



ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนเพสต์ที่ปรับปรุงด้วยถ่านชีวภาพสำหรับวิเคราะห์ปริมาณไอออนตะกั่ว ในสารละลายด้วยวิธีโพเทนชิโอเมตริก

Carbon paste electrode modified with biochar for the determination of lead ion in aqueous solution by potentiometric method

ธนวัฒน์ พงษ์ศักดิ์ อรนวล หาญเม่ง และ เขมาวดี อุดมพันธ์*

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ลพบุรี 15000

Thanawat Phongsak Oranual Hanmeng and Kemawadee Udomphan*

Science Program, Faculty of Science and Technology, Rajabhat Thepsatri University, Lopburi 15000

*Corresponding author: kemawadee.u@lawasri.tru.ac.th

Received: 29 July 2024/ Revised: 10 October 2024/ Accepted: 28 October 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการประกอบขั้วไฟฟ้าคาร์บอนเพสต์ที่ปรับปรุงด้วยถ่านชีวภาพเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณไอออนตะกั่วในสารละลายด้วยวิธีโพเทนชิโอเมตริก การตรวจหาคุณลักษณะของถ่านชีวภาพที่ใช้ประกอบขั้วไฟฟ้าสามารถศึกษาได้โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD), เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบลำแสงส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) กับการวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิค energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) และเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ (elemental analysis, EA) จากการวิเคราะห์พบว่าโครงสร้างผลึกของถ่านชีวภาพนี้มีเฟสของคาร์บอนอสัณฐาน และแกรไฟต์ โดยมีลักษณะพื้นผิวเป็นรูพรุนและมีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนมากที่สุด คือ ร้อยละ 89.46 และออกซิเจนร้อยละ 9.60 ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ โดยพบธาตุคาร์บอนและออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับ ร้อยละ 75.58 และออกซิเจนร้อยละ 22.18 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอเมตริกพบว่าขั้วไฟฟ้านี้มีการตอบสนองต่อไอออนตะกั่วที่ดีโดยมีค่าความชันเท่ากับ 30.36 ± 1.21 mV ซึ่งเป็นไปตามสมการเนิร์นสต์ ความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนตะกั่วที่สามารถวิเคราะห์ได้ (limit of detection, LOD) เท่ากับ 5.69×10^{-6} M และช่วงความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้เป็นเส้นตรงอยู่ในช่วง 5×10^{-5} - 0.1 M อัตราส่วนของการประกอบขั้วไฟฟ้าชนิดนี้มีอัตราส่วนของถ่านชีวภาพ:แกรไฟต์:น้ำมันจุล เท่ากับ 28:12:60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขั้วไฟฟ้าชนิดนี้มีความเที่ยงและมีความเลือกจำเพาะต่อไอออนตะกั่วที่ดี

คำสำคัญ: ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนเพสต์ ไอออนตะกั่ว ถ่านชีวภาพ วิธีโพเทนชิโอเมตริก

Abstract

A carbon paste modified with biochar electrode was constructed to determine lead ion in aqueous solution by potentiometric method. Biochar was characterized by using X-ray diffraction spectroscopy (XRD), scanning electron microscope with energy dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS)



and elemental analysis (EA) techniques. XRD analysis result exhibited that biochar was amorphous phase carbon along with graphite structure. SEM-EDS result showed the morphology of biochar has porous and composed of carbon at highest content with 89.46% and oxygen 9.60 %, this result corresponding with EA analysis which found carbon and oxygen with 75.58% and 9.60% respectively. Potentiometric analysis revealed that the electrode showed best response to lead ion with slope 30.36 ± 1.21 mV which conformed with Nernst's equation. Limit of detection was 5.69×10^{-6} M within linear concentration range 5×10^{-5} - 0.1 M and composition of electrode with biochar:nujol:graphite at 28:12:60 % wt provided good slope for lead determination. This carbon paste modified with biochar potentiometric electrode showed good precision and selective to lead ion.

Keywords: Carbon paste electrode, Lead ion, Biochar, Potentiometric method

บทนำ

ถ่านชีวภาพ (biochar) คือ วัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักสามารถผลิตได้จากชีวมวล (biomass) โดยผ่านกระบวนการไพโรไลซิสหรือกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนหรือในสภาวะที่ปราศจากแก๊สออกซิเจน [1] สมบัติที่สำคัญของถ่านชีวภาพ ได้แก่ พื้นที่ผิวมาก ปริมาตรของรูพรุนสูงและมีความเสถียรทางเคมีที่ดี นอกจากนี้ยังมีต้นทุนที่ใช้ในการผลิตต่ำและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม จึงทำให้มีการนำถ่านชีวภาพมาประยุกต์ใช้เป็นสารปรับปรุงดินเพื่อเพิ่มปริมาณธาตุอาหาร ใช้เป็นตัวดูดซับสารพิษจำพวกยาฆ่าหญ้า ยาฆ่าแมลง สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์และโลหะหนักในดินหรือน้ำได้ [2-5] นอกจากนี้ยังพบว่าการนำถ่านชีวภาพไปประยุกต์ใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์พลังงาน เช่น ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (supercapacitor) โดยมีการปรับปรุงพื้นผิวของถ่านชีวภาพด้วยเบส KOH และกรด HNO_3 เพื่อให้มีพื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุนเพิ่มมากขึ้นเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการกักเก็บประจุและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า [6] และในปัจจุบันมีการผลิตแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดจากถ่านชีวภาพจากขยะผลไม้ (fruit waste) เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำ ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และให้ประสิทธิภาพในการใช้งานที่ดีอีกทั้งยังเป็นการกำจัดของเสียที่เกิดจากผลไม้และทำให้เกิดการเกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม [7]

การปนเปื้อนของโลหะในสิ่งแวดล้อม เช่น การปนเปื้อนในน้ำ อากาศและดิน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา เนื่องจากการเติบโต การพัฒนาด้านเศรษฐกิจ การขยายตัวของตัวเมืองและการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรม โลหะ เช่น ตะกั่ว แคดเมียม และปรอท ซึ่งจัดเป็นธาตุที่อันตรายและไม่มีความจำเป็นต่อระบบการทำงานในร่างกายของมนุษย์ [8] ตะกั่วเป็นโลหะชนิดหนึ่งที่มนุษย์มีการใช้งานมาตั้งแต่สมัยโบราณ เนื่องจากสมบัติทางกายภาพของตะกั่ว เช่น มีการนำไฟฟ้าต่ำ มีความเหนียว สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดี จึงถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตสี การก่อสร้าง ปิโตรเคมี เซรามิกส์ และอุตสาหกรรมเหมืองแร่ เป็นต้น อย่างไรก็ตามตะกั่วไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ถ้าวางกายเกิดการสะสมโดยการกิน หายใจ หรือการสัมผัสทางผิวหนังจะทำให้เกิดปัญหาการทำงานของระบบสมอง โรคไตหรือความดันโลหิตสูงได้ องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา (The United States Environmental Protection Agency, USEPA) ระบุว่าตะกั่วเป็นโลหะเป็นพิษ มีความสำคัญต้องได้รับการตรวจสอบและควบคุม [9] โดยองค์การอนามัยโลก (World Health Organization, WHO) และองค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา (USEPA) โดยระบุว่าความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำดื่มที่ยอมรับได้ควรมีค่าอยู่ในช่วง 0.01-0.015 มิลลิกรัมต่อลิตร [10, 11] ในปัจจุบันการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วในตัวอย่างประเภทต่าง ๆ สามารถทำได้โดยวิธีแอมัลไฟต์เฟอร์เนกซ์อะตอมมิคแอบซอร์บชัน สเปกโตรเมตรี (graphite furnace atomic absorption spectrometry, GFAAS) [12], ไฮโดรด์เจเนอเรชัน อะตอมมิคแอบซอร์บชัน สเปกโตรเมตรี (hydride generation atomic absorption spectrometry) [13] และเฟลมอะตอมมิค

