

ประสิทธิภาพจากถ่านชีวภาพไม้ไผ่ในการกำจัดน้ำที่ปนเปื้อนผสมเหล็ก แมงกานีส และสารหนู The Efficiency of Bamboo Biochar for the Removal of Iron Manganese and Arsenic Mixed Metal Contaminated Water

พรพฤณ วิลามาต¹, นัททกานต์ เครือทอง², สร้อยดาว วินิจนันทรตน์^{2*}, อนวัช พินิจศักดิ์กุล³, สายชล แสงให้สุ⁴
Ponwarin Wilamas¹, Nattakarn Kruatong², Soydoa Vinitnantharat^{2*}, Anawat Pinisakul³,
Saichol Sanghaisuk⁴

¹ภาควิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

¹Department of Natural Science, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

²สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม กลุ่มวิจัยการจัดการสิ่งแวดล้อมและพลังงานเพื่อชุมชนและเศรษฐกิจหมุนเวียน
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

²Environmental Technology Program, Environmental and Energy Management for Community and Circular
Economy (EEC&C) Research Group, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of
Technology Thonburi

³หน่วยวิจัยเคมีเพื่อสังคมสีเขียวและสุขภาพ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

³Chemistry for Green Society and Healthy Living Research Unit (ChGSH), Department of Chemistry, Faculty of
Science, King Mongkut's University of Technology Thonburi

⁴กองจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กรุงเทพฯ

⁴Water Quality Management Division, Pollution Control Department, Ministry of Natural Resources and
Environment, Bangkok

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปนเปื้อนปริมาณเหล็ก แมงกานีส และสารหนู ในแหล่งน้ำใกล้พื้นที่เหมืองแร่ทองคำในจังหวัดพิจิตร และศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักชนิดเดียวและโลหะผสมในน้ำสังเคราะห์ด้วยถ่านชีวภาพไม้ไผ่ ถ่านชีวภาพไม้ไผ่ที่เคลือบไคโตซาน และถ่านชีวภาพไม้ไผ่ผงเหล็ก ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี ความเป็นกรดต่าง และไอโอไดนิซึมเบอร์ ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับด้วยการหาระยะเวลาสมดุลของการดูดซับ และความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหลือที่ระยะเวลาสมดุล จากนั้นทำการศึกษาการนำถ่านชีวภาพไม้ไผ่กลับมาใช้ซ้ำเพื่อดูดซับโลหะหนักผสม ผลการวิเคราะห์พบปริมาณเหล็กสูงในน้ำผิวดินและน้ำบาดาลมีปริมาณแมงกานีสสูงกว่าเกณฑ์คุณภาพน้ำดื่ม ขึ้นกับสภาพทางธรณีวิทยาของพื้นที่ องค์ประกอบของถ่านชีวภาพไม้ไผ่มีเหล็กและแมงกานีสร้อยละ 6.83 และ 2.37 ตามลำดับ การเคลือบไคโตซานทำให้องค์ประกอบของเหล็กและแมงกานีสลดลง และการฝังเหล็กทำให้สัดส่วนของเหล็กและซิลิกาเพิ่มขึ้น ถ่านชีวภาพไม้ไผ่ ให้ค่าความเป็นกรดต่างเป็นกลางถึงด่าง ส่วนถ่านเคลือบไคโตซานและผงเหล็กให้ค่าเป็นกรด ค่าไอโอไดนิซึมเบอร์ถ่านชีวภาพไม้ไผ่มีค่าสูงสุดเท่ากับ 75.30 มิลลิกรัม/กรัม ระยะเวลาสมดุลของการดูดซับเหล็กเกิดขึ้นได้

* Corresponding author : soydoa.vin@kmutt.ac.th

ในเวลา 24 ชั่วโมง ส่วนการดูดซับแมงกานีสด้วยถ่านชีวภาพไม้ไผ่ถึงระยะเวลาสมดุลการดูดซับเร็วกว่าถ่านที่ปรับปรุงพื้นผิว และการดูดซับสารหนูด้วยถ่านผิวกว้างมีระยะเวลาสมดุลที่ 2 ชั่วโมง การปรับปรุงพื้นผิวถ่านชีวภาพไม้ไผ่ไม่เหมาะกับการบำบัดโลหะหนักชนิดเดียว ถ่านชีวภาพไม้ไผ่ที่ดูดซับเหล็กและแมงกานีสแล้วเมื่อนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อดูดซับโลหะหนักผสม สามารถบำบัดได้เพียงเหล็กและสารหนู ดังนั้นถ่านชีวภาพไม้ไผ่จึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุกรองน้ำ

คำสำคัญ: การดูดซับ ไม้ไผ่ เหล็ก แมงกานีส สารหนู

Abstract

The objectives of this research were to study the iron, manganese, and arsenic contaminated in water resources near the gold mining area in Pichit Province. The heavy metal adsorption capacities in single and mixed metal adsorbed by bamboo biochar, chitosan coated-bamboo biochar and iron impregnated-bamboo biochar were also investigated. The adsorbents were characterized the chemical content, pH, and the iodine number. The study of adsorption efficiency was employed in term of the adsorption equilibrium time and residual concentrations of heavy metals at equilibrium time. The reusability of loaded bamboo biochar for mixed heavy metal adsorption was carried out. From the results, it revealed that the surface water contained high iron content whereas groundwater showed manganese content above drinking water quality criteria due to the geological area. Bamboo biochar contained iron and manganese contents of 6.83% and 2.37%, respectively. Chitosan coating could decrease iron and manganese contents while iron impregnated-bamboo biochar gave high iron and silica contents. The bamboo biochar exhibited neutral to base pH range, whereas the chitosan coated biochar and iron impregnated-bamboo biochar showed the acid pH range. The iodine number of bamboo biochar showed highest value of 75.30 mg/g. The equilibrium time of iron adsorption could occur within 24 hours. Manganese adsorption by bamboo biochar achieved equilibrium time faster than the surface modified biochar. The arsenic adsorption by the iron impregnated-bamboo biochar reached equilibrium time at 2 hours. Surface modified biochar was suitable for single heavy metal removal. Reuse of iron and manganese loaded-bamboo biochar for mixed heavy metals adsorption could only treated for iron and arsenic. Thus, bamboo biochar could be used for water filter material.

