

การกำจัดตะกั่วและแคดเมียมด้วยสารดูดซับจากกระดูกหมู



นางสาว สุดารัตน์ เกศวิทยาพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551.

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REMOVAL OF LEAD AND CADMIUM BY SWINE BONE ADSORBENTS

Miss Sudaratn Lurtwitayapont

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Environmental Science

(Interdisciplinary Program)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

510552

ศุคารัตน์ เลิศวิทยาพนธ์ : การกำจัดตะกั่วและแคดเมียมด้วยสารดูดซับจากกระดูกหมู
(REMOVAL OF LEAD AND CADMIUM BY SWINE BONE ADSORBENTS)

อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร. ธีเรศ ศรีสถิตย์ : , 324 หน้า.

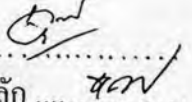
วัตถุประสงค์การวิจัยเพื่อเตรียมสารดูดซับจากกระดูกหมูในสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดสารละลายตะกั่วและแคดเมียมสังเคราะห์โดยศึกษาโครงสร้างทางกายภาพ ทางเคมี ประสิทธิภาพการกำจัดแบบแบตช์และแบบแท่ง รวมทั้งการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับและการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับที่ใช้งานแล้ว

การศึกษาโครงสร้างทางกายภาพ ทางเคมีของผงกระดูก ถ่านกระดูกและถ่านกัมมันต์กระดูกที่เตรียมจากกระดูกหมู พบว่าโครงสร้างเป็นเฮกซาโกนัล มีแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ เป็นองค์ประกอบหลัก การทดลองประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายตะกั่วและแคดเมียมแบบแบตช์พบว่า ถ่านกระดูกมีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ 1,829 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่านและ สามารถกำจัดตะกั่วได้ร้อยละ 99 รองลงไปเป็นถ่านกัมมันต์และผงกระดูก สำหรับการกำจัดแคดเมียม ผงกระดูกให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด 383 มิลลิกรัมต่อกรัมกระดูกที่ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดแคดเมียมได้ร้อยละ 85 รองลงไปเป็นถ่านกัมมันต์และถ่านกระดูก ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของผงกระดูกเป็นแบบฟรุนด์ลิช ของถ่านกระดูกเป็นแบบแลงมัวร์ ไอโซเทอมการดูดซับแคดเมียมของผงกระดูกเป็นแบบแลงมัวร์

การกำจัดตะกั่วและแคดเมียมด้วยเกลือกระดูกแบบแท่ง สามารถบำบัดสารละลายตะกั่วเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ 4,651 BV ที่ความสูงของเกลือกระดูก 30 เซนติเมตร ตามลำดับ และกำจัดแคดเมียมได้ 4,636 BV. ที่พีเอช 4 อัตราการไหล 0.6 ลิตรต่อชั่วโมง

การฟื้นฟูสภาพเกลือกระดูกที่ใช้ดูดซับตะกั่วด้วยสารเคมีพบว่าสารละลายกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 5 สามารถฟื้นฟูสภาพเกลือกระดูกได้ดีที่สุด ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วของสารดูดซับที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพเป็น 23-25% ของสารดูดซับที่ไม่ผ่านการฟื้นฟูสภาพ

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2551

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก 

4789689020 : INTER-DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEY WORD: BONE ABSORBENT/ SORPTION/ REMOVAL / LEAD / CADMIUM

SUDARATN LURTWITAYAPONT: REMOVAL OF LEAD AND CADMIUM BY SWINE BONE ADSORBENTS. THESIS PRINCIPAL ADVISOR : ASSOC.PROF. THARES SRISATIT, PhD., 324 pp.

The research objectives are to study the appropriate preparing conditions of bone adsorbents for the removal of synthetic ion solutions of lead and cadmium(batch and column experiments) and the influential factors to remove them, also study the adsorption isotherm of the two metals and then recovery the spent bone granule with chemical reagents.

The physical and chemical characteristics of bone adsorbents were studied and found that the main components are hexagonal structure, calcium hydroxyl-apatite. The results of batch experiment found that the highest percentage and adsorptive capacity of 10 ppm. lead ion by bone char was 1,829 mg. per g. and could remove 99% of lead ion but bone powder was the best adsorbent for cadmium removal, could remove 85% of cadmium ion, the adsorptive capacity was 383 mg. per g. The adsorption isotherms for lead were Freundlich and Langmuir model for bone and bone char respectively and Langmuir model was fitted for cadmium removal by bone adsorbent.

