

การจัดทำตัวอักษรและเคดเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์
โดยใช้ถ่านกระดูก กระตุ้น โดยซิงก์คลอไรด์



นายจักรพงษ์ แสนชัย

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

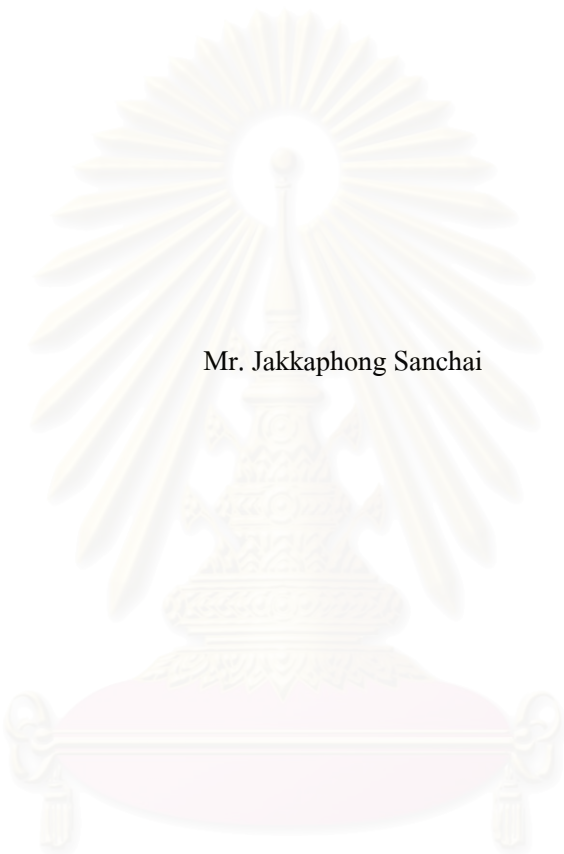
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-3897-8

ลิขสิทธิ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REMOVAL OF LEAD AND CADMIUM FROM SYNTHETIC WASTEWATER BY USING
BONE CHARCOAL ACTIVATED BY ZINC CHLORIDE



Mr. Jakkaphong Sanchai

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering


Chulalongkorn University

Academic Year 2005


ISBN 974-17-3897-8

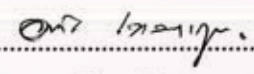
หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดตะกั่วและแคดเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ่าน กระตุก กระตุ้น โดยซิงก์คลอไรด์
โดย	นายจักรพงษ์ แสนชัย
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ อรทัย ขวาลภาฤทธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. ทรายพงษ์ วิทิตสานต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.รเศษ ศรีstitichai)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ อรทัย ขวาลภาฤทธิ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.ทรายพงษ์ วิทิตสานต์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ ฟังรัมย์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.เชมรัฐ โอสถาพันท์)

จักรพงษ์ แสนชัย : การกำจัดตะกั่วและแคดเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ่านกระดูก กระตุ้นโดยซิงก์คลอไรด์. (REMOVAL OF LEAD AND CADMIUM FROM SYNTHETIC WASTEWATR BY USING BONE CHARCOAL ACTIVATED BY ZINC CHLORIDE) อ.ที่ปรึกษา : รศ.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ.ดร. ธาราพงษ์ วิทิตสานต์, 130 หน้า. ISBN 974-17-3897-8.

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกระดูกกระตุ้นโดยซิงก์คลอไรด์เพื่อกำจัด โลหะหนัก 2 ชนิดจากน้ำเสียสังเคราะห์ ได้แก่ ตะกั่ว และแคดเมียม โดยศึกษาลักษณะพื้นผิว และ โครงสร้างของถ่านกระดูก ซึ่งถูกกระตุ้นโดยซิงก์คลอไรด์ต่อกระดูกบดที่อัตรา ส่วนเท่ากับ 1:1, 1.5:1 และ 2:1 เพื่อศึกษาสัดส่วนที่ดีที่สุด และจะถูกเลือกเป็นตัวแทนในการศึกษาประสิทธิภาพการ กำจัดแบบแบดซ์ต่อไป จากผลการวิเคราะห์พบว่าถ่านกระดูกซึ่งถูกกระตุ้นด้วยสัดส่วน 1:1 ให้ค่า พื้นผิว ปริมาตรจำเพาะของโพรง และปริมาณผลึกอะพาไต์ มากที่สุด โดยชนิดของผลึกส่วนใหญ่ ที่พบภายหลังการกระตุ้นมีดังนี้ $Ca_{10}(PO_4)_6(Cl)_2$, $CaZn_2(PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ และ $Ca_{10x}Zn_x(PO_4)_6(OH)_2$ และชนิดผลึกส่วนใหญ่ที่พบภายหลังการกำจัดตะกั่วคือ $Pb_{10}(PO_4)_6(Cl)_2$ สำหรับภายหลังกำจัด แคดเมียมพบว่าชนิดผลึกไม่มีการเปลี่ยนแปลง จึงสรุปได้ว่ากลไกการกำจัดตะกั่วในน้ำเสีย สังเคราะห์ คือ การละลายและการตกตะกอน และกลไกการกำจัดแคดเมียม คือการดูดติดผิว

จากการศึกษาแบบแบดซ์ พบว่าถ่านกระดูกสามารถกำจัดตะกั่วได้ดีกว่าแคดเมียมมาก สำหรับการทดสอบกับน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว 50 มก./ล. และน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียม 10 มก./ล. พบว่าพีเอชที่เหมาะสมคือ 4 และ 7 ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ความ สามารถในการกำจัดตะกั่วโดยกลไกการละลาย และการตกตะกอน ของถ่านกระดูก มากที่สุดถึง 1,002 มก.ตะกั่ว/ก.ถ่านกระดูก หรือ ร้อยละ 68.38 และความสามารถในการกำจัดแคดเมียมโดย กลไกการดูดติดผิวของถ่านกระดูก มากที่สุดถึง 22.06 มก.แคดเมียม/ก.ถ่านกระดูก หรือร้อยละ 24.70

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....
ปีการศึกษา 2548.....

ลายมือชื่อนิสิต จางระณี แสงศรี.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา อรทัย ชวาลภาฤทธิ์.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ธาราพงษ์ วิทิตสานต์.....

4670252021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD : BONE CHARCOAL / APATITE / ADSORPTION / LEAD / CADMIUM

JAKKAPHONG SANCHAI : REMOVAL OF LEAD AND CADMIUM FROM SYNTHETIC WASTEWATR BY USING BONE CHARCOAL ACTIVATED BY ZINC CHLORIDE. THESIS ADVISOR : ASSC. PROF. ORATHAI CHAVALPARIT, THESIS COADVISOR : ASSC. PROF. THARAPONG VITIDSANT, Ph.D., 130 pp. ISBN 974-17-3897-8.

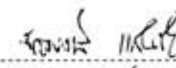
This research studied the removal efficiency of lead and cadmium from synthetic wastewater by bone charcoal activated by zinc chloride. The ratio of zinc chloride and bone was varied at three different ratio 1:1, 1.5:1 and 2:1. The surface area and structure of bone charcoal after activated by zinc chloride were analyzed and used to determine the optimal condition for preparing the bone charcoal for the further experiment. The result showed that bone charcoal activated by zinc chloride at the ratio of 1:1 gave the best result such as high surface area and high apatite intensity. The major types of crystals composed in bone charcoal were $\text{Ca}_{10-x}\text{Zn}_x(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, $\text{CaZn}_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{Cl})_2$. After absorption test with lead, the major crystal composition of bone charcoal was changed to $\text{Pb}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{Cl})_2$. The different results were shown for absorption test with cadmium, the major crystal composition was not changed. It was concluded that the mechanism of removing lead depended on dissolution and precipitation while removing cadmium depended on adsorption.

The results of batch absorption experiment showed that the removal efficiency of lead by bone charcoal was higher than that of cadmium. The synthetic wastewater contained with lead and cadmium at 50 mg L^{-1} and 10 mg L^{-1} . It was found that the highest removal efficiency of lead and cadmium were achieved at pH 4 and 7 respectively. Furthermore it was conclude that bone charcoal could remove lead and cadmium from synthetic wastewater by the dissolution and precipitation of lead with the amount of $1,002 \text{ mg g}^{-1}$ of bone charcoal or 68.38% where as the mechanism of adsorption with the amount of adsorption capacity at 22.06 mg g^{-1} of bone charcoal or 24.70%.

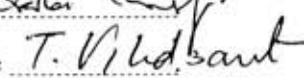
Department Environmental Engineering.....

Field of Study Environmental Engineering

Academic year 2005.....

Student's signature 

Advisor's signature 

Co-advisor's signature 

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ อรทัย ชาวลาภฤทธิ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้แนวทาง และคำแนะนำอย่างดียิ่ง ในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา รวมทั้งการวิเคราะห์ผลการทดลองและตรวจเล่มวิทยานิพนธ์ จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษา ให้ความสะดวก และเอื้อเฟื้อสถานที่ ในการทำวิจัยที่ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ ตลอดจนเครื่องมืออุปกรณ์ในการทำวิจัย อย่างดียิ่งตลอดมา

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชเรศ ศรีสถิตย์ ที่เป็นประธานกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ และเอื้อเฟื้อสถานที่ ตลอดจนเครื่องมือในการทำวิจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขั้นตอนการเตรียมถ่านกระดูกที่ห้องปฏิบัติการมูลฝอย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ อย่างดียิ่งตลอดมา

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ ฟังรัมย์ และอาจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาปนุฑ์ ที่ได้ให้คำแนะนำเป็นอย่างดียิ่ง และได้สละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือที่ห้องปฏิบัติการมูลฝอย ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ห้องปฏิบัติการวิจัยและบัณฑิต ขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือที่ห้องวิจัยของภาควิชาฯ เป็นอย่างดียิ่งตลอดมา

ขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนการวิจัยต่างๆ ได้แก่ทุนวิจัยบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และโครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตรายที่ได้อนุญาตให้ใช้เครื่องวัดปริมาณโลหะหนักโดยไม่คิดค่าใช้จ่าย

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ จันทวรรณ ต้นเจริญ ที่ได้ให้คำแนะนำในการทำวิจัยและอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยโดยตลอดมา ขอขอบคุณ พี่โอ สัม ก้อย โอ๊ค ดิว นก บิว ตี๋ บีม ออน มินท์ เหน่ง นื่องแจน และเพื่อนๆทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ และกำลังใจโดยเฉพาะ ศิลาวุธ ที่ช่วยบริการวิชาการให้ตลอดมา

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อเอนก คุณแม่แสงเดือน แสนชัย รวมถึงญาติพี่น้อง เป็นอย่างสูงที่ให้ช่วยเหลือในด้านทุนทรัพย์ และกำลังใจ ซึ่งทำให้กระผมสามารถฝ่าฟันปัญหาต่างๆ มาได้ตลอดมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 โลหะหนัก.....	5
2.2 ตะกั่ว.....	6
2.2.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของตะกั่ว.....	6
2.2.2 ชนิดของตะกั่ว.....	6
2.2.3 ทางไปสู่สิ่งแวดล้อม.....	8
2.3 แคดเมียม.....	9
2.3.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของแคดเมียม.....	9
2.3.2 ทางไปสู่สิ่งแวดล้อม.....	10
2.3.3 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงในสิ่งแวดล้อม.....	11
2.4 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย.....	12
2.4.1 การตกตะกอนผลึกทางเคมี.....	13
2.4.2 การแลกเปลี่ยนไอออน.....	15
2.4.3 การรีเวอร์ส ออสโมซิส.....	15
2.4.4 การออกซิเดชันและการรีดักชัน.....	15
2.4.5 การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า.....	16
2.4.6 การระเหย.....	16

2.4.7 การอิเล็กทรอนิกส์โคอะไลซิส.....	16
2.4.8 การดูดติดผิว.....	16
2.5 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์.....	17
2.5.1 การคาร์บอนไนเซชัน.....	17
2.5.2 กระบวนการกระตุ้นถ่านชาร์.....	17
2.6 กลไกการดูดซับ.....	19
2.7 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล.....	19
2.8 สมดุลของการดูดซับ.....	20
2.8.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช.....	21
2.8.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์.....	21
2.8.3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบบีอีที.....	22
2.9 ถ่านกระดูก.....	23
2.10 ผลงานวิจัยที่ผ่านมา.....	24
2.10.1 งานวิจัยต่างประเทศ.....	24
2.10.2 งานวิจัยในประเทศ.....	26
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	29
3.1 รูปแบบการวิจัย.....	29
3.2 สถานที่ทำการวิจัย.....	29
3.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนัก.....	29
3.3.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว.....	29
3.3.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียม.....	29
3.4 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี.....	30
3.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	30
3.4.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	30
3.5 แผนการทดลอง.....	32
3.5.1 ตัวแปรในการทดลอง.....	32
3.6 การดำเนินการทดลอง.....	38
3.6.1 การทดลองที่ 1 การศึกษาสภาวะในการเตรียมถ่านกระดูก ด้วยสารละลายซิงก์คลอไรด์.....	38

	3.6.2 การทดลองที่ 2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพ และ โครงสร้าง ของถ่านกระดูก.....	38
	3.6.3 การทดลองที่ 3 การศึกษาพีเอชที่เหมาะสม โดยทำการทดลองแบบแบดซ์.....	39
	3.6.4 การทดลองที่ 4 การศึกษาไอโซเทอม การดูดซับในการกำจัดโลหะหนัก โดยทำการทดลองแบบแบดซ์.....	49
	3.6.5 การทดลองที่ 5 การศึกษาค่าใช้จ่ายเบื้องต้นโดยประมาณ.....	52
บทที่ 4	ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	54
	4.1 การศึกษาสภาวะในการเตรียมถ่านกระดูก ด้วยสารละลายซิงก์คลอไรด์.....	54
	4.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและ โครงสร้างของถ่านกระดูก.....	58
	4.2.1 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของถ่านกระดูกด้วยเครื่อง SEM.....	58
	4.2.2 การศึกษาแนวโน้มของปริมาณ PO_4^{3-} ที่เปลี่ยนไปด้วยเครื่อง FTIR.....	62
	4.2.3 การตรวจสอบชนิดผลึกของถ่านกระดูกด้วยเครื่อง XRD.....	62
	4.3 การศึกษาพีเอชที่เหมาะสม โดยทำการทดลองแบบแบดซ์.....	69
	4.3.1 น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว.....	69
	4.3.2 น้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียม.....	77
	4.4 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในการกำจัดโลหะหนัก โดยการทดลองแบบแบดซ์.....	82
	4.4.1 น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว.....	83
	4.4.2 น้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียม.....	88
	4.4.3 การทดสอบการละลายของซิงก์จากถ่านกระดูกในน้ำเสียสังเคราะห์.....	93
	4.5 การศึกษาค่าใช้จ่ายเบื้องต้นโดยประมาณ.....	97
	4.5.1 ร้อยละผลผลิตที่ได้จากขั้นตอนการเตรียม ด้วยสารละลาย ซิงก์คลอไรด์.....	97
	4.5.2 ค่าใช้จ่ายโดยประมาณ.....	98
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	100
	5.1 สรุปผลการวิจัย.....	100
	5.1.1 ผลการศึกษาสภาวะในการเตรียมถ่านกระดูก ด้วยสารละลาย ซิงก์คลอไรด์.....	100
	5.1.2 ผลการศึกษาพีเอชที่เหมาะสม.....	101

5.1.3 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ.....	101
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	102
รายการอ้างอิง.....	103
ภาคผนวก.....	107
ภาคผนวก ก.....	108
ภาคผนวก ข.....	114
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	130



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญัตราง

		หน้า
ตารางที่ 1.1	จำนวนโค กระบือที่อนุญาตให้ฆ่าเป็นอาหาร ตั้งแต่ปี 2539 – 2547.....	2
ตารางที่ 2.1	คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของโลหะ lead และสารประกอบ lead.....	7
ตารางที่ 2.2	คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ ของถ่านกระดุก เกรดการค้าชื่อ Brimac 216.....	24
ตารางที่ 3.1	แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 1.....	33
ตารางที่ 3.2	แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 2.....	34
ตารางที่ 3.3	แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 3.....	35
ตารางที่ 3.4	แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 4.....	36
ตารางที่ 3.5	แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 5.....	37
ตารางที่ 4.1	ผลการวิเคราะห์ ค่าพื้นที่ผิว(Specific surface area (BET)) ปริมาตรจำเพาะของ โพรง(Pore specific volume) และค่าขนาดของโพรง(Average pore diameter) ที่สภาวะการเตรียมด้วยสัดส่วนของซิงก์คลอไรด์ต่อกระดุกบดต่างกัน.....	58
ตารางที่ 4.2	เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ ชนิดต่างๆ.....	59
ตารางที่ 4.3	ร้อยละผลผลิตที่ได้จากสภาวะการเตรียมก่อนแช่ ด้วยสารละลายซิงก์คลอไรด์.....	98
ตารางที่ 4.4	ร้อยละผลผลิตที่ได้จากสภาวะการเตรียมหลังแช่ ด้วยสารละลายซิงก์คลอไรด์.....	98

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	การตกตะกอนผลึกของโลหะหนักชนิดต่างๆ ในรูปไฮดรอกไซด์และซัลไฟด์.....	14
รูปที่ 2.2	Molecular Transfer.....	20
รูปที่ 3.1	เครื่องเขย่า(Shaker).....	31
รูปที่ 3.2	เตาเผาอุณหภูมิสูง (Muffle furnace).....	31
รูปที่ 3.3	เตาอบวัสดุ.....	32
รูปที่ 3.4	การหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมถ่านกระดูกด้วยสารละลายซิงก์คลอไรด์.....	40
รูปที่ 3.5	ขั้นตอนศึกษาลักษณะทางกายภาพและ โครงสร้างถ่านกระดูกจากผลวิเคราะห์ SEM, FTIR และ XRD.....	41
รูปที่ 3.6	ขั้นตอนศึกษาผลึกที่เกิดขึ้นภายหลังการกำจัดสำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว.....	42
รูปที่ 3.7	ขั้นตอนศึกษาผลึกที่เกิดขึ้นภายหลังการกำจัดสำหรับน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียม.....	43
รูปที่ 3.8	การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับศึกษาพีเอชที่เหมาะสมสำหรับตะกั่ว โดยการทดลองแบบเบตซ์.....	44
รูปที่ 3.9	การหาพีเอชที่เหมาะสมสำหรับตะกั่ว โดยการทดลองแบบเบตซ์.....	46
รูปที่ 3.10	การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับศึกษาพีเอชที่เหมาะสมสำหรับแคดเมียม โดยการทดลองแบบเบตซ์.....	47
รูปที่ 3.11	การหาพีเอชที่เหมาะสมสำหรับแคดเมียม โดยการทดลองแบบเบตซ์.....	48
รูปที่ 3.12	การหาสมการไอโซเทอมสำหรับตะกั่ว โดยทำการทดลองแบบเบตซ์.....	50
รูปที่ 3.13	การหาสมการไอโซเทอมสำหรับแคดเมียม โดยทำการทดลองแบบเบตซ์.....	51
รูปที่ 3.14	การแบ่งสถานะก่อนและหลังแ่สารละลายซิงก์คลอไรด์.....	53
รูปที่ 4.1	กระดูกป่นที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการทดลอง.....	54
รูปที่ 4.2	ถ่านกระดูก บดคัดขนาด 8 - 16 เมช.....	55
รูปที่ 4.3	ถ่านกระดูกบดแช่ในสารละลายซิงก์คลอไรด์.....	55
รูปที่ 4.4	กระดูกนึ่งบด ขนาดน้อยกว่า 325 เมช.....	56
รูปที่ 4.5	ถ่านกระดูกบด ขนาดน้อยกว่า 325 เมช สัดส่วนซิงก์คลอไรด์ ต่อ กระดูกบด เป็น 1:1 โดยน้ำหนัก.....	56

รูปที่ 4.6	ถ่านกระดูกบด ขนาดน้อยกว่า 325 เมช สัดส่วนซิงก์คลอไรด์ต่อกระดูกบด เป็น 1.5:1 โดยน้ำหนัก.....	56
รูปที่ 4.7	ถ่านกระดูกบด ขนาดน้อยกว่า 325 เมช สัดส่วนซิงก์คลอไรด์ต่อกระดูกบด เป็น 2:1 โดยน้ำหนัก.....	57
รูปที่ 4.8	ภาพถ่ายกระดูกบดก่อนสภาวะการเตรียมด้วยสัดส่วนต่างๆ ของซิงก์คลอไรด์.....	60
รูปที่ 4.9	ภาพถ่ายถ่านกระดูกบดที่สภาวะการเตรียมด้วยสัดส่วนต่างๆ ของซิงก์คลอไรด์ต่อกระดูกบด เป็น 1 : 1.....	60
รูปที่ 4.10	ภาพถ่ายถ่านกระดูกบดที่สภาวะการเตรียมด้วยสัดส่วนต่างๆ ของซิงก์คลอไรด์ต่อกระดูกบด เป็น 1.5 : 1.....	61
รูปที่ 4.11	ภาพถ่ายถ่านกระดูกบดที่สภาวะการเตรียมด้วยสัดส่วนต่างๆ ของซิงก์คลอไรด์ต่อกระดูกบด เป็น 2 : 1.....	61
รูปที่ 4.12	ผลวิเคราะห์ FTIR ของกระดูกหนึ่ง (ก); ภายหลังกระตุ้นด้วยซิงก์คลอไรด์ต่อกระดูกบดเป็น 1:1(ข); 1.5:1(ค); และ 2:1(ง).....	63
รูปที่ 4.13	ผลวิเคราะห์ XRD ของกระดูกหนึ่ง (ก); ภายหลังกระตุ้นด้วยซิงก์คลอไรด์ต่อกระดูกบดเป็น 1:1(ข); และ 1.5:1(ค).....	64
รูปที่ 4.14	ผลวิเคราะห์ XRD ของถ่านกระดูกภายหลังกระตุ้นด้วยซิงก์คลอไรด์ต่อกระดูกบดเป็น 2:1 (ก); หลังการกำจัดตะกั่ว (ข); และแคลเซียม (ค).....	65
รูปที่ 4.15	ผลวิเคราะห์ XRD ของการทดสอบชนิดของผลึกที่เกิดขึ้นเมื่อปรับเปลี่ยนค่าสัดส่วนของ Zn ²⁺ ในสารละลาย.....	67
รูปที่ 4.16	ผลวิเคราะห์ XRD ของการทดสอบชนิดของผลึกที่เกิดขึ้นเมื่อ CaHAp ทำปฏิกิริยากับน้ำ(A); ภายหลังทำปฏิกิริยากับPb ²⁺ ในขณะที่มี NO ₃ ⁻ (B); Cl ⁻ (C); F ⁻ (D); SO ₄ ²⁻ (E); และ CO ₃ ²⁻ (F).....	68
รูปที่ 4.17	ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียดังเคราะห์ ความเข้มข้นน้ำเสียดักั่วเริ่มต้น 10 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 5 ถ่านกระดูก 0.025 ก./ล. น้ำตัวอย่าง.....	70
รูปที่ 4.18	ร้อยละการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียดังเคราะห์ ความเข้มข้นน้ำเสียดักั่วเริ่มต้น 10 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 5 ถ่านกระดูก 0.025 ก./ล. น้ำตัวอย่าง.....	70
รูปที่ 4.19	พีเอชน้ำเสียดักั่วหลังการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียดังเคราะห์ ความเข้มข้นน้ำเสียดักั่วเริ่มต้น 10 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 5 ถ่านกระดูก 0.025 ก./ล. น้ำตัวอย่าง.....	71
รูปที่ 4.20	ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียดังเคราะห์ ความเข้มข้นน้ำเสียดักั่วเริ่มต้น 50 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 5 ถ่านกระดูก 0.050 ก./ล. น้ำตัวอย่าง.....	72

รูปที่ 4.21	ร้อยละการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้นน้ำเสียตะกั่วเริ่มต้น 50 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 5 ถ่านกระดูก 0.050 ก./ล. น้ำตัวอย่าง.....	72
รูปที่ 4.22	พีเอชน้ำเสียหลังการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้นน้ำเสียตะกั่วเริ่มต้น 50 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 5 ถ่านกระดูก 0.050 ก./ล. น้ำตัวอย่าง.....	73
รูปที่ 4.23	ร้อยละการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ 0.050 ก./ล. ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มก./ล. ที่พีเอช 3 ถึง 7.....	75
รูปที่ 4.24	ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อกำจัดด้วยถ่านกระดูก ปริมาณ 0.050 ก./ล. ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มก./ล. ที่พีเอช 3 ถึง 7.....	75
รูปที่ 4.25	ความสามารถในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกระดูก ปริมาณ 0.050 ก./ล. ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มก./ล. ที่พีเอช 3 ถึง 7.....	76
รูปที่ 4.26	รูปแบบของตะกั่วในสารละลายที่พีเอชต่างๆ.....	76
รูปที่ 4.27	ความเข้มข้นของแคดเมียมที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นน้ำเสีย แคดเมียมเริ่มต้น 10 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 6 ถ่านกระดูก 0.5 ก./ล. น้ำตัวอย่าง.....	78
รูปที่ 4.28	ร้อยละการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้นน้ำเสียแคดเมียม เริ่มต้น 10 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 6 ถ่านกระดูก 0.5 ก./ล. น้ำตัวอย่าง.....	79
รูปที่ 4.29	พีเอชน้ำเสียหลังการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้นน้ำเสีย แคดเมียมเริ่มต้น 10 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 6 ถ่านกระดูก 0.5 ก./ล. น้ำตัวอย่าง.....	79
รูปที่ 4.30	ร้อยละการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ 0.5 ก./ล. ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มก./ล. ที่พีเอช 3 ถึง 7.....	81
รูปที่ 4.31	ความเข้มข้นของแคดเมียมที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อกำจัดด้วยถ่านกระดูก ปริมาณ 0.5 ก./ล. ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มก./ล. ที่พีเอช 3 ถึง 7.....	81
รูปที่ 4.32	ความสามารถในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกระดูก ปริมาณ 0.5 ก./ล. ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มก./ล. ที่พีเอช 3 ถึง 7.....	82
รูปที่ 4.33	ร้อยละการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ถ่านกระดูกปริมาณต่างๆ.....	84
รูปที่ 4.34	ความเข้มข้นตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์จากการกำจัดด้วย ถ่านกระดูกปริมาณต่างๆ.....	85
รูปที่ 4.35	ความสามารถในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ถ่านกระดูก ปริมาณต่างๆ.....	85
รูปที่ 4.36	พีเอชหลังการทดลอง หลังจากการกำจัดตะกั่วด้วยถ่านกระดูกปริมาณต่างๆ.....	86

รูปที่ 4.37	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการกำจัดตะกั่วโดยถ่านกระดูกกับปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ ณ สมดุล.....	86
รูปที่ 4.38	ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วแบบฟรอนดลิชของถ่านกระดูกที่เตรียมจากสัดส่วนซิงก์คลอไรด์ ต่อ กระดูกบด เป็น 1:1 ที่พีเอช 4 และความเข้มข้นตะกั่ว 50 มิลลิกรัม/ลิตร.....	87
รูปที่ 4.39	ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วแบบแลงมัวร์ของถ่านกระดูกที่เตรียมจากสัดส่วนซิงก์คลอไรด์ ต่อ กระดูกบด เป็น 1:1 ที่พีเอช 4 และความเข้มข้นตะกั่ว 50 มิลลิกรัม/ลิตร.....	87
รูปที่ 4.40	ร้อยละการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ถ่านกระดูกปริมาณต่างๆ....	90
รูปที่ 4.41	ความเข้มข้นแคดเมียมที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์จากการกำจัดด้วยถ่านกระดูกปริมาณต่างๆ.....	90
รูปที่ 4.42	ความสามารถในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ถ่านกระดูกปริมาณต่างๆ.....	91
รูปที่ 4.43	พีเอชหลังการทดลอง หลังจากการกำจัดแคดเมียมด้วยถ่านกระดูกปริมาณต่างๆ....	91
รูปที่ 4.44	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการกำจัดแคดเมียมโดยถ่านกระดูกและปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ ณ สมดุล.....	92
รูปที่ 4.45	ไอโซเทอมการดูดซับแคดเมียมแบบฟรอนดลิชของถ่านกระดูกที่เตรียมจากสัดส่วนซิงก์คลอไรด์ ต่อ กระดูกบดเป็น 1:1 ที่พีเอช 7 และความเข้มข้นแคดเมียม 10 มิลลิกรัม/ลิตร	92
รูปที่ 4.46	ไอโซเทอมการดูดซับแคดเมียมแบบแลงมัวร์ของถ่านกระดูกที่เตรียมจากสัดส่วนซิงก์คลอไรด์ ต่อ กระดูกบดเป็น 1:1 ที่พีเอช 7 และความเข้มข้นแคดเมียม 10 มิลลิกรัม/ลิตร	93
รูปที่ 4.47	ความเข้มข้นซิงก์จากถ่านกระดูกในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 4 ความเข้มข้นตะกั่ว 0 และ 50 มิลลิกรัม/ลิตร	94
รูปที่ 4.48	ความเข้มข้นซิงก์จากถ่านกระดูกในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 7 ความเข้มข้นแคดเมียม 0 และ 10 มิลลิกรัม/ลิตร	95

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในภาวะปัจจุบันปัญหาสิ่งแวดล้อมมีความสำคัญที่จำเป็นต้องแก้ไขอย่างเร่งด่วน โดยเฉพาะปัญหาการเจือปน โลหะหนักในน้ำที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศที่กำลังพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงมีจำนวนโรงงานอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้นในแต่ละปี ซึ่งเป็นสาเหตุที่สำคัญที่ก่อให้เกิดผลเสียโดยตรงกับแหล่งน้ำและยังส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ซึ่งอาจเกิดการสะสมของโลหะหนักในสัตว์น้ำและถ่ายทอดไปตามห่วงโซ่อาหารจนในที่สุดก็จะเกิดผลกระทบต่อมนุษย์อย่างเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องที่จะต้องกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำเพื่อให้มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตน้อยที่สุด

ในปัจจุบันกระบวนการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมนั้นมีอยู่หลายวิธี ได้แก่ กระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ การตกตะกอน โลหะหนักการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ หรือกระบวนการออสโมซิสผันกลับ เป็นต้น ซึ่งกระบวนการต่างๆ เหล่านี้สามารถกำจัดโลหะหนักได้ดี แต่มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูง อีกทั้งยังต้องมีการจัดการอย่างมีประสิทธิภาพ จึงส่งผลให้มีค่าดำเนินการที่สูงตามมา ดังนั้นหากสามารถหาวัสดุที่มีประสิทธิภาพสูงแต่ต้นทุนต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าหากสามารถนำของเสียที่เกิดขึ้นมาใช้เป็นวัตถุดิบได้ก็จะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียเหล่านั้นอีกด้วย

จากข้อมูล ฝ่ายประมวลผลและสถิติ กองแผนงาน กรมปศุสัตว์ ได้แสดงปริมาณโอซินที่ส่งออกในปี 2547 จำนวน 2,581,633 กิโลกรัม และจำนวนโค กระบือที่ถูกฆ่าต่อปี ดังตาราง 1.1 จะเห็นว่ามียังมีจำนวนเฉลี่ย 518,647 ตัวต่อปี จุฑารัตน์ เศรษฐกุล(2542) ได้ศึกษาว่าน้ำหนักกระดูกต่อตัวของโค กระบือ ประมาณ 34.9 กิโลกรัมต่อตัว ดังนั้นน้ำหนักกระดูกเฉลี่ยต่อปีจะเท่ากับ 18,101 ตัน จะเห็นว่าปริมาณกระดูกที่เหลือซึ่งอาจนำมาทำกระดูกนึ่ง หรือทิ้งไปเป็นจำนวนมาก

ตารางที่ 1.1 จำนวนโค กระบือที่อนุญาตให้ฆ่าเป็นอาหาร ตั้งแต่ปี 2539 – 2547 (กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, พ.ศ. 2539 – 2547)

ปี พ.ศ.	โค (ตัว)	กระบือ (ตัว)	รวม (ตัว)
2539	597,548	158,517	756,065
2540	440,756	124,875	565,631
2541	389,303	98,993	488,296
2542	375,665	104,104	479,769
2543	335,923	110,199	446,122
2544	430,902	130,752	561,654
2545	371,319	107,733	479,052
2546	336,176	86,048	422,224
2547	375,904	93,109	469,013
รวม	3,653,496	1,014,330	4,667,826
เฉลี่ยต่อปี	405,944	112,703	518,647

ดังนั้นหากมีการนำกระดูกโคกระบือซึ่งมีมูลค่าต่ำเหล่านี้ มาผลิตเป็นสารดูดติดผิว ในการกำจัดโลหะหนัก เพื่อเพิ่มมูลค่าให้มากขึ้น จะสามารถทำรายได้ให้ประเทศได้มากขึ้น อีกทั้งยังสามารถลดการนำเข้าปริมาณถ่านกัมมันต์จากต่างประเทศได้อีกทางหนึ่ง ซึ่งปัจจุบันมีการรับซื้อกระดูกสัตว์ที่เหลือเช่นกัน โดยโรงงานอุตสาหกรรมกระดูกสัตว์ ผลิตภัณฑ์ที่นำไปผลิตมี 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่

1. กระดูกนึ่ง ทำมาจากกระดูกสดนำมาบดและนำไปเข้าเตาซึ่งมีความดัน เพื่อเอาไขมันออก ก็เพื่อให้เก็บได้นานและฆ่าเชื้อโรค ซึ่งประโยชน์คือ นำเอาไปทำปุ๋ย และอาหารสัตว์
2. โอซีน นำกระดูกสดไปต้ม เพื่อเอาไขมันออก และนำไปแช่กรดไฮโดรคลอริก เพื่อนำเอาแคลเซียมออก ผลพลอยได้คือไคแคลเซียมฟอสเฟต ซึ่งสามารถนำไปทำอาหารสัตว์เสริมแคลเซียม หรือนำไปทำ Gelatin ซึ่งเป็นวัตถุดิบหนึ่งของฟิล์มถ้ำยรูป กาว แคปซูลยา และ เกล็ด

โดยกระดูกนึ่งนั้นมีต้นทุนต่ำ ซึ่งสามารถนำมาเพิ่มมูลค่าได้โดยนำมาทำเป็นถ่านกระดูก (Bone Charcoal) เพื่อใช้กำจัดสารปนเปื้อนในน้ำเสียได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการนำถ่านกระดูกสัตว์ โดยเฉพาะ กระดูกโค กระบือ ซึ่งเป็นของเสียที่เกิดขึ้นมากที่สุดมาใช้เตรียมเป็นสารดูดซับในการกำจัดโลหะหนัก 2 ชนิดคือตะกั่วและแคดเมียม โดยศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักทั้ง 2 ชนิดดังกล่าว และผลของสภาวะการเตรียมถ่านกระดูกซึ่งถูกกระตุ้นด้วยสารละลายซิงก์คลอไรด์ในสัดส่วนต่างๆ ตลอดจนสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิด ซึ่งหากประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักสูงพอที่จะนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียจริงได้ ก็จะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการผลิตสารดูดซับที่มีราคาถูกมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียได้

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. ศึกษาลักษณะทางกายภาพ และ โครงสร้างของถ่านกระดูกที่เตรียมจากซิงก์คลอไรด์ที่อัตราส่วนของซิงก์คลอไรด์และถ่านกระดูกแตกต่างกัน
2. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก ตะกั่ว และแคดเมียม ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ่านกระดูกกระตุ้นด้วยซิงก์คลอไรด์
3. ศึกษาผลของพีเอช ในน้ำเสียที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักโดยใช้ถ่านกระดูกที่ผ่านการกระตุ้นด้วยซิงก์คลอไรด์
4. ศึกษาค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการเตรียมถ่านกระดูก

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. เตรียมถ่านกระดูกเพื่อใช้เป็นสารในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย โดยใช้สารละลายซิงก์คลอไรด์ เข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนซิงก์คลอไรด์ต่อกระดูกบด เป็น 1:1, 1.5:1, 2:1 ตามลำดับ ซึ่งถ่านกระดูกที่ใช้ในการทดลองจะผ่านการบดและร่อน ให้ผ่านตะแกรงเบอร์ 325
2. ศึกษาแนวโน้มของพื้นที่ผิว BET ของถ่านกระดูก ภายหลังจากเตรียมด้วยสารละลายซิงก์คลอไรด์ที่อัตราส่วนต่างๆ
3. ศึกษาการกำจัดโลหะหนักตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยทำการทดลองแบบแบตช์
4. ปรับเปลี่ยนพีเอชน้ำเสียเพื่อศึกษาผลที่มีต่อประสิทธิภาพและความสามารถในการกำจัดโลหะหนักโดยการทดลองแบบแบตช์ ดังนั้น ปรับเปลี่ยนค่าพีเอชน้ำเสีย 5 ค่า คือ พีเอชตั้งแต่ 3 – 7 สำหรับน้ำเสียทั้งตะกั่วและแคดเมียม

5. ศึกษา Adsorption Isotherm ของการกำจัด ตะกั่วและ แคดเมียม โดยการทดลองแบบแบตช์
6. การวิเคราะห์ปริมาณ โลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ใช้วิธีอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรเมตรี (Atomic Absorption Spectrometry)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นวิธีหนึ่งในการนำกระดูก ซึ่งเป็นของเสียจากโรงงานฆ่าสัตว์มาใช้ให้เกิดประโยชน์
2. เป็นการพัฒนาวิธีการเตรียมถ่านกระดูก ให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำอย่างสูงสุด
3. ผลที่ได้จากการทดลองครั้งนี้จะนำไปประยุกต์ใช้จริงสำหรับบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีโลหะหนักเจือปนอยู่ได้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โลหะหนัก

โลหะหนักหมายถึงโลหะที่มีความหนาแน่นเกินกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หรือมีค่าความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23 – 92 ภายในคาบที่ 4 – 7 ของตารางธาตุเช่น ตะกั่ว นิกเกิล ปรัตท แคดเมียม สังกะสี เป็นต้น ซึ่งโลหะหนักแต่ละชนิดจะถูกปล่อยออกจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างชนิดกัน(Dean และคณะ, 1972) โดยทั่วไปโลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็งยกเว้นปรอทที่มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ ซึ่งโลหะหนักส่วนใหญ่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่คล้ายคลึงกันคือ นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมันวาว สามารถตีเป็นแผ่นบางได้ และสะท้อนแสงได้ดี ส่วนคุณสมบัติทางด้านเคมีที่สำคัญคือ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า ดังนั้นโลหะหนักจึงสามารถที่จะรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex compound) ได้หลายรูปที่เสถียรกว่าโลหะอิสระโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ซึ่งสามารถที่จะถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตได้ โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหารและเมื่อโลหะหนักเหล่านี้แพร่กระจายในสิ่งแวดล้อมโดยปนเปื้อนในดิน น้ำ อากาศ และผลผลิตทางการเกษตร ก็จะเข้าสู่ร่างกายมนุษย์และมีผลต่อเมตาบอลิซึมของเซลล์สิ่งมีชีวิต

โดยทั่วไปเราสามารถแบ่งโลหะหนักต่าง ๆ ออกตามคุณสมบัติที่มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตได้เป็น 4 ประเภทดังนี้คือ

1. โลหะหนักที่ให้คุณประโยชน์ต่อสิ่งมีชีวิต เช่น เหล็ก และทองแดง เป็นต้น
2. โลหะที่ไม่ก่อประโยชน์และโทษต่อสิ่งมีชีวิต เช่น อะลูมิเนียม
3. โลหะหนักที่สะสมในสิ่งมีชีวิตและก่อให้เกิดโทษ เช่น ปรัตท ตะกั่ว และสารหนู
4. โลหะที่ก่อประโยชน์ถ้าสิ่งมีชีวิตได้รับเพียงเล็กน้อย แต่ให้โทษถ้าได้รับในปริมาณมาก

2.2 ตะกั่ว

2.2.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของตะกั่ว

ตะกั่ว เป็นโลหะสีเทาอมน้ำเงิน มีลักษณะอ่อนสามารถตัดให้ขาดได้ง่าย เมื่อหลอมหรือถูกตัดขาดใหม่ๆ ผิวหน้ามีลักษณะเป็นเงา ในตารางธาตุ ตะกั่วอยู่ในกลุ่มที่ IVA ของตารางพีริออดิก(periodic table of elements) มีเลขอะตอม(atomic number) เท่ากับ 82 และน้ำหนักเชิงอะตอม(atomic weight) เท่ากับ 207.19 ซึ่งคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของตะกั่วและสารประกอบตะกั่วแสดงในตารางที่ 2.1 โลหะตะกั่วเป็นที่รู้จักมาตั้งแต่สมัยโบราณ และมีการนำมาใช้ประโยชน์มากกว่า 6,000 ปีแล้วในยุคอาณาจักรโรมัน จากการค้นพบบันทึกทางการแพทย์ในสมัยนั้น พบว่าพิษของสารตะกั่วอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อาณาจักรอันยิ่งใหญ่ต้องล่มสลายไป สารประกอบของตะกั่วมีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ สารประกอบของตะกั่วสามารถใช้งานอย่างกว้างขวาง ตะกั่วเข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้โดยธรรมชาติและโดยการกระทำของมนุษย์ด้วยเหตุผลนี้เองจึงทำให้อาหารทุกชนิดปนเปื้อนด้วยตะกั่ว อาหารเป็นแหล่งสำคัญที่มนุษย์ได้รับตะกั่วจากธรรมชาติ ตะกั่วมีพิษเฉียบพลันค่อนข้างต่ำ พิษของตะกั่วที่สำคัญในมนุษย์ส่วนใหญ่เป็นพิษเรื้อรังซึ่งเกิดจากการได้รับตะกั่วเป็นเวลานาน อาการพิษที่สำคัญคือ ผลต่อระบบประสาท ตะกั่วมีผลต่อเด็กมากกว่าผู้ใหญ่ ตะกั่วมีพิษเฉียบพลันสูงในสัตว์น้ำโดยเฉพาะ tetraethyllead และ tetramethyllead สารประกอบของตะกั่วถูกจัดเป็นวัตถุอันตรายชนิดที่ 3 ออกตามความในพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 ยกเว้น lead arsenate ซึ่งถูกจัดเป็นวัตถุอันตรายชนิดที่ 4 ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่องบัญชีรายชื่อวัตถุอันตราย พ.ศ. 2538

2.2.2 ชนิดของตะกั่ว

ตะกั่วที่นำมาใช้ในวงการอุตสาหกรรมมี 2 ชนิด คือ

1. สารประกอบอนินทรีย์ตะกั่ว เช่น

1.1 โลหะตะกั่ว ใช้ผสมในแท่งโลหะผสมหรือ ผงเชื่อมบัดกรีโลหะ

1.2 ออกไซด์ของตะกั่ว ได้แก่

- ตะกั่วโมโนออกไซด์ ใช้เป็นสารสีเหลืองผสมสีทาบ้าน

- ตะกั่วไดออกไซด์ ใช้ทำเป็นขั้วอิเล็กโทรดของแบตเตอรี่รถยนต์

และเครื่องจักร

- ตะกั่วออกไซด์หรือตะกั่วแดงใช้เป็นสีทาโลหะเพื่อกันสนิม

1.3 สารประกอบของเกลือตะกั่วจะมีสีต่าง ๆ กัน จึงนิยมใช้เป็นแม่สี หรือสีผสมทำให้เกิดสีต่าง ๆ ใช้ในอุตสาหกรรมการทำสีเช่น

- ตะกั่วคาร์บอเนต ผสมกับตะกั่วไฮดรอกไซด์รวมกัน เรียกว่า “ตะกั่วขาว”

- ตะกั่วโครเมต หรือ Chrome yellow

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของโลหะ lead และสารประกอบ lead (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2545)

สารประกอบ lead	MP* (°ซ)	BP (°ซ)	SpGr	SW
โลหะ lead	327.4	1,740	11.34	none
anhydrous lead acetate	280	NA	3.25	443 (20)
basic lead acetate	75	NA	NA	625 (15)
lead acetate trihydrate	75	200	2.55	456 (15)
lead tetraacetate	175	NA	2.228	NA
lead carbonate	315	NA	6.6	0.0011 (20)
basic lead carbonate	NA	NA	6.14	NA
lead fluoride	855	1,290	8.24	0.64 (20)
lead chloride	501	950	5.84	9.9 (20)
lead bromide	373	916	6.66	8.44 (20)
lead iodide	402	954	6.16	0.63 (20)
lead oxide	888	1,472	9.53	0.017 (20)
lead dioxide	290	NA	9.375	none
lead sesquioxide	370	NA	NA	none
lead tetroxide	NA	NA	9.1	NA
lead monosilicate	700 – 784	NA	6.50 – 6.65	NA
tribasic lead silicate	705 – 733	NA	7.52	NA
tribasic lead sulfate	NA	NA	6.9	0.0262 (18)
tetraethyllead	-136.80	200	1.653	0.00029 (25)
tetramethyllead	-27.5	110	1.995	none

*MP = จุดหลอมเหลว (°ซ), BP = จุดเดือด (°ซ), SpGr = ความถ่วงจำเพาะ,
SW = การละลายน้ำ, กรัม/ลิตร (ที่อุณหภูมิ), NA = ไม่มีข้อมูล, none = ไม่ละลายน้ำ

- ตะกั่วอาร์เซเนต ใช้เป็นยาฆ่าแมลงและปราบศัตรูพืช
- ตะกั่วซิลิเกต ใช้ผสมในกระเบื้อง เครื่องเคลือบ หรือเซรามิก

เพื่อให้เกิดความเป็นเงางามและมีผิวเรียบ เป็นต้น

2. สารประกอบอินทรีย์ของตะกั่วเช่น ตะกั่วเตตระเอซิด และตะกั่วเตตระเมทิล ใช้เป็นสารกันเนื้อก หรือสารป้องกันการกระตุกของเครื่องยนต์เวลาทำงาน ทำให้ค่าออกเทนของน้ำมันสูงขึ้นจึงใช้ผสมในน้ำมันเบนซิน สารนี้มีสีแดง ฉะนั้น น้ำมันชนิดพิเศษทั้งหลายจึงมีสีแดงด้วย สารประกอบอินทรีย์ของตะกั่วค่อนข้างจะเป็นพิษมากกว่าตะกั่วอนินทรีย์เพราะระเหยกระจายไปในอากาศได้ดี สำหรับตะกั่วที่ออกมาจากท่อไอเสียรถยนต์จะอยู่ในรูปของตะกั่วออกไซด์ชนิดต่าง ๆ ซึ่งเป็น ตะกั่วอนินทรีย์

2.2.3 ทางไปสู่สิ่งแวดล้อม

การเข้าสู่สิ่งแวดล้อมของตะกั่ว เกิดได้ทั้งโดยธรรมชาติและจากการกระทำของมนุษย์ การระเบิดของภูเขาไฟและการสึกกร่อนของแหล่งแร่ตามธรรมชาติเป็นสาเหตุหลักของการเข้าสู่สิ่งแวดล้อมของตะกั่วที่เกิดโดยธรรมชาติ ซึ่งเกิดขึ้นรวมกันประมาณ 19,000 ตัน/ปี (Nriagu and Pacyna, 1989) ซึ่ง การเข้าสู่สิ่งแวดล้อมของตะกั่ว จากการกระทำของมนุษย์เกิดขึ้นจาก

