KKU RESEARCH JOURNAL (GRADUATE STUDIES)
Vol. 18 NO. 4: October-December 2018

การเตรียมซิลิกาซีโรเจลจากเถ้าแกลบเคลือบด้วยแมงกานีสและเหล็กออกไซด์เพื่อกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

Preparation of Manganese-Iron Oxide Coated Rice Husk Ash Silica Xerogel for Removal of Heavy Metals in Wastewater

กานต์มณี ทองศรี (Karnmanee Thongsri)[1]* ดร.นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ (Dr.Nipon Tungkananuruk)**
คณิตา ตังคณานุรักษ์ (Kanita Tungkananuruk)** ดร.วัชรพงษ์ วาระรัมย์ (Dr.Watcharapong Wararam)***

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมวัสดุดูดซับที่มีราคาถูก และมีศักยภาพในการถูกปรับปรุงและเพิ่มความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงได้เตรียมซิลิกาจากการสกัดเถ้าแกลบข้าวและเคลือบด้วยแมงกานีสออกไซด์และเหล็กออกไซด์ ศึกษาความสามารถการดูดซับของซิลิกาที่เคลือบด้วย Fe และ Mn ในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน (Fe100, Fe80, Fe60, Fe40, Fe20 และ Mn100) ในสารละลายตะกั่ว แคดเมียม นิกเกิล และสังกะสี ด้วยการทดลองแบบแบทช์ พบว่าในสารละลายโลหะหนักแต่ละชนิดความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ซิลิกาที่เคลือบด้วย Fe20 และ Mn100 มีความสามารถในการดูดซับสูงเท่ากันประมาณ 3.8-4.0 มิลลิกรัมต่อกรัม กลไกการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมบนซิลิกาที่เคลือบด้วย Mn100 สอดคล้องกับไอโซเทอร์มทั้งแบบแลงเมียร์และฟรุนดิช นอกจากนี้ได้ประยุกต์ใช้ซิลิกาเคลือบ Mn100 บำบัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ 500 มิลลิลิตร โดยใช้เครื่องจาร์เทสต์พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุด คือ ตะกั่วร้อยละ 99.87 แคดเมียมร้อยละ 95.40 นิกเกิลร้อยละ 95.90 และสังกะสีร้อยละ 95.02 ที่สภาวะพีเอช 7 ความเร็วรอบการปั่นกวนที่ 50 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 15 นาที และตัวดูดซับปริมาณ 1 กรัม ดังนั้น ซิลิกาที่ดัดแปลงทางเคมีจึงมีศักยภาพสูงในการกำจัดตะกั่ว แคดเมียม นิกเกิล และสังกะสีในน้ำเสีย

ABSTRACT

This research was to prepare low cost adsorbents that had significant potential for modification and enhancement of heavy metals adsorption capabilities. Silica from extraction of rice husk ash and coated with manganese and iron oxides was prepared. The adsorption capabilities of various ratios of coating Fe and Mn (Fe100, Fe80, Fe60, Fe40, Fe20 and Mn100) were investigated in Pb, Cd, Ni and Zn solutions by batch experiments. The results showed that in each heavy metal solution (40 mg/L), Fe20 and Mn100 coated silica showed the same high adsorption capability around 3.8-4.0 mg/g. The adsorption mechanism of both Pb and Cd on Mn100 coated silica was agreed with Langmuir and Freundlich. In addition, application of Mn100 coated silica for heavy metals treatment in 500 mL of the synthetic wastewater was conducted on jar test apparatus. The maximum removal efficiencies obtained were 99.87% Pb, 95.40% Cd, 95.90% Ni and 95.02% Zn at pH 7, agitation at 50 rpm/min for 15 min and 1 g of adsorbent. Therefore, this chemically modified silica had a high potential for removals of Pb, Cd, Ni and Zn in wastewater.

