

การประยุกต์ตะกอนดินจากกระบวนการผลิตน้ำประปาเพื่อการกำจัดโลหะหนัก ในน้ำเสียอุตสาหกรรม

Application of Sediment from Water Supply Process for Removing Heavy Metals in Industrial Wastewater

พรพรรณ เยาวยอด (Pornpan Yaowayord)^{1*} คณิตา ตั้งคณานุรักษ์ (Kanita Tungkananuruk)**

ดร.นพวรรณ เสมวิมล (Dr.Noppawan Semvimol)*** ดร.ฐิติมา รุ่งรัตนอุบล (Dr.Thitima Rungratthanaubon)***

(Received: February 11, 2019; Revised: April 10, 2019; Accepted: April 18, 2019)

บทคัดย่อ

ตะกอนดินน้ำประปาถูกใช้เป็นตัวดูดซับสำหรับกำจัดโลหะหนัก (โครเมียม แมงกานีส นิกเกิล สังกะสี ทองแดง แคดเมียม และ ตะกั่ว) จากสารละลาย ความจุของการดูดซับสูงสุดของโลหะหนักด้วยตะกอนดินแบบผงเท่ากับ 1.47, 1.72, 1.76, 1.81, 1.82, 1.79 และ 1.90 มก./ก. ตามลำดับ ที่เวลาสัมผัส 60 นาที และ ตะกอนดินแบบเม็ดเท่ากับ 1.28, 1.46, 1.49, 1.60, 1.67, 1.59 และ 1.75 มก./ก. ตามลำดับ ที่เวลาสัมผัส 120 นาที กลไกการดูดซับของตะกอนดินแบบผงและตะกอนดินแบบเม็ดเป็นตามไอโซเทอร์มฟรุนดลิช และไอโซเทอร์มแลงเมียร์ ตามลำดับ ศึกษาการกำจัดโลหะหนัก 7 ชนิดจากสารละลาย 500.00 มล. ความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิด 40.00 มก./ล. โดยการดูดซับของตะกอนดินแบบผง และตะกอนดินแบบเม็ดตะกอนดินแบบผงสามารถกำจัดโลหะหนักได้ร้อยละ 50.53, 73.37, 68.92, 91.89, 90.12, 93.86 และ 94.49 ตามลำดับ ในขณะที่ตะกอนดินแบบเม็ดกำจัดได้ร้อยละ 48.82, 61.43, 54.64, 68.04, 83.68, 61.78 และ 89.46 ตามลำดับ

ABSTRACT

Water supply sediment (WSS) was used as adsorbent for the removal of heavy metals (Chromium Manganese Nickel Zinc Copper Cadmium and Lead) from aqueous solutions. The maximum adsorption capacities of heavy metals by powder-WSS were 1.47, 1.72, 1.76, 1.81, 1.82, 1.79 and 1.90 mg/g respectively at contact time of 60 min and by bead-WSS were 1.28, 1.46, 1.49, 1.60, 1.67, 1.59 and 1.75 mg/g respectively at contact time of 120 min. The adsorption mechanism of powder-WSS and bead-WSS could be fitted by Freundlich isotherm and Langmuir isotherm respectively. Removal of 7 heavy metals from aqueous solution 500.00 mL of 40.00 mg/L of each metal by adsorption onto powder-WSS and bead-WSS were investigated. Powder-WSS was able to remove heavy metals of 50.53, 73.37, 68.92, 91.89, 90.12, 93.86 and 94.49 % respectively while bead-WSS managed to remove 48.82, 61.43, 54.64, 68.04, 83.68, 61.78 and 89.46% respectively

คำสำคัญ: ตะกอนดินน้ำประปา โลหะหนัก กลไกการดูดซับ

Keywords: Water supply sediment, Heavy metals, Adsorption mechanism

¹Correspondent author: pornpan.ku72@gmail.com

*นักศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

**รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

***อาจารย์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บทนำ

ตะกอนสลัดจ์ หรือ ตะกอนดินจากกระบวนการผลิตน้ำประปาเป็นของเหลือทิ้งที่โรงผลิตน้ำประปาสูบออกจากบ่อตกตะกอนมาตากให้แห้ง เพื่อขนย้ายนำไปกำจัดต่อไป ตะกอนดินนี้มีปริมาณมากที่จะถูกปล่อยเข้าสู่สิ่งแวดล้อม การผลิตน้ำประปา 3 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวัน จะทำให้เกิดตะกอนดินโดยเฉลี่ย 100 ตันต่อวัน [1] หน่วยงานที่เกี่ยวข้องทำวิจัยโดยนำตะกอนดินกลับมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง และ พัฒนาเป็นวัตถุดิบทดแทนในอุตสาหกรรมแร่และโลหะ แต่อย่างไรก็ตามยังพบว่ายังมีปริมาณตะกอนดินอีกจำนวนมากที่ยังไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์ รอคการนำไปกำจัดทิ้ง และด้วยองค์ประกอบของตะกอนดินซึ่งประกอบด้วย ธาตุอะลูมิเนียม ซิลิกอน และออกซิเจนเป็นองค์ประกอบทางเคมี และเป็นสารประกอบจำพวกแอนไฮดรอะลูมิเนียมซิลิเกต [2] อีกทั้งตะกอนดินยังมีลักษณะเป็นรูปพรุน อนุภาคคล้ายดินเหนียวที่มีขนาดเล็กซึ่งมีคุณสมบัติในการกำจัดโลหะหนักด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) และกระบวนการดูดซับ (Adsorption) และกระบวนการตกตะกอนทางเคมี (chemical coagulation) และเมื่อกล่าวถึงปัญหามลภาวะทางสิ่งแวดล้อม การปนเปื้อนของโลหะหนักจากน้ำเสียอุตสาหกรรมซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ ในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมความเข้มข้นของโลหะหนักที่พบอยู่ในช่วง 5-40 mg/L และกรมควบคุมมลพิษได้กำหนดค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมมีโลหะหนัก (Cr Zn Cu Cd Pb Ni และ Mn) ได้ไม่เกิน 0.25 mg/L 5.0 mg/L 2.0 mg/L 0.03 mg/L 0.2 mg/L 1.0 mg/L และ 5.0 mg/L ตามลำดับ ซึ่งเมื่อมีการปนเปื้อนของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมซึ่งมนุษย์จะได้รับโลหะหนักต่างเข้าสู่ร่างกายโดยตรงและทางอ้อม เช่น ได้สัมผัส การหายใจหากมีปริมาณมากจะเกิดอันตรายต่อร่างกายทั้งเฉียบพลันและแบบเรื้อรัง[3] ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำตะกอนดินมาใช้ประโยชน์ในการกำจัด เพื่อเป็นทางเลือกทดแทนวิธีการบำบัดโลหะที่มีต้นทุนสูงที่นิยมใช้กัน คือ วิธีการเคมีซึ่งต้องใช้สารเคมีปริมาณมากและเสียค่าใช้จ่ายสูง โดยทำการศึกษาตะกอนดิน 2 ลักษณะคือลักษณะที่เป็นแบบผงและแบบเม็ดเพื่อเป็นทางเลือกในการนำไปใช้งานการกำจัดโลหะหนักตามความเหมาะสม โดยงานวิจัยนี้ศึกษาถึงสถานะที่เหมาะสม ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิดของตะกอนดินแบบผงและแบบเม็ดและรูปแบบการนำไปใช้งานได้จริง ซึ่งตะกอนดินที่กำจัดโลหะหนักถือว่าการทำให้โลหะอยู่กับที่ (stabilization) [4] หลังจากนั้นสามารถนำไปเป็นส่วนผสมในการทำก้อนซีเมนต์ปูพื้นซึ่งเป็นการทำให้เป็นก้อนแข็ง (solidification) ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นวิธีการหนึ่งในการกำจัดของเสียอันตรายซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าของตะกอนดินในเกิดประโยชน์สูงสุด