1. การทำเหมืองแร่ ประมาณร้อยละ 70 ของสินแร่ตะกั่ว มักเกิดร่วมกับสังกะสี (zinc) ดังนั้นการเข้าสู่สิ่งแวดล้อมของตะกั่วและสังกะสีจึงเกิดร่วมกัน การทำเหมืองแร่ทำให้ตะกั่วไหลสู่แหล่งน้ำธรรมชาติเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ยังทำให้มีการปนเปื้อนในอากาศจากการฟุ้งกระจายของผงแร่ การถลุงแร่และการทำแร่ให้บริสุทธิ์ทำให้ตะกั่วปนเปื้อนในน้ำ อากาศ การนำเศษแร่มากองทับถมทำให้ตะกั่วปนเปื้อนในดินและน้ำใต้ดิน

2. การผลิตสารประกอบของตะกั่วรวมทั้งการผสมปรุงแต่งผลิตภัณฑ์และการแบ่งบรรจุโรงงานที่ไม่มีการควบคุมฝุ่นละอองที่ดี จะทำให้ตะกั่วฟุ้งกระจายเข้าสู่บรรยากาศ และถ้าโรงงานไม่มีระบบบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพดีพอ จะทำให้ตะกั่วในน้ำที่มาจากโรงงานปนเปื้อนในแหล่งน้ำธรรมชาติได้

3. การเก็บรักษาและการขนส่ง ซึ่งเกิดจากอุบัติเหตุ การหกหรือรั่วไหล

4. การใช้ สารประกอบตะกั่วถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในทางอุตสาหกรรม เพื่อใช้ผลิตสารประกอบและผลิตภัณฑ์ต่างๆ ตะกั่วและสารประกอบตะกั่วหลายชนิดถูกนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ใช้ภายในบ้านเรือน เช่น ยาข้อมผม สีทาบ้าน ลูกปืน สารกำจัดแมลง และแบตเตอรี่รถยนต์ การใช้ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ ทำให้ตะกั่วเข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้

การใช้ lead arsenate ในการกำจัดแมลง ทำให้ตะกั่วปนเปื้อนในอากาศ น้ำ และดิน การฉีดพ่นทำให้ละอองของตะกั่วปนเปื้อนในอากาศ ซึ่งสามารถแพร่กระจายได้โดยลม การ

เข้าสู่บรรยากาศของตะกั่วที่สำคัญอีกสาเหตุหนึ่งก็มาจากไอเสียของรถยนต์ซึ่งใช้น้ำมันเบนซินที่ผสมด้วย เป็นสารป้องกันการน็อกของเครื่องยนต์ ในปัจจุบันประเทศต่าง ๆ รวมทั้งประเทศไทย ได้ห้ามการใช้น้ำมันที่ผสม tetraethyllead หรือ tetramethyllead จึงทำให้การเข้าสู่บรรยากาศของตะกั่วจากไอเสียรถยนต์ลดลง

5. การจัดการกากของเสีย โรงงานที่มีระบบบำบัดน้ำเสียที่ไม่มีประสิทธิภาพ ในการกำจัดตะกั่ว ทำให้ตะกั่วปนเปื้อนในแหล่งน้ำธรรมชาติและตะกอนดิน การจัดการกากของเสียที่มีตะกั่วโดยการเผาในเตาเผาที่มีระบบกำจัดอากาศเสีย (scrubber) ที่ไม่ดีพอทำให้ตะกั่วปล่อยออกสู่บรรยากาศได้ อย่างไรก็ตามถึงแม้ระบบบำบัดน้ำเสีย และอากาศเสียที่มีประสิทธิภาพดี ก็ไม่อาจกำจัดตะกั่วให้หมดได้ก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม จึงทำให้ต้องมีมาตรฐาน กำหนดปริมาณ total lead ในน้ำทิ้ง และอากาศที่ปล่อยจากแหล่งกำเนิดมลพิษ

2.3 แคดเมียม

2.3.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของแคดเมียม

แคดเมียมเป็นธาตุที่อยู่ใน กลุ่ม II B ของตารางพีริออดิก (periodic table of elements) มีเลขอะตอม (atomic number) เท่ากับ 48 และน้ำหนักเชิงอะตอม (atomic weight) เท่ากับ 112.40 ซึ่งแคดเมียมเป็น โลหะที่มีคุณสมบัติเบา อ่อน ดัดงอได้ง่าย และทนต่อการกัดกร่อน มีความถ่วงจำเพาะ 8.65 จุดหลอมละลาย 320.9°C จุดเดือด 767°C

ความดันไอของแคดเมียมมีค่า 1.4 มิลลิเมตรที่ 400 และ 16 มิลลิเมตร ที่ 500 ดังนั้น ในกระบวนการที่ใช้ความร้อนสูง เช่น การอบแร่ การบัดกรี การหลอมเศษเหล็ก และการเผาของเสีย จะทำให้มีไอของแคดเมียม ออกมาได้ ในระหว่างกระบวนการ และไอของแคดเมียมในอากาศจะถูกออกซิไดซ์อย่างรวดเร็วไปเป็น แคดเมียมออกไซด์

แคดเมียมเป็นธาตุที่ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ดีใน กรดไนตริก และละลายได้ใน กรดไฮโดรคลอริกอย่างช้า ๆ จะเห็นว่าแคดเมียมจะละลายได้ในกรดอ่อน จากคุณสมบัติขี้ผึ้งนี้ แคดเมียมจึงเป็นอันตรายต่อคนแบบเฉียบพลันเมื่อกินเข้าไป

สารประกอบของแคดเมียม เช่น Cadmium sulfate (CdSO_4), Cadmium chloride (CdCl_2) และ Cadmium nitrate ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$) เป็นสารประกอบที่ไม่มีสีและละลายได้ดีในน้ำ นอกจากนี้แคดเมียมสามารถรวมกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่สามารถละลายน้ำได้ โดยเฉพาะ เมื่อรวมกับ Cyanides และ amines

2.3.2 ทางไปสู่สิ่งแวดล้อม

แหล่งที่แพร่กระจายแคดเมียมสู่สิ่งแวดล้อม คือ

1. จากอุตสาหกรรมตะกั่วและสังกะสี ได้แก่ การทำเหมือง การหลอม และถลุง อุตสาหกรรมตะกั่วและสังกะสี ซึ่งจะปล่อยฝุ่น ไอ น้ำเสีย กากตะกอน ที่มีแคดเมียมปนอยู่ออกมา
2. จากโรงงานชุบโลหะแคดเมียม ซึ่งของเสียจากโรงงานประเภทนี้จะมี แคดเมียม ประมาณ 100 – 500 ppm และมีโลหะหนักอื่นๆ รวมทั้งไซยาไนด์และสารเคมีอื่นๆ ผสมอยู่ด้วย
3. จาก Primary iron and steel industry และ secondary non – ferrous metal industry อุตสาหกรรมประเภทนี้จะปล่อยฝุ่น ไอ น้ำเสีย กากตะกอน ที่มีแคดเมียมปนอยู่ออกมา
4. จากการเผาของเสีย การเผาของเสียที่มีแคดเมียมประกอบอยู่เช่นพลาสติก เม็ดสี โลหะเคลือบ เศษเหล็ก เป็นต้น จะปล่อยแคดเมียมออกมาในรูป Cadmium aerosols เช่น Cadmium oxide (CdO)
5. จากยางรถยนต์ที่สึกหรือ ยางรถยนต์จะมีแคดเมียมประกอบอยู่ประมาณ 20 – 90 ppm โดยเป็นสิ่งเจือปนใน Zinc oxide ซึ่งเป็นสารรักษาความเงา
6. จากปุ๋ยฟอสเฟต ปุ๋ยฟอสเฟตมีแคดเมียมปนอยู่ เนื่องจากหินฟอสเฟตที่เป็นวัตถุดิบที่มีแคดเมียมประมาณ 2–170 ppm มีรายงานการศึกษาพบว่าการใช้ปุ๋ยฟอสเฟตจะไปเพิ่มปริมาณแคดเมียมในดิน เพราะ Cadmium phosphate ละลายน้ำได้น้อย และ ส่วนที่ไม่ละลายพืชไม่สามารถดูดซึมได้ ดังนั้นแคดเมียมส่วนนี้จึงสะสมอยู่ในดิน แต่ถ้ามีการใช้ปุ๋ยแอมโมเนียมร่วมด้วย แคดเมียมจะละลายได้มากขึ้นเนื่องจากแคดเมียมจะไปรวมตัวกับแอมโมเนียเป็นไอออนที่ละลายน้ำได้คือ $\text{Cd}(\text{NH}_3)_2^{+2}$ และ $\text{Cd}(\text{NH}_3)_4^{+2}$
7. จากการใช้ถ่านหิน และ heating oil แคดเมียมเป็นธาตุปริมาณน้อยใน fossil fuels ดังนั้น เมื่อมีการใช้เชื้อเพลิงเหล่านี้ แคดเมียมจะถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมในรูปของ ไอและเถ้า ปริมาณแคดเมียมในถ่านหินอยู่ในช่วง 0.25 – 5 ppm ถึงแม้จะไม่ทราบเปอร์เซ็นต์ที่แน่นอนของแคดเมียมที่ถูกปล่อยออกจากปล่อง หรือส่วนที่ถูกขจัดโดย scrubber หรือส่วนที่ถูกทำให้ตกตะกอนก็ตาม แต่พบว่าในเถ้าจากถ่านหินมีปริมาณแคดเมียมสูงถึง 150 ppm ส่วนความเข้มข้นของแคดเมียมโดยเฉลี่ยใน heating oil ประมาณ 0.3 ppm
8. จากกากตะกอนของน้ำทิ้ง กากตะกอนจากโรงงานกำจัดน้ำเสียมีปริมาณแคดเมียมค่อนข้างสูง ปริมาณแคดเมียมในกากตะกอนจากโรงงานกำจัดน้ำเสีย จำนวน 56 แห่ง ในประเทศสวีเดน มีค่าเฉลี่ย 15.6 ppm และการใช้กากตะกอนเหล่านี้เพื่อเป็นปุ๋ย จะเป็นการเพิ่มปริมาณแคดเมียมในดิน ได้มีการคำนวณว่าจากการใช้กากตะกอนของน้ำทิ้ง(ที่มีแคดเมียมประมาณ 20 ppm หรือมากกว่า) จำนวน 2 – 3 ตัน/ปี ใส่งลงในพื้นที่เพาะปลูกที่ยังไม่มีปัญหามลพิษ(แคดเมียม

< 0.1 – 0.5 ppm) จะไปเพิ่มปริมาณแคดเมียมในดินเพาะปลูกนี้เป็น 1.2 – 6 ppm และพบว่า พืชบางชนิด เช่น ข้าว ข้าวสาลี สามารถดูดซึมแคดเมียมจากดินได้ดี

9. จากการศึกษาก่อนของสังกะสี แคดเมียมเป็นลิ่งเจือปนในสังกะสี เมื่อโลหะหรือภาชนะที่ชุบสังกะสี เกิดการสึกกร่อนแคดเมียมก็จะแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้

10. ยาสูบ จากการสูบบุหรี่พบว่ามีแคดเมียมออกสู่บรรยากาศ 1.4 ไมโครกรัม/บุหรี่ยี่ 1 มวน

2.3.3 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงในสิ่งแวดล้อม

1. การแตกตัวทำปฏิกิริยากับน้ำ (hydrolysis)

แคดเมียมตามแหล่งน้ำในธรรมชาติ มีอยู่ด้วยกันหลายรูป เช่น ในรูปของไอออน สารประกอบของโลหะ-อนินทรีย์ หรือ โลหะ-อินทรีย์ แต่ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของ divalent cadmium ion และปัจจัยสำคัญที่ทำให้แคดเมียมอยู่ในรูปอื่น คือ พีเอช และปริมาณสารอินทรีย์ เนื่องจากไอออนของแคดเมียมจะรวมตัวเป็นสารประกอบกับสารหรือไอออนอื่นๆ ที่อยู่ในน้ำตามลำดับก่อนหลังในแง่ของการจับตัว คือ $\text{humic acid} > \text{CO}_3^{2-} > \text{OH}^- \geq \text{Cl}^- \geq \text{SO}_4^{2-}$

EPA (1979) ได้รายงานไว้ว่า พีเอช และความกระด้างไม่ได้มีส่วนสำคัญมากนักในปฏิกิริยาการจับตัวระหว่างโลหะกับสารอินทรีย์ แต่จะมีส่วนสำคัญมากในปฏิกิริยาการจับตัวระหว่างโลหะกับ humic acid กล่าวคือ เมื่อ พีเอช เพิ่มขึ้น ก็จะไปเพิ่มการเปลี่ยนแปลงรูปของแคดเมียมในขณะที่เมื่อความกระด้างเพิ่มขึ้นจะไปมีผลทำให้การทำปฏิกิริยาของแคดเมียมกับ humic acid ลดลง

ในการเปลี่ยนแปลงรูปโดยปฏิกิริยาของน้ำ แคดเมียมจะรวมตัวเป็นสารประกอบกับ hydroxyl group (OH⁻) เช่น CdOH^+ , Cd(OH)_2 , Cd(OH)_3^- และ Cd(OH)_4^{2-} แคดเมียมที่ละลายน้ำเกือบทั้งหมดจะอยู่ในรูปของไอออนบวกที่มีวาเลนซ์ 2 แต่เมื่อน้ำมี พีเอชสูงขึ้น (พีเอช > 9) แคดเมียมจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่เป็นของแข็งไม่ละลายน้ำ คือ Cd(OH)_2 โดยปฏิกิริยาข้างล่างนี้



2. การดูดซับ (sorption)

ในกระบวนการ sorption โดยที่แคดเมียมติดอยู่กับผิวของเกลือแร่ หรือ hydrous metal oxides หรือ สารอินทรีย์ต่างๆ เป็นการขจัดเอาแคดเมียมออกมาได้มากกว่าการทำให้ตกตะกอน (precipitation) จากการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการ sorption แคดเมียมให้ติดกับดิน

เหนียว สารอินทรีย์ hydrous iron, aluminum or manganese oxide และ carbonate minerals พบว่า แคลเซียมในตะกอนที่นอนก้นจะมีมากกว่าในน้ำ

โดยสรุป sorption process เป็นกระบวนการสำคัญที่ลดปริมาณแคลเซียมในแหล่งน้ำ โดยเคลื่อนย้ายไปสะสมอยู่ในตะกอน และแคลเซียมที่อยู่ในตะกอนดิน จะถูกกระจายออกมาในชั้นน้ำได้ เมื่อความเค็มของน้ำเพิ่มขึ้น

3. การระเหยเป็นไอ (evaporation)

แคลเซียมจากแหล่งน้ำไม่สามารถจะระเหยกลายเป็นไอ เพื่อทำปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นรูปอื่น ซึ่งแตกต่างไปจากปรอท ทั้งๆ ที่แคลเซียมอยู่ติดลงมาในคอลัมน์เดียวกันของตารางพีริออดิก แต่ปฏิกิริยาทางเคมีส่วนใหญ่จะคล้ายคลึงกันยกเว้นปฏิกิริยาทางชีวะ เช่น methylation ของแคลเซียม กลับไม่ปรากฏ

4. การเปลี่ยนไปโดยปฏิกิริยาของออกซิเจน (oxidation)

จากปฏิกิริยา oxidation ของตะกอน พบว่า dissolved oxygen เพิ่มขึ้น pH ลดลง จะมีผลทำให้มีแคลเซียมละลายในน้ำเพิ่มขึ้นในรูปของ hydrated divalent cations, soluble Cl^- และ SO_4^{2-}

โดยสรุป กระบวนการต่างๆ ทางธรรมชาติ หรือในสิ่งแวดล้อมที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ยังไม่สามารถทำลายแคลเซียมได้ ดังนั้นแคลเซียมที่แพร่กระจายอยู่ในสิ่งแวดล้อมจะยังคงอยู่ในสิ่งแวดล้อมเพียงแต่ย้ายจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง และยังมีผลทำให้เกิดการสะสมอยู่ที่ใดที่หนึ่ง เช่น ในดินหรือในสิ่งมีชีวิตบางชนิด และการปล่อยหรือทิ้งแคลเซียมออกสู่สิ่งแวดล้อมจะเป็นการเพิ่มการสะสมดังกล่าวขึ้น ฉะนั้น การควบคุมการแพร่กระจายของแคลเซียมจากแหล่งธรรมชาติ หรือมนุษย์เป็นผู้ก่อขึ้นจึงจำเป็นที่จะต้องเฝ้าระวัง ทั้งนี้เพื่อลดการสะสมในสิ่งแวดล้อม

2.4 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

กระบวนการที่ใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียมียหลายวิธี การพิจารณาจะเลือกใช้วิธีใดนั้นขึ้นอยู่กับ ความเหมาะสมในหลายๆ ด้าน ดังนี้คือ

- คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนบำบัด
- คุณภาพของน้ำที่ต้องการ
- พื้นที่ที่ต้องการใช้ในการบำบัด
- ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย
- ความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่

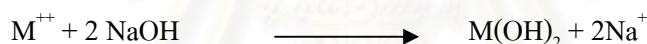
ซึ่งสามารถสรุปวิธีการกำจัดโลหะหนักได้ดังนี้

2.4.1 การตกตะกอนผลึกทางเคมี (Chemical Precipitation)

วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมานานแล้ว โดยการเติมสารเคมีลงในน้ำเพื่อทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่ละลายอยู่ เกิดตะกอนแยกออกได้ ซึ่งการตกตะกอนผลึกด้วยสารเคมีมีหลายวิธีด้วยกัน แต่ที่นิยมคือการตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ และการตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ ซึ่งการตกตะกอนผลึกของโลหะหนักชนิดต่างๆ ในรูปไฮดรอกไซด์และซัลไฟด์แสดงดังรูปที่ 2.1

2.4.1.1 การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์

การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ จัดเป็นการตกตะกอนแบบดั้งเดิม ทำโดยการเติมปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เกิดปฏิกิริยาดังสมการ



โดย M^{++} คือ โลหะไอออน

การตกผลึกไฮดรอกไซด์สามารถใช้กับน้ำเสียได้หลายประเภทด้วยกัน แต่มีข้อจำกัดคือ โลหะไฮดรอกไซด์จะไม่สามารถตกตะกอนที่พีเอชใดพีเอชหนึ่ง แต่จะตกตะกอนในช่วงพีเอชกว้าง โดยทั่วไปโลหะส่วนใหญ่จะตกตะกอนได้ดีที่พีเอชประมาณ 8-11 และโลหะไฮดรอกไซด์นี้สามารถละลายกลับมาได้อีกถ้าพีเอชเปลี่ยนไปจากค่าพีเอชที่ตกตะกอน

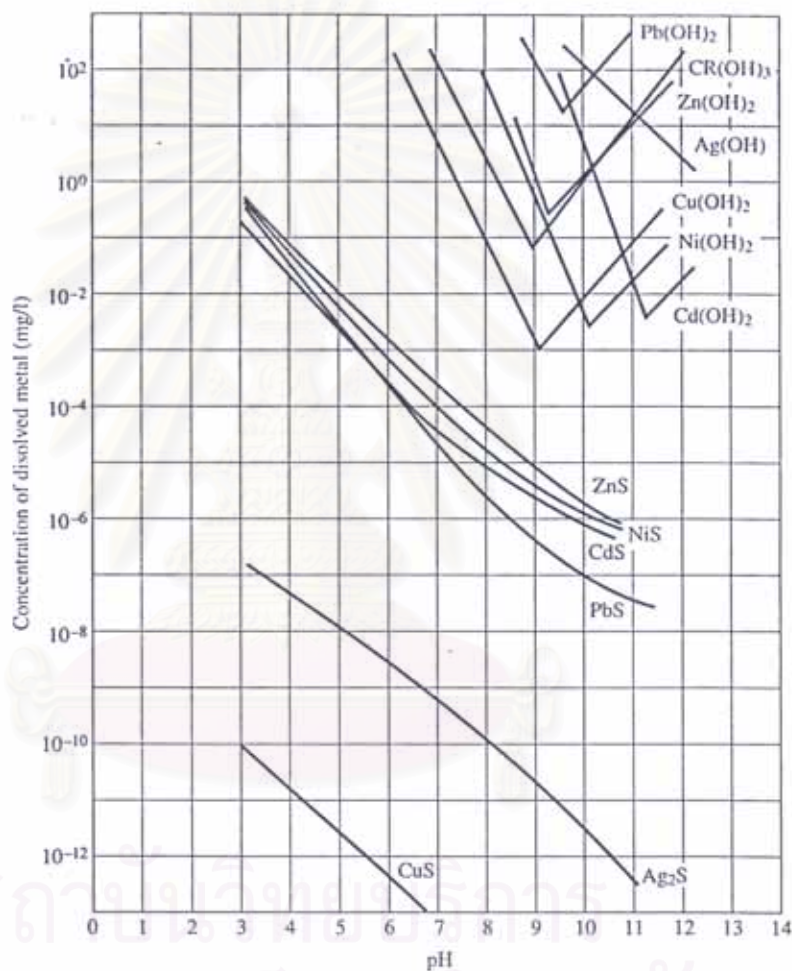
2.4.1.2 การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์

การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์จะใช้โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) หรือโซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ ($NaHS$) หรือเฟอร์รัสซัลไฟด์ (FeS) เป็นสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการ



โดย M^{++} คือ โลหะไอออน

ข้อดีของการตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ คือการละลายของโลหะซัลไฟด์เกิดขึ้นน้อยมาก เมื่อเทียบกับโลหะไฮดรอกไซด์ แต่การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์มีข้อจำกัดคือเรื่องกลิ่นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเกิดจากไอออนของซัลไฟด์ที่มากเกินไปจึงต้องมีการป้องกันก๊าซที่เกิดขึ้น โดยการนำเอาซัลไฟด์ออกก่อนที่จะระบายน้ำทิ้ง



รูปที่ 2.1 การตกตะกอนผลึกของโลหะหนักชนิดต่างๆในรูปไฮดรอกไซด์และซัลไฟด์ (Eckenfelder,2000)

2.4.2 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

การแลกเปลี่ยนไอออนสามารถแยกโลหะหนักออกจากสารละลายได้ โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดมีความชอบหรือถูกดูดซับด้วยเรซินได้ไม่เท่ากัน ซึ่งเรซินที่ใช้แลกเปลี่ยนไอออนนี้จะมีทั้งได้จากธรรมชาติและชนิดที่สังเคราะห์ขึ้น ซึ่งเรซินนี้จะมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่และจะถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามซึ่งไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามกันนี้เป็นไอออนที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย

วิธีนี้จะเหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง นิยมใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดคือ ถ้ามีสารปนเปื้อนชนิดอื่นอยู่จะต้องกำจัดออกก่อนที่จะเข้าถังเรซินเพื่อให้การบำบัดมีประสิทธิภาพสูงที่สุด และยังมีข้อเสียที่ต้องใช้ค่าใช้จ่ายในการลงทุนและดำเนินการสูง

2.4.3 การรีเวอร์ส ออสโมซิส (Reverse Osmosis)

วิธีการนี้เป็นการแยกโลหะออกจากน้ำเสีย โดยหลักการความแตกต่างของแรงดันระหว่างแผ่นเมมเบรนที่ทำด้วยสารเซลลูโลสอะซิเตดและโพลีเอไมด์ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นเยื่อเลือกผ่าน (Semi-permeable Membrane) ซึ่งจะให้เฉพาะตัวทำละลายผ่านเพื่อแยกสารที่ต้องการออกและทำให้เข้มข้น วิธีนี้ต้องใช้แรงดันสูงอาจสูงกว่า 100 ความดันบรรยากาศดังนั้นแผ่นเมมเบรนจึงต้องทนความดันสูงและต้องมีการบำบัดขั้นต้นโดยการปรับพีเอช แยกสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงออกและกรองสารแขวนลอยออกก่อนเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน วิธีนี้เหมาะสำหรับกำจัดโลหะหนักจากอุตสาหกรรมการชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้าและน้ำเสียจากการล้างภาพ

2.4.4 การออกซิเดชันและการรีดักชัน (Oxidation and Reduction)

วิธีการนี้เป็นวิธีทางเคมีที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ ซึ่งมีสารประกอบของโลหะต่างๆ เจือปนอยู่ ในการกำจัดต้องเติมสารเคมีลงไปเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับสารประกอบที่ต้องการกำจัด ทำให้สารประกอบนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่เป็นพิษหรือตกตะกอนได้ สารเคมีที่ใช้เป็นตัวออกซิเดชันได้แก่ อากาศ ออกซิเจน โอโซน คลอรีน ไฮโปคลอไรต์ เปอร์แมงกาเนต โครเมต และไนเตรต ส่วนสารเคมีที่ทำให้เกิดรีดักชัน ได้แก่ เหล็ก(II)ซัลเฟต โซเดียมเมตาไบซัลเฟต ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ สำหรับตัวอย่างการบำบัดน้ำทิ้งด้วยวิธีการออกซิเดชัน ได้แก่ การกำจัดไซยาไนด์ในน้ำทิ้งของโรงงานชุบโลหะโดยใช้คลอรีนหรือไฮโปคลอไรต์ ส่วนตัวอย่างการบำบัดน้ำทิ้งด้วยวิธี

รีดักชัน ได้แก่ การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะที่มีสารประกอบโครเมตหรือกรดโครมิกเจือปนอยู่โดยใช้เหล็ก(II)ซัลเฟต โดยต้องทำปฏิกิริยาที่พีเอชต่ำกว่า 3 หลังจากนั้นเติมปูนไลม์ลงไป เพื่อตกตะกอนอีกชั้นหนึ่ง ซึ่งจะเห็นได้ว่าการบำบัดด้วยวิธีนี้ ค่าพีเอชมีความสำคัญมาก จะต้องปรับพีเอชให้มีค่าที่เหมาะสม ปฏิกิริยาจึงจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์

2.4.5 การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า(Electrolytic Recovery)

วิธีนี้เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าซึ่งจะลดปริมาณไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทด (ขั้วบวก) และเกิดออกซิเจนที่ขั้วแอโนด (ขั้วลบ) ตลอดเวลา วิธีนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะสูงแต่วิธีนี้มักไม่นิยมเพราะสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสูงมาก

2.4.6 การระเหย (Evaporation)

เป็นการระเหยเอาน้ำออกซึ่งเป็นวิธีง่าย ๆ ที่ใช้ในการทำให้สารมีความเข้มข้นสูงขึ้น การระเหยมีทั้งการระเหยที่บรรยากาศธรรมดาและระเหยภายใต้สภาวะสุญญากาศ วิธีการบำบัดแบบนี้จะได้ผลดีกับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักสูง แต่มีข้อเสียที่ต้องใช้ทุนในการดำเนินงานสูงเพื่อที่จะทำให้กระบวนการมีประสิทธิภาพสูง

2.4.7 การอิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis)

วิธีนี้เป็นการแยกไอออนออกจากสารละลายด้วยไฟฟ้าตรงรวมกับการใช้เมมเบรนสำหรับไอออนแต่ละชนิด (Ion Selective Membrane) กลไกของกระบวนการนี้เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย ซึ่งน้ำเสียจะต้องผ่านการกรองก่อนเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน ความบริสุทธิ์ของไอออนขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเมมเบรน วิธีนี้มีข้อเสียตรงมีค่าต้นทุนการก่อสร้างและดำเนินการสูง แต่มีข้อดีคือ สามารถกำหนดชนิดไอออนที่ต้องการได้

2.4.8 การดูดติดผิว (Adsorption)

การดูดติดผิวเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมความเข้มข้นของอนุภาคที่ผิวหน้า หรือระหว่างผิวของสารสองสถานะไม่ว่าจะเป็นสถานะของแข็งกับของเหลว ก๊าซกับของ

เหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดเรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีพื้นที่ผิวเป็นที่เกาะจับของสารดูดซับเรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent)

ถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับชีวชนิดสำคัญ ทำจากวัตถุดิบได้หลายชนิดคือ ไม้ชนิดต่างๆ ขี้เลื่อย ถ่านบิทูมินัส กระจุก กะลามะพร้าว ลิกไนต์ ซากพืช โดยผ่านกระบวนการเพื่อทำให้เกิดรูพรุนจำนวนมากที่ผิว ในด้านคุณภาพถ่านจะแตกต่างกันไปตามชนิดวัตถุดิบ

2.5 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์มีมากมายหลายวิธี ซึ่งขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบและสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ ซึ่งโดยทั่วไปประกอบด้วย 2 ขั้นตอนดังนี้

2.5.1 การคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization)

การคาร์บอนไนเซชันเป็นกระบวนการไพโรไลซิสรูปแบบหนึ่ง ซึ่งเผาในที่อับอากาศที่อุณหภูมิ 200 – 500 องศาเซลเซียส มีจุดมุ่งหมายคือ เพิ่มเปอร์เซ็นต์คาร์บอนให้สูงขึ้น โดยให้ความร้อนแก่วัสดุจนกระทั่งสารปนเปื้อนที่ไม่ใช่คาร์บอนสลายตัวไป การคาร์บอนไนเซชันเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ เพราะเป็นขั้นตอนการเริ่มต้นการเกิดโครงสร้างที่เป็นรูพรุน โดยทำให้เกิดการแตกตัวทางเคมีของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน ออกมาในรูปก๊าซ คาร์บอนอิสระที่มีอยู่จะรวมตัวกันในรูปของชาร์

2.5.2 กระบวนการกระตุ้นถ่านชาร์

2.5.2.1 วิธีกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation)

เป็นวิธีการผลิตสารกระตุ้นทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารเคมีที่นิยมใช้ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ข้อดีของการกระตุ้นด้วยวิธีนี้คือใช้อุณหภูมิไม่สูงมากนัก (400 – 600 องศาเซลเซียส) แต่มีข้อเสียคือมีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีออก อีกทั้งอุปกรณ์ที่ใช้ต้องเป็นชนิดพิเศษที่ทนการกัดกร่อน ตัวกระตุ้นดังกล่าวมักเป็นเกลืออนินทรีย์พวกเกลือของโลหะคลอไรด์ เช่น แคลเซียมคลอไรด์ แมกนีเซียมคลอไรด์ ซึ่งละลายน้ำได้ดี

ต่อมานิยมใช้ซิงก์คลอไรด์ โดยหลักการแล้วสามารถใช้เกลืออนินทรีย์ทุกชนิดที่ทนต่อการเผาไหม้ แต่ซิงก์คลอไรด์มีคุณสมบัติที่ได้เปรียบดังนี้

- เนื่องจากซิงก์คลอไรด์มีจุดเดือดสูงถึง 756 องศาเซลเซียส จึงมีความคงทนต่อการสลายตัวที่อุณหภูมิสูง

- ซิงก์คลอไรด์ สามารถกระจายอยู่ทั่วไปได้มากและค่อนข้างสม่ำเสมอ กว่าเกลืออื่นๆ ดังนั้นเมื่อสกัดซิงก์คลอไรด์ออกจากหลังการกระตุ้นก็จะเกิดรูพรุนในจำนวนที่มากกว่า และสม่ำเสมอกว่า ซึ่งรูพรุนที่มากขึ้นนี้เองจะช่วยให้คุณสมบัติการกำจัดสารถูกดูดซับดีขึ้น

2.5.2.2 วิธีกระตุ้นทางฟิสิกส์ (Physical Activation)

เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยให้ผิวของคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์ เช่น การจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งจะทำให้ถ่านเพิ่มความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ก๊าซที่นิยมใช้ในการออกซิไดซ์ ได้แก่ ไออน้ำอิมพัลส์ยวดย คาร์บอนไดออกไซด์และออกซิเจน โดยใช้ร่วมกับความร้อน ปฏิกิริยาการกระตุ้นอาจเกิดจากความร้อนเพียงอย่างเดียวแต่ต้องใช้อุณหภูมิสูงมาก 1,200 องศาเซลเซียสแต่ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จะมีคุณภาพต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิต โดยการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์ ปัจจัยที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์ คือ

- สมบัติทางเคมีและความเข้มข้นของก๊าซออกซิไดซ์ที่ใช้
- อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา
- ระยะเวลาของปฏิกิริยา
- ชนิดและปริมาณวัสดุที่ใช้

อุณหภูมิที่ใช้ไม่สามารถกำหนดได้แน่นอน แต่มักไม่เกิน 1,000 องศาเซลเซียส เพราะว่าถ้าใช้อุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส จะทำให้อำนาจการดูดซับของถ่านลดน้อยลงซึ่ง อุณหภูมิที่ใช้ส่วนมากประมาณ 800 – 900 องศาเซลเซียส

การกระตุ้นนั้นคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์กลายเป็นก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์แพร่ออกจากผิวคาร์บอน เกิดแก๊สซิฟิเคชันบางส่วนของเม็ดถ่านเป็นรูพรุนในโครงสร้างของถ่าน ถ่านจากการคาร์บอนไนซ์จะประกอบด้วยรูพรุนเล็ก ๆ จำนวนมาก ซึ่งเกิดจากช่องว่างระหว่างผลึกในการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอม รูพรุนนี้จะถูกอุดตันไว้ด้วยทาร์ที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อนและถูกขัดขวางด้วยอะมอฟสคาร์บอน ดังนั้นการกระตุ้นจึงเป็นการเปิดรูพรุนที่ถูกปิด และสร้างรูพรุนขึ้นมาใหม่ด้วย

2.6 กลไกการดูดซับ(Adsorption Mechanism)

กระบวนการดูดซับสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของแรงที่เข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งการดูดซับทั้งสองแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้และยึดติดกับผิวของของแข็งจนแรงนี้สามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารที่อยู่ในของเหลวได้

การดูดซับทางกายภาพเป็นผลมาจากแรงวานเดอร์วาลส์(Vander waals force) ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และ แรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) โมเลกุลของสารดูดซับจะดูดติดกันทางกายภาพกับโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ การดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) กล่าวคือ แต่ละชั้นของโมเลกุลจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นของโมเลกุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดซับเพิ่มขึ้น (Cheremisinoff, P.N. and Ellerbusch, F. , 1978)

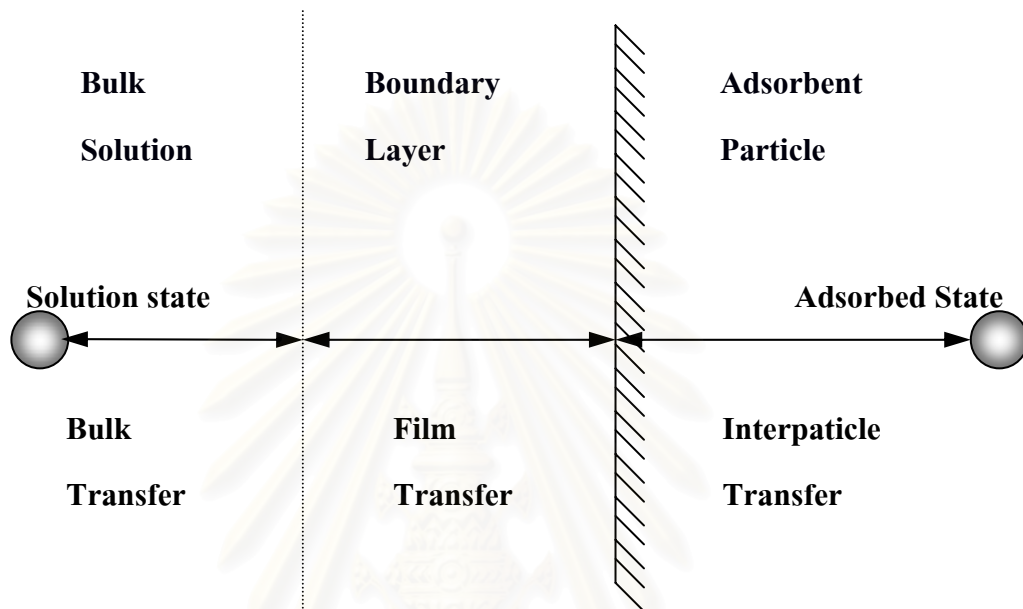
การดูดซับทางเคมี(Chemisorption) เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารดูดซับ และสารที่ถูกดูดซับ เกิดเป็นสารประกอบทางเคมีขึ้น การดูดซับทางเคมีแตกต่างกับทางกายภาพ เนื่องจากการดูดซับแบบชั้นเดียว(Monolayer) และ ไม่สามารถผันกลับได้(Irreversible) ดังนั้น โมเลกุลที่ถูกดูดซับจะติดอยู่ที่ใดที่หนึ่งเฉพาะที่

2.7 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of molecular transfer)

อัตราการดูดซับที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดซับผิวจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับผิวของสารจากสารละลายโดยสารดูดซับที่มีรูพรุนมี 3 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.2 คือ

1. การขนส่งทั้งก้อน (Bulk transfer) เป็นขั้นตอนที่เกิดเร็วที่สุดเกิดโดยการแพร่ของโมเลกุลจากสารละลายไปยังพื้นผิวภายนอกของชั้นของเหลวบางๆ ที่ห่อหุ้มสารดูดซับ
2. การขนส่งชั้นฟิล์ม(Film transfer) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆแทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม(Film diffusion)
3. การขนส่งภายในอนุภาค(Interparticle transfer) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ(Pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน

ภายใต้สภาวะที่มีความปั่นป่วนน้อย การขนส่งชั้นฟิล์มจัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิว แต่หากว่า ภายในระบบมีความปั่นป่วนเพียงพอ ขั้นตอนการแพร่สู่รูพรุน(Pore diffusion) จะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดติดผิว



รูปที่ 2.2 Molecular Transfer(Eckenfelder,1989)

2.8 สมดุลของการดูดซับ (Adsorption Equilibria)

การดูดซับของสารละลายเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของตัวถูกละลายที่อยู่บนผิวหน้าของสารดูดซับ เมื่อกระบวนการดูดซับเกิดขึ้น ตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับจะมีแนวโน้มที่จะหลุดออกมาสู่สารละลายอีกครั้งหนึ่ง ตัวถูกละลายจะเกิดการถูกดูดซับและหลุดออกมาในจำนวนที่เท่าๆ กันที่เวลาสมดุลซึ่งเป็นสถานะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ หรือตัวถูกละลายในสารละลายอีกต่อไป

โดยทั่วไปพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นที่อุณหภูมิคงที่และผลของความสัมพัทธ์นี้ถูกเรียกว่า “ไอโซเทอร์มการดูดติดผิว” (Adsorption isotherm) สมการที่ใช้สำหรับบรรยายข้อมูลไอโซเทอร์มในการทดลองถูกพัฒนาขึ้นมา 3 ประการ โดย Freundlich, Langmuir และ โดย Brunauer, Emmet และ Teller จากทั้ง 3 สมการนี้ ฟรอนดลิชไอโซเทอร์มจะใช้เป็น

เครื่องมือสำหรับบรรยายสมบัติการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในงานบำบัดน้ำ และน้ำเสียบ่อยที่สุด (Metcalf and Eddy, 1991) ซึ่งไอโซเทอมแบบต่างๆ มีรายละเอียดดังนี้

2.8.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

ฟรุนดลิชไอโซเทอรัมมีรูปสมการดังนี้ (Metcalf and Eddy, 1991)

$$\frac{x}{m} = K_f \cdot C_e^{\frac{1}{n}}$$

เมื่อ $\frac{x}{m}$ = ปริมาณทั้งหมดโดยน้ำหนักของสารถูกดูดติดผิวที่ถูกดูดติดต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์

C_e = ความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวในสารละลายที่จุดสมดุลภายหลังการดูดติดผิว

K_f, n = ค่าคงที่เอมไพริกัล หรือค่าคงที่จากการทดลอง

ค่าคงที่ในฟรุนดลิชไอโซเทอรัม สามารถหาได้โดยการกำหนดจุดบนกราฟระหว่างค่า $\log\left(\frac{x}{m}\right)$ กับค่า $\log C_e$ ที่ $C_e = 1$ จะได้ค่า K_f และค่า $\frac{1}{n}$ เท่ากับค่าความชันของเส้นกราฟ สามารถเขียนสมการใหม่ที่ใช้หาค่าคงที่จากการทดลองได้ดังนี้

$$\log\left(\frac{x}{m}\right) = \log K_f + \left(\frac{1}{n}\right) \log C_e$$

2.8.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

แลงมัวร์ไอโซเทอรัมมีรูปสมการดังนี้ (Metcalf and Eddy, 1991)

$$\frac{x}{m} = \frac{abC_e}{1 + bC_e}$$

เมื่อ $\frac{x}{m}$ = ปริมาณทั้งหมดโดยน้ำหนักของสารถูกดูดติดผิวที่ถูกดูดติดต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์

a, b = ค่าคงที่เอมไพริกัล

C_e = ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในสารละลาย ที่จุดสมดุล

ภายหลังการดูดซับ

ค่าคงที่ในแลงมัวร์ไอโซเทอร์ม สามารถหาได้โดยการกำหนดจุดบนกราฟระหว่างค่า $\frac{C_e}{(x/m)}$ กับค่า C_e หากค่า a ได้จากค่าความชันของเส้นกราฟซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{a}$ และหากค่า b ได้จากค่าของ

จุดตัดแกน Y ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{ab}$ สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{C_e}{(x/m)} = \frac{1}{ab} + \frac{1}{a} \cdot C_e$$

2.8.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบบีอีที (BET Adsorption Isotherm)

บีอีทีไอโซเทอร์ม จะมีรูปสมการดังนี้

$$\frac{x}{m} = \frac{ACX_m}{(C_s - C) \left(1 + (A-1) \frac{C}{C_s} \right)}$$

เมื่อ $\frac{x}{m}$ = ปริมาณทั้งหมดโดยน้ำหนักของสารถูกดูดซับที่ถูกละลายต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์

X_m = ปริมาณทั้งหมดของสารถูกดูดซับที่ถูกละลาย ในแบบพ่นชั้นเดียวโดยสมบูรณ์

C_s = ความเข้มข้นอิ่มตัวของสารถูกดูดซับในสารละลาย

C = ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในสารละลายที่จุดสมดุล

A = ค่าคงที่ที่ใช้บรรยายพลังงานของการเกิดร่วมกันระหว่างสารถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของสารดูดซับ

ค่าคงที่ในบีอีทีไอโซเทอมสามารถหาได้โดยการกำหนดจุดบนกราฟระหว่างค่า $\frac{C}{(C_s - C)(x/m)}$ กับค่า $\frac{C}{C_s}$ หากค่า A ได้จากค่าความชันของของเส้นกราฟซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{(A-1)}{A(X_m)}$ และค่าที่จุดตัดแกน Y ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{A(X_m)}$ และสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{C}{(C_s - C)\frac{x}{m}} = \frac{1}{A(X_m)} + \frac{(A-1)}{A(X_m)} \cdot \frac{C}{C_s}$$

2.9 ถ่านกระดูก (Bone charcoal)

ถ่านกระดูกเป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากกระดูกสัตว์ โดยมากนิยมใช้กระดูกโค กระบือ เนื่องจากเป็นวัสดุที่เหลือใช้ ซึ่งในอดีตเมื่อปี ค.ศ. 1811 นักเภสัชศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ได้นำมาใช้เป็นสารฟอกสีน้ำตาล ต่อมาในศตวรรษที่ 19 จึงนิยมใช้กันมากขึ้นอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมน้ำตาลจนกระทั่งปัจจุบันนี้ โดยถ่านกระดูกนี้จัดเป็นสารประเภทอนินทรีย์ ประกอบด้วยองค์ประกอบหลักที่สำคัญ 2 ส่วน คือ คาร์บอน และไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite) โดยคาร์บอนจะเป็นส่วนที่มีกลไกการกำจัดแบบดูดซับ ในขณะที่ไฮดรอกซีอะพาไทต์ซึ่งมีสูตรเคมีดังนี้ $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_5(\text{OH})_2$ ก็คือส่วนประกอบหลักที่เป็นสารอนินทรีย์ในกระดูกนั่นเองซึ่งก็คือสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตรูปแบบหนึ่ง โดยจะเป็นตัวกำจัดสารประเภทโมเลกุลประจุบวกประเภทไอออนอนินทรีย์ (inorganic ion) ได้หลายชนิด ด้วยแรงทางประจุซึ่งมีความแข็งแรงมากกว่าแรงยึดเหนี่ยวบนผิวคาร์บอน (ebonex eoporation, 2004) ดังนั้นจึงมีความแตกต่างกับถ่านกัมมันต์ที่ทำมาจากพืชซึ่งองค์ประกอบหลักๆ คือคาร์บอน เท่านั้น ซึ่งคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ ของถ่านกระดูกเกรดการค้าชื่อ Brimax 216 แสดงดังตารางที่ 2.2

จากองค์ประกอบหลักทั้งสองส่วนนี้เอง จึงทำให้ถ่านกระดูกสามารถที่จะดูดซับได้ทั้งในส่วนของแอนไอออนิกและแคทไอออนิกในสารละลาย นอกจากนี้เมื่อทำการดูดซับด้วยถ่านกระดูกแล้วตัวที่ถูกดูดซับจะถูกยึดติดทางเคมีภายใน โครงร่างผลึกแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า เคมิซอร์บชัน (Chemisorption) และไม่พบคุณสมบัตินี้ในสารที่มีองค์ประกอบคาร์บอนทั่วไป ดังนั้นจึงเป็นปัจจัยที่ทำให้ถ่านกระดูกมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้หลายชนิดนอกจากนี้ถ่านกระดูกยังสามารถใช้ในการดูดซับสี กลิ่น รส ตะกั่ว โลหะหนักชนิดอื่น และสารอินทรีย์ในน้ำได้อีกด้วย

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ ของถ่านกระดูกเกรดการค้าชื่อ
Brimac 216 (Danny และคณะ, 2004)

Chemical composites		Physical properties	
Items	Limits	Items	Limits
Calcium carbonate	7 - 9 wt. %	Bulk density (dry)	640 Kg m ⁻³
Calcium sulfate	0.1 - 0.2 wt. %	Carbon surface area	50 m ² g ⁻¹
Carbon content	9 - 11 wt. %	Total surface area	100 m ² g ⁻¹
CaHAP	70 - 76 wt. %	Pore volume	0.225 cm ³ g ⁻¹
Iron-as Fe ₂ O ₃	< 0.3 wt. %	Moisture	5 wt. %

ปัจจุบันมีการนำถ่านกระดูกมาใช้งานดังต่อไปนี้คือ

1. ใช้เป็นสารดูดซับพิษในอุตสาหกรรมอาหาร โดยเฉพาะอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล ซึ่งนำถ่านกระดูกมาใช้ในการฟอกสีของน้ำตาล
2. ใช้ในการกรองน้ำเพื่อลดระดับของโลหะหนัก คลอไรด์ โบรไมด์ ฟลูออไรด์ รวมทั้งยาฆ่าแมลง
3. ใช้เป็นสารดูดซับพิษสำหรับการกรองน้ำที่ใช้หมุนเวียนในสระว่ายน้ำ

