

การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้ถ่านกระดุก



นางสาวอุบลรัตน์ วาริชวัฒนะ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1190-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REMOVAL OF HEAVY METALS FROM WASTEWATER  
USING BONE CHARCOAL

Miss Ubonrat Warichvattana

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 2001

ISBN 974-03-1190-3

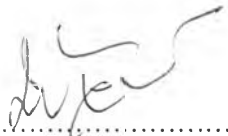
หัวข้อวิทยานิพนธ์                      การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้ถ่านกระตุ้น  
โดย    นางสาวอุบลรัตน์ วาริชวัฒนะ  
สาขาวิชา                                    วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
อาจารย์ที่ปรึกษา                         รองศาสตราจารย์อรรถัย ขวาลภาฤทธิ์

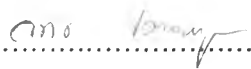
---

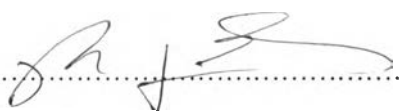
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


.....  ..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....  ..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์บุญยง ไฉ่ห้วงศ์วัฒน์)

.....  ..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์อรรถัย ขวาลภาฤทธิ์)

.....  ..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

.....  ..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธา ชาวเขียว)

อุบลรัตน์ วาวิชัยวัฒน์ : การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้ถ่านกระดูก (REMOVAL OF HEAVY METALS FROM WASTEWATER USING BONE CHARCOAL) อาจารย์ที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์อรรถัย ขวาลภาฤทธิ์, 140 หน้า. ISBN 974-03-1190-3.

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงความสามารถและประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสามชนิดได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม และโครเมียมด้วยถ่านกระดูกที่เตรียมจากการเผากระดูกโคกระบือที่อุณหภูมิ 600, 800 และ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง โดยทำการทดลองแบบแบดซ์และแบบคอลัมน์ ซึ่งการทดลองแบบแบดซ์ได้ศึกษาถึงผลของสภาวะการเตรียมถ่านกระดูกได้แก่ อุณหภูมิและระยะเวลาในการเผา และผลของคุณสมบัติของน้ำเสียเริ่มต้นได้แก่ ความเข้มข้นโลหะหนักและพีเอชของน้ำเสียที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก ส่วนการทดลองแบบคอลัมน์ได้ศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของน้ำเสียเริ่มต้นรวมถึงปริมาตรน้ำเสียที่กำจัดได้ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของโลหะหนักแต่ละชนิด ผลการทดลองในแบบแบดซ์พบว่า ถ่านกระดูกสามารถกำจัดตะกั่วได้ดีกว่าแคดเมียม แต่ไม่สามารถกำจัดโครเมียมได้ เมื่อพิจารณาถึงสภาวะการเตรียมถ่านกระดูกพบว่าที่อุณหภูมิการเผาที่ 600 องศาเซลเซียสจะมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุด โดยที่ 800 และ 1000 องศาเซลเซียสจะให้ประสิทธิภาพรองลงมาตามลำดับ สำหรับระยะเวลาในการเผาที่ 8, 10 และ 12 ชั่วโมงให้ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกันในแต่ละอุณหภูมิการเผา ซึ่งถ่านกระดูกที่เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมงเป็นสภาวะที่การเตรียมถ่านกระดูกที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดในการทดลอง และเมื่อพิจารณาถึงค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียพบว่า ในช่วงที่พีเอชต่ำกว่า 4 เมื่อพีเอชของน้ำเสียเพิ่มสูงขึ้น ก็จะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดจะสูงขึ้นด้วย แต่ในช่วงที่พีเอชสูงกว่า 6 เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดจะลดลง โดยถ่านกระดูกสามารถกำจัดตะกั่วและแคดเมียมได้ประสิทธิภาพสูงในช่วงที่พีเอชระหว่าง 4 ถึง 6 ซึ่งพบว่าถ่านกระดูกสามารถกำจัดตะกั่วได้ประสิทธิภาพสูงที่สุดโดยคิดเป็น 458.55 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่านกระดูกที่ความเข้มข้นตะกั่วในน้ำเสียเริ่มต้นเป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรและพีเอชเริ่มต้นเป็น 5 ส่วนแคดเมียมมีประสิทธิภาพการกำจัดเป็น 29.80 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่านกระดูกที่ความเข้มข้นเริ่มต้นในน้ำเสีย 40 มิลลิกรัมต่อลิตรและพีเอชเริ่มต้นเป็น 6 ส่วนผลการศึกษาไอโซเทอมโดยใช้ถ่านกระดูกพบว่าความสามารถในการกำจัดตะกั่วมีความสัมพันธ์กับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช และการกำจัดแคดเมียมมีความสัมพันธ์กับไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ โดยกลไกการกำจัดตะกั่วเกิดจากการเกิดพันธะทางเคมีระหว่างไอออนของตะกั่วกับโครงสร้างแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไตต์ เนื่องจากผลการศึกษาโครงสร้างของถ่านกระดูกพบว่าถ่านกระดูกก่อนทำการทดลองมีโครงสร้างเป็นแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไตต์ (Calcium Hydroxyapatite;  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ) และถ่านกระดูกหลังจากกำจัดตะกั่วมีโครงสร้างเป็นลีดฟอสเฟตไฮดรอกไซด์ (Lead Phosphate Hydroxide;  $\text{Pb}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ) จึงสรุปได้ว่าการดูดติดผิวของตะกั่วและแคดเมียมด้วยถ่านกระดูกจะมีแบบเกิดพันธะเคมีกับตัวดูดซับหรือการดูดติดผิวทางเคมี ในส่วนผลการทดลองแบบคอลัมน์พบว่าสำหรับการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้น 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรมีประสิทธิภาพการกำจัดเป็น 85.28 และ 63.08 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่านกระดูก และสามารถบำบัดน้ำได้ประมาณ 4937.14 และ 1851.43 เท่าของปริมาตรเบด สำหรับแคดเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรมีประสิทธิภาพการกำจัดเป็น 2.62 และ 2.38 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่านกระดูก และสามารถบำบัดน้ำได้ประมาณ 308.57 และ 137.14 เท่าของปริมาตรเบด