แอบซอร์บชัน สเปกโตรเมตรี (flame atomic absorption spectrometry, FAAS) [14] สำหรับการหาปริมาณตะกั่วด้วยเทคนิค FAAS มีข้อดีคือ มีการวิเคราะห์กันอย่างแพร่หลายในห้องปฏิบัติการเนื่องจากค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ต่ำ มีความไวในการวิเคราะห์สูง การใช้งานเครื่องมือสามารถทำได้ง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน อย่างไรก็ตามข้อเสียของเทคนิค FAAS นี้ก็มีปัญหาเกี่ยวกับ nebulizer โดยตัวอย่างจะถูกดูดเข้าไปที่ atomizer มีเพียงประมาณ 10% เท่านั้น ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ลดลง [15] เทคนิคโพเทนชิโอเมตรีเป็นเทคนิควิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าเทคนิคหนึ่งที่สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้แม่นยำ ให้ค่าความจำเพาะเลือกต่อตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ที่ดี ค่า LOD ที่วิเคราะห์ได้มีค่าต่ำ สามารถวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว ได้ในระดับที่ต่ำมาก ๆ นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างทางคลินิก สิ่งแวดล้อม และอาหารได้อีกด้วย [16, 17] ปัจจุบันมีการศึกษาการนำถ่านชีวภาพมาพัฒนาเป็นตัวตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า (electrochemical sensor) เพิ่มมากขึ้น เช่น การเตรียมขั้วไฟฟ้าคาร์บอนเพสต์ที่ปรับปรุงด้วยถ่านชีวภาพเพื่อใช้วิเคราะห์ปริมาณของไอออนโลหะหนัก เช่น สังกะสี ตะกั่ว แคดเมียม และสารอินทรีย์ ด้วยวิธีโวลแทมเมตรีในตัวอย่างจริง เช่น กระสุนครีม เครื่องดื่มชูกำลัง น้ำมะพร้าว น้ำเสีย เป็นต้น ผลการทดลองพบว่าปริมาณของตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้มีค่า LOD ต่ำ ช่วงการวิเคราะห์ที่สามารถวิเคราะห์ได้กว้างและสามารถวิเคราะห์หาปริมาณในตัวอย่างจริงได้ [18-21] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดของขั้วไฟฟ้าจากถ่านชีวภาพ โดยปรับปรุงกับอนุภาคของทองเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณไฮโดรควิโนน (hydroquinone) กับแคทเทคคอล (catechol) ซึ่งเป็นไอโซเมอร์กันในตัวอย่างน้ำประปาได้ [22] และการเตรียมขั้วไฟฟ้าจากถ่านชีวภาพที่ปรับปรุงกับรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (reduced graphene oxide) โดยเตรียมเป็นสารประกอบนาโนคอมโพสิต (nanocomposite) เพื่อวิเคราะห์คาร์เบนดาซิม (carbendazim) ในน้ำส้ม ผักกาดหอม น้ำดื่ม และน้ำเสีย จากการทดลองพบว่าค่า LOD ที่วิเคราะห์ได้มีค่าต่ำมาก คือ 7.7 nM [23] และจากเหตุผลข้างต้นที่ได้กล่าวไปนั้น ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการตรวจหาคุณลักษณะของถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่เพื่อประกอบเป็นขั้วไฟฟ้าคาร์บอนเพสต์ที่ปรับปรุงด้วยถ่านชีวภาพสำหรับวิเคราะห์หาปริมาณไอออนตะกั่วในสารละลายด้วยเทคนิคโพเทนชิโอเมตรี เนื่องจากไอออนตะกั่วจัดเป็นมลพิษชนิดหนึ่งซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตได้ [24, 25] ตัวอย่างเช่น ถ้ำร่างกายได้รับไอออนตะกั่วเข้าไปจะทำให้ระบบต่าง ๆ ที่สำคัญในร่างกายของสิ่งมีชีวิตผิดปกติ เช่น การดูดซึมในระบบทางเดินอาหารลดลง ระบบขับถ่ายทำงานผิดปกติ และถ้ำร่างกายได้รับในปริมาณ 30-100 ไมโครกรัมต่อลิตร จะก่อให้เกิดอาการจุกแน่นหน้าอกหรือโรคไตอักเสบได้ [26]

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การตรวจหาคุณลักษณะของถ่านชีวภาพ

งานวิจัยนี้ใช้ถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่ของบริษัท Bamboo Reform อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี ซึ่งเตรียมจากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิมากกว่า 1,000 °C สำหรับประกอบขั้วไฟฟ้าชนิดโพเทนชิโอเมตรี โครงสร้างผลึกของถ่านชีวภาพสามารถศึกษาได้โดยเครื่องเอกซเรย์-ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ รุ่น Smart lab SE ยี่ห้อ Rigaku แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์เท่ากับ 40 kV, 30 mA, Cu-K β (= 1.54 nm) มุมการเลี้ยวเบนสแกนอยู่ในช่วง 10° - 60° การศึกษาลักษณะพื้นผิวและองค์ประกอบของถ่านชีวภาพวิเคราะห์ได้โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบลำแสงส่องกราดกับเทคนิค energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) ยี่ห้อ FEI รุ่น quanta 450 ที่ 15 kV การวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ C, H และ N (elemental analysis, EA) วิเคราะห์โดยเครื่อง CHNS/O, LECO 628 Series

2. การประกอบขั้วไฟฟ้าคาร์บอนเพสต์ที่ปรับปรุงด้วยถ่านชีวภาพ

ซึ่งถ่านชีวภาพอบที่อุณหภูมิ 110 °C แล้วจำนวน 0.28 กรัม ผสมกับแกรไฟต์ 0.12 กรัม ในครกบดสารอาเกต เติมน้ำมันจุล (binder) 0.60 กรัม บดให้เป็นเนื้อเดียวกันประมาณ 15 นาที จะได้ electroactive material สำหรับใช้ประกอบเป็นขั้วไฟฟ้าทำงานชนิดโพเทนชิโอเมตรี จากนั้นนำ electroactive material นี้ใส่หลอดฉีดยาขนาด 1 มิลลิลิตร และใช้หลอดทองแดงเป็นตัวนำไฟฟ้า



3. การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอเมตรี

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอเมตรี ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าทำงานคาร์บอนเพสต์ที่ปรับปรุงด้วยถ่านชีวภาพตามข้อที่ 2 ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงชนิดซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl) สารละลายของไอออนที่ต้องการวิเคราะห์และเครื่องโพเทนชิโอสแตท/กัลวานอสแตท (potentiostat/galvanostat, PGSTAT) รุ่น 797 VA Computrace analyzer ยี่ห้อ Metrohm

