

การพัฒนาขั้วไฟฟ้าจากการวาดด้วยดินสอบนกระดาษทราย สำหรับหาปริมาณแคดเมียมในน้ำ

พุฒิพัฒน์ เบญจปรีชาพัฒน์^{1*} นवलระออ รัตนีมานวงศ์¹ และปรีชา มั่นสลาย²

¹ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ วัฒนา กรุงเทพฯ 10110

²ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ธัญบุรี ปทุมธานี 12110

*E-mail: puttiphat@g.swu.ac.th

รับบทความ: 6 ตุลาคม 2560 ยอมรับตีพิมพ์: 25 ธันวาคม 2560

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการที่ง่ายและราคาประหยัดสำหรับการเตรียมอิเล็กโทรเคมีคัลเซนเซอร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในน้ำ โดยการใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์อย่างง่ายซึ่งผลิตขึ้นจากไส้ดินสอที่ฝนบนกระดาษทราย เมื่อนำขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ที่ผลิตได้มาใช้ร่วมกับเทคนิคสแควร์เวฟแอนาไลติกสทริปปิงโวลแทมเมตรี พบว่า มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมที่มีปริมาณน้อยได้ จากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อสัญญาณที่ตรวจวัดได้ที่สภาวะที่เหมาะสมให้ช่วงความเป็นเส้นตรงของกราฟมาตรฐานตั้งแต่ $5 \mu\text{gL}^{-1}$ ถึง $100 \mu\text{gL}^{-1}$ ขีดจำกัดในการตรวจวัดเท่ากับ $0.72 \mu\text{gL}^{-1}$ อิเล็กโทรเคมีคัลเซนเซอร์นี้ประสบความสำเร็จในการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์แคดเมียมในตัวอย่างน้ำโดยตรง

คำสำคัญ: แคดเมียม ขั้วไฟฟ้าจากการวาดด้วยดินสอ สแควร์เวฟโวลแทมเมตรี

Development of Pencil Drawn Electrodes on a Sand Paper for Cadmium Analysis in Water

Puttiphat Benjapreechaphat^{1*}, Nuanlaor Ratanawimarnwong¹, and Preecha Mansalai²

¹Department of Chemistry, Faculty of Science, Srinakharinwirot University, Wattana, Bangkok 10110, Thailand

²Department of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thanyaburi, Pathum Thani 12110, Thailand

*E-mail: puttiphat@g.swu.ac.th

Received: 6 October 2017 Accepted: 25 December 2017

Abstract

This research presented a simple and low-cost approach for electrochemical sensor preparation to determine cadmium in water. The approach employed a simple graphite electrode made of pencil lead via mechanical abrasion onto a sand paper. When using the developed graphite electrode to square-wave anodic stripping voltammetry, the capability for trace analysis of cadmium was observed. Influence of several relevant operating parameters was also investigated. At the optimum condition, linear range of $5 \mu\text{gL}^{-1}$ to $100 \mu\text{gL}^{-1}$ was provided and detection limit of $0.72 \mu\text{gL}^{-1}$ was achieved. The proposed sensor was successfully applied for the direct determination of cadmium in water samples.

Keywords: Cadmium, Pencil drawn electrodes, Square wave voltammetry

บทนำ

แคดเมียมในธรรมชาติส่วนใหญ่พบในแหล่งทำเหมืองแร่สังกะสี ตะกั่ว และทองแดง มีการนำแคดเมียมมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมยาสูบ การชุบโลหะ การผลิตแบตเตอรี่ สี และพลาสติก แคดเมียมที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม เช่น ในน้ำดื่ม อาหาร หรือยาสูบ เมื่อเข้าสู่ร่างกายจะดูดซึมในกระเพาะอาหาร แล้วแพร่กระจายไปสะสมที่ตับอ่อน ม้าม

และลำไส้ เมื่อสะสมในปริมาณมากจะส่งผลเสียต่อร่างกาย เช่น มีอาการไตทำงานผิดปกติ โรคความดันโลหิตสูง ปวดกระดูกสันหลัง แขนขา และยังส่งผลให้ไตพิการได้ โรคที่เกิดจากพิษของแคดเมียมที่รู้จักกันดีเรียกว่า โรคอิไต-อิไต (Itai-Itai disease) (Chawengsri, 1994)

ปัญหาการปนเปื้อนของสารแคดเมียมในประเทศไทยได้รุนแรงขึ้นในปี พ.ศ. 2547 จากการตรวจพบแคดเมียมปนเปื้อนในข้าว ผัก ปลา