ผู้วิจัยคาดว่าจากผลงานวิจัยจะทำให้ได้วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ต้นทุนต่ำ ประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัด และสามารถนำไปประยุกต์และพัฒนา ใช้งานได้จริงในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักในโรงงานอุตสาหกรรมและชุมชน และยังเป็นการช่วยเพิ่มมูลค่าตะกอนดินซึ่งเป็นของเหลือทิ้งอีกด้วย

วิธีการวิจัย

1. การเตรียมตะกอนดิน

ตะกอนดินได้รับความอนุเคราะห์จากโรงผลิตน้ำประปamahavithai เตรียมตะกอนดิน 2 ลักษณะ คือ ตะกอนดินแบบผง โดย บดตะกอนดินให้ละเอียด ร้อนผ่านตะแกรงร่อนทรายเบอร์ 30 นำไปอบที่เตาอบยี่ห้อ vecstar บริษัท vecstar ltd. ประเทศอังกฤษ ที่อุณหภูมิ 105 C⁰ 3 ชั่วโมง [5] ได้ตะกอนดินแบบผง และ ตะกอนดินแบบเม็ด ทำโดย

ตะกอนดินแบบผง ผสม กับ น้ำ บ้วนเป็นเม็ด เผาที่เตาเผา ยี่ห้อ vecstar บริษัท vecstar ltd. ประเทศอังกฤษที่ อุณหภูมิ 550 C° 3 ชั่วโมง ซึ่งเป็นการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ [5]

2. การเตรียมสารละลายโลหะหนัก

เตรียมสารละลายโลหะหนัก 7 ชนิด ได้แก่ Cr Mn Ni Zn Cu Cd และ Pb เตรียมสารละลายโลหะหนักแต่ละชนิดที่ ความเข้มข้น 5.00 – 50.00 มก./ล. โดยเตรียมจากการเจือจางสารละลายโลหะหนักแต่ละชนิด เข้มข้น 1,000.00 มก./ล. และเตรียมสารละลายโลหะหนักที่ประกอบด้วยโลหะหนักทั้ง 7 ชนิด โดยเข้มข้น 40.00 มก./ล. วัดที่ความยาวคลื่นที่ทำให้มีการดูดกลืนแสงสูงสุด ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer(AAS) ยี่ห้อ Agilent รุ่น 200 Series AA ประเทศสหรัฐอเมริกา [6] มีความยาวคลื่นที่ดูดกลืนแสง เป็นดังนี้ Cr (357.9 nm), Mn (245 nm), Ni (232 nm), Zn (213.90 nm), Cu (324.8 nm), Cd (228.8 nm), และ Pb (283.30 nm)

3. ศึกษาประสิทธิภาพเบื้องต้นในการดูดซับโลหะหนักด้วยตะกอนดินแบบผงและแบบเม็ด ในการทดลองแบบทีละเท (batch)

ศึกษาประสิทธิภาพเบื้องต้น โดย ทำการทดลองแบบทีละเท (batch) เพื่อหาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักทั้ง 7 ชนิด โดยใช้ตะกอนดินแบบผงและแบบเม็ด ที่ 1 กรัม ต่อสารละลายโลหะหนักที่ความเข้มข้น 40.00 มก./ล. ปริมาตร 50.00 มล. เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที วิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในสารละลายที่กรองได้โดยการย่อยด้วยเครื่องย่อยไมโครเวฟ ตามวิธีมาตรฐาน USEPA3052 และ วิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer(AAS) สภาวะการวิเคราะห์ Flame Atomization Technique และคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับ

4. ศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิดของตะกอนดินแบบผงและแบบเม็ด

ปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับ โดยการทำทดลองแบบทีละเท (batch) ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส 30, 60, 90 และ 120 นาที และ ปริมาณตะกอนดินแบบผงและแบบเม็ด 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 กรัม และอีกปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักเริ่มต้นแต่ละชนิด 5.00, 10.00, 15.00, 20.00, 30.00, 40.00 และ 50.00 มก./ล. โดยใช้ปริมาณตะกอนดิน และความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักที่สภาวะเหมาะสมโดยทุกปัจจัยที่ศึกษา เขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที วิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในสารละลายที่กรองได้โดยการย่อยด้วยเครื่องย่อยไมโครเวฟ ตามวิธีมาตรฐาน USEPA3052 และ วิเคราะห์ปริมาณ โลหะหนักด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer(AAS) สภาวะการวิเคราะห์ Flame Atomization Technique [6] นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับ และ ความจุของการดูดซับ ดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$\text{Adsorption efficiency (\%)} = \frac{C_1 - C_0}{C_1} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Adsorption capacity (mg/g)} = \left(\frac{C_1 - C_0}{m} \right) V \quad (2)$$

เมื่อ C_1 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก (มก./ล.) C_0 คือ ความเข้มข้นคงเหลือของโลหะหนัก (มก./ล.)