Keywords: Adsorption, Bamboo, Iron, Manganese, Arsenic

1. บทนำ

น้ำบาดาลเป็นแหล่งน้ำสำหรับการบริโภค อุปโภค ของชุมชนต่าง ๆ ที่ห่างจากแหล่งน้ำผิวดิน และไม่มีระบบน้ำประปาในพื้นที่ แต่เนื่องจากน้ำบาดาลในบางพื้นที่ มีปริมาณเหล็ก แมงกานีส และสารหนูสูง เนื่องจากสภาพทางธรณีวิทยาและจากกิจกรรมของมนุษย์ Zhou et al. (2020) รายงานว่าแหล่งโลหะหนักในทวีปแอฟริกามาจากภาคการเกษตรจากการใช้ปุ๋ยและยาฆ่าแมลงร่วมกับสภาพดินฟ้าอากาศถึงร้อยละ 56.7 ในทวีปเอเชียและยุโรปมีแหล่งโลหะหนักมาจากการขุดเจาะและการผลิต รวมถึงการฟุกร่อนของหินร้อยละ 97.1 และ 56.2 ตามลำดับ ดังนั้นพื้นที่บริเวณใกล้เคียงเมืองจึงเป็นพื้นที่ที่ควรเฝ้าระวังการปนเปื้อนของโลหะหนัก สำหรับประเทศไทยมีการรายงานการพบปริมาณสารหนูในช่วง 0.0028-0.0205 มิลลิกรัม/ลิตร จากแหล่งน้ำบริเวณพื้นที่เมืองทองทุ่งคำ จังหวัดเลย และยังพบปริมาณเหล็กสูงในช่วง 0.5-38.0 มิลลิกรัม/ลิตร และแมงกานีสในช่วง 0.3-1.6 มิลลิกรัม/ลิตร ในพื้นที่จังหวัดกำแพงเพชร สุโขทัย พิจิตร และพิษณุโลก (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2563) โดยทั่วไปครัวเรือนหรือชุมชนมีระบบกรองน้ำก่อนนำไปใช้เพื่อการอุปโภค โดยใช้ทรายกรองร่วมกับวัสดุดูดซับ เช่น ถ่านกัมมันต์เพื่อกำจัดโลหะหนักและกลิ่น และใช้กรีนแซนด์ (ทรายเคลือบด้วยแมงกานีสออกไซด์) สำหรับกำจัดน้ำบาดาลที่มีเหล็กและแมงกานีสสูง โดยอาศัยหลักการออกซิไดซ์เหล็กและแมงกานีสให้เปลี่ยนเป็นรูปไปเป็นเหล็กเฟอร์ริกและแมงกานีสออกไซด์ที่ตกตะกอนได้ (Viessman and Hammer, 1985; Benis et al., 2020) ซึ่งถ่านกัมมันต์และกรีนแซนด์มีราคาค่อนข้างสูง ที่ผ่านมามีงานวิจัยที่ศึกษาเรื่องการพัฒนาวัสดุดูดซับ และการปรับปรุงพื้นผิววัสดุดูดซับให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น การเคลือบวัสดุดูดซับด้วยไคโตซาน เนื่องจากไคโตซานมีหมู่ฟังก์ชันเอมีนช่วยในการดูดซับไอออนที่เป็นประจุลบในน้ำ เช่น ไนเตรต และสารหนู และมีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลที่ช่วยดูดซับไอออนประจุบวก เช่น แอมโมเนียม และโลหะหนัก โดยการเคลือบบนเม็ดแก้วเพื่อดูดซับทองแดง (Albarelli et al., 2012) การเคลือบไคโตซานบนผงหินเพื่อดูดซับสารหนูและตะกั่ว (Jung et al., 2019) การเคลือบไคโตซานบนถ่านจากกะลาปาล์มเพื่อดูดซับโครเมียม (Nomanbhay and Palanisamy, 2005) และการฝังเหล็กในถ่านกัมมันต์เพื่อดูดซับสารหนู (Gu et al., 2005) จะเห็นว่างานวิจัยส่วนใหญ่มักศึกษาการใช้วัสดุดูดซับโลหะหนักเพียงชนิดเดียวและพบว่ามีประสิทธิภาพกำจัดโลหะหนักได้ดี แต่ในแหล่งน้ำธรรมชาติมักพบโลหะผสม ไม่ว่าจะเป็นเหล็กร่วมกับแมงกานีส หรืออาจมีสารหนูปนเปื้อนอยู่ด้วย ซึ่งการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดโลหะผสมยังมีอยู่น้อย และวัสดุดูดซับที่ปรับปรุงพื้นผิวอาจไม่มีประสิทธิภาพสูงพอสำหรับการบำบัดโลหะหนักผสมได้

ไผ่ เป็นพืชเศรษฐกิจใหม่ที่มีประโยชน์ ทั้งการเป็นอาหารและการนำไปแปรรูปเป็นของใช้ ไผ่เป็นพืชที่เติบโตเร็ว มีองค์ประกอบที่เป็นคาร์บอนถึงร้อยละ 47.43 มีเส้นใยและรูลพูนมากกว่าต้นไม้ปกติถึง 4 เท่า สามารถหมุนเวียนตัดลำแก่ไปใช้เพื่อเผาเป็นถ่านและผลิตเป็นถ่านชีวภาพขนาดต่าง ๆ หรือทำเป็นผงคาร์บอนได้ (ธัญพิศฐ์ พวงจิก, 2558) หากนำถ่านชีวภาพไผ่ไปใช้เป็นวัสดุดูดซับทดแทนถ่านกัมมันต์สำหรับการกรองน้ำ จะเป็นการใช้ทรัพยากรในประเทศได้อย่างคุ้มค่า และช่วยลดค่าใช้จ่ายอีกด้วย คณะผู้วิจัยจึงศึกษาการใช้วัสดุดูดซับจากถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไผ่และปรับปรุงพื้นผิวด้วยการเคลือบไคโตซาน และฝังเหล็กเพื่อใช้ในการดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิด โลหะหนักผสม 2 ชนิด (เหล็กและแมงกานีส) และโลหะหนักผสม 3 ชนิด (เหล็ก แมงกานีส และสารหนู) โดยศึกษาระยะเวลาสมดุลของการดูดซับ และศึกษาการนำถ่านชีวภาพที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาผลการเตรียม และวิเคราะห์ถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่ และถ่านที่ปรับปรุงด้วยไคโตซาน และฟิงเหล็ก

2.2 เพื่อศึกษาปริมาณเหล็ก แมงกานีส และสารหนูในแหล่งน้ำใกล้พื้นที่เหมือง

2.3 เพื่อศึกษาระยะเวลาสมมูลของการดูดซับโลหะหนักของถ่านชีวภาพไม้ไผ่และที่ปรับปรุงด้วยการเคลือบไคโตซานและการฟิงเหล็ก และผลของการนำถ่านชีวภาพที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การศึกษาคุณภาพน้ำใกล้พื้นที่เหมือง

ทำการเก็บตัวอย่างน้ำบริเวณพื้นที่ห่างจากพื้นที่เหมืองไม่เกิน 7 กิโลเมตร บริเวณตำบลเขาเจ็ดยอด อำเภอทับคล้อ จังหวัดพิจิตร ในเดือนตุลาคม พ.ศ. 2563 และศึกษาข้อมูลคุณภาพน้ำย้อนหลัง (เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2562 และเดือนสิงหาคม 2563) ของพื้นที่ โดยใช้ข้อมูลจากองค์การบริหารส่วนตำบลเขาเจ็ดยอด ทำการเก็บตัวอย่างน้ำผิวดินแบบจ้วงตัก (Grab sampling) และเก็บน้ำบาดาลด้วยการสูบน้ำขึ้นมาแล้วทิ้งน้ำก่อนประมาณ 30 วินาที จึงเก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กและแมงกานีส ด้วยเครื่องอะตอมมิก แอ็บซอร์ปชัน สเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer; AAS, Shimadzu Europa AA-6300 ประเทศเยอรมัน) วิเคราะห์สารหนูด้วยเครื่องอินดักทีฟ คัปเปิล พลาสมา-ออปติคัล อิมิสชัน สเปกโตรมิเตอร์ (Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer; ICP-OES, Perkin Elmer Optima 8000, ประเทศสหรัฐอเมริกา) และตรวจวิเคราะห์หาปริมาณไอออนบวก และไอออนลบในน้ำบาดาลและน้ำประปา ด้วยเครื่องไอออน โครมาโทกราฟี (Ion Chromatography; IC, 761 Compact IC, Metrohm, ประเทศสวิตเซอร์แลนด์)

3.2 การเตรียมน้ำสังเคราะห์

นำน้ำประปาในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีเก็บใส่ในภาชนะ 200 ลิตร สำหรับใช้ในการศึกษาวิจัยตลอดการทดลองแทนการใช้น้ำบาดาลหรือน้ำผิวดินจริง โดยใช้น้ำประปาเป็นตัวทำละลายสำหรับการเตรียมน้ำสังเคราะห์ให้มีความเข้มข้นของโลหะหนักเหล็ก แมงกานีส และสารหนู ด้วย $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Ajax Finechem Pty Ltd.), $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (Ajax Finechem Pty Ltd.) และ $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Sigma-Aldrich) ตามลำดับ

3.3 การเตรียมและวิเคราะห์ถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่

ถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ เป็นถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่ที่ขายในอำเภอรินช้างราย จังหวัดอุบลราชธานี ใช้ลำต้นไม้ไผ่กิมชุง (*Bambusa beecheyana*) จากป่าไผ่ที่ปลูกไว้ อายุ 2-3 ปี ตัดให้มีขนาดประมาณ 30 เซนติเมตร นำไปเผาด้วยเตาดินเผาของชุมชนรูปครึ่งวงกลมกว้างประมาณ 2.5 เมตร สูง 2.5 เมตร ให้มีออกซิเจนในเตาน้อยที่สุด โดยช่วงต้นให้ความร้อนด้านหน้าเตาด้วยฟืนเพื่อไล่ความชื้นและให้เกิดไอร้อนภายในเตาอย่างต่อเนื่องเป็นเวลาโดยประมาณ 8 ชั่วโมง โดยทั่วไปอุณหภูมิอยู่ในช่วง 400-600 องศาเซลเซียส หลังจากควั่น

