การใช้ถ่านกระดูกกำจัดตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสีย

นายศุภกิจ พัฒนเตชะ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2557-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- 8 มิ.ย. 2547

I20832266

USING BONE CHARCOAL FOR TREATING LEAD AND CADMIUM FROM WASTEWATER

Mr.Supakit Pattanataycha

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-2557-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้ถ่านกระดูกกำจัดตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสีย
โดย	นาย ศุภกิจ พัฒนเตชะ
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ อรทัย ชวาลภาฤทธิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล สายพานิช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธาขาวเธียร)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ)

ศุภกิจ พัฒนเตชะ : การใช้ถ่านกระดูกกำจัดตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสีย. (USING BONE CHARCOAL FOR TREATING LEAD AND CADMIUM FROM WASTEWATER) อ. ที่ปรึกษา: รศ.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์, จำนวนหน้า 119 หน้า.
ISBN 974-17-2557-4

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการกำจัดโลหะหนัก 2 ชนิดได้แก่ ตะกั่ว และ แคดเมียม โดยใช้ถ่านกระดูกที่เตรียมจากการเผากระดูกโคและกระบือโดยทำการทดลองแบบแบตช์และคอลัมน์ รวมทั้งศึกษาลักษณะทางกายภาพของถ่านกระดูกก่อนและหลังการทดลอง ซึ่งการทดลองแบบแบตช์ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิในการเตรียมถ่านกระดูกที่อุณหภูมิต่ำ (400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส) และศึกษาผลของความเข้มข้นโลหะหนักเริ่มต้น พีเอชและเวลากวนสัมผัส ต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำ รวมทั้งการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ ส่วนการทดลองแบบคอลัมน์โดยใช้น้ำเสียจริงและน้ำเสียสังเคราะห์ ผลการทดลองแบบแบตช์พบว่า ถ่านกระดูกกำจัดตะกั่วและแคดเมียมได้ดีที่อุณหภูมิการเตรียมการเผาที่ 500 และ 400 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงพีเอชต่อผลของประสิทธิภาพพบว่าสำหรับตะกั่วถ่านกระดูกจะมีความสามารถในการดูดซับมากที่สุดที่พีเอช 4-6 และสำหรับแคดเมียมถ่านกระดูกจะมีความสามารถในการดูดซับมากที่สุดที่พีเอช 5-7 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับถ่านกระดูกมีความสัมพันธ์กับไอโซเทอมการดูดซับทั้งของแลงมัวร์และฟรุนดลิช โดยเฉพาะการดูดซับของแคดเมียม ส่วนของตะกั่วมีความคลาดเคลื่อนบ้างเนื่องจากการตกตะกอน โดยมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วสูงที่สุดที่ 617.5 มก./ก. ถ่านกระดูก และความสามารถในการดูดซับแคดเมียมสูงสุดที่ 68 มก./ก. ถ่านกระดูก

จากผลการวิเคราะห์ศึกษาโครงสร้างทางกายภาพของถ่านกระดูก สรุปได้ว่าคาร์บอเนตจะมีสัดส่วนที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงขึ้นซึ่งคาร์บอเนตที่แทรกอยู่ระหว่างโครงสร้างพันธะจะทำให้ถ่านกระดูกสามารถละลายน้ำได้มากขึ้น ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการกำจัดโลหะหนัก และคาร์บอเนตที่อยู่ในถ่านกระดูกยังทำให้กระดูกมีรูพรุนมากขึ้นด้วย การวิเคราะห์ XRD ภายหลังการทดลอง พบว่าปฏิกิริยาการกำจัดตะกั่วเกิดจากปฏิกิริยาการตกตะกอน คือ ตะกั่วสามารถจับกับอพาไทท์ตกตะกอนเป็น เลดไฮดรอกซีฟอสเฟต และปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างตะกั่วและแคลเซียมในสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกซีอพาไทท์ซึ่งต่างจากแคดเมียมที่ไม่สามารถตรวจพบได้เนื่องจากแคดเมียมมีกลไกการกำจัดที่แตกต่างออกไป