และน้ำดื่มในพื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ในปริมาณที่เกินกว่าค่ามาตรฐาน เนื่องมาจากการทำเหมืองแร่สังกะสี และในปี พ.ศ. 2558 ปริมาณแคดเมียมที่ตรวจพบไม่ได้ลดลงไปจากเดิม โดยพบการปนเปื้อนแคดเมียมที่ละลายน้ำได้สูงสุดคือ 0.92 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และที่สามารถสกัดได้ 46.87 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานของสหภาพยุโรปที่กำหนดไว้ว่าไนดินไม่ควร มีปริมาณแคดเมียมเกิน 1 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (Pluemphuak et al., 2015) โดยองค์การอนามัยโลก กำหนดปริมาณแคดเมียมสูงสุดที่สามารถบริโภคเข้าไปได้ 8.3 ไมโครกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม/วัน และหน่วยงานป้องกันด้านสิ่งแวดล้อม (The Environmental Protection Agency, EPA) ได้กำหนดให้น้ำดื่มมีปริมาณแคดเมียมปนเปื้อนได้ไม่เกิน 5 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม (Puminat, 2004)

การวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมสามารถทำได้โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง เช่น เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรมิเตอร์ (atomic absorption spectrometer) (Zhao et al., 2015) เครื่องอะตอมมิกอิมิซชันสเปกโทรมิเตอร์ (atomic emission spectrometer) (Matsumoto et al., 2010) และเครื่องอะตอมมิกฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรโฟมิเตอร์ (atomic fluorescence spectrometer) (Zhang et al., 2016) แม้ว่าเครื่องมือเหล่านี้จะมีสภาพไวสูง ผลการวิเคราะห์แม่นยำ แต่ต้องอาศัยผู้ปฏิบัติที่มีทักษะสูง เครื่องมือวิเคราะห์ตั้งอยู่ในห้องควบคุมบรรยากาศ และมีค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์สูง นอกจากนี้เครื่องมือวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าก็สามารถวิเคราะห์แคดเมียมได้ในช่วงเดียวกับเครื่องมือขั้นสูงเหล่านี้ เมื่อเลือกขั้วไฟฟ้าและเทคนิคที่เหมาะสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทคนิคอา-

โนติกสทริปปิงโวลแทมเมตรี (anodic stripping voltammetry) เป็นเทคนิคที่มีสภาพไวสูง สามารถหาปริมาณโลหะได้พร้อมกันมากกว่าหนึ่งชนิด วิเคราะห์ได้ง่าย และมีค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่า โดยทั่วไปขั้วไฟฟ้าที่นิยมใช้ในทางเคมีไฟฟ้ามีหลายชนิด ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าแพลทินัม เงิน ทอง พรอท และคาร์บอน เนื่องจากมีค่าการนำไฟฟ้าที่ดี และมีความเสถียรสูง ขั้วไฟฟ้าพรอทเป็นขั้วไฟฟ้ามีข้อดีโดดเด่นทางด้านสภาพไวสูง แต่มีข้อจำกัดคือเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ยากต่อการกำจัด และไม่ปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน (Sriphong, 2000)

ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนหรือแกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้าประเภทหนึ่งที่มีข้อดีอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีสมบัติที่ดี ได้แก่ เจือต่อปฏิกิริยาเคมี ทำให้มีสารรบกวนน้อย ใช้ได้ในช่วงศักย์ไฟฟ้าที่กว้าง มีความแข็งแรง และสามารถนำไปใช้ปรับแต่งหรือดัดแปลงในรูปแบบต่าง ๆ ได้ (Tagaew and Chaisuksant, 2014) ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนที่นิยมใช้ เช่น กลาสซีคาร์บอน (glassy carbon) คาร์บอนเพสต์ (carbon paste) และพิมพ์สกรีน (screen print) ขั้วไฟฟ้าเหล่านี้ต้องอาศัยผู้ที่มีทักษะความชำนาญทั้งการเตรียม การใช้งาน และการดูแลรักษา อีกทั้งสารเคมีบางชนิดที่ใช้เตรียมขั้วไฟฟ้าก็มีพิษสูง และยากต่อการกำจัด เช่น เตตระไฮโดรฟูแรน (tetrahydrofuran) (Alarfaj et al., 2012) และโทลูอีน (toluene) (Shankar et al., 2011) ดังนั้นปัจจุบันการเตรียมขั้วไฟฟ้าคาร์บอนแบบใหม่จึงได้รับความสนใจมากขึ้น เช่น การใช้สัดินสอดซึ่งมีแกรไฟต์ (graphite) เป็นองค์ประกอบหลัก มาประดิษฐ์เป็นขั้วไฟฟ้า สามารถใช้ในการวิเคราะห์สารหลากหลายประเภท นอกจากนี้ยังมีรายงานการนำดินสอมาวัดเป็นขั้วไฟฟ้า และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บนวัสดุที่เหมาะสม เพื่อให้