2.10 ผลงานวิจัยที่ผ่านมา

2.10.1 งานวิจัยต่างประเทศ

Yoshiharu และคณะ, 1987 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียด้วยถ่านกระดูกและถ่านกัมมันต์ ทำการทดลองโดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (K₂Cr₂O₇) ที่ความเข้มข้น 100 ppm. ผสมกับถ่านกระดูกหรือถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที พบว่าพีเอชสุดท้ายของสารละลายมีค่าระหว่าง 1 ถึง 7 เมื่อพีเอชของสารละลายเริ่มต้นอยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 3 และพีเอชสุดท้ายมีค่าระหว่าง 7 ถึง 10 เมื่อพีเอชเริ่มต้นมีค่ามากกว่า 3 และประสิทธิภาพการดูดซับของ Cr⁶⁺ จะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชสุดท้ายของสารละลายหลังทำการทดลองคือสำหรับถ่านกัมมันต์ค่าพีเอชสุดท้ายจะอยู่ระหว่าง 3.5 ถึง 5.5

และสำหรับถ่านกระดูกจะมีค่าพีเอชประมาณ 1 จะทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด โดยจะมีโครเมียมทั้งหมดเหลืออยู่ประมาณ 10 และ 46 เปอร์เซ็นต์สำหรับถ่านกัมมันต์ และถ่านกระดูกตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อค่าพีเอชสุดท้ายน้อยกว่า 3.5 Cr^{6+} จะถูกลดรูปเป็น Cr^{3+} และ Cr^{+3} จะค่อยๆ ถูกดูดซับด้วยสารดูดติดผิว

Azab และ Peterson, 1989 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียโดยใช้สารดูดติดผิวทางชีวภาพชนิดต่างๆ เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ ทำการทดลองโดยใช้สารละลายแคดเมียมความเข้มข้น 100 ppm. ให้ผ่านคอลัมน์ที่บรรจุสารดูดติดผิวทางชีวภาพชนิดต่างๆ ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส และ พีเอชเป็น 5.2 พบว่ากระดูกสามารถดูดซับแคดเมียมได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์

Maycock และคณะ, 1997 ได้ทำการศึกษาการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเกลือจากการผลิตคลอรีนและโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยถ่านกระดูก ทำการทดลองโดยใช้สารละลายเกลือที่มีความเข้มข้นต่างๆ ซึ่งมี อะลูมิเนียม ตะกั่ว แมงกานีส และนิกเกิล เจือปนอยู่ประมาณ 100 มิลลิกรัม ผสมกับถ่านกระดูก 1.5 กรัม ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 70 ชั่วโมง ผลที่ได้พบว่า เมื่อปริมาณความเข้มข้นของเกลือเพิ่มขึ้นจะไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดูดซับอะลูมิเนียม แต่จะมีผลยับยั้งการดูดซับตะกั่วและแมงกานีสเพียงเล็กน้อยที่ความเข้มข้นของเกลือในสารละลายสูงๆ ผลที่ได้พอสรุปได้ว่าถ่านกระดูกสามารถลดปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักเหล่านี้ได้ และปริมาณเกลือที่เจือปนอยู่ในน้ำไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของถ่านกระดูก

Phatumvanit และ Legeros, 1997 ศึกษาถึงลักษณะของถ่านกระดูกที่มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์จากน้ำที่มีฟลูออไรด์เจือปน ซึ่งจุดมุ่งหมายในการทำการทดลองคือศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์จากน้ำที่มีฟลูออไรด์เจือปน โดยการทดลองศึกษาการเตรียมถ่านกระดูกโดยการเผาที่อุณหภูมิ 400, 600 และ 800 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำธรรมชาติ และทำการฟื้นฟูประสิทธิภาพถ่านกระดูกหลังการใช้งานด้วยกรดหรือด่าง ซึ่งผลการทดลองพบว่า ถ่านกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส นั้น โครงสร้างผลึกไม่แตกต่างกับก่อนเผามากนัก และปริมาณสัดส่วนผลึกที่มากขึ้นนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณอุณหภูมิที่ใช้เผา คือเมื่ออุณหภูมิเผาสูงขึ้นจะมีความเข้มข้นผลึกมากขึ้นจากผลวิเคราะห์ FTIR และ XRD แต่ไม่ส่งผลดีต่อการกำจัดเท่ากับที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการกำจัดฟลูออไรด์มากกว่าและสำหรับการฟื้นฟูสภาพ โดยการใช้ด่างจะให้ประสิทธิภาพดีที่สุด

Dahbi, Azzi และ Guardia, 1999 ศึกษาการกำจัดโครเมียมวาเลนซี 6 จากน้ำเสีย โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ คือ เวลาสัมผัส ปริมาณถ่านกระดูก ฟิเอช ความเข้มข้นของโครเมียม และปริมาณตัวอย่างที่ใช้ ซึ่งการทดลองใช้สารละลายโครเมียมวาเลนซี 6 ที่มีความเข้มข้นระหว่าง 5 ถึง 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมวาเลนซี 6 นั้นสูงมากกว่า 90% เมื่อ ฟิเอชเท่ากับ 1 โดยใช้ 2 กรัมถ่านกระดูก ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที

Miyaji, Kono และ Suyama, 2005 ได้ศึกษาผลของโลหะหนัก ซิงก์ ต่อแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไต์ ซึ่งสังเคราะห์โดยกระบวนการตกตะกอน ซึ่งวิธีทดลองได้เตรียมฟอสฟอรัสเข้มข้น 0.06 โมล/ลิตร จากการละลาย $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ในน้ำกลั่น เตรียมแคลเซียม และซิงก์ จากการละลาย $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ และ $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ โดยสัดส่วนเปอร์เซ็นต์โมลของซิงก์คำนวณได้จาก $[\text{Zn}]/[\text{Ca}+\text{Zn}] \times 100$ จากนั้นปรับฟิเอชเป็น 8 แล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง นำไปกรองแล้วอบให้แห้งจึงนำไปวิเคราะห์เพื่อหาชนิดผลึกที่เกิดขึ้น จากการทดลองได้เพิ่มสัดส่วนเปอร์เซ็นต์โมลของซิงก์ จนถึง 70 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ซิงก์สามารถรวมตัวเกิดเป็นผลึกในรูปแบบอะพาไต์ได้ แต่เมื่อเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ผลึกอะพาไต์ในรูปแบบ $\text{Ca}_{10-x}\text{Zn}_x(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ จะยิ่งน้อยลงไป กลับพบผลึกของซิงก์ในรูปแบบ $\text{CaZn}_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ มากขึ้น

2.10.2 งานวิจัยในประเทศ

มานัด แก้วถาวร, 2537 ศึกษาผลของโซเดียมคลอไรด์ ซิงก์คลอไรด์ และ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ต่อการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว จากการทดลองพบว่า ตัวกระตุ้นทั้ง 3 ชนิดสามารถทำให้ถ่านมีคุณสมบัติการดูดซับไอโอดีนสูงขึ้น การใช้โซเดียมคลอไรด์ และซิงก์คลอไรด์ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าร้อยละของผลผลิตสูงกว่ากรณีที่เหมาะสมให้เป็นถ่านธรรมดา และพบว่าอัตราส่วนซิงก์คลอไรด์ต่อกะลามะพร้าวที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 100% (1:1) โดยให้ค่าการดูดซับไอโอดีน 686 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนอัตราส่วนโซเดียมคลอไรด์ต่อกะลามะพร้าวที่เหมาะสมมีค่ามากกว่า 200% โดยให้ค่าการดูดซับไอโอดีน 448 มิลลิกรัมต่อกรัม กรณีของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 800-900 องศาเซลเซียส โดยให้ค่าการดูดซับไอโอดีน 787 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับการศึกษาผลของขนาดกะลามะพร้าวและอุณหภูมิพบว่าขนาดอนุภาคเล็กและอุณหภูมิสูงทำให้ถ่านมีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงขึ้น แต่ร้อยละของผลผลิตลดลงและภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารกระตุ้นมีรูพรุนมากกว่าถ่านจากการไพโรไลซิสที่ไม่ได้ผ่านการกระตุ้นด้วยสารกระตุ้น

พงศธร โคว์วชาภรณ์, 2538 ศึกษาสมบัติรวมทั้งการใช้งานของถ่านกัมมันต์ ที่เตรียมได้จากขังข้าวโพดโดยวิธีการกระตุ้นด้วยซิงก์คลอไรด์ จากการทดลองพบว่า อัตราส่วนซิงก์คลอไรด์ต่อวัตถุดิบ ที่ 2:1 อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลาการเผา 3 ชั่วโมง ได้ค่าร้อยละของผลผลิต 62.82 ค่าไอโอดีนอยู่ในเกณฑ์ 800-900 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการฟอกสีเมทิลีนบลู 120-180 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิว 1,000 ตารางเมตรต่อกรัม พบว่า ร้อยละผลิตภัณฑ์ต่ำลงที่อุณหภูมิการกระตุ้น 600 และ 800 องศาเซลเซียส แต่จะได้ถ่านที่มีสมบัติดีกว่ากระตุ้นที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส โดยพบว่าที่อุณหภูมิการกระตุ้น 600 องศาเซลเซียสจะดีที่สุดครั้งนี้ อัตราส่วนซิงก์คลอไรด์ต่อวัตถุดิบ 4:1 ได้ค่าร้อยละของผลผลิต 52.41 ค่าไอโอดีนอยู่ในเกณฑ์ 960-1,075 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการฟอกสีเมทิลีนบลู 230-300 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิว 1,140-1,300 ตารางเมตรต่อกรัม

กฤติยา เสือสีนาค, 2542 ศึกษาการดูดซับแก๊สโพรเพนด้วยตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากกะลามะพร้าวโดยการกระตุ้นด้วยซิงก์คลอไรด์ ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายซิงก์คลอไรด์ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ โดยมวล พื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นถึง 711 ตารางเมตรต่อกรัม ขณะที่ค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นถึง 898 มิลลิกรัมต่อกรัม ลักษณะสมบัติทั้งสองยังเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิจนถึง 500 องศาเซลเซียส และเพิ่มขึ้นตามช่วงเวลาการเตรียมจนถึง 60 นาที และพบว่า สมดุลการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ ขณะที่ปริมาณการดูดซับสูงสุดสอดคล้องกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมขึ้น

เกรียงศักดิ์ กิตติพิมาน, 2542 ศึกษาการดูดซับออกซิเจนและไนโตรเจนด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวโดยการกระตุ้นด้วยซิงก์คลอไรด์ โดยใช้ซิงก์คลอไรด์เข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ซึ่งทดสอบที่อัตราส่วนซิงก์คลอไรด์ต่อถ่านกะลา 1:1, 1.5:1, 2:1, 2.5:1 และกระตุ้นที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส พบว่า ที่อัตราส่วน 2.5:1 พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเป็น 870 ตารางเมตรต่อกรัม ขณะที่การดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 550 ตารางเมตรต่อกรัม เป็น 600 ตารางเมตรต่อกรัม

อุบลรัตน์ วาริชวัฒนะ, 2544 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก 3 ชนิด คือตะกั่ว แคดเมียม และโครเมียม ด้วยถ่านกระตุ้นที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 600, 800 และ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง ผลการทดลองที่ได้สรุปว่าเวลาในการเผาไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสามารถ กำจัดตะกั่วได้ดีกว่าแคดเมียม โดยพบว่าที่สภาวะการเตรียมถ่านกระตุ้นที่อุณหภูมิการเผา 600 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุด โดยที่ 800 และ 1000 องศาเซลเซียสจะให้ประสิทธิภาพรองลงมาตามลำดับ และสำหรับพีเอชที่เหมาะสมสำหรับกำจัดตะกั่วและแคดเมียม คือ 5 และ 6 ตามลำดับ

ศุภกิจ พัฒนเตชะ, 2545 ศึกษาความสามารถในการกำจัดโลหะหนัก 2 ชนิด ได้แก่ ตะกั่วและแคดเมียม โดยใช้ถ่านกระดูกที่เตรียมมาจากเผาที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการทดลองพบว่า ถ่านกระดูกสามารถกำจัดตะกั่วและแคดเมียมได้ดีที่ อุณหภูมิการเผาที่ 500 และ 400 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาถึงพีเอชที่เหมาะสม สำหรับกำจัดตะกั่วและแคดเมียม คือ พีเอช 4 และ 6 ตามลำดับ ส่วนผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับถ่านกระดูกมีความสัมพันธ์กับไอโซเทอมการดูดซับทั้งของแลงมัวร์และฟรุนดลิชโดยความสามารถในการดูดซับตะกั่วสูงที่สุดที่ 617.5 มก./ก.ถ่านกระดูก และความสามารถในการดูดซับแคดเมียมสูงที่สุดที่ 68 มก./ก.ถ่านกระดูก

ธเรศ ศรีสถิตย์ และ คณะ, 2546 ศึกษาประสิทธิภาพของการกำจัดตะกั่วและปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างถ่านกัมมันต์ที่จำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป กับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากซีเมนต์ที่ใช้เกลือแองเป็นสารกระตุ้น และทำการล้างสารกระตุ้นด้วยกรดไฮโดรคลอริก 5% พบว่าถ่านซีเมนต์มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ 510 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีพื้นที่ผิว 566.39 ตารางเมตรต่อกรัม จากนั้นทดสอบแบบแบดจ์ พบว่า ที่พีเอช 4 และความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดตะกั่วและปรอทดีที่สุด และไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชทำนายความสามารถในการดูดซับตะกั่วและปรอทได้ค่า 116.18 และ 18.78 มิลลิกรัมต่อกรัม ถ่านกัมมันต์ สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วและปรอท ตามลำดับ สำหรับถ่านกัมมันต์ที่จำหน่ายทั่วไป มีความสามารถในการดูดซับตะกั่วและปรอทได้ 11.07 และ 98.85 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ การทดสอบแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ได้ใช้ถ่านซีเมนต์ที่มีดินเหนียวเป็นวัสดุเชื่อมประสาน และทำการป้อนน้ำเสียอย่างต่อเนื่องแบบไหลลง ด้วยอัตราการไหล 3 แกลลอน/(นาที่-ลูกบาศก์ฟุต) พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ขึ้นความสูง 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร สามารถบำบัดตะกั่วในน้ำเสียได้ 5865.58, 3910.93, 3909.50 และ 3054.47 BV ตามลำดับ และสามารถบำบัดปรอทได้ 28.87, 16.04, 11.76 และ 9.62 BV ตามลำดับ จากผลการทดลองแบบฟรุนดลิชและแบบต่อเนื่องแสดงให้เห็นว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากซีเมนต์มีความเหมาะสมในการกำจัดตะกั่วมากกว่าปรอท

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 รูปแบบการวิจัย

มีรูปแบบเป็นการวิจัยเชิงทดลอง ภายใต้สถานการณ์ที่ควบคุมภายในห้องปฏิบัติการ

3.2 สถานที่ทำการวิจัย

การดำเนินการวิจัยนี้กระทำที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนัก

3.3.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว

เริ่มจากการนำสารละลายมาตรฐานตะกั่วไนเตรต ($Pb(NO_3)_2$) ซึ่งมีความเข้มข้นของตะกั่วเป็น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร มาเจือจางให้เป็น 100 มิลลิกรัม/ลิตร โดยใช้สารละลายมาตรฐาน 100 มิลลิลิตร ผสมกับกรดไนตริกเข้มข้น 10 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวม 1,000 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน จะได้สารละลายตะกั่วเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร จากนั้นจึงนำสารละลายตะกั่วเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร ดังกล่าวไปเจือจางด้วยน้ำกลั่น จนกระทั่งได้ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วเป็น 50 มิลลิกรัม/ลิตร และ 10 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ

3.3.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียม

เริ่มจากการนำสารละลายมาตรฐานแคดเมียมไนเตรต ($Cd(NO_3)_2$) ซึ่งมีความเข้มข้นของแคดเมียมเป็น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร มาเจือจางให้เป็น 100 มิลลิกรัม/ลิตร โดยใช้สารละลายมาตรฐาน 100 มิลลิลิตร ผสมกับกรดไนตริกเข้มข้น 10 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวม 1,000 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน จะได้สารละลายแคดเมียมเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร จากนั้นจึงนำสารละลายแคดเมียมเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร ดังกล่าวไปเจือจางด้วยน้ำกลั่น จนกระทั่งได้ความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมเป็น 10 มิลลิกรัม/ลิตร

3.4 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

3.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องเขย่า (Shaker)
2. เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
3. เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้าแบบละเอียด (Analytical Balance)
4. อุปกรณ์เครื่องแก้วทั่วไป
5. ตะแกรงร่อนคัดขนาด 8, 16 และ 325 เมช(Mesh)
6. เครื่องมืออบวัสดุ
7. ชุดเครื่องกรองสุญญากาศ
8. หลอดผสมสารขนาด 50 มิลลิลิตร
9. เตาเผาอุณหภูมิสูง (Muffle furnace)
10. เตาอบวัสดุ
11. ตู้ดูดความชื้น (Desiccator)
12. ขวดพลาสติกเก็บตัวอย่างขนาด 60 มิลลิลิตร
13. กระดาษกรองเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.45 ไมครอน
14. BET Surface Area Analyzer
15. X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD)
16. Fourier Transform Infrared Absorption Spectroscopy (FTIR)
17. Atomic Absorption Spectrometer (AAS)
18. Scanning Electron Microscope (SEM)

3.4.2) สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1. ตะกั่วไนเตรท ($Pb(NO_3)_2$)
2. แคดเมียมออกไซด์ (CdO)
3. โซเดียมอะซิเตด (CH_3COONa)
4. กรดไนตริก (HNO_3)
5. โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$)
6. ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$)
7. PIPES sodium salt ($C_8H_{17}N_2NaO_6S_2$)



รูปที่ 3.1 เครื่องเขย่า (Shaker)



รูปที่ 3.2 เตาเผาอุณหภูมิสูง (Muffle furnace)



รูปที่ 3.3 เตาอบวัสดุ

3.5 แผนการทดลอง

การวิจัยนี้จะทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักได้แก่ ตะกั่ว และแคดเมียม ในน้ำเสีย โดยใช้ถ่านกระดูกซึ่งกระตุ้นด้วยสารละลายซิงก์คลอไรด์ เป็นตัวกำจัด และ ผลของพีเอช เวลาดูดซับ ความเข้มข้นโลหะหนักที่เหมาะสมรวมถึงค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการเตรียมที่สภาวะที่ดีที่สุด โดยการทดลองนี้จะใช้น้ำเสียสังเคราะห์ในการทดลอง งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 5 การทดลอง คือ

1. การทดลองที่ 1 การศึกษาสภาวะในการเตรียมถ่านกระดูก ด้วยสารละลายซิงก์คลอไรด์
2. การทดลองที่ 2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของถ่านกระดูก
3. การทดลองที่ 3 การศึกษาพีเอชที่เหมาะสม โดยทำการทดลองแบบเบดซ์
4. การทดลองที่ 4 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในการกำจัดโลหะหนักโดยทำการทดลองแบบเบดซ์
5. การทดลองที่ 5 การศึกษาค่าใช้จ่ายเบื้องต้นโดยประมาณ

3.5.1 ตัวแปรในการทดลอง

ค่าตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ในการทดลองแต่ละขั้นตอน แสดงในตารางที่ 3.1 – 3.5

ตารางที่ 3.1 แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 1

การศึกษาสภาวะในการเตรียมถ่านกระดูก			
ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์	ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
1. สภาวะการเตรียมถ่านกระดูก	- กระดุก กระตุ้นด้วย ซิงก์คลอไรด์ : กระดุก บด เป็น 1 : 1, 1.5 : 1 และ 2 : 1	1. สภาวะการเตรียมถ่าน กระดูก	- กระดุกหนึ่ง
ตัวแปรที่ควบคุมให้คงที่		ตัวแปรที่ควบคุมให้คงที่	
1. ความเข้มข้นสารละลายซิงก์คลอไรด์ 2. สภาวะ ก่อนแช่สารละลายซิงก์คลอไรด์ - อุณหภูมิการเผา - ระยะเวลาในการเผา - อุณหภูมิในการอบแห้ง 3. สภาวะ หลังแช่สารละลายซิงก์คลอไรด์ - อุณหภูมิการเผา - ระยะเวลาในการเผา - ระยะเวลา แช่สารละลายซิงก์คลอไรด์ - ขนาดถ่านกระดูกบด - อุณหภูมิในการอบแห้ง	ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก 300 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง 105 องศาเซลเซียส 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง 24 ชั่วโมง < 45 ไมโครเมตร (325 เมช) 105 องศาเซลเซียส	1. ขนาดกระดูกบด	< 45 ไมโครเมตร (325 เมช)
ตัวแปรตาม		ตัวแปรตาม	
1. พื้นที่ผิวจำเพาะของรูพรุนทั้งหมด	- พื้นที่ผิว BET , m ² /g : ASTM C 879-77 - ปริมาตรจำเพาะของ โพรง (Pore specific volume) , cm ³ /g - ค่าขนาดของโพรง (Average pore diameter) , A ^o	1. พื้นที่ผิวจำเพาะของรูพรุน ทั้งหมด	- พื้นที่ผิว BET , m ² /g : ASTM C 879-77 - ปริมาตรจำเพาะของ โพรง (Pore specific volume) , cm ³ /g - ค่าขนาดของโพรง (Average pore diameter) , A ^o

ตารางที่ 3.2 แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 2

การศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของถ่านกระดูก		การตรวจสอบชนิดผลึกของกระดูกหลังการกำจัด	
ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์	ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
1.สภาวะการเตรียมถ่าน กระดูก	กระดูกจากการเตรียมในขั้นตอนที่ 1 - กระดูกนี้ - กระดูก กระตุ้นด้วยสัดส่วน ซิงก์คลอไรด์ : กระดูกบด เป็น 1 : 1, 1.5 : 1 และ 2 : 1	1.สภาวะการเตรียมถ่าน กระดูก	- กระดูก กระตุ้นด้วยสัดส่วน ซิงก์คลอไรด์ : กระดูกบด เป็น 1 : 1 (สภาวะที่เหมาะสมที่เลือกจากการทดลองขั้นตอนที่ 1 และ 2)
ตัวแปรที่ควบคุมให้คงที่		ตัวแปรที่ควบคุมให้คงที่	
-	-	1. ลักษณะน้ำเสีย - ความเข้มข้นตะกั่ว - ความเข้มข้นแคลเมียม	50 มิลลิกรัม/ลิตร 10 มิลลิกรัม/ลิตร
		2. ปริมาณน้ำเสีย	50 มิลลิลิตร
		3. ปริมาณถ่านกระดูก - น้ำเสียตะกั่ว - น้ำเสียแคลเมียม	0.08 กรัมถ่านกระดูก / ลิตรน้ำเสีย 0.6 กรัมถ่านกระดูก / ลิตรน้ำเสีย
		4. ความเร็วการกวนผสม	250 รอบ/นาที
		5. ระยะเวลาการกวนผสม	60 ชั่วโมง (เวลา ณ. สมดุลการกำจัดตะกั่วและแคลเมียม ในขั้นตอนการทดลองที่ 4)
ตัวแปรตาม		6. พีเอช - น้ำเสียตะกั่ว - น้ำเสียแคลเมียม	4 7
1. ลักษณะพื้นผิวกระดูก	- ผลวิเคราะห์ SEM		
2. แนวโน้มปริมาณ PO_4^{3-} ที่เปลี่ยนไป	- ผลวิเคราะห์ FTIR		
		ตัวแปรตาม	
3. ชนิดผลึกของกระดูก	- ผลวิเคราะห์ XRD	1. ชนิดผลึกของกระดูก	- ผลวิเคราะห์ XRD

หมายเหตุ : การปรับพีเอชใช้สารละลาย buffer CH_3COONa สำหรับพีเอช 3, 4, 5, 6 และใช้สารละลายbuffer PIPES สำหรับพีเอช 7

ตารางที่ 3.3 แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 3

การหาเวลาที่เหมาะสม		การหาพีเอชที่เหมาะสม	
ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์	ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
1.ระยะเวลาเก็บตัวอย่าง - ตะกั่ว - แคดเมียม	0 ถึง 72 ชั่วโมง 0 ถึง 72 ชั่วโมง	1. ลักษณะน้ำเสีย - พีเอชตะกั่ว - พีเอชแคดเมียม	3, 4, 5, 6, 7 3, 4, 5, 6, 7
ตัวแปรที่ควบคุมให้คงที่		ตัวแปรที่ควบคุมให้คงที่	
1. ลักษณะน้ำเสีย - ความเข้มข้นตะกั่ว - ความเข้มข้นแคดเมียม - พีเอชตะกั่ว - พีเอชแคดเมียม 2. ปริมาณน้ำเสีย 3. ปริมาณถ่านกระดูก - น้ำเสียตะกั่ว - น้ำเสียแคดเมียม 4. ความเร็วการกวนผสม	10,50 มิลลิกรัม/ลิตร 10 มิลลิกรัม/ลิตร 5 6 50 มิลลิลิตร 0.025, 0.5 กรัมถ่านกระดูก/ลิตรน้ำเสีย 0.5 กรัมถ่านกระดูก /ลิตรน้ำเสีย 250 รอบ/นาที	1. ลักษณะน้ำเสีย - ความเข้มข้นตะกั่ว - ความเข้มข้นแคดเมียม 2. ปริมาณน้ำเสีย 3. ปริมาณถ่านกระดูก - น้ำเสียตะกั่ว - น้ำเสียแคดเมียม 4. ความเร็วการกวนผสม 5. ระยะเวลาการกวนผสม	50 มิลลิกรัม/ลิตร 10 มิลลิกรัม/ลิตร 50 มิลลิลิตร 0.05 กรัมถ่านกระดูก /ลิตรน้ำเสีย 0.5 กรัมถ่านกระดูก /ลิตรน้ำเสีย 250 รอบ/นาที จากเวลาที่เหมาะสมที่ได้ ในขั้นตอนที่ 3
ตัวแปรตาม		ตัวแปรตาม	
1. ลักษณะน้ำเสียหลัง การทดลอง	- ความเข้มข้น โลหะหนักที่เหลือ - พีเอช	1. ลักษณะน้ำเสียหลัง การทดลอง	- ความเข้มข้น โลหะหนักที่เหลือ - พีเอช

หมายเหตุ : การปรับพีเอชใช้สารละลาย buffer CH_3COONa สำหรับพีเอช 3, 4, 5, 6 และใช้สารละลายbuffer PIPES สำหรับพีเอช 7

ตารางที่ 3.4 แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 4

การหาสมการไอโซเทอม	
ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
1. ปริมาณถ่านกระดูก - น้ำเสียตะกั่ว - น้ำเสียแคดเมียม	0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9 กรัมถ่านกระดูก / ลิตรน้ำเสีย 0, 0.035, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08 กรัมถ่านกระดูก / ลิตรน้ำเสีย
ตัวแปรที่ควบคุมให้คงที่	
1. ลักษณะน้ำเสีย - ความเข้มข้นตะกั่ว - ความเข้มข้นแคดเมียม - พีเอชตะกั่ว และ แคดเมียม 2. ปริมาณน้ำเสีย 3. ความเร็วการกวนผสม 4. เวลาสัมผัส	50 มิลลิกรัม/ลิตร 10 มิลลิกรัม/ลิตร เลือกพีเอช ที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด จากขั้นตอนที่ 3 50 มิลลิลิตร 250 รอบ/นาที 3 - 72 ชั่วโมง
ตัวแปรตาม	
1. ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง	- ความเข้มข้นโลหะหนักที่เหลือ ณ. สมดุลการดูดซับ - พีเอช

หมายเหตุ : การปรับพีเอชใช้สารละลาย buffer CH_3COONa สำหรับพีเอช 3, 4, 5, 6 และใช้สารละลายbuffer PIPES สำหรับพีเอช 7

ตารางที่ 3.5 แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 5

การศึกษาค่าใช้จ่ายเบื้องต้นโดยประมาณ	
ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
1. สัดส่วน ชิงก์คอลลอยด์ : กระจุกบด	1 : 1, 1.5 : 1 และ 2:1
ตัวแปรที่ควบคุมให้คงที่	
1. ความเข้มข้นสารละลายชิงก์คอลลอยด์	ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก
2. สภาวะ ก่อนแช่สารละลายชิงก์คอลลอยด์	
- อุณหภูมิการเผา	300 องศาเซลเซียส
- ระยะเวลาในการเผา	2 ชั่วโมง
- อุณหภูมิในการอบแห้ง	105 องศาเซลเซียส
- น้ำหนักกระจุกบด	500 กรัม
- ขนาดด้านกระจุกบด	2.36 ถึง 1.18 มิลลิเมตร (8-16 เมช)
3. สภาวะหลังแช่สารละลายชิงก์คอลลอยด์	
- อุณหภูมิการเผา	400 องศาเซลเซียส
- ระยะเวลาในการเผา	1 ชั่วโมง
- ระยะเวลาในการแช่สารละลายชิงก์คอลลอยด์	24 ชั่วโมง
- ขนาดด้านกระจุกบด	< 45 ไมโครเมตร (325 เมช)
- อุณหภูมิในการอบแห้ง	105 องศาเซลเซียส
- น้ำหนักด้านกระจุกบด ที่ได้จากสภาวะ ก่อนแช่สารละลายชิงก์คอลลอยด์	50 กรัม
ตัวแปรตาม	
1. ด้านกระจุกที่เตรียมได้	
- จากสภาวะก่อนแช่สารละลายชิงก์คอลลอยด์	ร้อยละผลผลิต
- จากสภาวะหลังแช่สารละลายชิงก์คอลลอยด์	ร้อยละผลผลิต

3.6 การดำเนินการทดลอง

3.6.1 การทดลองที่ 1 การศึกษาสถานะในการเตรียมถ่านกระดูกด้วยสารละลายซิงก์คลอไรด์

มีขั้นตอนและวิธีทำ สรุปได้ดังรูปที่ 3.4 และมีรายละเอียดดังนี้

1. นำวัตถุดิบ(กระดูกนึ่ง)ไปเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้บดง่ายขึ้น

2. บด และคัดขนาดให้มีขนาดระหว่าง 8 – 16 เมช

3. แช่กระดูกบดในสารละลายซิงก์คลอไรด์ เข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนักโดยมีสัดส่วนซิงก์คลอไรด์ ต่อ กระดูกบด เป็น 1:1 , 1.5 : 1 และ 2 : 1 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

4. นำไปอบไล่ไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนแห้ง

5. เผาในเตาเผาอับอากาศ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเตา

6. นำออกมาล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งน้ำที่ล้างได้เป็นกลาง โดยการทดสอบด้วยกระดาษลิตมัส

7. อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งแห้งแล้วเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้น

8. บดให้มีขนาดเล็กกว่า 45 ไมโครเมตร หรือ 325 เมช (ASTM D 3860-89A)

9. วิเคราะห์ค่า พื้นที่ผิว BET (ASTM C 819-77), ปริมาตรจำเพาะของโพรง, ขนาดของโพรง

10. เลือกสถานะที่ดีที่สุดจาก พื้นที่ผิว BET , ปริมาตรจำเพาะของโพรง และ ปริมาณ PO_4^{3-} จากขั้นตอนที่ 2

11. บดกระดูกนึ่งให้มีขนาดเล็กกว่า 45 ไมโครเมตร แล้วนำไปวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิว BET (ASTM C 819-77), ปริมาตรจำเพาะของโพรง และ ขนาดของโพรง เพื่อศึกษาเปรียบเทียบกับสถานะการเตรียมถ่านกระดูกด้วยสารละลายซิงก์คลอไรด์

3.6.2 การทดลองที่ 2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของถ่านกระดูก

3.6.2.1 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของกระดูกนึ่งและถ่านกระดูกที่เตรียมได้จากการทดลองขั้นตอนที่ 1 ทั้ง 3 สถานะการเตรียมจากภาพถ่ายด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope

ซึ่งมีขั้นตอนและวิธีทำ สรุปได้ดังรูปที่ 3.5 และมีรายละเอียดวิธีทำดังนี้ สัดส่วนซิงก์คลอไรด์ ต่อ กระจกบด เป็น 1:1, 1.5:1 และ 2:1 ที่อุณหภูมิการเผา 400 องศาเซลเซียส

3.6.2.2 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

เพื่อศึกษาเปรียบเทียบความเปลี่ยนแปลงของความเข้มของ PO_4^{3-} ของ กระจกหนึ่งก่อนการเตรียม และ หลังจากการทดลองขั้นตอนที่ 1 ทั้ง 3 สภาวะการเตรียม ซึ่งมี ขั้นตอนและวิธีทำสรุปได้ดังรูปที่ 3.5 และมีรายละเอียดวิธีทำดังนี้ สัดส่วนซิงก์คลอไรด์ ต่อ กระจก บด เป็น 1:1, 1.5:1 และ 2:1 ที่อุณหภูมิการเผา 400 องศาเซลเซียส

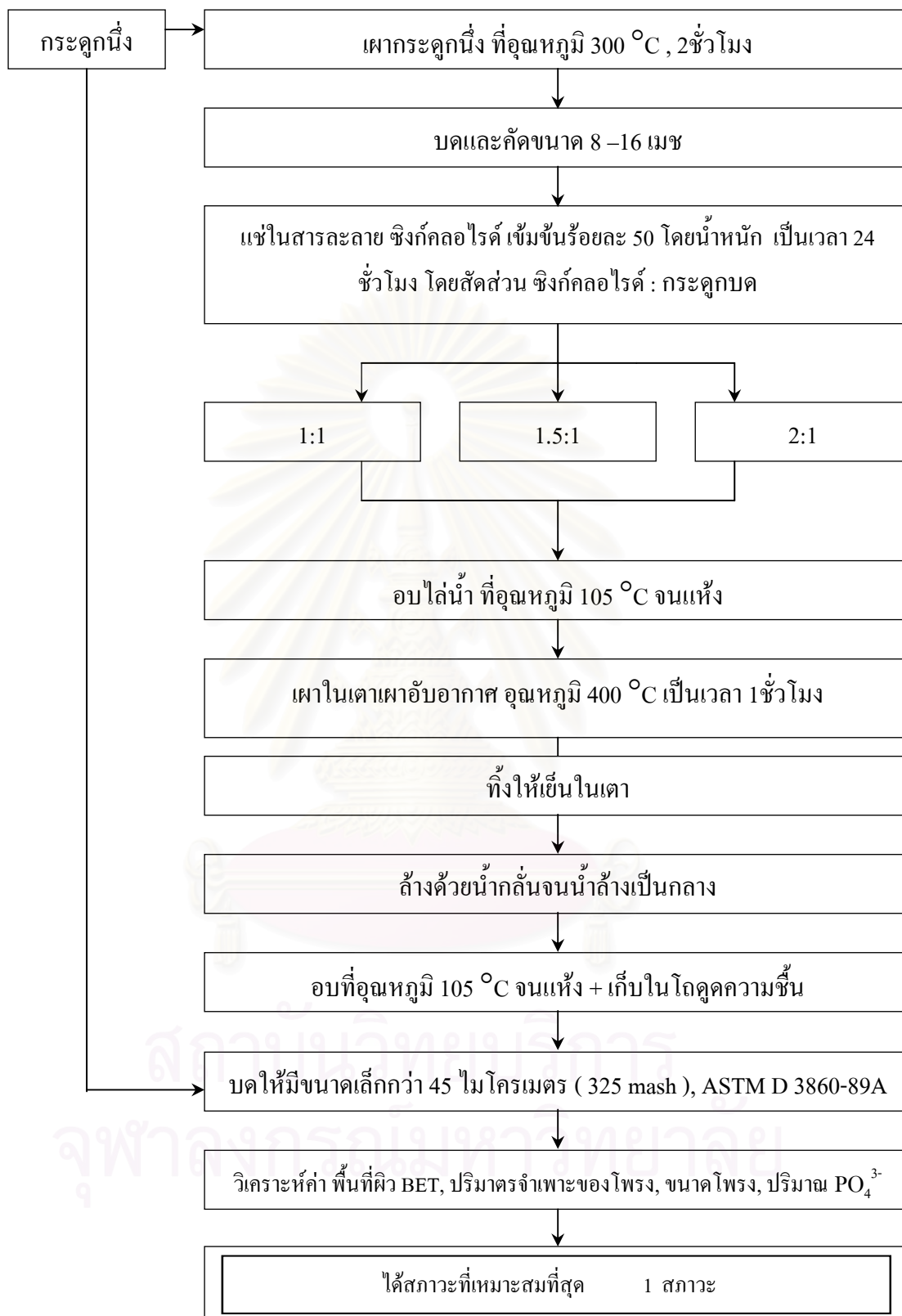
3.6.2.3 เครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD)

เพื่อศึกษาเปรียบเทียบความเปลี่ยนแปลงของชนิดผลึกฟอสเฟตของ กระจกหนึ่งก่อนการเตรียมและที่เตรียมได้จากการทดลองขั้นตอนที่ 1 ทั้ง 3 สภาวะการเตรียม ซึ่งมี ขั้นตอนและวิธีทำสรุปได้ดังรูปที่ 3.5 และมีรายละเอียดวิธีทำดังนี้ สัดส่วนซิงก์คลอไรด์ต่อกระจก บดเป็น 1:1, 1.5:1 และ 2:1 ที่อุณหภูมิการเผา 400 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาผลึกที่เกิดขึ้นภายหลัง การดูดซับดังรูปที่ 3.6 สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว และรูปที่ 3.7 สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ แคลเมียม

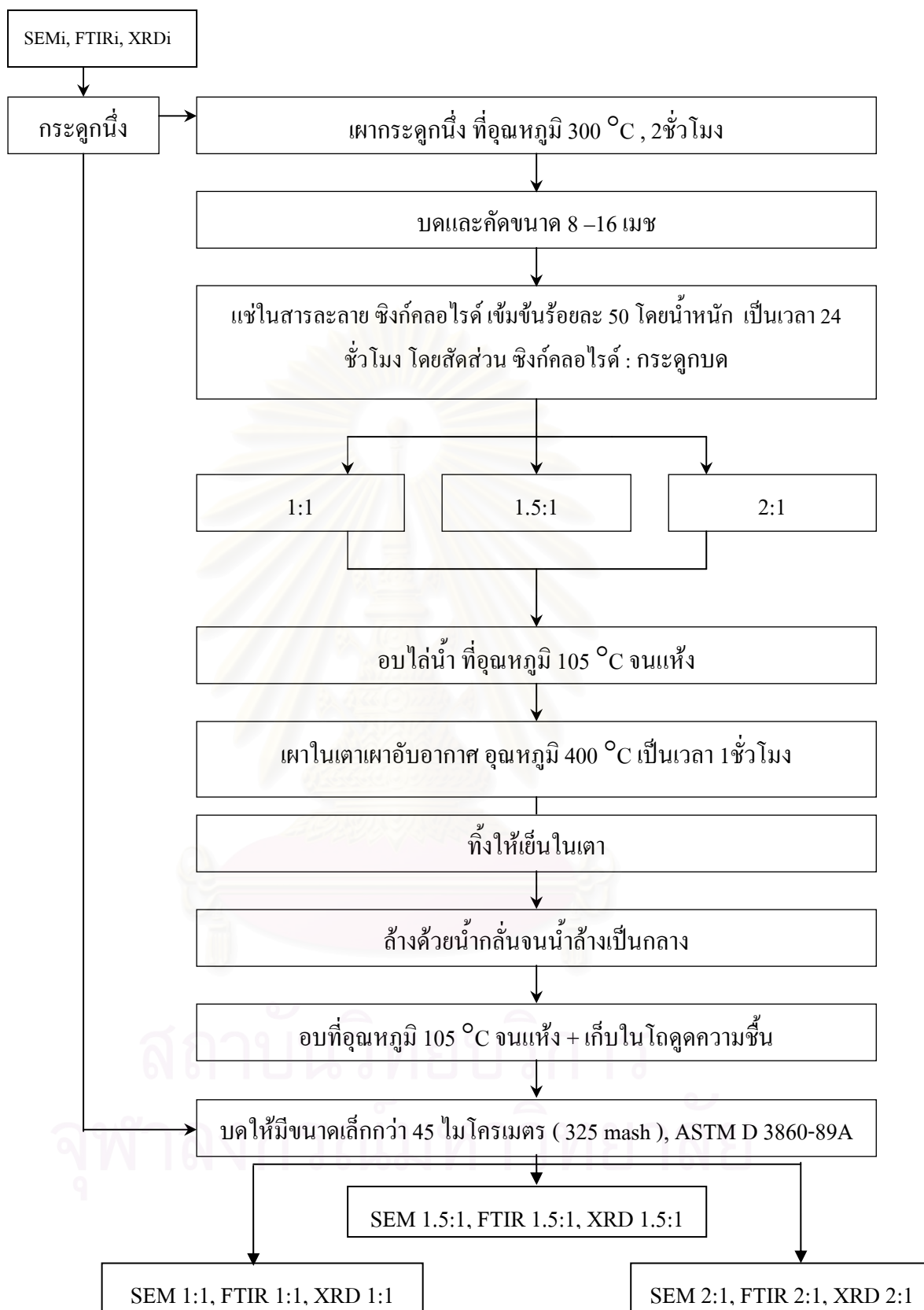
3.6.3 การทดลองที่ 3 การศึกษาพีเอชที่เหมาะสม โดยทำการทดลองแบบแบดซ์

3.6.3.1 การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับศึกษาพีเอชที่เหมาะสมของตะกั่ว โดยทำ การทดลองแบบแบดซ์

มีขั้นตอนและวิธีทำ สรุปได้ดังรูปที่ 3.8 และมีรายละเอียดวิธีทำดังนี้ เริ่มการทดลองโดยชั่งถ่านกระจกที่เตรียมได้ปริมาณ 0.025 กรัมต่อลิตร น้ำตัวอย่าง ใส่ในน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตรและชั่งถ่านกระจก 0.05 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง ใส่ลงไป ในน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตรที่พีเอช 5



รูปที่ 3.4 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมถ่านกระดูกด้วยสารละลายซิงก์ลอไรด์



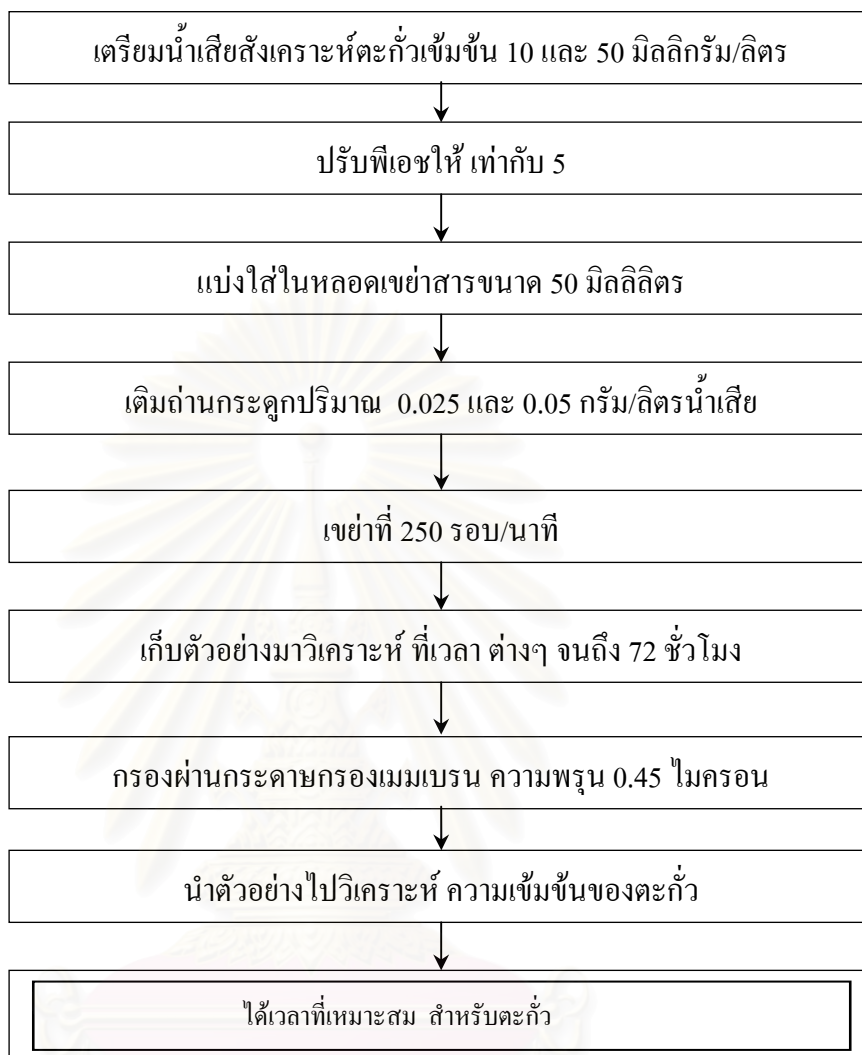
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างถ่านกระตุกจากผลวิเคราะห์ SEM, FTIR และ XRD



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนศึกษาผลึกที่เกิดขึ้นภายหลังการกำจัดสำหรับน้ำเสี้ยงเคราะห์ตะกั่ว



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนศึกษาผลึกที่เกิดขึ้นภายหลังการกำจัดสำหรับน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียม



รูปที่ 3.8 การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับศึกษาพีเอชที่เหมาะสมสำหรับตะกั่ว
โดยการทดลองแบบเบตซ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ในหลอดเขย่าสารขนาด 50 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างที่เวลาต่างๆจนถึง 72 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างไปกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน และนำน้ำจากการกรองที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชัน

3.6.3.2 การหาพีเอชที่เหมาะสมสำหรับตะกั่ว โดยทำการทดลองแบบแบตช์

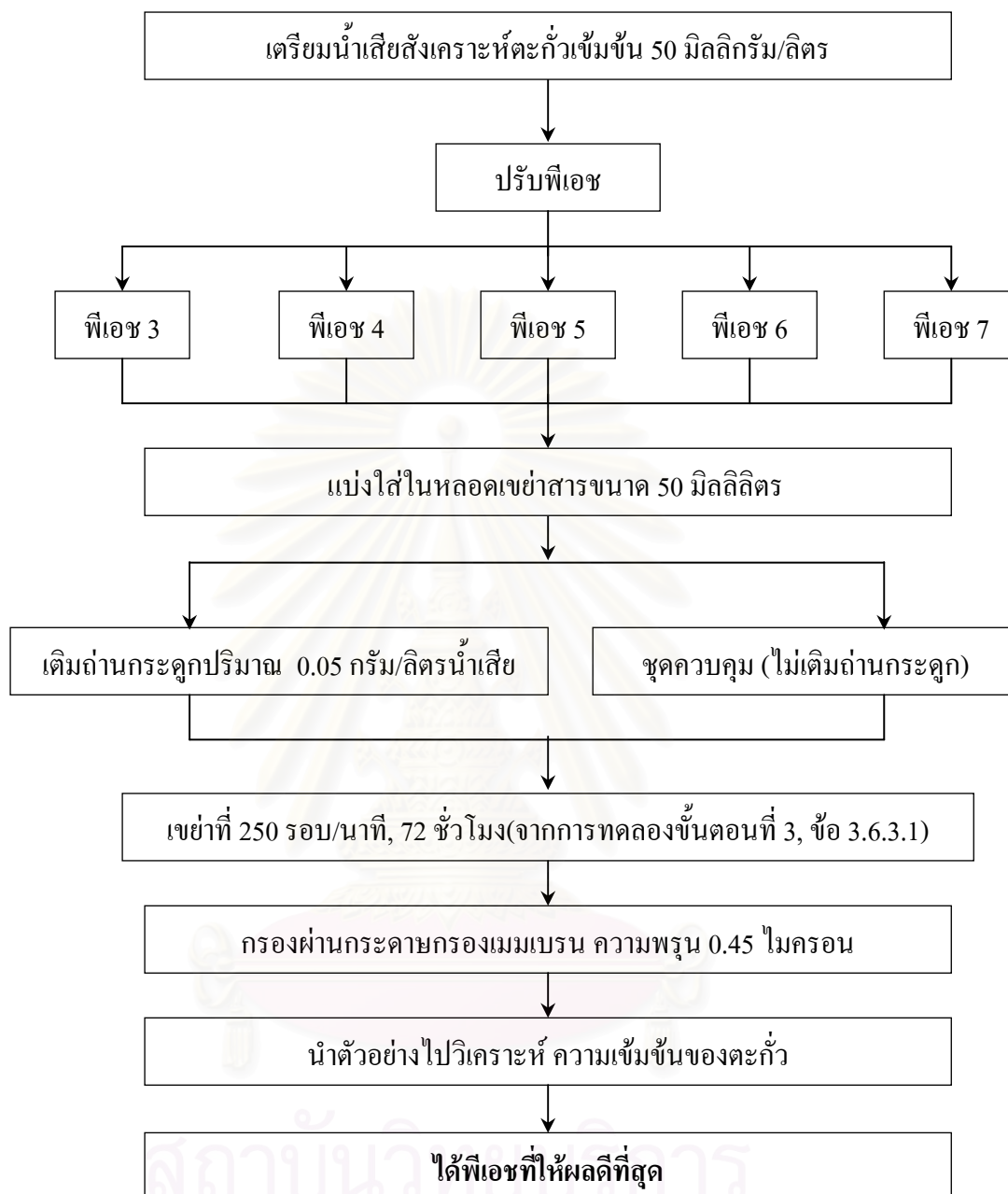
มีขั้นตอนและวิธีทำ สรุปได้ดังรูปที่ 3.9 และมีรายละเอียดวิธีทำดังนี้
ทำการทดลองโดยชั่งถ่านกระดูกที่สภาวะการเตรียมที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง ขั้นตอนที่ 1 ปริมาณ 0 (สำหรับ ชุดควบคุม) , 0.05 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง และ เติมน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในหลอดเขย่าสารขนาด 50 มิลลิลิตร ที่พีเอช 3, 4, 5, 6 และ 7 แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ตามเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง ขั้นตอนที่ 3 ข้อ 3.6.3.1 จากนั้นนำไปกรองด้วยกระดาษกรองเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมครอน แล้วนำน้ำจากการกรองที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชัน

3.6.3.3 การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับศึกษาพีเอชที่เหมาะสมสำหรับแคดเมียม โดยทำการทดลองแบบแบตช์

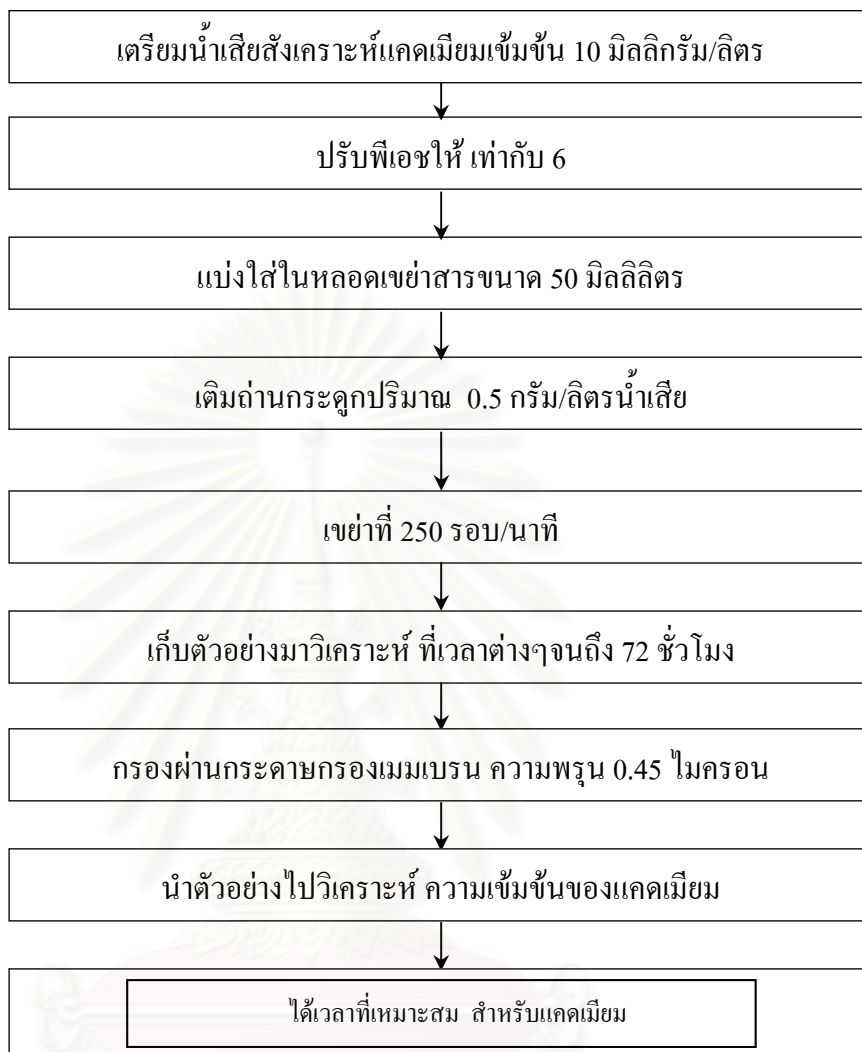
มีขั้นตอนและวิธีทำ สรุปได้ดังรูปที่ 3.10 และมีรายละเอียดวิธีทำดังนี้
เริ่มการทดลองโดยชั่งถ่านกระดูกที่เตรียมได้ ปริมาณ 0.5 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง ใส่ลงไปในน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ที่พีเอช 6 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ในหลอดเขย่าสารขนาด 50 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างที่เวลาต่างๆ จนถึง 72 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างไปกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน จากนั้นนำน้ำจากการกรองที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียม ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชัน

3.6.3.4 การหาพีเอชที่เหมาะสมสำหรับแคดเมียม โดยทำการทดลองแบบแบตช์

มีขั้นตอนและวิธีทำ สรุปได้ดังรูปที่ 3.11 และมีรายละเอียดวิธีทำดังนี้

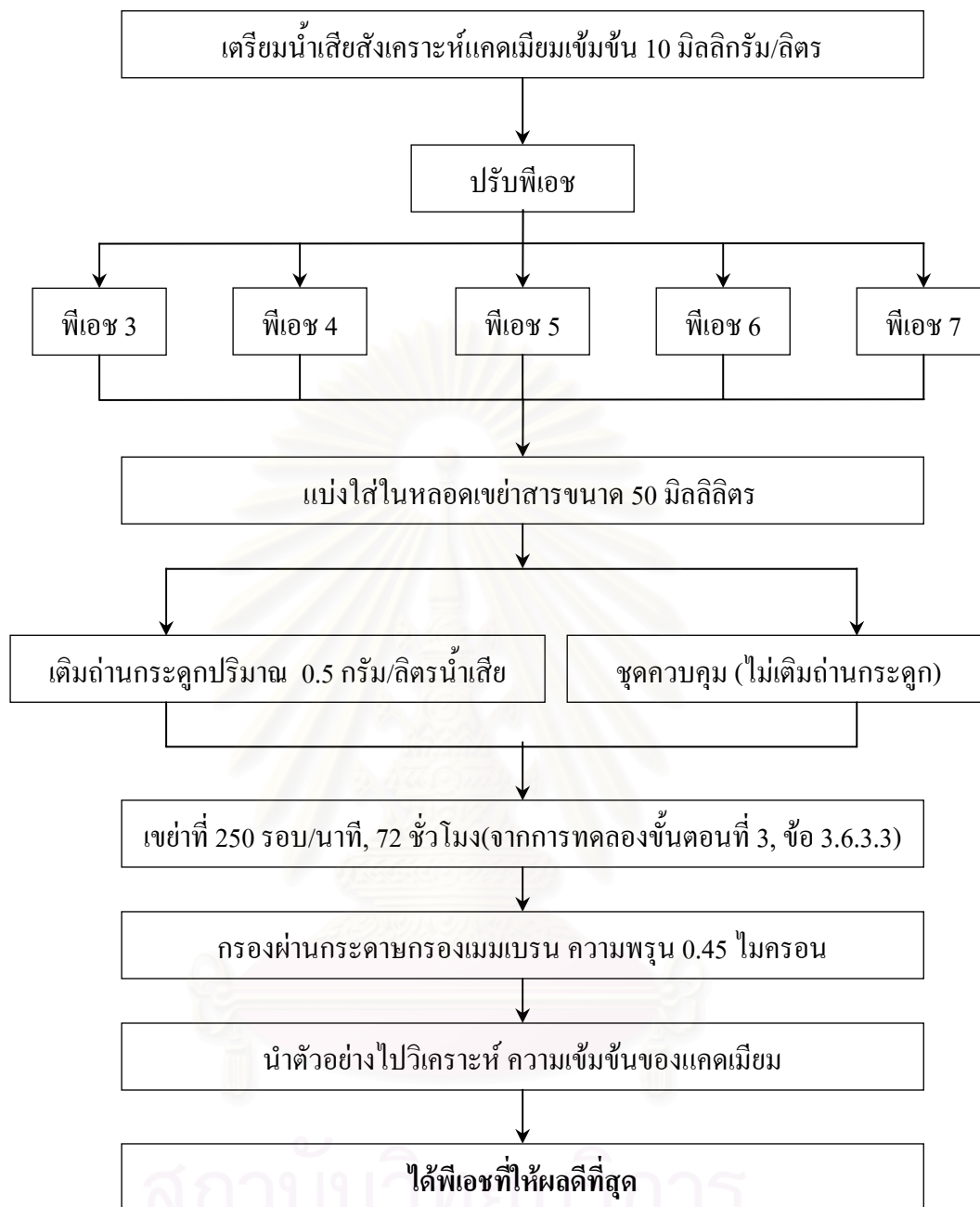


รูปที่ 3.9 การหาฟิเอชที่เหมาะสมสำหรับตะกั่ว โดยการทดลองแบบแบตช์



รูปที่ 3.10 การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับศึกษาพีเอชที่เหมาะสมสำหรับแคดเมียม
โดยการทดลองแบบเบตซ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.11 การหาพีเอชที่เหมาะสมสำหรับแคดเมียม โดยการทดลองแบบเบตซ์

ทำการทดลองโดยชั่งถ่านกระดูกที่สภาวะการเตรียมที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองขั้นตอนที่ 1 ปริมาณ 0 (สำหรับ ชุดควบคุม) , 0.5 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง และเติมน้ำเสียสังเคราะห์แคะเมียมที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในหลอดเขย่าสารขนาด 50 มิลลิิตร ที่พีเอช 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ตามเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองขั้นตอนที่ 3 ข้อ 3.6.3.3 จากนั้นนำไปกรองด้วยกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน แล้วนำน้ำจากการกรองที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณแคะเมียมด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชัน

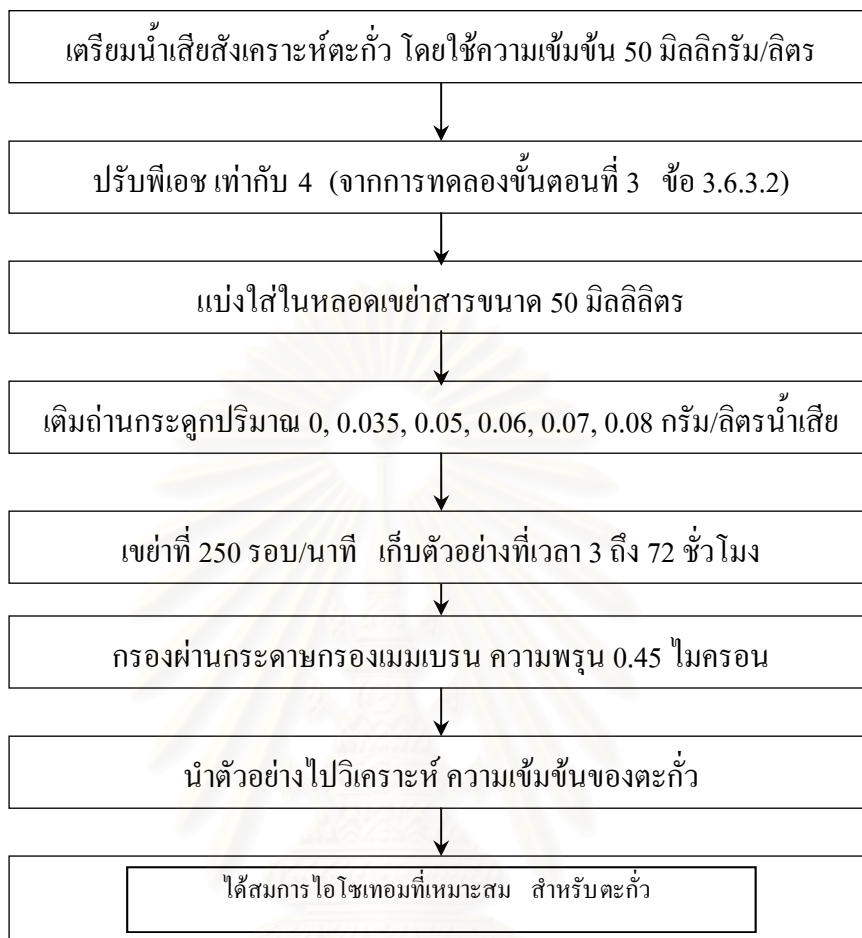
3.6.4 การทดลองที่ 4 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในการกำจัดโลหะหนัก โดยทำการทดลองแบบแบตช์

3.6.4.1 การหาสมการไอโซเทอมสำหรับตะกั่ว โดยทำการทดลองแบบแบตช์

มีขั้นตอนและวิธีทำ สรุปได้ดังรูปที่ 3.12 และมีรายละเอียดวิธีทำดังนี้
ทำการทดลองโดยชั่งถ่านกระดูกที่สภาวะการเตรียมที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองขั้นตอนที่ 1 ปริมาณ 0, 0.035, 0.05, 0.06, 0.07 และ 0.08 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง เติมน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 4 ซึ่งให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดที่ได้จากการทดลองขั้นตอนที่ 3 ข้อ 3.6.3.2 จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบ ต่อนาที เก็บตัวอย่างที่เวลา 3 ถึง 72 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลานำไปกรองด้วยกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน แล้วนำน้ำจากการกรองที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชัน

3.6.4.2 การหาสมการไอโซเทอมสำหรับแคะเมียม โดยทำการทดลองแบบแบตช์

มีขั้นตอนและวิธีทำ สรุปได้ดังรูปที่ 3.13 และมีรายละเอียดวิธีทำดังนี้
ทำการทดลองโดยชั่งถ่านกระดูกที่สภาวะการเตรียมที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองขั้นตอนที่ 1 ปริมาณ 0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 0.9 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง เติมน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 7 ที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดที่ได้จากการทดลองขั้นตอนที่ 3 ข้อ 3.6.3.4 จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบ



รูปที่ 3.12 การหาสมการไอโซเทอมสำหรับตะกั่ว โดยทำการทดลองแบบเบดซ์



รูปที่ 3.13 การหาสมการไอโซเทอมสำหรับแคดเมียม โดยทำการทดลองแบบเบตซ์

ต่อมาที่เก็บตัวอย่างที่เวลา 3 ถึง 72 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลานำไปกรองด้วยกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน แล้วนำน้ำจากการกรองที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชัน

3.6.5 การทดลองที่ 5 การศึกษาค่าใช้จ่ายเบื้องต้นโดยประมาณ

3.6.5.1 ร้อยละผลผลิตที่ได้จากขั้นตอนการเตรียมถ่านกระดูก ด้วยสารละลายซิงก์คลอไรด์

ศึกษาโดยแบ่งขั้นตอนการเตรียมจากการทดลองที่ 1 เป็นสองสภาวะการเตรียมคือ การเตรียมในสภาวะก่อนแช่สารละลายซิงก์คลอไรด์ และสภาวะหลังแช่สารละลายซิงก์คลอไรด์ ซึ่งสรุปได้ดังรูปที่ 3.14 โดยสภาวะก่อนแช่สารละลายซิงก์คลอไรด์ เริ่มจากนำเศษกระดูกปริมาณ 500 กรัม ใส่ในภาชนะหม้อดินเผาที่มีฝาปิด แล้วเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำถ่านที่ได้มาบดและคัดขนาดให้ได้ขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 2.36 ถึง 1.18 มิลลิเมตร (8 – 16 เมช) เมื่อได้ขนาดอนุภาคตามต้องการ ชั่งน้ำหนักและคำนวณร้อยละผลผลิตที่ได้จากน้ำหนักถ่านกระดูกที่เหลือ

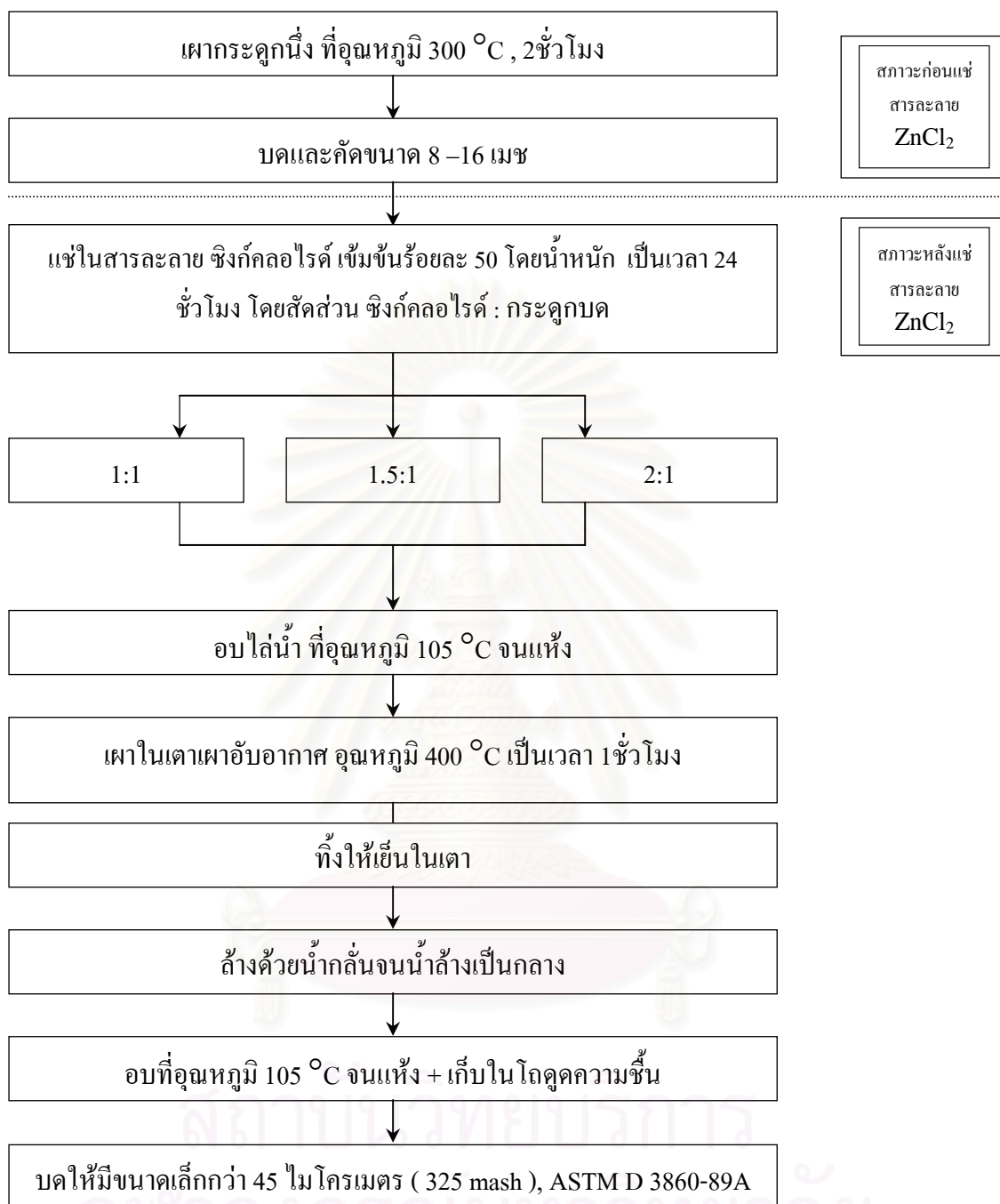
สำหรับสภาวะหลังแช่สารละลายซิงก์คลอไรด์ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. แช่ถ่านกระดูกบดปริมาณ 50 กรัม ในสารละลายซิงก์คลอไรด์ เข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนักโดย มีสัดส่วนซิงก์คลอไรด์ ต่อ กระดูกบด เป็น 1: 1, 1.5 : 1 และ 2 : 1 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปอบไล่ไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนแห้ง

2. เผาในเตาเผาอับอากาศ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเตาจากนั้นนำออกมาล้างด้วยน้ำร้อนจนกระทั่งน้ำที่ล้างได้เป็นกลางโดยการทดสอบด้วยกระดาษลิตมัส

3. อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ให้แห้ง แล้วเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้นจนกระทั่งถ่านเย็นลง จากนั้นชั่งน้ำหนักถ่านที่ได้

4. บดให้มีขนาดเล็กลงว่า 45 ไมโครเมตร หรือ 325 เมช แล้วชั่งน้ำหนักถ่าน เมื่อได้ขนาดอนุภาคตามต้องการ ชั่งน้ำหนักและคำนวณร้อยละผลผลิตที่ได้จากน้ำหนักถ่านกระดูกที่เหลือ



รูปที่ 3.14 การแบ่งสภาวะก่อนและหลังแช่สารละลายซิงก์คลอไรด์

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 การศึกษาสภาวะในการเตรียมถ่านกระดูก ด้วยสารละลายซิงก์คลอไรด์

งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก ตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้กระดูกโค กระบือ เป็นวัตถุดิบ ซึ่งกระดูกที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการเตรียมนั้นได้รับความอนุเคราะห์มาจากบริษัทอุตสาหกรรมกระดูกสัตว์ จำกัด ซึ่งได้ผ่านการนำไปนึ่งด้วยไอน้ำแล้วจึงบดเป็นชิ้นเล็กๆ มาแล้วก่อนที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ กระดูกหนึ่งที่ได้มาจากกระดูกหลายส่วนปนกันมีสีแตกต่างกันไปเช่น สีเหลืองอ่อน สีขาว หรือสีน้ำตาล และบางชิ้นเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าสามารถเห็นได้ว่ามีความพรุนทั่วกระดูก บางชิ้นมีความพรุนน้อยดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กระดูกป่นที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการทดลอง

กระดูกป่นจะถูกนำไปเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้สามารถบดได้ง่ายขึ้น บดและคัดขนาดให้มีขนาดระหว่าง 8 – 16 เมช ดังแสดงในรูปที่ 4.2 แล้วแช่กระดูกบดในสารละลายซิงก์คลอไรด์ เข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยมีสัดส่วนซิงก์คลอไรด์ ต่อกระดูกบด เป็น 1:1 , 1.5:1 และ 2:1 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ก่อนนำไปอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนแห้งซึ่งจากการทดลองต้องใช้เวลาอบประมาณ 48 ชั่วโมงจึงจะแห้ง จากนั้นนำกระดูกที่ได้แต่ละสภาวะไปใส่ในภาชนะหม้อดินเผาที่มีฝาปิด เพื่อกันการเดือดที่รุนแรงของซิงก์คลอไรด์ แล้วเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเตา นำถ่านออกมาล้างด้วยน้ำกลั่นที่ต้มเดือด จนกระทั่งน้ำที่ล้างได้มีพีเอชเป็นกลางโดยการทดสอบด้วยกระดาษลิตมัส จากนั้นนำถ่านกระดูกที่ได้แต่ละสภาวะไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศา

เซลเซียส 24 ชั่วโมง เพื่อให้ถ่านแห้ง และบดให้มีขนาดเล็กกว่า 45 ไมโครเมตร หรือ 325 เมช (ASTM D 3860–89A) เพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไป



รูปที่ 4.2 ถ่านกระดูก บดคัดขนาด 8 - 16 เมช



รูปที่ 4.3 ถ่านกระดูกบดแช่ในสารละลายซิงก์คลอไรด์

กระดูกนึ่งที่ใช้เป็นวัตถุดิบที่ยังไม่ผ่านกระบวนการใดๆ เมื่อนำมาบดให้มีขนาดเล็กกว่า 45 ไมโครเมตร หรือ 325 เมช จะได้เป็นสีเหลืองอ่อนดังแสดงในรูปที่ 4.4 ถ่านกระดูกที่ได้จากการแช่ในสารละลายซิงก์คลอไรด์ เข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยมีสัดส่วนซิงก์คลอไรด์ ต่อ กระดูกบด เป็น 1:1 , 1.5:1 และ 2:1 โดยน้ำหนัก จะมีสีที่แตกต่างกัน โดยมีสีดำเข้มมากที่สุดในสัดส่วน 1:1 และเป็นสีน้ำตาลและน้ำตาลอ่อนเมื่อสัดส่วนซิงก์คลอไรด์ ต่อ กระดูกบดมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 กระจุกหนึ่งบด ขนาดน้อยกว่า 325 เมช



รูปที่ 4.5 ถ่านกระจุกบด ขนาดน้อยกว่า 325 เมช สัดส่วน
ซิงค์กลอไรด์ต่อกระจุกบด เป็น 1:1 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.6 ถ่านกระจุกบด ขนาดน้อยกว่า 325 เมช สัดส่วน
ซิงค์กลอไรด์ต่อกระจุกบด เป็น 1.5:1 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.7 ถ่านกระดูกบด ขนาดน้อยกว่า 325 เมช สัดส่วน
ซิงค์คลอไรด์ต่อกระดูกบด เป็น 2 :1 โดยน้ำหนัก

นอกจากนี้ยังได้นำถ่านทั้ง 4 สภาวะข้างต้นไปวิเคราะห์โดยเครื่อง Surface Area Analyzer ด้วยวิธี BET (Brunauer-Emmett-Teller) ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.1 โดยจะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกระดูกหนึ่งกับกระดูกที่ผ่านกระบวนการกระตุ้น โดยใช้ซิงค์คลอไรด์ พบว่าซิงค์คลอไรด์สามารถทำให้พื้นที่ผิว ปริมาตรโพรงเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนซิงค์คลอไรด์ต่อกระดูกบดมากขึ้นจะทำให้พื้นที่ผิว ปริมาตรโพรงลดลง การลดลงของพารามิเตอร์ทั้งสองค่านี้มีความสำคัญต่อกลไกการกำจัดมาก ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าเนื่องจากซิงค์คลอไรด์เป็นเกลือมีจุดเดือดสูงถึง 756 องศาเซลเซียสจึงมีความคงทนต่อการสลายตัวสูง เมื่อซิงค์คลอไรด์หลอมเหลวที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส ซิงค์คลอไรด์จะแทรกไปตามรูพรุน ช่องว่าง ที่เกิดขึ้น ดังนั้นเมื่อมีปริมาณซิงค์คลอไรด์มากเกินไปอาจทำให้สิ่งเจือปนในกระดูกไม่สามารถที่จะหลุดไปได้โดยสะดวก กลับทำให้เกิดการติดค้างอยู่ในรูพรุนได้มากขึ้น จะเห็นว่าสัดส่วนซิงค์คลอไรด์ ต่อ กระดูกบด เป็น 1:1 จะให้ค่าพื้นที่ผิวและค่าปริมาตรจำเพาะของโพรงมากที่สุด ส่วนค่าขนาดโพรงถึงแม้จะมีแนวโน้มลดลงเช่นกันแต่ก็ยังมีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับขนาดอออนของโลหะหนัก

การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ พื้นที่ผิว BET ปริมาตรจำเพาะของโพรง ค่าขนาดของโพรง และคุณสมบัติทางกายภาพอื่นๆ แสดงดังตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าเมื่อเทียบกับถ่านกระดูกการค้า Brimac216 (Danny และคณะ, 2004) ค่าพื้นที่ผิว BET มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ปริมาตรจำเพาะของโพรงจากงานวิจัยนี้มีค่ามากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยสุกกิจที่อุณหภูมิการเผาเดียวกันคือ 400 องศาเซลเซียส พบว่างานวิจัยนี้มีค่าพื้นที่ผิวน้อยกว่า แต่ขนาดโพรงใหญ่กว่าถึง 2 เท่า

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิว(Specific surface area (BET)) ปริมาตรจำเพาะของโพรง (Pore specific volume) และค่าขนาดของโพรง (Average pore diameter) ที่สภาวะการเตรียมด้วยสัดส่วนของซิงก์คลอไรด์ต่อกระดูกบดต่างกัน

ตัวอย่าง	ซิงก์คลอไรด์:กระดูกบด	Specific surface area(BET) (m ² /g)	Pore specific volume (cm ³ /g)	Average pore diameter (Å)
1	กระดูกนี้	27.44	0.1237	293.96
2	1:1	88.08	0.3691	289.98
3	1.5:1	71.74	0.2743	254.76
4	2:1	70.95	0.2330	237.56

4.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของถ่านกระดูก

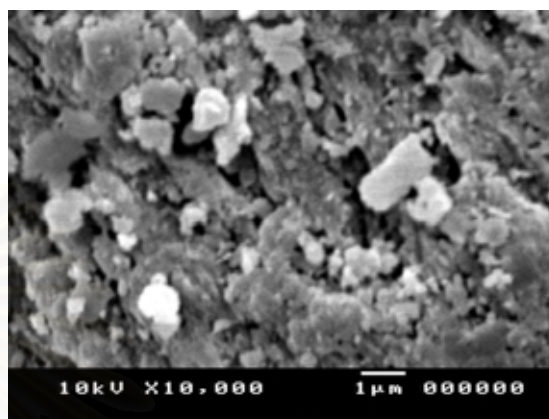
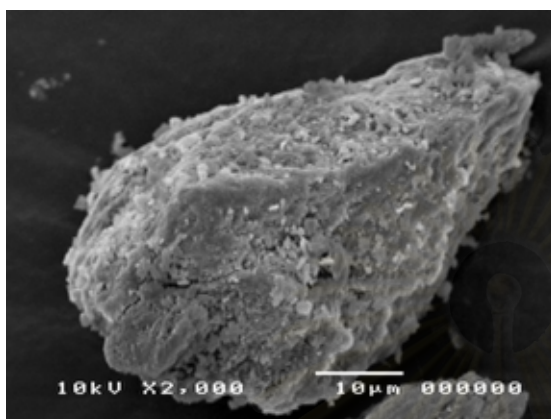
การศึกษาในขั้นนี้เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของถ่านกระดูกและองค์ประกอบของผลึกที่มีอยู่เดิมและที่เกิดขึ้นใหม่หลังจากการกระตุ้นด้วย ซิงก์คลอไรด์ ต่อ กระดูกบด เป็น 1:1, 1.5:1 และ 2:1 ที่อุณหภูมิการเผา 400 องศาเซลเซียส ซึ่งการทดสอบได้ทำการทดสอบโดยใช้เครื่องมือ FTIR เพื่อดูแนวโน้มของปริมาณ PO₄³⁻ ที่เปลี่ยนไป และเปรียบเทียบความสอดคล้องของความเข้มผลึกที่เปลี่ยนไปกับผลทดสอบโดยใช้เครื่องมือ XRD ซึ่งสามารถบอกได้ถึงชนิดของผลึก PO₄³⁻ ที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดจนทำให้สามารถเชื่อมโยงถึงกลไกในการกำจัดโลหะหนักได้

4.2.1 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของถ่านกระดูกด้วยเครื่อง SEM

จากขั้นตอนการเตรียมถ่านกระดูก ด้วยสัดส่วนต่างๆ ของซิงก์คลอไรด์ ในขั้นตอนที่ 4.1 จะได้ถ่านในสภาวะต่างๆ ตามที่ต้องการ จากนั้นจึงนำมาศึกษาด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 1,000 หรือ 2,000 เท่า เพื่อแสดงให้เห็นลักษณะรูปร่างของถ่าน และปรับกำลังขยายเป็น 10,000 เท่า เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของถ่าน พบว่าที่สภาวะก่อนการเตรียมขนาดรูพรุนจะใหญ่กว่าที่สภาวะหลังการเตรียมด้วยสัดส่วนต่างๆ ของซิงก์คลอไรด์อย่างชัดเจน ดังรูปที่ 4.8 ถึง 4.11 ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์ ดังตารางที่ 4.1 ที่พบว่าที่สภาวะหลังการเตรียมด้วยสัดส่วนต่างๆ ของซิงก์คลอไรด์ พื้นที่ผิวของกระดูกจะเพิ่มขึ้น แต่ค่าขนาดโพรงจะลดลง โดยทั้งสองค่าพารามิเตอร์นี้จะมีค่าใกล้เคียงกันมากเมื่อเตรียมด้วยสัดส่วนของซิงก์คลอไรด์ เป็น 1:1, 1.5:1 และ 2:1 จึงอาจเป็นเหตุให้เมื่อดูจากภาพขยาย 10,000 เท่าจึงมีความใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ชนิดต่างๆ

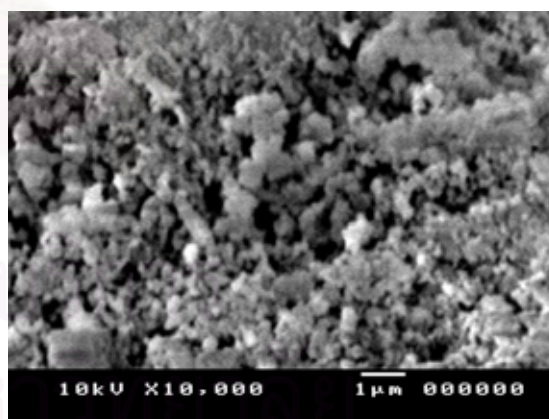
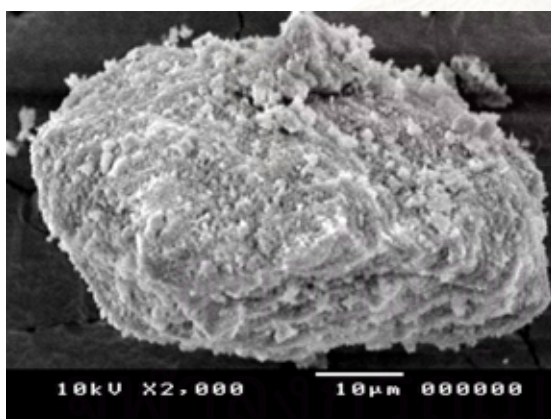
วิธีผลิต/(ชื่อการค้า)	Specific surface area(BET) (m ² /g)	Pore specific volume (cm ³ /g)	Average pore diameter (A°)	Iodine number (mg/g)	Bulk density (g/cm ³)	วัตถุดิบ	หมายเหตุ
(Brimac 216)	100	0.2250	-	-	-	กระดูกโค-กระบือ	Denny และคณะ (2004)
(ICI America Hydrodarco 3000)	600-650	0.95	-	650	0.43	ลิกไนท์	Wesly (1989)
(Calgon Filtrasorb 300)	950-1,050	0.85	-	900	0.48	บิโทมินัส	
(Westvaco Nuchar WV-L)	1,000	0.85	-	950	0.48		
(Witco 517)	1,050	0.60	-	1,000	0.48		
ZnCl ₂ :กระดูกบด 1 : 1 เผา 400 องศาเซลเซียส	88.08	0.3691	289.98	-	-	กระดูกโค-กระบือ	งานวิจัยนี้
ZnCl ₂ :กระดูกบด 1.5 : 1 เผา 400 องศาเซลเซียส	71.74	0.2743	254.76	-	-		
ZnCl ₂ :กระดูกบด 2 : 1 เผา 400 องศาเซลเซียส	70.95	0.2330	237.56	-	-		
ZnCl ₂ :ยางเหลือทิ้ง 0.7 : 1 เผา 500 องศาเซลเซียส	-	-	-	800-900	0.407	ยางเหลือทิ้ง	ปิยะพร (2542)
ZnCl ₂ :ขี้ข้าวโพด 1 : 4 เผา 600 องศาเซลเซียส	1,140-1,300	-	-	960-1,075	-	ขี้ข้าวโพด	พงศธร (2537)
ZnCl ₂ :กะลาตาล โตนด 3 : 2 เผา 500 องศาเซลเซียส	1,600-1,700	-	-	1,100-1,200	-	กะลาตาล โตนด	บุญชัย (2536)
เผา 400 องศาเซลเซียส	120.007	0.3625	120.83	-	-	กระดูกโค-กระบือ	ศุกกิจ (2545)
เผา 500 องศาเซลเซียส	85.1261	0.3277	153.69	-	-		
เผา 600 องศาเซลเซียส	43.453	0.1998	183.97	-	-		
เผา 800 องศาเซลเซียส	2.1507	0.0061	144.02	-	-		
เผา 1000 องศาเซลเซียส	1.8423	0.0030	65.27	-	-		
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	476.64	-	-	411.27	0.524	กะลาปาล์ม น้ำมัน	วราวุฒิ (2541)



ก) กำลังขยาย 2,000 เท่า

ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า

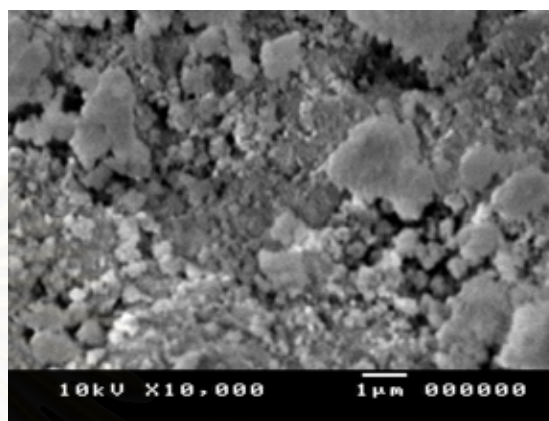
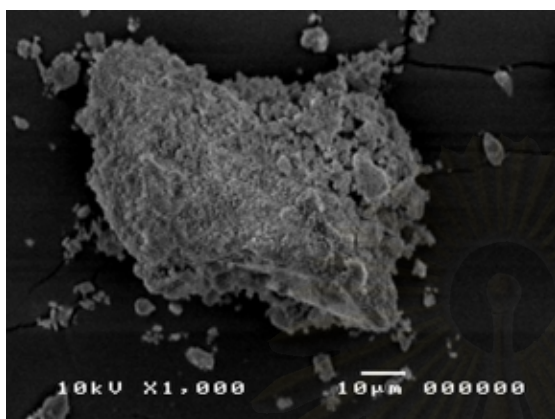
รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายกระดูกบดก่อนสภาวะการเตรียมด้วยสัคส่วนต่างๆ ของซิงก์คลอไรด์



ก) กำลังขยาย 2,000 เท่า

ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า

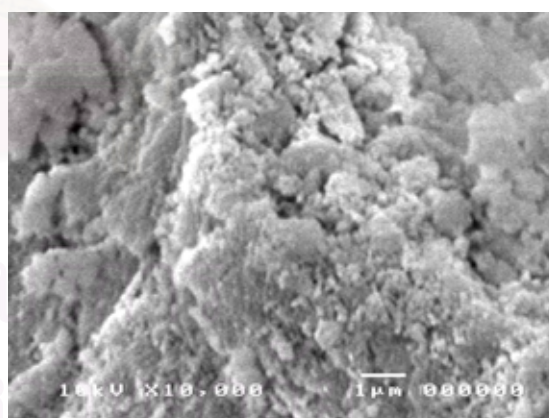
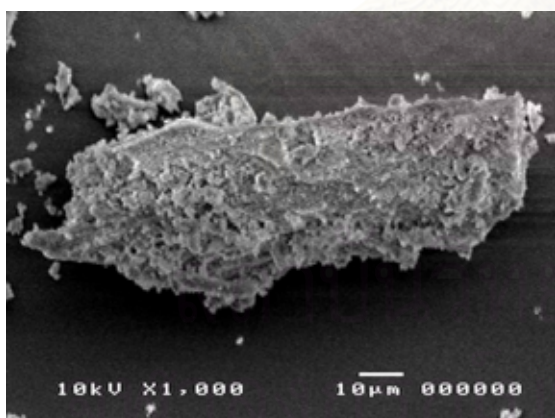
รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายผ่านกระดูกบดที่สภาวะการเตรียมด้วยสัคส่วนต่างๆ ของซิงก์คลอไรด์ต่อ
กระดูกบด เป็น 1 : 1



ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า

ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า

รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายผ่านกระดุกบดที่สภาวะการเตรียมด้วยสัดส่วนต่างๆ ของซิงก์คลอไรด์ต่อ
กระดุกบด เป็น 1.5 : 1



ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า

ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า

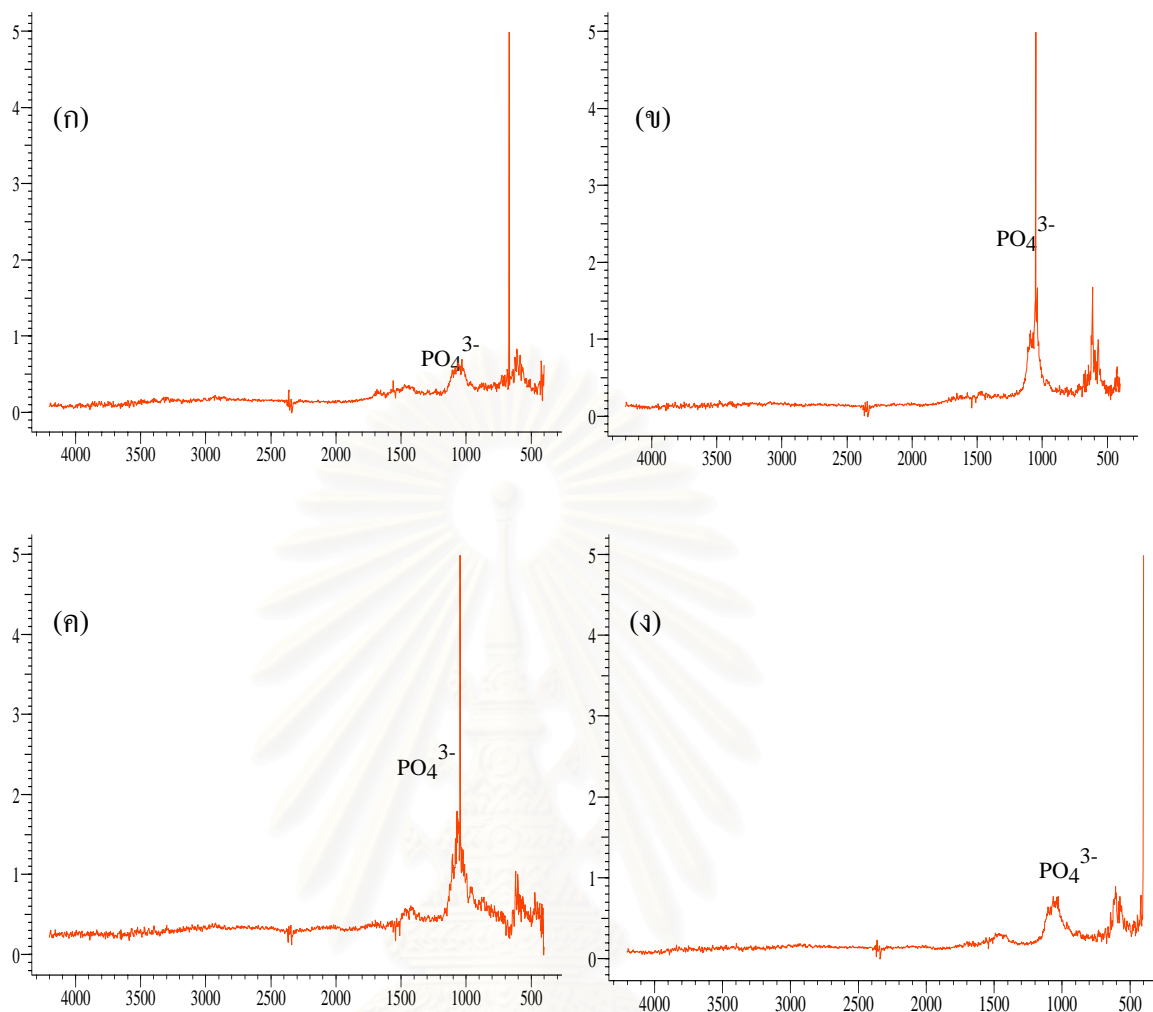
รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายผ่านกระดุกบดที่สภาวะการเตรียมด้วยสัดส่วนต่างๆ ของซิงก์คลอไรด์ต่อ
กระดุกบด เป็น 2 : 1

4.2.2 การศึกษาแนวโน้มของปริมาณ PO_4^{3-} ที่เปลี่ยนไปด้วยเครื่อง FTIR

จากการศึกษาสภาวะในการเตรียมถ่านกระดูก ด้วยสารละลายซิงก์คลอไรด์ทำให้ได้ถ่านกระดูกทั้งหมด 4 สภาวะ คือกระดูกนึ่งและกระดูกบดซึ่งผ่านการกระตุ้นโดยซิงก์คลอไรด์ต่อกระดูกบด เป็น 1:1, 1.5:1 และ 2:1 ที่อุณหภูมิการเผา 400 องศาเซลเซียส ซึ่งผลวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR แสดงดังรูปที่ 4.12 โดยจุดประสงค์เพื่อศึกษาแนวโน้มปริมาณความเข้มข้นของ PO_4^{3-} ในองค์ประกอบที่เปลี่ยนไป Chen และคณะ (1997) ได้กล่าวว่าปริมาณ PO_4^{3-} ในสารละลายจะมีผลต่อกลไกการกำจัดโลหะหนักโดยตรงโดยเฉพาะกับ Pb^{2+} ซึ่งจะถูกควบคุมปริมาณโดยกลไกการละลายและการตกตะกอน (Dissolution and precipitation) จากผลการวิเคราะห์พบว่ากระดูกนึ่งจะมีความเข้มข้น PO_4^{3-} ต่ำกว่ากระดูกซึ่งผ่านการกระตุ้นด้วยซิงก์คลอไรด์ เนื่องจากมีความสูงพีคที่ต่ำกว่าและเมื่อนำกระดูกมากระตุ้นโดยซิงก์คลอไรด์ต่อกระดูกบด เป็น 1:1, 1.5:1 และ 2:1 ที่อุณหภูมิการเผา 400 องศาเซลเซียสพบว่าความเข้มข้นของ PO_4^{3-} ต่ำลงตามลำดับซึ่งหมายถึงความเป็นผลึก (Crystallinity) ก็จะลดลงด้วย