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2545

4270567321 : MAJOR Environmental Engineering

KEYWORD : Adsorption / Heavy Metals / Lead / Cadmium / Bone Charcoal

SUPAKIT PATTANATAYCHA : USING BONE CHARCOAL FOR TREATING LEAD AND CADMIUM FROM WASTEWATER. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. ORATHAI CHAVALAPARIT, 119 pp , ISBN 974-17-2557-4

This research was conducted to study the capabilities lead and cadmium removal using bone charcoal which was prepared from calcining cattle's bones. The study consisted of both completely mix batch and column experiments . The physical structure of before- and after-experiment of bone charcoal was investigated. The batch experiment was aimed to study the effects of the temperatures which was used for preparing the bone charcoal (400, 500 and 600° C), initial concentration of lead and cadmium, solution pH, and contact time on lead and cadmium adsorption by bone charcoal. Adsorption isotherm was used to model the batch adsorption data. The application of bone charcoal in removing heavy metals in continuous flow system was tested in the column study using both synthetic and industrial wastewater.

The batch experiment results show that lead is most effectively removed by the bone charcoal prepared at 500°C while cadmium is most effectively removed by bone charcoal prepared at 400°C. The optimum pH range for the removal are 4-6 for lead and 5-7 for cadmium. Cadmium adsorption results fit well with Freundlich equation while lead adsorption results fit well with Langmuir equation. The deviation of the results from the model is due to precipitation. The adsorption capacity of bone charcoal is 617.5 mg/g for lead and 68 mg/g for cadmium. The main mechanisms of lead removal by bone charcoal are the formation of co-precipitation.

Owing to physical structure analysis of bone charcoal, Carbonate proportion is going to decrease when the temperature increases. Carbonate that is in between bond structure is able to make bone charcoal more dissolved and this is an important mechanism in metal removal. Furthermore, Carbonate causes bone have more surface area and pore volume. Lastly , after the XRD experiment, lead is removed by apatite precipitating out to be lead hydroxyphosphate; on the other hand, cadmium bonding with apatite cannot be detected by XRD because of its low crystallinity and other removal mechanisms.

Department	Environmental Engineering	Student's signature .....
Field of Study	Environmental Engineering	Teacher's signature.....
Academic Year	2002	

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัยนี้ ที่ได้ให้คำแนะนำต่าง ๆ จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงมาด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คณะอาจารย์รวมถึงครูในห้องปฏิบัติการทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความรู้และคำแนะนำต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณโรงงานบริษัทอุตสาหกรรมกระดูกสัตว์ จำกัด สำหรับกระดูกป่นที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมถ่านกระดูกในงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณสำหรับกำลังใจอันแสนอบอุ่น และความช่วยเหลือต่าง ๆ มากมายของเพื่อน ๆ พี่ ๆ และ น้อง ๆ ทุกคนในภาควิชา

ใครมีปัญหาเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ส่ง E-mail มาได้ที่ supakitp@hotmail.com