ได้วิธีที่สะดวก รวดเร็ว ต้นทุนต่ำ เป็นเทคโนโลยีสีเขียว (green technology) ในการออกแบบอุปกรณ์ และนวัตกรรมต่าง ๆ เช่น ตัวต้านทาน คาปาซิเตอร์ ทรานซิสเตอร์ เซนเซอร์ต้านทานแบบเพียร์โซ แบริเตอร์

การนำขั้วไฟฟ้าจากการวาดด้วยดินสอมาใช้ในงานวิเคราะห์โดยเทคนิคโวลแทมเมตรี (voltammetry) เริ่มมีการนำมาใช้ครั้งแรกในปี พ.ศ. 2556 (Santhiago and Kubota, 2013) โดยนำขั้วไฟฟ้าจากการวาดด้วยดินสอมาใช้ในงานในการพัฒนาเกลือโคสไบโอเซนเซอร์บนอุปกรณ์กระดาษ ซึ่งขั้วไฟฟ้าที่วาดด้วยดินสอถูกดัดแปลงด้วย 4-อะมิโนฟีนิลโบโรนิก แอซิด (4-amino phenylboronic acid) เพื่อใช้เป็นเมดิเอเตอร์ และเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส ต่อมา มีรายงานการศึกษาการตอบสนองทางเคมีไฟฟ้าของกรดแอสคอร์บิก (ascorbic acid) โดพามีน (dopamine) และพาราเซตามอล (paracetamol) ด้วยขั้วไฟฟ้าจากการวาดด้วยดินสอโดยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (cyclic voltammetry) (Dossi et al., 2013) พบว่า สารดังกล่าวสามารถเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ได้ดีบนขั้วไฟฟ้าที่เตรียมขึ้น และได้นำไปเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดในเทคนิคโครมาโทกราฟีแบบเยื่อบาง (thin layer chromatography) ในปี พ.ศ. 2557 (Santhiago et al., 2014) มีรายงานการนำขั้วไฟฟ้าจากการวาดด้วยดินสอมาใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณพารา-ไนโตรฟีนิล (*p*-nitrophenol) โดยเทคนิคโวลแทมเมตรี และรายงานล่าสุดในปี พ.ศ. 2558 (Honeychurch, 2015) มีการนำขั้วไฟฟ้าจากการวาดด้วยดินสอไปใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียโดยเทคนิคสทริปปิงโวลแทมเมตรี (stripping voltammetry) พบว่า ได้ความสัมพันธ์เชิงเส้นอยู่ในช่วง 80 –

330 ไมโครกรัมต่อลิตร และ 330–915 ไมโครกรัมต่อลิตร ชัดจำกัดในการตรวจวัด เท่ากับ 9.5 ไมโครกรัมต่อลิตร

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาขั้วไฟฟ้าที่ได้จากการวาดด้วยดินสอสำหรับเซนเซอร์ทางเคมีไฟฟ้าในการหาปริมาณแคดเมียมที่สามารถเกิดปฏิกิริยาตอบสนองให้สัญญาณทางเคมีไฟฟ้าได้ ซึ่งจะได้อำนาจไฟฟ้าที่เป็นเทคโนโลยีสีเขียวที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม แต่ยังมีประสิทธิภาพสูง

วิธีการทดลอง

สารเคมีและอุปกรณ์

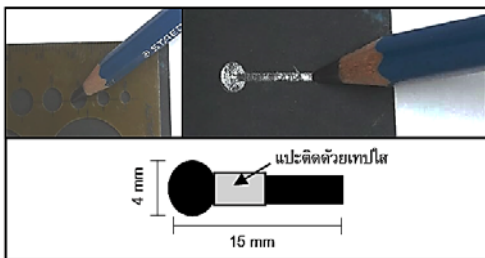
สารละลายมาตรฐานแคดเมียม (Fluka, Switzerland) ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร กรดไฮโดรคลอริก (Merck, Germany) กรดซัลฟิวริก (Merck, Germany) กรดไนตริก (Merck, Germany) กรดแอสซิดิก (Merck, Germany) กรดเปอร์คลอริก (Scharlau, Spain) กรดฟอสฟอริก (BDH, England) ใช้เตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ น้ำบริสุทธิ์ที่ใช้เตรียมสารละลายเป็นเกรด HPLC (RCI Labscan, Thailand) และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทั้งหมดเป็นเกรดวิเคราะห์ (AR-grade)