4.2.3 การตรวจสอบชนิดผลึกของกระดูกด้วยเครื่อง XRD

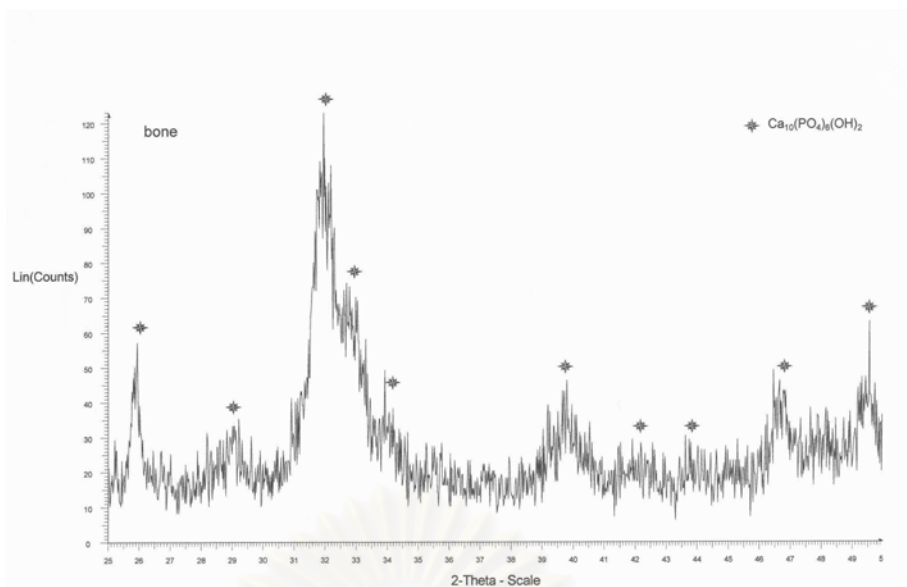
จากการศึกษาสภาวะในการเตรียมถ่านกระดูก ด้วยสารละลายซิงก์คลอไรด์ทำให้ได้ถ่านกระดูกทั้งหมด 4 สภาวะ คือกระดูกนึ่งและกระดูกบดซึ่งผ่านการกระตุ้นโดย ซิงก์คลอไรด์ต่อกระดูกบด เป็น 1:1, 1.5:1 และ 2:1 ที่อุณหภูมิการเผา 400 องศาเซลเซียส ซึ่งผลวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 โดยจุดประสงค์เพื่อศึกษาชนิดของผลึก PO_4^{3-} ที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดจนทำให้สามารถเชื่อมโยงถึงกลไกในการกำจัดโลหะหนักได้ พบว่าพีคของถ่านกระดูกที่กระตุ้นด้วยซิงก์คลอไรด์ ต่อ กระดูกบด เป็น 1:1 สูงที่สุด ซึ่งปริมาณ PO_4^{3-} ก็จะมากขึ้นตามไปด้วยเนื่องจากผลึกที่ได้จากถ่านกระดูกเป็นสารประกอบของฟอสเฟต และลดลงเมื่อสัดส่วนซิงก์คลอไรด์เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ FTIR จะเห็นว่าถ่านกระดูกที่กระตุ้นด้วยซิงก์คลอไรด์ ต่อ กระดูกบด เป็น 1:1 ยังให้ค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรจำเพาะของโพรงมากที่สุดด้วย ดังนั้นจึงเลือกสภาวะนี้เป็นตัวแทนในการนำไปทดสอบแบบแบตช์ต่อไป จากผลวิเคราะห์ชนิดผลึกที่มีอยู่เดิมจากกระดูกนึ่งพบว่าพีคเด่นที่เกิดขึ้นเป็นผลึกของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$; CaHAp) เพียงชนิดเดียว ซึ่งสอดคล้องกับถ่านกระดูกที่ขายเป็นการค้าชื่อ Brimac 216 (Danny และคณะ, 2004) ซึ่งมีปริมาณ CaHAp เป็นองค์ประกอบหลักสูงถึง 70-76 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก Sugiyama และคณะ (2002) ได้กล่าวว่า CaHAp จะเป็นองค์ประกอบหลักของเนื้อเยื่อแข็ง เช่น กระดูกและฟัน



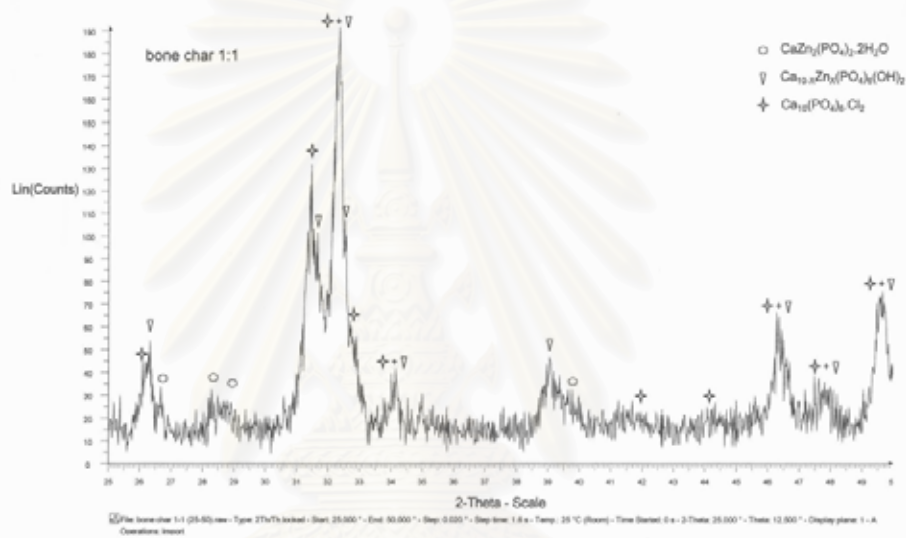
รูปที่ 4.12 ผลวิเคราะห์ FTIR ของกระดูกนึ่ง (ก); ภายหลังกระตุ้นด้วยซิงก์คลอไรด์ต่อกระดูกบดเป็น 1:1(ข); 1.5:1(ค); และ 2:1(ง)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

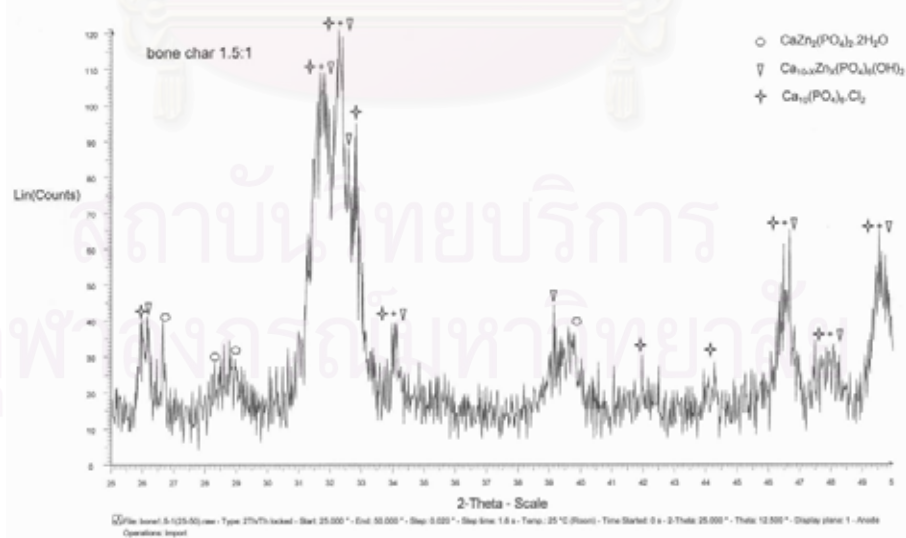
(ก)



(ข)

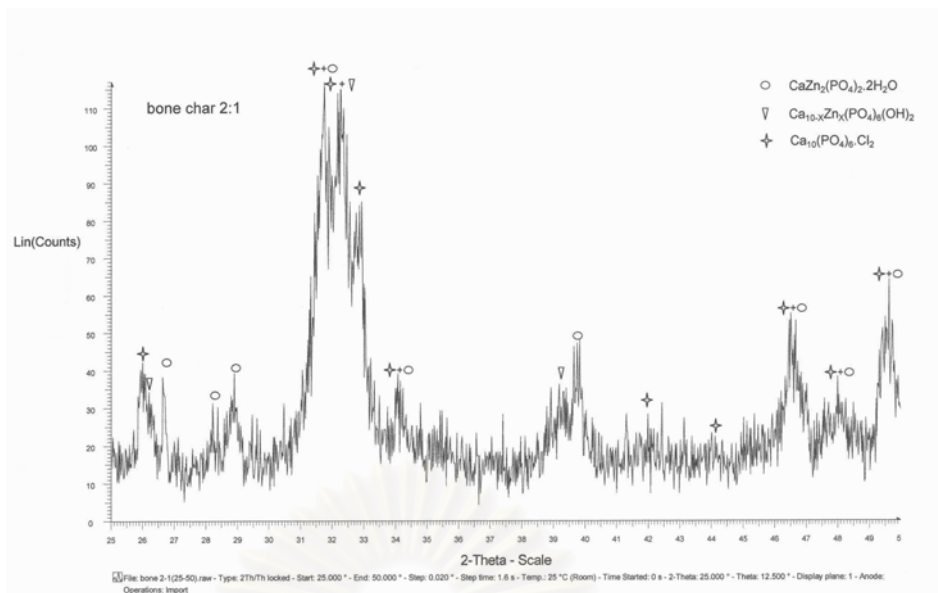


(ค)

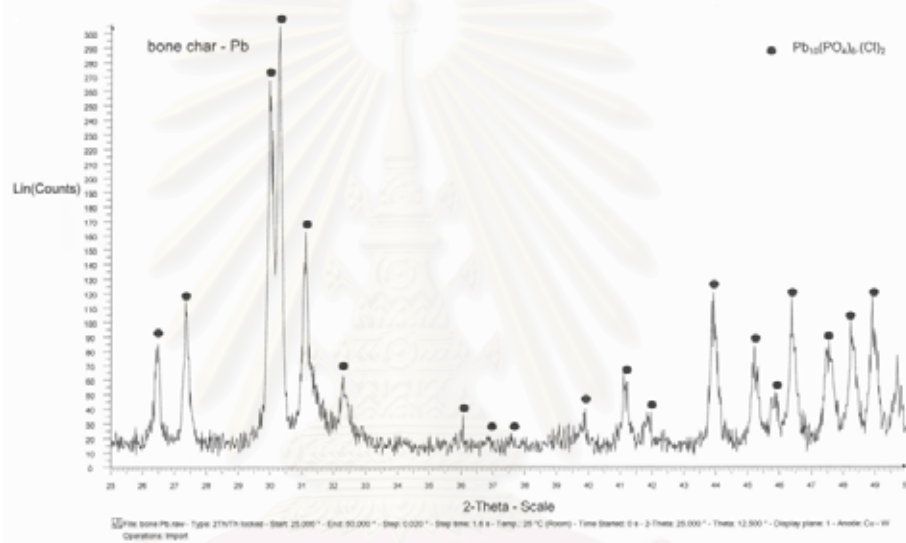


รูปที่ 4.13 ผลวิเคราะห์ XRD ของกระดูกนึ่ง (ก); ภายหลังกระตุ้นด้วยซิงก์คลอไรด์ ต่อกระดูกบดเป็น 1:1(ข); และ 1.5:1(ค)

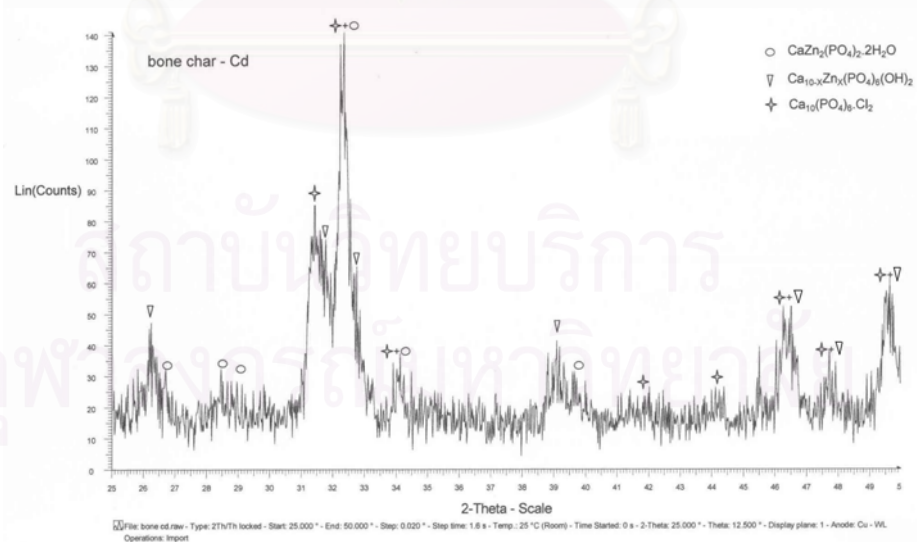
(ก)



(ข)

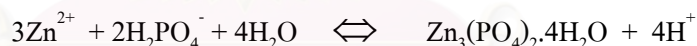


(ค)

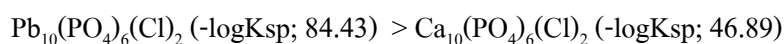


รูปที่ 4.14 ผลวิเคราะห์ XRD ของถ่านกระดูกภายหลังกระตุ้นด้วยซิงก์คลอไรด์ต่อกระดูกบดเป็น 2:1 (ก); หลังการกำจัดตะกั่ว (ข); และแคดเมียม (ค)

ผลวิเคราะห์หึ่งชนิดผลึกเมื่อซิงก์คลอไรด์ต่อกระดูกบด เป็น 1:1, 1.5:1, 2:1 พบพีคของ $\text{Ca}_{10-x}\text{Zn}_x(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, $\text{CaZn}_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{Cl})_2$ เช่นเดียวกับผลการทดลองของ Miyaji, Kono และ Suyama (2005) ซึ่งได้ศึกษาโครงสร้างของ CaHAp ที่เปลี่ยนไปภายหลังจากการที่เพิ่มความเข้มข้นของ Zn^{2+} มากขึ้นพบว่า Zn^{2+} สามารถแทนที่ Ca^{2+} ได้บางส่วนเท่านั้น และเมื่อเพิ่มความเข้มข้น Zn^{2+} มากขึ้น จำนวนผลึกของ $\text{Ca}_{10-x}\text{Zn}_x(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ จะลดลง แต่จะเกิด $\text{CaZn}_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ เพิ่มมากขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.15 Chen และคณะ (1997) ได้สรุปไว้ว่า กลไกที่ใช้กำจัด Cd^{2+} จากสารละลายที่เป็นของเหลวคือกลไกการดูดติดผิว (Sorption mechanism) แต่จะไม่ตกผลึกกับฟอสเฟต ซึ่งพบว่าสอดคล้องกับการทดสอบการกำจัด Cd^{2+} โดย CaHAp เนื่องจากผลวิเคราะห์ XRD แสดงดังรูปที่ 4.14 ซึ่งทดสอบในสภาวะเดียวกันกับที่ใช้ทดสอบหาสมการไอโซเทอม คือความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์แควเมียม 10 มก./ล. เดิมถ่านกระดูก 0.6 ก./ล. น้ำเสียปรับพีเอชเป็น 7 เขย่า 250 รอบ/นาที เป็นเวลา 60 ชั่วโมง จะเห็นลักษณะของพีคโดยรวมเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านที่เลือกมาใช้ทดสอบ (ซิงก์คลอไรด์ : กระดูกบด เท่ากับ 1:1) จะมีลักษณะเหมือนเดิมแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างผลึกส่วนใหญ่ยังอยู่ในรูปแบบเดิม แต่การที่ยังสามารถกำจัด Cd^{2+} ได้แสดงว่ากลไกการกำจัดเป็นแบบดูดติดผิว ซึ่งการที่มี Cd^{2+} อยู่บริเวณผิว รูพรุน และการละลายของผลึกในน้ำเสียสังเคราะห์ อาจเป็นสาเหตุให้ความเข้มข้นของผลึกหลังการดูดติดมีพีคที่ลดลงเมื่อวิเคราะห์ XRD Misra and Bowen ได้ศึกษาผลของปฏิกิริยาระหว่าง Zn^{2+} กับ CaHAp ในน้ำเสียสังเคราะห์ (1981 อ้างถึงใน Chen และคณะ, 1997: 629) พบว่าจะเกิดรวมตัวเป็นผลึก $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Hopeite) ดังสมการ

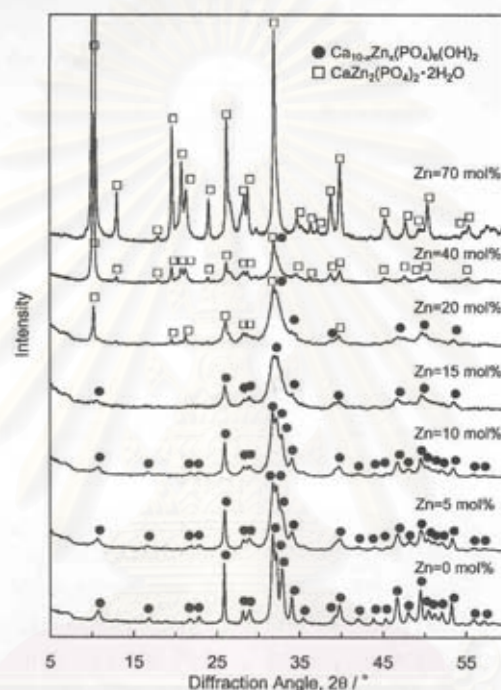


จากผลการทดลองนี้ไม่มีพีคของ $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ที่ปรากฏเด่นชัดดังนั้นข้อสมมุติฐานของ Misra and Bowen จึงไม่สอดคล้องกับงานวิจัยนี้ จากงานวิจัยของ Ma และคณะ (1994) ได้สรุปว่าการมีอยู่ของ NO_3^- ในสารละลายจะไม่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาระหว่าง Pb กับ CaHAp และ NO_3^- ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับ CaHAp ได้ อีกทั้งงานวิจัยของ LeGeros ยังพบว่าเมื่อ CaHAp อยู่ในสารละลายที่มีทั้ง Cl^- , NO_3^- โดย Cl^- สามารถแทนที่ OH^- ใน CaHAp ได้ (1993 อ้างถึงใน Miyaji และคณะ, 2005: 210) ดังนั้นเมื่อตรวจด้วย XRD จะพบสารประกอบใหม่ในรูปแบบ $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{Cl})_2$ และเมื่อ CaHAp อยู่ในสารละลายที่มีทั้ง Pb^{2+} , Cl^- , NO_3^- สารประกอบใหม่จะอยู่ในรูปของ $\text{Pb}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{Cl})_2$ (Ma และคณะ, 1994) โดยไม่พบในรูปแบบ $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{Cl})_2$ เนื่องจาก $\text{Pb}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{Cl})_2$ มีความเสถียรมากกว่าซึ่งอาจดูได้จากค่า Solubility product ($-\log K_{sp}$) จากงานวิจัยของ Crannell และคณะ (2000) ดังนี้



ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ซึ่งตรงกันกับผลการทดลองของงานวิจัยนี้ที่พบพีคที่เด่นชัดมากของผลึก

$Pb_{10}(PO_4)_6(Cl)_2$ เท่านั้นที่พีเอช 4 โดยทดสอบในสภาวะเดียวกันกับที่ใช้ทดสอบหาสมการไอโซเทอม คือความเข้มข้นน้ำเสียดังเคราะห์ตะกั่ว 50 มก./ล. เติมน้ำกรด 0.08 ก./ล. น้ำเสียดัง ปรับพีเอช เป็น 4 เขย่า 250 รอบ/นาที เป็นเวลา 60 ชั่วโมง และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Crannell และคณะ (2000) ที่พบว่าพีเอช 4 เหมาะสมสำหรับการเกิด(Chloropyromorphite)มากที่สุดด้วย ดังนั้น แสดงว่าผลึกจะอยู่ในรูปผลึก $Pb_{10}(PO_4)_6(Cl)_2$ เป็นส่วนใหญ่



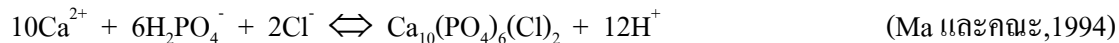
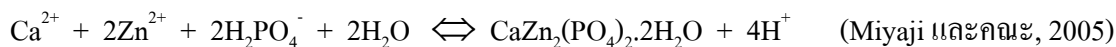
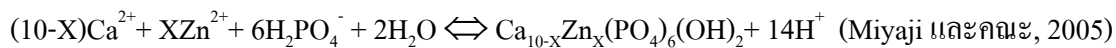
รูปที่ 4.15 ผลวิเคราะห์ XRD ของการทดสอบชนิดของผลึกที่เกิดขึ้นเมื่อปรับเปลี่ยนค่าสัดส่วนของ Zn^{2+} ในสารละลาย (Miyaji และคณะ, 2005)

ดังนั้นจากข้อสมมุติฐานทั้งหมดสามารถเขียนสมการแสดงการเกิดผลึกใหม่ของ $Ca_{10-x}Zn_x(PO_4)_6(OH)_2$, $CaZn_2(PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ และ $Ca_{10}(PO_4)_6(Cl)_2$ สำหรับสภาวะซิงค์คลอไรด์ต่อกระดูกบด เป็น 1:1, 1.5:1 และ 2:1 ได้ดังนี้

การละลาย (Dissolution)

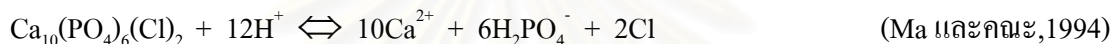
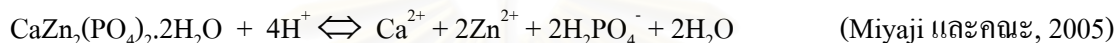
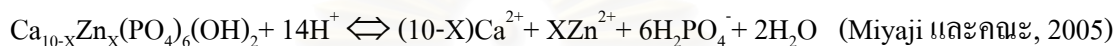


การตกตะกอน (Precipitation)

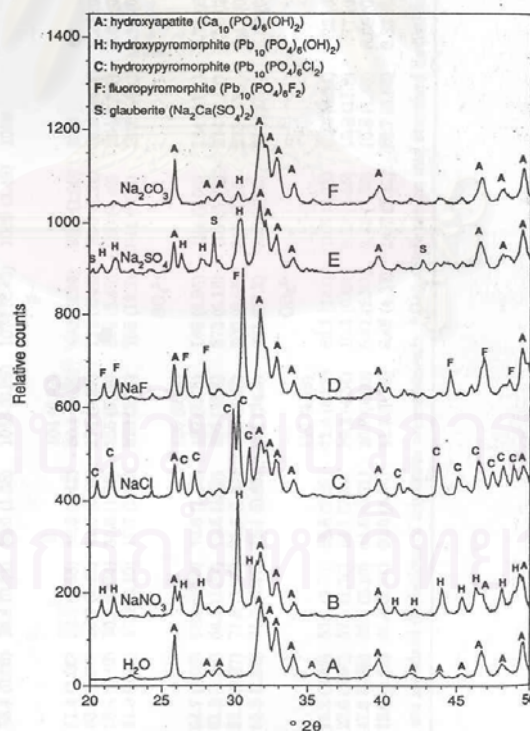
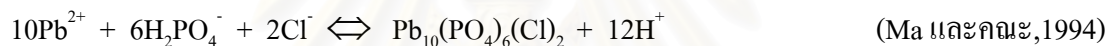


และสมการแสดงการเกิดผลึก $\text{Pb}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{Cl})_2$ ภายหลังจากการดูดซับกับ Pb^{2+} ที่ pH 4 ของถ่านกระดูกที่เลือกจากสถานะที่เตรียมจากสัดส่วน ซิงก์กลอไรด์ ต่อ กระดูกบด เป็น 1:1 ได้ดังนี้

การละลาย (Dissolution)



การตกตะกอน (Precipitation)



รูปที่ 4.16 ผลวิเคราะห์ XRD ของการทดสอบชนิดของผลึกที่เกิดขึ้นเมื่อ CaHAp ทำปฏิกิริยากับน้ำ (A); ภายหลังจากทำปฏิกิริยากับ Pb^{2+} ในขณะที่มี NO_3^- (B); Cl^- (C); F^- (D); SO_4^{2-} (E); และ CO_3^{2-} (F). (Ma และคณะ, 1994)

4.3 การศึกษาพีเอชที่เหมาะสม โดยทำการทดลองแบบแบตซ์

4.3.1 น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว

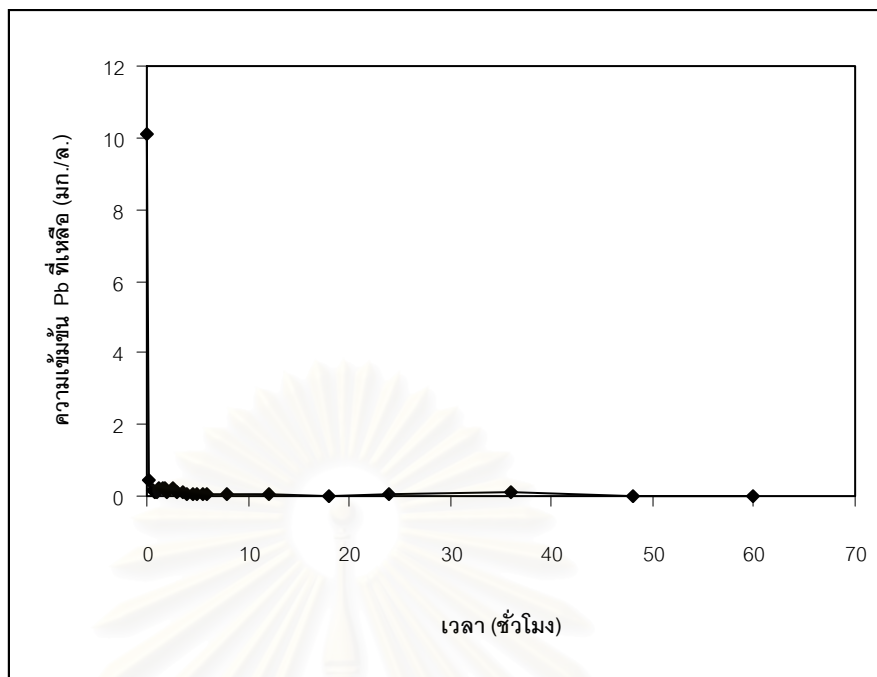
4.3.1.1 การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับศึกษาพีเอชที่เหมาะสมสำหรับตะกั่ว โดยทำการทดลองแบบแบตซ์

เริ่มการทดลอง โดยชั่งถ่านกระดูกจากสภาวะที่เลือกคือสัดส่วนซึ่งกัลลอสไรต์ต่อกระดูกบด เป็น 1:1 ปริมาณ 0.025 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง ใส่ลงไปใต้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร และชั่งถ่านกระดูก 0.050 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง ใส่ลงไปใต้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ที่พีเอช 5 เขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างที่เวลาต่างๆ จนครบ 60 ชั่วโมง แล้วนำน้ำตัวอย่างไปกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชัน ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

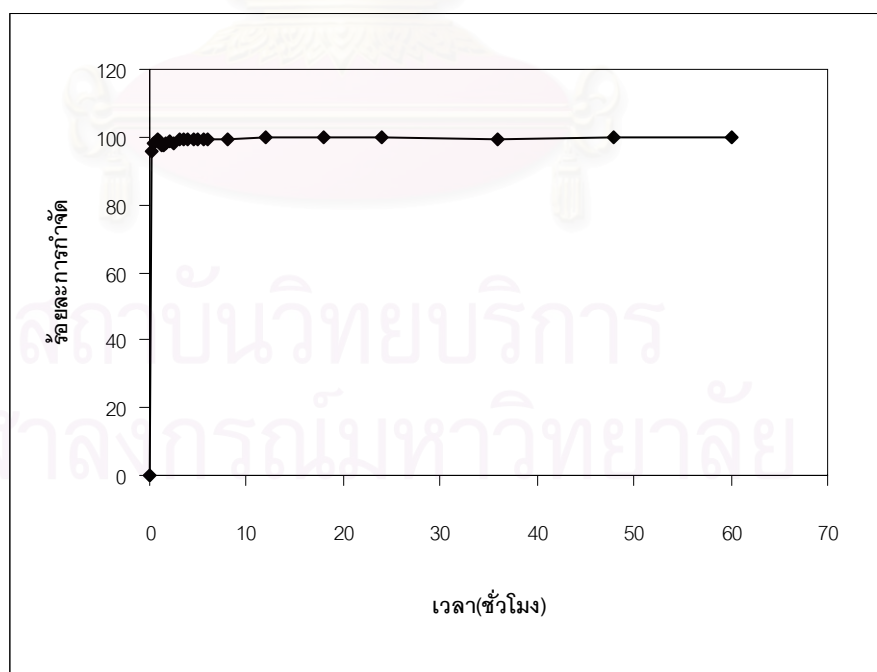
1. น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร

จากผลการทดลองพบว่าถ่านกระดูกมีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วได้สูงมากโดยพบว่าความเข้มข้นตะกั่วลดลงจาก 10.13 มิลลิกรัม/ลิตร เหลือเพียง 0.44 มิลลิกรัม/ลิตร หรือคิดเป็นร้อยละในการกำจัดสูงถึง 95.66 ภายในเวลาเพียง 15 นาทีแรกเท่านั้น และกำจัดได้ถึงร้อยละ 99.14 ภายในเวลา 3 ชั่วโมง จนกระทั่ง 100 เปอร์เซ็นต์ที่เวลา 48 ชั่วโมง ซึ่งผลการทดลองเป็นไปตามภาคผนวก ก ตารางที่ ก-1 ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ,4.18 และเมื่อพิจารณาค่าพีเอชของน้ำก่อนและหลังการทดลองพบว่ามีพีเอชสูงขึ้นเล็กน้อยคือจากพีเอชเริ่มต้น 5 เปลี่ยนเป็น 5.05 ที่เวลา 60 ชั่วโมง เป็นไปตามภาคผนวก ก ตารางที่ ก-1 ดังแสดงในรูปที่ 4.19 พบว่าค่าความสามารถในการกำจัดตะกั่วของถ่านกระดูก(Removal capacity) สำหรับสภาวะที่ใช้ทดสอบนี้มีค่าอยู่ระหว่าง 387.60 ถึง 405.20 มิลลิกรัม Pb/กรัมถ่านกระดูก

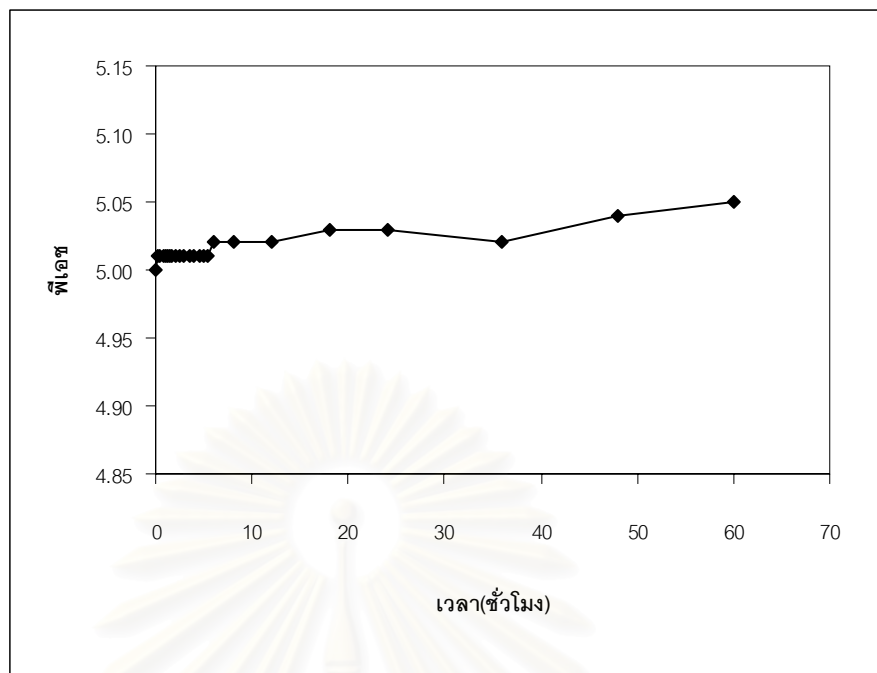
จะเห็นว่าถ่านปริมาณ 0.025 ก./ล.น้ำตัวอย่าง สามารถกำจัดตะกั่วได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นเพื่อให้การทดลองเห็นผลที่ชัดเจนมากขึ้นจึงเปลี่ยนสภาวะการทดสอบใหม่ โดยเพิ่มความเข้มข้น น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วเป็น 50 มิลลิกรัม/ลิตร และเพิ่มปริมาณถ่านกระดูกเป็น 0.050 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง



รูปที่ 4.17 ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อความเข้มข้นน้ำเสียตะกั่วเริ่มต้น 10 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 5 ถ่านกระดูก 0.025 ก./ล. น้ำตัวอย่าง



รูปที่ 4.18 ร้อยละการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อความเข้มข้นน้ำเสียตะกั่วเริ่มต้น 10 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 5 ถ่านกระดูก 0.025 ก./ล. น้ำตัวอย่าง

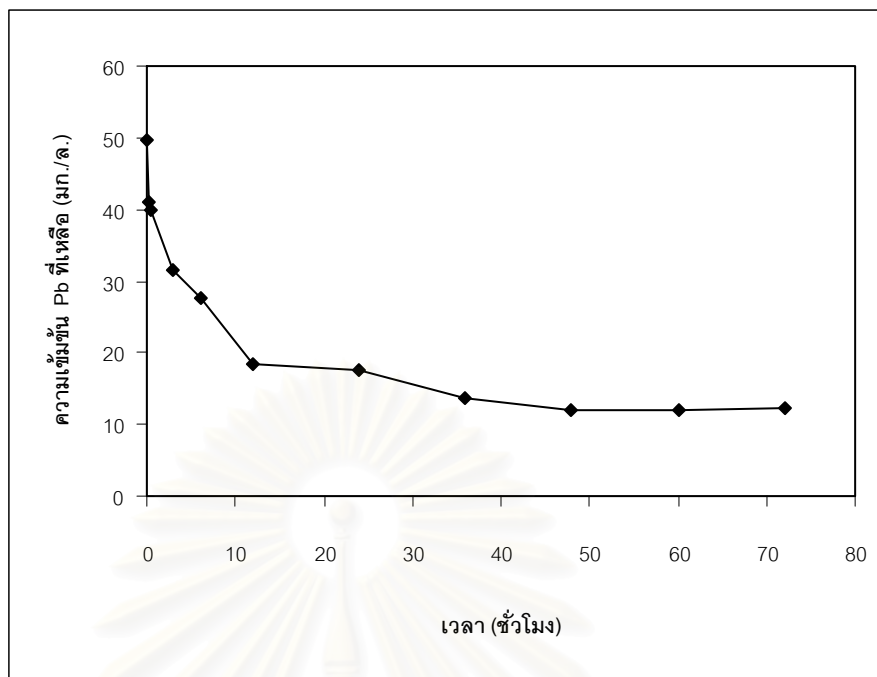


รูปที่ 4.19 พิเอชน้ำเสียหลังการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อความเข้มข้นน้ำเสีย
ตะกั่วเริ่มต้น 10 มก./ล. พิเอชเริ่มต้น 5 ถ่านกระดูก 0.025 ก./ล. น้ำตัวอย่าง

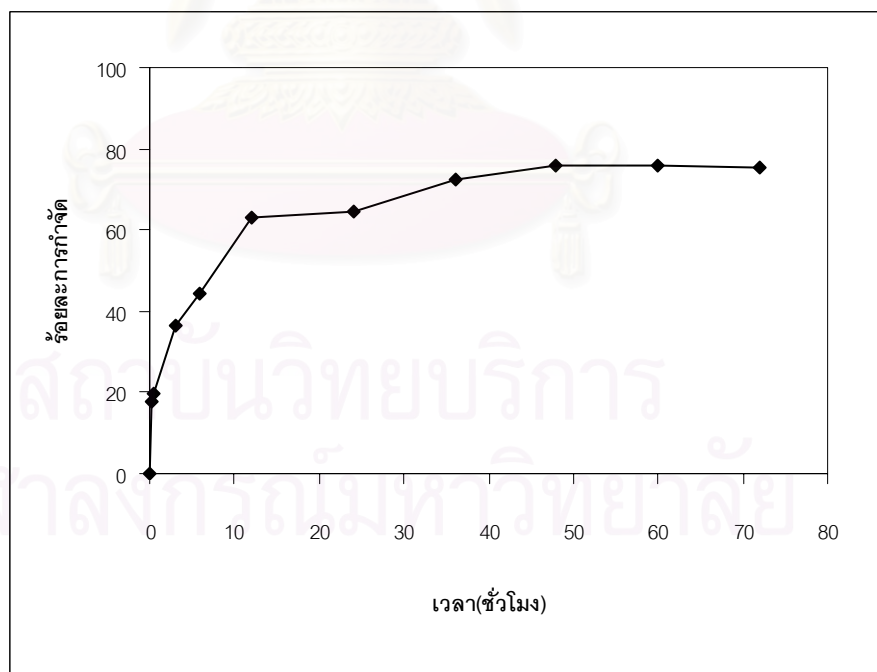
2. น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร

เริ่มต้นทดสอบโดยชั่งถ่านกระดูก 0.050 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง
ใส่ลงไปใต้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ที่พิเอช 5 เขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่
ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างที่เวลาต่างๆจนครบ 72 ชั่วโมง ซึ่งข้อมูล
ผลการทดลองเป็นไปตามภาคผนวก ก ตารางที่ ก-2 พบว่าความเข้มข้นตะกั่วลดลงจาก 49.77
มิลลิกรัม/ลิตร เหลือเพียง 12.26 มิลลิกรัม/ลิตร หรือคิดเป็นร้อยละในการกำจัด 75.37 ภายในเวลา
72 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.20 และ 4.21 เมื่อพิจารณาค่าพิเอชของน้ำก่อนและหลังการทดลอง
พบว่าพิเอชสูงขึ้นเล็กน้อยคือจากพิเอชเริ่มต้น 5 เปลี่ยนเป็น 5.01 ที่เวลา 72 ชั่วโมง ดังแสดงใน
รูปที่ 4.22 และค่าความสามารถในการกำจัดตะกั่วของถ่านกระดูกสำหรับสภาวะที่ใช้ทดสอบนี้มี
ค่าเพิ่มขึ้นโดยค่าอยู่ระหว่าง 175.40 – 755.20 มิลลิกรัม Pb/กรัมถ่านกระดูก

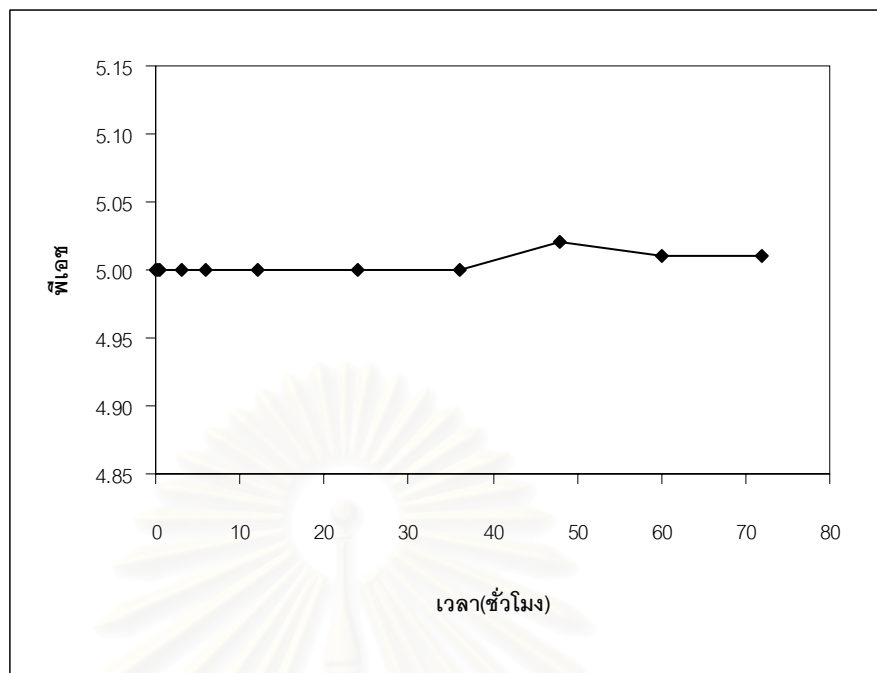
ดังนั้นจึงเลือกเวลาที่ 72 ชั่วโมงไปทำการทดลองในขั้นตอนการ
หาพิเอชที่เหมาะสมสำหรับตะกั่ว โดยทำการทดลองแบบเบตซ์ต่อไปสำหรับผลการทดลองที่
4.3.1.1 นั้นจะพบว่าพิเอชจะมีการเพิ่มขึ้นจากพิเอชเดิมเนื่องจากขั้นตอนการละลายของผลึกที่จะเกิด
ขึ้นตลอดเวลา ตามข้อสมมุติฐานของ Miyaji และคณะ (2005) และ Ma และคณะ (1994) ดัง
สมการต่อไปนี้



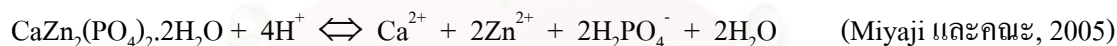
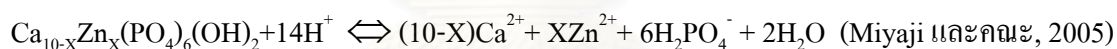
รูปที่ 4.20 ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียดังเคราะห์ เมื่อความเข้มข้นน้ำเสียดังแก้วเริ่มต้น 50 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 5 ถ่านกระดูก 0.050 ก./ล. น้ำตัวอย่าง



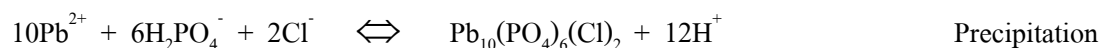
รูปที่ 4.21 ร้อยละการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียดังเคราะห์ เมื่อความเข้มข้นน้ำเสียดังแก้วเริ่มต้น 50 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 5 ถ่านกระดูก 0.050 ก./ล. น้ำตัวอย่าง



รูปที่ 4.22 พีเอชน้ำเสียหลังการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อความเข้มข้นน้ำเสียตะกั่วเริ่มต้น 50 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 5 ถ่านกระดูก 0.050 ก./ล. น้ำตัวอย่าง



จะสังเกตว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตะกั่วจาก 10 มก./ล. เป็น 50 มก./ล. โดยเพิ่มปริมาณถ่านกระดูกขึ้นเพียง 2 เท่าคือจาก 0.025 ก./ล. น้ำตัวอย่าง เป็น 0.050 ก./ล. น้ำตัวอย่าง พีเอชสุดท้ายที่สมดุลการกำจัดของความเข้มข้นของตะกั่ว 50 มก./ล. จะมีพีเอชต่ำกว่า ซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการการตกผลึกของ $\text{Pb}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{Cl})_2$ (Ma และคณะ, 1994) ได้ดังนี้

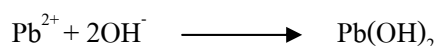


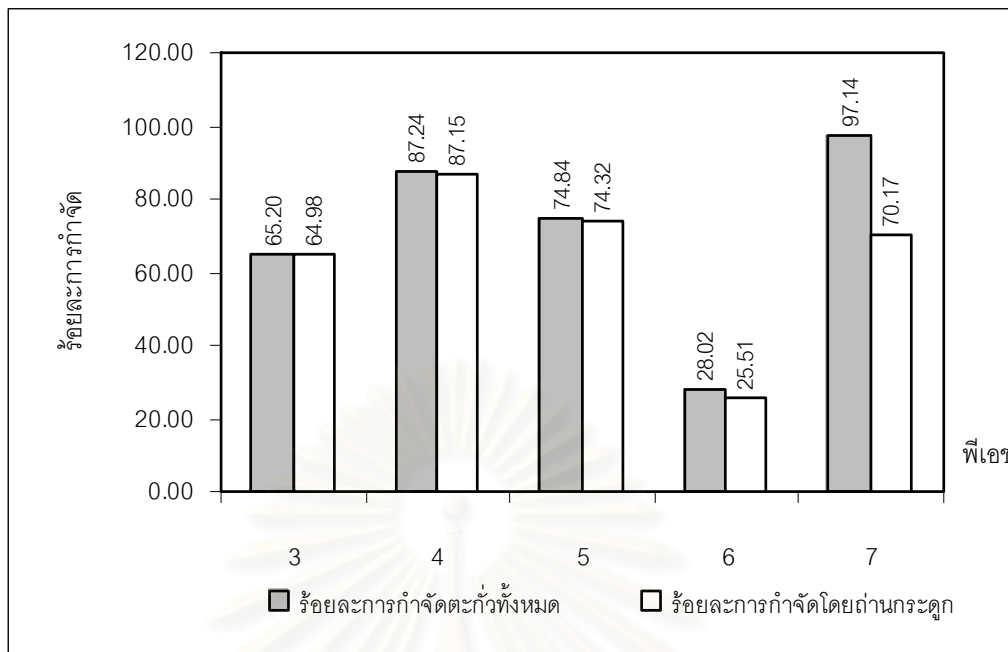
จะเห็นว่าความเข้มข้นของโลหะหนัก Pb^{2+} ยิ่งมาก H^+ ก็ยิ่งเกิดมาก ดังนั้นสารละลายจึงมีความเป็นกรดมากขึ้น