คำสำคัญ: แกลบ ซิลิกา การดูดซับ

Keywords: Rice husk, Silica, Adsorption

---

[1] *Correspondent author: karnmanee.t@live.com*

** นักศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาสาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*

*** รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิทยาสาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*

**** อาจารย์ ภาควิชาวิทยาสาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*

บทนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจและพัฒนาเทคโนโลยี เกิดการขยายตัวอย่างรวดเร็วของภาคอุตสาหกรรม ส่งผลให้เกิดการเพิ่มจำนวนของโรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ ขึ้น อาทิเช่น โรงงานอุตสาหกรรมอาหาร โรงงานผลิตแบตเตอร์รี่ โรงงานชุบโลหะ และโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น เมื่อมีการเพิ่มจำนวนของโรงงานอุตสหกรรมย่อมมีการปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งการปนเปื้อนโลหะหนักเกิดจากกระบวนการผลิตที่มีส่วนประกอบของ ตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสี เป็นต้น เมื่อมีการรั่วไหลปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำผิวดิน น้ำบาดาล หรือน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งส่งผลให้เกิดปัญหาที่สำคัญต่อสิ่งแวดล้อม และระบบนิเวศแหล่งน้ำซึ่งเป็นทรัพยากรคุณค่าการใช้ประโยชน์ของมนุษย์ [1] จึงจำเป็นต้องมีการกำจัดหรือบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะที่เหมาะสมก่อนปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นศึกษาเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวซิลิกา และปรับปรุงพื้นผิวของซิลิกาโดยการเคลือบซิลิกาด้วยแมงกานีสและเหล็กออกไซด์ เพื่อเกิดกลไกการดูดซับบนพื้นผิวได้ง่ายขึ้นอันเนื่องมาจากพื้นที่ผิวและประจุบนพื้นผิวมีอยู่มากจึงสามารถดูดจับกับโลหะหนักรวมทั้งสารอินทรีย์ต่าง ๆ ได้ [2] เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมของตัวดูดซับที่เตรียมได้ไปใช้ในการกำจัดโลหะหนักที่เป็นอันตรายซึ่งได้แก่ ตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสี เป็นการใช้ประโยชน์จากเถ้าแกลบข้าว ซึ่งเป็นของเสียจากด้านเกษตรกรรมนำมาเป็นวัตถุดิบในการสกัดเป็นซิลิกาซึ่งมีสารประกอบด้วยธาตุ 2 ธาตุ คือ ซิลิคอน (Si) และออกซิเจน (O) ลักษณะที่พบอาจอยู่ในรูปซิลิเกต อีกทั้งยังมีลักษณะพื้นที่ผิว และมีโครงสร้างที่มีรูพรุนจำนวนมาก [3] นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังถือเป็นการนำของเสียมาใช้ให้เกิดประโยชน์ และสามารถนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ในโรงงานอุตสาหกรรม

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวซิลิกา และปรับปรุงพื้นผิวของซิลิกาให้มีคุณสมบัติในการดูดซับโลหะหนัก
2. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบซิลิกาด้วยแมงกานีสและเหล็กออกไซด์
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมของตัวดูดซับที่เตรียมไปใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

วัสดุ/วิธีการวิจัย

1. การเตรียมซิลิกาซีโรเจลจากเถ้าแกลบ

ใช้วิธีการเตรียมซิลิกาตามวิธีของ Dangseporn (2016) ดัดแปลงจากวิธีของ Kalapathy *et al*. (2000) [4]

2. การเตรียมซิลิกาที่เคลือบด้วยแมงกานีสและเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนต่างกัน

เตรียมสารละลาย $FeSO_4.7H_2O$ และ $KMnO_4$ ความเข้มข้นที่ 20 กรัมต่อลิตร โดยมีองค์ประกอบทางเคมีอัตราส่วนของสารละลาย (ตารางที่ 1) ใส่น้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร ชั่งซิลิกาผงที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 500 ไมครอน 20 กรัม กวนในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำกลั่นจนไม่มีสี อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และนำมาผ่านตะแกรงร่อน 2 มิลลิเมตร วิเคราะห์ศึกษาลักษณะของพื้นที่ผิวด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

3. การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสี ของซิลิกาที่เคลือบด้วยแมงกานีสและเหล็กออกไซด์ในอัตราส่วนที่ต่างกัน โดยการทดลองแบบแบทช์

3.1 การศึกษาหาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิด

ชั่งซิลิกาที่เคลือบด้วยแมงกานีสและเหล็กออกไซด์ที่เตรียมได้ จากการศึกษาที่ 2 ปริมาณ 0.5 กรัม ใส่ในขวดชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ต่อสารละลายมาตรฐานตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสี ความเข้มข้นที่ 10, 20, 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ในปริมาตร 50 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที และกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C ขนาด 0.45 ไมครอน ตวงสารตัวอย่าง 30 มิลลิลิตร ใส่เวสเซลเติมกรดไนตริก 3.3 มิลลิลิตร ตามวิธีมาตรฐาน US.EPA Method 3051a ย่อยด้วยเครื่อง Microwave Digestor ปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร นำตัวอย่างไปวิเคราะห์โลหะด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (AAS) และคำนวณประสิทธิภาพในการบำบัดตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสี

3.2 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

ทำการทดลองเหมือนการศึกษาที่ 3.1 โดยศึกษากับสารละลายมาตรฐานตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสี แต่ละชนิดในความเข้มข้นที่ 10, 20, 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณเขียนกราฟแสดงไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) หรือไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิช (Freundlich Isotherm)

3.3 การศึกษาหาอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กออกไซด์ที่เคลือบซิลิกาที่เหมาะสมในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์

ชั่งซิลิกาที่เคลือบด้วยแมงกานีสและเหล็กออกไซด์ที่เตรียมได้ จากการศึกษาที่ 2 ปริมาณ 0.5 กรัม ใส่ในขวดชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสี ความเข้มข้นที่ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ในปริมาตร 50 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที ทำการทดลองต่อเช่นเดียวกับการศึกษาที่ 3.1

4. การศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสี ของซิลิกาที่เคลือบด้วยแมงกานีสและเหล็กออกไซด์ในอัตราส่วนที่ต่างกัน โดยวิธีทดลองแบบจาร์เทสต์