สีขาวเปลี่ยนเป็นคว้นใส จึงปิดเตาทิ้งไว้ข้ามคืน จากนั้นรดน้ำรอบ ๆ เตา 5-6 วัน แล้วทิ้งไว้อีก 6 วันจึงเปิดเตาเพื่อเอาก้อนชีวภาพออกมา ซึ่งการเผาต่อครั้งจะได้ถ่านไม้ไผ่ประมาณ 1,000 กิโลกรัม หรือ 50 กระสอบ จากนั้นนำมาทุบแล้วร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 7 และเบอร์ 10 เพื่อให้มีขนาด 2-3 มิลลิเมตร เก็บในภาชนะที่แห้งแล้วนำมาใช้โดยไม่ผ่านการปรับปรุง และนำมาปรับปรุงพื้นผิวด้วยการเคลือบด้วยไคโตซาน และการฝังด้วยเหล็ก

การเคลือบด้วยไคโตซาน ทำโดยเตรียมสารละลายไคโตซาน โดยใช้ไคโตซานผง 1 กรัม ละลายในกรดแอซิติกความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำไปกวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้เป็นสารละลายเนื้อเดียวกัน จากนั้นจึงใส่ถ่านชีวภาพไม้ไผ่ขนาด 2-3 มิลลิเมตร ปริมาณ 5 กรัม ในสารละลายดังกล่าว นำไปแช่ในเครื่องแช่ที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (Vinitnantharat, et al., 2007) กรองเอาก้อนชีวภาพที่เคลือบไคโตซานแล้วออกมาล้างด้วยน้ำประปาจนกระทั่งค่า pH ของน้ำล้างอยู่ในช่วง 6.5-7.5 แล้วจึงล้างต่อด้วยน้ำปราศจากไอออน (Deionized water, DI water) นำไปผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง เก็บในภาชนะที่มีฝาปิดเพื่อทำการทดลองในขั้นต่อไป

การฝังเหล็กทำโดยดัดแปลงจาก Kalaruban et al. (2019) โดยเตรียมสารละลายเหล็กจากเฟอร์ริกคลอไรด์ ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 6.75 กรัม ละลายน้ำ 500 มิลลิลิตร หลังจากนั้นใส่ถ่านชีวภาพไม้ไผ่ขนาด 2-3 มิลลิเมตร ปริมาณ 20 กรัม นำไปแช่ในเครื่องแช่ที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำถ่านมาล้างด้วยน้ำประปาจนกระทั่งค่า pH ของน้ำล้างอยู่ในช่วง 6.5-7.5 แล้วจึงล้างต่อด้วยน้ำปราศจากไอออน นำไปผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง เก็บในภาชนะที่มีฝาปิดเพื่อทำการทดลองในขั้นต่อไป

นำถ่านชีวภาพไม้ไผ่ และถ่านชีวภาพไม้ไผ่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยการเคลือบไคโตซานและฝังเหล็กไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence; XRF, Rigaku รุ่น ZSX Primus II ประเทศญี่ปุ่น) ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับด้วยวิธีไอโอดีนนับเบอร์ (Iodine number) ตามมาตรฐาน ASTM D4607-94 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ (Point of zero change: pH_{pzc}) ใช้วิธีของ Newcombe et al. (1993) และการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (pH_{sol}) ใช้วิธีของ Al-Degs et al. (2000)

3.4 การศึกษาหาระยะเวลาสมมูลของการดูดซับ

ศึกษาระยะเวลาการดูดซับ ในน้ำสังเคราะห์ที่มีโลหะหนักชนิดเดียว โลหะหนักผสม 2 ชนิดของเหล็กและแมงกานีส และโลหะหนักผสม 3 ชนิดของเหล็ก แมงกานีส และสารหนู ดังตารางที่ 1 โดยใช้วัสดุดูดซับปริมาณ 0.5 กรัม และสารละลายโลหะหนักปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปรับค่า pH ของสารละลายเริ่มต้นให้อยู่ในช่วง 7.00 ± 0.50 ยกเว้นการศึกษาระยะเวลาสมมูลของการดูดซับโลหะเหล็กชนิดเดียว ได้ปรับค่า pH ของสารละลายเริ่มต้นให้อยู่ในช่วง 4.40 ± 0.10 เพื่อป้องกันการตกตะกอนของ Fe(II) ไปเป็น Fe(III) จากนั้นนำไปแช่ที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ 28 ± 0.5 องศาเซลเซียส เก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์โลหะหนักที่ระยะเวลาต่าง ๆ จนกระทั่งการดูดซับเข้าสู่สมมูลของการดูดซับและการคายซับ กรองวัสดุดูดซับออกด้วยกระดาษกรองไนลอน 0.45 ไมครอน นำน้ำที่ผ่านการกรองไปวิเคราะห์หาโลหะหนักที่เหลือ ทำการทดลองพร้อมกับชุดควบคุมที่ไม่มีวัสดุดูดซับ และที่มีวัสดุดูดซับแต่ไม่ใส่โลหะหนักที่ศึกษาในน้ำประปา

ตารางที่ 1 ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ใช้ศึกษาระยะเวลาสมดุล

ประเภทการดูดซับ	Fe(II) (มิลลิกรัม/ลิตร)	Mn(II) (มิลลิกรัม/ลิตร)	As(V) (มิลลิกรัม/ลิตร)
โลหะหนัก 1 ชนิด	10.00*	1.00	0.05
โลหะหนักผสม 2 ชนิด	7.00**	1.00	-
โลหะหนักผสม 3 ชนิด	7.00**	1.00	0.02

หมายเหตุ: *ปรับค่า pH ของสารละลายเริ่มต้นให้อยู่ในช่วง 4.40 ± 0.10 เพื่อป้องกันการตกตะกอนของเหล็ก

**เหล็กตกตะกอนเมื่อปรับค่า pH ให้อยู่ในช่วง 7.00 ± 0.50 จากความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร เป็น 7 มิลลิกรัม/ลิตร

ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับบนวัสดุดูดซับ (q_t) คำนวณได้จากสมการที่ 1

$$q_t = \{[C_0 - (C_t - C_c)]V\}/m \quad (1)$$

โดยที่ q_t คือ ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อกรัมวัสดุดูดซับที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัม/กรัม)

C_0 คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายเริ่มต้น (มิลลิกรัม/ลิตร)

C_t คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัม/ลิตร)

C_c คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายของชุดควบคุม (มิลลิกรัม/ลิตร)

V คือ ปริมาตรของสารละลาย (ลิตร)

m คือ ปริมาณวัสดุดูดซับ (กรัม)

3.5 การศึกษาการนำถ่านชีวภาพไม้ไผ่ที่ใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่

นำถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่ที่ผ่านการดูดซับสารละลายที่มีโลหะหนักของแมงกานีส และเหล็กผสม 2 ชนิด จากการทดลองระยะเวลาดูดซับที่ผั่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ปริมาณ 0.50 กรัม ใส่สารละลายที่มีโลหะหนักผสม 3 ชนิด ที่ความเข้มข้นของเหล็ก แมงกานีส และสารหนู เท่ากับ 7.00, 1.00 และ 0.02 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับค่า pH ของสารละลายเริ่มต้นให้อยู่ในช่วง 7.00 ± 0.50 นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ 28.0 ± 0.5 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาสมดุล แยกวัสดุดูดซับออกด้วยกระดาษกรองไนลอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.45 ไมครอน นำน้ำที่ผ่านการกรองไปวิเคราะห์หาโลหะหนักที่เหลือ และนำวัสดุดูดซับมาผั่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเพื่อทำการทดลองซ้ำอีก 3 รอบ