4.3.1.2 การหาพีเอชที่เหมาะสมสำหรับตะกั่ว โดยทำการทดลองแบบแบดซ์

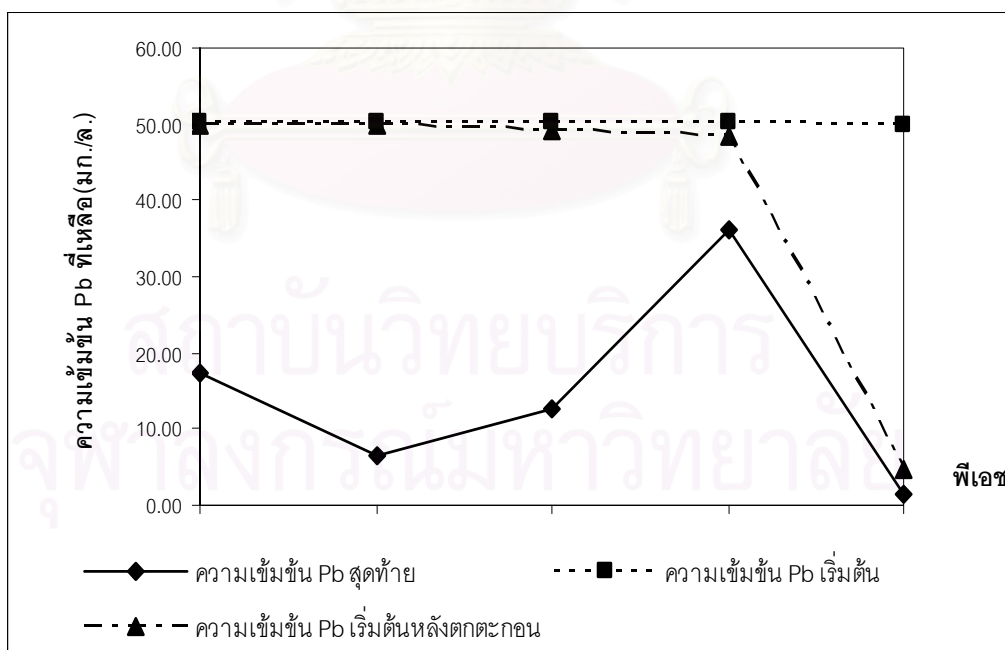
ทำการทดลองโดยชั่งถ่านกระดูกที่สภาวะการเตรียมที่เลือกคือ ซิงค์คลอไรด์ ต่อ กระดุกบด เป็น 1:1 ปริมาณ 0.050 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง โดยใช้ น้ำเสียดังเคราะห์ตะกั่วที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ทดสอบที่พีเอช 3, 4, 5, 6 และ 7 แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 72 ชั่วโมงซึ่งเป็นเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองขั้นตอนที่ 4.3.1.1 จากนั้นนำไปกรองด้วยกระดาษกรอง เมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันผลการทดลองสามารถสรุปโดยการเปรียบเทียบกับชุดควบคุม(ไม่เติมถ่านกระดูก)ได้ดังนี้

จากการทดลองพบว่าถ่านกระดูกมีประสิทธิภาพการกำจัดรวมต่ำที่สุดที่พีเอช 6 ซึ่งสามารถกำจัดได้ทั้งหมดคิดเป็นร้อยละ 28.02 ส่วนพีเอชที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดรวมสูงสุดคือพีเอช 7 โดยคิดเป็นร้อยละ 97.14 สำหรับพีเอช 3, 4 และ 5 ให้ประสิทธิภาพการกำจัดรวมโดยคิดเป็นร้อยละ 65.20, 87.24 และ 74.84 ตามลำดับ แต่พบว่าค่าความสามารถในการกำจัดตะกั่วของถ่านกระดูก(Dissolution and precipitation capacity) ที่พีเอช 3 ถึง 7 นั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 66.80 ถึง 867.80 มิลลิกรัม Pb/กรัมถ่านกระดูก โดยที่พีเอช 7 ให้ค่าต่ำที่สุดและพีเอช 4 ให้ค่าสูงที่สุด ส่วนที่พีเอช 3, 5 และ 6 ให้ค่าความสามารถในการกำจัดตะกั่วของถ่านกระดูกเท่ากับ 647.60, 730.40 และ 247.20 มิลลิกรัมPb/กรัมถ่านกระดูก ตามลำดับ ซึ่งหากคิดเป็นร้อยละที่กำจัดได้ที่พีเอช 3 ถึง 7 คือ 64.98, 87.15, 74.32, 25.51 และ 70.72 ตามลำดับ ข้อมูลแสดงดังภาคผนวก ก ตาราง ก-3 และรูปที่ 4.23, 4.24, 4.25 จะสังเกตว่าค่าร้อยละการกำจัดรวมมีค่ามากกว่าร้อยละการกำจัดโดยถ่านกระดูก ดังนั้นแสดงว่ามีการตกตะกอนของตะกั่วเกิดขึ้น ซึ่งค่าร้อยละของตะกั่วที่ตกตะกอนสามารถคำนวณได้จากชุดควบคุมซึ่งไม่เติมถ่านกระดูก โดยค่าร้อยละการตกตะกอน ของตะกั่วที่เกิดขึ้นที่พีเอช 3 ถึง 7 คือ 0.64, 0.72, 2.01, 3.37 และ 90.42 ตามลำดับ จะสังเกตว่าตะกั่วจะตกตะกอนมากขึ้นเมื่อพีเอชสูงขึ้น เนื่องจากความสามารถในการละลายของโลหะส่วนใหญ่เพิ่มขึ้นกับค่าพีเอช โดยตะกั่วสามารถเกิดเป็นสปีชีส์ของตะกั่วออกไซด์ได้ ดังรูปที่ 4.26 ในช่วงพีเอชประมาณ 6-10 ดังสมการต่อไปนี้

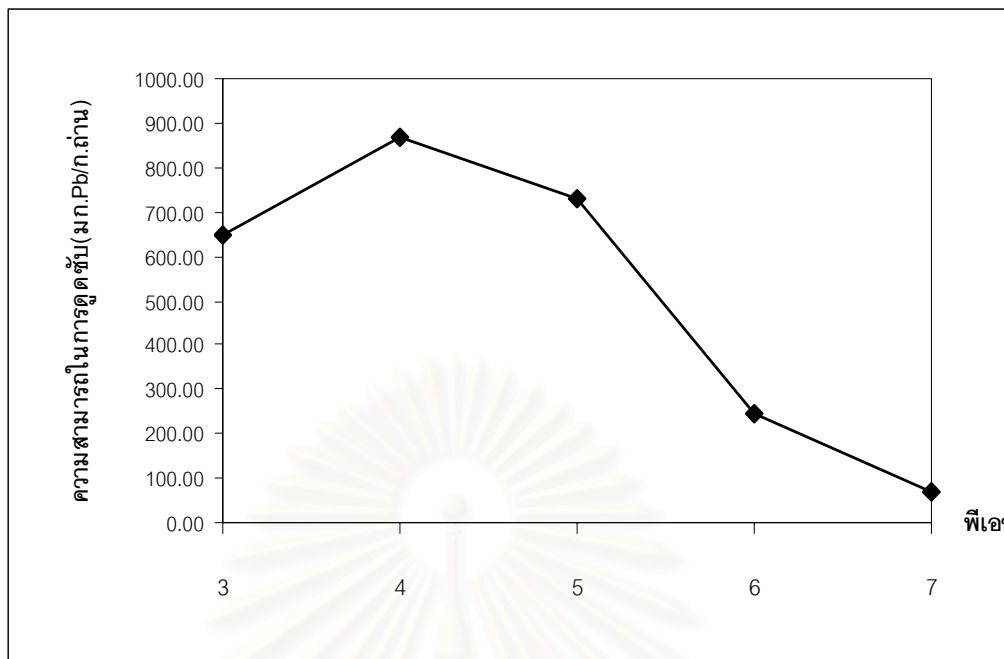




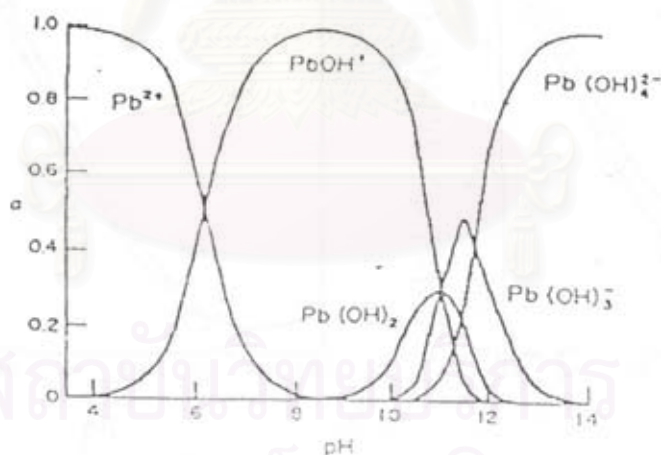
รูปที่ 4.23 ร้อยละการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกระดุกปริมาณ 0.050 ก./ล. เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มก./ล. ที่พีเอช 3 ถึง 7



รูปที่ 4.24 ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อกำจัดด้วยถ่านกระดุกปริมาณ 0.050 ก./ล. ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มก./ล. ที่พีเอช 3 ถึง 7



รูปที่ 4.25 ความสามารถในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ 0.050 ก./ล. ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มก./ล. ที่พีเอช 3 ถึง 7



รูปที่ 4.26 รูปแบบของตะกั่วในสารละลายที่พีเอชต่าง ๆ (Fergusson, 1990)

และการที่พีเอชมากขึ้นการละลายของผลึกก็เกิดได้ยากขึ้น เนื่องจากมีปริมาณ H^+ ในสารละลายน้อยลงส่งผลต่อการตกผลึกของ $Pb_{10}(PO_4)_6(Cl)_2$ ประสิทธิภาพการกำจัดโดยถ่านกระดูกจึงลดลง แต่ที่พีเอช 7 มีการตกตะกอนมากทำให้ความเข้มข้นตะกั่วหลังตกตะกอนเหลือเพียง 4.76 มิลลิกรัม/ลิตร ถึงแม้ว่าผลึกจะละลายได้ยาก แต่ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้นเหลือน้อยจึงทำให้ร้อยละในการกำจัดโดยถ่านกระดูกสูงขึ้นมากกว่าที่พีเอช 6 และจะสังเกตได้ว่าค่าความสามารถในการกำจัดโดย

ถ่านกระดูกที่พีเอช 7 ไม่ได้สูงขึ้นตามแต่กลับมีค่าน้อยที่สุดคือ 66.80 มิลลิกรัม Pb/กรัมถ่านกระดูก และเมื่อพีเอชต่ำ ปริมาณ H^+ ในสารละลายก็จะมาก อาจมีผลรบกวนกับการตกผลึก $Pb_{10}(PO_4)_6(Cl)_2$ ได้ ซึ่งจากการทดลองนี้ก็จะเห็นว่าร้อยละการกำจัดโดยถ่านกระดูกที่พีเอช 3 เท่ากับ 64.57 น้อยกว่าที่พีเอช 4 เท่ากับ 86.52 ซึ่งแสดงว่าพีเอชมีผลต่อการละลายและการเกิดผลึกแต่ละชนิด แสดงว่าที่พีเอช 4 ผลึก $Pb_{10}(PO_4)_6(Cl)_2$ (Chloropyromorphite) จะมีเสถียรภาพที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Crannell และคณะ(2000) และ Ma และคณะ (1994) ซึ่งได้กล่าวไปแล้วในขั้นตอนที่ 4.2.3

ดังนั้นพีเอช 4 เป็นพีเอชที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ศึกษาไอโซเทอมของตะกั่วในขั้นตอนต่อไป

4.3.2 นำเสียดังเคราะห์แคดเมียม

4.3.2.1 การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับศึกษาพีเอชที่เหมาะสมสำหรับแคดเมียม

โดยทำการทดลองแบบแบตช์

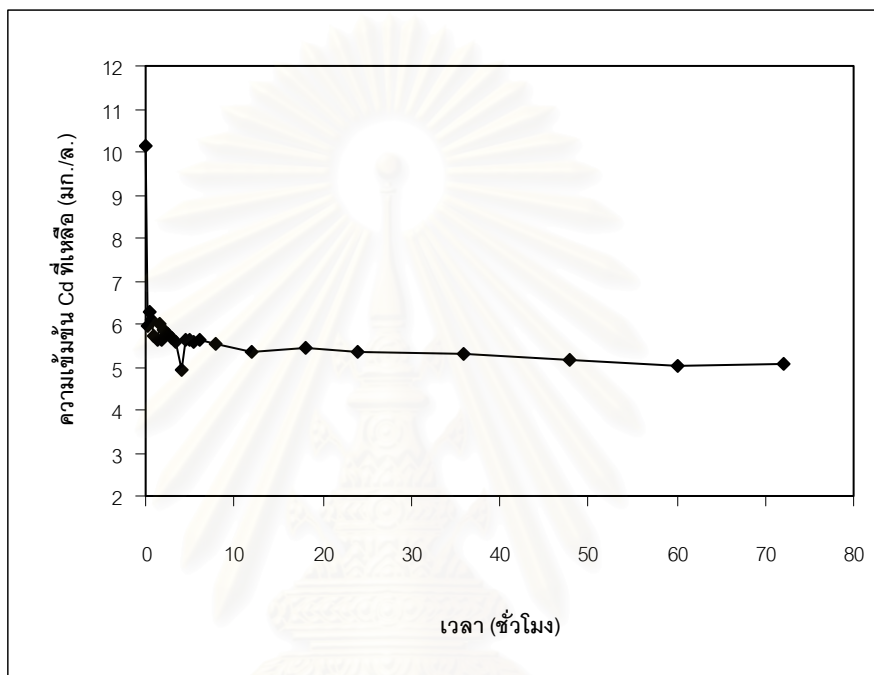
เริ่มการทดลอง โดยชั่งถ่านกระดูกจากสภาวะที่เลือกคือสัดส่วนซิงก์คลอไรด์ต่อกระดูกบดเป็น 1:1 ปริมาณ 0.5 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง ใส่ลงไปในน้ำเสียดังเคราะห์ตะกั่ว ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ที่พีเอช 6 เขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างที่เวลาต่างๆ จนครบ 72 ชั่วโมง แล้วนำน้ำตัวอย่างไปกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอนและนำไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันซึ่งผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. นำเสียดังเคราะห์แคดเมียมความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร

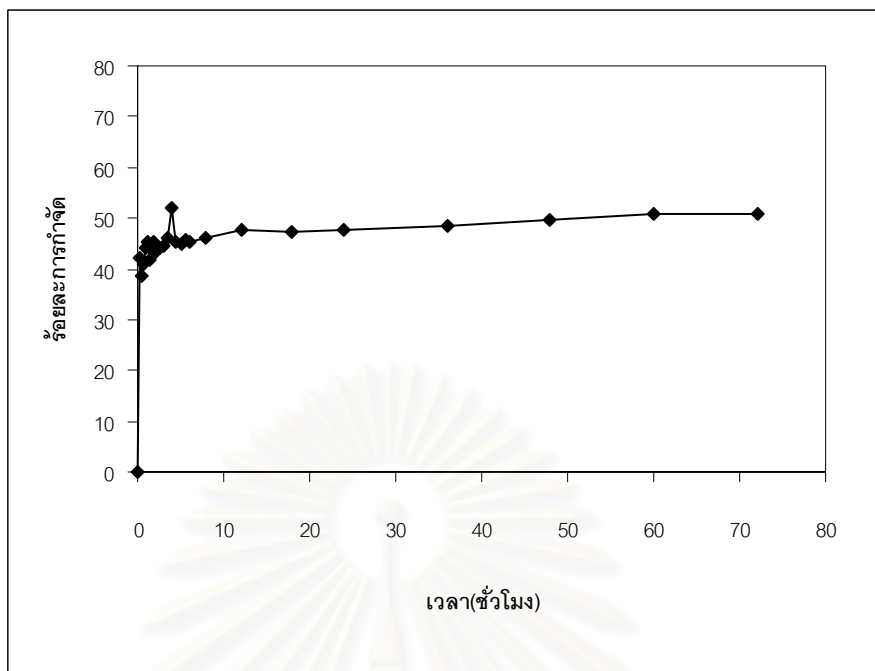
จากผลการทดลองพบว่าถ่านกระดูกสามารถกำจัดแคดเมียมได้ โดยพบว่าความเข้มข้นแคดเมียมลดลงจาก 10.28 มิลลิกรัม/ลิตร เหลือเพียง 5.96 มิลลิกรัม/ลิตร หรือคิดเป็นร้อยละในการกำจัด 42.02 ภายในเวลาเพียง 15 นาทีแรกเท่านั้น และกำจัดได้มากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 50.78 ที่เวลา 72 ชั่วโมง และเมื่อพิจารณาค่าพีเอชของน้ำ ก่อนและหลังการทดลอง พบว่ามีพีเอชสูงขึ้นเล็กน้อยคือจากพีเอชเริ่มต้น 6 เปลี่ยนเป็น 6.09 ที่เวลา 72 ชั่วโมง ซึ่งผลการทดลองเป็นไปตามภาคผนวก ก ตารางที่ ก-4 ดังแสดงในรูปที่ 4.27, 4.28 และ 4.29

จากผลการทดลองพบว่า ค่าความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของถ่านกระดูก(Removal capacity) สำหรับสภาวะที่ใช้ทดสอบนี้มีค่าอยู่ระหว่าง 7.98 ถึง 10.48 มิลลิกรัม Cd/กรัมถ่านกระดูก ดังนั้นจึงเลือกเวลาขณะสมดุลที่ 72 ชั่วโมง ไปทำการทดลองใน

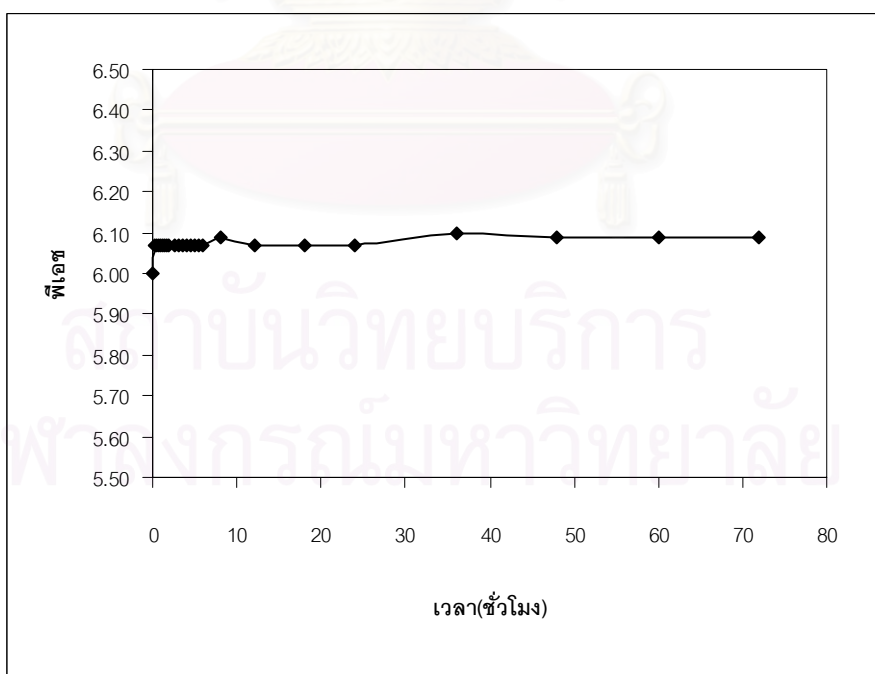
ขั้นตอนการหาพีเอชที่เหมาะสมสำหรับแคดเมียม โดยทำการทดลองแบบเบ็ดเสร็จต่อไป สำหรับผลการทดลองที่ 4.3.2.1 นี้จะพบว่าพีเอชเพิ่มขึ้นเนื่องจากขั้นตอนการละลายของผลึก $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{Cl})_2$, $\text{Ca}_{10-x}\text{Zn}_x(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ และ $\text{CaZn}_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ซึ่งจะเกิดขึ้นตลอดเวลาดังอธิบายไปแล้วในข้อ 4.3.1.1



รูปที่ 4.27 ความเข้มข้นของแคดเมียมที่เหลือในน้ำเสียดังเคราะห์เมื่อความเข้มข้นน้ำเสียดังแคดเมียมเริ่มต้น 10 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 6 ถ่านกระดูก 0.5 ก./ล. น้ำตัวอย่าง



รูปที่ 4.28 ร้อยละการกำจัดคลอรีนในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อความเข้มข้นน้ำเสียคลอรีนเริ่มต้น 10 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 6 ถ่านกระดูก 0.5 ก./ล. น้ำตัวอย่าง



รูปที่ 4.29 พีเอชน้ำเสียหลังการกำจัดคลอรีนในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อความเข้มข้นน้ำเสียคลอรีนเริ่มต้น 10 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 6 ถ่านกระดูก 0.5 ก./ล. น้ำตัวอย่าง

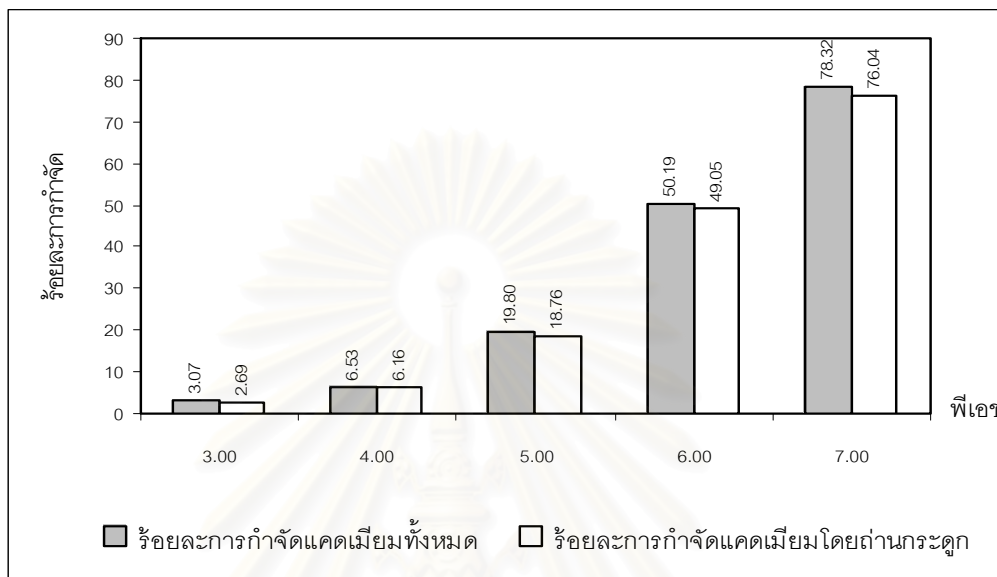
4.3.2.2 การหาพีเอชที่เหมาะสมสำหรับแคะเมียม โดยทำการทดลองแบบแบตช์

ทำการทดลองโดยชั่งถ่านกระดูกที่สภาวะการเตรียมที่เลือก คือสัดส่วน ซิงค์คลอไรด์ ต่อ กระดุกบด เป็น 1:1 ปริมาณ 0.5 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ แคะเมียมที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทดสอบที่พีเอช 3, 4, 5, 6 และ 7 แล้วนำไปเขย่า ด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง ขั้นตอนที่ 4.3.2.1 จากนั้นนำไปกรองด้วยกระดาษกรองเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมครอน แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันผลการทดลอง สามารถสรุปโดยเปรียบเทียบกับชุดควบคุม(ไม่เติมถ่านกระดูก)ได้ดังนี้

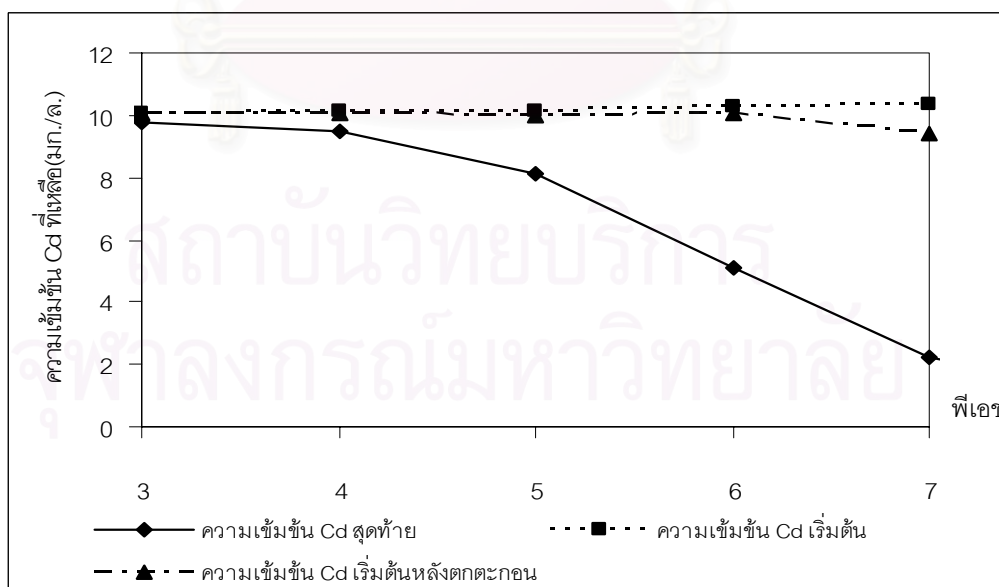
จากการทดลองพบว่าถ่านกระดูกมีประสิทธิภาพการกำจัดรวมสูงขึ้นจาก พีเอช 3 ถึง 7 เป็นลำดับ คือที่พีเอช 3 ให้ประสิทธิภาพการกำจัดรวมต่ำที่สุด คือสามารถกำจัดได้ ร้อยละ 3.07 และ ที่พีเอช 7 ให้ประสิทธิภาพการกำจัดรวมสูงสุด โดยคิดเป็นร้อยละ 78.32 สำหรับ พีเอช 4, 5 และ 6 ให้ประสิทธิภาพการกำจัดรวมโดยคิดเป็นร้อยละ 6.53, 19.80 และ 50.19 ตามลำดับ และพบว่าค่าความสามารถในการกำจัดแคะเมียมของถ่านกระดูก(Adsorption capacity) ที่พีเอช 3 ถึง 7 นั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 0.54 ถึง 14.28 มิลลิกรัมCd/กรัมถ่านกระดูก โดยค่า ความสามารถในการกำจัดมีแนวโน้มสูงขึ้นจากพีเอช 3 ถึง 7 เป็นลำดับ เช่นเดียวกับประสิทธิภาพ การกำจัดรวม คือที่พีเอช 3 ให้ค่าต่ำที่สุด และพีเอช 7 ให้ค่าสูงที่สุด ส่วนที่พีเอช 4, 5, 6 ให้ค่า ความสามารถในการกำจัดแคะเมียมของถ่านกระดูก(Adsorption capacity) เท่ากับ 1.24, 3.74, 9.84 มิลลิกรัมCd/กรัมถ่านกระดูกตามลำดับ ซึ่งหากคิดเป็นร้อยละที่กำจัดได้โดยถ่านกระดูกเท่านั้นที่ พีเอช 3 ถึง 7 ค่าร้อยละที่กำจัดได้คือ 2.67, 6.13, 18.51, 47.95 และ 68.78 ตามลำดับ ข้อมูล แสดงดังภาคผนวก ก ตาราง ก-5 และรูปที่ 4.30, 4.31, 4.32 จะสังเกตว่าค่าร้อยละการกำจัดรวมมีค่า มากกว่าร้อยละการกำจัดโดยถ่านกระดูก ดังนั้นแสดงว่ามีการตกตะกอนของแคะเมียมเกิดขึ้น ซึ่งค่า ร้อยละของแคะเมียมที่ตกตะกอนสามารถคำนวณได้จากชุดควบคุม(Blank) ซึ่งไม่เติมถ่านกระดูก โดยค่าร้อยละการตกตะกอนของแคะเมียมที่เกิดขึ้นที่พีเอช 3 ถึง 7 คือ 0.40, 0.40, 1.29, 2.24 และ 9.54 ตามลำดับ จะสังเกตว่าแคะเมียมจะตกตะกอนมากขึ้นเมื่อพีเอชสูงขึ้นเช่นเดียวกับตะกั่ว เนื่องจากเมื่อพีเอชสูงขึ้นการตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์ก็จะมากขึ้นตามโดยช่วงของพีเอช ที่สามารถตกตะกอนได้ตามทฤษฎีก็จะแตกต่างกันไปตามแต่นิกของโลหะหนัก ดังรูปที่ 2.1

จากการทดสอบถ่านหลังการกำจัดแคะเมียมด้วยXRD ไม่พบฟิสิกที่เด่นชัด ของสารประกอบแคะเมียมชนิดใดเกิดขึ้น ซึ่งตรงกันกับงานวิจัยของอุบลรัตน์(2544) และ ศุภกิจ(2545) ดังนั้นกลไกการกำจัดจึงไม่ใช่การละลายและตกผลึก แต่ควรเป็นการดูดติดผิวและติดข้างใน รูพรุน ซึ่งการที่พีเอชต่ำ H^+ อาจมีผลรบกวนต่อการดูดติดผิวได้ พบว่าการเพิ่มของพีเอชเป็น 7 ทำ

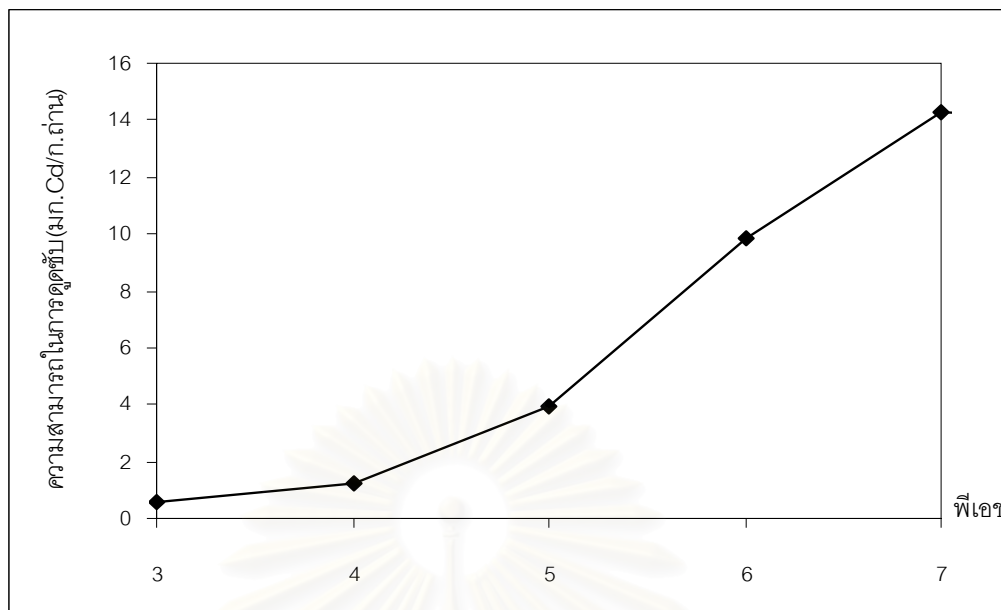
ให้พีเอชหลังการดูดคิดเพิ่มขึ้นน้อยลง เนื่องจากการที่ผลึกละลายได้น้อยลงนั่นเอง และยังส่งผลให้แคดเมียมสามารถที่จะดูดคิดผิวได้มากขึ้นเนื่องจากอิออนต่างๆ ซึ่งอาจรบกวนกลไกการดูดคิดได้ในน้ำเสียน้อยลง



รูปที่ 4.30 ร้อยละการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียน้ำสังเคราะห์ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ 0.5 ก./ล. ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มก./ล. ที่พีเอช 3 ถึง 7



รูปที่ 4.31 ความเข้มข้นของแคดเมียมที่เหลือในน้ำเสียน้ำสังเคราะห์เมื่อกำจัดด้วยถ่านกระดูกปริมาณ 0.5 ก./ล. ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มก./ล. ที่พีเอช 3 ถึง 7



รูปที่ 4.32 ความสามารถในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกระดุก ปริมาณ 0.5 ก./ล. ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มก./ล. ที่พีเอช 3 ถึง 7

ดังนั้นพีเอช 7 เป็นพีเอชที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ศึกษาไอโซเทอมของ แคดเมียมในขั้นต่อไป

4.4 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในการกำจัดโลหะหนัก โดยทำการทดลองแบบเบตซ์

ไอโซเทอมการดูดซับ เป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายที่มีผลต่อการดูดซับของตัวดูดซับ(Adsorbent) ซึ่งในระหว่างที่การดูดซับกำลังดำเนินอยู่นั้น ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ก็ยังสามารถที่จะหลุดออกจากการดูดซับได้ ซึ่งจะทำให้ความเข้มข้นของสารละลายเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา จนกระทั่งระบบเข้าสู่สมดุล ซึ่งเป็นสถานะที่การดูดซับและการหลุดออกจากการดูดซับเกิดขึ้นในอัตราที่เท่ากัน ส่งผลให้ความเข้มข้นในสารละลายในระบบคงที่ ดังนั้นการหาสมการการดูดซับ(Adsorbition Isotherm) จำเป็นที่จะต้องทำการทดลองจนกระทั่งระบบเข้าสู่สมดุลก่อน จากนั้นจึงสามารถที่จะนำค่าความเข้มข้นที่เหลือมาคำนวณหาสมการการดูดซับได้

4.4.1 น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว

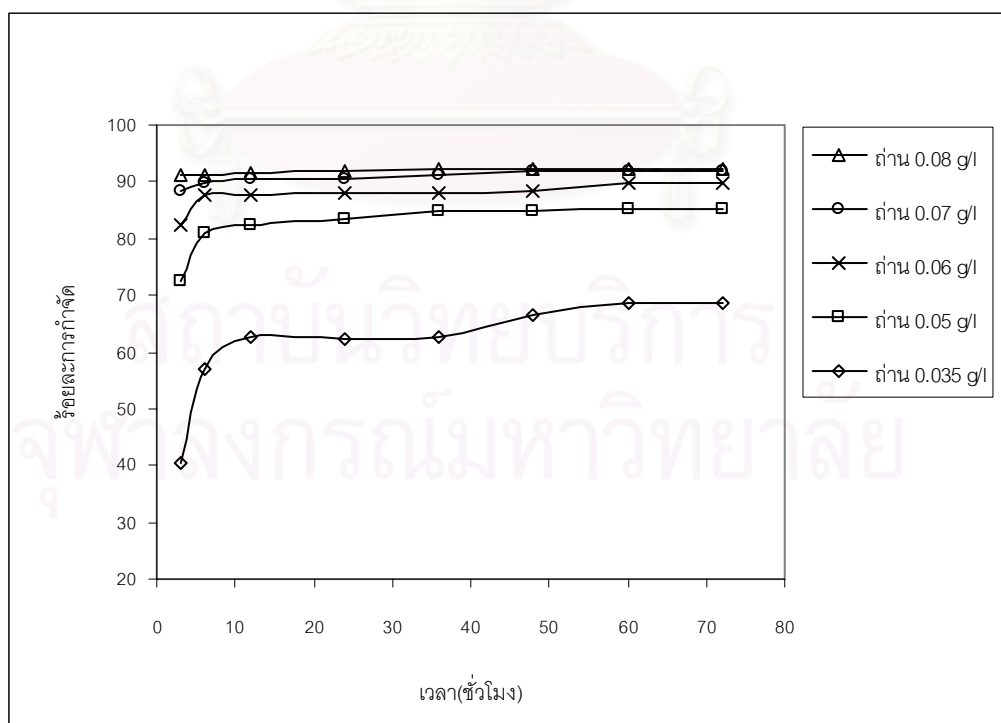
4.4.1.1 การหาสมการไอโซเทอมสำหรับตะกั่ว โดยทำการทดลองแบบแบตช์

ทำการทดลองโดยใช้ถ่านกระดูกจากสภาวะการเตรียมที่เลือกคือ สัดส่วนซิงค์คลอไรด์ ต่อ กระดุกบด เป็น 1:1 ปริมาณ 0, 0.035, 0.05, 0.06, 0.07 และ 0.08 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง เติมน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 4 ซึ่งให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดที่ได้จากการทดลองขั้นตอนที่ 4.3.1.2 จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาทีจนถึง 72 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลานำไปกรองด้วยกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน แล้วจึงนำไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชัน ซึ่งข้อมูลความเข้มข้นที่เหลือ ณ เวลาต่างๆ ของแต่ละปริมาณถ่าน แสดงดังภาคผนวก ข ตารางที่ ข-1 ถึง ข-5 และผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.33-4.36

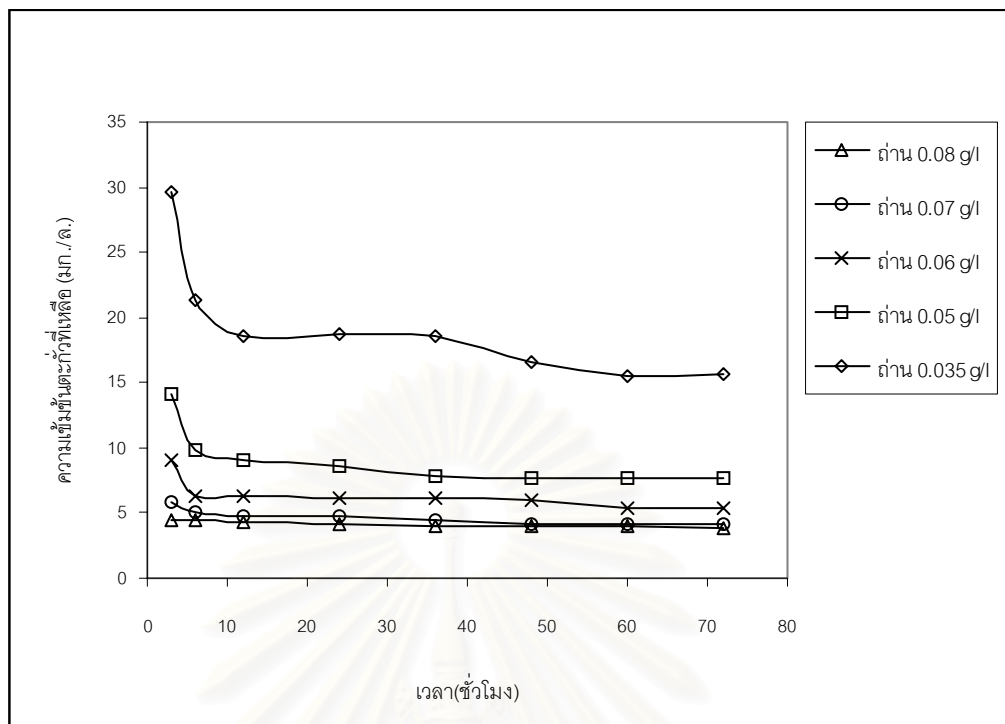
จากผลการทดลองพบว่าถ่านปริมาณ 0.08 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง เข้าสู่สมดุลเร็วที่สุดคือใช้เวลา 36 ชั่วโมง และสำหรับถ่านปริมาณ 0.07, 0.06, 0.05 และ 0.035 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง ระบบสามารถเข้าสู่สมดุลได้ภายใน 48, 60, 60 และ 60 ชั่วโมงตามลำดับ โดยพบว่าร้อยละการกำจัดจะเพิ่มมากขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน และค่าร้อยละในการกำจัดตะกั่วทั้งหมดที่สมดุลเมื่อใช้ถ่านปริมาณ 0.035, 0.05, 0.06, 0.07 และ 0.08 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง มีค่าเท่ากับ 68.57, 85.18, 89.61, 91.84 และ 92.30 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.33 จะเห็นว่าเมื่อปริมาณถ่าน/ลิตรน้ำตัวอย่างมากขึ้น จะส่งผลให้ระบบเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้น ร้อยละการกำจัดเพิ่มขึ้นเนื่องจากตัวดูดซับมีปริมาณมากขึ้น ตะกั่วถูกกำจัดได้เร็วจึงเข้าสู่สมดุลเร็วกว่า ดังนั้นสรุปได้ว่าระยะเวลาเข้าสู่สมดุลจะเร็วมากขึ้นและร้อยละการกำจัดจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณถ่านที่ใช้เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.35 พบว่าความสามารถในการกำจัดตะกั่วทั้งหมด(มก.Pb/ก.ถ่าน)จะเพิ่มมากขึ้นตามเวลาการกำจัดที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่เวลาสัมผัสเดียวกันความสามารถในการกำจัดตะกั่วทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณถ่านลดลง โดยค่าความสามารถในการกำจัดตะกั่วทั้งหมดที่สมดุล(Removal Capacity) สำหรับถ่านปริมาณ 0.035, 0.05, 0.06, 0.07 และ 0.08 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง มีค่าเท่ากับ 972, 875.60, 767.67, 665.86 และ 585.50 มก.Pb/ก.ถ่าน ตามลำดับ จากการทดลองยังพบว่าค่าพีเอชหลังการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาที่เวลาสัมผัสเดียวกันก็จะพบว่าเมื่อใช้ถ่านปริมาณมากขึ้น ค่าพีเอชหลังการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน

ดังนั้นเมื่อทราบความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือ ณ สมดุลของถ่านปริมาณต่างๆ แล้ว สามารถพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการกำจัดตะกั่วโดยถ่านกระดูกกับปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ ณ สมดุลได้ดังแสดงในรูปที่ 4.37 ซึ่งพบว่าค่าความสามารถใน

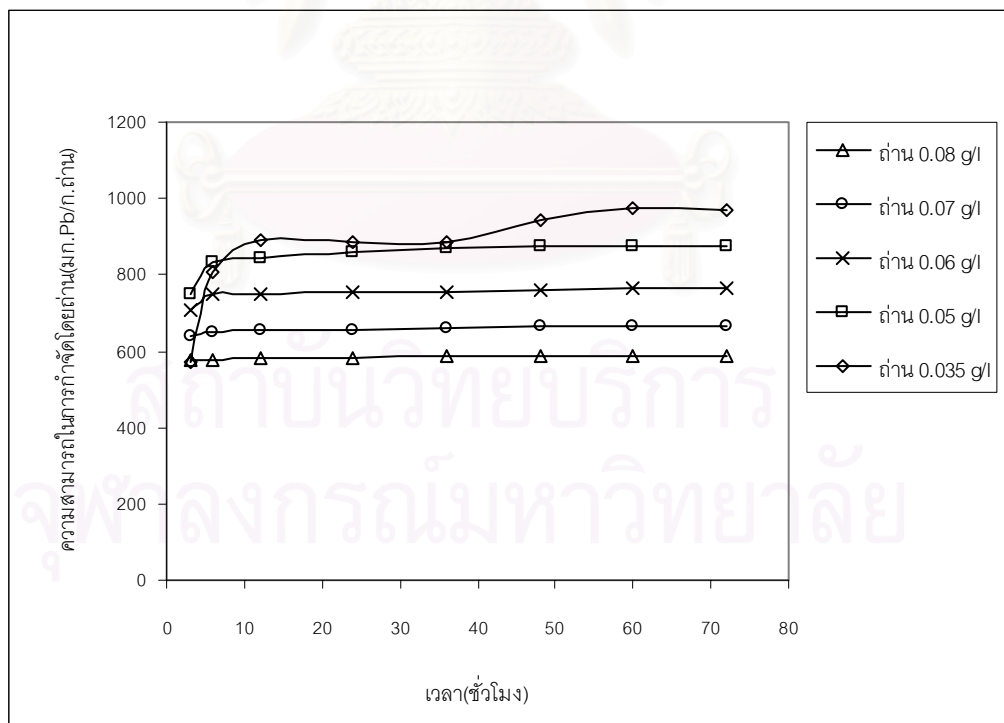
การกำจัดตะกั่วโดยถ่านกระดุกมากที่สุดถึง 963.14 มก.Pb/ก.ถ่าน และยังมีแนวโน้มที่อาจจะเพิ่มขึ้นอีกได้ และเมื่อพิจารณาผลการทดลองโดยอธิบายด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ไอโซเทอม 2 แบบคือ ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชและแบบแลงมัวร์ ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.38 และ 4.39 ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังภาคผนวก ข ตารางที่ ข-6 พบว่าค่า R^2 ของไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชและแบบแลงมัวร์มีค่าเท่ากับ 0.8556 และ 0.9150 ตามลำดับ โดยสมการไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชแสดงดังนี้ $\log(x/m) = 0.3327 \log C + 2.6103$ และสมการไอโซเทอมแบบแลงมัวร์แสดงดังนี้ $1/(x/m) = 0.0033 (1/C) + 0.0008$ จากผลการวิเคราะห์สมการไอโซเทอมพบว่า สมการแบบแลงมัวร์มีความเหมาะสมที่จะนำมาเป็นตัวแทนในการทำนายกลไกการกำจัดตะกั่วมากกว่าสมการแบบฟรุนดลิช เนื่องจาก R^2 มีค่ามากกว่า ซึ่งจากผลการวิเคราะห์โดยสมการไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชพบว่าให้ค่าความสามารถในการกำจัดตะกั่วโดยถ่านกระดุกมากที่สุดถึง 1,002.00 มก.Pb/ก.ถ่าน และยังพบว่ายังมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ ศุภกิจ(2545) โดยได้ศึกษาการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมโดยถ่านกระดุก ซึ่งเผาที่อุณหภูมิต่างๆ โดยมีความเหมาะสมกับไอโซเทอมแบบแลงมัวร์เช่นกันซึ่งค่า R^2 เท่ากับ 0.8976 จะเห็นว่าค่า R^2 ที่ได้จากงานวิจัยนี้ และของศุภกิจ(2545)มีค่าไม่สูงมากนักเนื่องจากกลไกการกำจัดเป็นแบบละลายและตกตะกอน(Dissolution and precipitation) มากกว่าการดูดซับซึ่งจากการตรวจสอบตะกอนหลังการกำจัดพบว่าสีของถ่านจะไม่เป็นสีดำเข้มเช่นเดิมโดยจะเป็นสีเทามากขึ้น และพบคราบตะกอนสีขาวเกิดขึ้นเล็กน้อยบริเวณขอบขามระเหย ซึ่ง



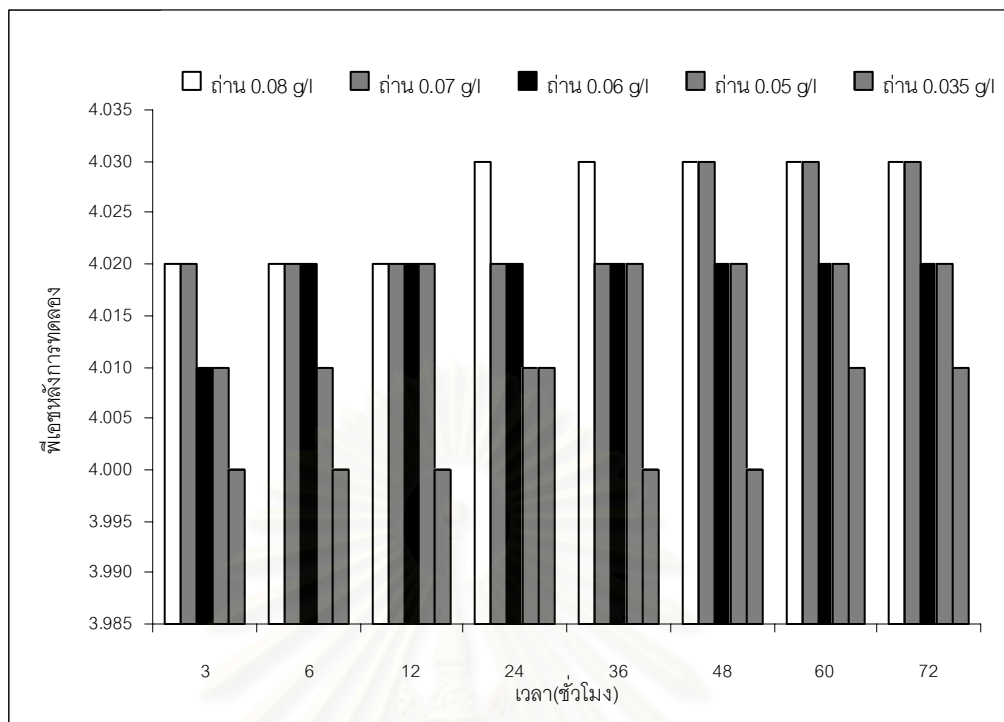
รูปที่ 4.33 ร้อยละการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ถ่านกระดุกปริมาณต่างๆ