The quantities of lead and cadmium removal by bone granule, column test were 4,651 BV. and 4,636 BV. of 30 cm. high of sorbent for 10 ppm. of the metal ion concentration, the flow-rate 0.6 lit per hour and the pH solution 4. The best regenerating agent was 5% nitric acid, the regenerating efficiency was 23-25% of original bone granule.

Field of study Environmental Science
Academic year 2008

Student's signature.....
Principal Advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ฐเรศ ศรีสถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ที่ให้ข้อคิด แนวทางและคำปรึกษาในการเลือกหัวข้อวิทยานิพนธ์และการศึกษา วิจัย วิเคราะห์ รวมทั้งกระตุ้นไม่ให้ย่อท้อ และเอื้อเฟื้อสถานที่ อนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องมือ วัสดุและ อุปกรณ์ในการวิจัยของหน่วยวิจัยการจัดการของเสียอุตสาหกรรม ห้องปฏิบัติการขยะ ห้องปฏิบัติการ ของเสียอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โหมยิตานนท์ ผู้อำนวยการ หลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมที่เป็นประธานกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ และเป็นอาจารย์สอนวิชาสัมมนาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้ข้อคิด แนะนำแนวทาง และหาความรู้มาพัฒนาให้เกิด ทักษะในการนำเสนอ การคิดวิเคราะห์ ก่อให้เกิดประสบการณ์ที่สามารถนำมาแก้ปัญหาและ ดำเนินการวิจัยให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ คณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ฐราพงษ์ วิทิตสานต์ รองศาสตราจารย์ ดร. อมร เพชรสม รองศาสตราจารย์ ดร.วันเพ็ญ วิโรจนะภูฏ ที่ได้ให้คำแนะนำอย่างดียิ่งในการเสนอหัวข้อวิทยานิพนธ์และแนะนำแนวทางการวิจัย รวมทั้ง อนุเคราะห์เป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ หลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์ สิ่งแวดล้อม ที่อนุเคราะห์ให้ใช้อุปกรณ์และเครื่องมือในการวิจัย

ขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนการวิจัย บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และขอขอบคุณอาจารย์ จันทวรรณ ดันเจริญ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ นางอลิสรา จุ้ยศิริ และ นางสาวอุมาพร หาญกิจ ที่ช่วยพิมพ์วิทยานิพนธ์ นางสาวพรรชกร ใจประดับเพชร คุณมานพ ตีระสมโกชน นางปิยะวรรณ ปัญญาดี และผู้ที่ให้ความช่วยเหลือที่ไม่ได้กล่าวนามในที่นี้

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้เลี้ยงดู ปลูกฝังความคิดในการ ดำเนินชีวิต ให้โอกาสในการศึกษาและ การพัฒนาตนเอง ตลอดมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและสภาพปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	5
1.4 ขอบเขต ระยะเวลาและสถานที่ทำการวิจัย.....	6
1.5 นิยามศัพท์.....	7
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	9
บทที่ 2 ทฤษฎี แนวคิดและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.1 กระบวนการคิดตัดสินใจ.....	11
2.2 สารคิดตัดสินใจหรือสารคิดซ้ำ.....	11
2.3 ถ่านกัมมันต์.....	13
2.3.1 ประเภทของถ่านกัมมันต์.....	18
2.3.2 การผลิตถ่านกัมมันต์.....	20
2.3.3 การกระตุ้นถ่านกัมมันต์.....	23
2.3.4 การคิดตัดสินใจของถ่านกัมมันต์.....	24
2.3.5 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์.....	25
2.3.6 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์.....	27
2.4 โลหะหนักและการกำจัด.....	28
2.5 ความสามารถและไอโซเทอมของการคิดตัดสินใจ.....	34
2.6 การฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้ว.....	39
2.7 กระจกสัตว์และถ่านกัมมันต์จากกระจกสัตว์.....	42
2.8 การทบทวนวรรณกรรม.....	49