4.1 การศึกษา pH ที่เหมาะสม

โดยใช้สัดส่วนที่เหมาะสมจากการศึกษาที่ 2 ชั่งวัสดุปริมาณ 5 กรัม ต่อสารละลายมาตรฐานตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสี ความเข้มข้นที่เหมาะสมจากการศึกษาที่ 3.1 ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ปรับ pH ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 N โดย pH เท่ากับ 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที ทำการทดลองต่อเช่นเดียวกับการศึกษาที่ 3.1

4.2 การศึกษาระยะเวลาปั่นกวน

โดยใช้สัดส่วนที่เหมาะสมจากการศึกษาที่ 2 ชั่งวัสดุปริมาณ 5 กรัม ต่อสารละลายมาตรฐานตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสี ความเข้มข้นที่เหมาะสมจากการศึกษาที่ 3.1 ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ปรับ pH ที่เหมาะสมจากการศึกษาที่ 4.1 ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 และ 120 นาที ทำการทดลองต่อเช่นเดียวกับการศึกษาที่ 3.1

4.3 การศึกษาความเร็วรอบการปั่นกวน

โดยใช้สัดส่วนที่เหมาะสมจากการศึกษาที่ 2 ชั่งวัสดุปริมาณ 5 กรัม ต่อสารละลายมาตรฐานตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสี ความเข้มข้นที่เหมาะสมจากการศึกษาที่ 3.1 ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ปรับ pH ที่เหมาะสมจาก

การศึกษาที่ 4.1 ความเร็วรอบ 50, 100, 150 และ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลาที่เหมาะสมจากการศึกษาที่ 4.2 ทำการทดลองต่อเช่นเดียวกับการศึกษาที่ 3.1

4.4 การศึกษาหาปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสม

โดยใช้สัดส่วนที่เหมาะสมจากการศึกษาที่ 2 ชั่งวัสดุปริมาณ 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม ต่อสารละลายมาตรฐานตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสี ความเข้มข้นที่เหมาะสมจากการศึกษาที่ 3.1 ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ปรับ pH ที่เหมาะสมจากการศึกษาที่ 4.1 ความเร็วรอบที่เหมาะสมจากการศึกษาที่ 4.3 เวลาที่เหมาะสมจากการศึกษาที่ 4.2 ทำการทดลองต่อเช่นเดียวกับการศึกษาที่ 3.1

ผลการวิจัย

1. ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของซิลิกาที่ผ่านและไม่ผ่านจากกระบวนการปรับปรุงพื้นผิว

การศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพของซิลิกาที่ผ่านและไม่ผ่านจากกระบวนการปรับปรุงพื้นผิว ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 2,300 เท่า พบว่าลักษณะทางกายภาพของซิลิกา (ภาพที่ 1a) จะมีลักษณะผิวที่ขรุขระมีรูพรุนจำนวนมากและเกาะกันเป็นกลุ่ม [5] ส่วนลักษณะทางกายภาพของซิลิกาที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงพื้นที่ผิว (ภาพที่ 1b) จะมีลักษณะเกาะกันเป็นกลุ่มโดยมีพื้นผิวละเอียด และมีรูพรุนน้อยเนื่องจากเกิดจากการเคลือบด้วยแมงกานีสออกไซด์

2. ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสี ของซิลิกาที่เคลือบด้วยแมงกานีสต่อเหล็กออกไซด์ในอัตราส่วนที่ต่างกัน โดยการทดลองแบบแบทช์

2.1 ผลการศึกษาหาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิด

จากการทดลองพบว่าความสามารถในการดูดซับตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสี โดยใช้ซิลิกาเคลือบด้วยแมงกานีสและเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนต่างกัน คือ Fe100, Fe80, Fe60, Fe40, Fe20 และ Mn100 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานจะมีแนวโน้มในการดูดซับของตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสีเพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากเกิดการผลักกันระหว่างไอออนที่บริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับ และไอออนในน้ำเสียเพิ่มขึ้น ดังนั้นความเข้มข้นที่เหมาะสม คือ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสี ได้ดีที่สุดร้อยละ 98.4, 99.89, 94.87 และ 100 ตามลำดับ โดยมีค่าความจุในการดูดซับ มีค่าเท่ากับ 3.94, 3.92, 3.79 และ 4.00 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ภาพที่ 2

2.2 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

จากการทดลองแบบแบทช์เพื่อศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยแปรผันสารละลายมาตรฐานตะกั่วและแคดเมียม ในความเข้มข้นที่ 10, 20, 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ต่อ Mn100 0.5 กรัม ในปริมาตร 50 มิลลิลิตร ความเร็วรอบการเขย่า 200 รอบต่อนาที ในระยะเวลาเขย่า 60 นาที ศึกษาการกำจัดปริมาณตะกั่ว และแคดเมียม นำค่าความเข้มข้นที่ได้มาคำนวณหาค่า C คือ ความเข้มข้นตัวดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย และ q คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดไว้บนผิวของตัวดูดซับ ส่วน 1/q, 1/C, log q และ log C คือ ค่าที่คำนวณได้จากค่า C และค่า q ข้างต้น และนำผลที่ได้แทนสมการไอโซเทอร์มแลงเมียร์และฟรุนดิช ซึ่งสมการแลงเมียร์ คือ $1/q = (1/q_mK)1/C + 1/q_m$ และสมการของฟรุนดิช คือ $\log q = \log K + (1/n)\log C$ ได้ผลการศึกษาดังนี้ (ตารางที่ 2)