3.1 การศึกษาการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าทำงานต่อไอออนต่าง ๆ สามารถทำได้โดยใช้ขั้วไฟฟ้าทำงานที่มีอัตราส่วนของถ่านชีวภาพ:แกรไฟต์:น้ำมันจุล เท่ากับ 25:25:50 % โดยน้ำหนัก จากนั้นวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในสารละลายไอออน Ca^{2+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Cd^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+} และ Pb^{2+} ในช่วงความเข้มข้น 10^{-6} – 0.1 M สารเคมีของไอออนที่ใช้ในการวิเคราะห์ทั้งหมดเป็น analytical grade ยี่ห้อ Carlo Erba และแกรไฟต์ยี่ห้อ Acros organics

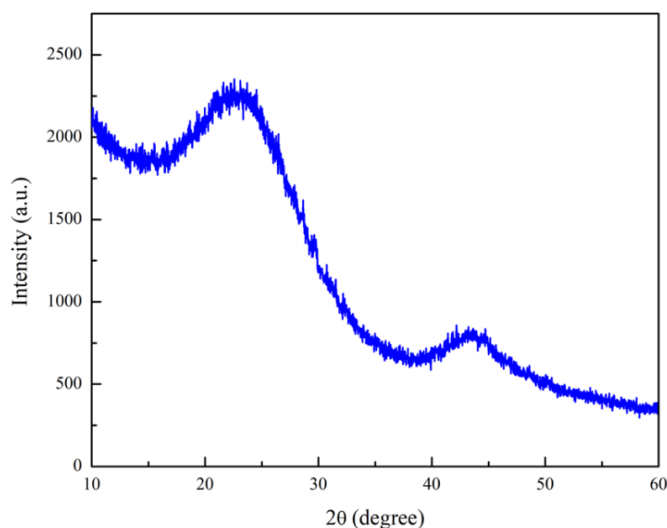
3.2 การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการประกอบขั้วไฟฟ้า งานวิจัยนี้ได้เตรียมขั้วไฟฟ้า 3 อัตราส่วน โดยมีอัตราส่วนของถ่านชีวภาพ:แกรไฟต์:น้ำมันจุล เท่ากับ 25:25:50, 28:12:60 และ 30:20:50 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากนั้นนำขั้วไฟฟ้าแต่ละอัตราส่วนวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในสารละลายของไอออนตะกั่วในช่วงความเข้มข้น 10^{-6} – 0.1 M และหาค่าความชัน

3.3 การศึกษาความเที่ยง (precision) ของขั้วไฟฟ้า ศึกษาได้โดยทำสภาพการทวนซ้ำได้ (reproducibility) โดยเตรียมขั้วไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนของถ่านชีวภาพ:แกรไฟต์:น้ำมันจุล เท่ากับ 28:12:60 % โดยน้ำหนัก จำนวน 5 ขั้ว วัดค่าศักย์ไฟฟ้าในสารละลายไอออนตะกั่วในช่วงความเข้มข้น 10^{-6} – 0.1 M และเปรียบเทียบค่าความชัน สำหรับการศึกษาสถานะทำซ้ำได้ของขั้วไฟฟ้า (repeatability) ทำได้โดยวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในสารละลายไอออนตะกั่วความเข้มข้นจาก 1×10^{-4} , 1×10^{-3} และ 1×10^{-2} M วิเคราะห์ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปซึ่งได้จากการคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3.4 การศึกษาความเลือกจำเพาะ (selectivity) ของขั้วไฟฟ้าต่อไอออนของโลหะอื่น ๆ ศึกษาโดยใช้ขั้วไฟฟ้าทำงานที่มีอัตราส่วนของถ่านชีวภาพ:แกรไฟต์:น้ำมันจุล เท่ากับ 28:12:60 % โดยน้ำหนัก วัดค่าศักย์ไฟฟ้าในสารละลายไอออน Ca^{2+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Cd^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+} และ Pb^{2+} ในช่วงความเข้มข้น 10^{-6} – 0.1 M ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอเมตรี คำนวณหาค่า selectivity coefficient (K_A^{pot}) ด้วยวิธี separate solution method (SSM) [27]

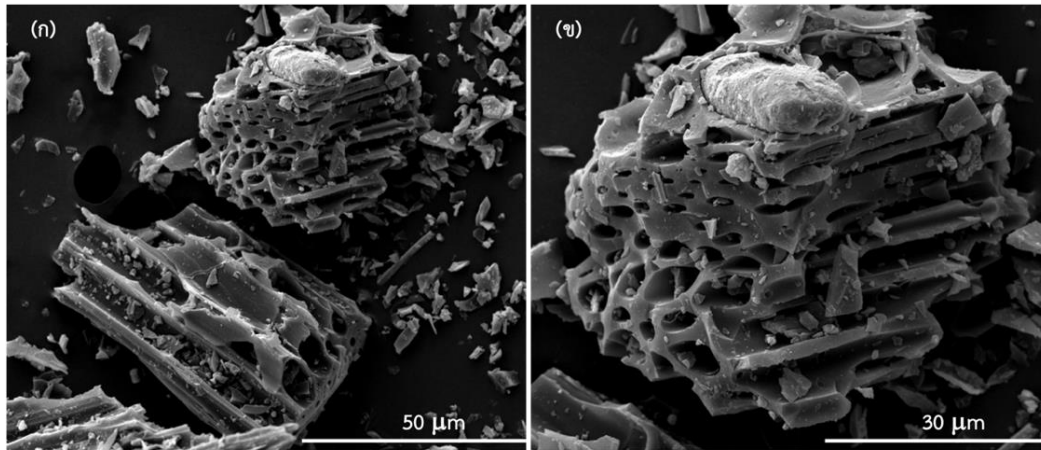
ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของถ่านชีวภาพแสดงดังภาพที่ 1 จากผลการวิเคราะห์พบยอดฟีกที่ระนาบ d_{002} ในช่วงมุม 20° - 30° ซึ่งเป็นโครงสร้างของสัณฐานคาร์บอนที่เกิดจากการเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบและมีการเกิดพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนและซิลิกอนภายในโครงสร้างด้วย สำหรับฟีกที่ระนาบ d_{001} ที่มุม 43.40° เป็นเฟสของโครงสร้างแกรไฟต์ [28]



ภาพที่ 1 XRD pattern ของถ่านชีวภาพ

ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและลักษณะโครงสร้างของถ่านชีวภาพด้วยเทคนิค SEM แสดงดังภาพที่ 2 จากการวิเคราะห์พบว่าถ่านชีวภาพ มีลักษณะพื้นผิวเป็นโพรงและมีรูพรุนที่แตกออกเป็นช่อง ๆ อย่างชัดเจน เนื่องจากการเกิดของโครงสร้างอะโรมาติกของถ่านชีวภาพ การสลายตัวของสารอินทรีย์อย่างรวดเร็วและการสลายตัวของไม้เมื่อได้รับความร้อน [29]