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญรูป ..... ฎ

บทที่

1 บทนำ 1

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

วัตถุประสงค์ของการวิจัย 3

ขอบเขตการวิจัย 3

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4

2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5

แนวคิดและทฤษฎี 5

2.1 โลหะหนัก 5

2.2 สมบัติทางกายภาพและเคมีของตะกั่ว 5

2.2.1 พิษของตะกั่ว 8

2.2.2 ประโยชน์ของตะกั่ว 9

2.3 แคดเมียม 9

2.4 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย 10

2.4.1 การตกตะกอนผลึกทางเคมี 10

2.4.2 การแลกเปลี่ยนอิออน 11

2.4.3 การรีเวิร์ส ออสโมซีส 11

2.4.4 การออกซิเดชันและการรีดักชัน 12

2.4.5 การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า 12

2.4.6 การระเหย 12

2.4.7 การอิเล็กโตรไดอะไลซิส 13

2.4.8 การดูดติดผิว 13

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.5 ถ่านกระดูก....18
2.6 ผลงานวิจัยที่ผ่านมา....20
3 วัสดุอุปกรณ์ และวิธีดำเนินการวิจัย....22
3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี....22
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย....22
3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย....22
3.2 แผนการทดลอง....24
3.2.1 ขั้นตอนการทดลอง....24
3.2.2 ตัวแปรในการทดลอง....25
3.3 การเตรียมถ่านกระดูก....28
3.4 การเตรียมน้ำเสียโลหะหนัก....29
3.4.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว....29
3.4.2 การเตรียมน้ำสังเคราะห์แคดเมียม....29
3.4.3 การเตรียมน้ำเสียจริงตะกั่ว....29
3.5 การดำเนินการทดลอง....30
3.5.1 การหาสภาวะการเตรียมถ่านกระดูกที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก โดยการทดลองแบบแบตช์....30
3.5.2 การศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่มีผลต่อการกำจัดโลหะหนัก โดยทำการทดลองแบบแบตช์....30
3.5.3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในการกำจัดโลหะหนักโดยทำการทดลองแบบแบตช์....31
3.5.4 การศึกษาถึงประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะในน้ำเสียจริงและสังเคราะห์โดยการทดลองแบบคอลัมน์....32
3.5.5 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างวัสดุของถ่านกระดูก....33
3.6 การบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตหลอดภาพ....33
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล....35

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างวัสดุของถ่านกระดูก
ก่อนการทดลอง 35
4.1.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างวัสดุของ
ถ่านกระดูกโดยใช้เครื่องSpecific Surface Area Analyzer 37
4.1.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างวัสดุของ
ถ่านกระดูกโดยใช้เครื่อง FTIR 38
4.1.3 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างวัสดุของ
ถ่านกระดูกโดยใช้เครื่องX-Ray Diffraction Spectrometer 40
4.2 การศึกษาสภาวะการเตรียมถ่านกระดูกที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก 42
4.2.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยถ่านกระดูก 42
4.2.2 ผลการศึกษาสภาวะการเตรียมถ่านกระดูกในการกำจัดแคดเมียม 46
4.2.3 สรุปผลการศึกษาสภาวะการเตรียมถ่านกระดูกที่เหมาะสม 49
4.3 ผลการศึกษาของพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่มีต่อการกำจัดโลหะหนัก 50
4.3.1 ผลการศึกษาของพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่มีต่อการกำจัดตะกั่ 50
4.3.2 ผลการศึกษาของพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่มีต่อ
การกำจัดแคดเมียม 55
4.3.3 สรุปผลการศึกษาพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม 59
4.4 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm)
ในการกำจัดโลหะหนัก 60
4.4.1 ผลการศึกษาเวลาในการดูดซับตะกั่วที่เหมาะสม
กับการศึกษาไอโซเทอม 60
4.4.2 ผลการศึกษาเวลาในการดูดซับแคดเมียมที่เหมาะสม
กับการศึกษาไอโซเทอม 61
4.4.3 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในการกำจัดตะกั่ว 63
4.4.4 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในการกำจัดแคดเมียม 64
4.5 การศึกษาการกำจัดตะกั่วโดยใช้ถ่านกระดูก โดยทดการทดลอง
แบบคอลัมน์ 68