2.8.1	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์ของถ่านกระดุก ในด้านสิ่งแวดล้อม	49
2.8.2	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดโลหะหนักด้วยถ่านกัมมันต์	56
2.8.3	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้ว	65
บทที่ 3	แผนงานและการดำเนินการวิจัย	69
3.1	แผนงานการวิจัย	69
3.2	การดำเนินการวิจัย	69
3.3	สถานที่ดำเนินการวิจัย	71
3.4	เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	72
3.5	การเตรียมสารดูดซับ	73
3.6	การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารดูดซับที่เตรียมได้ ก่อนการดูดซับและภายหลังการดูดซับ	76
3.7	การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ของตะกั่วและแคดเมียม	77
3.8	การทดลองหาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมแบบไม่ต่อเนื่อง	78
3.9	การทดลองกำจัดตะกั่วและแคดเมียมด้วยแท่งเกล็ดกระดุก	81
3.10	การฟื้นฟูสภาพเกล็ดกระดุกที่ใช้ดูดซับสารละลายตะกั่ว	82
3.11	ตัวแปรและพารามิเตอร์ในการทดลอง	83
3.12	สถิติและการวิเคราะห์ข้อมูล	89
บทที่ 4	ผลการทดลองและการวิเคราะห์	90
4.1	ผลการเตรียมสารดูดซับจากกระดุกหมู	90
4.2	การศึกษาโครงสร้างทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของสารดูดซับ ที่เตรียมได้และภายหลังการกำจัดตะกั่วและแคดเมียม	93
4.3	การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมที่ความเข้มข้นต่างกัน โดยการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch Test) ด้วยสารดูดซับที่เตรียมได้	107
4.4	การศึกษาการเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลายตะกั่วและแคดเมียม ต่อการตกตะกอนและความสามารถในการกำจัด	121
4.5	การศึกษาการแทนที่ปริมาณแคลเซียมในองค์ประกอบของสารดูดซับกระดุก ภายหลังการกำจัดสารละลายตะกั่วและแคดเมียม	126
4.6	การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสารละลายตะกั่วและแคดเมียม	129
4.7	การศึกษาการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมของเกล็ดกระดุกแบบแท่งหรือคอล์มน์	135

4.8 การฟื้นฟูสภาพแก่สัตว์กระดูกที่ใช้งานแล้ว	141
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	145
5.1 สรุปผลการวิจัย	145
5.2 ข้อเสนอแนะ	147
รายการอ้างอิง	148
ภาคผนวก	158
ภาคผนวก ก	159
ภาคผนวก ข	174
ภาคผนวก	190
ภาคผนวก ง	206
ภาคผนวก จ	227
ภาคผนวก ฉ	267
ภาคผนวก ช	272
ภาคผนวก ซ	279
ภาคผนวก ฌ	284
ภาคผนวก ฎ	290
ภาคผนวก ฏ	293
ภาคผนวก ฐ	322
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	324

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1	เปรียบเทียบปริมาณการกำจัดตะกั่วด้วยสารดูดซับชนิดต่างๆ.....	4
ตารางที่ 1.2	เปรียบเทียบปริมาณการกำจัดแคดเมียมด้วยสารดูดซับชนิดต่างๆ.....	4
ตารางที่ 2.1	พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์บางชนิด.....	16
ตารางที่ 2.2	คุณสมบัติของผงถ่านกัมมันต์ที่ใช้ชื่อทางการค้าว่า “DARCO”	27
ตารางที่ 2.3	องค์ประกอบทางเคมีและทางกายภาพของถ่านกระดูกวัวควาย.....	44
ตารางที่ 2.4	องค์ประกอบของถ่านกระดูกที่ใช้ชื่อทางการค้า Brimac 216	44
ตารางที่ 2.5	เปรียบเทียบการกำจัดโลหะหนักของถ่านกระดูกสัตว์ซีโอไลท์และ ดินอินทรีย์ดูดซับน้ำมัน.....	50
ตารางที่ 2.6	เปรียบเทียบการกำจัดโลหะหนักของถ่านกระดูกสัตว์ ซีโอไลท์ และดินอินทรีย์ (ฮอยล์ซอร์บ)ในสารละลายของโลหะแต่ละชนิด.....	50
ตารางที่ 3.1	พารามิเตอร์ วิธีหรือเครื่องมือในการทดสอบและการอ้างอิง.....	77
ตารางที่ 3.2	ตัวแปรและพารามิเตอร์ในการเตรียมสารดูดซับจากกระดูกหมู.....	83
ตารางที่ 3.3	ตัวแปรและพารามิเตอร์ในการศึกษาการกำจัดตะกั่วและแคดเมียม ด้วยสารดูดซับกระดูก(แบบแบทซ์).....	84
ตารางที่ 3.4	ตัวแปรและพารามิเตอร์ของการศึกษาเวลาสัมผัสของการกำจัดตะกั่ว และแคดเมียม ด้วยสารดูดซับที่เตรียมจากกระดูก.....	85
ตารางที่ 3.5	ตัวแปรและพารามิเตอร์ของการศึกษาความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้น ต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว/แคดเมียม (การทดลองแบบแบตซ์).....	86
ตารางที่ 3.6	ตัวแปรและพารามิเตอร์ของการศึกษาไอโซเทอมของการกำจัดตะกั่ว และแคดเมียม ด้วยสารดูดซับถ่านกระดูกและผงกระดูก.....	87
ตารางที่ 3.7	ตัวแปรและพารามิเตอร์ของการศึกษาการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมแบบแห้ง เกลือกระดูก.....	88
ตารางที่ 3.8	ตัวแปรและพารามิเตอร์ของการฟื้นฟูสภาพเกลือกระดูกที่ใช้ดูดซับตะกั่ว.....	88