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ เครื่องโพเทนชิโอสแตท รุ่น PalmSens3 (PalmSens BV, Netherlands) ทำหน้าที่ป้อนศักย์ไฟฟ้าและแสดงสัญญาณไฟฟ้าด้วยโปรแกรมควบคุม PS Trace 4 เป็นระบบ 3 ขั้วไฟฟ้า ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (silver-silver chloride electrode, RE) ขั้วไฟฟ้าแพลตทินัมเป็นขั้วไฟฟ้าช่วย (counter electrode, CE) และขั้วไฟฟ้าที่วาดด้วยดินสอบนกระดาษทราย

เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (working electrode, WE) การวัดสัญญาณทางเคมีไฟฟ้า จะใช้เทคนิคสแควร์-เวฟโวลแทมเมตรี โดยให้ศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ -1.20 โวลต์ เป็นเวลา 200 วินาที ในการสะสมบนผิวขั้วไฟฟ้า และทำการให้สัญญาณศักย์ไฟฟ้าเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมแบบขั้นบันไดจากศักย์ไฟฟ้าที่ -1.20 ถึง 0.05 โวลต์ ที่ความถี่ 25 เฮิร์ตซ์ ค่าแอมพลิจูด 50 มิลลิโวลต์ และขั้นการให้ศักย์ไฟฟ้า 6 มิลลิโวลต์ ก่อนการวัดแต่ละครั้งขั้วไฟฟ้าถูกปรับสภาพให้สะอาดด้วยศักย์ไฟฟ้าที่ $+0.30$ โวลต์ เป็นเวลา 10 วินาที

การเตรียมขั้วไฟฟ้าที่วาดด้วยดินสอบนกระดาษทราย

ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าที่วาดด้วยดินสอ ได้ดัดแปลงจากวิธีของ Honeychurch (2015) ซึ่งใช้ดินสอ 6B ฝนลงในช่องวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร และความยาว 15 มิลลิเมตร บนกระดาษทราย หลังจากนั้นนำมาตัดตามรูปแบบที่วาด แล้วแปะติดด้วยเทปใสกัน (ภาพที่ 1)



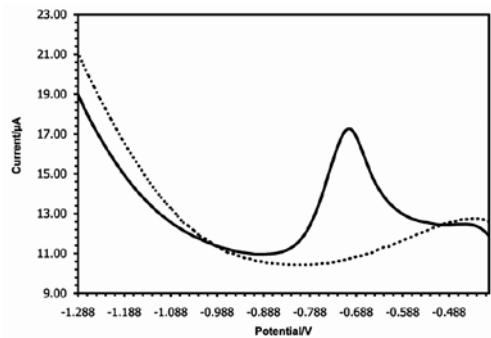
ภาพที่ 1 การประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าจากการวาดด้วยดินสอ 6B บนกระดาษทราย

ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการศึกษาการตอบสนองเบื้องต้นของขั้วไฟฟ้าที่ประดิษฐ์ขึ้น

เมื่อนำขั้วไฟฟ้าที่ประดิษฐ์ได้จากการวาดด้วยดินสอ 6B บนกระดาษทราย ขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลางเท่ากับ 4 มิลลิเมตร ยาว 15 มิลลิเมตร มาศึกษาการตอบสนองเบื้องต้นในสารละลายอิเล็กโทรไลต์กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ และสารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 20 ไมโครกรัมต่อลิตร แล้วนำไปวัดสัญญาณทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิคสแควร์-เวฟโวลแทมเมตรี พบว่า มีกระแสแอดวานติกที่ศักย์ไฟฟ้า -0.74 โวลต์ อย่างเด่นชัด ซึ่งเป็นการตอบสนองของไอออนแคดเมียมในสารละลาย (เส้นทึบ) เมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายที่ไม่มีไอออนแคดเมียม (เส้นประ) ดังในภาพที่ 2

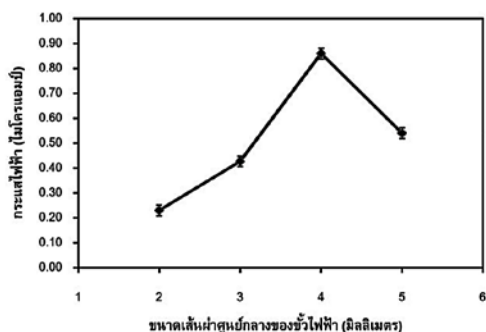


ภาพที่ 2 สแควร์เวฟโวลแทมโมแกรมของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 20 ไมโครกรัมต่อลิตร (เส้นทึบ) เปรียบเทียบกับสัญญาณแบลนด์ (เส้นประ)