จากตารางที่ 2 สรุปได้ว่ากลไลการดูดซับมีความสอดคล้องของไอโซเทอร์มเป็นทั้งแลงเมียร์และ ฟรุนดิช โดยซิลิกาที่เคลือบด้วย Mn100 ในอัตราส่วนที่เหมาะสมเป็นอนุภาคพื้นผิวการดูดซับทางเคมีที่อาศัยแรงยึดเหนี่ยว/พันธะ

โคเวเลนต์ จึงสามารถดูดซับแบบชั้นเดียว แต่ในขณะเดียวกัน Mn100 ยังเป็นกลไกการดูดซับของฟรุนดิชด้วย [8] เนื่องจากซิลิกามีรูพรุนเป็นการดูดซับแบบทางกายภาพจึงสามารถดูดซับแบบซ้อนหลายชั้นได้ ภาพที่ 3- 4

2.3 ผลการศึกษาหาอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กออกไซด์ที่เคลือบซิลิกาที่เหมาะสมในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์

จากการทดลองความสามารถในการดูดซับตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสี โดยใช้ซิลิกาเคลือบด้วยแมงกานีสและเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนต่างกัน คือ Fe100, Fe80, Fe60, Fe40, Fe20 และ Mn100 พบว่าเมื่อสัดส่วนของ Mn มากขึ้นจะมีแนวโน้มการดูดซับตะกั่วมากขึ้น ดังภาพที่ 5 (a) อธิบายได้ว่า Pb^{2+} สามารถเป็นตัวออกซิไดซ์ได้ดีกว่า Ni^{2+}, Cd^{2+} และ Zn^{2+} ที่เกิดปฏิกิริยาโดยการตกตะกอนดีที่สุด และยังเป็นคุณสมบัติเฉพาะทางเทอร์โมไดมิกส์ของแมงกานีสออกไซด์ที่สามารถเกิดการปฏิกริยาการดูดซับทางเคมีกับตะกั่วได้ดี และเป็นปฏิกริยาที่สามารถเกิดขึ้นได้เองโดยไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานกระตุ้น [6] นอกจากนี้จากการพิจารณาค่าไอโซอิเล็กทริก (Isoelectric point) ของวัสดุ พบว่า MnO_2 และซิลิกามีค่าไอโซอิเล็กทริกเท่ากับ 2 ขณะที่เหล็กออกไซด์หรือ Alpha-FeOOH มีค่าเท่ากับ 6 ทำให้ซิลิกา และ MnO_2 สามารถดูดซับโลหะหนักหรือไอออนประจุบวกในสารละลายที่เป็นกรดได้ดีกว่าเหล็กออกไซด์ [7] นอกจากนี้วัสดุทั้งหมดที่มีประสิทธิภาพการดูดซับ นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสี ได้ใกล้เคียงกัน (ภาพที่ 5) ดังนั้นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้เคลือบซิลิกา คือ Mn100 ซึ่งมีประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่ว นิกเกิล แคดมียม และสังกะสี ได้ร้อยละ 98.25, 66.12, 94.23 และ 92.32 ตามลำดับ โดยมีค่าความจุในการดูดซับตะกั่ว นิกเกิล แคเมียม และสังกะสี ด้วย Mn100 มีค่าเท่ากับ 3.92, 2.64, 3.76, 3.69 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

3. ผลศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสี ด้วยซิลิกาที่เคลือบแมงกานีสและเหล็กออกไซด์ในอัตราส่วนที่ต่างกัน โดยวิธีทดลองแบบจาร์เทสต์

3.1 ผลศึกษาอิทธิพลของ pH ในการปั่นกวน

จากการทดลองพบว่า pH ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อการดูดซับที่มากขึ้น เนื่องจากความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนที่จุดอิ่มตัวจะอยู่ที่ pH เท่ากับ 7 เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งได้ร้อยละการกำจัดในการแลกเปลี่ยนตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสี เท่ากับร้อยละ 99.72, 98.38, 95.95 และ 99.95 ตามลำดับ (ภาพที่ 6a)

3.2 ผลการศึกษาระยะเวลาปั่นกวน

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับของตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสีด้วยวัสดุ Mn100 ในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อมีการเพิ่มระยะปั่นกวนนานขึ้นจะเข้าสู่สภาวะสมดุลตั้งแต่ 15 นาที เนื่องจากปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface Reaction) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับดูดติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็ว [8] ดังนั้นระยะเวลาปั่นกวนที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสี คือระยะเวลาปั่นกวนที่ 15 นาที ซึ่งสามารถดูดซับตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสีสูงสุดร้อยละ 98.42, 98.96, 96.02 และ 99.78 ตามลำดับ (ภาพที่ 6b)