V คือ ปริมาตรของสารละลายโลหะหนัก (ล.) m คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (ก.)

5. ศึกษารูปแบบของการดูดซับโลหะหนัก

ศึกษารูปแบบการดูดซับโลหะหนักของตะกอนดินโดยใช้สมการ ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) และไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิช (Freundlich adsorption isotherm) ดังสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ และพิจารณาถ้อยการดูดซับจากค่า R^2 (R-square) จากกราฟแสดงความสัมพันธ์สมการของแลงเมียร์และฟรุนดิช การศึกษาเลือกโลหะหนักที่ดูดซับด้วยตะกอนดินแบบผงและตะกอนดินแบบเม็ดได้มากที่สุด

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

$$\log q_e = \log(K_p) + \left(\frac{1}{n}\right) \log(C_e) \quad (4)$$

เมื่อ q_e คือ ความสามารถในการดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ ณ สมดุล (มก./ก.) q_m คือ ปริมาณการดูดซับสูงสุดที่ถูกดูดซับแบบชั้นเดียวต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (มก./ก.) C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ ณ สมดุล (มก./ล.) K_L คือ ค่าคงที่ของแลงเมียร์ (ล./มล.) K_p คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ (ล./ก.) $\frac{1}{n}$ คือ ปัจจัยที่แสดงถึงความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน [7]

6. ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักด้วยตะกอนดินแบบผงและแบบเม็ด

6.1 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก ด้วยตะกอนดินแบบเม็ด

6.1.1 ทดลองแบบคอลัมน์

การทดลองแบบคอลัมน์เป็นการทดลองขนาดเล็ก โดยใช้คอลัมน์แก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.6 ซม. สูง 40 ซม. บรรจุตะกอนดินแบบเม็ด 60 กรัม (คำนวณจากการทดลองข้อ 4 ที่สภาวะเหมาะสม) ต่อสารละลายโลหะหนัก ที่ความเข้มข้น 40.00 มก./ล. ปริมาตร 500.00 มล. แซ่ทิ้งไว้ 120 นาที และปล่อยน้ำเสียผ่านตะกอนดินและวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก

6.1.2 การทดลองแบบเขย่า

ซึ่งตะกอนดินแบบเม็ดปริมาณ 60 กรัม ใส่ในขวดปรับปริมาตร (คำนวณจากการทดลองข้อ 4 ที่สภาวะเหมาะสม) เติมสารละลายโลหะหนัก ที่ความเข้มข้น 40.00 มก./ล. ปริมาตร 500.00 มล. กวนที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เขย่าเป็นเวลา 120 นาที จากนั้นกรองและวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักทำการทดลองซ้ำโดยใช้ตะกอนดินแบบเม็ดต่อเนื่อง 5 ครั้ง หรือจนกว่าตะกอนดินจะหมดประสิทธิภาพการดูดซับในการบำบัดลดลงหรือคงที่

6.2 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก ด้วยตะกอนดินแบบผง

ซึ่งตะกอนดินแบบผงปริมาณ 60 กรัม ใส่ในขวดปรับปริมาตร เติมสารละลายโลหะหนัก ที่ความเข้มข้น 40.00 มก./ล. ปริมาตร 500.00 มล. กวนที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เขย่าเป็นเวลา 60 นาที จากนั้นกรองและวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักทำการทดลองซ้ำใช้ตะกอนดินแบบผงต่อเนื่อง 5 ครั้ง หรือจนกว่าตะกอนดินจะหมดประสิทธิภาพการดูดซับในการบำบัดลดลงหรือคงที่

ผลการวิจัย

1. ผลการศึกษาประสิทธิภาพเบื้องต้นของการดูดซับโลหะหนักด้วยตะกอนดินโดยการทดลองแบบที่ละเท

ศึกษาประสิทธิภาพเบื้องต้นโดยการทดลองแบบที่ละเท เพื่อหาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักทั้ง 7 ชนิด ผลการทดลองพบว่า ตะกอนดินแบบผงและตะกอนดินแบบเม็ดมีร้อยละการดูดซับของโลหะหนักมากที่สุด คือ ตะกั่ว มีร้อยละการดูดซับเท่ากับ 92.04 และ 79.75 ตามลำดับ คิดเป็นความจุของการดูดซับได้เท่ากับ 1.90 และ 1.75 มก./ก. และมีร้อยละการดูดซับโลหะหนักน้อยที่สุด คือ โครเมียม มีร้อยละการดูดซับเท่ากับ 56.21 และ 40.21 ตามลำดับ คิดเป็นความจุของการดูดซับได้เท่ากับ 1.47 และ 1.28 มก./ก. ดังตารางที่ 1

จากผลการทดลองการดูดซับโลหะหนัก พบว่า ตะกอนดินแบบผงและตะกอนดินแบบเม็ดมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักชนิดเดียวกันได้มากที่สุดและน้อยที่สุด ตะกั่วมีประสิทธิภาพการดูดซับได้มากที่สุดเนื่องมาจากไอออนของโลหะมีประจุ +2 แต่มีค่ารัศมีไอออนต่างกัน โดยตะกั่ว สังกะสี แคดเมียม ทองแดง นิกเกิล และแมงกานีส

มีค่ารัศมีไอออนเท่ากับ 119, 95, 74, 72, 69, 65 พิโกเมตร ตามลำดับ ซึ่งขนาดไอออนของตะกั่ว มีขนาดพอเหมาะกับรูพรุน เมื่อเคลื่อนเข้าไปแล้วสามารถเคลื่อนที่ออกมาจากรูพรุนได้ยาก ส่วนไอออนที่มีขนาดเล็กกว่าเมื่อถูกดูดซับแล้วสามารถหลุดออกได้ง่ายกว่าเรียงตามลำดับของขนาดไอออนที่เล็กลง ส่วน โครเมียม ประจุ +3 มีค่ารัศมีไอออน เท่ากับ 64 พิโกเมตร มีขนาดเล็กกว่ารูพรุน เมื่อเคลื่อนที่เข้าไปแล้วมีโอกาสเคลื่อนออกมาได้ง่ายทำให้มีประสิทธิภาพการดูดซับน้อยที่สุด [8]

2. ผลการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส ปริมาณตัวดูดซับ และความเข้มข้น

2.1 ระยะเวลาการสัมผัส

ระยะเวลาสัมผัสที่ทำการศึกษาคือ 30, 60, 90, 120 นาที พบว่าตะกอนดินแบบผงสามารถดูดซับ Mn, Pb, Ni, Cd, Cu และ Zn ได้ มากกว่า ร้อยละ 80 ยกเว้น Cr ที่ถูกดูดซับประมาณร้อยละ 20 ดังภาพที่ 1 (ก) และพบว่าร้อยละการดูดซับของโลหะแต่ละชนิดที่ระยะเวลาสัมผัสต่างกันมีร้อยละการดูดซับไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) แสดงว่า ระยะเวลาสัมผัสไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับของตะกอนดินแบบผงและเมื่อพิจารณาการดูดซับโลหะหนักทุกชนิด พบว่ามีค่าคงที่ ตั้งแต่ เวลาที่ 60 นาที โดยมี ร้อยละการดูดซับอยู่ในช่วง 84.20 -84.90 ส่วนตะกอนดินแบบเม็ด ระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักไม่มีผลต่อ Zn และPb แต่มีผลกับ Cd, Ni, Cu, Cr และ Mn ดังภาพที่ 1 (ข) โดยที่ทุกระยะเวลาสัมผัสมีร้อยละการดูดซับ Zn เท่ากับ 100 ส่วน Cu และ Cd ถูกดูดซับได้เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 80 เป็นร้อยละ 100 เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นจาก 30 เป็น 120 นาที แสดงว่าระยะเวลาสัมผัสมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ [9] ในช่วงแรกพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีปริมาณมากทำให้อัตราการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเวลาผ่านไปอัตราการดูดซับ ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารละลายโลหะหนักจากภายนอกเข้าสู่พื้นที่ภายในอนุภาคสารดูดซับจะเริ่มช้าลง เมื่อเปรียบเทียบกับแนวโน้มของร้อยละการดูดซับโลหะหนักโดยเฉลี่ยของตะกอนดินแบบเม็ดและแบบผง โดยตะกอนดินแบบเม็ดมีร้อยละการดูดซับเท่ากับแบบผงเมื่อระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 120 นาที แต่อย่างไรก็ตามตะกอนดินแบบผงสามารถดูดซับโลหะทุกชนิดได้ดี ($>$ ร้อยละ 80) ยกเว้น Cr ที่เป็นเช่นนี้เพราะ ตะกอนดินแบบผงมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าแบบเม็ด ดังนั้นระยะเวลาการดูดซับที่เหมาะสมของตะกอนดินแบบผงและตะกอนแบบเม็ด เท่ากับ 60 และ 120 นาที

2.2 ปริมาณตัวดูดซับ

ปริมาณตะกอนดินที่ทำการศึกษา 1, 2, 3, 4, 5 และ6 กรัม ทดลองกับสารละลายโลหะหนักแต่ละชนิดเข้มข้น 40.00 มก./ล. ปริมาตร 50.00 มล.พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตะกอนดินแบบผงหรือแบบเม็ดร้อยละการดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ดังภาพที่ 2(ก)และ(ข) เนื่องมาจากเมื่อเพิ่มปริมาณตะกอนดินจึงมีผลทำให้ร้อยละการดูดซับโลหะหนักเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้อาจเป็นเพราะเมื่อเพิ่มปริมาณตะกอนดินเป็นการเพิ่มตำแหน่งที่ว่างไว้ในกระบวนการดูดซับทำให้ไอออนของโลหะหนักสามารถดูดซับที่ผิวของตะกอนดินที่มากขึ้นในโลหะหนักบางชนิดที่มีความว่างไว้ในกระบวนการดูดซับ ปริมาณตะกอนดินทั้ง 2 แบบที่ดูดซับโลหะหนักได้ดีคือ 6 กรัม ซึ่งตะกอนดินแบบผงมีร้อยละการดูดซับอยู่ในช่วง 67.08 – 98.34 ส่วนตะกอนดินแบบเม็ดมีร้อยละการดูดซับอยู่ในช่วง 51.42 – 88.61 จะเห็นได้ว่า ตะกอนดินแบบผงมีประสิทธิภาพการดูดซับมากกว่า ตะกอนดินแบบเม็ด แต่อย่างไรก็ตามตะกอนดินแบบผงและแบบเม็ดมีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะแต่ละชนิดได้ดี ดังภาพที่ 3 สามารถเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้คือ Pb ถูกดูดซับได้มากที่สุด รองลงมาคือ Cu, Zn, Cd, Ni, Mn และ Cr ตามลำดับ

2.3 ความเข้มข้น

ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักที่ทำการศึกษาคือ 5.00, 10.00, 15.00, 20.00, 30.00, 40.00 และ 50.00 มก./ล. ปริมาตร 50.00 มล. ใช้ปริมาณตะกอนดินแบบผงหรือตะกอนดินแบบเม็ด 1 กรัม พบว่า ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิดของตะกอนดินมีค่าลดลง อธิบายได้ว่าความเข้มข้นมีผลต่อการดูดซับโลหะหนักของตะกอนดินแบบผงมากกว่าตะกอนดินแบบเม็ด เนื่องจากตะกอนดินแบบผงมี รูพรุน และช่องว่างของพื้นที่ผิวมากอีกทั้งยังมีประจุ ทำให้สามารถสร้างพันธะกับสารอินทรีย์และโลหะหนัก และพบว่าความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการดูดซับจะลดลง [10] ซึ่งการทดลองนี้อธิบายให้เห็นชัดเจนว่าประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายโลหะหนักขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก ดังภาพที่ 4 (ก) และ (ข) ดังนั้นความเข้มข้นที่เหมาะสม ในการดูดซับสารละลายโลหะหนักแต่ละชนิดเท่ากับ 40.00 มก./ล. และเมื่อคำนวณความจุของการดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิดที่ร้อยละการดูดซับสูงที่สุดพบว่าตะกอนดินแบบผงมีค่าความจุของการดูดซับโลหะหนักทุกชนิดสูงกว่าตะกอนดินแบบเม็ด ความจุของการดูดซับสภาวะที่เหมาะสมของตะกอนดินแบบผง (Cr, Mn, Ni, Zn, Cu, Cd, Pb) เท่ากับ 1.47, 1.72, 1.76, 1.81, 1.82, 1.79 และ 1.90 มก./ก. ตามลำดับ ที่เวลาสัมผัส 60 นาที และตะกอนดินแบบเม็ดเท่ากับ 1.28, 1.46, 1.49, 1.60, 1.67, 1.59 และ 1.75 มก./ก. ตามลำดับ