ผลการศึกษานานของขั้วไฟฟ้าที่ประดิษฐ์ขึ้น

นำขั้วไฟฟ้าที่ประดิษฐ์ได้จากการวาดด้วยดินสอ 6B บนกระดาษทราย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 3 4 และ 5 มิลลิเมตร ยาว 15 มิลลิเมตร มาศึกษาการตอบสนองเบื้องต้นในสารละลายอิเล็กโทรไลต์กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ และสารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 20 ไมโครกรัมต่อลิตร แล้วนำไปวัดสัญญาณ

ทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมตรี พบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เหมาะสมของขั้วไฟฟ้าที่สร้างขึ้นคือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร เนื่องจากมีพื้นที่มากเกินพอที่ทำให้ไอออนของแคดเมียมไปเกาะติดบนขั้วไฟฟ้าที่วาดด้วยดินสอ 6B บนกระดาษทราย เกิดการนำกระแสไฟฟ้าได้ดี เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ตั้งในภาพที่ 3 ทั้งนี้หากเพิ่มขนาดของขั้วไฟฟ้า จะทำให้สัญญาณกระแสไฟฟ้าลดลง เพราะในขั้นตอนการสะสมไอออนแคดเมียมเกิดปฏิกิริยารีดักชันบนขั้วไฟฟ้ามีปริมาณมากเกินไป และเมื่อสแกนสัญญาณศักย์ไฟฟ้าสแควร์เวฟที่ขั้วไฟฟ้ายังคงมีแคดเมียมบางส่วนไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจากขั้วไฟฟ้าหลุดออกมาหมด จึงทำให้สัญญาณกระแสไฟฟ้าลดลง

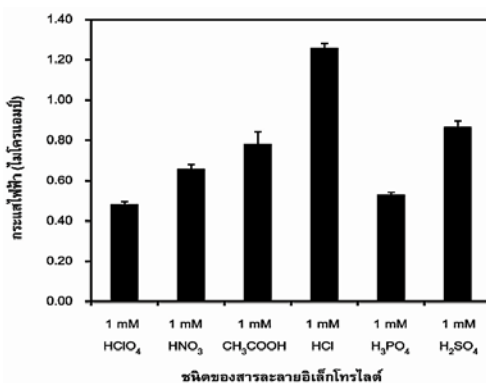


ภาพที่ 3 การเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วไฟฟ้าที่สร้างขึ้น (n = 3)

ผลการศึกษาชนิดและความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์และความเข้มข้น เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการตอบสนองของไอออนแคดเมียมในสารละลาย นำขั้วไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 6 ชนิด ได้แก่ สารละลายกรดเปอร์-

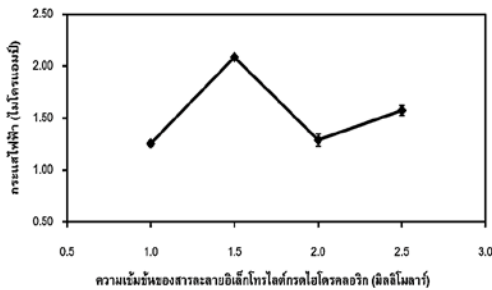
คลอริก กรดไนตริก กรดอะซิติก กรดไฮโดรคลอริก กรดฟอสฟอริก และกรดซัลฟิวริก เข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์เท่ากัน ดังในภาพที่ 4 และศึกษาความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมตั้งแต่ 1 ถึง 2.5 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 20 ไมโครกรัมต่อลิตร แล้วนำไปวัดสัญญาณทางเคมีไฟฟ้า ด้วยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมตรี เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ตั้งในภาพที่ 5



ภาพที่ 4 เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้ากับชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์

จากผลการศึกษาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ พบว่า สารละลายอิเล็กโทรไลต์กรดไฮโดรคลอริกเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ให้สัญญาณสูงที่สุดในการหาปริมาณแคดเมียมในสารละลาย ทั้งนี้จากสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของกรดไนตริก กรดซัลฟิวริก และกรดเปอร์คลอริกสามารถถูกรีดิวส์เมื่อให้สัญญาณศักย์ไฟฟ้าทางลบมากขึ้น ส่งผลให้ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเกิดฟองแก๊ส NO₂ SO₂ และ ClO₂ ได้ (Chuanuwatanakul et al., 2008) ซึ่งจะบดบังที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าส่งผลให้ลดประสิทธิภาพของขั้นตอนการสะสมโลหะที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ส่วนกรดอะซิติกและกรดฟอสฟอริกเป็น