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการศึกษาโลหะหนักในแหล่งน้ำ

ผลการเก็บตัวอย่างคุณภาพน้ำบาดาลและน้ำผิวดินในตำบลเขาเจ็ดยักษ์ จังหวัดพิจิตร แสดงในตารางที่ 2 พบปริมาณเหล็กสูงในน้ำผิวดิน (0.423-1.573 มิลลิกรัม/ลิตร) มากกว่าน้ำบาดาล (0.102-0.139 มิลลิกรัม/ลิตร) ในขณะที่ปริมาณแมงกานีสในน้ำบาดาล (0.258-1.370 มิลลิกรัม/ลิตร) มีค่าสูงกว่าน้ำผิวดิน (0.034-0.244 มิลลิกรัม/ลิตร) จากเกณฑ์คุณภาพน้ำประปากรมอนามัย (2563) ได้กำหนดให้ปริมาณเหล็ก แมงกานีส และสารหนู ต้องไม่เกิน 0.30, 0.30 และ 0.01 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ และตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม พ.ศ.2551 ได้กำหนดเกณฑ์อนุโลมสูงสุดของคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้บริโภคได้ ต้องมีปริมาณเหล็ก แมงกานีส และสารหนู ไม่เกิน 1.00, 0.50 และ 0.05 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ดังนั้น น้ำบาดาลจึงมีเพียงแมงกานีสที่ยังคงมีค่าเกินเกณฑ์ที่เหมาะสม อีกทั้งน้ำบาดาลมีปริมาณไอออนของโซเดียมและแคลเซียมสูง ขณะที่น้ำผิวดินมีปริมาณแมงกานีส และซัลเฟตค่อนข้างสูง โดยน้ำประปาที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้มีปริมาณไอออนบวกและใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำที่ตรวจวัดของจังหวัดพิจิตร ยกเว้นคลอไรด์และไนเตรทที่มีค่าสูงกว่า

ตารางที่ 2 ปริมาณเหล็ก แมงกานีส และสารหนู ในน้ำบาดาลและน้ำผิวดิน จังหวัดพิจิตร

หน่วย : มิลลิกรัม/ลิตร

ตัวอย่างน้ำ	Fe ²⁺	Mn ²⁺	As ⁵⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻
น้ำบาดาลบ้านเนินทอง ม.8	0.139	0.824	0.003	15.928	ND	0.789	145.017	12.624	0.438	ND	0.106	0.069	1.257
น้ำบาดาลบ้านเขาหม้อ ม.9	0.118	0.258	ND	17.076	ND	1.555	58.981	13.122	1.446	ND	0.104	ND	13.491
น้ำบาดาลบ้านหนองระมาน	0.102	1.370	0.004	11.202	0.224	1.328	109.304	5.800	0.948	0.014	0.388	0.442	8.379
น้ำคลองใกล้วัดประชาบำรุง	1.573	0.244	0.001	6.915	0.018	2.708	28.846	9.440	2.283	0.007	1.090	ND	26.539
บ่อน้ำข้างเหมือง	0.423	0.200	0.002	1.832	0.158	6.147	55.845	34.558	1.073	ND	0.175	ND	118.674
น้ำคลองใกล้ชุมชน	0.734	0.034	0.001	7.025	0.007	2.104	36.617	14.924	4.051	ND	0.179	ND	68.968
ค่าเฉลี่ย	0.515	0.488	0.002	9.996	0.068	2.439	72.435	15.078	1.707	0.004	0.340	0.085	39.551
น้ำประปาสำหรับงานวิจัยนี้	ND	ND	ND	11.952	0.030	4.659	57.048	9.518	12.749	ND	4.032	ND	34.897

หมายเหตุ: ND = Non detectable (ไม่สามารถตรวจวัดปริมาณได้)

ผลการศึกษาข้อมูลเปรียบเทียบผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลจากงานวิจัยนี้เทียบกับข้อมูลผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำที่ได้จาก อบต. เขาเจ็ดยักษ์ จังหวัดพิจิตร ในเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2562 และเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2563 แสดงในตารางที่ 3 พบว่าปริมาณเหล็กมีแนวโน้มลดลง แมงกานีสมีแนวโน้มสูงขึ้น และสารหนูไม่เปลี่ยนแปลงมากนักทั้ง 3 จุดเก็บตัวอย่าง

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบปริมาณเหล็ก แมงกานีส และสารหนู ในน้ำบาดาลที่ตรวจวัดได้กับข้อมูลย้อนหลัง

หน่วย : มิลลิกรัม/ลิตร

จุดเก็บตัวอย่าง	Fe ²⁺			Mn ²⁺			As ⁵⁺		
	ต.ค.	ส.ค.	พ.ค.	ต.ค.	ส.ค.	พ.ค.	ต.ค.	ส.ค.	พ.ค.
	63	63	62	63	63	62	63	63	62
น้ำบาดาลบ้านเนินทอง ม.8	0.139	0.205	0.274	0.824	0.333	0.338	0.003	0.001	ND
น้ำบาดาลบ้านเขาหม้อ ม.9	0.118	3.818	2.722	0.258	0.181	0.173	ND	0.002	ND
น้ำบาดาลบ้านหนองระมาน	0.102	1.014	0.072	1.370	0.775	<0.007	0.004	0.004	ND

จากข้อมูลย้อนหลังการตรวจวัดคุณภาพน้ำผิวดินในเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2562 และเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2563 จำนวน 12 ตัวอย่าง มีปริมาณเหล็ก แมงกานีส และสารหนู โดยเฉลี่ย เท่ากับ 0.360, 0.150 และ 0.001 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ และจากน้ำบาดาล 67 ตัวอย่าง มีปริมาณเหล็ก แมงกานีส และสารหนู โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.700, 0.230 และ 0.005 มิลลิกรัม/ลิตร และพบปริมาณสูงสุดของเหล็ก แมงกานีส และสารหนูในน้ำบาดาลเท่ากับ 11.200, 1.160 และ 0.012 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ซึ่งผลวิเคราะห์ข้อมูลน้ำผิวดินมีความสอดคล้องกันที่มีปริมาณเหล็กมากกว่าแมงกานีส ส่วนข้อมูลการตรวจวัดน้ำบาดาลที่เก็บมีความแตกต่างกับข้อมูลในอดีตเนื่องจากคุณภาพน้ำบาดาลในแต่ละพื้นที่มีความแตกต่างกันขึ้นกับสภาพทางธรณีวิทยาและการปนเปื้อน

4.2 ผลวิเคราะห์คุณลักษณะของถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่

วัสดุดูดซับที่ได้จากการเตรียมแสดงดังภาพที่ 1 พบว่าเมื่อนำถ่านชีวภาพไม้ไผ่มาปรับปรุงด้วยการเคลือบไคโตซาน และฟ้งเหล็ก ซึ่งลักษณะภายนอกก่อนและหลังการปรับปรุงไม่มีความแตกต่างกันมากนัก โดยถ่านเคลือบไคโตซานมีความมันวาวเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากไคโตซานเป็นสารพอลิเมอร์ธรรมชาติและเมื่อละลายในกรดอินทรีย์เจือจางแล้วจะเป็นสารละลายที่ไม่มีสี (วรรณิ ศรินุตตระกูล, 2553) ทำให้เมื่อนำมาเคลือบวัสดุดูดซับแล้วสีของวัสดุดูดซับจะไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม แต่มีลักษณะมันวาวเพิ่มมากขึ้น ส่วนถ่านฟ้งเหล็กมีสีแดงอิฐของเหล็กติดอยู่บนตัวถ่าน



ภาพที่ 1 วัสดุดูดซับที่ใช้ในการทดลอง (ก) ถ่านชีวภาพไม้ไผ่ (ข) ถ่านเคลือบไคโตซาน (ค) ถ่านฟ้งเหล็ก

