

การดูดซับตะกั่ว (Pb^{2+}) โดยใช้ซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพ Adsorption of Lead (Pb^{2+}) Using Saw Dust and Modified Saw Dust

พลวัฒน์ พาทรมพิก,¹ ปานใจ สือประเสริฐสิทธิ์,^{2*} ธาญกร พระบำรุง³

Polawat Phaphromphuek,¹ Panjai Sueprasearsit,^{2*} Thayukorn Prabamroong³

Received: 25 April 2016 ; Accepted: 26 August 2016

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการดูดซับตะกั่ว (Pb^{2+}) ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีลี้อย (SD) และซีลี้อยปรับสภาพ (MSD) โดยปรับสภาพด้วยกระบวนการปรับสภาพด้วยกรด-ด่าง โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารละลายกรดซัลฟิวริก การศึกษาทั้งหมดอยู่ในรูปแบบการทดลองแบบที่ละทีละอย่าง ซึ่งปัจจัยการดูดซับที่ทำการศึกษา ประกอบด้วย ค่า pH ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วเริ่มต้น และอุณหภูมิ นอกจากนี้ได้มีการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ จลนศาสตร์การดูดซับ และ อุณหพลศาสตร์การดูดซับ เพื่ออธิบายกลไกการดูดซับที่เกิดขึ้น รวมถึงศึกษาการคายซับเพื่อพิจารณาวิธีการจัดการที่เหมาะสมสำหรับตัวดูดซับหลังผ่านการดูดซับ

ผลการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วโดยใช้ซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพ คือ pH 5 ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส สำหรับการศึกษาการดูดซับพบว่า สมการไอโซเทอร์มที่เหมาะสมในการอธิบายกลไกการดูดซับตะกั่วของซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพ คือ แลงเมียร์โดยค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพตามสมการของแลงเมียร์มีค่าเท่ากับ 5.58 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 7.56 มิลลิกรัมต่อกรัม การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับพบว่า ผลการทดลองสอดคล้องกับสมการ Pseudo-second-order และการศึกษาอุณหพลศาสตร์การดูดซับ พบว่า ΔH^0 ของซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพมีค่าเท่ากับ -9.99 กิโลจูลต่อโมลและ -15.08 กิโลจูลต่อโมล แสดงว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic Reaction) และ ΔG^0 ของซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพมีค่าเป็นลบแสดงว่าเป็นปฏิกิริยาการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้เอง (Spontaneous Reaction) และ ΔS^0 ของซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพมีค่าเท่ากับ -52.20 จูลต่อโมล.เคลวิน และ -64.40 จูลต่อโมล.เคลวิน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นทำให้ระบบมีความเป็นระเบียบมากขึ้น

นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาประสิทธิภาพการคายซับเพื่อหาวิธีการที่เหมาะสมในการจัดการวัสดุดูดซับหลังผ่านกระบวนการดูดซับ ซึ่งพบว่า ซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพ มีค่าเท่ากับ 70.79% และ 90.28% จากการใช้สารละลาย กรดไนตริก 1.0 โมลาร์ จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการคายซับมีค่าสูงจึงเหมาะสมที่จะใช้วิธีการคายซับในการจัดการตัวดูดซับหลังผ่านการดูดซับ ซึ่งวิธีการนี้จัดว่าเป็นวิธีการนำตะกั่วกลับมาใช้ (Recovery) และเป็นการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ (Regeneration) เพื่อกลับมาใช้ใหม่ได้อีกด้วย จากผลการศึกษาทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพจัดว่าเป็นวัสดุดูดซับที่น่าสนใจและมีประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่ว ซึ่งการนำซีลี้อยและซีลี้อยที่ปรับสภาพมาใช้ประโยชน์นี้จัดว่าเป็นการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้ง (Waste Utilization) และยังช่วยจัดการวัสดุเหลือทิ้ง (Waste Management) ซึ่งเป็นแนวทางที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Eco-friendly Approach) อีกแนวทางหนึ่ง

คำสำคัญ: การดูดซับ โลหะหนัก ซีลี้อยการปรับสภาพ

¹ นิสิตระดับปริญญาโท,^{2,3} อาจารย์, คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอเมืองจังหวัดมหาสารคาม 44150

¹ Master Degree's Student, ^{2,3} Lecturer, Faculty of Environment and Resource Studies, Mahasarakham University, Kantharawichai District, MahaSarakhm, 44150, Thailand.

* Corresponding author; PanjaiSueprasearsit, Faculty of Environment and Resource Studies, Mahasarakham University, Kantharawichai District, MahaSarakhm, 44150, Thailand. panjai@msu.ac.th

Abstract

This research presented the adsorption of lead in synthetic wastewater using sawdust (SD) and modified sawdust (MSD) that modified processes of Alkali-Acid Modification with sodium hydroxide cooperate citric acid. All experiments were carried out in the batch reactor technique. This research project studied the characteristics of sawdust and modified the sawdust including adsorption factors; pH, contact time, initial lead concentration and temperature. Furthermore, the studied adsorption isotherm, kinetic and thermodynamics were used to explain the related adsorption. Finally, desorption was studied to evaluate the appropriate technique for spent adsorbent management.

The results indicate that the optimal adsorption of lead using sawdust and modified sawdust condition consists of pH 5, contact time 120 minutes of contacting time, initial lead concentration of 50 mg/l and temperature at 30 °C. The experimental data were well fitted with Langmuir isotherm of sawdust and modified sawdust, in which the adsorption efficiency of sawdust and modified sawdust was 5.58 mg/g and 7.56 mg/g respectively. The kinetic adsorption behavior was fitted with the Pseudo-second-order model. The average thermodynamic changes of standard adsorption heat, ΔH^0 , of sawdust and modified sawdust were -9.99 kJ/mol and -15.08 kJ/mol, which shows that the adsorption system was an exothermic reaction. ΔG^0 values indicate the reaction process for lead onto the studied sawdust and modified sawdust were a spontaneous reaction. The values of standard entropy, ΔS^0 , of sawdust and modified sawdust were -52.20 J/mol.K and -64.40 J/mol.K, which shows that the adsorption system had more regularity.

In addition, this research studied the desorption efficiency for management of adsorbent after. The results of desorption were 70.79% and 90.28% respectively. The results of desorption were high yield. All the results show sawdust and modified sawdust to be interesting adsorbents and adsorption efficient of lead. Sawdust and modified sawdust were effective for waste utilization and represent an eco-friendly approach.