3.3 ผลการศึกษาความเร็วรอบปั่นกวน

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับของตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสีด้วยวัสดุ Mn100 ในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุลตั้งแต่ความเร็วรอบในการปั่นกวนที่ 50 รอบต่อนาที จนกระทั่งความเร็วรอบที่ 200 รอบต่อนาที เนื่องจากปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface Reaction) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับดูดติดที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็ว [8] ดังนั้นความเร็วรอบการปั่นกวนที่เหมาะสมที่สุด คือ ความเร็วรอบการปั่นกวนที่ 50 รอบต่อนาที สามารถดูดซับตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสีสูงสุดร้อยละ 100, 99.24, 96.01 และ 100 ตามลำดับ (ภาพที่ 6c)

3.4 ผลการศึกษาหาปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสม

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับของตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสี มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณวัสดุ Mn100 เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณวัสดุ Mn100 เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับมลสารต่าง ๆ จึงทำให้ร้อยละการดูดซับเพิ่มขึ้นจนได้ปริมาณวัสดุ Mn 100 ที่เหมาะสม จากนั้นจะเริ่มคงที่เมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล ดังนั้นปริมาณวัสดุ Mn100 ที่เหมาะสมคือ 1 กรัม ซึ่งสามารถดูดซับตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสีสูงสุดร้อยละ 99.87, 95.40, 95.90 และ 95.02 ตามลำดับ (ภาพที่ 6d)

สรุปผลการวิจัย

การสกัดซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 500 ไมครอน ที่เคลือบด้วยสารละลายเปอร์แมงกาเนต ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ที่มีสัดส่วนองค์ประกอบร้อยละ 0:100 (วัสดุ Mn100) เป็นวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการกำจัดตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสีความเข้มข้นที่ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร พีเอชเท่ากับ 7 ในระยะเวลาการปั่นกวน 15 นาที ที่ความเร็วรอบการปั่นกวน 50 รอบต่อนาที ตามลำดับ โดยซิลิกาที่เคลือบด้วยเปอร์แมงกาเนต (วัสดุ Mn100) มีความสามารถในการดูดซับตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสีสูงสุดมีค่าเท่ากับร้อยละ 100, 99.24, 96.25 และ 100 ตามลำดับ โดยอาศัยกลไกการดูดซับบนพื้นผิวอันเนื่องมาจากพื้นที่ผิวและประจุบนพื้นผิว (surface charge) ที่มีอยู่มากจึงทำให้สามารถดูดจับกับโลหะหนักต่าง ๆ ได้ นอกจากนี้ผลการศึกษาไอโซเทอร์มพบว่าวัสดุมีไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับทั้งไอโซเทอร์มแลงเมียร์และฟรุนดิช

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุน การทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัย ประเภททุนบัณฑิตศึกษา ระดับปริญญาโท สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) จึงขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

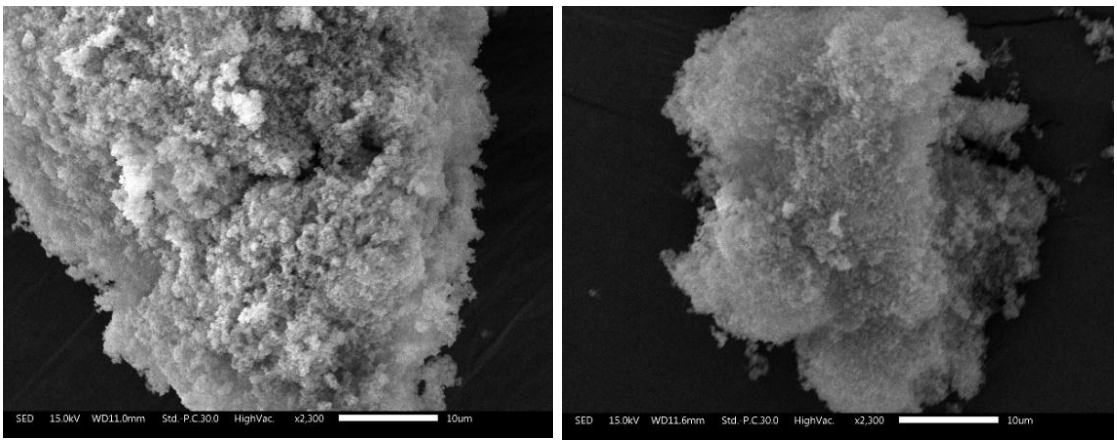
เอกสารอ้างอิง

1. Sawyer C, Mc Carty P, Parkin G. Chemistry for Environmental Engineering and Science: Fifth Edition. McGraw Hill Companies, Inc., Boston. 2003.
2. Wongsiri B. Removal of Lead and Copper from Wastewater by Iron-Oxide Coated Waste Silica Gel, Master of science (Environmental Science), Chulalongkorn University. 2004.
3. Kepert CJ. Metal-organic framework material. *In* D. W. Bruce, D. O. Hare and R. I. Walton, eds. Porous Materials. A John Wiley and Son, Ltd, United Kingdom. pp. 1-69. 2011.
4. Dangsepon C. Synthesis of Zeolite Y from Rice Husk Ash and Forming by Sintering Method for Pollutants Treatment in Municipal Wastewater, Master of science (Environmental Science), Kasetsart University. 2016.
5. Pattarith K. Drinking Water filter from Rice Husk Ash, Department of Science, Faculty of Science and Technology, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University, Phranakhon Si Ayutthaya, Thailand. 2013.
6. Boujelben N, Bouzid J, Elouear Z. Removel of Lead (II) Ions from Aqueous Solutions Using Manganese Oxide-coated Adsorbents: Characterization and Kinetic Study. Journals adsorption science & technology. 27: 117-191. 2009.