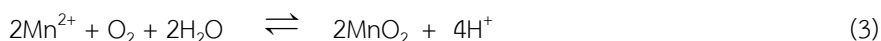
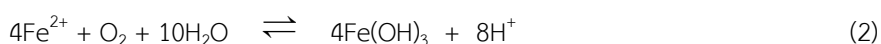
ข้อมูลองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ และค่าความเป็นกรดต่างของถ่านชีวภาพไม้ไผ่ ถ่านเคลือบไคโตซาน และถ่านฟ้งเหล็ก แสดงในตารางที่ 4 พบว่าถ่านชีวภาพเองมีเหล็กและแมงกานีสอยู่ แต่ตรวจไม่พบสารหนู โดยถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่มีปริมาณเหล็กและแมงกานีสอยู่ร้อยละ 0.32 และ 0.70 โดยมีโพแทสเซียมเป็นองค์ประกอบหลักสูงสุดที่ร้อยละ 64.50 เมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวของถ่านชีวภาพ พบว่าองค์ประกอบของธาตุเปลี่ยนแปลงไป โดยการเคลือบไคโตซานทำให้ปริมาณธาตุต่าง ๆ เพิ่มขึ้น ยกเว้นคลอรีนและโพแทสเซียมลดลง เนื่องจากในกระบวนการเตรียมไคโตซานมีการใช้กรดแอซิดิกจึงมีโอกาสชะไอออนออกมาได้ ส่วนการฟ้งด้วยเหล็กทำให้มีเหล็กติดอยู่ที่ถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้น และพบสัดส่วนของซิลิกาเพิ่มขึ้น ค่าไอโอดีนนัมเบอร์เป็นค่าที่บอกความสามารถในการดูดซับไอโอดีนซึ่งอธิบายการดูดซับที่เกิดขึ้นกับรูพรุนขนาดเล็กที่มีพื้นที่การดูดซับ 0.4 ตารางนาโนเมตร คิดจากค่าพื้นที่หน้าตัดของโมเลกุลไอโอดีนที่ถูกดูดซับ (Hill and Marsh, 1968 อ้างใน Alaya et al., 2000) จากผลการวิเคราะห์พบว่าถ่านชีวภาพไม้ไผ่และถ่านเคลือบไคโตซาน มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ใกล้เคียงกัน แต่การฟ้งเหล็กด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ ซึ่งเหล็กอยู่ในรูป Fe^{3+} มีขนาด 0.55 อังสตรอม (Simoes et al., 2017) มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของถ่านชีวภาพไม้ไผ่ จึงสามารถเข้าไปอยู่ในรูพรุนของถ่านได้ และส่งผลทำให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ลดลง

ตารางที่ 4 องค์ประกอบของธาตุในวัสดุดูดซับและสมบัติทางเคมี

วัสดุดูดซับ	ธาตุองค์ประกอบ (ร้อยละ)									Iodine no. (มิลลิกรัม/กรัม)	pH _{pzc}	pH _{sol}
	Fe	Mn	Ca	Si	S	P	Cl	As	K			
ถ่านชีวภาพไม้ไผ่	0.32	0.70	7.78	7.93	2.87	7.06	5.62	ND	64.50	75.30	7.63	8.66
ถ่านเคลือบไคโตซาน	0.82	1.68	13.70	14.50	6.44	10.90	ND	ND	47.70	72.09	4.56	4.31
ถ่านฝังเหล็ก	19.60	0.59	3.17	25.90	3.08	6.04	24.30	ND	13.20	45.54	3.61	2.59

หมายเหตุ: ND = Non detectable (ไม่สามารถตรวจวัดปริมาณได้)

ถ่านชีวภาพไม้ไผ่ มีค่า pH_{sol} เท่ากับ 8.66 ซึ่งสูงกว่าถ่านปรับปรุงพื้นผิว เนื่องจากมีแคลเซียมออกไซด์เมื่อสัมผัสกับน้ำเกิดเป็น $Ca(OH)_2$ จึงทำให้สารละลายเป็นเบสได้ และมีค่า pH_{pzc} เท่ากับ 7.63 หากค่า pH_{sol} มากกว่า pH_{pzc} แสดงว่าประจุสุทธิที่พื้นผิวของวัสดุดูดซับเป็นลบ จึงมีแนวโน้มในการดูดซับเหล็กและแมงกานีสที่เป็นประจุบวกได้ดี ในทางตรงกันข้าม ถ่านไม้ไผ่ที่ทำการปรับปรุงด้วยไคโตซานและฟ้งเหล็ก พบว่าค่า pH_{sol} มีค่าต่ำมาก เนื่องจากในระหว่างการเขย่ามีการชนกันของวัสดุดูดซับ ทำให้เกิดการชะละลายของกรดแอซิดิกที่ใช้ในการเคลือบไคโตซาน และเป็นการเติมอากาศในระบบ จึงทำให้เหล็กและแมงกานีส ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในน้ำและปลดปล่อยไฮโดรเจนไอออนออกมา ดังสมการ (Benefield et al., 1981)

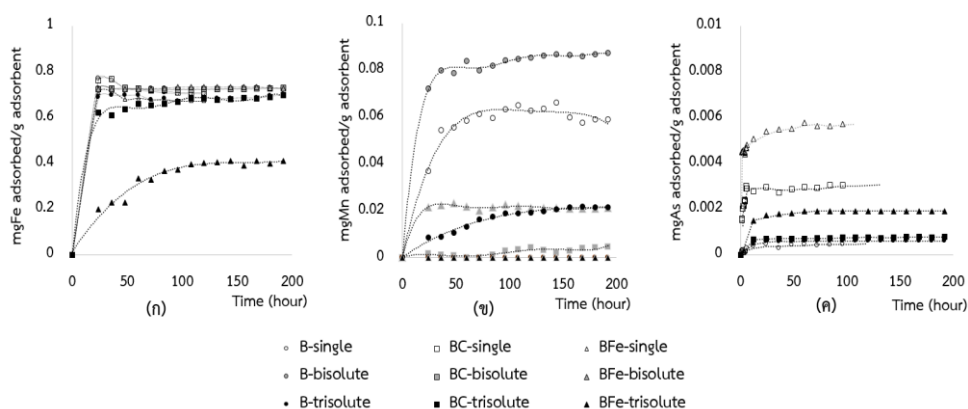


เนื่องจากค่า pH_{sol} ของถ่านเคลือบไคโตซาน และถ่านผิงเหล็กมีค่าต่ำกว่า pH_{pzc} ดังนั้นประจุสุทธิที่ผิวจึงมีค่าเป็นบวก มีแนวโน้มในการดูดซับสารหนูได้ดี เนื่องจากสารหนูเมื่อละลายน้ำ จะอยู่ร่วมกับออกซิเจนที่เป็นประจุลบของ $H_2AsO_4^-$ หรือ $HAsO_4^{2-}$

4.3 ระยะเวลาสมดุลของการดูดซับ

ระยะเวลาสมดุลของการดูดซับเหล็กในน้ำสังเคราะห์ที่มีโลหะหนักชนิดเดียวและผสม 2 ชนิด สามารถเกิดขึ้นได้เร็วภายในระยะเวลา 24 ชั่วโมง ในทุกวัสดุดูดซับ เนื่องจากในการทดลองมีการเขย่า จึงเป็นการเติมอากาศ ทำให้เหล็กที่อยู่ในรูป Fe^{2+} ในสารละลายตกตะกอนเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_3$) และตกค้างในรูปพูนของถ่านได้ เพราะเหล็กมีขนาดไอออนเท่ากับ 0.65 อังสตรอม (Simoes et al., 2017) ส่วนระยะเวลาสมดุลในการดูดซับเหล็กที่มีโลหะหนักผสม 3 ชนิด ถ่านชีวภาพไม้ไผ่ (B) ยังคงใช้ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ส่วนถ่านเคลือบไคโตซาน (BC) และถ่านผิงเหล็ก (BFe) มีระยะเวลาสมดุลที่นานขึ้นเท่ากับ 72 และ 120 ชั่วโมงตามลำดับ เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวที่ต่างกัน ดังภาพที่ 2 (ก)