Keywords: Adsorption, Heavy Metal, Sawdust, Modified

บทนำ

การปนเปื้อนของตะกั่วในสิ่งแวดล้อมได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว มีผลสืบเนื่องมาจากการนำเอาตะกั่วไปใช้ประโยชน์เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมต่างๆ เป็นจำนวนมาก เช่น อุตสาหกรรมแบตเตอรี่ อุตสาหกรรมเคลือบเหล็ก อุตสาหกรรมชุบโลหะ (เหล็ก และเหล็กกล้า) เป็นต้น¹ ซึ่งทำให้มีโอกาที่ตะกั่วจะปนเปื้อนหรือแพร่กระจายไปในสิ่งแวดล้อมจนก่อให้เกิดผลเสียต่อคุณภาพชีวิตของประชาชน ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าหากประชาชนได้รับสารตะกั่วเข้าไปสะสมในร่างกายจะมีผลต่อระบบหมุนเวียนโลหิต ระบบประสาทสมอง ไต และต่อสารพันธุกรรม เป็นต้น²

จากข้อมูลดังกล่าวจึงจำเป็นต้องหาวิธีการที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วที่ปนเปื้อนจากแหล่งกำเนิดที่ส่วนใหญ่ของในรูปแบบของน้ำเสีย ซึ่งวิธีการกำจัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในน้ำเสียมียุทธวิธีด้วยกัน ประกอบด้วย การตกตะกอน (Precipitation) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) กระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ (Reverse Osmosis) กระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electrochemical) การออกซิเดชันทางเคมี และการดูดซับ (Adsorption)³ สำหรับงานวิจัยนี้ผู้วิจัยสนใจที่จะเลือกวิธีการดูดซับมาใช้ศึกษา ทั้งนี้เนื่องจากการดูดซับจัดว่าใช้หลักการขั้นพื้นฐานง่ายต่อการควบคุมและบำรุงรักษามีประสิทธิภาพสูงในการบำบัด และมีค่าใช้จ่ายต่ำในการดำเนินการ นอกจากนี้ยังมีความเป็นไปได้สูงในการที่จะนำกลับตะกั่วกลับไปใช้ประโยชน์ (Recovery)⁴ และเป็นที่ยอมรับกันดีว่าการดูดซับโดยทั่วไปจะนิยมใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับแต่เนื่องจากกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จะต้องใช้อุณหภูมิสูงซึ่งทำให้มีค่าใช้จ่ายในการผลิตสูงและใช้พลังงานเป็นจำนวนมาก⁵ ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงได้นำขี้เลื่อย (Sawdust หรือ Wood Dust) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตประเภทผลิตภัณฑ์ไม้ และไม้แปรรูป ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ขี้เลื่อยจัดเป็นวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่มีองค์ประกอบของ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งในโครงสร้างมีกลุ่มฟังก์ชันคือ กลุ่มไฮดรอกซิล (OH^-) และคาร์บอกซิลิก (COO^-)⁶ เป็นจำนวนมากจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้ดูดซับตะกั่วได้ และนอกจากการใช้ขี้เลื่อยตามธรรมชาติแล้ว ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้สนใจที่จะศึกษาการดูดซับตะกั่วของขี้เลื่อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกระบวนการกรด-ด่างโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับกรดซิตริก ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การปรับสภาพด้วยโซเดียม

ไฮดรอกไซด์จะทำให้เลือกวิธีการดูดซับมาใช้ศึกษา ทั้งนี้เนื่องจากการดูดซับจัดว่าใช้หลักการขั้นพื้นฐานง่ายต่อการควบคุมและบำรุงรักษามีประสิทธิภาพสูงในการบำบัด และมีค่าใช้จ่ายต่ำในการดำเนินการ นอกจากนี้ยังมีความเป็นไปได้สูงในการที่จะนำกลับตะกั่วกลับไปใช้ประโยชน์ (Recovery)⁴ และเป็นที่ยอมรับกันดีว่าการดูดซับโดยทั่วไปจะนิยมใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับแต่เนื่องจากกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จะต้องใช้อุณหภูมิสูงซึ่งทำให้มีค่าใช้จ่ายในการผลิตสูงและใช้พลังงานเป็นจำนวนมาก⁵ ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงได้นำขี้เลื่อย (Sawdust หรือ Wood Dust) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตประเภทผลิตภัณฑ์ไม้ และไม้แปรรูป ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ขี้เลื่อยจัดเป็นวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่มีองค์ประกอบของ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งในโครงสร้างมีกลุ่มฟังก์ชันคือ กลุ่มไฮดรอกซิล (OH^-) และคาร์บอกซิลิก (COO^-)⁶ เป็นจำนวนมากจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้ดูดซับตะกั่วได้ และนอกจากการใช้ขี้เลื่อยตามธรรมชาติแล้ว ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้สนใจที่จะศึกษาการดูดซับตะกั่วของขี้เลื่อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกระบวนการกรด-ด่างโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับกรดซิตริก ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การปรับสภาพด้วยโซเดียม

ไฮดรอกไซด์ (NaOH) สามารถละลายพันธะสลายพันธะโควาเลนต์ระหว่างลิกนินและเซลลูโลส ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักได้ มากไปกว่านั้นยังช่วยย่อยสลายไซและไซมันบนผิวของเซลลูโลส และกรดซัลฟิวริกช่วยเพิ่มอุณหภูมิ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเปลี่ยนกลุ่มฟังก์ชันนอลของไฮดรอกซิลเป็นคาร์บอกซิลิก ซึ่งเป็นการเพิ่มไอออนลบให้แก่ตัวดูดซับ ทำให้สามารถดูดซับไอออนบวกของโลหะหนักได้เพิ่มมากขึ้น⁸ โดยในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการดูดซับตะกั่ว (Pb^{2+}) โดยใช้ทั้งซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพด้วยกรด-ด่าง โดยเริ่มจากการศึกษาคุณสมบัติของซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพ ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ คือ ค่า pH ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วเริ่มต้น และอุณหภูมิ ทำการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ จลนศาสตร์การดูดซับ และอุณหพลศาสตร์การดูดซับ รวมทั้งการคายซับตะกั่วจากวัสดุดูดซับทั้งสองชนิด

วิธีการทดลอง

1. การเตรียมวัสดุดูดซับและน้ำเสียสังเคราะห์

1.1 การเตรียมซีลี้อย

ล้างซีลี้อยด้วยน้ำกลั่นเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกจนค่า pH ของน้ำล้างสุดท้ายใกล้เคียงกับค่า pH ของน้ำกลั่น และนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นในตู้ดูดความชื้นและนำไปบดให้มีขนาดเล็กกลง และร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 35 และ 60 มิลลิเมตร (ขนาด 250-500 ไมโครเมตร)³ เก็บไว้ในภาชนะที่ปิดสนิท เพื่อใช้เป็นซีลี้อยในขั้นตอนการทดลอง

1.2 การเตรียมซีลี้อยปรับสภาพ

สำหรับซีลี้อยปรับสภาพ สามารถเตรียมได้ โดยการนำซีลี้อยผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ (0.1M NaOH) ด้วยอัตราส่วน 1:20 นำไปปั่นเหวี่ยงที่ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นจนค่า pH ของน้ำล้างสุดท้ายใกล้เคียงกับค่า pH ของน้ำกลั่น นำซีลี้อยไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำซีลี้อยไปแช่ในกรดซัลฟิวริก 1 โมลาร์ ($1M\ C_6H_8O_{10}$) ด้วยอัตราส่วน 1:7 แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นจนค่า pH ของน้ำล้างสุดท้ายใกล้เคียงกับค่า pH ของน้ำกลั่นนำซีลี้อยไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง⁸ จากนั้นนำไปบดให้มีขนาดเล็กกลงและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 35 และ 60 มิลลิเมตร (ขนาด 250-500 ไมโครเมตร) แล้วเก็บในภาชนะที่ปิดสนิท เพื่อใช้เป็นซีลี้อยปรับสภาพในการทดลอง