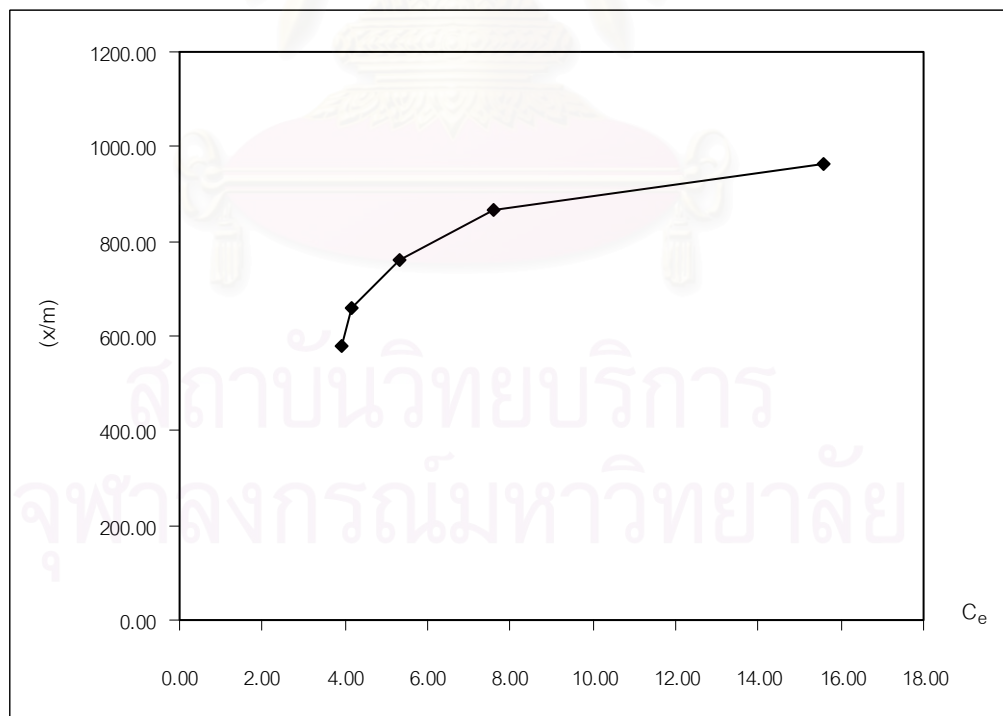
รูปที่ 4.34 ความเข้มข้นตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์จากการกำจัดด้วยถ่านกระตุ้นปริมาณต่างๆ



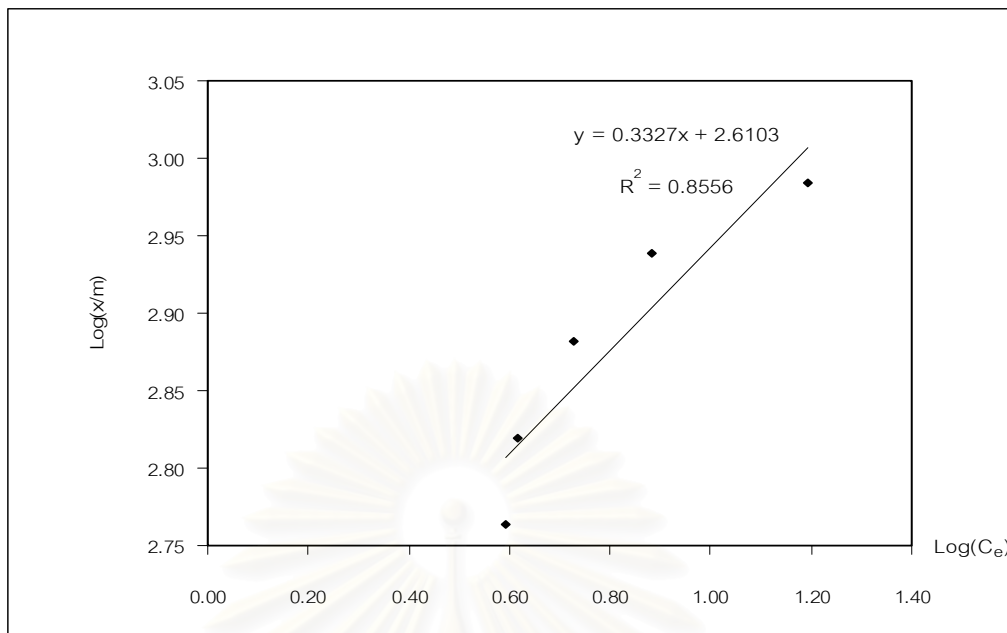
รูปที่ 4.35 ความสามารถในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ถ่านกระตุ้นปริมาณต่างๆ



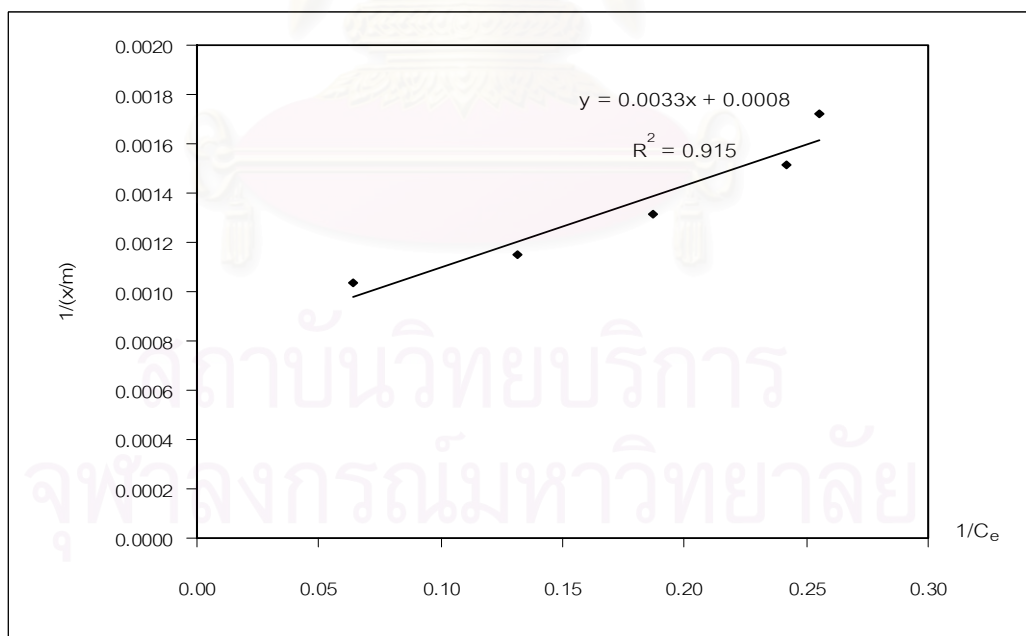
รูปที่ 4.36 พีเอชหลังการทดลอง หลังจากการกำจัดตะกั่วด้วยถ่านกระดุกปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการกำจัดตะกั่วโดยถ่านกระดุกกับปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ ณ สมดุล



รูปที่ 4.38 ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วแบบฟรุนดลิชของถ่านกระดูกที่เตรียมจากสั้ดส่วน ซิงก์คลอไรด์ ต่อ กระดูกบด เป็น 1:1 ที่พีเอช 4 และความเข้มข้นตะกั่ว 50 มิลลิกรัม/ลิตร



รูปที่ 4.39 ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วแบบแลงมัวร์ของถ่านกระดูกที่เตรียมจากสั้ดส่วน ซิงก์คลอไรด์ ต่อ กระดูกบด เป็น 1:1 ที่พีเอช 4 และความเข้มข้นตะกั่ว 50 มิลลิกรัม/ลิตร

อาจเป็นไปได้ที่จะเป็นตะกอนรูปแบบหนึ่งของ Zn เนื่องจากผลวิเคราะห์ XRD พบว่าผลึกหลังการดูดซับเกิดเป็น $Pb_{10}(PO_4)_6(Cl)_2$

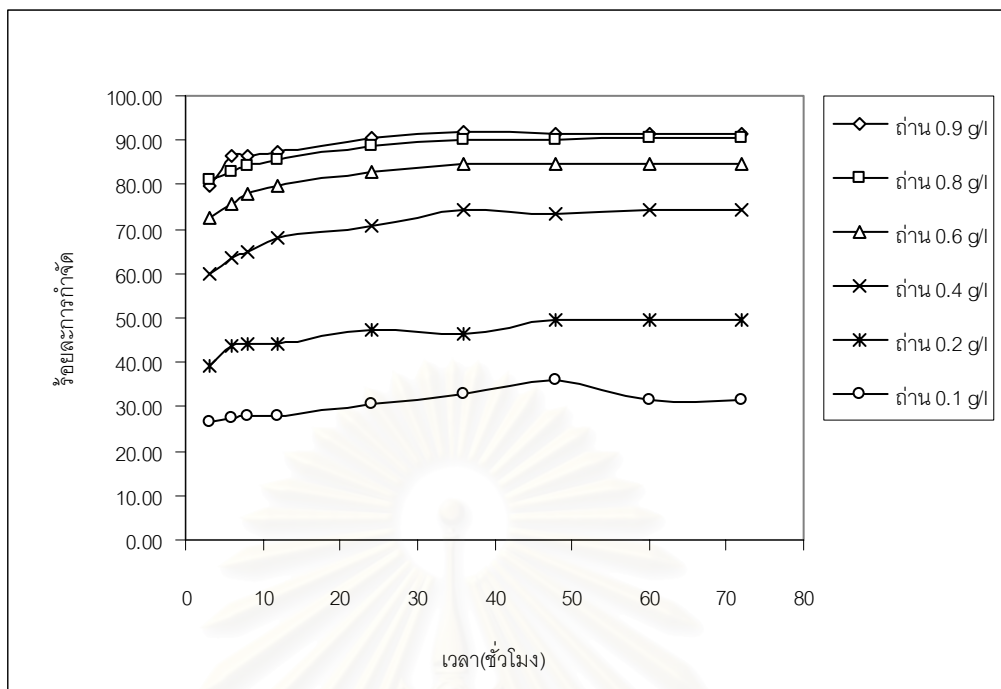
4.4.2 นำเสียดังเคราะห์แคดเมียม

4.4.2.1 การหาสมการไอโซเทอมสำหรับแคดเมียม โดยทำการทดลองแบบแบตช์

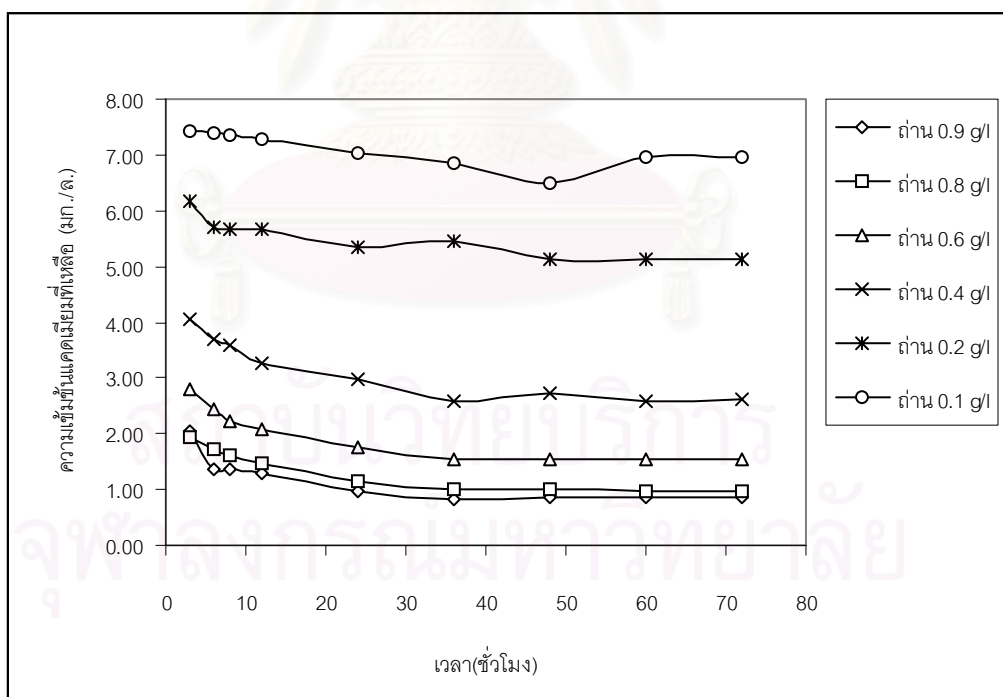
ทำการทดลองโดยใช้ถ่านกระดูกจากสภาวะการเตรียมที่เลือกคือ สัดส่วน ซิงค์คลอไรด์ ต่อ กระดุกบด เป็น 1:1 ปริมาณ 0, 0.9, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2 และ 0.1 กรัมต่อลิตรน้ำ ตัวอย่าง เติมน้ำเสียดังเคราะห์แคดเมียมความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 7 ซึ่งให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดที่ได้จากการทดลองขั้นตอนที่ 4.3.2.2 จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาทีจนถึง 72 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลานำไปกรองด้วยกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน แล้วจึงนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชัน ซึ่งข้อมูลความเข้มข้นที่เหลือ ณ เวลาต่างๆ ของแต่ละปริมาณถ่านแสดงดังภาคผนวก ข ตารางที่ ข-7 ถึง ข-12 และผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.40-4.43

จากผลการทดลองพบว่าถ่านปริมาณ 0.9, 0.8 และ 0.6 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง เข้าสู่สมดุลที่เวลา 36 ชั่วโมง และสำหรับถ่านปริมาณ 0.4, 0.2 และ 0.1 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง ระบบสามารถเข้าสู่สมดุลได้ภายใน 60 ชั่วโมง โดยพบว่าร้อยละการกำจัดจะเพิ่มมากขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน และค่าร้อยละในการกำจัดแคดเมียมทั้งหมดที่สมดุลโดยถ่านปริมาณ 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 0.9 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง มีค่าเท่ากับ 31.59, 49.51, 74.31, 84.65, 90.35 และ 91.63 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.40 จะเห็นว่าเมื่อปริมาณถ่าน/ลิตรน้ำตัวอย่างมากขึ้น จะส่งผลให้ระบบเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้น และค่าร้อยละการกำจัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวดูดซับมีปริมาณมากขึ้น แคดเมียมจึงถูกกำจัดได้เร็วส่งผลให้เข้าสู่สมดุลเร็ว จากรูปที่ 4.42 พบว่าความสามารถในการกำจัดแคดเมียมทั้งหมด(มก.Cd/ก.ถ่าน) จะเพิ่มมากขึ้นตามเวลาการกำจัดที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่เวลาสัมผัสเดียวกันความสามารถในการกำจัดแคดเมียมทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณถ่านลดลง โดยค่าความสามารถในการกำจัดแคดเมียมทั้งหมดที่สมดุล(Removal capacity)เมื่อใช้ถ่านปริมาณ 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 0.9 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง มีค่าเท่ากับ 32.10, 25.15, 18.88, 14.33, 11.48 และ 10.34 มก.Cd/ก.ถ่าน ตามลำดับ จากการทดลองยังพบว่าค่าพีเอชหลังการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาที่เวลาสัมผัสเดียวกันก็จะพบว่าเมื่อใช้ถ่านปริมาณมากขึ้น ค่าพีเอชหลังการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน

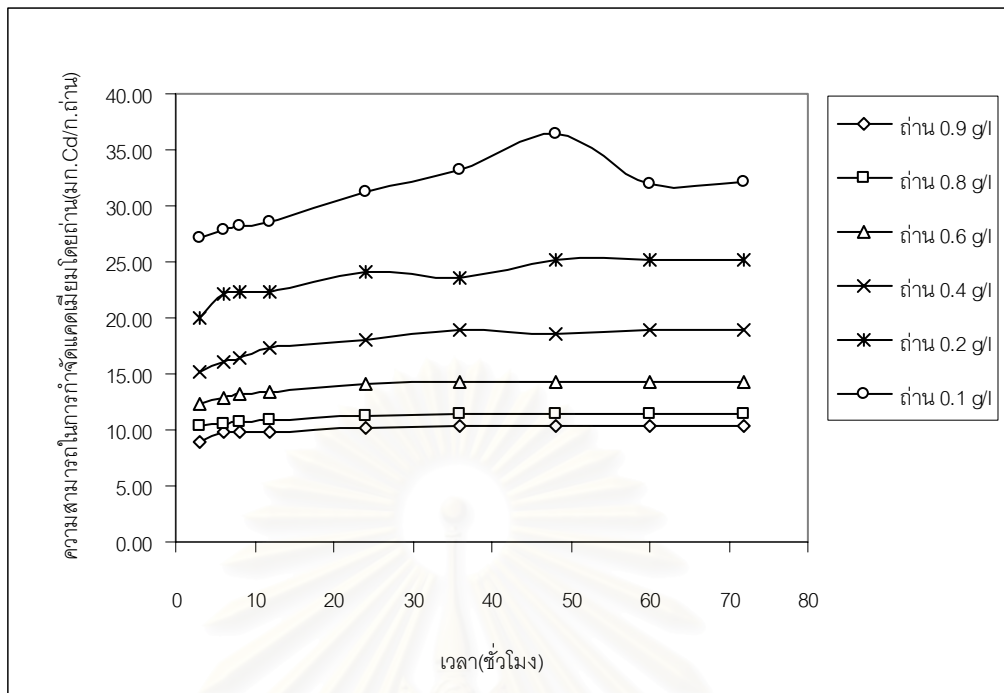
ดังนั้นเมื่อทราบความเข้มข้นของแคดเมียมที่เหลือ ณ สมดุลของถ่าน ปริมาณต่างๆ แล้ว สามารถพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการกำจัดแคดเมียม โดยถ่านกระดุกและปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ ณ สมดุลได้ดังแสดงในรูปที่ 4.44 ซึ่งพบว่าค่าความสามารถในการกำจัดแคดเมียมโดยถ่านกระดุกมากที่สุดถึง 22.80 มก.Cd/ก.ถ่าน และยังมีแนวโน้มที่อาจจะเพิ่มขึ้นอีกได้ และเมื่อพิจารณาผลการทดลองโดยอธิบายด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ไอโซเทอม 2 แบบคือไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชและแบบแลงมัวร์ ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.45 และ 4.46 ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังภาคผนวก ข ตารางที่ ข-13 พบว่าค่า R^2 ของไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชและแบบแลงมัวร์มีค่าเท่ากับ 0.9897 และ 0.9963 ตามลำดับ โดยสมการไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชแสดงดังนี้ $\log(x/m) = 0.4209 \log C + 1.0168$ และสมการไอโซเทอมแบบแลงมัวร์แสดงดังนี้ $1/(x/m) = 0.0602 (1/C) + 0.0369$ จากผลการวิเคราะห์สมการไอโซเทอมพบว่า สมการแบบแลงมัวร์มีความเหมาะสมที่จะนำมาเป็นตัวแทนในการทำนายกลไกการกำจัดแคดเมียมมากกว่าสมการแบบฟรุนดลิช เนื่องจาก R^2 มีค่ามากกว่า ซึ่งจากผลการวิเคราะห์โดยสมการไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชพบว่าให้ค่าความสามารถในการกำจัดแคดเมียมโดยถ่านกระดุกมากที่สุดถึง 22.06 มก.Pb/ก.ถ่าน และยังพบว่ายังมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของอุบลรัตน์(2544) และ ศุภกิจ(2546) โดยทั้งสองงานวิจัยได้ศึกษาการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมโดยถ่านกระดุกซึ่งเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งพบว่ามีความเหมาะสมกับไอโซเทอมแบบแลงมัวร์เช่นกันกับงานวิจัยนี้ โดยค่า R^2 เท่ากับ 0.9968 และ 0.9937 ตามลำดับ จะเห็นว่าค่า R^2 ที่ได้จากงานวิจัยนี้และทั้งสองงานวิจัยดังกล่าวมีค่าสูงมาก เมื่อเทียบกับค่า R^2 ที่ได้จากการทดสอบน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วของอุบลรัตน์(2544), ศุภกิจ(2545) และงานวิจัยนี้ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.7691, 0.8976 และ 0.915 ตามลำดับ เนื่องจากกลไกการกำจัดเป็นแบบการดูดซับ ซึ่งสอดคล้องกับข้อสรุปของ Chen et al. (1997) ดังกล่าวไปตอนต้นแล้วว่ากลไกที่ใช้กำจัด Cd^{2+} จากสารละลายที่เป็นของเหลวคือกลไกการดูดติดผิว(Sorption mechanism) ซึ่งจากการตรวจสอบตะกอนหลังการกำจัดพบว่า สีของถ่านจะยังคงเป็นสีดำเข้มเช่นเดิมและไม่พบคราบตะกอนสีขาวเกิดขึ้นบริเวณขอบขามระเหยดังเช่นน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว



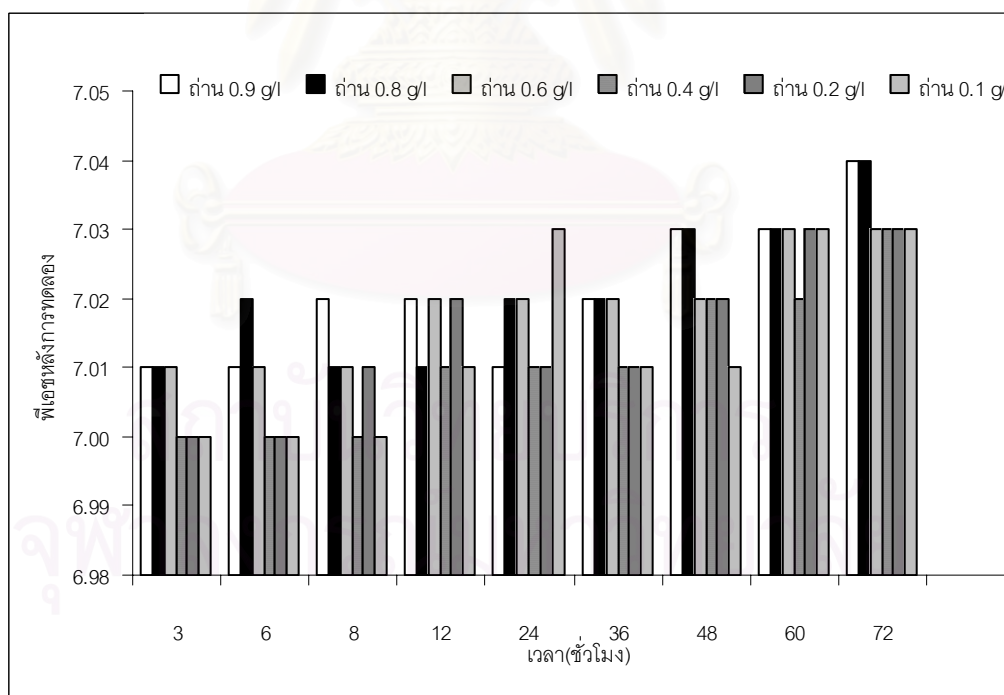
รูปที่ 4.40 ร้อยละการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ถ่านกระตุ้นปริมาณต่างๆ



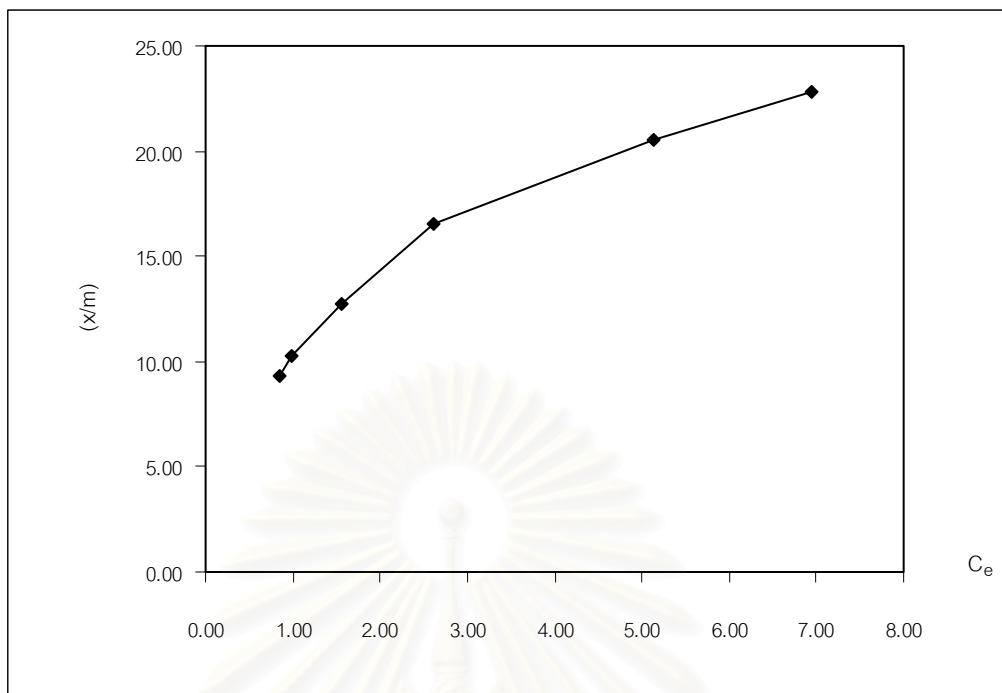
รูปที่ 4.41 ความเข้มข้นแคดเมียมที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์จากการกำจัดด้วยถ่านกระตุ้นปริมาณต่างๆ



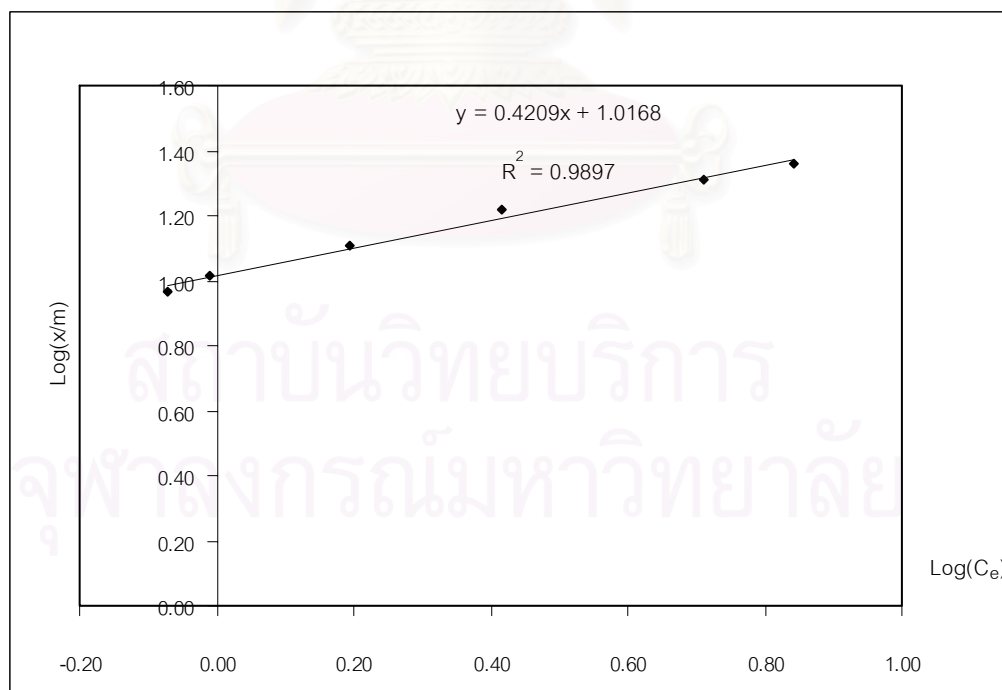
รูปที่ 4.42 ความสามารถในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ถ่านกระดูกปริมาณต่างๆ



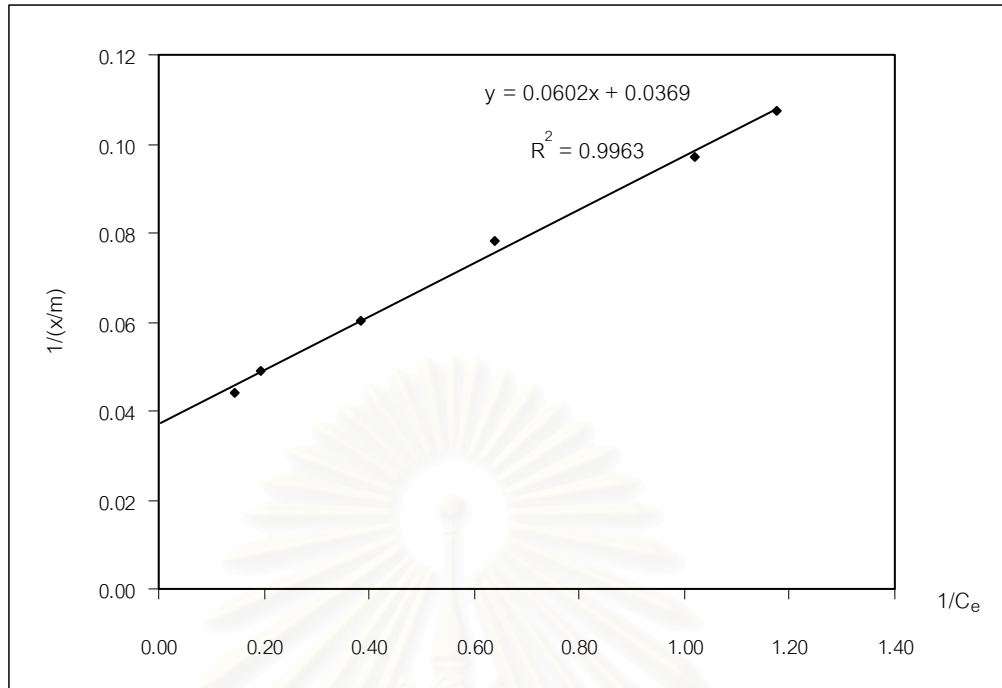
รูปที่ 4.43 ฟิเออร์หลังการทดลอง หลังจากการกำจัดแคดเมียมด้วยถ่านกระดูกปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการกำจัดแคดเมียมโดยถ่านกระดุกและปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ ณ สมดุล



รูปที่ 4.45 ไอโซเทอมการดูดซับแคดเมียมแบบฟรอนดลิชของถ่านกระดุกที่เตรียมจากสัสด่วนซิงก์คลอไรด์ ต่อ กระดุกบดเป็น 1:1 ที่พีเอช 7 และความเข้มข้นแคดเมียม 10 มิลลิกรัม/ลิตร

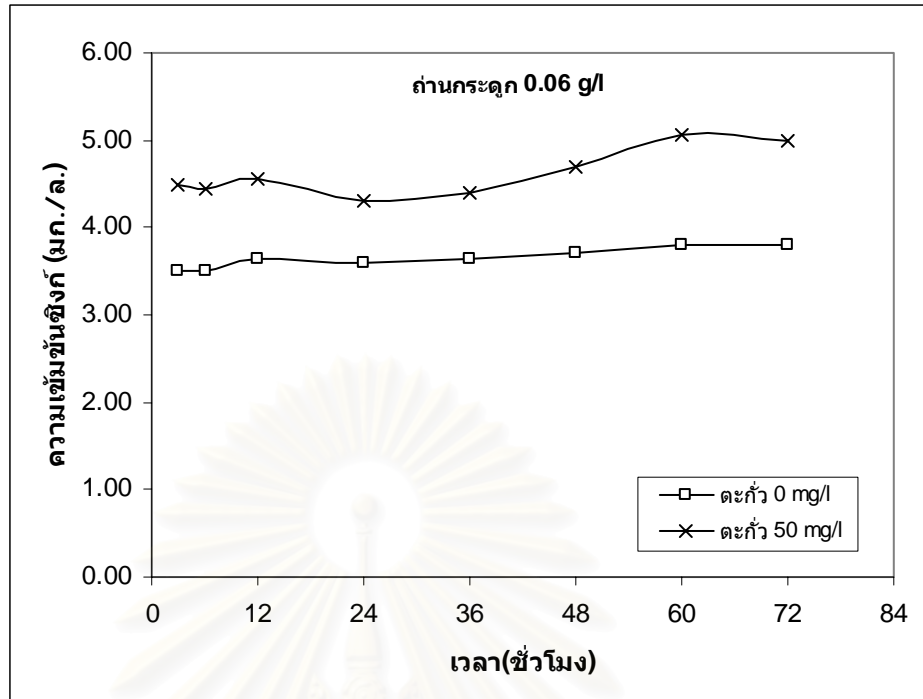


รูปที่ 4.46 ไอโซเทอมการดูดซับแคดเมียมแบบแลงมัวร์ของถ่านกระดูก ที่เตรียมจากสัดส่วน ซิงค์คลอไรด์ ต่อ กระดุกบดเป็น 1:1 ที่พีเอช 7 และความเข้มข้นแคดเมียม 10 มิลลิกรัม/ลิตร

4.4.3 การทดสอบการละลายของซิงค์จากถ่านกระดูกในน้ำเสียดังเคราะห์

4.4.3.1 น้ำเสียดังเคราะห์ตะกั่ว

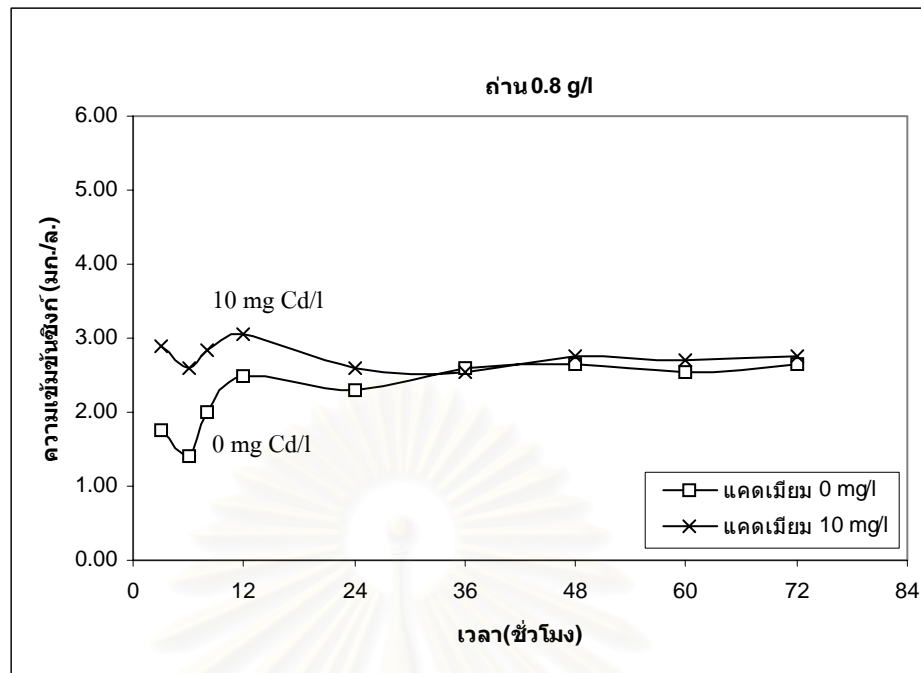
ทำการทดลองโดยใช้สภาวะเดียวกับที่ใช้ทดสอบหาสมการไอโซเทอมของตะกั่ว โดยเลือกใช้ถ่านกระดูกจากสภาวะการเตรียมที่เลือกคือ สัดส่วนซิงค์คลอไรด์ต่อกระดุกบด เป็น 1:1 ปริมาณ 0.06 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง เดิมน้ำเสียดังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 0 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 4 จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาทีจนถึง 72 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลานำไปกรองด้วยกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน แล้วจึงนำไปวิเคราะห์หาปริมาณซิงค์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชัน ซึ่งข้อมูลความเข้มข้น ณ เวลาต่างๆ แสดงดังภาคผนวก ข ตารางที่ ข-14 และผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.47



รูปที่ 4.47 ความเข้มข้นซิงก์จากถ่านกระดูกในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 4 ความเข้มข้น ตะกั่ว 0 และ 50 มิลลิกรัม/ลิตร

4.4.3.2 น้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียม

ทำการทดลองโดยใช้สภาวะเดียวกับที่ใช้ทดสอบหาสมการไอโซเทอมของแคดเมียม โดยเลือกใช้ถ่านกระดูกจากสภาวะการเตรียมที่เลือกคือ สัดส่วนซิงก์คลอไรด์ต่อกระดูกบด เป็น 1:1 ปริมาณ 0.8 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง เติมน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมความเข้มข้น 0 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 7 จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาทีจนถึง 72 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลานำไปกรองด้วยกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน แล้วจึงนำไปวิเคราะห์หาปริมาณซิงก์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชัน ซึ่งข้อมูลความเข้มข้น ณ เวลาต่างๆ แสดงดังภาคผนวก ข ตารางที่ ข-15 และผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.48



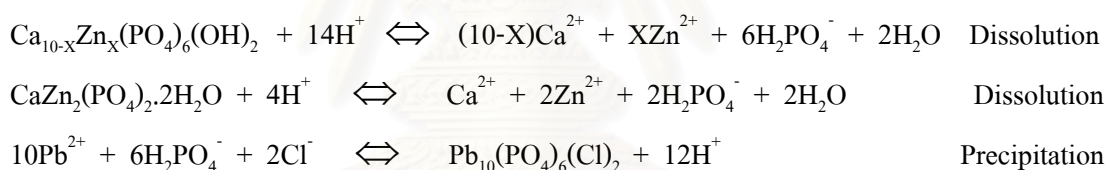
รูปที่ 4.48 ความเข้มข้นซิงก์จากถ่านกระดูกในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 7 ความเข้มข้นแคดเมียม 0 และ 10 มิลลิกรัม/ลิตร

จากการทดลองขั้นตอนที่ 4.4.3.1 จะเห็นว่าเมื่อใช้ถ่านปริมาณ 0.06 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง ทดสอบที่พีเอชเท่ากับ 4 จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที จนถึง 72 ชั่วโมง และน้ำเสียสังเคราะห์ไม่มีตะกั่ว ความเข้มข้นของซิงก์ที่ละลายออกมาค่อนข้างคงที่โดยอยู่ในช่วง 3.5–3.8 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งน้อยกว่าในสถานะเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีตะกั่ว 50 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถวัดความเข้มข้นของซิงก์ที่ละลายออกมาได้ซึ่งอยู่ในช่วง 4.5 – 5.0 มิลลิกรัม/ลิตร แสดงว่าผลึก $\text{Ca}_{10-x}\text{Zn}_x(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ และ $\text{CaZn}_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ซึ่งเป็นองค์ประกอบในกระดูกเกิดการละลายตามสมมุติฐานซึ่งได้กล่าวไว้ในขั้นตอนที่ 4.2.3

จากการทดลองขั้นตอนที่ 4.4.3.2 จะเห็นว่าเมื่อใช้ถ่านปริมาณ 0.8 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง ทดสอบที่พีเอชเท่ากับ 7 จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาทีจนถึง 72 ชั่วโมง และน้ำเสียสังเคราะห์ไม่มีแคดเมียม ความเข้มข้นของซิงก์ที่ละลายออกมาค่อนข้างคงที่ ที่เวลา 36 ชั่วโมงโดยความเข้มข้นทั้งหมดอยู่ในช่วง 1.4 – 2.65 มิลลิกรัม/ลิตร จะเห็นว่าในช่วงเวลาก่อน 36 ชั่วโมง ความเข้มข้นซิงก์ที่พบจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วใน 12 ชั่วโมงแรก แล้วค่อยๆ คงที่มากขึ้น สำหรับสถานะเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีแคดเมียม 10 มิลลิกรัม/ลิตร ความเข้มข้นของซิงก์ที่ละลายออกมาอยู่ในช่วง 2.60 – 2.90 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งจะเห็นว่าซิงก์ที่ละลายออกมาค่อนข้างคงที่ ที่เวลา 36 ชั่วโมง เช่นเดียวกับสถานะที่ในน้ำเสียสังเคราะห์ไม่มี

แคดเมียม และ จะสังเกตว่า 12 ชั่วโมงแรกของการทดสอบ แคดเมียมมีผลรบกวนสมดุลการละลายกลับของผลึก $\text{Ca}_{10-x}\text{Zn}_x(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, $\text{CaZn}_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ เนื่องจากจะเห็นว่าความเข้มข้นซิงก์ในสภาวะที่มีแคดเมียม จะมากกว่าในสภาวะที่ไม่มีแคดเมียมในน้ำเสีย เมื่อระบบเริ่มเข้าสู่สมดุลประมาณ 36 ชั่วโมง จะเห็นว่าซิงก์ที่ละลายออกมาจากทั้งสองสภาวะจะมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นสรุปได้ว่าการมีแคดเมียมอยู่ในน้ำเสียไม่มีผลกับการละลายของซิงก์ ณ.สมดุล เพียงแต่สามารถรบกวน สมดุลของการละลายและตกผลึกของซิงก์เท่านั้น

เมื่อพิจารณาสภาวะที่ไม่มีโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อทดสอบโดยใช้ถ่าน 0.06 กรัม/ลิตร ที่พีเอช 4 พบปริมาณซิงก์มากกว่า เมื่อทดสอบโดยใช้ถ่าน 0.8 กรัม/ลิตร ที่พีเอช 7 ทั้งที่ปริมาณถ่านที่ใช้น้อยกว่า แสดงว่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์มีผลต่อการละลายได้ของผลึก $\text{Ca}_{10-x}\text{Zn}_x(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ และ $\text{CaZn}_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ส่วนสภาวะที่มีโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์นั้นพบว่าน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว 50 มิลลิกรัม/ลิตร มีผลต่อการละลายได้ของซิงก์โดยซิงก์ไม่สามารถจะตกผลึกกลับไปได้ทั้งหมด ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า H_2PO_4^- บางส่วนถูกใช้ไปในการเกิดผลึก $\text{Pb}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{Cl})_2$ ตามสมมุติฐานการละลาย (Miyaji et al., 2005) และการตกตะกอน (Ma et al., 2000) ดังนี้



4.5 การศึกษาค่าใช้จ่ายเบื้องต้นโดยประมาณ

4.5.1 ร้อยละผลผลิตที่ได้จากขั้นตอนการเตรียม ด้วยสารละลายซิงก์คลอไรด์

จากขั้นตอนการเตรียมในขั้นตอนที่ 1 ได้แบ่งเป็น 2 สถานะการเตรียม โดยสถานะแรกเป็นการเตรียมก่อนแช่ด้วยสารละลายซิงก์คลอไรด์เพื่อให้ได้ถ่านขนาด 8 ถึง 16 เมช ให้มากที่สุด สำหรับใช้ในสถานะหลังแช่ด้วยสารละลายซิงก์คลอไรด์ต่อไป พบว่าหลังจากที่เผากระดูกบด ปริมาณ 500 กรัม ในเตาเผาด้วยอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วบด และคัดขนาดถ่านกระดูกที่ได้ให้มีขนาดที่ต้องการคือ 8 – 16 เมช ปริมาณผลผลิตที่ได้คือ 364.28 กรัม ซึ่งคิดเป็นผลผลิตได้ร้อยละ 72.86 และสูญเสียร้อยละ 27.14 ดังแสดงในตารางที่ 4.3

หลังจากได้ขนาดอนุภาคที่ต้องการแล้ว จึงนำถ่านปริมาณ 50 กรัม ไปแช่ในสารละลายซิงก์คลอไรด์ เข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยมีสัดส่วนซิงก์คลอไรด์ ต่อ กระดูกบด เป็น 1:1, 1.5:1 และ 2:1 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปอบไล่ไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนแห้ง แล้วเผาในเตาเผาอับอากาศ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเตา และนำออกมาล้างด้วยน้ำร้อนจนกระทั่งน้ำที่ล้างได้เป็นกลางโดยการทดสอบด้วยกระดาษลิตมัส นำถ่านที่ล้างได้ไปอบให้แห้งและทิ้งให้เย็นในตู้ดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักถ่านที่เหลือ พบว่าปริมาณถ่านเหลือเพียงร้อยละ 52.24, 36.45 และ 33.09 สำหรับสัดส่วนซิงก์คลอไรด์ ต่อ กระดูกบด เป็น 1:1, 1.5:1 และ 2:1 ตามลำดับ จากนั้นนำถ่านไปบดและคัดขนาดให้มีขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับ 45 ไมครอน (325 เมช) ซึ่งเป็นขนาดทดสอบที่ใช้สำหรับการทดสอบแบบแบตช์ ดังแสดงในตารางที่ 4.4

จากทั้งสองสถานะการเตรียมข้างต้นสามารถคิดเป็นร้อยละผลผลิตโดยรวมได้ โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 38.06, 26.56 และ 24.11 เมื่อสัดส่วนซิงก์คลอไรด์ ต่อ กระดูกบด เป็น 1:1, 1.5:1 และ 2:1 ตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 ร้อยละผลผลิตที่ได้จากสภาวะการเตรียมก่อนแช่ด้วยสารละลายซิงก์คลอไรด์

วิธีการเตรียม	น้ำหนักกระดุก (กรัม)	ร้อยละผลผลิต (เปอร์เซ็นต์)
กระดุกเริ่มต้น	500	100.00
↓ เผา 300 ^o C 2 ชั่วโมง	-	-
↓ บด และคัดขนาด 8 – 16 เมช	364.289	72.86

ตารางที่ 4.4 ร้อยละผลผลิตที่ได้จากสภาวะการเตรียมหลังแช่ด้วยสารละลายซิงก์คลอไรด์

วิธีการเตรียม	ซิงก์คลอไรด์: ถ่านกระดุกบด					
	1 : 1		1.5 : 1		2 : 1	
	น้ำหนักกระดุก(กรัม)	ผลผลิต (%)	น้ำหนักกระดุก(กรัม)	ผลผลิต (%)	น้ำหนักกระดุก(กรัม)	ผลผลิต (%)
ถ่านกระดุกบดเริ่มต้น 8 - 16 เมช	50	100.00	50	100.00	50	100.00
↓ แช่สารละลาย ZnCl ₂ 24 ชั่วโมง	-	-	-	-	-	-
↓ อบให้แห้ง 24 ชั่วโมง	-	-	-	-	-	-
↓ เผา 400 ^o C 1 ชั่วโมง	-	-	-	-	-	-
↓ ↓ล้างด้วยน้ำร้อน จนเป็นกลาง	-	-	-	-	-	-
↓ อบให้แห้ง	26.121	52.24	18.225	36.45	16.547	33.09