การดูดซับแมงกานีสโดยถ่านไม้ไผ่ชีวภาพเกิดขึ้นภายในระยะเวลา 48 ชั่วโมง ซึ่งเกิดเร็วกว่าถ่านเคลือบไคโตซาน และถ่านผิงเหล็ก ที่มีระยะเวลาสมดุลที่ 96 และ 84 ชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อน้ำสังเคราะห์มีโลหะหนักผสม 2 ชนิด พบว่าถ่านชีวภาพไม้ไผ่ และถ่านผิงเหล็กเริ่มเข้าสู่ระยะเวลาสมดุลที่ 36 ชั่วโมง และถ่านเคลือบไคโตซาน เข้าสู่ระยะเวลาสมดุลที่ 84 ชั่วโมง เมื่อมีโลหะหนักผสมกัน 3 ชนิด พบว่าถ่านชีวภาพไม้ไผ่ถึงจุดสมดุลเร็วที่สุดที่ 24 ชั่วโมง และถ่านเคลือบไคโตซาน และผิงเหล็กถึงระยะเวลาสมดุลที่ 96 และ 72 ชั่วโมง ตามลำดับ ดังภาพที่ 2 (ข) ส่วนภาพที่ 2 (ค) แสดงระยะเวลาสมดุลการดูดซับสารหนูในน้ำสังเคราะห์ ที่มีโลหะหนักชนิดเดียว พบว่าถ่านผิงเหล็ก มีระยะเวลาถึงจุดสมดุลของการดูดซับสารหนูได้เร็วที่สุดที่เวลา 2 ชั่วโมง ตามด้วยถ่านเคลือบไคโตซาน และถ่านชีวภาพไม้ไผ่ ที่เริ่มเข้าสู่สมดุลที่ 5 และ 12 ชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อมีเหล็กและแมงกานีสผสมอยู่ด้วยกัน พบระยะเวลาสมดุลของการดูดซับด้วยถ่านชีวภาพไม้ไผ่เพิ่มขึ้นเป็น 72 ชั่วโมง ส่วนถ่านเคลือบไคโตซาน และถ่านผิงเหล็ก เริ่มเข้าสู่สมดุลที่ 24 และ 48 ชั่วโมง



ภาพที่ 2 ระยะเวลาสมดุลของการดูดซับในสารละลายที่มีโลหะหนักชนิดเดียว และผสม 2 และ 3 ชนิด
(ก) เหล็ก (ข) แมงกานีส และ (ค) สารหนู

ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักที่ระยะเวลาสมมูลของการดูดซับแสดงในตารางที่ 5 ผลการศึกษาพบว่า ถ่านเคลือบไคโตซานดูดซับเหล็กได้ดีที่สุดในน้ำสังเคราะห์ที่มีโลหะหนักชนิดเดียว ขณะที่ถ่านชีวภาพไม่ดูดซับแมงกานีสได้ดีที่สุด และถ่านฝังบักดูดซับสารหนูได้ดีที่สุดและได้ความเข้มข้นต่ำกว่าเกณฑ์คุณภาพน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย

ตารางที่ 5 ความเข้มข้นของโลหะหนักที่เวลาสมมูลของการดูดซับ

สารละลาย	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นที่ระยะเวลาสมมูล (มิลลิกรัม/ลิตร)			เกณฑ์น้ำประปาดื่มได้ (กรมอนามัย, 2563)
		ถ่านชีวภาพ ไม้ไผ่	ถ่านเคลือบ ไคโตซาน	ถ่านฝังบัก	
โลหะหนักชนิดเดียว	Fe (II) 10.00	0.208±0.001	0.143±0.016	0.534±0.014	0.300
	Mn (II) 1.00	0.145±0.001	1.022±0.001	0.603±0.001	0.300
	As (IV) 0.05	0.043±0.001	0.018±0.001	ND	0.010
โลหะหนักผสม 2 ชนิด	Fe (II) 7.00	ND	ND	ND	0.300
	Mn (II) 1.00	0.121±0.007	0.945±0.003	0.778±0.002	0.300
โลหะหนักผสม 3 ชนิด	Fe (II) 7.00	0.073±0.013	0.111±0.009	2.559±0.468	0.300
	Mn (II) 1.00	0.807±0.006	1.313±0.002	1.313±0.008	0.300
	As (IV) 0.02	ND	ND	ND	0.010

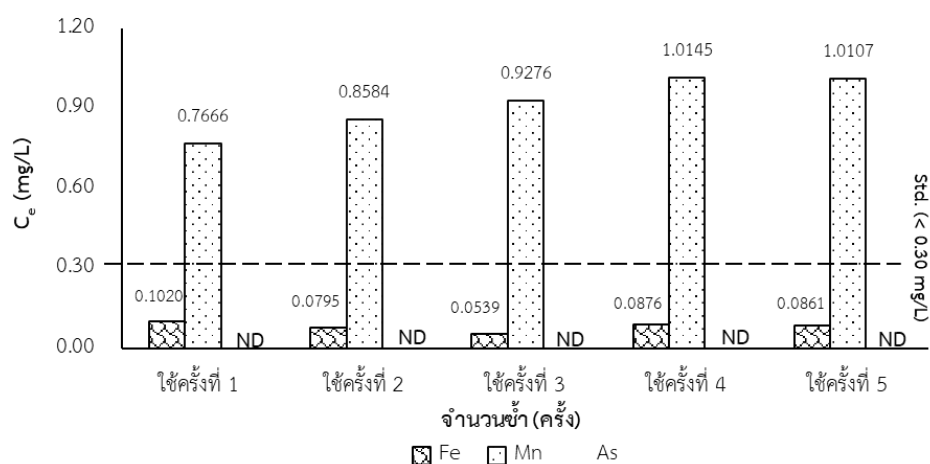
หมายเหตุ: ND = Non detectable (ไม่สามารถตรวจวัดปริมาณได้)

เมื่อมีโลหะหนักผสมกัน 2 ชนิด (เหล็กและแมงกานีส) พบว่าการใช้วัสดุดูดซับทุกชนิดสามารถกำจัดเหล็กได้หมด ซึ่งเกิดจากเหล็กสามารถตกตะกอนและตกค้างในรูพรุนของวัสดุดูดซับได้ แต่มีเพียงถ่านชีวภาพไม้ไผ่เท่านั้นที่สามารถสามารถลดปริมาณแมงกานีสให้อยู่ในเกณฑ์คุณภาพน้ำประปาดื่มได้ (0.121±0.007 มิลลิกรัม/ลิตร) เมื่อมีโลหะหนักผสมกัน 3 ชนิด พบว่าทุกวัสดุดูดซับสามารถกำจัดสารหนูได้หมด แต่ประสิทธิภาพในการบำบัดเหล็กและแมงกานีสลดลง โดยถ่านชีวภาพไม้ไผ่และถ่านเคลือบไคโตซานสามารถบำบัดเหล็กได้เหลือ 0.073±0.013 และ 0.111±0.009 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับอยู่ในเกณฑ์คุณภาพน้ำประปาดื่มได้ แต่ไม่สามารถกำจัดแมงกานีสให้ต่ำกว่าเกณฑ์ได้ ถ่านเคลือบไคโตซานและถ่านฝังบัก มีประสิทธิภาพในการบำบัดแมงกานีสได้ต่ำกว่าถ่านชีวภาพไม้ไผ่ และไม่สามารถบำบัดแมงกานีสให้ต่ำกว่าเกณฑ์ได้ ทั้งในน้ำสังเคราะห์ที่มีโลหะหนักผสม 2 ชนิด และ 3 ชนิด นอกจากนี้ยังพบว่าถ่านเคลือบไคโตซานมีการปลดปล่อยแมงกานีสและถ่านฝังบักมีการปลดปล่อยเหล็กและแมงกานีสออกมา เมื่อตรวจวัดค่าความเป็นกรดต่างที่ระยะเวลาสมมูลของถ่านชีวภาพไม้ไผ่ ถ่านเคลือบไคโตซาน และถ่านฝังบัก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.96±7.32, 4.60±4.64 และ 3.92±4.25 ในการดูดซับน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีโลหะหนักชนิดเดียว ตามลำดับ เท่ากับ 8.58, 5.21 และ 6.25

ในสารละลายผสมโลหะหนัก 2 ชนิด ตามลำดับ และเท่ากับ 6.92, 4.60 และ 3.92 ในสารละลายผสมโลหะหนัก 3 ชนิด ตามลำดับ โดยค่าความเป็นกรดต่างที่แนะนำสำหรับน้ำเพื่อการบริโภคโดยองค์การอนามัยโลกกำหนดไว้ที่ 6.5-9.0 ดังนั้น ถ่านชีวภาพไม้ไผ่ที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวจึงเหมาะสมสำหรับการนำมาใช้เป็นวัสดุกรองน้ำได้