1.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งเตรียมจากการละลายสารตะกั่วไนเตรต ($Pb(NO_3)_2$) ปริมาณ 1.59 กรัม ลงในน้ำกลั่นปรับปริมาตรให้เท่ากับ 1 ลิตร จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว (Pb^{2+}) 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร บรรจุลงในภาชนะปิดและเก็บไว้ทำการเจือจางให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการในแต่ละการทดลอง⁹

2. ขั้นตอนการทดลอง

2.1 การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุดูดซับ

คุณสมบัติของซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพ เป็นการศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Micro-scope; SEM) ยี่ห้อ Carl Zeiss รุ่น Leo-1450⁴ และเครื่อง BET Surface Area Pore Size and Pore Volume Distribution Analyzer (BET) ยี่ห้อ Bel-Japan รุ่น BelSorp mini II¹⁰ วิเคราะห์ผลึกโดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ X-ray Diffraction (XRD) ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance วิเคราะห์ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันโดยใช้เครื่อง Near Infrared & relate (IR-Spectrum) ยี่ห้อ BUCHI รุ่น NIRFlex N-500¹¹

2.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

การศึกษปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ศึกษาผลของค่า pH อยู่ในช่วง 2 ถึง 7 ในการปรับค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์จะใช้กรดไนตริกและโซเดียม-ไฮดรอกไซด์² ศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสที่ 0, 15, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180, 240 และ 360 นาที³ ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นกับอุณหภูมิ โดยที่ความเข้มข้น 5, 25, 50, 75 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และอุณหภูมิที่ 30, 45 และ 60 องศาเซลเซียส¹² โดยนำตัวอย่างไปแช่ในเครื่องควบคุมสภาวะแวดล้อมที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ซึ่งในการทดลองจะทำการแยกวัสดุดูดซับออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการกรอง โดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 90 มิลลิเมตร โดยสารละลายโลหะหนักที่ได้จะอยู่ในรูปของ Dissolved HM หลังจากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าโลหะหนักด้วยเครื่อง AAS ยี่ห้อ Shimadzu aa-6200 ที่ความยาวคลื่น 283.3 นาโนเมตร นำค่าที่ได้มาคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับจากสมการที่ (1)¹³ การทดลองทั้งหมดจะควบคุมปัจจัยที่มีค่าเหมาะสม ได้แก่ ค่า pH ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้น และอุณหภูมิ จากสมการที่ (1)¹

คำนวณค่าปริมาณของโลหะหนักที่ถูกดูดซับในรูป %Removal จากสมการที่ (1)

$$\% \text{Removal} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ C₀ คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนัก (mg/l) C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก (mg/l) ที่เหลือ

2.3 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

การวิเคราะห์ไอโซเทอร์มเพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมของการดูดซับตะกั่ว ประกอบด้วยสมการแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) สมการของฟรุนดิช (Freudlich Adsorption Isotherm) สมการของเทมคิน (Temkin Isotherm) และสมการของดูบิโน-ราดัสเควิช (Dubinin-Radushkevich Isotherm)

สมการแบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ ดังสมการที่ (2) และ (3)

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m} C_e + \frac{1}{q_m K_L} \quad (2)$$

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{K_L q_m} \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_m} \quad (3)$$

เมื่อ C₀ คือ ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วที่จุดสมดุล (mg/l) q₀ คือ ปริมาณของตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของซีลี้อยหรือซีลี้อยที่ปรับสภาพที่สภาวะสมดุล (mg/g) q_m คือ ความสามารถในการดูดซับตะกั่วสูงสุด (mg/g) และ K_L คือ ค่าคงที่แลงเมียร์ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ (l/mg)¹¹

สมการแบบจำลองไอโซเทอร์มของ ฟรุนดิช ดังสมการที่ (3) และ (4)⁵

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (4)$$

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F \quad (3)$$

เมื่อ K_F คือ ค่าคงที่ของฟรุนดิช (mg/g) และ n คือ ค่าคงที่ของฟรุนดิช¹³

สมการแบบจำลองของเทมคิน ดังสมการที่ (5) และ (6)

$$q_e = \frac{RT}{b} \ln K_T C_e \quad (5)$$

$$q_e = \beta \ln K_T + \beta \ln C_e \quad (6)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) R คือ ค่าคงที่ของก๊าซเท่ากับ 8.314 (J/mol.K) K_T คือ ค่าคงที่สมดุล (kJ/mg) b คือ พลังงานการดูดซับ (kJ/mol) และ β คือ ค่าคงที่ของเทมคิน (mol²/kJ²)⁸

สมการแบบจำลองไอโซเทอร์มของดูบิโน-ราดัสเควิช (Dubinin-Radushkevich Isotherm) ดังสมการที่ (6) (7) และ (8)

$$\ln q_e = \ln q_s - K_d \varepsilon^2 \quad (6)$$

$$\varepsilon = RT \ln \left[1 + \frac{1}{C_e} \right] \quad (7)$$

$$E = \frac{1}{\sqrt{2} \beta} \quad (8)$$

เมื่อ q₀ คือ ปริมาณสูงสุดของสารถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวของตัวดูดซับ (mg/g) K_d คือ ค่าคงที่ของดูบิโน-ราดัสเควิช (mol²/kJ²) ε คือ Polanyi Potential และ E คือ พลังงานในการดูดซับ (kJ/mol)¹⁴

2.4 การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ

การวิเคราะห์จลนศาสตร์เพื่อใช้อธิบายอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาประกอบด้วยแบบจำลอง Pseudo-first-order, Pseudo-second-Order และ Intraparticle Diffusion ดังสมการ

สมการ Pseudo-first-order ดังสมการที่ (9)

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (9)$$

เมื่อ q₀ คือ ความสามารถดูดซับตะกั่วที่จุดสมดุล (mg/g) q_t คือ ความสามารถในการดูดซับตะกั่วต่อปริมาณซีลี้อยหรือซีลี้อยปรับสภาพที่เวลาใด ๆ (mg/g) k₁ คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (min⁻¹) และ t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (min)⁸

สมการ Pseudo-second-order ดังสมการที่ (10)

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (10)$$

เมื่อ k₂ คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (mg/g*min⁻¹)⁵

สมการการแพร่กระจายของอนุภาคภายในตัวดูดซับ (Intraparticle Diffusion) ดังสมการที่ (11)

$$q_t = k_i t^{1/2} + C \quad (11)$$

เมื่อ k_i คือ ค่าคงที่ของการแพร่กระจายของอนุภาคภายในตัวดูดซับ ($\text{mg}\cdot\text{min}^{0.5}/\text{g}$) และ C คือ ค่าคงที่ (mg/g)¹⁵

2.5 การศึกษาอุณหพลศาสตร์การดูดซับ

พารามิเตอร์ของอุณหพลศาสตร์ เช่น Enthalpy Change (ΔH°) Free Energy Change (ΔG°) และ Entropy Change (ΔS°) สามารถประมาณโดยใช้ค่าคงที่สมดุลการเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ การเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของการดูดซับให้ผลตามสมการ ดังสมการที่ (12) และ (13)

