อไปได้



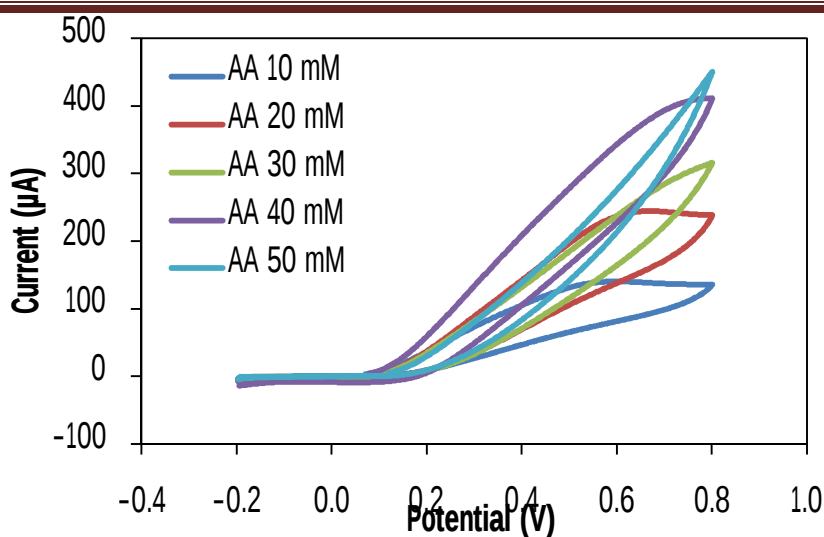
รูปที่ 2 แสดงกราฟ CV ของฟิล์มบาง PPy/GO ในสารละลาย $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-/3-}$ ที่เตรียมในสารละลาย PBS (pH 7.4) ที่อัตราเร็วในการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ 5, 10, 20, 50 และ 100 mV/sec ตามลำดับ



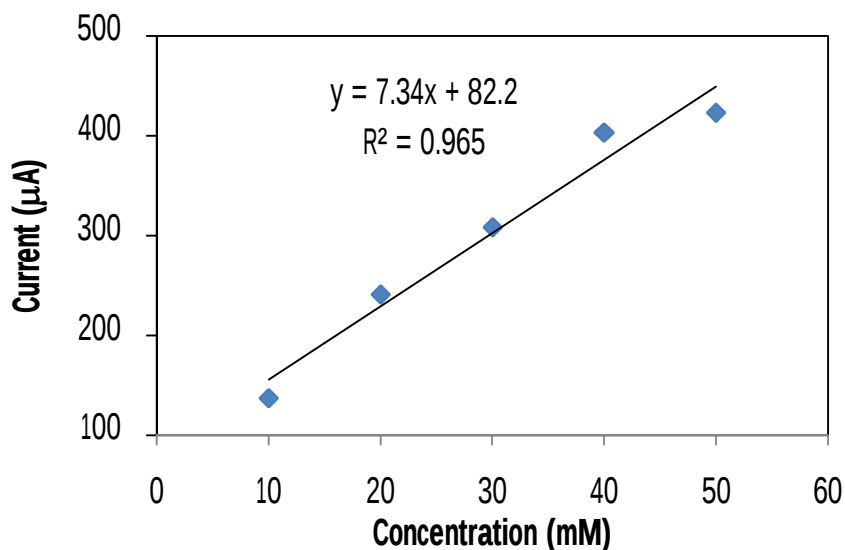
รูปที่ 3 กราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณกระแสในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันของ PPy/GO ในสารละลาย $\text{Fe(CN)}_6^{4-/3-}$ ที่เตรียมในสารละลาย PBS (pH 7.4) ที่อัตราเร็วในการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ 5, 10, 20, 50 และ 100 mV/sec ตามลำดับ