3. ผลการศึกษารูปแบบของการดูดซับโลหะหนัก

การศึกษากลไกการดูดซับที่สภาวะสมดุลโดยเลือกศึกษากับโลหะหนักที่เกิดการดูดซับได้มากที่สุดจากผลการทดลองข้างต้นพบว่า Pb เป็นโลหะหนักที่เกิดการดูดซับด้วยตะกอนดินทั้ง 2 แบบ ได้มากที่สุด ได้ไอโซเทอร์มของการดูดซับดังภาพที่ 5 และ 6 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากค่า R^2 พบว่า กลไกการดูดซับของตะกอนดินแบบผงสอดคล้องกับไอโซเทอร์มของฟรุนดลิช และตะกอนดินแบบเม็ดสอดคล้องกับไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ [11-12] อธิบายได้ว่า ตะกอนดินแบบเม็ดถูกอัดและเผาให้มีความคงทน จึงเกิดการดูดซับเฉพาะผิวหน้าของเม็ดตะกอนดิน แต่ตะกอนดินแบบผงเกิดกลไกการดูดซับได้ทั้งที่ผิวและภายในรูพรุน

4. ผลการศึกษาประสิทธิภาพการนำไปใช้งานจริง

4.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะ ด้วยตะกอนดินแบบเม็ด

ศึกษาวิธีการนำตะกอนดินแบบเม็ดไปใช้งาน 2 วิธี คือ บรรจุในคอลัมน์ และเขย่า โดยใช้ตะกอนดินแบบเม็ด 60 กรัม ทดลองกับสารละลายโลหะหนักเข้มข้น 40.00 มก./ล. ปริมาตร 500.00 มล. กวนที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เขย่าเป็นเวลา 120 นาที ในการทดลองแบบเขย่า พบว่าวิธีบรรจุคอลัมน์ให้ประสิทธิภาพการบำบัดต่ำ เนื่องจากตะกอนดินแบบเม็ดมีขนาดใหญ่ทำให้เกิดช่องว่างในคอลัมน์ สารละลายโลหะหนักส่วนหนึ่งไม่ได้สัมผัสกับตะกอนดิน ส่วนแบบเขย่าทำการศึกษากการบำบัดโดยใช้ตะกอนดินซ้ำต่อเนื่อง 5 ครั้ง การบำบัดโลหะหนักในครั้งแรกมีประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักได้ดีเมื่อผ่านการบำบัดโลหะหนักครั้งต่อไปประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักลดน้อยลงดังภาพที่ 7(ข) เนื่องจาก พื้นที่ผิวสัมผัสและรูพรุนของตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพลดน้อยลง [13] พบว่าร้อยละการดูดซับของ Cr, Mn, Ni, Cd, Zn, Cu และ Pb เท่ากับ เท่ากับ 53.84, 59.06, 65.23, 91.31, 69.46, 75.85 และ 93.41 ตามลำดับ

4.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก ด้วยตะกอนดินแบบผง

ใช้ปริมาณตะกอนดินแบบผง 60 กรัม ทดลองกับสารละลายโลหะหนักแต่ละชนิดเข้มข้น 40.00 มก./ล. ปริมาตร 500 มล. กวนที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เขย่าเป็นเวลา 60 นาที ทำการศึกษากการดูดซับโดยใช้ตะกอนดินซ้ำต่อเนื่อง 5 ครั้ง พบว่า มีร้อยละการดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิดในสารละลายโลหะหนักมีแนวโน้มลดลงดังภาพที่ 7(ก) มีค่าร้อยละการดูดซับโดยเฉลี่ย ของ Cr, Mn, Ni, Cd, Zn, Cu และ Pb เท่ากับ 58.07, 59.26, 69.67, 92.46,

73.00, 82.23 และ 94.98 ตามลำดับ จากการศึกษางานวิจัยของ [13] มีการศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์แบบผงชนิด Darco HDB พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมและตะกั่วเท่ากับ 96.50 และ 95.00 ตามลำดับ ซึ่งมีความใกล้เคียงกับการดูดซับด้วยตะกอนดินน้ำปะปาโดยตะกอนดินเท่ากับ 91.89 และ 94.49 แต่เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีราคาแพง จึงต้องมีการ Regeneration ให้ใช้งานใหม่ได้หลายครั้ง ซึ่งอาจจะมีการตกค้างของสารได้และเพื่อป้องกันการทิ้งตัวดูดซับที่จะทำให้สารดูดซับชะล้างสู่สิ่งแวดล้อม โดยมีการศึกษาการนำเทคนิค Fenton (electro-Fenton และ electrokinetic-Fenton) มาใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งถือว่าเป็นทางเลือกในการแก้ไขปัญหาการทิ้งวัสดุดูดซับลงสู่สิ่งแวดล้อม