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_L \quad (12)$$

$$\ln K_L = \frac{\Delta H^\circ}{-RT} + \frac{\Delta S^\circ}{R} \quad (13)$$

เมื่อ ΔG° คือ พลังงานอิสระของ Gibbs (kJ/mol) R คือค่าคงที่ของก๊าซ ($8.314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$) K_L คือ ค่าคงที่สมดุลทางอุณหพลศาสตร์ และ T คือค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (K) การคำนวณค่า K_L สามารถคำนวณได้ 3 รูปแบบ คือ

$$K_L = K_F^n \quad (14)$$

$$K_L = 1/b \quad (15)$$

$$K_L = q_e/c_e \quad (16)$$

ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมการแลงเมียร์และฟรุนดลิช โดยคำนวณค่า K_L ได้ 3 รูปแบบ ได้แก่ $K_L = K_F^n$ ค่า K_F ได้มาจากค่าคงที่ของสมการฟรุนดลิช $K_L = 1/b$ ค่า b ได้มาจากค่าคงที่ของสมการแลงเมียร์ (K_L) และ $K_L = q_e/c_e$ ได้มาจากไอโซเทอร์มการดูดซับโดยตรง¹⁶

2.6 การศึกษาการคายซับของโลหะหนัก

นำซีลีเนียมและซีลีเนียมปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับและผ่านการอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 ชั่วโมงปริมาณ 0.5 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.1, 0.5, 1.0 และ 1.5 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตรทำการแยกวัสดุดูดซับด้วยการกรองโดยใช้กระดาษกรอง โดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 90 มิลลิเมตรโดยสารละลายโลหะหนักที่ได้จะอยู่ในรูปของ Dissolved HM นำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าโลหะหนักด้วยเครื่อง AAS ยี่ห้อ Shimadzu aa-6200 ที่ความยาวคลื่น 283.3 นาโนเมตรและคำนวณการคายซับจากสมการประสิทธิภาพการคายซับ¹² ดังสมการที่ (17)

$$D = \left\{ \frac{[(C_i - C_e) - C_d]}{C_i - C_e} \right\} \times 100 \quad (17)$$

เมื่อ D คือ ประสิทธิภาพการคายซับ (%) C_i คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนัก (mg/l) C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลาย ในสารละลายที่จุดสมดุล (mg/g) และ C_d คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหลืออยู่ (mg/l)

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุดูดซับ

(Figure 1) แสดงลักษณะพื้นที่ผิวของซีลีเนียมและซีลีเนียมปรับสภาพโดยใช้เครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า พบว่า การปรับสภาพโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารละลายกรดซัลฟิวริกทำให้พื้นที่ผิวของซีลีเนียมมีรูพรุนเพิ่มมากขึ้น รวมทั้งยังช่วยกำจัดสิ่งสกปรกที่เกาะอยู่บริเวณพื้นที่ผิวของซีลีเนียมทำให้พื้นที่ผิวเหมาะสมต่อการดูดซับตะกั่วได้มากขึ้น⁴ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Nady และคณะ⁸ ที่ได้ทำการศึกษาผลของการปรับสภาพที่มีผลต่อโครงสร้างของฟางข้าว พบว่า การปรับสภาพด้วยกรดต่างร่วมกันสามารถปรับสภาพพื้นที่ผิวของฟางข้าวให้มีความเป็นระเบียบและเหมาะสมต่อการดูดซับได้มากขึ้น รวมทั้งเห็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในการผลิตตัวดูดซับต้นทุ่นดำที่มีประสิทธิภาพสำหรับกำจัดตะกั่วได้ซึ่งได้ผลดัง (Figure 1)

(Table 1) แสดงลักษณะพื้นที่ผิวของซีลีเนียมและซีลีเนียมปรับสภาพโดยใช้เครื่อง BET พบว่า ซีลีเนียมและซีลีเนียมปรับสภาพมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 1.14 ตารางเมตรต่อกรัม และ 1.56 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ขนาดรูพรุนของซีลีเนียมและซีลีเนียมปรับสภาพมีค่าเท่ากับ 0.007 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และ 0.009 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับจากการศึกษาการกระจายตัวของรูพรุน พบว่ารูพรุนส่วนใหญ่มีขนาดอยู่ในช่วง 2-50 นาโนเมตร ซึ่งจัดว่าเป็นรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore)⁹ และมีขนาดรูพรุนของซีลีเนียมและซีลีเนียมปรับสภาพโดยเฉลี่ยเท่ากับ 24.75 นาโนเมตร และ 26.71 นาโนเมตร จากการศึกษาที่ได้จะเห็นว่าซีลีเนียมปรับสภาพมีพื้นที่ผิวจำเพาะปริมาตรรวมของรูพรุน และขนาดของรูพรุนมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จะสามารถละลายพันธะละลายพันธะโควาเลนต์ระหว่างลิกนินและเซลลูโลส ไฮโดรไลซ์เฮมิเซลลูโลส และละลายโครงสร้างของลิกนินทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักได้¹⁰ ซึ่งได้ผลดัง (Table 1)

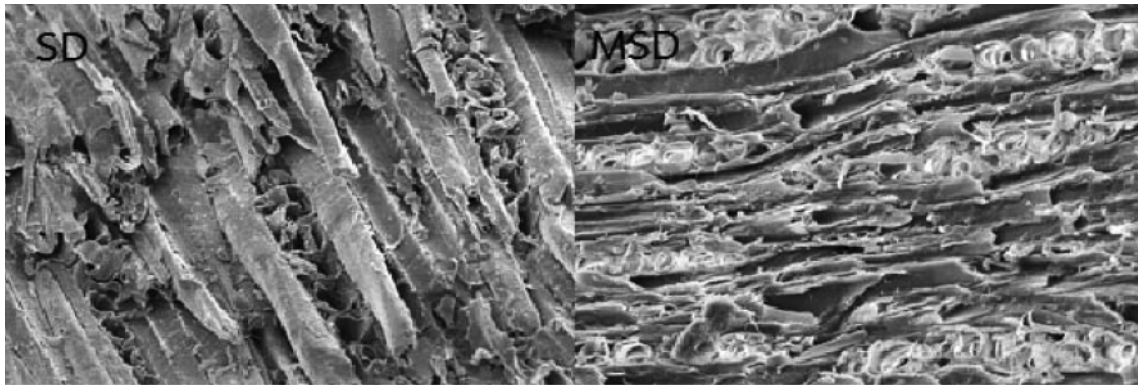


Figure 1 Characteristics of surface area using SEM at times 500 magnification

Table 1 Characteristics of surface area using BET

Adsorbent	BET surface area (m ² /g)	Total pore volume (cm ³ /g)	Mean pore diameter (nm)
SD	1.14	0.007	24.75
MSD	1.56	0.009	26.71