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.6 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างวัสดุของถ่านกระดูก
หลังการทดลองกำจัดตะกั่วและแคดเมียม....72
4.6.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างวัสดุของ
ถ่านกระดูกหลังการทดลองโดยใช้เครื่องFTIR....72
4.6.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างวัสดุของ
ถ่านกระดูกหลังการทดลองโดยใช้เครื่องXRD....76
4.7 การคำนวณเพื่อยืนยันสมมติฐานการกำจัดโลหะหนักของถ่านกระดูก
เนื่องจากการตะกอนกลับของผลึกของเลดไฮดรอกซีฟอสเฟต....78
4.8 การประเมินค่าใช้จ่ายในการเผากระดูกโดยใช้เตาไฟฟ้า....79
4.9 ข้อเสนอแนะการนำถ่านกระดูกไปกำจัดตะกั่วในน้ำเสีย....80
5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ....81
รายการอ้างอิง....83
ภาคผนวก....86
ภาคผนวก ก ผลการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมถ่านกระดูก
สำหรับกำจัดน้ำเสียตะกั่วและแคดเมียมในการทดลองแบบแบตช์....87
ภาคผนวก ข ผลการศึกษาพีเอชที่เหมาะสมในการ
ดูดซับโลหะหนักในการทดลองแบบแบตช์....97
ภาคผนวก ค ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm)
ของการกำจัดโลหะด้วยถ่านกระดูก โดยการทดลองแบบแบตช์....104
ภาคผนวก ง การศึกษาถึงประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะในน้ำเสีย
โดยการทดลองแบบคอลัมน์....111
ภาคผนวก จ มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม....114
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์....119

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 จำนวนโคกระบือที่อนุญาตให้ฆ่าเป็นอาหาร ตั้งแต่ปี 2539-2544 2
ตารางที่ 2.1 ชนิดของโลหะหนักที่พบในอุตสาหกรรมต่าง ๆ 6
ตารางที่ 2.2 ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภท 7
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบของถ่านกระดูกเชิงการค้าชื่อ Brimac216 19
ตารางที่ 4.1 ผลการวัดพื้นที่ผิว ปริมาตรโพรง และขนาดของโพรงของถ่าน
กระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิต่าง ๆ 37
ตารางที่ 4.2 ความสามารถในการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมสูงสุดของ
สารดูดซับชนิดต่าง ๆ 67

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 3.1 เครื่องเขย่า(Shaker) ที่ใช้ทำการทดลอง.....23
รูปที่ 3.2 หลอดเขย่าสารขนาด 50 มิลลิลิตร.....23
รูปที่ 3.3 เตาเผาที่ใช้ในการทดลอง.....24
รูปที่ 3.4 รูปจำลองการทดลองแบบคอลัมน์.....32
รูปที่ 3.5 แผนผังระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตหลอดภาพ.....34
รูปที่ 4.1 กระดูกป่นที่เตรียมโดยเผาที่อุณหภูมิ400 องศาเซลเซียส.....35
รูปที่ 4.2 กระดูกป่นที่เตรียมโดยเผาที่อุณหภูมิ500 องศาเซลเซียส.....36
รูปที่ 4.3 กระดูกป่นที่เตรียมโดยเผาที่อุณหภูมิ600 องศาเซลเซียส.....36
รูปที่ 4.4 ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดตะกั่ว
ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 ด้วย ถ่าน
กระดูกปริมาณ0.2 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ที่สภาวะอุณหภูมิการเตรียมต่าง ๆ.....38
รูปที่ 4.5 ผลวิเคราะห์ FTIR ของถ่านกระดูกก่อนการทดลอง.....39
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการเตรียมถ่านกระดูกและ
ปริมาณไฮดรอกซีอพาไตท์ในถ่านกระดูก.....40
รูปที่ 4.7 ผลวิเคราะห์ XRD ของถ่านกระดูกก่อนการทดลอง.....41
รูปที่ 4.8 ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดตะกั่ว
ความเข้มข้นเริ่มต้น10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ5 ด้วยถ่านกระดูก
ปริมาณ0.2 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ที่สภาวะอุณหภูมิการเตรียมต่าง ๆ.....43
รูปที่ 4.9 ร้อยละการกำจัดของตะกั่วหลังการทดลองการกำจัดตะกั่ว
ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ5 ด้วยถ่านกระดูก
ปริมาณ0.2 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ที่สภาวะอุณหภูมิการเตรียมต่าง ๆ.....43
รูปที่ 4.10 ค่าพีเอชของน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดตะกั่วความเข้มข้น
เริ่มต้น10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 ด้วยถ่านกระดูก
ปริมาณ0.2 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ที่สภาวะอุณหภูมิการเตรียมต่าง ๆ.....44
รูปที่ 4.11 ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดตะกั่ว
ความเข้มข้นเริ่มต้น50 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ5 ด้วยถ่านกระดูก
ปริมาณ0.2 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ที่สภาวะอุณหภูมิการเตรียมต่าง ๆ.....44