7. Forstner and Wittman. Metal transfer between solid and aqueous phase. Metal Pollution in the Aquatic Environment. 1981.
8. Tungkananuruk N, Tungkananuruk K. Principle of Chemical Water Quality Analysis, Kasetsart University Press, Bangkok. 2007.

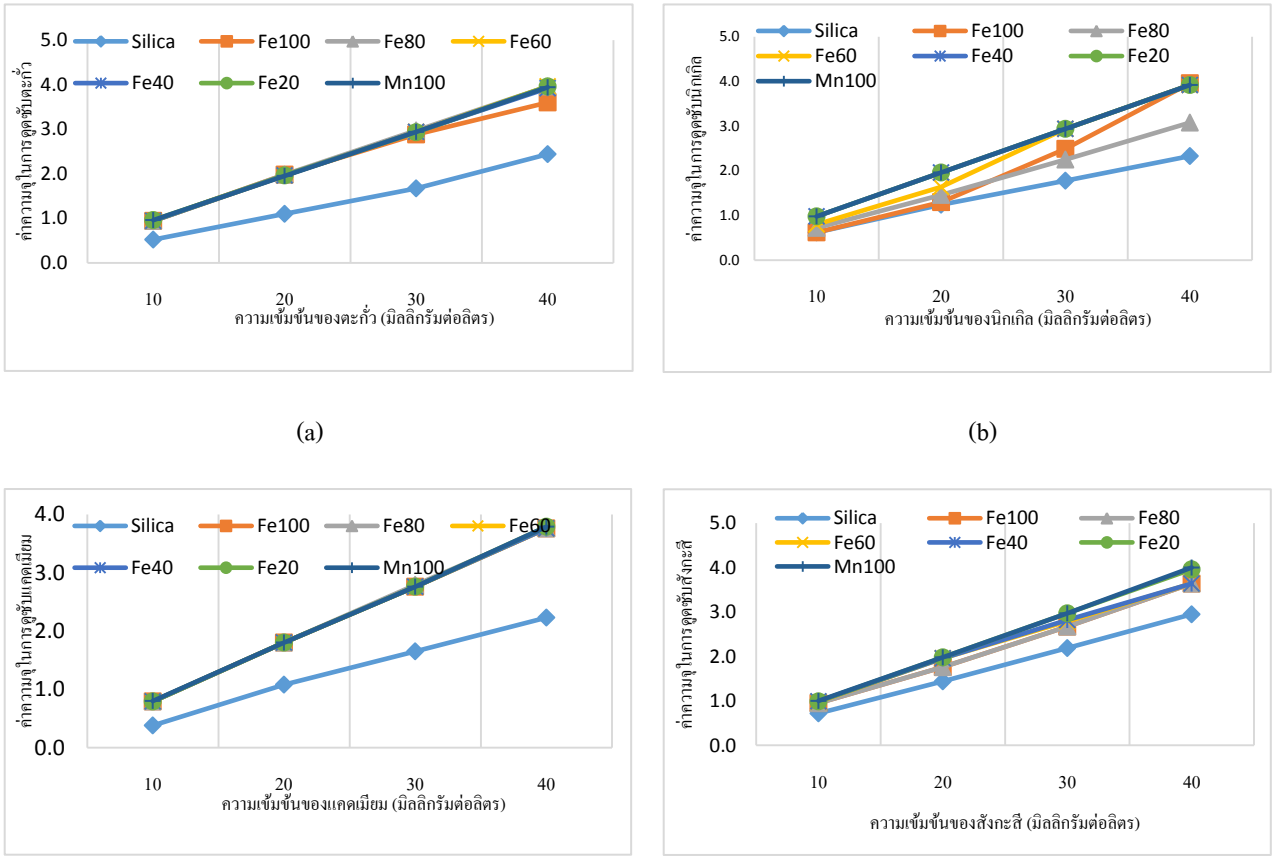
ตารางที่ 1 อัตราส่วนขององค์ประกอบที่เคลือบซิลิกา (กรัม)

วัสดุ	อัตราส่วนของ $FeSO_4.7H_2O$: $KMnO_4$ (กรัม)
Silica	-
Fe 100	1 : 0
Fe 80	0.8 : 0.2
Fe 60	0.6 : 0.4
Fe 40	0.4 : 0.6
Fe 20	0.2 : 0.8
Mn 100	0 : 1



(a) (b)