อิเล็กทรอนิกส์อ่อน นำไฟฟ้าได้ไม่ดี ทำให้ได้สัญญาณตอบสนองต่ำ



ภาพที่ 5 เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้ากับความเข้มข้นสารละลายอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ทรานซิสเตอร์

จากผลการศึกษาค่าความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ทรานซิสเตอร์ พบว่าความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ทรานซิสเตอร์ที่เหมาะสม คือ 1.5 มิลลิโมลาร์ สามารถให้สัญญาณกระแสไฟฟ้าในการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในสารละลายมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบสารละลายอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ทรานซิสเตอร์ที่มีความเข้มข้นอื่น พบว่า ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ทรานซิสเตอร์มากกว่า 1.5 มิลลิโมลาร์ ทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนได้ง่ายขึ้น และฟองแก๊สที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า สามารถเข้าไปสะสมโลหะที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าน้อยลง จึงทำให้สัญญาณกระแสไฟฟ้าตรวจวัดได้น้อยลง

ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมตรี

นำขั้วไฟฟ้าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร สารละลายอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ทรานซิสเตอร์ 1.5 มิลลิโมลาร์ และสารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 20 ไมโครกรัมต่อลิตร มาศึกษาหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ประกอบด้วย (1) ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการสะสมบนผิวขั้ว

ไฟฟ้าตั้งแต่ -1.00 ถึง -1.40 โวลต์ (2) เวลาที่ใช้ในการสะสมบนผิวขั้วไฟฟ้าตั้งแต่ 120 ถึง 210 วินาที (3) ความถี่ตั้งแต่ 5.00 ถึง 30.00 เฮิร์ตซ์ (4) แอมพลิจูด ตั้งแต่ 30 ถึง 80 มิลลิโวลต์ (5) ขั้นตอนการให้ศักย์ไฟฟ้า ตั้งแต่ 3 ถึง 18 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ พบว่า ในการให้สัญญาณศักย์ไฟฟ้าแบบเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมตรีที่เหมาะสมประกอบด้วย (1) ศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ -1.30 โวลต์ เป็นเวลา 180 วินาที ในการสะสมบนผิวขั้วไฟฟ้า (2) ความถี่ 25.00 เฮิร์ตซ์ (3) แอมพลิจูด 50 มิลลิโวลต์ และ (4) ขั้นตอนการให้ศักย์ไฟฟ้า 12 มิลลิโวลต์

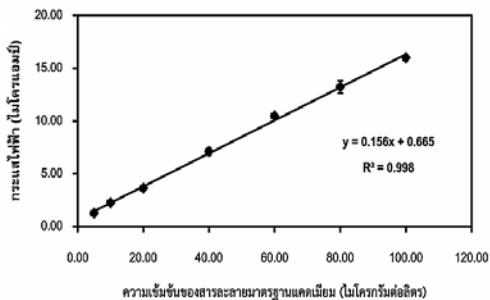
ผลการศึกษาคูณลักษณะในการวิเคราะห์

(1) ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

จากการศึกษาช่วงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณของแคดเมียม ด้วยการวัดสัญญาณทางเคมีไฟฟ้า โดยใช้เทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมตรี ประกอบด้วย (1) ศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ -1.30 โวลต์ เป็นเวลา 180 วินาที ในการสะสมบนผิวขั้วไฟฟ้า (2) ความถี่ 25.00 เฮิร์ตซ์ (3) แอมพลิจูด 50 มิลลิโวลต์ และ (4) ขั้นตอนการให้ศักย์ไฟฟ้า 12 มิลลิโวลต์ พบว่า ในช่วงความเป็นเส้นตรงของความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแคดเมียม อยู่ระหว่าง 5 – 100 ไมโครกรัมต่อลิตร (สมการเส้นตรงคือ $y = 0.156x + 0.665$) ด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r^2) เท่ากับ 0.998 ดังในภาพที่ 6

(2) ขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัดและขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์ปริมาณ

ขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด (LOD) และขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์ปริมาณ (LOQ) ของระบบที่พัฒนาขึ้น โดยคำนวณตามวิธีของ