ผลการศึกษาความสามารถในการตรวจวัดสารชีวโมเลกุล

นำฟิล์มบาง PPy/GO มาศึกษาความสามารถในการตรวจวัดสารละลายแอสคอร์บิกด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยกำหนดค่าความต่างศักย์ในช่วง -0.2 ถึง 0.8 V ด้วยอัตราเร็วในการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ 20 mV/sec โดยใช้สารละลายแอสคอร์บิกที่มีความเข้มข้นต่างๆ ได้แก่ 10, 20, 30, 40 และ 50 mM ตามลำดับ พบว่าฟิล์มบาง PPy/GO สามารถนำมาใช้ในการตรวจวัดสารละลายแอสคอร์บิกได้ โดยสามารถแสดงผลการทดลองได้ดังรูปที่ 4 และสามารถแสดงกราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณกระแสและความเข้มข้นของสารละลายแอสคอร์บิกที่มีค่าความเป็นเส้นตรงเท่ากับ 0.9651 ได้ดังรูปที่ 5 โดยค่าสัญญาณกระแสมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อสารละลายแอสคอร์บิกมีความเข้มข้นสูงขึ้น เมื่อพิจารณากระแสของสารละลายแอสคอร์บิกจะเห็นว่าลักษณะการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าของสารละลายแอสคอร์บิกเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเดียวที่ไม่มีสัญญาณรีดักชัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ภัทธานีตรัส และคณะ (2557) ที่ได้อธิบายว่ากรดแอสคอร์บิกจะเกิดปฏิกิริยาแบบไม่ย้อนกลับโดยจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว



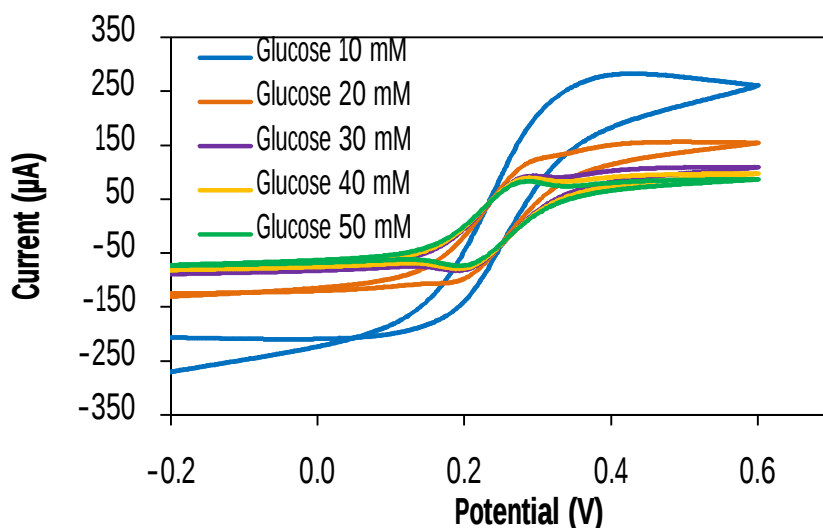
รูปที่ 4 แสดงกราฟ CV ของ PPY/GO ในการตรวจวัดสารละลายแอสคอร์บิกที่ความเข้มข้นต่างๆ



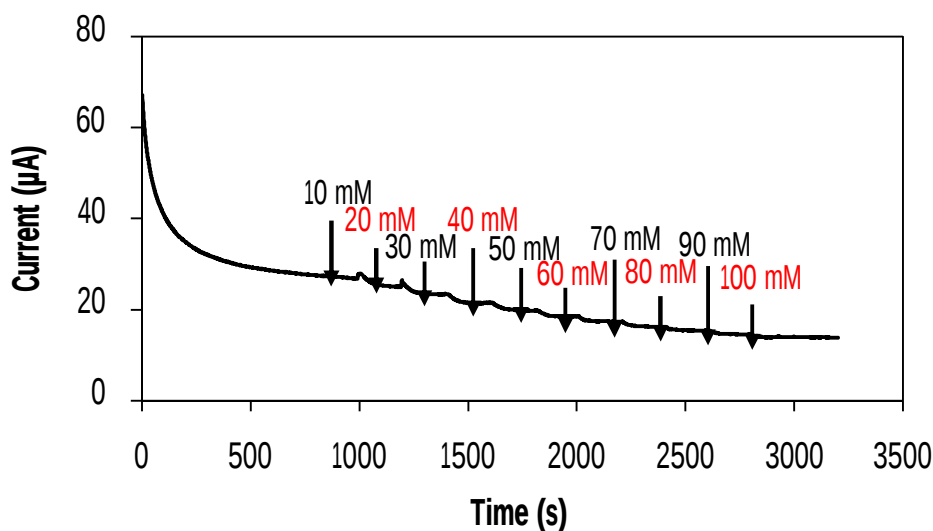
รูปที่ 5 กราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัญญาณกระแสในการตรวจวัดสารละลายแอสคอร์บิกด้วย PPY/GO ที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.8 V