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.12 ร้อยละการกำจัดของตะกั่วหลังการทดลองการกำจัดตะกั่ว ความเข้มข้นเริ่มต้น50 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 ด้วยถ่านกระดูก ปริมาณ0.2 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ที่สภาวะอุณหภูมิการเตรียมต่าง ๆ.....45

รูปที่ 4.13 ค่าพีเอชของน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น50 มก./ล. ค่าพี เอชเริ่มต้นเท่ากับ5 ด้วยถ่านกระดูก ปริมาณ0.2 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ที่สภาวะอุณหภูมิการเตรียมต่าง ๆ.....46

รูปที่ 4.14 ความเข้มข้นของแคดเมียมที่เหลือในน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดแคดเมียมความเข้มข้นเริ่มต้น10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ5 ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ1 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ที่สภาวะอุณหภูมิการเตรียมต่าง ๆ.....47

รูปที่ 4.15 ร้อยละการกำจัดของแคดเมียมที่เหลือในน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดแคดเมียมความเข้มข้นเริ่มต้น10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ5 ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ1 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ที่สภาวะอุณหภูมิการเตรียมต่าง ๆ.....47

รูปที่ 4.16 ค่าพีเอชของน้ำเสียหลังการทดลองกำจัดแคดเมียมความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ5 ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ1 ก./ล. น้ำตัวอย่าง ที่สภาวะอุณหภูมิการเตรียมต่าง ๆ.....48

รูปที่ 4.17 ความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหลือในน้ำเสียหลังการทดลองกำจัดตะกั่ว ความเข้มข้นเริ่มต้น10 มก./ล. ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ0.2 ก./ล. น้ำตัวอย่างที่พีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ.....51

รูปที่ 4.18 ร้อยละการกำจัด(จากการดูดซับ+การตกตะกอน)ในน้ำเสียหลังการทดลองกำจัดตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น10 มก./ล. ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ0.2 ก./ล. น้ำตัวอย่าง ที่พีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ.....51

รูปที่ 4.19 ความสามารถในการดูดซับของถ่านกระดูกปริมาณ0.2 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ความเข้มข้นตะกั่ว 10 มก./ล. ที่พีเอชต่าง ๆ.....52

รูปที่ 4.20 ความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหลือในน้ำเสียหลังการทดลองกำจัดตะกั่ว ความเข้มข้นเริ่มต้น50 มก./ล. ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ0.2 ก./ล. น้ำตัวอย่าง ที่พีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ.....53

รูปที่ 4.21 ร้อยละการกำจัด(จากการดูดซับ+การตกตะกอน)ในน้ำเสียหลังการทดลองกำจัดตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น50 มก./ล. ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ0.2 ก./ล.น้ำตัวอย่างที่พีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ.....53