ภาพที่ 6 กราฟมาตรฐานของสารละลายแคดเมียม

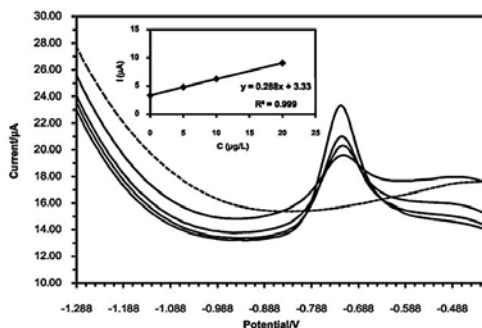
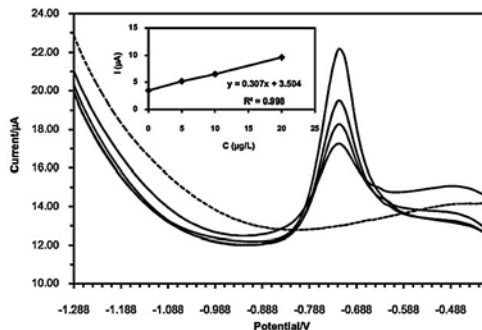
Rojanarata (2010) มีค่า 0.72 และ 0.86 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

(3) ความเที่ยงในการวิเคราะห์ของข้อไฟฟ้าที่ประดิษฐ์ขึ้น

สำหรับความเที่ยงการวิเคราะห์ด้วยข้อไฟฟ้าเดียวกัน วัดโดยตรวจวิเคราะห์สารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 20 ไมโครกรัมต่อลิตร ทำซ้ำ 7 ครั้ง (n = 7) พบว่า มีความคลาดเคลื่อนที่ร้อยละ 4.40 และเมื่อเปรียบเทียบการวัดโดยการตรวจวิเคราะห์สารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 20 ไมโครกรัมต่อลิตร ด้วยข้อไฟฟ้าที่ประดิษฐ์ขึ้นต่าง ๆ จำนวน 7 ข้อ (n = 7) พบว่า มีความคลาดเคลื่อนที่ร้อยละ 5.05 แสดงว่าข้อไฟฟ้าที่ประดิษฐ์ขึ้นมีความเที่ยงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ผลการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในน้ำตัวอย่าง

ในการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในตัวอย่างน้ำดื่มด้วยเทคนิคการเติมสารละลายมาตรฐาน โดยการนำตัวอย่างน้ำดื่มมาปรับ pH เป็น 3 และเติมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมที่มีความเข้มข้น 5 10 และ 20 ไมโครกรัมต่อลิตร จากนั้นวิเคราะห์ด้วยสแควร์เวฟโวลแทมเมตรีที่สภาวะที่เหมาะสม ได้ผลการทดลองดังในภาพที่ 7 และตาราง 1



ภาพที่ 7 สแควร์เวฟโวลแทมโมแกรมของ (ก) ตัวอย่างน้ำดื่ม และ (ข) น้ำแร่ ที่เติมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมลงไป 5 10 และ 20 ไมโครกรัมต่อลิตร ประกอบด้วย (1) ศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ -1.30 โวลต์ เป็นเวลา 180 วินาที ในการสะสมบนผิวข้อไฟฟ้า (2) ความถี่ 25.00 เฮิรตซ์ (3) แอมพลิจูด 50 มิลลิโวลต์ และ (4) ขั้นตอนการให้ศักย์ไฟฟ้า 12 มิลลิโวลต์

เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ระหว่างวิธีที่พัฒนาขึ้นกับวิธีมาตรฐาน inductively coupled plasma – mass spectrometer (ICP/MS) โดยการทดสอบความแตกต่างแบบจับคู่ (paired t-test) พบว่า ค่าเฉลี่ยของผลการวิเคราะห์ทั้ง 2 วิธีไม่แตกต่างกัน ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95%

ตาราง 1 ความเข้มข้นของแคดเมียมที่พบในน้ำตัวอย่าง ที่เติมแคดเมียม 10 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยเปรียบเทียบระหว่างวิธีที่พัฒนาขึ้นกับวิธีมาตรฐาน (ICP-MS)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของแคดเมียม (ไมโครกรัมต่อลิตร)	
	วิธีที่พัฒนาขึ้น*	วิธีมาตรฐาน ICP/MS
1	9.37 ± 0.02	8.78
2	11.41 ± 0.22	8.89
3	11.56 ± 0.16	9.77