นอกจากนี้ฟิล์มบาง PPY/GO ยังสามารถตรวจวัดสารละลายกลูโคสได้ด้วย โดยมีผลการศึกษาดังรูปที่ 6 ซึ่งแสดงผลการศึกษาความสามารถในการตรวจวัดสารละลายกลูโคสความเข้มข้นต่างๆ ของฟิล์มบาง PPY/GO หลังนำมาตรึงด้วย GOx ปริมาณ 1 mg/mL เป็นเวลา 15 นาที และนำมาตรวจวัดด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี กำหนดค่าความต่างศักย์ในช่วง -0.2 ถึง 0.6 V ด้วยอัตราเร็วในการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ 20 mV/sec ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับ

การศึกษาความสามารถในการตรวจวัดกลูโคสด้วยเทคนิคแอมเพอโรเมตรีที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.6 V ดังแสดงในรูปที่ 7



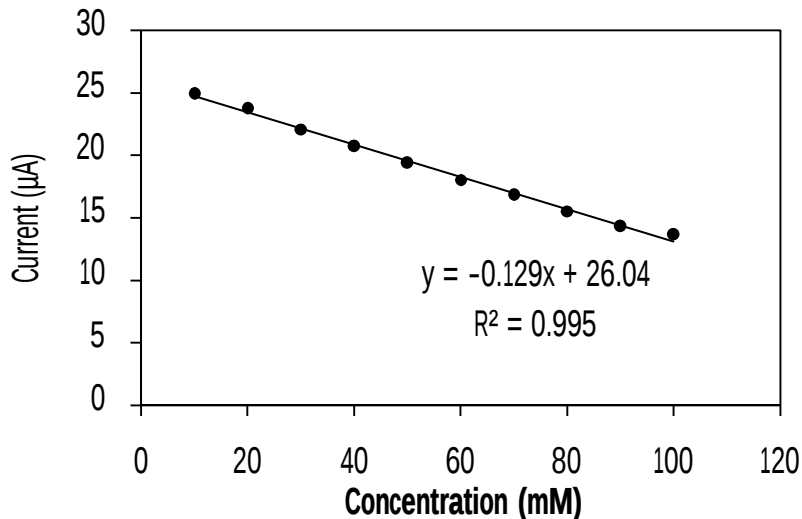
รูปที่ 6 แสดง CV ของ PPY/GO ในการตรวจวัดสารละลายกลูโคสที่มีความเข้มข้นต่างๆ



รูปที่ 7 แสดงผลการตอบสนองต่อการตรวจวัดน้ำตาลกลูโคสของ PPY/GO โดยการเติมสารละลายกลูโคสที่มีความเข้มข้นต่างๆ ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.6 V

เมื่อพิจารณาความสามารถของฟิล์มบาง PPY/GO ในการตรวจวัดสารละลายกลูโคสด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีและเทคนิคแอมเพอโรเมตรีพบว่าค่าสัญญาณกระแสมีค่าลดลงเมื่อสารละลายกลูโคสมีความเข้มข้นสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง GOX ที่ตรึงบนฟิล์มบางของ PPY/GO กับสารละลายน้ำตาลกลูโคสที่เติมลงไปทำให้สัญญาณกระแสการ

ตอบสนองลดลงเมื่อความเข้มข้นของกลูโคสเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถแสดงกราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณกระแสและความเข้มข้นของกลูโคสที่มีค่าความเป็นเส้นตรงเท่ากับ 0.9957 ได้ดังรูปที่ 8 ด้วยเหตุนี้จึงสามารถสรุปได้ว่าฟิล์มบาง PPy/GO สามารถนำมาใช้ในการตรวจวัดน้ำตาลกลูโคสที่ปริมาณต่างๆได้



รูปที่ 8 กราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัญญาณกระแสในการตรวจวัดน้ำตาลกลูโคสด้วย PPy/GO ที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.6 V

สรุปผลการวิจัย

ฟิล์มบาง PPy/GO สามารถสังเคราะห์ด้วยวิธีอิเล็กโทรพอลิเมอไรเซชัน โดยมีค่าศักย์ไฟฟ้าในการกระบวนการไทป์/ดีไทป์ที่ประมาณ 0.45 และ 0.2 V ตามลำดับ โดยฟิล์มบาง PPy/GO มีความเสถียรและสามารถแสดงสมบัติทางเคมีไฟฟ้าได้ดีในสารละลาย PBS (pH 7.4) เมื่อนำมาศึกษาความสามารถในการตรวจวัดสารชีวโมเลกุล พบว่าฟิล์มบาง PPy/GO สามารถนำมาใช้ในการตรวจวัดสารละลายแอสคอร์บิกและสารละลายน้ำตาลกลูโคสด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีและเทคนิคแอมเพโรเมตรีตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าฟิล์มบางของวัสดุผสม PPy/GO ถือเป็นอีกหนึ่งวัสดุทางเลือกที่สามารถนำไปศึกษาและพัฒนาทางด้านไบโอเซนเซอร์เพื่อใช้ในการสารชีวโมเลกุลชนิดต่างๆ ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย งบประมาณแผ่นดิน (แบบปกติ) พ.ศ. 2560 (สัญญาเลขที่ RDI-1-59-6-03) ของสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ในการนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณหลักสูตรสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และสถาบันวิจัยวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูล ที่ให้การสนับสนุนและการช่วยเหลือจนงานวิจัยสำเร็จ ล่วงไปได้ด้วยดี มาโอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