ภาพที่ 1 ไมโครกราฟจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 2,300 เท่า แสดงลักษณะทางกายภาพของ (a) ซิลิกา (b) ซิลิกาที่เคลือบด้วย Mn100



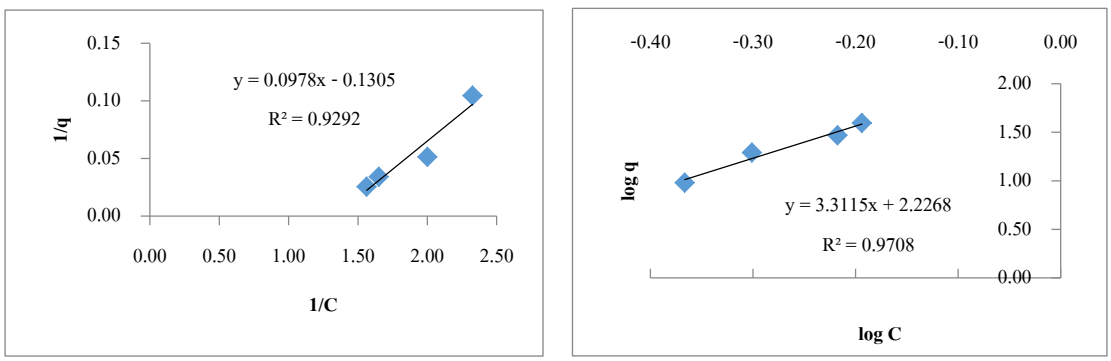
(a) (b)

(c) (d)

ภาพที่ 2 ค่าความจุในการดูดซับกับสารละลายความเข้มข้นที่ 10, 20, 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ของ (a) ตะกั่ว (b) นิกเกิล (c) แคดเมียม (d) สังกะสี

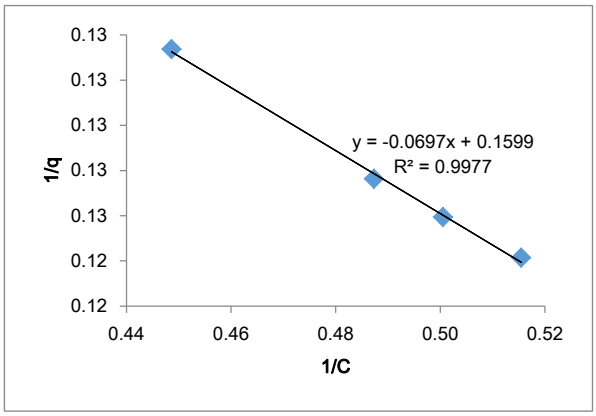
ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ได้จากการคำนวณสมการของไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และฟรุนดิช

วัสดุ Mn100	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2)	
	ไอโซเทอร์มแลงเมียร์	ไอโซเทอร์มฟรุนดิช
ตะกั่ว	0.9292	0.9708
แคดเมียม	0.9977	0.9994

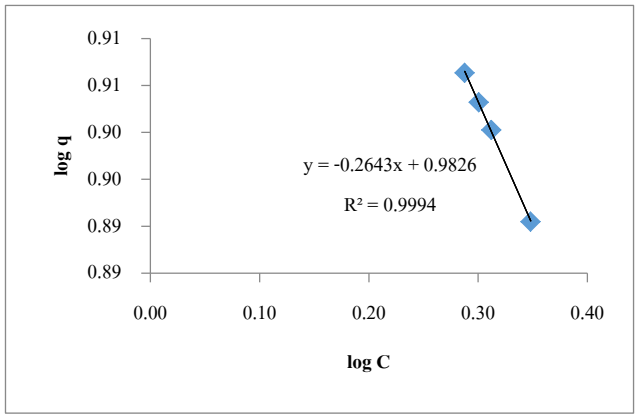


(a) ไอโซเทอร์มแลงเมียร์ (b) ไอโซเทอร์มฟรุนดิช

ภาพที่ 3 ไอโซเทอร์มของการดูดซับตะกั่วด้วยวัสดุ Mn100



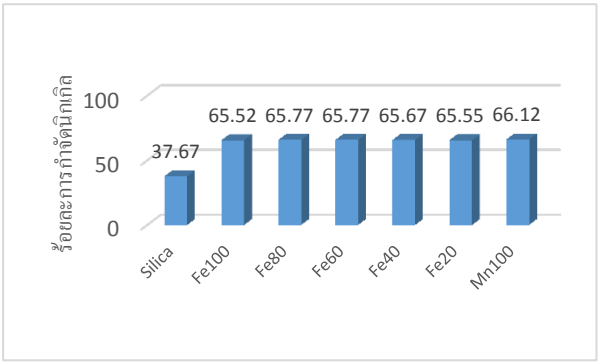
(a) ไอโซเทอร์มแลงเมียร์



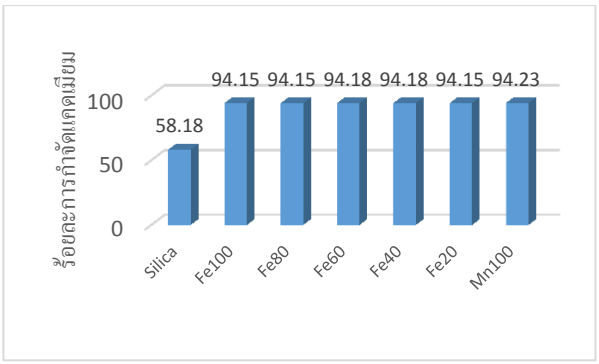
(b) ไอโซเทอร์มฟรุนดิช

ภาพที่ 4 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแคดเมียมด้วยวัสดุ Mn100