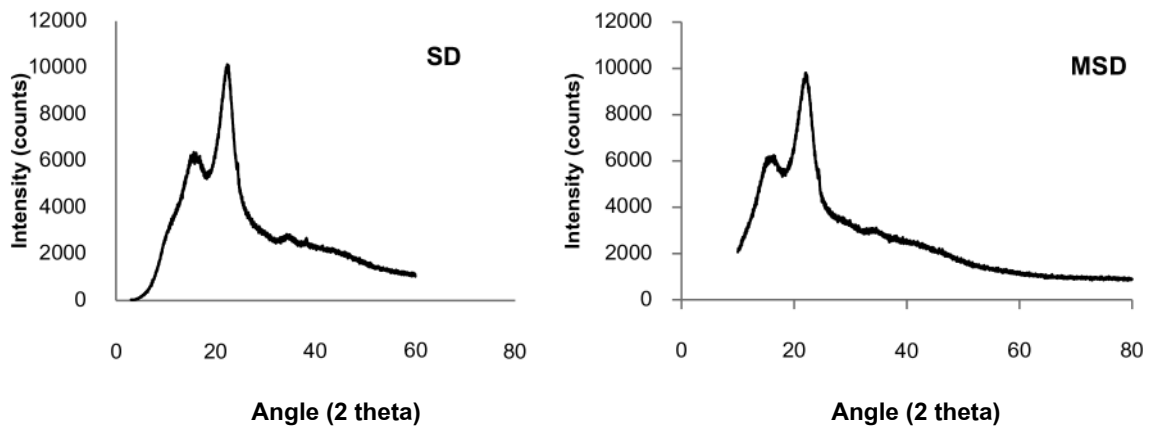


Figure 2 Characteristics of configuration using X-ray Diffraction

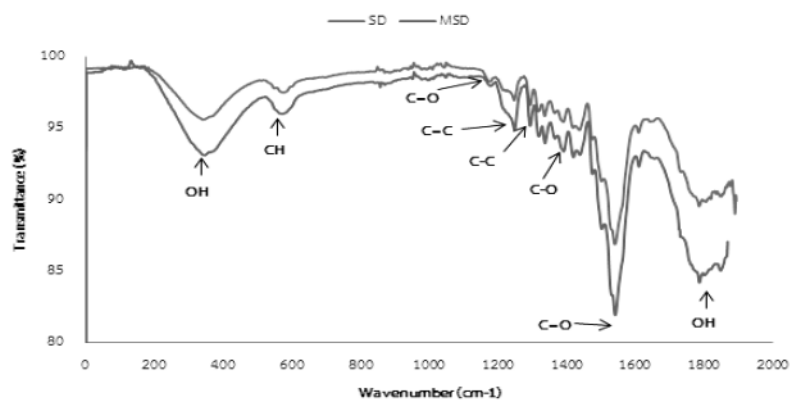


Figure 3 IR-spectrum using Near Infrared & Related

(Figure 2) แสดงลักษณะองค์ประกอบของซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพโดยใช้เครื่อง X-ray พบว่า ซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพมีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน (Amorphous) เป็นการเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบในโครงสร้างและทำให้มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน โดยองค์ประกอบที่พบจะเป็นส่วนประกอบที่มีในโครงสร้างของพีซีอย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่างซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพ พบว่า การปรับสภาพจะมีการเกิดผลึกของเซลลูโลสซึ่งเกิดจากกระบวนการไฮโดรไลซ์มากขึ้น ทำให้ลักษณะของเส้นกราฟมีความเป็นระเบียบมากขึ้น¹¹ ซึ่งได้ผลดัง (Figure 2)

(Figure 3) แสดงลักษณะหมู่ฟังก์ชันของซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพโดยใช้เครื่อง FTIR พบว่าสเปกตรัมของซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพจะปรากฏพีคของอีเธอร์และเอสเทอร์ (กลุ่มคาร์บอนิล) ที่ตำแหน่ง 1,000-1,300 (C-O) พีคของกลุ่มอัลคีน (กลุ่มคาร์บอน-นิล) ที่ตำแหน่ง 1,000-1,500 (C=C) และพีคของแอลดีไฮด์ (กลุ่มคาร์บอกซิลิก) ที่ตำแหน่ง 1,700 (C=O) ซึ่งซีลี้อยปรับสภาพจะมีกลุ่มฟังก์ชันที่ตำแหน่งต่าง ๆ เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลจากการทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟิวริกโดยใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่เปลี่ยนกลุ่มฟังก์ชันของไฮดรอกซิลเป็นคาร์บอกซิลิก (C=O เป็นส่วนที่มาจากกรด) ซึ่งการที่ซีลี้อยปรับสภาพมีกลุ่มฟังก์ชันของคาร์บอกซิลิกเพิ่มขึ้นจัดว่าเป็นการเพิ่มไอออนลบให้แก่ซีลี้อย ทำให้มีความสามารถในการดูดซับไอออนบวกของโลหะหนักได้เพิ่มมากขึ้น¹⁷ ซึ่งได้ผลดัง (Figure 3)

ผลการศึกษาคุณสมบัติวัสดุดูดซับ คือ ซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพ เมื่อปรับสภาพวัสดุดูดซับทำให้มีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยและมีค่าไม่แตกต่างกัน ได้แก่ พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน ปริมาตรของรูพรุน และองค์ประกอบ แต่หมู่ฟังก์ชันของซีลี้อยได้ถูกเปลี่ยนไป จึงมีผลต่อการดูดซับตะกั่วได้เพิ่มขึ้น ดังนั้นกระบวนการปรับสภาพด้วยกรดต่างร่วมกันมีความเป็นไปได้ที่ทำให้คุณสมบัติของวัสดุดูดซับมีความเหมาะสมและเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วได้

2. ศึกษาผลของ pH ที่มีต่อการดูดซับตะกั่ว

(Figure 4) แสดงผลของ pH ที่มีต่อประสิทธิภาพของการดูดซับตะกั่วของซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพ จากผลการทดลองพบว่า การดูดซับที่ค่า pH ต่ำจะทำให้ความสามารถในการแตกตัวของไฮโดรเจนไอออนหรือโปรตอนสูง จึงเกิดการแย่งจับกับไอออนของตะกั่ว ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วต่ำส่วนค่า pH ที่สูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งมากกว่า 6 โลหะตะกั่วจะเกิดการตกตะกอนในรูปของสารประกอบไฮดรอกไซด์ ทำให้ในสภาพที่เป็นต่างซึ่งปริมาณโลหะที่ถูกดูดติดตัวดูดซับจะมีน้อยลง และทำให้ความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลายมี

ค่าลดลงด้วยสำหรับในงานวิจัยนี้เลือกค่า pH ที่เหมาะสม คือ pH 5 ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุดเท่ากับ 40.50% และ 55.40% ตามลำดับ โดยที่ค่า pH 6 และ 7 เริ่มมีการตกตะกอนทำให้ค่า Blank ของตะกั่วมีค่าลดลง ได้ผลดัง (Figure 4)

3. การศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสที่มีต่อการดูดซับตะกั่ว

(Figure 5) แสดงประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วของซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพ ซึ่งในช่วงแรกแนวโน้มในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากพื้นที่ผิวบริเวณ Active Site ของซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพเวลาผ่านไปพื้นที่ผิวบริเวณ Active Site จะลดลงเพราะไอออนของตะกั่วจะเข้าไปยึดเกาะทำให้ยังมีพื้นที่อยู่มากจึงสามารถดูดซับได้รวดเร็ว แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปการดูดซับจะลดลง¹⁸ และจะเกิดแรงผลักระหว่างตะกั่วที่จะเข้าไปยึดเกาะกับตะกั่วที่ถูกดูดซับไว้เดิมที่เรียกว่า "การคายซับ (Desorption)" ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเริ่มคงที่โดยจุดที่

ประสิทธิภาพคงที่ เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า "จุดสมดุล"⁴ งานวิจัยนี้ พบว่า จุดสมดุลของการดูดซับ คือ 120 นาที ซึ่ง ณ สภาวะดังกล่าวประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วของซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเท่ากับ 50.32% และ 68.29% และซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรมีค่าเท่ากับ 24.13% และ 32.70% ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตะกั่วที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลทำให้เกิดแรงขับเคลื่อน (Driving Force) ที่เพิ่มสูงขึ้นรวมทั้งเห็นความแตกต่างของอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของการดูดซับไอออนตะกั่ว¹⁵ ได้ผลดัง (Figure 5)

4. ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นและอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับตะกั่ว

(Figure 6) แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับหรือปริมาณตัวถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ (SD และ MSD) มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับ เห็นได้ว่าการเพิ่มความเข้มข้นของไอออนตะกั่วเป็นผลทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในสารละลายกับบริเวณผิวของซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพเพิ่มสูงขึ้น เกิดแรงขับเคลื่อน (Driving Force) ที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับของไอออนตะกั่วจะมีแนวโน้มที่สูงขึ้น⁴ และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพลังงานจลน์มีมากขึ้นทำให้การเคลื่อนที่ของสารละลายโลหะหนักไปยังพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับได้น้อย ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วลดลง¹⁹ ซึ่งได้ผลดัง (Figure 6)

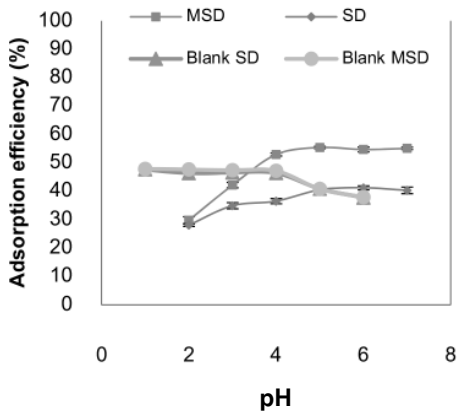


Figure 4 Effects of pH

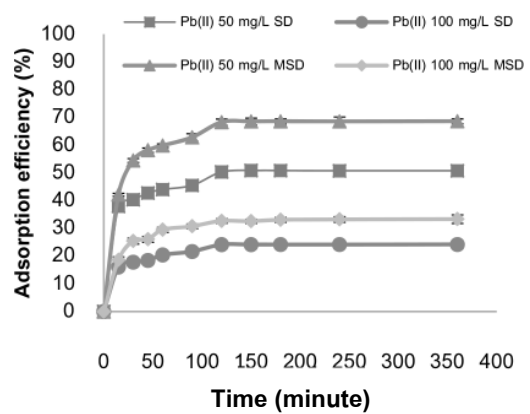


Figure 5 Effects of contact time

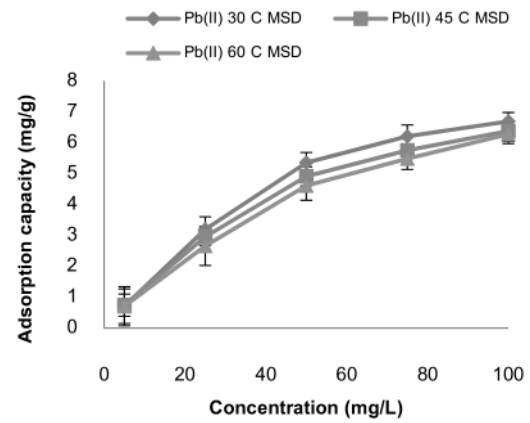
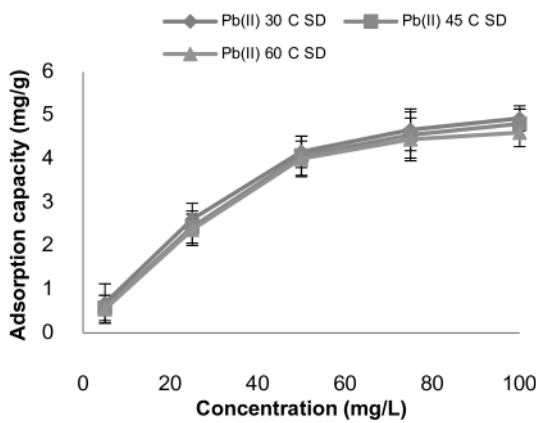


Figure 6 Effects of initial lead concentration on adsorption capacity of SD and MSD

5. การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มการดูดซับตะกั่วโดยใช้ซีเลื้อยและซีเลื้อยปรับสภาพ เมื่อใช้สมการแลงเมียร์ ฟรุนดลิช เทมคิน และ ดุบิโนน-ราตัสเควิช แสดงใน (Table 2) และ (Table 3) พบว่า สอดคล้องกับสมการแลงเมียร์ซึ่งอธิบายได้ว่า การดูดซับเกิดขึ้นเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) ที่มีความสม่ำเสมอ

(Homogenous) ที่อยู่บนพื้นที่ผิวของซีเลื้อยและซีเลื้อยปรับสภาพมีตำแหน่งในการดูดซับมีปริมาตรที่แน่นอน^๑ และมีค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายตะกั่วที่เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวได้มากที่สุดเท่ากับ 5.58 และ 7.5 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งเมื่อนำค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าได้ผลดัง (Table 4)

Table 2 All parameters SD of Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin-Radushkevits

temp. (°C)	langmuir			Freundlich			Temkin			Dubinin-Radushkevits			
	q _{max} (mg/g)	K _L (g/mg)	R ²	K _F (l/g)	n (mg/g)	R ²	K _T (l/g)	b (kJ/mol)	R ²	K _d (mol ² /kJ ²)	q _d (mg/g)	E (kJ/mol)	R ²
30	5.58	0.10	0.997	0.72	2.06	0.973	0.64	2.68	0.982	6*10 ⁻⁷	4.02	0.29	0.918
45	5.71	0.08	0.996	0.54	1.80	0.967	0.97	3.00	0.979	9*10 ⁻⁷	3.90	0.75	0.919
60	5.60	0.07	0.995	0.47	1.73	0.958	1.15	3.18	0.977	1*10 ⁻⁶	3.80	0.71	0.923

Table 3 All parametersMSD of Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin-Radushkevits.

temp. (°C)	langmuir			Freundlich			Temkin			Dubinin-Radushkevits			
	q_{max} (mg/g)	K_L (g/mg)	R^2	K_F (l/g)	n (mg/g)	R^2	K_T (l/g)	b (kJ/mol)	R^2	K_d (mol ² /kJ ²)	q_d (mg/g)	E (kJ/mol)	R^2
30	7.56	0.12	0.998	0.92	2.11	0.961	1.99	4.69	0.984	$5 \cdot 10^{-7}$	5.26	1.00	0.918
45	7.35	0.09	0.996	0.82	1.90	0.976	2.08	4.56	0.997	$6 \cdot 10^{-7}$	4.88	0.91	0.901
60	7.55	0.07	0.988	0.68	1.80	0.987	1.01	3.99	0.966	$7 \cdot 10^{-7}$	4.60	0.85	0.877

Table 4 Comparison maximum lead adsorption capacity of SD and MSD with the other adsorbents

Adsorbents	Maximum lead adsorption capacity (mg/g)	References
Logan Peel	8.70	[3]
Dried Logan Peel	1.48	[3]
Treat Logan Peel	1.01	[3]
Phosphorylated Sawdust	1.45	[20]
Spent Coffee Grounds	2.46	[21]
SD	5.58	This research
MSD	7.56	This research

6. การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ

การศึกษาอัตราเร็วปฏิกิริยาของการดูดซับตะกั่ว โดยใช้ซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพใช้แบบจำลอง Pseudo-first-order Pseudo-second-order และแบบจำลองการแพร่กระจายภายในอนุภาคภายในตัวดูดซับ (Intraparticle Diffusion) แสดงใน (Table 5) พบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับสมการ

Pseudo-second-order แสดงให้เห็นว่า อัตราควบคุมการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับเป็นแรงทางเคมี (Chemical Force) ซึ่งพันธะเคมีหรือแรงเคมีที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือเกิดจากการให้อิเล็กตรอนหรือการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างสารละลายโลหะหนักกับตัวดูดซับ¹⁷ ซึ่งได้ผลดัง (Table 5)

Table 5 Pseudo-first-order, Pseudo-second order and Intraparticle diffusion constants for adsorption of lead on SD and MSD

Adsorbents	Pseudo-first-order			Pseudo-second-order			Intraparticle Diffusion		
	K_1 (min ⁻¹)	q_e (mg/g)	R^2	K_2 (mg/g.min ⁻¹)	$q_{e,cal}$ (mg/g)	R^2	K_i (mg.min ^{0.5} /g)	C_i (mg/g)	R^2
50SD	0.03	1.32	0.918	0.03	4.98	0.998	0.09	3.43	0.771
100 SD	0.04	2.04	0.975	0.02	4.94	0.999	0.12	2.95	0.824
50 MSD	0.02	2.67	0.944	0.02	6.81	0.999	0.15	4.42	0.701
100 MSD	0.03	3.77	0.964	0.01	6.61	0.999	0.16	3.95	0.704

7. การศึกษาอุณหพลศาสตร์การดูดซับ

ในงานวิจัยนี้ มีพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของการดูดซับ (ΔH^0) การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS^0) และการเปลี่ยนแปลง

พลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG^0) เมื่อนำผลการทดลอง การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 30 45 และ 60 องศาเซลเซียส ของการดูดซับไอออนตะกั่วโดยใช้ซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพใน (Table 4) และ (Table 5) ซึ่งผลของอุณหพลศาสตร์จะพิจารณาจากค่า R^2

และความเป็นไปได้ของข้อมูล พบว่า สอดคล้องกับรูปแบบสมการ 1/b โดย ΔH^0 ของซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพมีค่าเท่ากับ -9.99 กิโลจูลต่อโมลและ -15.08 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งมีค่าเป็นลบ แสดงว่ากระบวนการดูดซับไอออนตะกั่วลงบนพื้นผิวซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพเป็นแบบคายความร้อน ส่วน ΔG^0 ของซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพมีค่าเป็นลบซึ่งแสดงว่าการดูดซับไอออนตะกั่วลงบนพื้นผิวของซีลี้อยและซีลี้อยปรับ

สภาพเกิดขึ้นได้เองและ ΔS^0 ของซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพมีค่าเท่ากับ -52.20 จูลต่อโมล.เคลวิน และ -67.40 จูลต่อโมล.เคลวิน เมื่อพิจารณาค่า ΔS^0 แสดงว่าปฏิกิริยามีความเป็นระเบียบมากขึ้น เนื่องจากผลของ Degree of Freedom เพิ่มขึ้นที่บริเวณรอยต่อของแข็งของเหลวในระหว่างที่เกิดการดูดซับไอออนตะกั่ว¹⁵ ได้ผลดัง (Table 6 และ 7)

Table 6 Thermodynamic parameters of lead adsorption on SD

Calculation method of K_L	T (K)	K_L	ΔG^0 (kJ/mol)	ΔS^0 (J/mol.K)	ΔH^0 (kJ/mol)	R^2
$K_L = K_F^n$	303	0.51	1.68			
	318	0.33	2.94	-64.26	-17.68	0.964
	333	0.27	3.62			
$K_L = 1/b$	303	10.00	-5.80			
	318	12.50	-6.68	-52.20	-9.99	0.986
	333	14.29	-7.36			
$K_L = q_e/c_e$	303	0.16	4.69			
	318	0.15	5.07	-23.66	-2.47	0.992
	333	0.14	5.40			

Table 7 Thermodynamic parameters of lead adsorption on MSD

Calculation method of K_L	T (K)	K_L	ΔG^0 (kJ/mol)	ΔS^0 (J/mol.K)	ΔH^0 (kJ/mol)	R^2
$K_L = K_F^n$	303	0.84	0.44			
	318	0.69	0.99	-48.97	-14.45	0.976
	333	0.50	1.92			
$K_L = 1/b$	303	8.33	-5.34			
	318	11.11	-6.37	-67.40	-15.08	0.999
	333	14.29	-7.36			
$K_L = q_e/c_e$	303	0.26	3.42			
	318	0.21	4.08	-40.20	-8.74	0.995
	333	0.19	4.63			

8. ผลของการศึกษาการคายซับซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพหลังผ่านการดูดซับ

การศึกษาการคายซับของตะกั่วจากวัสดุดูดซับทั้ง 2 ชนิด คือ ซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพโดยใช้กรดไนตริก 0.1, 0.5, 1.0 และ 1.5 โมลาร์แสดงใน (Figure 7) พบว่า

การคายซับของซีลี้อยและซีลี้อย คือที่ความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ มีประสิทธิภาพการคายซับสูงสุด เท่ากับ 70.79% และ 90.28% ตามลำดับ จากผลการทดลองมีความเป็นไปได้สูงในการที่จะนำกลับตะกั่วกลับไปใช้ประโยชน์ (Recovery)⁴ ได้ผลดัง (Figure 7)