ภาควิชา	<u>วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม</u>	ลายมือชื่อนิสิต	<u>อุบลรัตน์ วาวิชัยวัฒน์</u>
สาขาวิชา	<u>วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม</u>	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา	<u>อ.อรรถัย</u>
ปีการศึกษา	<u>2544</u>		

# # 4170653521: MAJOR Environmental Engineering

KEYWORD: Adsorption / Heavy metals / Lead / Cadmium / Chromium / Bone Charcoal

UBONRAT WARICHVATTANA: REMOVAL OF HEAVY METALS FROM WASTEWATER USING BONE CHARCOAL. THESIS ADVISOR : ASSC. PROF. ORATHAI CHAVALAPARITH, 140 pp. ISBN 974-03-1190-3.

This study was conducted to determine the efficiency of heavy metals removal by bone charcoal. The bone charcoal was prepared from bones by calcining at various temperatures (namely, 600, 800 and 1000 °C) and various length of times (namely, 8, 10 and 12 hours). Three heavy metals (lead, cadmium and chromium) were used in performing batch and column experiments. The aims of batch experiment were to study effects of conditions for preparing bone charcoal (namely, temperature and timing of calcining), initial concentration of heavy metals and initial pH values of wastewater on removal efficiency of heavy metals . And the aim of column experiment was to study effects of initial concentration of heavy metal in wastewater on removal efficiency including volumes of wastewater through column ensured that the heavy metal concentration in filtered water complied with the industrial wastewater standards. The batch experiment results showed lead and cadmium were effectively removed by bone charcoal and lead removal efficiency was higher than cadmium. Chromium was not successful by this method. Considering the results of conditions for preparing bone charcoal that calcining at 600 °C had more removal efficiency than calcining at 800 and 1000 °C, but, in term, timing of calcining were not difference. Bone charcoal that calcining for 12 hours at 600 °C was found to be the most appropriate bone charcoal to be used in heavy metals removal for this study. And, in term of initial pH values showed the removal efficiency related to pH values at the lower pH than 4 but its inversely related to pH values at the higher pH than 6, the highest removal efficiency were showned in the pH range of 4 to 6. These showed adsorption capacity of lead on bone charcoal was 485.55 mg/g of bone charcoal at lead concentration of 100 mg/L at initial pH 5, and the adsorption capacity of cadmium was 29.80 mg/g at cadmium concentration of 40 mg/L at initial pH 6. The adsorption isotherm for lead removal was fitted in the freundlich isotherm, and cadmium was fitted in the langmuir isotherm. And the mechanism of lead removal was chemical bonding between lead ion and calcium hydroxyapatite structure in bone charcoal, cause of result of the structure 's study showed untreated bone charcoal formed structure of calcium hydroxyapatite; Ca<sub>10</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>(OH)<sub>2</sub> and lead removed bone charcoal formed lead phosphate hydroxide; Pb<sub>10</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>(OH)<sub>2</sub>. Therefore the adsorption of lead and cadmium by bone charcoal were formed chemical bonding with adsorbent or chemisorption. According to the column experiment 's results showed the breakthrough capacity of lead were 85.28 and 63.08 mg/g and volumes of treated water were 4937.14 and 1851.43 BV. at 10 mg./L. and 20 mg./L. lead wastewater, respectively, and the breakthrough capacity of cadmium were 2.62 and 2.38 mg./g. and volumes of treated water were 308.57 and 137.14 BV. at 5 mg./L. and 10 mg./L. cadmium wastewater, respectively.