ภัทรานิษฐ์ ทองเทพ, สมพร มุลมั่งมี, และฉัตรชัย พลเชื้อว. (2557). การศึกษาสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของเฮมินร่วม พอลิไพโรลบนขั้วไฟฟ้าคาร์บอนเพสต์สำหรับการตรวจวัดกรดแอสคอร์บิกด้วยเทคนิคโวลแทมเมตรี.

Science and Technology RMUTT Journal, 4(2), 25–32.

Adhikari B. & Majumdar S. (2004). Polymers in sensor applications. **Progress in Polymer Science**, 29, 699–766.

Baba A., Mannen T., Ohdaira Y., Shinbo K., Kato K., Kaneko F., Fukuda N. & Ushijima H. (2010). Detection of adrenaline on poly (3-aminobenzylamine) ultrathin film by electrochemical-surface plasmon resonance spectroscopy. **Langmuir**, 26, 18476–18482.

Feng X., Cheng H., Pan Y. & Zheng H. (2015). Development of glucose biosensors based on nanostructured graphene-conducting polyaniline composite. **Biosensors and Bioelectronics**, 70, 411–417.

Huang N. M., Lim H. N., Chia C. H., Yarmo M. A. & Muhamad M. R. (2011). Simple room-temperature preparation of high-yield large-area graphene oxide. **International Journal of Nanomedicine**, 6, 3443–3448.

JanmaneeR., Baba A., Phanichphan S., Sriwichai S., Shinbo K., Kato K. & Kaneko F. (2011). Detection of human IgG on poly(pyrrole-3-carboxylicacid) thin filmby electrochemical-surface plasmon resonance spectroscopy. **Japanese Journal of Applied Physics**, 50, 01BK02-01-01BK02-06.

Janmanee R., Baba A., Phanichphant S., Sriwichai S., Shinbo K., Kato K., & Kaneko F.(2013). Electrochemically fabricated pyrrole copolymer thin films and their electroactivity in neutral aqueous solution, **Molecular Crystals and Liquid Crystals**, 580, 29–34.

Nia P. M., Meng W. P., Lorestani F., Mahmoudian M. R. & Alias Y. (2015). Electrodeposition of copper oxide/polypyrrole/reduced grapheme oxide as a nonenzymatic glucose biosensor. **Sensors & Actuators, B**, 209, 100–108.

Nathalie K. G., Natalia G. & Christine E. S. (2007). Conducting polymers in biomedical engineering. **Progress in Polymer Science**, 32, 876–921.

Peng H., Soeller C., Vigar N., Kilmartin P. A., Cannel M. B., Bowmaker G. A., Cooney R. P. &Travas-Sejdic J. (2005). Label-free electrochemical DNA sensor based on functionalized conducting polymer. **Biosensors and Bioelectronics**, 20, 1821–1828.

RafighiP., Tavahodi M. & Haghighi B. (2016).Fabrication of a third-generation glucose biosensor using graphene-polyethyleneimine-gold nanoparticles hybrid. **Sensors & Actuators, B**, 232, 454–461.

- Ruiyi L., Qianfang X., Zaijun L., Xiulan S. &Junkang L. (2013).Electrochemical immunosensor for ultrasensitive detection of microcystin-LR based on graphene–gold nanocomposite/functional conducting polymer/gold nanoparticle/ionic liquid composite film with electrodeposition. **Biosensors and Bioelectronics**, 44, 235–240.
- Tam P. D. &Hieu N. V. (2011). Polymer film-based immunosensor using carbon nanotube/antibodies doped polypyrrole. **Applied Surface Science**, 257, 9817–9824.
- Vidal J. C., Garcia-Ruiz E. & Castillo R. J.(2003).Recent advances in electropolymerized conducting polymers in amperometric biosensors. **Microchimica Acta**, 143, 93–111.