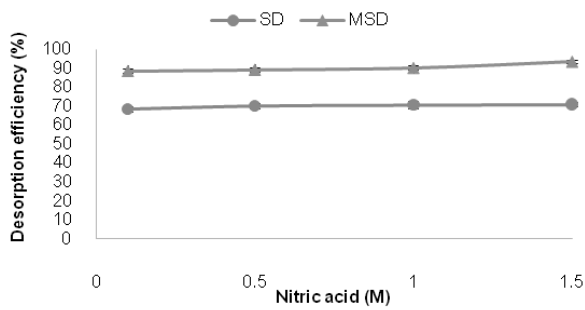


Figure 7 Effects of desorption

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาจากการศึกษาสมบัติวัสดุดูดซับ คือ ซีโอไลต์และซีโอไลต์ปรับสภาพ เมื่อปรับสภาพวัสดุดูดซับด้วยกรด-ด่าง ทำให้มีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป ได้แก่ พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุน และหมู่ฟังก์ชัน ทำให้คุณสมบัติของวัสดุดูดซับมีความเหมาะสมในการดูดซับตะกั่วและเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วได้ สภาวะที่เหมาะสมการดูดซับตะกั่วโดยใช้ซีโอไลต์และซีโอไลต์ปรับสภาพ คือ ค่า pH เท่ากับ 5 ระยะเวลาสัมผัสที่ 120 นาทีความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส สภาวะดังกล่าวประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วของซีโอไลต์และซีโอไลต์ปรับสภาพเท่ากับ 43.60% และ 56.24% ตามลำดับ สำหรับการศึกษากลไกการดูดซับ พบว่า สมการไอโซเทอร์มที่เหมาะสมในการอธิบายกลไกการดูดซับตะกั่วของซีโอไลต์และซีโอไลต์ปรับสภาพ คือ แลงเมียร์ การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ พบว่าสอดคล้องกับสมการ Pseudo-second-order แสดงให้เห็นว่าอัตราควบคุมการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับเป็นแนวทางเคมี ศึกษาอุณหพลศาสตร์การดูดซับพบว่า ΔH^0 ของซีโอไลต์และซีโอไลต์ปรับสภาพมีค่าเท่ากับ -10.41 กิโลจูลต่อโมล และ -6.73 กิโลจูลต่อโมล ส่วน ΔG^0 ของซีโอไลต์และซีโอไลต์ปรับสภาพมีค่าเป็นลบ ซึ่งบ่งบอกถึงกระบวนการดูดซับตะกั่วโดยใช้ซีโอไลต์และซีโอไลต์ปรับสภาพเป็นคายความร้อนและเกิดขึ้นได้เอง และ ΔS^0 ของซีโอไลต์และซีโอไลต์ปรับสภาพมีค่าเท่ากับ -52.20 จูลต่อโมล.เคลวิน และ -67.40 จูลต่อโมล.เคลวิน แสดงว่า กระบวนการดูดซับมีความเป็นระเบียบมาก และการคายซับ พบว่าที่ความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ประสิทธิภาพการคายซับสูงสุดมีค่าเท่ากับ 70.79% และ 90.28% ตามลำดับ จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า ซีโอไลต์และซีโอไลต์ปรับสภาพเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วและการใช้วัสดุดังกล่าวจัดว่าเป็นการจัดการวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมแปรรูปไม้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกองส่งเสริมการวิจัยและบริการวิชาการ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม สำหรับทุนสนับสนุนการวิจัย ผู้มอบทุนทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทบัณฑิตศึกษาปีงบประมาณ 2558 และทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติประเภทบัณฑิตศึกษาปีงบประมาณ 2559 รวมทั้งคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและคณะทันตแพทยศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความอนุเคราะห์ลดหย่อนค่าวิเคราะห์คุณสมบัติและองค์ประกอบของตัวดูดซับ ตลอดจนคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ของคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ทุกท่านที่ให้ความเอื้อเฟื้อในด้านต่างๆ จนงานวิจัยสามารถดำเนินการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

1. ยูพดี เส้นขาว. การกำจัดไอออนแคดเมียมและตะกั่วจากน้ำเสียด้วยมะขามและเปลือกทับทิม. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ 2557; 22:2.
2. พดาร์ตน์ นิลเจียรนัย. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารตะกั่วที่ปนเปื้อนในน้ำสังเคราะห์โดยใช้แผ่นไคโตซาน. ใน: เอกสารการประชุมสัมมนาทางวิชาการงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติ เครือข่ายบัณฑิตศึกษา. มหาวิทยาลัยราชภัฏภาคเหนือ ครั้งที่ 15. มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม; 2558: 111-120.
3. บัญชา ขวาลี. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับไอออนโลหะแคดเมียมและตะกั่วในสารละลายโดยใช้เปลือกกล้วยเป็นสารดูดซับ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้; 2549.
4. อรทัย วิเศษรัตน์, รินรดี งามสมบัติ, ปานใจ สือประเสริฐสิทธิ์, จิตติมา ประสาระเอ. การดูดซับน้ำมันโดยใช้ชานอ้อยปรับสภาพ. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยมหาสารคาม 2554; 31:4.
5. นิศารัตน์ จุนเจริญวงศา. การกำจัด Cu Mn และ Zn โดยกระบวนการดูดซับด้วยเปลือกหอย. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา; 2556.
6. Renu Singh, Sapna Tiwari, Monika Srivastava, and Ashish Shukla. Microwave sited Alkali Pretreatment of Rice Straw for Enhancing Enzymatic. Digestibility

- Energy 2014;7.
7. สุภาวดี ผลประเสริฐ. การปรับสภาพวัตถุดิบพวกกลีกลินโซเซลลูโลสสำหรับการผลิตเอทานอล. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหิดล 2557;22(5):641-649.
 8. Nady A Fathy, Ola I El-Shafey, Laila B Khalil. Effectiveness of alkali-acid treatment in enhance- ment the adsorption capacity for rice straw: The removal of methylene blue dye. Physical chemistry 2013; 208087:15.
 9. JogaRao H, Jing P, Prasanna Kumar Y. Experimental investigation on adsorption of lead from aqueous solution using activated carbon from the waste rubber tire: optimization of process parameters using central composite design. Chemical 2016;9(2):254-277.
 10. Abdel-Ghani NT, El-Chaghaby, Helal FS. Preparation, characterization and phenol adsorption capacity of activated carbons from African beech wood sawdust. Environment Science Manage 2016;2(3): 209-222.
 11. Nimkar DA, Chavan SK. Removal of methylene blue dye (basic dye) from aqueous solution using sawdust as an adsorbent. Engineering Research & Technology 2014;3(4):1579-1583.
 12. PhuradaSaeprasearsit. Adsorption of chromium (Cr^{+6}) using durian peel. Proceedings of the international conference on biotechnology and environment management Singapore 2011;18(1).
 13. อุษณีย์ รัชไชยวรรณ, ยุพดี กุศลรัตน์กิตติวงศ์, โกวิทย์ปิยะมั่งคลา. สมดุลและจลนศาสตร์การดูดซับไอออนเงินโดยไคโตซานผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เรซิน. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ 2557; 9(2):12-22.
 14. Dada AO, Olalekan AP, Olatunya AM, DADA O. Langmuir, freundlich, temkin and dubinin-radushkevich isotherms studies of equilibrium sorption of Zn^{2+} unto phosphoric acid modified rice husk. Applied chemistry 2012;3(1):38-45.
 15. รวิินทร์สุทธระนันท์, โกวิทย์ปิยะมั่งคลา. จลนศาสตร์และเทอร์โมเคมีกการดูดซับเมทิลีนบลูโดยใช้เกลบดัดแปร. ใน: เอกสารการประชุมสัมมนาทางวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ครั้งที่ 45: สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2554;21(2).
 16. Huang Xin, GAO Nai-yun, ZHANG Qiao-li. Thermodynamics and kinetics of cadmium adsorption onto oxidized granular activated carbon. Environmental sciences 2007;19:1287-1292.
 17. Nwabanne T Joseph, Okpe Emmanuel Chinonye, Igbokwe K Philomena, Asadu C Christian, OnuChijioke Elijah. Isotherm and kinetic modeling of adsorption of dyestuffs onto kola nut (*Cola acuminata*) shell activated carbon. Chemical Technology and Metallurgy 2016;51(2):188-201.
 18. Ali Kara, EmelDemirbel, NalanTekin, Bilgen Osman, NecatiBesirli. Magnetic vinylphenylboronic acid microparticles for Cr(VI) adsorption: Kinetic, isotherm and thermodynamic studies. Hazardous materials 2015;286:612-623.
 19. รชตตามา. การดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยฟางข้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี; 2553.
 20. ChoongJeon, Jung Hwan Kim. Removal of lead ions using phosphorylated sawdust. Industrial and engineering chemistry 2009;15:910-913.
 21. Roberto Lavecchia, Franco Medici, MaríaSilvinaPatterer, Antonio Zuorro. Lead removal from water by adsorption on spent coffee grounds. Chemical Engineering Transactions 2016;47:295-300.