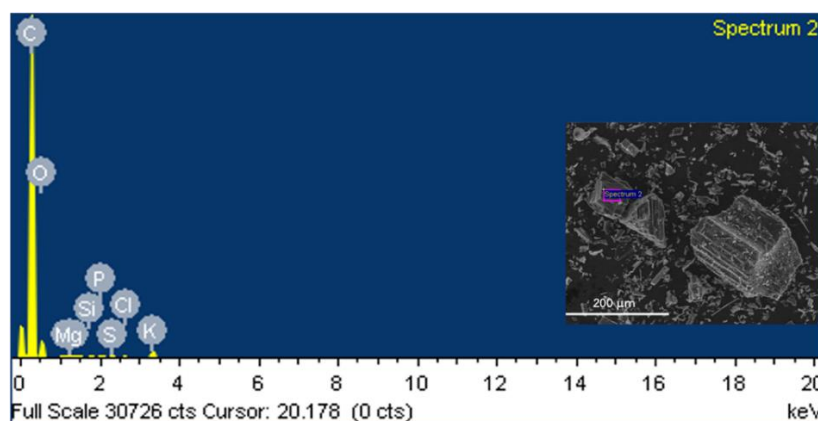


ภาพที่ 2 โครงสร้างจุลภาคของถ่านชีวภาพที่กำลังขยายเท่ากับ (ก) 700 และ (ข) 1,400 เท่า

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของถ่านชีวภาพแสดงดังตารางที่ 1 และภาพที่ 3 จากการวิเคราะห์พบว่า องค์ประกอบของถ่านชีวภาพมีธาตุที่สูงเป็น 4 อันดับแรก ได้แก่ คาร์บอนร้อยละ 89.46 ออกซิเจนร้อยละ 9.60 โพแทสเซียม ร้อยละ 0.51 และฟอสฟอรัสร้อยละ 0.12 ตามลำดับ โดยถ่านชีวภาพนี้มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักในปริมาณสูงแสดงว่า ถ่านชีวภาพนี้มีความบริสุทธิ์ของคาร์บอนสูงเช่นเดียวกัน [30] นอกจากนี้ยังพบซิลเฟอร์ แมกนีเซียม ซิลิกอนและคลอรีนเป็น องค์ประกอบด้วย

ตารางที่ 1 ปริมาณธาตุของถ่านชีวภาพที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค Energy-dispersive X-ray spectroscopy

ตัวอย่าง	ธาตุ (atomic %)							
	C	O	Mg	Si	P	S	Cl	K
Biochar	89.46	9.60	0.07	0.06	0.12	0.10	0.06	0.51



ภาพที่ 3 สเปกตรัม EDS ของถ่านชีวภาพ

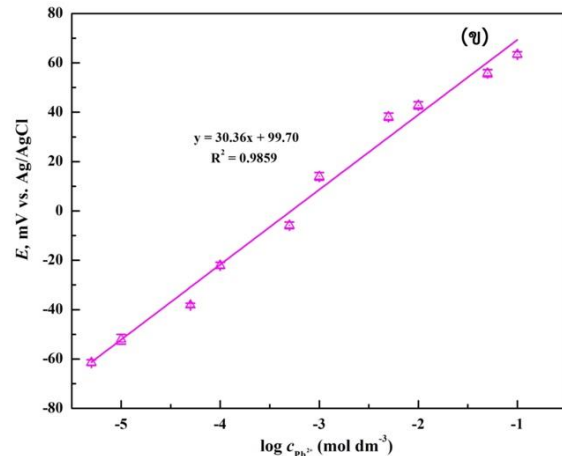
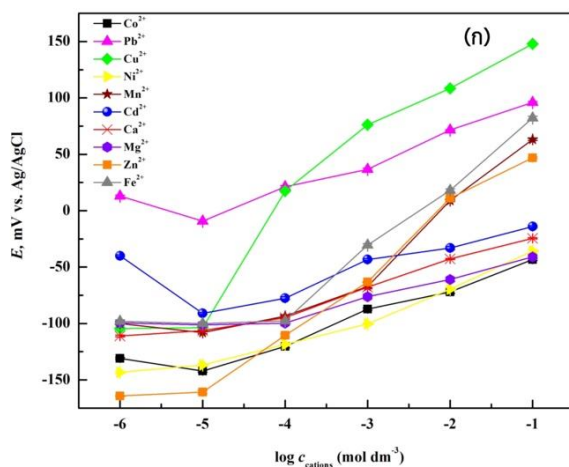


ผลการวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ (elemental analysis, EA) พบว่ามีคาร์บอนและออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลัก คือ มีคาร์บอนร้อยละ 75.58 ออกซิเจนร้อยละ 22.18 ไฮโดรเจนร้อยละ 1.81 และไนโตรเจนร้อยละ 0.43 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ EDS

ผลการศึกษาการตอบสนองต่อของไอออนเมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอเมตรี ผู้วิจัยได้เตรียมขั้วไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนของถ่านชีวภาพ:แกรไฟต์:น้ำมันจุล เท่ากับ 25:25:50 % โดยน้ำหนัก เมื่อวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในสารละลายของไอออน Ca^{2+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Cd^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+} และ Pb^{2+} ในช่วงความเข้มข้น 10^{-6} – 0.1 M ให้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2 และภาพที่ 4 (ก)

ตารางที่ 2 ค่าความชันและช่วงความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้เป็นเส้นตรง เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าในสารละลายของไอออนช่วงความเข้มข้น 10^{-6} – 0.1 M

ชนิดไอออน	ความชัน (mV decade ⁻¹)	ช่วงความเข้มข้นที่ วิเคราะห์เป็นเส้นตรง (mol dm ⁻³)	ชนิดไอออน	ความชัน (mV decade ⁻¹)	ช่วงความเข้มข้นที่ วิเคราะห์เป็นเส้นตรง (mol dm ⁻³)
Zn^{2+}	53.70±1.07	10^{-5} - 0.1	Co^{2+}	19.50±1.06	10^{-6} - 0.1
Fe^{2+}	58.85±1.33	10^{-4} - 0.1	Cu^{2+}	55.94±0.81	10^{-6} - 0.1
Ni^{2+}	21.21±0.96	10^{-6} - 0.1	Ca^{2+}	18.57±0.86	10^{-6} - 0.1
Mn^{2+}	54.63±0.98	10^{-4} - 0.1	Mg^{2+}	19.18±1.04	10^{-4} - 0.1
Cd^{2+}	19.85±1.02	10^{-5} - 0.1	Pb^{2+}	26.20±0.82	10^{-5} - 0.1



ภาพที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log c_{\text{cations}}$ (ก) เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าในสารละลายของไอออนชนิดต่าง ๆ ในช่วงความเข้มข้น 10^{-6} -0.1 M และ (ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ

$\log c_{\text{Pb}^{2+}}$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าในสารละลายของไอออนตะกั่วในช่วงความเข้มข้น 10^{-6} - 0.1 M

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในสารละลายของไอออนตะกั่ว ค่าความชันที่วิเคราะห์ได้มีค่าเท่ากับ 26.20 ± 0.82 mV decade⁻¹ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีตามสมการของเนินสต์ คือ 29.50 mV decade⁻¹ แสดงตามสมการที่ (1)

$$E_{\text{ind}} = K \pm \frac{0.0592}{n} \log c_i \quad (1)$$



เมื่อ E_{ind} คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าทำงานหรือขั้วไฟฟ้าชีบอก n คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 2 K คือ ผลรวมของค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ($L - E_{ref} + E_j$) c_i คือ ความเข้มข้นของไอออนโลหะ [31] สำหรับช่วงความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้เป็นเส้นตรงอยู่ในช่วง $5 \times 10^{-5} - 0.1$ M ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงเลือกวิเคราะห์ไอออนตะกั่ว

ผลการศึกษาการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการประกอบขั้วไฟฟ้าวิเคราะห์ไอออนตะกั่ว งานวิจัยนี้เตรียมขั้วไฟฟ้า 3 อัตราส่วน โดยมีอัตราส่วนของถ่านชีวภาพ:แกรไฟต์:น้ำมันงูจอล เท่ากับ 25:25:50, 28:12:60 และ 30:20:50 % โดยน้ำหนักตามลำดับ จากนั้นนำขั้วไฟฟ้าแต่ละอัตราส่วนวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในสารละลายของไอออนตะกั่ว ในช่วงความเข้มข้น $10^{-6} - 0.1$ M โดยแต่ละขั้ววัดซ้ำวัดละ 4 ครั้ง ($n = 4$) ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าความชันและช่วงความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้เป็นเส้นตรง เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าของถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

อัตราส่วนของถ่านชีวภาพ:แกรไฟต์:น้ำมันงูจอล (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ความชัน (mV decade^{-1})	ช่วงความเข้มข้นที่วิเคราะห์ เป็นเส้นตรง (mol dm^{-3})
25:25:50	26.20 ± 0.82	$10^{-5} - 0.1$
30:20:50	23.89 ± 1.34	$10^{-5} - 10^{-2}$
28:12:60	30.36 ± 1.21	$10^{-5} - 0.1$

จากการทดลองพบว่าขั้วไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนของถ่านชีวภาพ:แกรไฟต์:น้ำมันงูจอล เท่ากับ 28:12:60 % โดยน้ำหนักพบว่ามีความชันเท่ากับ $30.36 \pm 1.21 \text{ mV decade}^{-1}$ ซึ่งสอดคล้องและใกล้เคียงกับสมการของเนินสต์มากที่สุดคือ $29.5 \text{ mV decade}^{-1}$ ตามสมการที่ (1) ที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้ (limit of detection, LOD) มีค่าเท่ากับ $5.69 \times 10^{-6} \text{ M}$ และช่วงความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้เป็นเส้นตรงอยู่ในช่วง $5 \times 10^{-5} - 0.1 \text{ M}$ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log c_{Pb^{2+}}$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าในสารละลายของไอออนตะกั่วในช่วงความเข้มข้น $10^{-6} - 0.1 \text{ M}$ แสดงดังภาพที่ 4 (ข)

ผลการศึกษาความเที่ยง (precision) ของขั้วไฟฟ้าสามารถศึกษาได้จากสภาพทวนซ้ำได้ (reproducibility) ของขั้วไฟฟ้า เมื่อเตรียมขั้วไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนของถ่านชีวภาพ:แกรไฟต์:น้ำมันงูจอล เท่ากับ 28:12:60 % โดยน้ำหนัก จำนวน 5 ขั้ว และวัดศักย์ไฟฟ้าในสารละลายไอออนตะกั่วในช่วงความเข้มข้น $10^{-6} - 0.1 \text{ M}$ พบว่าขั้วไฟฟ้าจำนวน 5 ขั้ว ให้ค่าความชันเฉลี่ยเท่ากับ $29.47 \pm 0.33 \text{ mV decade}^{-1}$ และมีค่าร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (% relative standard deviation, % RSD) เท่ากับ 0.0113 จากผลการทดลองพบว่าค่าความชันที่วิเคราะห์ได้มีค่าเป็นไปตามสมการของเนินสต์ และมีค่า % RSD ที่ต่ำ แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าความชันและร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (% RSD) ของขั้วไฟฟ้าจำนวน 5 ขั้ว

ขั้วไฟฟ้าหมายเลขที่	ความชัน (mV decade^{-1})	% RSD
1	28.59 ± 0.25	0.0086
2	29.66 ± 0.38	0.0126
3	29.13 ± 0.44	0.0149
4	30.96 ± 0.34	0.0111
5	28.99 ± 0.27	0.0094
ค่าเฉลี่ย	29.47 ± 0.33	0.0113

*หมายเหตุ จำนวนครั้งของการวิเคราะห์แต่ละขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 4 ($n = 4$)



ผลการศึกษาสถานะทำซ้ำได้ (repeatability) ของขั้วไฟฟ้า เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในสารละลายของไอออนตะกั่วที่ความเข้มข้น 1×10^{-4} , 1×10^{-3} และ 1×10^{-2} M ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าเท่ากับ -22.03 ± 0.93 , 14.73 ± 0.90 และ 44.73 ± 0.80 mV decade⁻¹ ตามลำดับ

ผลการศึกษาความเลือกจำเพาะ (selectivity) ของขั้วไฟฟ้าต่อไอออนอื่น ๆ เมื่อวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วงความเข้มข้น 10^{-6} -0.1 M โดยค่าความเลือกจำเพาะ (selectivity coefficient) หรือ $K_{A,B}^{pot}$ ของขั้วไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ด้วยวิธี separate solution method ตามสมการของ Nicolsky-Eisenman ดังสมการที่ (2) และค่า selectivity coefficient ($K_{A,B}^{pot}$) แสดงดังตารางที่ 5

$$K_{A,B}^{pot} = a_A^{(1-Z_A/Z_B)} e^{(E_B - E_A)Z_A F / (RT)} \quad (2)$$

เมื่อ $K_{A,B}^{pot}$ คือ ค่า selectivity coefficient ของขั้วไฟฟ้า E_A , E_B , Z_A , Z_B คือ ค่าศักย์ไฟฟ้า, ประจุของของไอออนที่ต้องการวิเคราะห์และไอออนรบกวนตามลำดับ F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์มีค่าเท่ากับ $96,485$ C mol⁻¹, R คือ ค่าคงที่ของแก๊สมีค่าเท่ากับ 8.3145 J K⁻¹ mol⁻¹ T คือ อุณหภูมิที่ 25 °C และ a_A คือ ความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ [27]

ตารางที่ 5 ค่าความเลือกจำเพาะ (selectivity coefficient, $K_{A,B}^{pot}$) ของขั้วไฟฟ้าโพเทนชิโอเมตริกจากถ่านชีวภาพไม้ไผ่

ไอออนรบกวน (interfering ions)	$K_{A,B}^{pot}$	ไอออนรบกวน (interfering ions)	$K_{A,B}^{pot}$
Zn ²⁺	3.02×10^{-7}	Ca ²⁺	3.34×10^{-2}
Fe ²⁺	2.42×10^{-9}	Mg ²⁺	3.20×10^{-2}
Ni ²⁺	2.37×10^{-5}	F ⁻	3.00×10^{-53}
Mn ²⁺	3.10×10^{-4}	Cl ⁻	3.55×10^{-60}
Cd ²⁺	5.30×10^{-2}	NO ₃ ⁻	3.55×10^{-71}
Co ²⁺	2.90×10^{-2}	SO ₄ ²⁻	3.10×10^{-49}
Cu ²⁺	3.15×10^{-2}		