Department Environmental Engineering

Student's signature *Ubonrat Warichvattana*

Field of study Environmental Engineering

Advisor's signature *Orathai Chavalaparith*

Academic Year 2001

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์อรรถัย ขวาลภาฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัยนี้ ที่ได้ให้คำแนะนำต่างๆ อย่างมากมาย งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงมาได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณในความเมตตากรุณา มา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ คณะอาจารย์รวมถึงครูปฏิบัติการทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆ แก่ผู้วิจัย และขอขอบพระคุณ ทนอุดหนุนการวิจัยต่างๆ ได้แก่ ทนวิจัยบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุนมูลนิธิชิน ไสภณพนิช ประจำปี 2542 ที่ได้มอบเงินอุดหนุนการวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณโรงงานบริษัทอุตสาหกรรมกระดูกสัตว์ไทย สำหรับกระดูกป่นที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมถ่านกระดูกในงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณสำหรับกำลังใจอันแสนอบอุ่น และความช่วยเหลือต่างๆมากมาย ของเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกคนในภาควิชาฯ

และสุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และคุณย่า เป็นอย่างสูง สำหรับการสนับสนุนทั้งด้านกำลังใจและกำลังทรัพย์แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 โลหะหนัก.....	4
2.2 ตะกั่ว.....	6
2.2.1 สมบัติทั่วไปของตะกั่ว.....	6
2.2.2 ตะกั่วในน้ำเสีย.....	9
2.3 แคดเมียม.....	12
2.4 โครเมียม.....	12
2.5 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย.....	14
2.5.1 การตกตะกอนผลึกทางเคมี.....	14
2.5.2 การแลกเปลี่ยนไอออน.....	15
2.5.3 การรีเวิร์ออสโมซิส.....	16
2.5.4 การออกซิเดชันและรีดักชัน.....	16
2.5.5 การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า.....	16
2.5.6 การระเหย.....	17
2.5.7 การอิเล็กโทรไดอะไลซิส.....	17
2.5.8 การดูดติดผิว.....	17

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 กระบวนการดูดติดผิว.....	17
2.6.1 กลไกการดูดติดผิวและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล.....	21
2.6.1.1 กลไกการดูดติดผิว.....	21
2.6.1.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล.....	22
2.6.2 สมดุลและไอโซเทอมการดูดติดผิว.....	23
2.6.2.1 รูปแบบของไอโซเทอมการดูดซับ.....	24
2.6.2.2 สมการที่ใช้อธิบายไอโซเทอมการดูดซับ.....	26
2.6.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดติดผิว.....	31
2.6.4 ประโยชน์ของการดูดติดผิว.....	33
2.7 ถ่านกระดูก.....	33
2.8 ผลงานวิจัยที่ผ่านมา.....	35
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย.....	41
3.1 แผนการทดลอง.....	41
3.1.1 การวางแผนการทดลอง.....	41
3.1.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	41
3.1.3 ตัวแปรในการทดลอง.....	43
3.2 การเตรียมถ่านกระดูก.....	46
3.3 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	47
3.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	47
3.3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	47
3.4 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนัก.....	49
3.4.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว.....	49
3.4.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียม.....	49
3.4.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม.....	49
3.5 การดำเนินการทดลอง.....	50
3.5.1 การหาสภาวะการเตรียมถ่านกระดูกที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก โดยทำการทดลองแบบแบดซ์.....	50
3.5.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่มีผลต่อการ กำจัดโลหะหนัก โดยทำการทดลองแบบแบดซ์.....	51