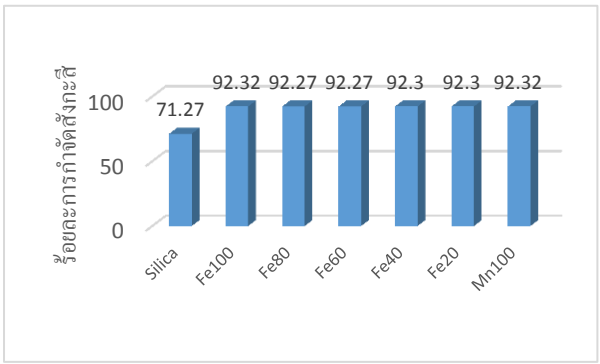
(a) ตะกั่ว



(b) นิกเกิล

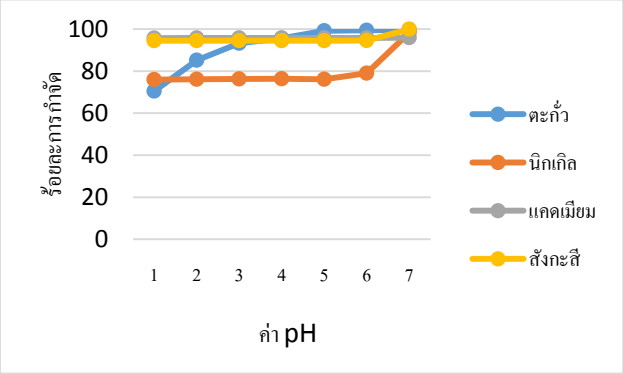


(c) แคดเมียม

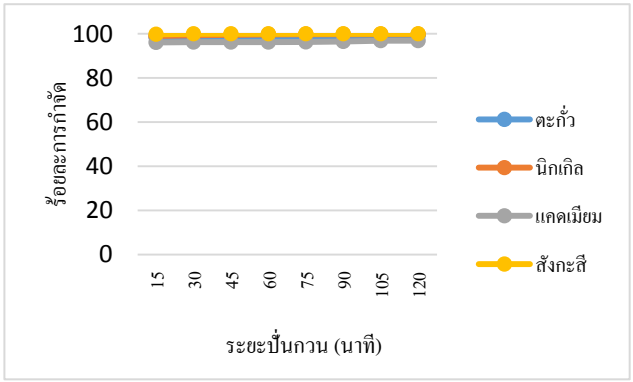


(d) สังกะสี

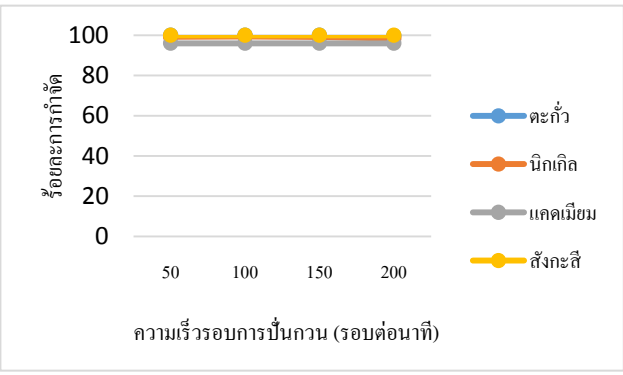
ภาพที่ 5 ความสามารถในการดูดซับด้วยซิลิกาเคลือบแมงกานีสและเหล็กออกไซด์ที่มีอัตราส่วนต่างกัน



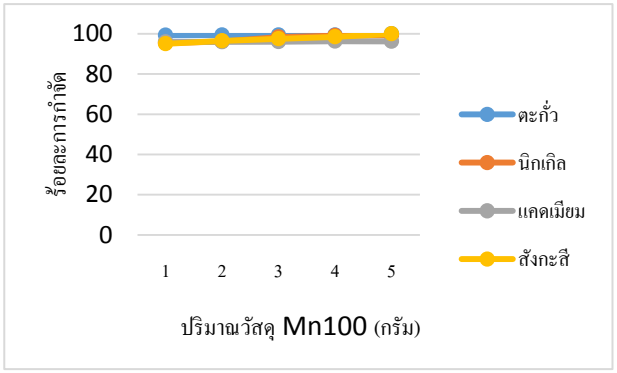
(a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH



(b) ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาปั่นกวน



(c) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการปั่นกวน



(d) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณวัสดุ Mn100

ภาพที่ 6 ร้อยละการกำจัดตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสีของตัววัสดุ Mn100 ที่เหมาะสม