ในทางทฤษฎีถ้าค่าความเลือกจำเพาะ ($K_{A,B}^{pot}$) ของขั้วไฟฟ้ามากกว่า 1 หมายความว่า ขั้วไฟฟ้านั้นจะตอบสนองต่อไอออนรบกวนได้ดีกว่าไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ แต่ถ้ามีค่าน้อยกว่า 1 หมายความว่า ขั้วไฟฟ้านั้นจะตอบสนองต่อไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ได้ดีกว่าไอออนรบกวน ดังนั้นขั้วไฟฟ้าที่มีความเลือกจำเพาะที่ดีควรมีค่า $K_{A,B}^{pot}$ น้อยกว่า 1 [27] จากการทดลองพบว่าค่า $K_{A,B}^{pot}$ ของขั้วไฟฟ้านี้ต่อไอออนชนิดต่าง ๆ มีค่าน้อยกว่า 1 จึงสรุปได้ว่าขั้วไฟฟ้าชนิดนี้ตอบสนองต่อไอออนตะกั่วได้ดีแต่ไม่ตอบสนองต่อไอออนรบกวน ยกเว้นเมื่อทำการวิเคราะห์ในสารละลายไอออนของ Cd²⁺, Co²⁺, Cu²⁺, Ca²⁺ และ Mg²⁺ ค่า $K_{A,B}^{pot}$ ที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียง 1 อย่างไรก็ตามจากการทดลองเบื้องต้นในการใช้ขั้วไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนของถ่านชีวภาพ:แกรไฟต์:น้ำมันงูจอล เท่ากับ 25:25:50 % โดยน้ำหนักวิเคราะห์ในสารละลายของไอออนเหล่านี้ ค่าความชันที่ได้ยังไม่เป็นไปตามทฤษฎีของเนินสต์ ซึ่งควรมีค่าใกล้เคียงกับ 29.5 mV decade⁻¹ แสดงว่าขั้วไฟฟ้านี้สามารถตอบสนองต่อไอออนตะกั่วได้ดี

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการตรวจหาคุณลักษณะของถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่เพื่อประกอบเป็นขั้วไฟฟ้าชนิดโพเทนชิโอเมตริกสำหรับวิเคราะห์ปริมาณไอออนตะกั่วในสารละลาย จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าโครงสร้างผลึกของถ่านชีวภาพไม้ไผ่มีเฟสของคาร์บอนอสัณฐานและแกรไฟต์ เนื่องจากพบพีคที่ระนาบ d_{002} ในช่วงมุม 20° - 30° และพีคที่ระนาบ d_{001}

ที่มุม 43.40° ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM พบว่าถ่านชีวภาพนี้มีลักษณะพื้นผิวที่เป็นรูพรุน โดยมีโครงสร้างของรูพรุนที่แตกออกอย่างชัดเจนและจาก EDS สเปกตรัมพบว่ามีส่วนประกอบของธาตุคาร์บอนมากที่สุด คือ ร้อยละ 89.46 และออกซิเจนร้อยละ 9.60 นอกจากนี้ยังพบธาตุแมกนีเซียม ซิลิกอน ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ คลอรีน และโพแทสเซียมเป็นองค์ประกอบด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ โดยพบธาตุคาร์บอนและออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับร้อยละ 75.58 ออกซิเจนร้อยละ 22.18 ไฮโดรเจนร้อยละ 1.81 และไนโตรเจนร้อยละ 0.43 ตามลำดับ

เมื่อประกอบชีวไฟฟ้าคาร์บอนเพสต์ที่ปรับปรุงด้วยถ่านชีวภาพและศึกษาการตอบสนองของชีวไฟฟ้าด้วยเทคนิคโพเทนชิโอเมตรี พบว่าชีวไฟฟ้าชนิดนี้ตอบสนองต่อไอออนตะกั่วได้ดีที่สุด เป็นได้ว่าเนื่องจากการเกิดหมู่ฟังก์ชันของ $C=S$, $-NH_2$, $C=O$ บริเวณพื้นผิวของถ่านชีวภาพทำให้เกิดการดูดซับทางเคมี (chemisorption) กับไอออนตะกั่วได้ดี [32] โดยลักษณะการดูดซับทางเคมีนี้จะเกิดแบบสารประกอบโคออร์ดิเนชัน [33, 34] และชีวไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนของถ่านชีวภาพ:แกรไฟต์:น้ำมันจุล เท่ากับ 28:12:60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการประกอบชีวไฟฟ้าชนิดโพเทนชิโอเมตรี โดยค่าความชันที่วิเคราะห์ได้มีค่าเท่ากับ $30.36 \pm 1.21 \text{ mV decade}^{-1}$ ความเข้มข้นต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้ (limit of detection, LOD) เท่ากับ $5.69 \times 10^{-6} \text{ M}$ และช่วงความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้เป็นเส้นตรงอยู่ในช่วง $5 \times 10^{-5} - 0.1 \text{ M}$ อย่างไรก็ตามค่า LOD สำหรับการวิเคราะห์ไอออนตะกั่วในงานวิจัยนี้ยังมีค่าสูง เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้าที่มีการใช้ชีวไฟฟ้าไฟฟ้าคาร์บอนเพสต์ปรับปรุงด้วยถ่านชีวภาพและบิสมัทที่มีโครงสร้างระดับนาโนสำหรับการวิเคราะห์ไอออนตะกั่วด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์ แอดซอร์บทีฟสตรipping โวลแทมเมตรี (differential pulse adsorptive stripping voltammetry, DPAdSV) ค่า LOD ที่วิเคราะห์ได้มีค่าเท่ากับ 1.41 nM ซึ่งมีค่าต่ำมาก [35] เช่นเดียวกับงานวิจัยในปี 2023 [36] ที่มีการใช้ชีวไฟฟ้าคาร์บอนเพสต์ปรับปรุงด้วยถ่านชีวภาพจากเปลือกกาแฟ สำหรับการวิเคราะห์ไอออนแคดเมียมและตะกั่วด้วยเทคนิค DPAdSV ค่า LOD ที่วิเคราะห์ได้มีค่าเท่ากับ 1.7 และ $0.2 \mu\text{g L}^{-1}$ ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลเนื่องจากองค์ประกอบของชีวไฟฟ้าและเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าที่ใช้ในการวิเคราะห์ไอออนมีความเหมาะสมและมีความจำเพาะมากกว่างานวิจัยนี้ สำหรับเวลาที่ใช้ในการตอบสนองของชีวไฟฟ้า (response) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นมีค่าประมาณ 5 วินาที ค่าศักย์ไฟฟ้าจึงจะเริ่มคงที่ แสดงให้เห็นว่าชีวไฟฟ้าชนิดนี้มีการตอบสนองต่อการวิเคราะห์ไอออนตะกั่วที่รวดเร็ว ผลการศึกษาความแม่นยำของชีวไฟฟ้าโดยการศึกษาสภาพทวนซ้ำ (reproducibility) และสถานะทำซ้ำ (repeatability) โดยพบว่าเมื่อเตรียมชีวไฟฟ้าจำนวน 5 ชั่ว ค่าความชันเฉลี่ยที่วิเคราะห์ได้มีค่าเท่ากับ $29.47 \pm 0.33 \text{ mV decade}^{-1}$ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของเนินสต์ ($29.50 \text{ mV decade}^{-1}$) และชีวไฟฟ้าทั้งหมดนี้ให้สภาพทวนซ้ำที่ดี เมื่อใช้ชีวไฟฟ้าวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในสารละลายของไอออนตะกั่วที่ความเข้มข้น 1×10^{-4} , 1×10^{-3} และ $1 \times 10^{-2} \text{ M}$ โดยวัดซ้ำ 4 ครั้ง ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าเท่ากับ -22.03 ± 0.93 , 14.73 ± 0.90 และ $44.73 \pm 0.80 \text{ mV decade}^{-1}$ ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่วิเคราะห์ได้มีค่าต่ำ แสดงให้เห็นว่าชีวไฟฟ้าชนิดนี้มีประสิทธิภาพของสถานะทำซ้ำที่ดี การศึกษาความเลือกจำเพาะของชีวไฟฟ้าโดยวิธี separate solution method (SSM) พบว่าชีวไฟฟ้ามีความจำเพาะต่อไอออนตะกั่วที่ดี เนื่องจากค่า K_{AB}^{pot} มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงให้เห็นว่าชีวไฟฟ้าชนิดนี้ตอบสนองต่อไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) ได้ดีกว่าไอออนรบกวน (interfering ions) ถึงแม้ว่าในการวิเคราะห์สารละลายไอออนของ Cd^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+} , Ca^{2+} และ Mg^{2+} ค่า K_{AB}^{pot} ที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียง 1 แต่อย่างไรก็ตามจากการผลการศึกษาเบื้องต้น ค่าความชันที่วิเคราะห์ได้เมื่อวิเคราะห์ในสารละลายเหล่านี้ไม่เป็นไปตามทฤษฎีของสมการเนินสต์ จึงสรุปได้ว่าชีวไฟฟ้าคาร์บอนเพสต์ที่ปรับปรุงด้วยถ่านชีวภาพนี้ สามารถใช้วิเคราะห์ไอออนตะกั่วในสารละลายได้เนื่องจากให้ค่าความชันที่เป็นไปตามทฤษฎีของเนินสต์ ช่วงความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้เป็นเส้นตรงกว้าง มีค่า LOD ต่ำ มีความแม่นยำและความเลือกจำเพาะที่ดีต่อไอออนตะกั่ว ถึงแม้ว่าในงานวิจัยนี้ยังไม่ได้มีการศึกษาและทดลองในตัวอย่างจริง อย่างไรก็ตามในอนาคตข้างหน้า ผู้วิจัยได้มีการวางแผนการประยุกต์ใช้งานวิจัยนี้สำหรับการศึกษาและทดลองในตัวอย่างจริงโดยเฉพาะตัวอย่างตัวอย่างดินและน้ำจากภาคการเกษตร เพื่อเป็นการช่วยเหลือเกษตรกรในการปรับปรุงคุณภาพน้ำและดินสำหรับการ