4.4 ผลการศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่

จากผลการศึกษาพบว่าถ่านชีวภาพไม้ไผ่เป็นถ่านที่เหมาะสมในการนำมาใช้ประโยชน์ในการดูดซับน้ำปนเปื้อนโลหะหนักที่ผสมกันได้ดีกว่าถ่านไม้ไผ่ที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวเพราะบำบัดแมงกานีสได้ต่ำกว่าและให้ค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม และน้ำธรรมชาติส่วนใหญ่มีค่า pH อยู่ร่วมกับแมงกานีส จึงได้นำถ่านชีวภาพไม้ไผ่ที่ดูดซับโลหะหนักผสมเหล็กและแมงกานีสแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ โดยการนำไปดูดซับน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีโลหะหนักผสมกัน 3 ชนิด และศึกษาการใช้ซ้ำ 5 รอบ ได้ผลการศึกษาดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ระยะเวลาสมดุลของการนำถ่านชีวภาพไม้ไผ่ (0.5 กรัม/50 มิลลิลิตร) มาใช้ซ้ำ (5 รอบ) ในสารละลายที่มีโลหะหนัก 3 ชนิดผสมกัน (เหล็ก, แมงกานีส และสารหนู ความเข้มข้นเริ่มต้น = 7.00, 1.00, 0.02 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ), ND = Non detectable (ไม่สามารถตรวจวัดปริมาณได้)

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสามารถบำบัดสารหนูและเหล็กให้มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนดได้ แต่สามารถดูดซับแมงกานีสได้เพียงเล็กน้อย และไม่สามารถดูดซับหรือบำบัดให้แมงกานีสต่ำกว่า 0.3 มิลลิกรัม/ลิตร จากผลการศึกษา แสดงให้เห็นว่าการบำบัดเหล็กและสารหนูในน้ำด้วยวัสดุดูดซับจากถ่านชีวภาพสามารถเกิดขึ้นได้ดี สามารถใช้ซ้ำหรือใช้ในระบบถ่วงกรองได้ แต่มีข้อจำกัดในการบำบัดแมงกานีส

5. อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ผลการตรวจวัดเหล็ก แมงกานีส และสารหนูในแหล่งน้ำพบว่าสารหนูมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน บางพื้นที่ที่มีปริมาณเหล็กและแมงกานีสสูง จำเป็นต้องได้รับการบำบัด โดยการปนเปื้อนของโลหะหนักดังกล่าวใน แหล่งน้ำอาจมาจากสภาพทางธรณีวิทยาของพื้นที่เอง และสารหนูมาจากการใช้ยาปราบศัตรูพืชได้ ดังนั้นจึงควร ทำการศึกษาเพิ่มเติมในการตรวจวัดมลสารชนิดอื่น ๆ ประกอบเช่น โปรท และไซยาไนด์ และศึกษาการใช้ถ่าน ชีวภาพไม้ไผ่ในการบำบัดมลสารที่ผสมกันหลายชนิดในแหล่งน้ำ

ลักษณะเด่นของวัสดุดูดซับที่ใช้ในการทดลองมีสมบัติที่โดดเด่นที่ต่างกัน โดยถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่มี คลเคลือบเป็นองค์ประกอบหลัก ทำให้มีสมบัติเป็นเบสและมีประจุพื้นผิวสุทธิเป็นลบ เมื่อทำการปรับปรุงด้วยการ เคลือบด้วยไคโตซานและการฝังเหล็กทำให้องค์ประกอบของธาตุเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการเคลือบไคโตซานมี การใช้กรดแอซิดิกทำให้มีการชะล้างไอออนออกจากถ่านชีวภาพไม้ไผ่ได้ อีกทั้งไคโตซานมีหมู่เอมีนซึ่งทำหน้าที่ เป็นตัวให้อิเล็กตรอน จึงสามารถทำปฏิกิริยาไอออนของโลหะได้ (วรรณิ ศรินุตตระกูล, 2553) ส่วนการฝังเหล็ก ทำให้เกิดการแทนที่ของเหล็กและการชะล้างของธาตุต่าง ๆ ออกมา จึงทำให้พื้นผิวถ่านมีประจุสุทธิเป็นบวก เพิ่มขึ้น และสามารถบำบัดสารหนูได้ดี เนื่องจากตกตะกอนสารหนูร่วมกับออกไซด์ของเหล็ก การมีประจุสุทธิบน พื้นผิวของวัสดุดูดซับที่ตรงข้ามกับกับไอออนที่ศึกษา ทำให้เกิดการดูดซับได้ดีขึ้น เช่นเดียวกับการศึกษาการดูดซับ ประจุลบของโครเมียม ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$, HCrO_4^- , CrO_4^{2-} , and HCr_2O_7^-) บนถ่านเคลือบไคโตซาน เกิดขึ้นได้ดีเนื่องจาก ประจุสุทธิพื้นผิวเป็นบวก (Nomanbhai and Palanisamy, 2005) ขณะที่การดูดซับสารละลายที่มีตะกั่วและ สารหนูร่วมกันด้วยผงหินที่เคลือบไคโตซาน พบการดูดซับตะกั่วสูงขึ้น ส่วนสารหนูลดลงเมื่อเทียบกับผงหินที่ไม่ เคลือบไคโตซาน เนื่องจากประจุสุทธิพื้นผิวเป็นลบ (Jung et al., 2019)

ระยะเวลาสมมูลของการดูดซับเหล็กของถ่านชีวภาพไม้ไผ่เกิดขึ้นได้เร็วภายในระยะเวลา 24 ชั่วโมง ในน้ำสังเคราะห์ที่มีเหล็กเพียงชนิดเดียว และที่มีการผสมโลหะหนักเพิ่ม 2 และ 3 ชนิด ส่วนการดูดซับเหล็กของ ถ่านเคลือบไคโตซานและถ่านฝังเหล็กมีระยะเวลานานขึ้นเมื่อมีการผสมโลหะหนัก 3 ชนิด การดูดซับแมงกานีส ของถ่านไม้ไผ่ชีวภาพเกิดขึ้นได้เร็วกว่าถ่านเคลือบไคโตซานและถ่านฝังเหล็กในน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีโลหะหนัก ชนิดเดียวและผสม การดูดซับสารหนูด้วยถ่านฝังเหล็กมีระยะเวลาสมมูลเร็วที่สุดที่ 2 ชั่วโมง เมื่อมีสารหนูเพียง ชนิดเดียวในน้ำสังเคราะห์ แต่เมื่อมีโลหะหนักผสมกัน 3 ชนิด ถ่านเคลือบไคโตซานเกิดได้เร็วที่สุดที่ 24 ชั่วโมง ระยะเวลาสมมูลของการดูดซับโลหะหนักมีความแตกต่างกันเนื่องจากประจุบนพื้นผิวที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ใน สภาวะที่ทำการศึกษา (ค่า pH 7-9) เหล็กและแมงกานีสอยู่ในรูป $\text{Fe}(\text{OH})^+$ และ Mn^{2+} ตามลำดับ ส่วนสารหนูอยู่ ในรูปประจุลบของ H_2AsO_4^- หรือ HAsO_4^{2-} (Takeno, 2005) เมื่อทำการเขย่า $\text{Fe}(\text{OH})^+$ สัมผัสกับอากาศจึง เปลี่ยนรูปเป็น $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ได้ง่าย และดูดติดที่ผิวของวัสดุดูดซับที่เป็นถ่านชีวภาพได้ เนื่องจากมีรูพรุน ทั้งนี้ ระยะเวลาการเข้าสู่สมมูลของการดูดซับเหล็กด้วยถ่านฝังเหล็กช้ากว่าถ่านชีวภาพไม้ไผ่ และถ่านเคลือบไคโตซาน เนื่องจากมีประจุบวกของเหล็กอยู่ภายในถ่าน ส่วนถ่านเคลือบไคโตซานมีหมู่ฟังก์ชันทั้งที่เป็นประจุบวกและลบ จึงเกิดขึ้นได้เร็วกว่าถ่านฝังเหล็ก