ตารางที่ 4.1	เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของสารดูดซับกระดูกที่เตรียม ในสภาวะต่างกัน.....	96
ตารางที่ 4.2	เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของสารดูดซับจากกระดูกหมู และกระดูกโค-กระบือ.....	97
ตารางที่ 4.3	ปริมาณธาตุองค์ประกอบในสารดูดซับกระดูก.....	107
ตารางที่ 4.4	ผลการทดลองหาเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่ว 10 มิลลิกรัม ต่อลิตรด้วยสารดูดซับกระดูก.....	109
ตารางที่ 4.5	เวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสมในการกำจัดแคดเมียม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยสารดูดซับกระดูก.....	111
ตารางที่ 4.6	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วกับประสิทธิภาพการกำจัด และร้อยละการกำจัดของสารดูดซับกระดูกต้ม ในเวลา 24 ชั่วโมง.....	112
ตารางที่ 4.7	ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแคดเมียม กับประสิทธิภาพ การกำจัด และความสามารถในการกำจัดของผงกระดูก (ต้ม) ในเวลา 72 ชั่วโมง.....	113
ตารางที่ 4.8	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของกระดูกสดต้ม 10 นาที ต้ม 10 ชั่วโมง และกระดูกต้มจากร้านอาหาร.....	115
ตารางที่ 4.9	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ของถ่านกระดูกที่คาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิต่างกับถ่านกัมมันต์กระดูก.....	115
ตารางที่ 4.10	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมเข้มข้น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัม ต่อลิตรของกระดูกสดต้ม 10 นาที, ต้ม 10 ชั่วโมง และกระดูกต้มจากร้านอาหาร.....	115
ตารางที่ 4.11	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ของกระดูกต้ม ถ่านกระดูกและถ่านกัมมันต์กระดูก.....	115
ตารางที่ 4.12	ร้อยละการกำจัดสารตะกั่วและแคดเมียมความเข้มข้น 10, 20, 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยสารดูดซับกระดูกต้มที่ต้มเวลาต่างกัน.....	118
ตารางที่ 4.13	ประสิทธิภาพการกำจัดสารตะกั่วและแคดเมียมความเข้มข้น 10, 20, 30 มิลลิกรัม ต่อลิตร ด้วยสารดูดซับกระดูกต้มและกระดูกสดที่ต้มเวลาต่างกัน.....	118
ตารางที่ 4.14	คุณสมบัติทางกายภาพของกระดูกต้มจากร้านอาหารและกระดูกสด ที่ต้มในเวลาต่างกับประสิทธิภาพ และ ร้อยละการกำจัดตะกั่ว ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	120
ตารางที่ 4.15	การตกตะกอนของสารละลายตะกั่วเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อพีเอชเปลี่ยนแปลง.....	124
ตารางที่ 4.16	การตกตะกอนของสารละลายแคดเมียมเข้มข้น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อพีเอชเปลี่ยนแปลง.....	125