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการประยุกต์ใช้ตะกอนดินจากการผลิตน้ำประปา เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก 7 ชนิดโดยเตรียมตะกอนดิน 2 แบบคือ แบบผงและแบบเม็ด สามารถสรุปได้ว่า ผลต่อการดูดซับโลหะหนักของตะกอนดินรูปแบบผง มีแนวโน้มของการดูดซับโลหะหนักสูงกว่าตะกอนดินแบบเม็ด การดูดซับของโลหะหนักมากที่สุดคือ ตะกั่ว และการดูดซับโลหะหนักน้อยที่สุดคือ โครเมียม ระยะเวลาสัมผัสมีผลต่อการดูดซับโลหะหนักของตะกอนดินแบบเม็ดมากกว่าแบบผงและระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของตะกอนดินแบบผงและตะกอนแบบเม็ด 60 และ 120 นาทีตามลำดับ ตะกอนดินทั้ง 2 แบบมีประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก 7 ชนิด ได้เรียงลำดับจากน้อยไปมาก ดังนี้ Cr, Mn, Ni, Zn, Cu, Cd และ Pb ความจุของการดูดซับสูงสุดของโลหะหนักด้วยตะกอนดินแบบผง เท่ากับ 1.47, 1.72, 1.76, 1.81, 1.82, 1.79 และ 1.90 มก./ก. ตามลำดับ และตะกอนดินแบบเม็ดเท่ากับ 1.28, 1.46, 1.49, 1.60, 1.67, 1.59 และ 1.75 มก./ก. ตามลำดับ เมื่อทดลองในสารละลายโลหะหนักที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิด เท่ากับ 40.00 มก./ล. พบว่าเมื่อใช้ตะกอนดินแบบผง 60 กรัม ในสารละลายโลหะหนัก 500.00 มล. โดยใช้ตะกอนดินซ้ำต่อเนื่อง 5 ครั้ง ร้อยละการดูดซับเท่ากับ 58.07, 59.26, 69.67, 92.46, 73.00, 82.23 และ 94.98 ตามลำดับ ส่วนตะกอนดินแบบเม็ดใช้วิธีการเขย่าได้ผลดีกว่าบรรจุในคอลัมน์ แบบเขย่าใช้ตะกอนดินแบบเม็ด 60 กรัม ในสารละลายโลหะหนัก 500.00 มล. โดยใช้ตะกอนดินซ้ำต่อเนื่อง 5 ครั้ง มีร้อยละการดูดซับโดยเฉลี่ยเท่ากับ 53.84, 59.06, 65.23, 91.31, 69.46, 75.85 และ 93.41 ตามลำดับ สามารถใช้เป็นตัวดูดซับต้นทุนต่ำทางเลือก สำหรับกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย ในขณะเดียวกัน ตะกอนดินแบบเม็ด ถูกแยกออกจากน้ำเสียได้ง่ายกว่า ตะกอนดินแบบผง และเมื่อพิจารณาถึงการเลือกนำไปใช้ประโยชน์ตะกอนดินแบบผงมีความคุ้มค่าและเหมาะสมมากกว่าตะกอนดินแบบเม็ดผง และหากนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมควรมีการเพิ่มขนาดให้ใหญ่กว่าเดิม เพิ่มประสิทธิภาพที่ดีขึ้น นอกจากนี้ยังได้วิธีการกำจัดโลหะหนักอันตรายในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ต้นทุนต่ำ และสามารถนำไปประยุกต์และพัฒนา ใช้ได้จริงในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักในโรงงานอุตสาหกรรมและชุมชน และยังเป็นการช่วยเพิ่มมูลค่าตะกอนดินซึ่งเป็นของเหลือทิ้งอีกด้วยและตะกอนดินที่ถูกดูดซับจากโลหะหนักแล้วหลังการใช้งานสามารถนำกลับมาใช้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้างทำเป็น อิฐมอญซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับตะกอนดินน้ำประปาอีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยเพื่อการพัฒนาบัณฑิต คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย



เอกสารอ้างอิง

1. Yagub, Mustafa T, Tushar KS, Sharmeen A, H.M. Ang. Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2014; 209: 172-184.
2. Panu S. Effect of Development Deposit Water Supply to Physical and Form Pottery [PhD thesis]. Bangkok: King Mongkut's of Technology Ladkrabang; 2007. Thai.
3. Duangkam S, Pansan W, Wattana R. Application of Sludge Sediment from Water Work supply. *KKU Science Journal*. 2017; 43(3). Thai.
4. Rai HS, Bhattacharyya J, Singh TK, Bansal vats P, Banerjee UC. Removal of dyes from the effluent of textile and dyestuff manufacturing industry: a review of emerging techniques with reference to biological treatment. *Environmental Science Technology*. 2005; 35: 219-238.
5. APHA, AWWA, WPCF. Standard Method for the Examination of Water and Wastewater. Heavy metals removal by using alum sludge from water supply treatment plant. New York. 1992; 81(1): 313-20.
6. Surasan W. Use of Adsorbent Derived from Lignite Fly Ash Mixed with Water Supply Sludge for Dye Removal [PhD thesis]. Bangkok: King Mongkut's University of Technology Thonburi; 2009. Thai.
7. Chu W. Dye Removal from Texile dye Wastewater using Recycle Alum Sludge. *Water Research*. 2001; 32(13): 3147-3152.
8. Kadirvelu K, Thamaraiselvi, Namasivayam C. Removal of heavy metals from industrial wastewaters by adsorption onto activated carbon prepared from an agricultural solid waste. *Bioresour*. 2001; 76(1): 63-65.
9. Watcharee S, Arisa K, Utsanee K. Determination of lead, iron and cadmium in the groundwater by atomic absorption spectrophotometry [PhD thesis]. Bangkok: Kakhon Ratchasima Rajabhat University; 2015. Thai.
10. Al-Degs, Khraisheh, M.A.M., Allen SJ, Ahmad MN, Walker GM, et al. Competitive adsorption of reactive dyes from solution: equilibrium isotherm studies in single and multi solute systems. *Chemical Engineering Journal*. 2007; (128): 163-167.
11. Chonlatis K. Heavy Metals Removal by Using Alum Sludge From Water Supply Treatment Plant [PhD thesis]. Khon Kaen: Khon Kaen University; 2004. Thai.
12. Amin NK. Removal of reactive dye from aqueous solution by adsorption onto activated carbon prepared from sugarcane bagasse pith. *Desalination*. 2008; (223): 152-161.
13. Emilio R, Delia A, Marta P, Iuliana L, M Angeles S. Kaolinite adsorption-regeneration system for dyestuff treatment by Fenton based processes. *Science of the Total Environment*. 2018; 622-623: 556-562.