แมงกานีสถูกดูดซับได้ยากเนื่องจากการเปลี่ยนเป็นรูปเป็น MnO_2 ที่เป็นของแข็งเป็นไปได้น้อย เนื่องจากสารละลายควรมีค่า pH มากกว่า 9.5 และต้องมีสภาวะออกซิเดชันสูง (Viessman and Hammer, 1985)

เมื่อน้ำสังเคราะห์หมีโลหะหนักผสมกัน ทำให้เกิดการแย่งพื้นที่ผิวในการดูดซับจึงทำให้ระยะเวลาในการดูดซับนานขึ้น เมื่อมีการผสมกันของโลหะหนัก 3 ชนิด โลหะหนักที่อยู่ในน้ำสังเคราะห์สามารถทำปฏิกิริยาร่วมกันได้โดยเฉพาะ เหล็ก นอกจากจะเกิดการออกซิเดชันแล้วยังสามารถทำปฏิกิริยากับสารหนูได้ เกิดเป็น FeAsO_4 ทำให้ตรวจไม่พบสารหนูภายหลังการดูดซับ Ravenscroft et al. (2009) รายงานว่า สารหนูสามารถทำปฏิกิริยากับเหล็กได้ดีกว่าแร่ธาตุอื่น ๆ การใช้ถ่านเคลือบไคโดซาน และถ่านฝังเหล็กทำให้น้ำมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำลง ทำให้เหล็กและแมงกานีสที่อยู่ในวัสดุดูดซับถูกชะละลายออกมาได้

ถ่านชีวภาพไม้ไผ่สามารถนำมาใช้ซ้ำเพื่อการบำบัดเหล็กและสารหนูได้ มีแนวโน้มอายุการใช้งานสูง แต่ไม่เหมาะสำหรับการนำมาบำบัดแมงกานีส หากแหล่งน้ำมีการปนเปื้อนแมงกานีส จำเป็นต้องใช้วิธีการบำบัดอื่นเพิ่มเติม จากการศึกษาพบว่าถ่านชีวภาพไม้ไผ่เป็นวัสดุดูดซับที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้เป็นวัสดุกรองน้ำมากกว่าถ่านเคลือบไคโดซาน และถ่านฝังเหล็กซึ่งจะเหมาะกับการบำบัดน้ำที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักสูง เช่นน้ำจากกากแร่ หรือในอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงควรมีการศึกษานำถ่านชีวภาพไม้ไผ่ไปทดลองใช้ในระดับสาธิต เปรียบเทียบกับการใช้วัสดุกรองที่มีราคาแพง เช่น ถ่านกัมมันต์ หรือกรีนแซนด์ เพื่อกรองน้ำปนเปื้อนโลหะหนักสำหรับการนำไปใช้เพื่อการอุปโภค บริโภคต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณกฤษณะ ก้อนแก้ว นายกเทศบาลตำบลเขาเจ็ดยอด จ.พิจิตร ที่ได้ให้อาณัติในการลงพื้นที่เก็บตัวอย่างน้ำและข้อมูลคุณภาพน้ำ ขอขอบคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ที่ให้ทุนสนับสนุนเลขที่ วช.อว.(อ)สส/122/2563 ในการวิจัยนี้ และขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี คณะวิทยาศาสตร์ และคณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และสถานที่ทำการวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. (2563). สรุปรายงานสถานการณ์น้ำบาดาลประเทศไทยประจำปี พ.ศ. 2563. สำนักอนุรักษ์และฟื้นฟูทรัพยากรน้ำบาดาล. <http://www.dgr.go.th/th/public-service/329>
- กรมอนามัย. (2563). เกณฑ์คุณภาพน้ำประปาดื่มได้. ประกาศกรมอนามัย เรื่อง เกณฑ์คุณภาพน้ำประปาดื่มได้ กรมอนามัย พ.ศ. 2563, กองสุขาภิบาลอาหารและน้ำ: กรมอนามัย: กระทรวงสาธารณสุข.
- ธัญพิสิษฐ์ พวงจิก. (2558). ถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ : ตลาดยังมีความต้องการสูง ?. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 23(6), 945-956. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/tstj/article/download/41333/34163/94922>
- ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2559). *ราชกิจจานุเบกษา*, 125(ตอนพิเศษ 85 ง), 110-111.
- Alaya, M.N., Hourieh, M.A., Youssef, A.M., & El-Sejarah, F. (2000). Adsorption properties of activated carbons prepared from olive stones by chemical and physical activation. *Adsorption Science & Technology* 18(1), 27-42. <https://doi.org/10.1260/0263617001493251>

- Albarelli, J.Q., Luna, M.T., Vieira, R.S., & Beppu, M.M. (2012). Evaluation of glass beads coated with chitosan for the adsorption of copper (II) ions from aqueous solution. *Adsorption Science & Technology*, 30(3), 227-240. <https://doi.org/10.1260/0263-6174.30.3.227>
- Al-Degs, Y., Khraisheh, M.A.M., Allen, S.J., & Ahmad, M.N. (2000). Effect of carbon surface chemistry on the removal of reactive dyes from textile effluent. *Water Research*, 34(2), 927-935. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00200-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00200-6)
- Benefield, L.D., Judkins, J.F., & Weand, B.L. (1981). *Process chemistry for water and wastewater treatment*. Prentice-Hall: Englewood Cliffs.
- Benis, K.Z., Damuchali, A.M., Sotan, J., & McPhedran, K.N. (2020). Treatment of aqueous arsenic- A review of biochar modification methods. *Science of the Total Environment*, 739(10), 139750. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139750>
- Gu, Z., Fang, J., & Deng, B. (2005). Preparation and evaluation of GAC-based iron-coating adsorbents for arsenic removal, *Environ Sci Technol*, 39(10), 3833-3843. <https://doi.org/10.1021/es048179r>
- Jung, K., Oh, S., Bak, H., Song, G.H., & Kim, H.T. (2019). Adsorption of Arsenic and Lead onto Stone Powder and Chitosan-Coated Stone Powder. *Processes*, 7(9), 599. <https://doi.org/10.3390/pr7090599>
- Kalaruban, M., Loganathan, P., Nguyen, T.V., Nur, T., Johir, Md. A.H., Nguyen, T.H., & Trinh, M.V. (2019). Iron-impregnated granular activated carbon for arsenic removal: Application to practical column filters. *Journal of Environmental Management*, 239, 235-243. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.053>
- Newcombe, G. Hayes, R., & Drikas, M. (1993). Granular activated carbon: importance of surface properties in the adsorption of naturally occurring organics. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 78, 65-71. [https://doi.org/10.1016/0927-7757\(93\)80311-2](https://doi.org/10.1016/0927-7757(93)80311-2)
- Nomanbhay S.M., Palanisamy K., 2005, Removal of heavy metal from industrial wastewater using chitosan coated oil palm shell charcoal, *Electronic Journal of Biotechnology*, 8(1). <http://www.ejbiotechnology.info/index.php/ejbiotechnology/article/view/v8n1-7/430>
- Ravenscroft, P., Brammer, H., & Richards, K. (2009). *Arsenic pollution A global Synthesis*, Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781444308785>
- Simoes, M.C., Hughes, K.J., Ingham, D.B., Ma, L., & Pourkashanian, M. (2017). Estimation of the thermochemical radii and ionic volumes off complex ions. *Inorganic Chemistry*, 56(13), 7566–7573. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.7b01205>

- Takeno, N. (2005). Atlas of Eh-pH diagrams-Intercomparison of thermodynamic databases. *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology*, 419, 29-31. <https://www.nrc.gov/docs/ML1808/ML18089A638.pdf>
- Vinitnantharat, S., Rattanasirisophon, W., & Ishibashi, Y. (2007). Modification of granular activated carbon surface by chitosan coating for geosmin removal: sorption performances. *Water Science and Technology*, 55(5), 145–152. <https://doi.org/10.2166/wst.2007.173>
- Viessman, W. Jr., & Hammer, M. J. (1985). *Water supply and pollution control* (4th ed.). New York: Harper and Row Publishers.
- Zhou, Q., Yang, N., Li, Y., Ren, B., Ding, X., Bian, H., & Yao, X. (2020). Total concentrations and sources of heavy metal pollution in global river and lake water bodies from 1972 to 2017. *Global Ecology and Conservation*, 29(6), e00925. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e00925>