ตารางที่ 4.17	ค่าคงที่ไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่วแบบฟรอนคลิช และแลงมัวร์ของผงกระดูก....	132
ตารางที่ 4.18	ค่าคงที่ไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่วแบบฟรอนคลิช และแลงมัวร์ ของถ่านกระดูก.....	132
ตารางที่ 4.19	ค่าคงที่ไอโซเทอมของการดูดซับแคดเมียมแบบฟรอนคลิช และแลงมัวร์ ของผงกระดูก.....	134
ตารางที่ 4.20	ตัวแปรการทดลองการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมแบบแห้งด้วยเกลือกระดูก และปริมาณ Bed Volume (BV).....	135
ตารางที่ 4.21	ผลการทดลองการกำจัดตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยเกลือกระดูกแบบแห้งหรือคอลลัมน์.....	136
ตารางที่ 4.22	ผลการทดลองการกำจัดแคดเมียมความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยเกลือกระดูกแบบแห้งหรือคอลลัมน์.....	139
ตารางที่ 4.23	เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของกระดูกที่ไม่ผ่านการฟื้นฟูสภาพ กับเกลือกระดูกที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพ.....	144

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1	การเกิดพื้นที่ผิวและโพรงภายในเนื้อถ่านกัมมันต์.....14
ภาพที่ 2.2	กลไกการดูดซับสารที่มีขนาดโมเลกุลแตกต่างกันของถ่านกัมมันต์16
ภาพที่ 2.3	โครงสร้างถ่านกัมมันต์และการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนในผลึกกราฟิต์.....17
ภาพที่ 2.4	ประเภทของถ่านกัมมันต์..... 19
ภาพที่ 2.5	ขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์ในอุตสาหกรรม.....21
ภาพที่ 2.6	อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมใน โครงสร้างของถ่านกัมมันต์.....22
ภาพที่ 2.7	การกระตุ้นถ่านด้วยวิธีทางเคมีและวิธีทางกายภาพ.....24
ภาพที่ 2.8	การดูดติดผิวของสารอินทรีย์ในน้ำเสียของถ่านกัมมันต์.....25
ภาพที่ 2.9	การเปลี่ยนแปลงขนาดโพรงของถ่านกัมมันต์เมื่อได้รับการกระตุ้น.....26
ภาพที่ 2.10	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์..... 35
ภาพที่ 2.11	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนด์ลิช.....37
ภาพที่ 2.12	ไอโซเทอมกับประสิทธิภาพการดูดซับสารของถ่านกัมมันต์..... 37
ภาพที่ 2.13	ไอโซเทอมที่ไม่เป็นเส้นตรง..... 38
ภาพที่ 2.14	อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วกับความจุในการดูดติดผิว..... 39
ภาพที่ 2.15	ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพสัมพันธ์กับปริมาณน้ำหนักรีดน้ำของ ถ่านกัมมันต์.....40
ภาพที่ 2.16	ผลของปริมาณความชื้นในถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วกับศักยภาพการ ดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ภายหลังการฟื้นฟูสภาพแล้ว.....40
ภาพที่ 2.17	โครงสร้างของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์..... 46
ภาพที่ 2.18	โครงสร้างของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์(มุมมองด้านบน).....46
ภาพที่ 2.19	ส่วนของกระดูกหมูที่นำมาเตรียมสารดูดซับ.....49
ภาพที่ 2.20	ผลการศึกษาการดูดติดผิว โครเมียม ไอออน Chromium (III) และChromium (V I) ด้วยถ่านกระดูกจากธรรมชาติ..... 51
ภาพที่ 2.21	ปริมาณโลหะที่ถูกกำจัดกับเวลาสัมผัสของสารดูดติดผิวเปลือกข้าวโพด.....57
ภาพที่ 2.22	ปริมาณโลหะที่ถูกกำจัดกับเวลาสัมผัสของสารดูดติดผิวซังข้าวโพด.....57
ภาพที่ 2.23	ปริมาณโลหะที่ถูกกำจัดกับเวลาสัมผัสของสารดูดติดผิวซังข้าวโพด และเปลือกข้าวโพดที่ผ่านการกระบวนการดัดแปลงด้วยสารอินทรีย์.....58