ทำเกษตรกรรม เพิ่มความระมัดระวังในการใช้ยาปราบศัตรูพืช วัชพืชหรือปุ๋ยเคมีลดปัญหาการเกิดสารพิษตกค้างในผลผลิตทางการเกษตรและลดค่าใช้จ่ายในการส่งน้ำและดินตรวจวิเคราะห์

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการประกอบขั้วไฟฟ้าคาร์บอนเพสต์ที่ปรับปรุงด้วยถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่ สำหรับวิเคราะห์ไอออนตะกั่วในสารละลาย ในอนาคตข้างหน้าอาจมีการนำขั้วไฟฟ้าชนิดนี้ไปประยุกต์ใช้วิเคราะห์หาปริมาณไอออนตะกั่วในน้ำตัวอย่างจริงที่มีตัวรบกวนซับซ้อน เช่น ตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหรือตัวอย่างน้ำที่ใช้สำหรับการเกษตร โดยวิธีการเติมสารละลายสารมาตรฐานหรือโพเทนชิโอเมตริกไทเทรชัน เพื่อประเมินประสิทธิภาพการใช้งานของขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นมานี้ได้ นอกจากนี้ยังอาจมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความเลือกจำเพาะของขั้วไฟฟ้าโดยใช้วิธีการเติมไอออนรบกวนลงไปในการวิเคราะห์ที่ต้องการวิเคราะห์ เพื่อวิเคราะห์ค่าความเลือกจำเพาะของขั้วไฟฟ้าให้ถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น มีการศึกษาการประกอบขั้วไฟฟ้าจากถ่านชีวภาพชนิดอื่น ๆ เพิ่มเติมเพื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ว่าถ่านชีวภาพ ชนิดใดที่จะให้ผลการวิเคราะห์ได้ดีที่สุดหรือใช้วิธีเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าชนิดอื่นในการวิเคราะห์ตัวอย่าง เช่น เทคนิคโวลแทมเมตรี เนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีการให้ศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมกับตัวอย่างเพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เหมาะสมซึ่งจะทำให้สามารถวิเคราะห์ในเชิงปริมาณได้ดี และมีความเลือกจำเพาะที่ดีขึ้นได้ หรือมีการสังเคราะห์ลิแกนด์ชนิดใหม่โดยเตรียมเป็น modified electrode เพื่อเพิ่มความสามารถในการวิเคราะห์ไอออน เช่น ค่า LOD ที่วิเคราะห์ได้มีค่าต่ำ ความแม่นยำและความเลือกจำเพาะของขั้วไฟฟ้าต่อไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ได้สูง นอกจากนี้ยังอาจมีการใช้ electroactive material ที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างที่สนใจในรูปแบบของสกรีน-พริ้นท์ อิเล็กโทรด (screen-printed electrode) เพื่อให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งานในภาคสนาม ใช้สารที่ต้องการวิเคราะห์ในปริมาณน้อยและมีความรวดเร็วในการวิเคราะห์ได้มากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

1. Lu Y, Hu Y, Tang L, Xie Q, Liu Q, Zhong L et al. Effects and mechanisms of modified biochars on microbial iron reduction of *Geobacter sulfurreducens*. *Chemosphere* 2021;283:130983.
2. Wang X, Gu Y, Tan X, Liu Y, Zhou Y, Hu X et al. Functionalized biochar/clay composites for reducing the bioavailable fraction of arsenic and cadmium in river Sediment. *Environ Toxicol Chem* 2019;38(10):2337-47.
3. Li L, Lai C, Huang F, Cheng M, Zeng G, Huang D et al. Degradation of naphthalene with magnetic bio-char activate hydrogen peroxide: Synergism of bio-char and Fe-Mn binary oxides. *Water Res* 2019;160:238-48.
4. Li Y, Wang Z, Xie X, Zhu J, Li R, Qin T. Removal of Norfloxacin from aqueous solution by clay-biochar composite prepared from potato stem and natural attapulgite. *Colloid Surface A* 2017;514:126-36.
5. Sackey EA, Song Y, Yu Y, Zhuang H. Biochars derived from bamboo and rice straw for sorption of basic red dyes. *Plos One* 2021;16(7):e0254637.
6. Jin H, Wang X, Gu Z, Polin J. Carbon materials from high ash biochar for supercapacitor and improvement of capacitance with HNO_3 surface oxidation. *J Power Sources* 2013;236:285e292.
7. Ehsani A, Parsimehr H. Electrochemical energy storage electrodes from fruit biochar. *Adv Colloid Interface Sci* 2020;284:102263.