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5.3 การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับการทดลองศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ โดยทำการทดลองแบบแบดซ์.....	52
3.5.4 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในการกำจัดโลหะหนัก โดยทำการ ทดลองแบบแบดซ์.....	53
3.5.5 การศึกษาผลของความเข้มข้นที่มีต่อการกำจัดโลหะหนัก โดยทำการ ทดลองแบบคอลลัมน์.....	54
3.5.6 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างวัสดุของถ่านกระดูก.....	54
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	55
4.1 ผลการศึกษาสภาวะการเตรียมถ่านกระดูกที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก.....	55
4.1.1 ผลการศึกษาสภาวะการเตรียมถ่านกระดูกในการกำจัดตะกั่ว.....	55
4.1.2 ผลการศึกษาสภาวะการเตรียมถ่านกระดูกในการกำจัดแคดเมียม.....	60
4.1.3 ผลการศึกษาสภาวะการเตรียมถ่านกระดูกในการกำจัดโครเมียม.....	66
4.1.4 สรุปผลการศึกษาสภาวะการเตรียมถ่านกระดูกที่เหมาะสม.....	66
4.2 ผลการศึกษาความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่มีต่อการกำจัดโลหะหนัก.....	73
4.2.1 ผลการศึกษาความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่มีต่อการกำจัดตะกั่ว.....	73
4.2.2 ผลการศึกษาความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่มีต่อการกำจัดแคดเมียม.....	76
4.3 ผลการศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก เพื่อใช้ทำการทดลองหา ไอโซเทอมการดูดซับ.....	79
4.3.1 ผลการศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่ว.....	79
4.3.2 ผลการศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดแคดเมียม.....	80
4.4 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในการกำจัดโลหะหนัก.....	81
4.4.1 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในการกำจัดตะกั่ว.....	81
4.4.2 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในการกำจัดแคดเมียม.....	83
4.5 ผลการศึกษาการกำจัดโลหะหนักด้วยถ่านกระดูก โดยทำการทดลองแบบคอลลัมน์.....	85
4.5.1 ผลการศึกษาการกำจัดตะกั่วด้วยถ่านกระดูก โดยทำการทดลองแบบคอลลัมน์.....	86
4.5.2 ผลการศึกษาการกำจัดแคดเมียมด้วยถ่านกระดูก โดยทำการทดลองแบบ คอลลัมน์.....	87
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	92
รายการอ้างอิง.....	95

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก.....	98
ภาคผนวก ก. ผลการศึกษาผ่านกระดุกที่สภาวะการเตรียมที่เหมาะสมสำหรับการกำจัด น้ำเสียโลหะหนักในการทดลองแบบแบตช์.....	99
ภาคผนวก ข. ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดและค่าความสามารถการดูดซับใน การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้น ต่างๆ ในการทดลองแบบแบตช์.....	112
ภาคผนวก ค. ผลการศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักเพื่อใช้ทำการทดลอง หาไอโซเทอมการดูดซับโดยทำการทดลองแบบแบตช์.....	118
ภาคผนวก ง. ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองแบบแบตช์.....	121
ภาคผนวก จ. ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักที่ความเข้มข้นโลหะหนัก ในน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นต่างๆ โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์.....	124
ภาคผนวก ฉ. ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผ่านกระดุกโดยวิธี X-Ray Diffraction.....	129
ภาคผนวก ช. ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของผ่านกระดุก.....	133
ภาคผนวก ซ. มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม.....	135
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	140

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ชนิดของโลหะหนักที่พบในอุตสาหกรรมต่างๆ.....	5
ตารางที่ 2.2 แสดงการใช้สารประกอบโครเมียมในอุตสาหกรรมต่างๆ .....	13
ตารางที่ 2.3 ชนิดและคุณสมบัติทางกายภาพของสารดูดซับที่นิยมใช้.....	20
ตารางที่ 2.4 แสดงผลของแฟกเตอร์ของการแยกตัวจากลักษณะรูปไอโซเทอม.....	28
ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบของถ่านกระดุกเชิงการค้าชื่อ Brimac216.....	34
ตารางที่ 2.6 ผลการทดลองแสดงลักษณะน้ำขาเข้าและขาออกจากระบบ.....	38
ตารางที่ 3.1 แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองขั้นตอนที่ 1.....	43
ตารางที่ 3.2 แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองขั้นตอนที่ 2.....	44
ตารางที่ 3.3 แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองขั้นตอนที่ 3.....	45
ตารางที่ 3.4 แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองขั้นตอนที่ 4.....	46
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้น 100 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น เป็น 5 ด้วยถ่านกระดุกที่ปริมาณต่างๆ.....	82
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองการกำจัดแคดเมียมที่ความเข้มข้น 40 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น เป็น 6 ด้วยถ่านกระดุกที่ปริมาณต่างๆ.....	83
ตารางที่ 4.3 ระยะเวลาการเบรคทฤษฎีที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ.....	90