ภาพที่ 2.24	ปริมาณ โลหะที่ถูกกำจัดกับเวลาสัมผัสของสารดูดติดผิวเปลือกข้าวโพด(ก) และซังข้าวโพด(ข)ที่ไม่ผ่านกระบวนการตัดแปลงด้วยสารอินทรีย์.....	58
ภาพที่ 2.25	ปริมาณ โครเมียมที่ถูกดูดซับและปริมาณ โครเมียมที่เหลือในสารละลายของการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ด้วยน้ำ กรด และด่าง.....	67
ภาพที่ 2.26	ปริมาณ โครเมียมที่เหลืออยู่ในสารละลายของการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้ว.....	67
ภาพที่ 3.1	โครงสร้างงานวิจัยเรื่องการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมด้วยสารดูดซับจากกระดูกหมู.....	70
ภาพที่ 3.2	การเตรียมกระดูกหมูเบื้องต้น.....	74
ภาพที่ 3.3	ขั้นตอนการเตรียมสารดูดซับจากกระดูกหมูต้ม.....	75
ภาพที่ 3.4	การเตรียมผงกระดูกจากกระดูกสด.....	76
ภาพที่ 3.5	ผังการทดลองกำจัดตะกั่วและแคดเมียมด้วยสารดูดซับจากกระดูกหมู.....	78
ภาพที่ 3.6	การฟื้นฟูสภาพเกลือกระดูกที่ใช้งานแล้ว.....	82
ภาพที่ 4.1	กระดูกอบที่เตรียมการเบื้องต้น.....	90
ภาพที่ 4.2	สารดูดซับ : เกล็ดกระดูก ผงกระดูก เกล็ดถ่านกระดูก และผงถ่านกระดูก.....	91
ภาพที่ 4.3	ลักษณะภายนอกของถ่านกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิต่างกันและถ่านกัมมันต์กระดูก.....	92
ภาพที่ 4.4	ลักษณะพื้นผิวและโพรงของสารดูดซับที่เตรียมได้ จากล้อยออิเล็กทรอนิกส์รอนไมโครสโคป ขยาย10,000 เท่า.....	94
ภาพที่ 4.5	ลักษณะพื้นผิวและโพรงสารดูดซับภายหลังการดูดซับสารละลายตะกั่ว จากล้อยออิเล็กทรอนิกส์รอนไมโครสโคป ขยาย10,000 เท่า.....	95
ภาพที่ 4.6	ลักษณะพื้นผิวและโพรงสารดูดซับภายหลังการดูดซับสารละลายแคดเมียม จากล้อยออิเล็กทรอนิกส์รอนไมโครสโคป ขยาย10,000 เท่า.....	95
ภาพที่ 4.7	เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของสารดูดซับที่เตรียมจากกระดูกในสถานะต่างกัน.....	97
ภาพที่ 4.8	ผลของอุณหภูมิการเตรียมสารดูดซับจากกระดูกกับปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดของโพรง และปริมาตรทั้งหมดของโพรง.....	99
ภาพที่ 4.9	เปรียบเทียบกลุ่มองค์ประกอบทางเคมีของ สารดูดซับกระดูกก่อนและหลังการดูดซับตะกั่ว(ก) และแคดเมียม(ข).....	102
ภาพที่ 4.10	เปรียบเทียบกลุ่มองค์ประกอบทางเคมีของถ่านกระดูกก่อนและหลังการดูดซับตะกั่ว(ก) และแคดเมียม(ข).....	103