8. Kafouris D, Christoforou E, Stefani D, Sarandi A, Stavroulakis G, Christou E et al. Lead, cadmium and mercury determination and human health risk assesement in foods from Cyprus. J Food Compos Anal 2024;128:10600.
9. Karaman DN, Serbest H, Bahçivan A, Korkunç ÜP, Bakirdere S. Development of an analytical strategy for the determination of trace lead in hibiscus tea extract by double slotted quartz tube assisted flame atomic absorption spectrometry after manganese ferrite based dispersive solid phase extraction. Microchem J 2023;195:10936.
10. Ensafi AA, Khayamian T, Benvidi A, Mirmomtaz E. Simultaneous determination of copper, lead and cadmium by cathodic adsorptive stripping voltammetry using artificial neural network. Anal Chim Acta 2006;561(1-2):225-32
11. El Mhammedi MA, Achak M, Chtaini A. $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ -modified carbon-paste electrode for the determination of trace lead(II) by square-wave voltammetry. J Hazard Mater 2009;161(1):55-61.
12. Ataman OY. Vapor generation and atom traps: Atomic absorption spectrometry at the ng/L level. Spectrochim Acta B: At Spectrosc 2008;63(8):825-34
13. Lu P, Nuhfer NT, Kelly S, Li Q, Konishi H, Elswick E et al. Lead coprecipitation with iron oxyhydroxide nano-particles. Geochim Cosmochimi Ac 2011;75(16):4547-61.
14. Hopkins AL, Lamm MG, Funk JL, Ritenbaugh C. *Hibiscus sabdariffa* L. in the treatment of hypertension and hyperlipidemia: a comprehensive review of animal and human studies. Fitoterapia 2013;85:84-94.
15. Chen G, Zhang X, Gao Y, Zhu G, Cheng Q, Cheng X. Novel magnetic $\text{MnO}_2/\text{MnFe}_2\text{O}_4$ nanocomposite as a heterogeneous catalyst for activation of peroxymonosulfate (PMS) toward oxidation of organic pollutants. Sep Purif Technol 2019;213: 456-64.
16. Jasiński A, Guziński M, Lisak G, Bobacka J, Bocheńska M. Solid-contact lead(II) ion-selective electrodes for potentiometric determination of lead(II) in presence of high concentrations of Na(I), Cu(II), Cd(II), Zn(II), Ca(II) and Mg(II). Sens Actuators B Chem 2015;218:25-30.
17. Krikstolaityte V, Ding R, Ruzgas T, Björklund S, Lisak G. Characterization of nano-layered solid-contact ion selective electrodes by simultaneous potentiometry and quartz crystal microbalance with dissipation. Anal Chim Acta 2020;1128:19-30
18. Suguihiro TM, de Oliveira PR, de Rezende EI, Mangrich AS, Marcolino LH Jr, Bergamini MF. An electroanalytical approach for evaluation of biochar adsorption characteristics and its application for Lead and Cadmium determination. Bioresour Technol 2013;143:40–5.
19. Oliveira PR, Lamy-Mendes AC, Rezende EI, Mangrich AS, Marcolino LH Jr, Bergamini MF. et al. Electrochemical determination of copper ions in spirit drinks using carbon paste electrode modified with biochar. Food Chem 2015;171:426–31.
20. Kalinke C, Mangrich AS, Marcolino LH Jr, Bergamini MF. Carbon paste electrode modified with biochar for sensitive electrochemical determination of Paraquat. Electroanalysis 2016;28:764-9.
21. Wang J, Yang J, Xu P, Liu H, Zhang L, Zhang S et al. Gold nanoparticles decorated biochar modified electrode for the high-T performance simultaneous determination of hydroquinone and catechol. Sens Actuators B Chem 2020;306:127590.



22. Sant'Anna MVS, Carvalho SWMM, Gevaerd A, Silva JOS, Santos E, Carregosa ISC et al. Electrochemical sensor based on biochar and reduced graphene oxide nanocomposite for carbendazim determination. *Talanta* 2020;220:121334.
23. Oliveira GA, Gevaerd A, Mangrich AS, Marcolino LH Jr, Bergamini MF. Biochar obtained from spent coffee grounds: Evaluation of adsorption properties and its application in a voltammetric sensor for lead (II) ions. *Microchem J* 2021;165:106114.
24. World Health Organization. Preventing disease through healthy environments. Exposure to lead: A major public health concern. [Internet].2023 [cited 2024 August 27]. Available from: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/372293/9789240078130-eng.pdf?sequence=1>
25. Flora SJ, Flora G, Saxena G. Environmental occurrence, health effects and management of lead poisoning. *Lead. Chemistry, Analytical Aspects, Environmental Impacts and Health Effects*. 1st ed. Amsterdam: Elsevier Science, Inc.; 2006.
26. Papanikolaou NC, Hatzidaki EG, Belivanis S, Tzanakakis GN, Tsatsakis AM. Lead toxicity update. A brief review. *Med Sci Monit* 2005;11(10):RA329-36.
27. Umezawa Y, Bühlmann P, Umezawa K, Tohda K, Amemiya S. Potentiometric selectivity coefficients of ion-selective electrodes part I. Inorganic cations (technical report). *Pure Appl Chem* 2000;72(10):1851-2082.
28. Armynah B, Tahir D, Tandilayuk M, Djafar Z, Piarah WH. Potentials of biochars derived from bamboo leaf biomass as energy sources: effect of temperature and time of heating. *Int J of Biomat* 2019;2019(1):3526145.
29. Sahoo SS, Vijay VK, Chandra R, Kumar H. Production and characterization of biochar produced from slow pyrolysis of pigeon pea stalk and bamboo. *Clean Eng Technol* 2021;3:100101.
30. Ioannidou O, Zabaniotou A (2007) Agricultural residues as precursors for activated carbon production- A review. *Renew Sust Energ Rev* 2007; 11:1966–2005.
31. เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ. เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2561.
32. Wang Y, Chen D, Xue X, Aihemaiti A, Yin J, Zhu H. Surface functionalized biochar for the effective capacitive deionization of lead ions. *Sep Purif Technol* 2024;350:127907.
33. Abubshait HA, Farag AA, El-Raouf MA, Negm NA, Mohamed EA. Graphene oxide modified thiosemicarbazide nanocomposite as an effective eliminator for heavy metal ions. *J Mol Liq* 2021;327:114790.
34. Huang Z, Lu L, Cai Z, Ren ZJ. Individual and competitive removal of heavy metals using capacitive deionization. *J Hazard Mater* 2016;302:323-31.
35. Agustini D, Mangrich AS, Bergamini MF, Marcolino LH Jr. Sensitive voltammetric determination of lead released from ceramic dishes by using of bismuth nanostructures anchored on biochar. *Talanta* 2015;142:221-7.
36. Mendonça MZM, de Oliveira FM, Petroni JM, Lucca BG, da Silva RAB, Cardoso VL et al. Biochar from coffee husks: a green electrode modifier for sensitive determination of heavy metal ions. *J Appl Electrochem* 2023;53:1461-71.