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับความสามารถในการละลายน้ำของตะกั่ว และโลหะหนักอื่นๆ.....	7
รูปที่ 2.2 แผนภาพของ Eh-pH สำหรับระบบ Pb-H <sub>2</sub> O-CO <sub>2</sub> .....	8
รูปที่ 2.3 แผนภาพ Eh-pH สำหรับสินแร่ตะกั่วและกลุ่ม.....	8
รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงการกระจายตัวของกลุ่มตะกั่วไฮดรอกซี.....	9
รูปที่ 2.5 แสดงสมดุลการละลายของตะกั่วที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ ความแรงไอออน 0 และ 0.1 โมลาร์.....	10
รูปที่ 2.6 การกระจายโมเลกุลระหว่างของเหลวกับพื้นผิวของแข็ง.....	18
รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์.....	23
รูปที่ 2.8 รูปของไอโซเทอมการดูดซับ.....	25
รูปที่ 2.9 กราฟแสดงไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบต่างๆ.....	27
รูปที่ 2.10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของตัวดูดซับชนิดต่างๆ โดยพิจารณา จากรูปแบบไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนดลิส.....	31
รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงแผนการทดลองและขั้นตอนการทดลอง.....	42
รูปที่ 3.2 เครื่องเขย่าที่ใช้ทำการทดลอง.....	48
รูปที่ 3.3 หลอดเขย่าสารขนาด 50 มิลลิลิตร.....	48
รูปที่ 4.1 กระจกป่นก่อนและหลังจากที่เผาที่อุณหภูมิ 600, 800 และ 1000 องศาเซลเซียส.....	56
รูปที่ 4.2 กระจกป่นที่เตรียมโดยเผาที่อุณหภูมิ 600, 800 และ 1000 องศาเซลเซียส ขนาด 0.42-0.84 มิลลิเมตร.....	56
รูปที่ 4.3 ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดตะกั่วความ เข้มข้น 10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 ด้วยถ่านกระจกปริมาณ 1 มก./ล. น้ำตัวอย่างที่สภาวะการเตรียมต่างๆ.....	57
รูปที่ 4.4 ร้อยละการกำจัดของตะกั่วในน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดตะกั่วความ เข้มข้น 10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 ด้วยถ่านกระจกปริมาณ 1 มก./ล. น้ำตัวอย่างที่สภาวะการเตรียมต่างๆ.....	58
รูปที่ 4.5 ค่าพีเอชของน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดตะกั่วความเข้มข้น 10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 ด้วยถ่านกระจกปริมาณ 1 มก./ล. น้ำตัวอย่าง ที่สภาวะการเตรียมต่างๆ.....	59

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.6 ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดตะกั่วความเข้มข้น 10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ 0.2 มก./ล. น้ำตัวอย่างที่สภาวะการเตรียมต่างๆ.....	61
รูปที่ 4.7 ร้อยละการกำจัดของตะกั่วในน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดตะกั่วความเข้มข้น 10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ 0.2 มก./ล. น้ำตัวอย่างที่สภาวะการเตรียมต่างๆ.....	62
รูปที่ 4.8 ค่าพีเอชของน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดตะกั่วความเข้มข้น 10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ 0.2 มก./ล. น้ำตัวอย่างที่สภาวะการเตรียมต่างๆ.....	63
รูปที่ 4.9 ความเข้มข้นของแคดเมียมที่เหลือในน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดแคดเมียมความเข้มข้น 10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ 1 มก./ล. น้ำตัวอย่างที่สภาวะการเตรียมต่างๆ.....	64
รูปที่ 4.10 ร้อยละการกำจัดของแคดเมียมในน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดแคดเมียมความเข้มข้น 10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ 1 มก./ล. น้ำตัวอย่างที่สภาวะการเตรียมต่างๆ.....	65
รูปที่ 4.11 ค่าพีเอชของน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดแคดเมียมความเข้มข้น 10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ 1 มก./ล. น้ำตัวอย่างที่สภาวะการเตรียมต่างๆ.....	67
รูปที่ 4.12 ความเข้มข้นของโครเมียมที่เหลือในน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดโครเมียมความเข้มข้น 10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ 1 มก./ล. น้ำตัวอย่างที่สภาวะการเตรียมต่างๆ.....	68
รูปที่ 4.13 ร้อยละการกำจัดของโครเมียมในน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดโครเมียมความเข้มข้น 10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ 1 มก./ล. น้ำตัวอย่างที่สภาวะการเตรียมต่างๆ.....	69
รูปที่ 4.14 ค่าพีเอชของน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดโครเมียมความเข้มข้น 10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ 1 มก./ล. น้ำตัวอย่างที่สภาวะการเตรียมต่างๆ.....	70
รูปที่ 4.15 ภาพถ่าย SEM ของถ่านกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิการเผา 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมงที่กำลังขยาย 150 เท่า.....	72