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.22 ความสามารถในการดูดซับของถ่านกระดูกปริมาณ0.2 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ความเข้มข้นแคดเมียม 50 มก./ล. ที่พีเอชต่าง ๆ....54
รูปที่ 4.23 ความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหลือในน้ำเสียหลังการทดลองกำจัดแคดเมียม ความเข้มข้นเริ่มต้น10 มก./ล. ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ1 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ที่พีเอชต่าง ๆ....56
รูปที่ 4.24 ร้อยละการกำจัด(จากการดูดซับ+การตกตะกอน)ในน้ำเสียหลังการทดลอง กำจัดแคดเมียมความเข้มข้นเริ่มต้น10 มก./ล. ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ1 ก./ล. น้ำตัวอย่าง ที่พีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ....56
รูปที่ 4.25 ความสามารถในการดูดซับของถ่านกระดูกปริมาณ1 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ความเข้มข้นแคดเมียม 10 มก./ล. ที่พีเอชต่าง ๆ....57
รูปที่ 4.26 ความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหลือในน้ำเสียหลังการทดลองกำจัดแคดเมียม ความเข้มข้นเริ่มต้น40 มก./ล. ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ1 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ที่พีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ....58
รูปที่ 4.27 การกำจัด(จากการดูดซับ+การตกตะกอน)ในน้ำเสียหลังการทดลองกำจัด แคดเมียมความเข้มข้นเริ่มต้น40 มก./ล. ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ1 ก./ล. น้ำตัวอย่าง ที่พีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ....58
รูปที่ 4.28 ความสามารถในการดูดซับของถ่านกระดูกปริมาณ1 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ความเข้มข้นแคดเมียม 40 มก./ล. ที่พีเอชต่าง ๆ....59
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระว่างเวลาในการเขย่ากับร้อยละการกำจัดตะกั่วด้วย ถ่านกระดูกปริมาณ0.04 ก./ล. โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 100 มก./ล. พีเอช 5....60
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระว่างเวลาในการเขย่ากับร้อยละการกำจัดตะกั่วด้วย ถ่านกระดูกปริมาณ0.2 ก./ล. โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 100 มก./ล. พีเอช 5....61
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระว่างเวลาในการเขย่ากับร้อยละการกำจัดแคดเมียม ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ0.1 ก./ล. โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียม ความเข้มข้น 40 มก./ล. พีเอช 6....62

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระว่างเวลาในการเขย่ากับร้อยละการกำจัดแคดเมียม
ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ1.5 ก./ล. โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียม
ความเข้มข้น 40 มก./ล. พีเอช 6 62
รูปที่ 4.33 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของถ่านกระดูกที่ 500 องศาเซลเซียส
ในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียตะกั่วสังเคราะห์ความเข้มข้น 100 มก./ล.
ที่พีเอช 5 63
รูปที่ 4.34 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิชของถ่านกระดูกที่ 500 องศาเซลเซียส
ในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียตะกั่วสังเคราะห์ความเข้มข้น 100 มก./ล.
ที่พีเอช 5 64
รูปที่ 4.35 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของถ่านกระดูกที่ 400 องศาเซลเซียส
ในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ความเข้มข้น 40
มก./ล. ที่พีเอช 6 65
รูปที่ 4.36 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิชของถ่านกระดูกที่ 400 องศาเซลเซียส
ในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ความเข้มข้น 40
มก./ล. ที่พีเอช 6 66
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์กับร้อยละการกำจัด
ตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 1 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น5 69
รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์พีเอชน้ำเสียที่
จุดเก็บต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 1 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น5 69
รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์กับร้อยละการกำจัด
ตะกั่วในน้ำเสียจริงความเข้มข้น1 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น5 70
รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์พีเอชน้ำเสียที่
จุดเก็บต่าง ๆ ในน้ำเสียจริงเข้มข้น1 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น5 70
รูปที่ 4.41 รูปคอลัมน์ 71
รูปที่ 4.42 จุดเก็บตัวอย่าง 72
รูปที่ 4.43 ผลวิเคราะห์ FTIR ของถ่านกระดูกก่อนและหลังการทดลอง
(a) 400°C (b) 500°C 73
รูปที่ 4.44 ผลวิเคราะห์ FTIR ของถ่านกระดูกก่อนและหลังการทดลอง
(a) 600°C (b) 800°C 74

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.45 ผลวิเคราะห์ FTIR ของถ่านกระดูกก่อนและหลังการทดลอง 1000°C.....75
รูปที่ 4.46 ผลวิเคราะห์ XRD ของถ่านกระดูกหลังการทดลอง.....77