ตารางที่ 1 ร้อยละการดูดซับและความจุของการดูดซับในการดูดซับโลหะหนัก 7 ชนิด ด้วยตะกอนดินแบบผง และตะกอนดินแบบเม็ด

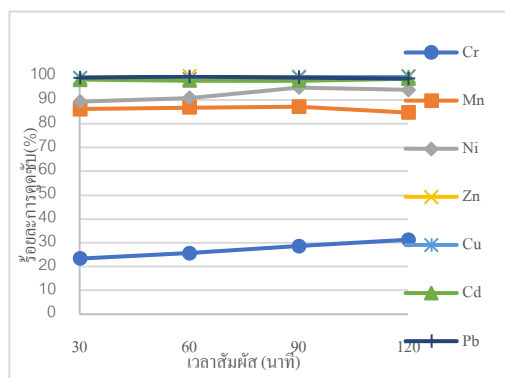
โลหะหนัก	ตะกอนดินแบบผง		ตะกอนดินแบบเม็ด	
	ร้อยละการดูดซับ (%)	ความจุของการดูดซับ (มก./ก.)	ร้อยละการดูดซับ (%)	ความจุของการดูดซับ (มก./ก.)
โครเมียม	56.21	1.47	40.21	1.28
แมงกานีส	76.68	1.72	55.38	1.46
นิกเกิล	80.36	1.76	58.04	1.49
สังกะสี	83.96	1.81	67.29	1.60
ทองแดง	85.32	1.82	72.75	1.67
แคดเมียม	82.61	1.79	66.21	1.59
ตะกั่ว	92.04	1.90	79.75	1.75

ตารางที่ 2 ไอโซเทอร์มการดูดซับตะกั่วด้วยตะกอนดินแบบผง

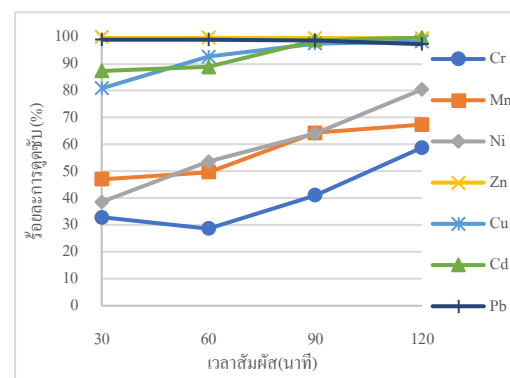
ปริมาณตะกอนดิน (กรัม)	C_0	C	V (ลิตร)	q	$1/c$	$1/q$	$\log c$	$\log q$
1	5	0.05	0.05	0.24	20.00	4.040	-1.301	-0.606
1	10	0.18	0.05	0.49	5.5560	2.036	-0.744	-0.308
1	15	0.44	0.05	0.72	2.272	1.373	-0.356	-0.137
1	20	0.58	0.05	0.97	1.724	1.029	-0.236	-0.012
1	30	1.88	0.05	1.40	0.531	0.711	0.274	0.147
1	40	4.31	0.05	1.78	0.232	0.560	0.634	0.251
1	50	5.61	0.05	2.21	0.178	0.450	0.748	0.346

ตารางที่ 3 ไอโซเทอร์มการดูดซับตะกั่วด้วยตะกอนดินแบบเม็ด

ปริมาณตะกอนดิน (กรัม)	C_0	C	V (ลิตร)	q	1/c	1/q	log c	log q
1	5	0.02	0.05	0.249	50.000	4.016	-1.698	-0.603
1	10	0.05	0.05	0.497	20.000	2.010	-1.301	-0.303
1	15	0.12	0.05	0.744	8.333	1.344	-0.920	-0.128
1	20	0.33	0.05	0.983	3.030	1.016	-0.481	-0.007
1	30	0.69	0.05	1.465	1.449	0.682	-0.161	0.165
1	40	1.66	0.05	1.917	0.602	0.521	0.220	0.282
1	50	1.62	0.05	2.419	0.617	0.413	0.209	0.383

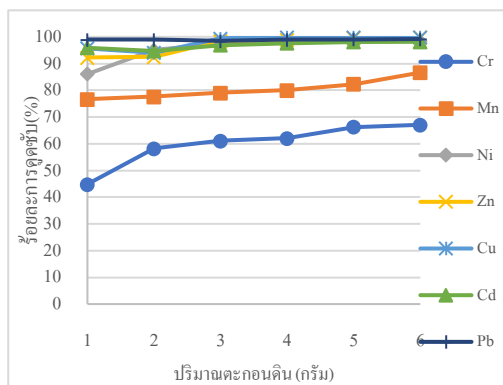


(ก)

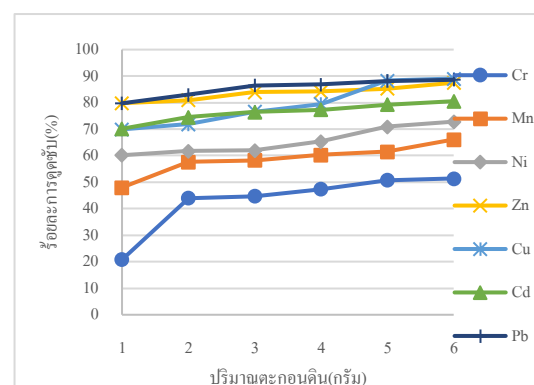


(ข)

ภาพที่ 1 ร้อยละการดูดซับโลหะหนักในสารละลายโลหะหนักแต่ละชนิด ด้วยตะกอนดินแบบผง (ก) และตะกอนดินแบบเม็ด (ข) กับระยะเวลาสัมผัส

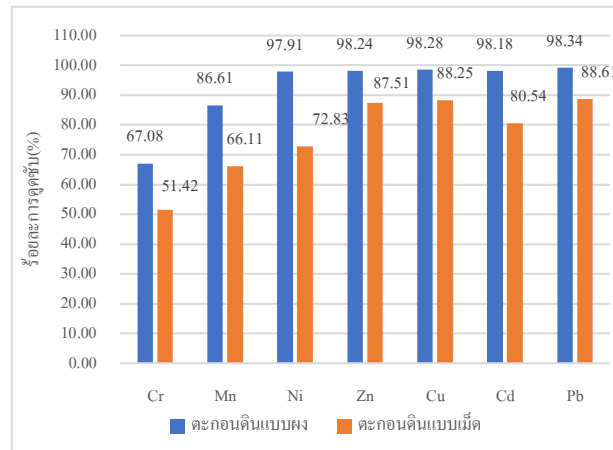


(ก)

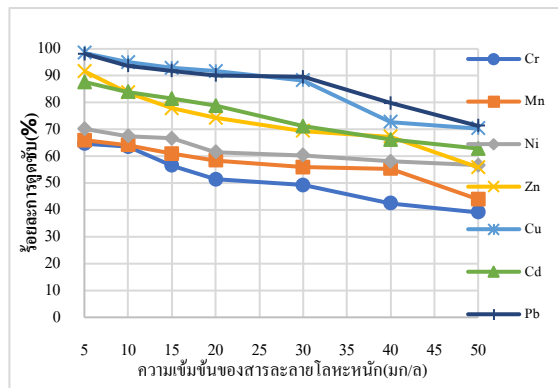


(ข)