ภาพที่ 4.11	เปรียบเทียบกลุ่มองค์ประกอบทางเคมีของถ่านกระดูกภายหลังการดูดซับ ตะกั่วและแคดเมียม.....	104
ภาพที่ 4.12	เปรียบเทียบกลุ่มองค์ประกอบทางเคมีของถ่านกัมมันต์กระดูก่อน และหลังการดูดซับตะกั่ว(ก) และแคดเมียม(ข)	104
ภาพที่ 4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัสกับร้อยละการกำจัดตะกั่วความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วยผงกระดูกและถ่านกระดูก	109
ภาพที่ 4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัสกับร้อยละในการกำจัดแคดเมียม ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วยผงกระดูกและถ่านกระดูก.....	111
ภาพที่ 4.15	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมของผงกระดูก กับความเข้มข้นเริ่มต้น.....	113
ภาพที่ 4.16	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมของสารดูดซับกระดูก ที่เตรียมในสถานะต่างกัน.....	117
ภาพที่ 4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชของสารละลายตะกั่วภายหลังการกำจัด กับร้อยละของการกำจัดที่ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยผงกระดูกปริมาณต่างกัน	122
ภาพที่ 4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชของสารละลายตะกั่วภายหลังการกำจัดกับร้อยละ ของการกำจัดที่ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยผงกระดูก ถ่านกระดูก และถ่านกัมมันต์กระดูก.....	122
ภาพที่ 4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชของสารละลายแคดเมียมภายหลังการกำจัด กับร้อยละการกำจัด เมื่อใช้ปริมาณสารดูดซับผงกระดูกต่างกัน.....	123
ภาพที่ 4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชของสารละลายแคดเมียมภายหลังการกำจัด กับร้อยละการกำจัดที่ความเข้มข้นสารละลายเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยผงกระดูก ถ่านกระดูก และถ่านกัมมันต์กระดูก.....	123
ภาพที่ 4.21	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดตะกั่วของผงกระดูก(ก) และถ่านกระดูก(ข) กับร้อยละของแคลเซียมในฟิลเตรท.....	127
ภาพที่ 4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดแคดเมียมของผงกระดูก(ก) และถ่านกระดูก(ข) กับร้อยละของแคลเซียมในฟิลเตรท.....	128
ภาพที่ 4.23	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดตะกั่ว(ก) และแคดเมียม(ข) ของแท่งเกลือกระดูกกับร้อยละของแคลเซียมในฟิลเตรท	128
ภาพที่ 4.24	เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว10 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อใช้ปริมาณผงกระดูกต่างกัน.....	130

ภาพที่ 4.25 (ก) ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของผงกระดูกแบบฟรอนด์ลิช.....	132
ภาพที่ 4.25 (ข) ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของผงกระดูกแบบแลงมัวร์.....	132
ภาพที่ 4.26 (ก) ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของถ่านกระดูกแบบฟรอนด์ลิช.....	133
ภาพที่ 4.26 (ข) ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่ว ของถ่านกระดูกแบบแลงมัวร์.....	133
ภาพที่ 4.27 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยผงกระดูกปริมาณต่างกัน	134
ภาพที่ 4.28(ก) ไอโซเทอมการดูดซับแคดเมียมแบบฟรอนด์ลิชของผงกระดูก.....	134
ภาพที่ 4.28(ข) ไอโซเทอมการดูดซับแคดเมียมแบบแลงมัวร์ของผงกระดูก.....	134
ภาพที่ 4.29 การทดลองกำจัดตะกั่วด้วยเกลือกระดูกแบบแท่งหรือคอล์มน์.....	137
ภาพที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วภายหลังการกรอง กับปริมาณน้ำที่กรองได้ที่ระดับความสูงของเกลือกระดูกต่างกัน.....	137
ภาพที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดตะกั่วกับปริมาณน้ำที่กรองได้ ที่ระดับความสูงของเกลือกระดูกต่างกัน.....	138
ภาพที่ 4.32 การทดลองกำจัดแคดเมียมด้วยเกลือกระดูกแบบแท่งหรือคอล์มน์.....	139
ภาพที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมภายหลังการกรอง กับปริมาณน้ำที่กรองได้ที่ระดับความสูง 30 เซนติเมตรของเกลือกระดูก.....	140
ภาพที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดแคดเมียมกับปริมาณน้ำที่กรองได้ ที่ความสูงของเกลือกระดูก 30 เซนติเมตร	140
ภาพที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชของสารละลายตะกั่วกับปริมาณน้ำที่กรองได้(ก) และความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชของสารละลายแคดเมียมกับปริมาณน้ำ ที่กรองได้(ข)	141
ภาพที่ 4.36 ประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพเกลือกระดูกที่ดูดซับตะกั่วแล้ว ด้วยสารละลายต่างชนิด	142
ภาพที่ 4.37 ประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพเกลือกระดูกที่ดูดซับตะกั่วแล้ว ด้วยกรดไนตริก 5% โดยใช้ปริมาณเกลือกระดูกต่างกัน.....	143
ภาพที่ 4.38 แนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพเกลือกระดูก กับจำนวนครั้งของการล้าง	144