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.16 ภาพถ่าย SEM ของถ่านกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิการเผา 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 5000 เท่า.....	72
รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพการกำจัด (การดูดซับ) ของถ่านกระดูกปริมาณ 0.2 ก./ล. น้ำตัวอย่างในการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่างๆ.....	74
รูปที่ 4.18 ประสิทธิภาพการกำจัด (การดูดซับร่วมกับการตกตะกอน) ของถ่านกระดูก ปริมาณ 0.2 ก./ล. น้ำตัวอย่างในการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้นและ พีเอชเริ่มต้นต่างๆ.....	74
รูปที่ 4.19 ค่าความสามารถการดูดซับของถ่านกระดูกปริมาณ 0.2 ก./ล. น้ำตัวอย่าง ในการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่างๆ.....	75
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงปฏิกิริยาการละลายน้ำของตะกั่ว.....	75
รูปที่ 4.21 ประสิทธิภาพการกำจัด (การดูดซับ) ของถ่านกระดูกปริมาณ 1 ก./ล. น้ำตัวอย่างในการกำจัดแคดเมียมที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่างๆ.....	77
รูปที่ 4.22 ประสิทธิภาพการกำจัด (การดูดซับร่วมกับการตกตะกอน) ของถ่านกระดูก ปริมาณ 1 ก./ล. น้ำตัวอย่างในการกำจัดแคดเมียมที่ความเข้มข้นและ พีเอชเริ่มต้นต่างๆ.....	77
รูปที่ 4.23 ค่าความสามารถการดูดซับของถ่านกระดูกปริมาณ 1 ก./ล. น้ำตัวอย่าง ในการกำจัดแคดเมียมที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่างๆ.....	78
รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับความสามารถในการละลายน้ำของ โลหะหนักชนิดต่างๆ.....	78
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเขย่ากับร้อยละการกำจัดในการกำจัด ตะกั่วด้วยถ่านกระดูกปริมาณ 0.2 ก./ล. น้ำตัวอย่าง โดยใช้น้ำเสีย สังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 100 มก./ล. ที่พีเอช 5.....	80
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเขย่ากับร้อยละการกำจัดในการกำจัด แคดเมียมด้วยถ่านกระดูกปริมาณ 1 ก./ล. น้ำตัวอย่าง โดยใช้น้ำเสีย สังเคราะห์แคดเมียมความเข้มข้น 40 มก./ล. ที่พีเอช 6.....	81
รูปที่ 4.27 ไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกระดูกเตรียมที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น เริ่มต้น 100 มก./ล. พีเอช 5.....	84

สารบัญญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.28 ไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกระดูกเตรียมที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น เริ่มต้น 40 มก./ล. พีเอช 6.....84

รูปที่ 4.29 ชุดอุปกรณ์การทดลองแบบคอลัมน์.....85

รูปที่ 4.30 ลักษณะการดูดซับบนผิวของคอลัมน์ เกิดขึ้นเมื่อน้ำเสียตะกั่วมีค่าพีเอช เริ่มต้นเป็น 5.....86

รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์กับร้อยละการกำจัด ที่ความเข้มข้นน้ำเสียตะกั่วเริ่มต้น 10 และ 20 มก./ล. พีเอชเริ่มต้นเป็น 4.....88

รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์กับสัดส่วนความเข้มข้น น้ำออกต่อน้ำเข้าที่ความเข้มข้นน้ำเสียตะกั่วเริ่มต้น 10 และ 20 มก./ล. พีเอชเริ่มต้นเป็น 4.....88

รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์กับร้อยละการกำจัด ที่ความเข้มข้นน้ำเสียแคดเมียมเริ่มต้น 5 และ 10 มก./ล. พีเอชเริ่มต้นเป็น 5.....89

รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์กับสัดส่วนความเข้มข้น น้ำออกต่อน้ำเข้าที่ความเข้มข้นน้ำเสียแคดเมียมเริ่มต้น 5 และ 10 มก./ล. พีเอชเริ่มต้นเป็น 5.....89