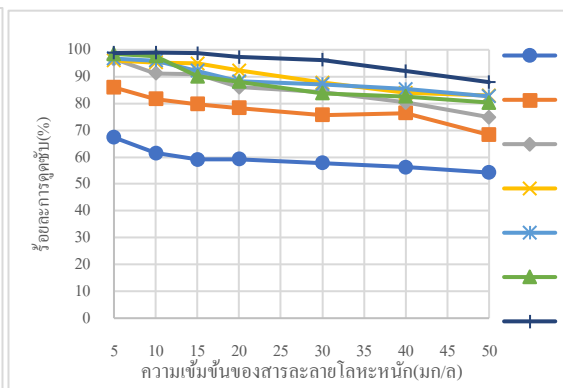
ภาพที่ 2 ร้อยละการดูดซับโลหะหนักในสารละลายโลหะหนักแต่ละชนิด ด้วยตะกอนดินแบบผง (ก) และตะกอนดินแบบเม็ด (ข) กับปริมาณตะกอนดิน



ภาพที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบร้อยละการดูดซับ โลหะหนักด้วยตะกอนดินแบบผงและตะกอนดินแบบเม็ด

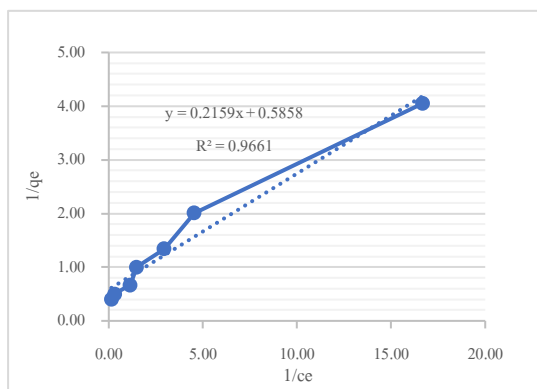


(ก)

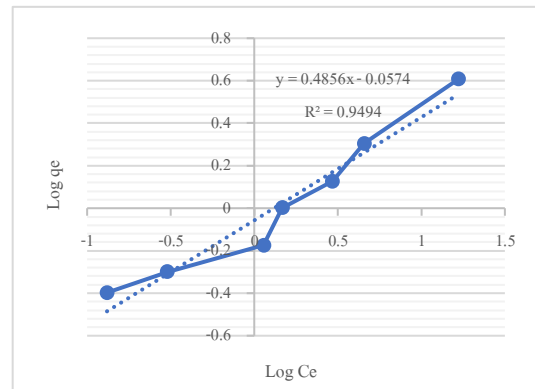


(ข)

ภาพที่ 4 ร้อยละการดูดซับ โลหะหนักด้วยตะกอนดินแบบผง (ก) และตะกอนดินแบบเม็ด (ข) กับความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก

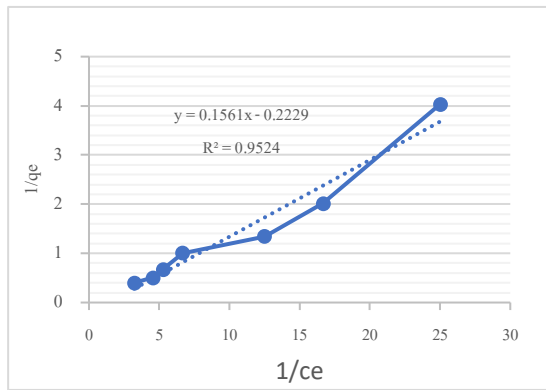


(ก)

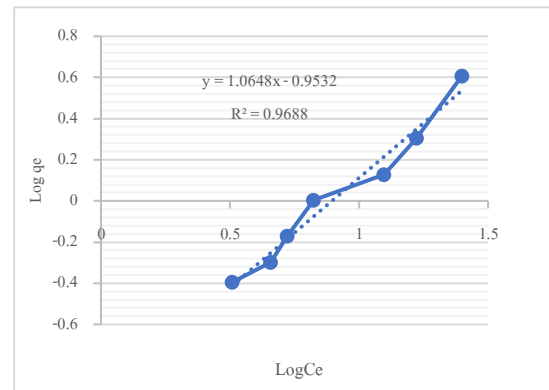


(ข)

ภาพที่ 5 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (ก) แบบฟรุนดลิช (ข) ของตะกั่ว ด้วยตะกอนดินแบบผง

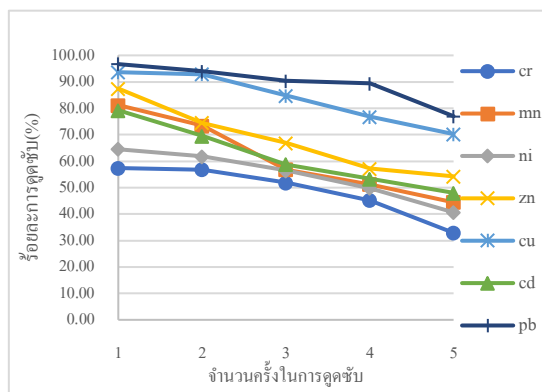


(ก)

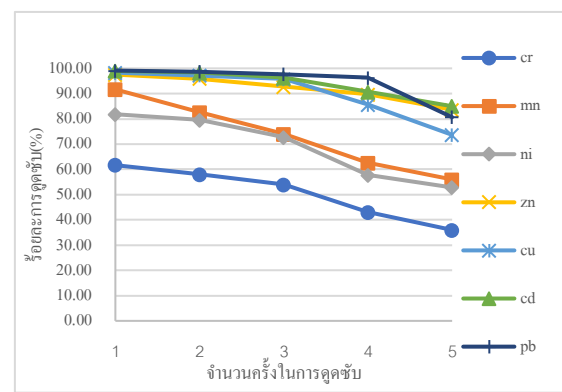


(ข)

ภาพที่ 6 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (ก) แบบฟรุนดลิช (ข) ของตะกั่ว ด้วยตะกอนดินแบบเม็ด



(ก)



(ข)

ภาพที่ 7 ร้อยละการดูดซับโลหะหนักด้วยตะกอนดินแบบผง (ก) และตะกอนดินแบบเม็ด (ข) กับ จำนวนครั้งในการดูดซับ