*n = 3

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเทคนิคการวิเคราะห์จากการประยุกต์ใช้ขั้วไฟฟ้าที่วาดด้วยดินสอที่พัฒนาขึ้นในห้องปฏิบัติการเพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าใช้งาน ซึ่งขั้วไฟฟ้าที่วาดด้วยดินสอสร้างมาจากการใช้ดินสอชนิด 6B มาวาดบนกระดาษทราย จากผลการศึกษาเบื้องต้น พบว่าขั้วไฟฟ้าที่วาดด้วยดินสอสามารถให้สัญญาณตอบสนองทางเคมีไฟฟ้าต่อไอออนแคดเมียมได้ดี ขั้วไฟฟ้าสามารถสร้างได้ง่ายและมีราคาไม่แพง นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมโดยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมตรี พบว่า ช่วงความเป็นเส้นตรงในการวิเคราะห์แคดเมียมมีค่าอยู่ระหว่าง 5–100 ไมโครกรัมต่อลิตร ชีตจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด มีค่า 0.725 ไมโครกรัมต่อลิตร ความเที่ยงในการวิเคราะห์จากขั้วไฟฟ้าที่วาดด้วยดินสอที่พัฒนาขึ้น พบว่า มีค่าเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ (%RSD) เท่ากับร้อยละ 4.40 และ 5.50 สำหรับการวิเคราะห์ภายในขั้วเดียวกันวันเดียวกัน และการวิเคราะห์ต่างขั้วกันต่างวันกัน ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นมีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หา

ปริมาณแคดเมียมในตัวอย่างน้ำดื่ม และเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ระหว่างวิธีที่พัฒนาขึ้นกับวิธีมาตรฐานด้วย ICP/MS การทดสอบความแตกต่างแบบจับคู่ พบว่า ค่าเฉลี่ยของผลการวิเคราะห์ทั้ง 2 วิธี ไม่แตกต่างกัน ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% แสดงให้เห็นว่าขั้วไฟฟ้าจากการวาดด้วยดินสอที่พัฒนาขึ้นในห้องปฏิบัติการนี้เป็นขั้วไฟฟ้าที่มีศักยภาพในการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในตัวอย่างจริงได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินรายได้คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประจำปีงบประมาณ 2559 และได้รับการสนับสนุนครุภัณฑ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และความอนุเคราะห์เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือทางเคมีไฟฟ้า จากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เอกสารอ้างอิง

- Alarfaj, N. A., Ammar, R. A., and El-Tohamy, M. F. (2012). Disposable screen-printed sensors for determination of duloxetine hydrochloride. **Chemistry Central Journal** 6(6): 1–8.
- Chawengsri, W. (1994). Cadmium. **Toxic Substances News Journal** 21(1): 32–36. (in Thai)
- Chuanuwatanakul, S., Dungchai, w., Chailapakul, O., and Motomizu, S. (2008). Determination of trace heavy metals by se-

- quential injection–anodic stripping voltammetry using bismuth film screen-printed carbon electrode. **Analytical Sciences** 24: 589–594.
- Dossi, N., Toniolo, R., Pizzariello, A., Impellizzeri, F., Piccin, E., and Bontempelli, G. (2013). Pencil-drawn paper supported electrodes as simple electrochemical detectors for paper–based fluidic devices. **Electrophoresis** 34: 2085–2091.
- Honeychurch, K. C. (2015). The voltammetric behaviour of lead at a hand drawn pencil electrode and its trace determination in water by stripping voltammetry. **Analytical Methods** 7: 2437–2443.
- Matsumoto, A., Osaki, S., Kobata, T., and Hashimoto, B. (2010). Determination of cadmium by an improved double chamber electrothermal vaporization inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. **Microchemical Journal** 95(1): 85–89.
- Pluemphuak, T., Verasan, J., Kamlung, A. and Mala, T. (2015). Cadmium contaminated in paddy soils and rice yields in Mae Tao and Phra That Pha Daeng Sub-district, Mae Sot District, Tak Province. **Prawaron Agricultural Journal** 12(1): 1–8. (in Thai)
- Puminat, W. (2004). Cadmium: Hazardous substances of cumulative hazards. **Food Journal** 34 (4): 298–301. (in Thai)
- Rojanarata, T. (2010). **Basic of Calculation in Quantitative Analysis**. 2nd ed. Nakorn Pathom: Petchkasemkarnpim. (in Thai)
- Santhiago, M., Henry, C. S., and Kubota, L. T. (2014). Low cost, simple three dimensional electrochemical paper–based analytical device for determination of *p*-nitrophenol. **Electrochimica Acta** 130: 771–777.
- Santhiago, M. and Kubota, L. T. (2013). A new approach for paper–based analytical devices with electrochemical detection based on graphite pencil electrodes. **Sensors and Actuators B: Chemical** 177: 224–230.
- Shankar, R., Groven, L., Amert, A., Whitesb, K. W., and Kellar J. J. (2011). Non-aqueous synthesis of silver nanoparticles using tin acetate as a reducing agent for the conductive ink formulation in printed electronics. **Journal of Materials Chemistry** 21: 10871–10877.
- Sriphong, L. (2000). **Electrochemical Analysis**. Nakorn Pathom: Silpakorn University. (in Thai)