4.5.2 ค่าใช้จ่ายโดยประมาณ

จากการทดลองสามารถประมาณค่าใช้จ่ายในการผลิตต่อ 1 กิโลกรัม ของถ่านกระดุก ซึ่งเตรียมด้วยสัดส่วนซิงก์คลอไรด์ ต่อ กระดุกบด เป็น 1:1 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่เหมาะสม และพบว่าผลผลิตโดยรวมเท่ากับร้อยละ 38.06 จึงสามารถประมาณค่าใช้จ่ายในส่วนหลักๆ ได้ดังนี้

1. กระดุก ต้องใช้กระดุก 2.63 กิโลกรัม ซึ่งราคา กิโลกรัมละ 3 บาท ดังนั้นคิดเป็นเงิน 7.89 บาท

2. เตาเผา สภาวะการเตรียมก่อนแช่สารละลายซิงก์คลอไรด์ใช้เวลาในการเผา 2 ชั่วโมง โดยให้ค่าร้อยละผลผลิต 72.86 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจะเหลือถ่านสำหรับการเตรียมในขั้นต่อไป 1.92 กิโลกรัม และจะต้องใช้อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ในการเผากระตุ้นต่อไป ดังนั้นเตาเผาใช้เวลาเผาทั้งหมด 3 ชั่วโมง

จากเตาเผา ใช้ไฟฟ้าประมาณ 3.52 KW / hr. ใช้เวลาในการเผาทั้งหมด 3 ชั่วโมง คิดเป็นหน่วยไฟฟ้า 10.56 KW และค่าไฟฟ้าโดยประมาณ 1.8 บาทต่อKW ดังนั้นค่าไฟฟ้านี้คิดเป็นเงิน 19.01 บาท

3. ซิงก์คลอไรด์เกรดการค้า จากสัดส่วนซิงก์คลอไรด์ ต่อ กระจกบด เป็น 1:1 จะต้องใช้ซิงก์คลอไรด์ 1.92 กิโลกรัม เพื่อให้ได้ถ่านกระจก 1 กิโลกรัม ซึ่งซิงก์คลอไรด์ ราคา 55 บาทต่อกิโลกรัม ดังนั้นค่าซิงก์คลอไรด์เป็นเงิน 105.60 บาท

$$\begin{aligned} \text{จากค่าใช้จ่ายทั้งหมด} &= \text{ค่ากระจก} + \text{ค่าไฟฟ้า} + \text{ซิงก์คลอไรด์} \\ &= 7.89 + 19.01 + 105.60 \\ &= 132.50 \text{ บาท} \end{aligned}$$

ดังนั้นเมื่อรวมจำนวนเงินค่าใช้จ่ายทั้งหมดเท่ากับ 132.50 บาท ต่อการผลิตถ่านกระจก 1 กิโลกรัม

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการกำจัดโลหะหนัก 2 ชนิดโดยการทดลองแบบแบตช์ ได้แก่ ตะกั่ว และแคดเมียม ของถ่านกระดูกที่กระตุ้นโดยซิงก์คลอไรด์ที่อัตราส่วนซิงก์คลอไรด์ต่อกระดูกต่างกัน และศึกษาลักษณะทางกายภาพของถ่านกระดูกในสภาวะก่อน และหลังการเตรียมผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ผลการศึกษาสภาวะในการเตรียมถ่านกระดูก ด้วยสารละลายซิงก์คลอไรด์

1. เมื่อนำกระดูกมากระตุ้นด้วย ซิงก์คลอไรด์ ต่อ กระดูกบด ในสัดส่วน 1:1, 1.5:1 และ 2:1 ที่อุณหภูมิการเผา 400 องศาเซลเซียส พบว่าซิงก์คลอไรด์สามารถทำให้พื้นผิว ปริมาตร โพร่งเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนซิงก์คลอไรด์ ต่อ กระดูกมากขึ้นจะทำให้พื้นที่ผิว ปริมาตรจำเพาะของโพร่งลดลงและปริมาณของ PO_4^{3-} จะลดลงตามสัดส่วนของซิงก์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ชนิดผลึกที่เกิดขึ้นภายหลังการเตรียม พบว่า ขนาดผลึก หรือความเข้มผลึกจะมากที่สุดที่สัดส่วนในการเตรียมเท่ากับ 1:1 และลดลงตามลำดับเมื่อสัดส่วนซิงก์คลอไรด์ ต่อ กระดูกบด มากขึ้น ดังนั้น จึงเลือกกระดูกซึ่งกระตุ้นด้วย ซิงก์คลอไรด์ ต่อ กระดูกบด ในสัดส่วน 1:1 เป็นตัวแทนในการนำไปทดสอบการกำจัด ตะกั่ว และแคดเมียมต่อไป โดยผลึกที่พบมีดังต่อไปนี้ $Ca_{10-x}Zn_x(PO_4)_6(OH)_2$, $CaZn_2(PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ และ $Ca_{10}(PO_4)_6(Cl)_2$

2. การวิเคราะห์หาชนิดผลึกภายหลังการกำจัด สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว 50 มก./ล. เติมถ่านกระดูก 0.08 ก./ล. น้ำตัวอย่าง พีเอช 4 เขย่า 250 รอบ/นาที เป็นเวลา 60 ชั่วโมง พบว่าชนิดของผลึกส่วนใหญ่ ได้เปลี่ยนไป โดยเกิดเป็น $Pb_{10}(PO_4)_6(Cl)_2$ (Chloropyromorphite) ซึ่งพบว่ากลไกการกำจัดเป็นไปตามสมมุติฐาน การละลาย และการตกตะกอน (Dissolution and Precipitation) สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียม 10 มก./ล. เติมถ่านกระดูก 0.6 ก./ล. น้ำตัวอย่าง พีเอช 7 เขย่า 250 รอบ/นาที เป็นเวลา 60 ชั่วโมง พบว่าชนิดของผลึกที่เกิดขึ้นภายหลังและก่อนการกำจัดแคดเมียม ยังคงไม่เปลี่ยนแปลง เพียงแต่ผลึกมีขนาดที่ลดลงเท่านั้น ซึ่งสามารถสรุปได้ว่ากลไกการกำจัดแคดเมียมนี้เป็นแบบดูดซับผิว

3. จากผลการศึกษาการเตรียมถ่านกระดูกที่กระตุ้นด้วย ซิงค์คลอไรด์ ต่อ กระดูกบด ในสัดส่วน 1:1 ซึ่งเป็นสภาวะที่ถูกเลือกเป็นตัวแทนในการทดสอบ พบว่าผลผลิตโดยรวมเท่ากับร้อยละ 38.06 ดังนั้นการที่จะผลิตถ่านกระดูกให้ได้ 1 กิโลกรัมจะต้องใช้กระดูกบดถึง 2.63 กิโลกรัม โดยค่าใช้จ่ายในการผลิตโดยประมาณต่อกิโลกรัมผลผลิต คือ 132.5 บาท

5.1.2 ผลการศึกษาพีเอชที่เหมาะสม

1. สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วได้ทดสอบที่ ความเข้มข้น 50 มก./ล. ถ่านกระดูก 0.050 ก./ล. น้ำตัวอย่าง โดยทดสอบที่พีเอช 3, 4, 5, 6 และ 7 แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 72 ชั่วโมง พบว่าที่พีเอช 7 ให้ค่าการกำจัดโดยรวมมากที่สุดถึงร้อยละ 97.14 ซึ่งส่วนใหญ่เกิดการตกตะกอนสูงถึงร้อยละ 90.42 และที่พีเอช 4 ให้ค่าการกำจัดโดยกลไกของถ่านกระดูกเองมากที่สุดถึงร้อยละ 87.15 และเกิดการตกตะกอนเพียงร้อยละ 0.72 ซึ่งคิดเป็นความสามารถการกำจัดโดยกลไก การละลาย และการตกตะกอน ของถ่าน สูงถึง 867.8 มก.Pb/ก.ถ่านกระดูก ดังนั้นจึงเลือกพีเอชเท่ากับ 4 ไปใช้ทดสอบไอโซเทอมต่อไป

2. สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมได้ทดสอบที่ ความเข้มข้น 10 มก./ล. ถ่านกระดูก 0.5 ก./ล. น้ำตัวอย่าง โดยทดสอบที่พีเอช 3, 4, 5, 6 และ 7 แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 72 ชั่วโมง พบว่าที่พีเอช 7 ให้ค่าการกำจัดโดยรวมมากที่สุดถึงร้อยละ 78.32 และยังให้ค่าการกำจัดโดยกลไกของถ่านกระดูกเองมากที่สุดด้วย ถึงร้อยละ 76.04 โดยเกิดการตกตะกอนร้อยละ 9.54 ซึ่งคิดเป็นความสามารถการกำจัดโดยกลไกการดูดติดผิวคือ 14.28 มก.Cd/ก.ถ่านกระดูก ดังนั้นจึงเลือกพีเอชเท่ากับ 7 ไปใช้ทดสอบไอโซเทอมต่อไป

5.1.3 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

1. จากผลการศึกษาโดยใช้สมการไอโซเทอมในการทำนายประสิทธิภาพการกำจัด สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว พบว่าค่า R^2 ของไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช และแลงมัวร์มีค่าเท่ากับ 0.8556 และ 0.9150 ตามลำดับ ดังนั้นสมการแบบแลงมัวร์จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาเป็นตัวแทนในการทำนายกลไกการกำจัดตะกั่ว มากกว่าสมการแบบฟรุนดลิช เนื่องจาก มีค่ามากกว่า และจากสภาวะที่ทดสอบพบว่า ความสามารถในการกำจัดโดยกลไก การละลาย และการตกตะกอน ของถ่าน มากที่สุดถึง 1,002.00 มก.Pb/ก.ถ่านกระดูก สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียม พบว่าค่า R^2 ของไอโซเทอมแบบ

ฟรุณฑลิจ และแลงมัวร์ มีค่าเท่ากับ 0.9897 และ 0.9963 ตามลำดับ ดังนั้นสมการแบบแลงมัวร์จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาเป็นตัวแทนในการทำนายกลไกการกำจัดแคดเมียม มากกว่าสมการแบบฟรุณฑลิจ และจากสถานะที่ทดสอบพบว่าความสามารถในการกำจัดโดยกลไกการดูดติดผิว ของถ่านมากที่สุด เท่ากับ 22.06 มก./ก.ถ่านกระดูก

2. จากการศึกษาผลของการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ ต่อปริมาณซิงก์จากถ่านกระดูก โดยใช้สภาวะเดียวกันกับการศึกษาไอโซเทอม พบว่าการมีอยู่ของแคดเมียมในน้ำเสียไม่มีผลกับการละลายของซิงก์ ณ.สมดุล เพียงแต่สามารถรบกวนสมดุลของการละลาย และตกผลึกของซิงก์เท่านั้น ซึ่งต่างจากการทดสอบกับน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วพบว่า การมีอยู่ของตะกั่วในน้ำเสียนั้น มีผลต่อการตกผลึกกลับของซิงก์โดยตรง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการเตรียมถ่านกระดูกที่กระตุ้นด้วยซิงก์คลอไรด์ที่อัตราส่วนซิงก์คลอไรด์ต่อถ่านกระดูกเท่ากับ 0.1:1 – 0.8:1
2. ศึกษาวิธีการนำซิงก์กลับมาใช้ใหม่ รวมถึงการรีเจนเนอเรตถ่านกระดูกให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างคุ้มค่าที่สุด
3. ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโดยใช้วัสดุอื่น ซึ่งมีอะพาไทต์เป็นองค์ประกอบเช่น หินฟอสเฟต เป็นต้น
4. ศึกษาการนำถ่านกระดูกไปใช้ในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียในการทดลองแบบต่อเนื่องต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กฤติยา เสือสีนาค. การดูดซับแก๊สโพรเพนด้วยตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากกะลามะพร้าวโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- เกรียงศักดิ์ กิตติพิมาน. การดูดซับออกซิเจนและไนโตรเจนด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- เกษรและสหกรณ์, กระทรวง. กรมปศุสัตว์. กองแผนงาน. ฝ่ายประมวลผลและสถิติ. ประมวลสถิติประจำปี 2539-2547, 2548.
- จุฑารัตน์ เศรษฐกุล. การจัดการโรงฆ่าสัตว์. คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542.
- ชาญวิทย์ สุภรานนท์รัตน์. ผลของฟลูออไรด์ในน้ำเสียต่อการดูดติดผิวของตะกั่วบนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- ชเรศ ศรีสถิตย์, ปณิตดา คำรัตน์ และวรรณนา วงษ์สุด. ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากขี้เถ้าของโรงงานน้ำตาลขุ่น ในการกำจัดตะกั่วและปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์. วารสารวิจัยสถานะแวดล้อม 25 (กรกฎาคม-ธันวาคม 2546): 1-13.
- นิชชรี นิลนนท์. การผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้โกงกางโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำยวดยิ่ง และการบอนด์ออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- บุญชัย ตระกูลมหชัย. การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาตาลโดนดในฟลูอิดไคซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.
- ปิยะพร บารมี. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากยางเหลือทิ้งโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.
- พงศธร โคว์ชชาภรณ์. ถ่านกัมมันต์จากขี้ข้าวโพด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

- มานัด แก้วถาวร. ผลของโซเดียมคลอไรด์ ซิงก์คลอไรด์ และ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ต่อการ
ผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชา
วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2537.
- มันสิน ตันทุลเทศ. วิศวกรรมประปา. เล่มที่ 2. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
- รวาวุฒิ ประชาศิริสกุล. การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมัน โดยการกระตุ้นด้วยพลังงาน
ไมโครเวฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กระทรวง. กรมควบคุมมลพิษ. กองมาตรฐานคุณภาพ
สิ่งแวดล้อม. เอกสารเผยแพร่ทางวิชาการของสารเคมีเฉพาะเรื่อง แคดเมียม. 2545.
- วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กระทรวง. กรมควบคุมมลพิษ. กองมาตรฐานคุณภาพ
สิ่งแวดล้อม. เอกสารเผยแพร่ทางวิชาการของสารเคมีเฉพาะเรื่อง ตะกั่ว. 2545.
- ศุภกิจ พัฒนเตชะ. การใช้ถ่านกระดูกกำจัดตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสีย. วิทยานิพนธ์ปริญญา
โทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, 2545.
- สุชาดา สุทธิพิบูลย์. ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและอาร์เซนิกในน้ำเสียด้วยถ่านกระดูก.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- อุบลรัตน์ วาริชวัฒนะ. การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้ถ่านกระดูก. วิทยานิพนธ์ปริญญา
โทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, 2544.

ภาษาอังกฤษ

- American Standard of Testing Material. Standard Practice for Determination of Adsorptive
Capacity of Activated Carbon by Aqueous Phase Isotherm Technique ASTM D3860-
89A. (1993): 533-535.
- American Standard of Testing Material. Standard Test Method for Determination of Iodine
Number of Activated Carbon ASTM D 4607-94. (1996): 542-545.
- American Standard of Testing Material. Standard Test Method for Surface Area of Activated
Carbon ASTM C 819-77. (1996): 379-382.

- Azab, M.S. and P.J. Peterson. The Removal of Cadmium from Water by the use of Biological Sorbents. Wat. Sci. Tech. 21(1989): 1705-1706.
- Chen, X.-B., et al. Effects of pH on heavy metal sorption on mineral apatite. Environmental science & Technology 31,3 (1997): 624-631
- Chen, X.-B., et al. Evaluation of heavy metal remediation using mineral apatite. Water, Air, and Soil Pollution 98(1997): 57-78.
- Cheremisinoff, P.N. and Ellerbusch, F. Carbon Adsorption Handbook. Michigan: Ann Arbor Science, 1978.
- Cheung, C. W., Porter, J. F., and McKay, G. Removal of Cu(II) and Zn(II) Ions by Sorption onto Bone Char Using Batch Agitation. Langmuir 18,3 (2001): 650-656.
- Crannell, B.S., et al. Heavy metal stabilization in municipal solid waste combustion bottom ash using soluble phosphate. Waste Management 20(2000): 135-148
- Dahbi, S., Azzi, M., and De la Guardia, M. Removal of hexavalent chromium from wastewaters by bone char coal. Fresenius J Anal Chem 363 (1999): 404-407.
- Danny C.K. Ko, Chun Wai Cheung, Keith K.H. Choy, John F Porter and Gordon McKay. Sorption equilibria of metal ions on bone char. Chemosphere 54 (2004): 273-281.
- Dean, J.G., Bosquill, F.L. and Lanuette, K.H. Removal heavy metal from Wastewater. Environ.Sci.Technol. 6(1972):518-521.
- Ebonex Coporation. Bone Char [online]. Available from: <http://www.ebonox.com/bapp.htm#water>. (12/03/2004).
- Lakatos J., Brown S.D. and Snape C.E. Coals as sorbents for the removal and reduction of hexavalent chromium from aqueous waste streams. Fuel 81(2002):691-698.
- Ma, Q.Y., Logan, T.J., Ryan, J.A. and Traina, S.J. Effects of NO₃⁻, Cl⁻, F⁻, SO₄²⁻, and CO₃²⁻ on Pb²⁺ Immobilization by Hydroxyapatite. Environ. Sci. Technol. 28(1994): 408-418.
- Maycock, K.R., Ulan, J.G. and Moser, C.R. 1997. Removal of Trace Metal and Metalloid Species from Brine. U.S. Patent. No.636979.
- Metcalf and Eddy. Wastewater Engineering. 3rd ed. Singapore: McGraw-Hill Book Co, 1991.
- Miyaji, F., Kono, Y., Suyama, Y. Formation and structure of zinc-substituted calcium hydroxyapatite. Materials Research Bulletin 40(2005): 209-220
- Phatumvanit, P. and Legeros, R.Z. Characteristics of Bone Char Related to Efficiency of Fluoride Removal from Highly Fluoridated Water. Fluoride 30,4 (1994):207-218.

- Rodriguez-Lorenzo, L. M., and Vallet-Regi, M. Controlled Crystallization of Calcium Phosphate Apatites. Journal of Chem. Mater. 12 (2000): 2460-2465.
- Sugiyama, S., et al. Effect of calcinations and sieving of calcium hydroxyapatite on ion-exchangeability with lead cation in the presence and absence of HCL. Advances in Environmental Research. 6(2002): 285-289
- Wesley Eckenfelder, W., Jr. Industrial water pollution control. 2nded. New York: McGraw-Hill,1989.
- Wesley Eckenfelder, W., Jr. Industrial water pollution control. 3rded. Boston: McGraw-Hill,2000.
- Xu, Y., Schwartz, F.W. and Traina, S.J. Sorption of Zn(II) and Cd(II) on Hydroxyapatite Surfaces. Environ.Sci.Technol. 28,8(1994):1472-1480.
- Yoshiharu, H., Tamotsu, M. and Masahide, I. Adsorption Characteristics of Chromium in Wastewater with Activated Carbon and Bone Charcoal. Chemical Abstract 107,1 (1987):288-295.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ผลการศึกษาพิเศษที่เหมาะสมโดยการทดลองแบบแบบตซ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-1 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของถ่านกระดูกที่เตรียมจากสัดส่วนซิงค์คลอไรด์ ต่อ
 กระดุกบดเป็น 1:1 ปริมาณถ่าน 0.025 กรัม/ลิตรน้ำตัวอย่าง พีเอช 5 และความเข้มข้น
 ตะกั่วเริ่มต้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร

เวลาเก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง : นาที)	พีเอช เริ่มต้น	พีเอช สุดท้าย	ความเข้มข้นน้ำเสียเริ่มต้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นน้ำเสียสุดท้าย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)	x/m
0:15	5.00	5.01	10.13	0.44	95.66	387.60
0:30	5.00	5.01	10.13	0.184	98.18	397.84
0:45	5.00	5.01	10.13	0.091	99.10	401.56
1:00	5.00	5.01	10.13	0.107	98.94	400.92
1:15	5.00	5.01	10.13	0.227	97.76	396.12
1:30	5.00	5.01	10.13	0.245	97.58	395.40
1:45	5.00	5.01	10.13	0.197	98.06	397.32
2:00	5.00	5.01	10.13	0.109	98.92	400.84
2:30	5.00	5.01	10.13	0.215	97.88	396.60
3:00	5.00	5.01	10.13	0.087	99.14	401.72
3:30	5.00	5.01	10.13	0.087	99.14	401.72
4:00	5.00	5.01	10.13	0.074	99.27	402.24
4:30	5.00	5.01	10.13	0.05	99.51	403.20
5:00	5.00	5.01	10.13	0.044	99.57	403.44
5:30	5.00	5.01	10.13	0.059	99.42	402.84
6:00	5.00	5.02	10.13	0.058	99.43	402.88
8:00	5.00	5.02	10.13	0.042	99.59	403.52
12:00	5.00	5.02	10.13	0.028	99.72	404.08
18:00	5.00	5.03	10.13	0.025	99.75	404.20
24:00	5.00	5.03	10.13	0.033	99.67	403.88
36:00	5.00	5.02	10.13	0.097	99.04	401.32
48:00	5.00	5.04	10.13	0	100.00	405.20
60:00	5.00	5.05	10.13	0	100.00	405.20

x/m = ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของถ่านกระดูก (มิลลิกรัม Pb/กรัมถ่านกระดูก)

ตารางที่ ก-2 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของถ่านกระดุกที่เตรียมจากสัดส่วนซิงค์คลอไรด์ ต่อ
 กระดุกบดเป็น 1:1 ปริมาณถ่าน 0.050 กรัม/ลิตรน้ำตัวอย่าง พีเอช 5 และความเข้มข้น
 ตะกั่วเริ่มต้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร

เวลาเก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง : นาที)	พีเอช เริ่มต้น	พีเอช สุดท้าย	ความเข้มข้นน้ำเสียเริ่มต้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นน้ำเสียสุดท้าย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)	x/m
0:15	5.00	5.00	49.77	41.00	17.62	175.40
0:30	5.00	5.00	49.77	40.00	19.64	195.50
3:00	5.00	5.00	49.77	31.55	36.61	364.40
6:00	5.00	5.00	49.77	27.70	44.35	441.50
12:00	5.00	5.00	49.77	18.48	62.87	625.80
24:00	5.00	5.00	49.77	17.57	64.70	644.00
36:00	5.00	5.00	49.77	13.67	72.53	722.00
48:00	5.00	5.02	49.77	12.04	75.81	754.60
60:00	5.00	5.01	49.77	12.01	75.87	755.20
72:00	5.00	5.01	49.77	12.26	75.37	750.20

x/m = ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของถ่านกระดุก (มิลลิกรัม Pb/กรัมถ่านกระดุก)

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-3 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของถ่านกระดูกที่เตรียมจากสัปดาห์คลอไรด์ ต่อ
 กระดูกบดเป็น 1:1 ปริมาณถ่าน 0.050 กรัม/ลิตรน้ำตัวอย่าง และความเข้มข้นตะกั่ว
 เริ่มต้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ที่พีเอชน้ำเสีย 3 ถึง 7

	pH _i	pH _f	Conc. _i	Conc. _f	%Removal _t	%Removal _s	%Removal _a	x/m
Blank	3.03	3.03	50.15	49.83	-	0.64	-	-
Sample	3.03	3.04	50.15	17.45	65.20	-	64.98	647.60
Blank	4.00	4.00	50.15	49.79	-	0.72	-	-
Sample	4.00	4.01	50.15	6.40	87.24	-	87.15	867.80
Blank	5.01	5.01	50.15	49.14	-	2.01	-	-
Sample	5.01	5.01	50.15	12.62	74.84	-	74.32	730.40
Blank	6.01	6.01	50.15	48.46	-	3.37	-	-
Sample	6.01	6.03	50.15	36.10	28.02	-	25.51	247.20
Blank	7.00	7.00	49.70	4.76	-	90.42	-	-
Sample	7.00	7.00	49.70	1.42	97.14	-	70.17	66.80

Blank	สารละลายที่ไม่เติมตัวดูดซับ
pH _i	พีเอชเริ่มต้นของสารละลาย
pH _f	พีเอชของสารละลายหลังการทดลอง
Conc. _i	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายก่อนทดลอง(มก./ล.)
Conc. _f	ความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายหลังการทดลอง(มก./ล.)
%Removal _t	ร้อยละการกำจัดโดยการตกตะกอนร่วมกับการดูดซับ
%Removal _s	ร้อยละการกำจัดโดยการตกตะกอน
%Removal _a	ร้อยละการกำจัดโดยการดูดซับ
x/m	ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของถ่านกระดูก (มิลลิกรัม Pb/กรัม ถ่านกระดูก)

ตารางที่ ก-4 ประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมของถ่านกระดูกที่เตรียมจากสัคส่วนซิงก์คลอไรด์ ต่อ
 กระจุกบดเป็น 1:1 ปริมาณถ่าน 0.5 กรัม/ลิตรน้ำตัวอย่าง พีเอช 6 และความเข้มข้น
 ตะกั่วเริ่มต้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร

เวลาเก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง : นาที)	พีเอช เริ่มต้น	พีเอช สุดท้าย	ความเข้มข้นน้ำเสียเริ่มต้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นน้ำเสียสุดท้าย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)	x/m
0:15	6.00	6.07	10.28	5.96	42.02	8.64
0:30	6.00	6.07	10.28	6.29	38.81	7.98
0:45	6.00	6.07	10.28	6.07	40.95	8.42
1:00	6.00	6.07	10.28	5.73	44.26	9.10
1:15	6.00	6.07	10.28	5.64	45.14	9.28
1:30	6.00	6.07	10.28	5.98	41.83	8.60
1:45	6.00	6.07	10.28	5.61	45.43	9.34
2:00	6.00	6.07	10.28	5.84	43.19	8.88
2:30	6.00	6.07	10.28	5.76	43.97	9.04
3:00	6.00	6.07	10.28	5.69	44.65	9.18
3:30	6.00	6.07	10.28	5.56	45.91	9.44
4:00	6.00	6.07	10.28	4.95	51.85	10.66
4:30	6.00	6.07	10.28	5.63	45.23	9.30
5:00	6.00	6.07	10.28	5.65	45.04	9.26
5:30	6.00	6.07	10.28	5.59	45.62	9.38
6:00	6.00	6.07	10.28	5.61	45.43	9.34
8:00	6.00	6.09	10.28	5.55	46.01	9.46
12:00	6.00	6.07	10.28	5.36	47.86	9.84
18:00	6.00	6.07	10.28	5.43	47.18	9.70
24:00	6.00	6.07	10.28	5.37	47.76	9.82
36:00	6.00	6.10	10.28	5.28	48.64	10.00
48:00	6.00	6.09	10.28	5.16	49.81	10.24
60:00	6.00	6.09	10.28	5.04	50.97	10.48
72:00	6.00	6.09	10.28	5.06	50.78	10.44

x/m = ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของถ่านกระดูก (มิลลิกรัม Cd/กรัมถ่านกระดูก)

ตารางที่ ก-5 ประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมของถ่านกระดูกที่เตรียมจาก สัตว์ส่วนซิงก์กลอไรด์ต่อ
กระดูกบดเป็น 1:1 ปริมาณถ่าน 0.5 กรัม/ลิตรน้ำตัวอย่าง และความเข้มข้นแคดเมียม
เริ่มต้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ที่พีเอชน้ำเสีย 3 ถึง 7

	pH _i	pH _f	Conc. _i	Conc. _f	%Removal _t	%Removal _s	%Removal _a	X/M
Blank	3.00	3.00	10.09	10.05	-	0.40	-	-
Sample	3.00	3.30	10.09	9.78	3.07	-	2.69	0.54
Blank	4.00	4.00	10.11	10.07	-	0.40	-	-
Sample	4.00	4.12	10.11	9.45	6.53	-	6.16	1.24
Blank	5.00	5.00	10.10	9.97	-	1.29	-	-
Sample	5.00	5.08	10.10	8.10	19.80	-	18.76	3.74
Blank	6.00	6.00	10.26	10.03	-	2.24	-	-
Sample	6.00	6.08	10.26	5.11	50.19	-	49.05	9.84
Blank	7.00	7.00	10.38	9.39	-	9.54	-	-
Sample	7.00	7.03	10.38	2.25	78.32	-	76.04	14.28

Blank	สารละลายที่ไม่เติมตัวดูดซับ
pH _i	พีเอชเริ่มต้นของสารละลาย
pH _f	พีเอชของสารละลายหลังการทดลอง
Conc. _i	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายก่อนทดลอง(มก./ล.)
Conc. _f	ความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายหลังการทดลอง(มก./ล.)
%Removal _t	ร้อยละการกำจัดโดยการตกตะกอนร่วมกับการดูดซับ
%Removal _s	ร้อยละการกำจัดโดยการตกตะกอน
%Removal _a	ร้อยละการกำจัดโดยการดูดซับ
x/m	ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของถ่านกระดูก (มิลลิกรัม Cd/กรัม ถ่านกระดูก)



ภาคผนวก ข

ผลการศึกษาไอโซโทมการดูดซับในการกำจัดโลหะหนัก โดยทำการทดลองแบบแบตช์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-1 ผลการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของถ่านกระดูกที่เตรียมจากสัปดาห์ซึ่งก็คลอไรด์
ต่อ กระดุกบดเป็น 1:1 พีเอช 4 และความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร
ปริมาณถ่าน 0.08 กรัม/ลิตรน้ำตัวอย่าง

เวลาเก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง : นาที)	พีเอช สุดท้าย	ความเข้มข้นน้ำเสียสุดท้าย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)	x/m
3:00	4.02	4.53	91.07	577.75
6:00	4.02	4.48	91.17	578.38
12:00	4.02	4.24	91.65	581.38
24:00	4.03	4.08	91.96	583.38
36:00	4.03	3.95	92.22	585.00
48:00	4.03	3.94	92.24	585.13
60:00	4.03	3.95	92.22	585.00
72:00	4.03	3.91	92.30	585.50

เก็บตัวอย่างที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50.75 mg/l น้ำเสีย

เก็บตัวอย่างความเข้มข้นเริ่มต้น ณ.เวลาที่ 72 ชั่วโมงเท่ากับ 50.30 mg/l น้ำเสีย

ดังนั้นเปอร์เซ็นต์การตกตะกอนเท่ากับ 0.89 %

x/m = ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของถ่านกระดูก (มิลลิกรัม Pb/กรัมถ่านกระดูก)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-2 ผลการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของถ่านกระดูกที่เตรียมจากสัปดาห์ซึ่งก็คลอไรด์
ต่อ กระดุกบดเป็น 1:1 พีเอช 4 และความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร
ปริมาณถ่าน 0.07 กรัม/ลิตรน้ำตัวอย่าง

เวลาเก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง : นาที)	พีเอช สุดท้าย	ความเข้มข้นน้ำเสียสุดท้าย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)	x/m
3:00	4.02	5.87	88.43	641.14
6:00	4.02	5.14	89.87	651.57
12:00	4.02	4.76	90.62	657.00
24:00	4.02	4.78	90.58	656.71
36:00	4.02	4.43	91.27	661.71
48:00	4.03	4.16	91.80	665.57
60:00	4.03	4.12	91.88	666.14
72:00	4.03	4.14	91.84	665.86

เก็บตัวอย่างที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50.75 mg/l น้ำเสีย

เก็บตัวอย่างความเข้มข้นเริ่มต้น ณ.เวลาที่ 72 ชั่วโมงเท่ากับ 50.30 mg/l น้ำเสีย

ดังนั้นเปอร์เซ็นต์การตกตะกอนเท่ากับ 0.89 %

x/m = ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของถ่านกระดูก (มิลลิกรัม Pb/กรัมถ่านกระดูก)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-3 ผลการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของถ่านกระดูกที่เตรียมจากสัปดาห์ซึ่งก็คลอไรด์
ต่อ กระดุกบดเป็น 1:1 พีเอช 4 และความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร
ปริมาณถ่าน 0.06 กรัม/ลิตรน้ำตัวอย่าง

เวลาเก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง : นาที)	พีเอช สุดท้าย	ความเข้มข้นน้ำเสียสุดท้าย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)	x/m
3:00	4.01	9.09	82.32	705.17
6:00	4.02	6.33	87.68	751.17
12:00	4.02	6.30	87.74	751.67
24:00	4.02	6.21	87.92	753.17
36:00	4.02	6.10	88.13	755.00
48:00	4.02	5.92	88.48	758.00
60:00	4.02	5.34	89.61	767.67
72:00	4.02	5.34	89.61	767.67

เก็บตัวอย่างที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 51.40 mg/l น้ำเสีย

เก็บตัวอย่างความเข้มข้นเริ่มต้น ณ.เวลาที่ 72 ชั่วโมงเท่ากับ 51.00 mg/l น้ำเสีย

ดังนั้นเปอร์เซ็นต์การตกตะกอนเท่ากับ 0.78 %

x/m = ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของถ่านกระดูก (มิลลิกรัม Pb/กรัมถ่านกระดูก)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-4 ผลการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของถ่านกระดูกที่เตรียมจากสัปดาห์ซึ่งก็คลอไรด์
ต่อ กระดุกบดเป็น 1:1 พีเอช 4 และความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร
ปริมาณถ่าน 0.05 กรัม/ลิตรน้ำตัวอย่าง

เวลาเก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง : นาที)	พีเอช สุดท้าย	ความเข้มข้นน้ำเสียสุดท้าย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)	x/m
3:00	4.01	14.05	72.67	747.00
6:00	4.01	9.87	80.80	830.60
12:00	4.02	9.13	82.24	845.40
24:00	4.01	8.52	83.42	857.60
36:00	4.02	7.83	84.77	871.40
48:00	4.02	7.71	85.00	873.80
60:00	4.02	7.63	85.16	875.40
72:00	4.02	7.62	85.18	875.60

เก็บตัวอย่างที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 51.40 mg/l น้ำเสีย

เก็บตัวอย่างความเข้มข้นเริ่มต้น ณ.เวลาที่ 72 ชั่วโมงเท่ากับ 51.00 mg/l น้ำเสีย

ดังนั้นเปอร์เซ็นต์การตกตะกอนเท่ากับ 0.78 %

x/m = ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของถ่านกระดูก (มิลลิกรัม Pb/กรัมถ่านกระดูก)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-5 ผลการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของถ่านกระดูกที่เตรียมจากสัปดาห์ซึ่งก็คลอไรด์ ต่อ กระดุกบดเป็น 1:1 พีเอช 4 และความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาณถ่าน 0.035 กรัม/ลิตรน้ำตัวอย่าง

เวลาเก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง : นาที)	พีเอช สุดท้าย	ความเข้มข้นน้ำเสียสุดท้าย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)	x/m
3:00	4.00	29.61	40.31	571.43
6:00	4.00	21.40	56.86	806.00
12:00	4.00	18.51	62.69	888.57
24:00	4.01	18.68	62.35	883.71
36:00	4.00	18.58	62.55	886.57
48:00	4.00	16.63	66.48	942.29
60:00	4.01	15.57	68.62	972.57
72:00	4.00	15.59	68.57	972.00

เก็บตัวอย่างที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 49.61 mg/l น้ำเสีย

เก็บตัวอย่างความเข้มข้นเริ่มต้น ณ.เวลาที่ 72 ชั่วโมงเท่ากับ 49.30 mg/l น้ำเสีย

คั่งนั้นเปอร์เซ็นต์การตกตะกอนเท่ากับ 0.62 %

x/m = ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของถ่านกระดูก (มิลลิกรัม Pb/กรัมถ่านกระดูก)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-6 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของถ่านกระดุกที่เตรียมจากสัคส่วนซึ่งกัลดอไรด์ ต่อ กระดุกบดเป็น 1:1 ปริมาณต่างๆ พีเอช 4 และความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ที่สภาวะสมดุล

C_0	x	m	x/m	1/(x/m)	C_e	1/ C_e	log(x/m)	log(C_e)
49.30	33.71	0.035	963.14	0.0010	15.59	0.06	2.98	1.19
51.00	43.38	0.050	867.60	0.0012	7.62	0.13	2.94	0.88
51.00	45.66	0.060	761.00	0.0013	5.34	0.19	2.88	0.73
50.30	46.16	0.070	659.43	0.0015	4.14	0.24	2.82	0.62
50.30	46.39	0.080	579.88	0.0017	3.91	0.26	2.76	0.59

C_0	ความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้น (มิลลิกรัม/ลิตร)
C_e	ความเข้มข้นของตะกั่วที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)
x	ความเข้มข้นของตะกั่วที่ถูกกำจัด (มิลลิกรัม/ลิตร)
m	ปริมาณถ่านกระดุก (กรัม/ลิตรน้ำตัวอย่าง)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-7 ผลการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของถ่านกระดูกที่เตรียมจากสัปดาห์ซึ่งก็คลอไรด์ ต่อ กระดุกบดเป็น 1:1 พีเอช 7 และความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาณถ่าน 0.9 กรัม/ลิตรน้ำตัวอย่าง

เวลาเก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง : นาที)	พีเอช สุดท้าย	ความเข้มข้นน้ำเสียดสุดท้าย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)	x/m
3:00	7.01	2.06	79.72	9.00
6:00	7.01	1.37	86.52	9.77
8:00	7.02	1.36	86.61	9.78
12:00	7.02	1.28	87.40	9.87
24:00	7.01	0.97	90.45	10.21
36:00	7.02	0.84	91.73	10.36
48:00	7.03	0.85	91.63	10.34
60:00	7.03	0.85	91.63	10.34
72:00	7.04	0.85	91.63	10.34

เก็บตัวอย่างที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10.16 mg/l น้ำเสียด

เก็บตัวอย่างความเข้มข้นเริ่มต้น ณ.เวลาที่ 72 ชั่วโมงเท่ากับ 9.23 mg/l น้ำเสียด

ดังนั้นเปอร์เซ็นต์การตกตะกอนเท่ากับ 9.15 %

x/m = ความสามารถในการกำจัด โลหะหนักของถ่านกระดูก (มิลลิกรัม Cd/กรัมถ่านกระดูก)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-8 ผลการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของถ่านกระดูกที่เตรียมจากสัปดาห์ซึ่งก็คลอไรด์ ต่อ กระดุกบดเป็น 1:1 พีเอช 7 และความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาณถ่าน 0.8 กรัม/ลิตรน้ำตัวอย่าง

เวลาเก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง : นาที)	พีเอช สุดท้าย	ความเข้มข้นน้ำเสียดสุดท้าย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)	x/m
3:00	7.01	1.93	81.00	10.29
6:00	7.02	1.73	82.97	10.54
8:00	7.01	1.60	84.25	10.70
12:00	7.01	1.48	85.43	10.85
24:00	7.02	1.15	88.68	11.26
36:00	7.02	1.00	90.16	11.45
48:00	7.03	0.99	90.26	11.46
60:00	7.03	0.98	90.35	11.48
72:00	7.04	0.98	90.35	11.48

เก็บตัวอย่างที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10.16 mg/l น้ำเสียด

เก็บตัวอย่างความเข้มข้นเริ่มต้น ณ.เวลาที่ 72 ชั่วโมงเท่ากับ 9.23 mg/l น้ำเสียด

ดังนั้นเปอร์เซ็นต์การตกตะกอนเท่ากับ 9.15 %

x/m = ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของถ่านกระดูก (มิลลิกรัม Cd/กรัมถ่านกระดูก)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-9 ผลการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของถ่านกระดูกที่เตรียมจากสัปดาห์ซึ่งก็คลอไรด์ ต่อ กระดุกบดเป็น 1:1 พีเอช 7 และความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาณถ่าน 0.6 กรัม/ลิตรน้ำตัวอย่าง

เวลาเก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง : นาที)	พีเอช สุดท้าย	ความเข้มข้นน้ำเสียดสุดท้าย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)	x/m
3:00	7.01	2.81	72.34	12.25
6:00	7.01	2.45	75.89	12.85
8:00	7.01	2.24	77.95	13.20
12:00	7.02	2.08	79.53	13.47
24:00	7.02	1.74	82.87	14.03
36:00	7.02	1.54	84.84	14.37
48:00	7.02	1.55	84.74	14.35
60:00	7.03	1.56	84.65	14.33
72:00	7.03	1.56	84.65	14.33

เก็บตัวอย่างที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10.16 mg/l น้ำเสียด

เก็บตัวอย่างความเข้มข้นเริ่มต้น ณ.เวลาที่ 72 ชั่วโมงเท่ากับ 9.23 mg/l น้ำเสียด

ดังนั้นเปอร์เซ็นต์การตกตะกอนเท่ากับ 9.15 %

x/m = ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของถ่านกระดูก (มิลลิกรัม Cd/กรัมถ่านกระดูก)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-10 ผลการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของถ่านกระดูกที่เตรียมจากสัปดาห์
ซิงก์คลอไรด์ ต่อ กระดูกบดเป็น 1:1 พีเอช 7 และความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้น
10 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาณถ่าน 0.4 กรัม/ลิตรน้ำตัวอย่าง

เวลาเก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง : นาที)	พีเอช สุดท้าย	ความเข้มข้นน้ำเสียดสุดท้าย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)	x/m
3:00	7.00	4.06	60.04	15.25
6:00	7.00	3.71	63.48	16.13
8:00	7.00	3.57	64.86	16.48
12:00	7.01	3.26	67.91	17.25
24:00	7.01	2.98	70.67	17.95
36:00	7.01	2.59	74.51	18.93
48:00	7.02	2.72	73.23	18.60
60:00	7.02	2.60	74.41	18.90
72:00	7.03	2.61	74.31	18.88

เก็บตัวอย่างที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10.16 mg/l น้ำเสียด

เก็บตัวอย่างความเข้มข้นเริ่มต้น ณ.เวลาที่ 72 ชั่วโมงเท่ากับ 9.23 mg/l น้ำเสียด

ดังนั้นเปอร์เซ็นต์การตกตะกอนเท่ากับ 9.15 %

x/m = ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของถ่านกระดูก (มิลลิกรัม Cd/กรัมถ่านกระดูก)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-11 ผลการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของถ่านกระดูกที่เตรียมจากสัปดาห์
ซิงก์คลอไรด์ ต่อ กระดูกบดเป็น 1:1 พีเอช 7 และความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้น
10 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาณถ่าน 0.2 กรัม/ลิตรน้ำตัวอย่าง

เวลาเก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง : นาที)	พีเอช สุดท้าย	ความเข้มข้นน้ำเสียดสุดท้าย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)	x/m
3:00	7.00	6.16	39.37	20.00
6:00	7.00	5.72	43.70	22.20
8:00	7.01	5.68	44.09	22.40
12:00	7.02	5.68	44.09	22.40
24:00	7.01	5.34	47.44	24.10
36:00	7.01	5.44	46.46	23.60
48:00	7.02	5.12	49.61	25.20
60:00	7.03	5.14	49.41	25.10
72:00	7.03	5.13	49.51	25.15

เก็บตัวอย่างที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10.16 mg/l น้ำเสียด

เก็บตัวอย่างความเข้มข้นเริ่มต้น ณ.เวลาที่ 72 ชั่วโมงเท่ากับ 9.23 mg/l น้ำเสียด

ดังนั้นเปอร์เซ็นต์การตกตะกอนเท่ากับ 9.15 %

x/m = ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของถ่านกระดูก (มิลลิกรัม Cd/กรัมถ่านกระดูก)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-12 ผลการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของถ่านกระดูกที่เตรียมจากสัปดาห์
ซิงค์กลอไรด์ ต่อ กระดูกบดเป็น 1:1 พีเอช 7 และความเข้มข้นแควมเมียมเริ่มต้น
10 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาณถ่าน 0.1 กรัม/ลิตรน้ำตัวอย่าง

เวลาเก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง : นาที)	พีเอช สุดท้าย	ความเข้มข้นน้ำเสี่ยสุดท้าย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)	x/m
3:00	7.00	7.44	26.77	27.20
6:00	7.00	7.38	27.36	27.80
8:00	7.00	7.34	27.76	28.20
12:00	7.01	7.30	28.15	28.60
24:00	7.03	7.04	30.71	31.20
36:00	7.01	6.84	32.68	33.20
48:00	7.01	6.51	35.93	36.50
60:00	7.03	6.96	31.50	32.00
72:00	7.03	6.95	31.59	32.10

เก็บตัวอย่างที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10.16 mg/l น้ำเสี่ย

เก็บตัวอย่างความเข้มข้นเริ่มต้น ณ.เวลาที่ 72 ชั่วโมงเท่ากับ 9.23 mg/l น้ำเสี่ย

ดังนั้นเปอร์เซ็นต์การตกตะกอนเท่ากับ 9.15 %

x/m = ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของถ่านกระดูก (มิลลิกรัม Cd/กรัมถ่านกระดูก)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-13 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแคดเมียมของถ่านกระดุกที่เตรียมจากสัคส่วน
ซิงก์คลอไรด์ ต่อ กระดุกบดเป็น 1:1 ปริมาณต่างๆ พีเอช 7 และความเข้มข้น
แคดเมียมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ที่สภาวะสมดุล

C_0	x	m	x/m	1/(x/m)	C_e	1/ C_e	log(x/m)	log(C_e)
9.23	2.28	0.10	22.80	0.0439	6.95	0.14	1.36	0.84
9.23	4.1	0.20	20.50	0.0488	5.13	0.19	1.31	0.71
9.23	6.62	0.40	16.55	0.0604	2.61	0.38	1.22	0.42
9.23	7.67	0.60	12.78	0.0782	1.56	0.64	1.11	0.19
9.23	8.25	0.80	10.31	0.0970	0.98	1.02	1.01	-0.01
9.23	8.38	0.90	9.31	0.1074	0.85	1.18	0.97	-0.07

- C_0 ความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้น (มิลลิกรัม/ลิตร)
 C_e ความเข้มข้นของแคดเมียมที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)
x ความเข้มข้นของแคดเมียมที่ถูกกำจัด (มิลลิกรัม/ลิตร)
m ปริมาณถ่านกระดุก (กรัม/ลิตรน้ำตัวอย่าง)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-14 ผลการศึกษาการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ต่อปริมาณซิงก์จากถ่านกระดูกซึ่งเตรียมจากสัดส่วนซิงก์กลอไรด์ ต่อ กระดูบดเป็น 1:1 ปริมาณ 0.06 กรัมต่อลิตร น้ำตัวอย่าง พีเอช 4 และความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 0, 50 มิลลิกรัม/ลิตร

เวลาเก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง : นาที)	ความเข้มข้นซิงก์ (มิลลิกรัม/ลิตร)		พีเอช สุดท้าย
	น้ำเสียตะกั่ว 0 มิลลิกรัม/ลิตร	น้ำเสียตะกั่ว 50 มิลลิกรัม/ลิตร	
3:00	3.50	4.50	4.03
6:00	3.50	4.45	4.03
12:00	3.65	4.55	4.04
24:00	3.60	4.30	4.05
36:00	3.65	4.40	4.05
48:00	3.70	4.70	4.06
60:00	3.80	5.05	4.06
72:00	3.80	5.00	4.08

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-15 ผลการศึกษาการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ ต่อปริมาณซิงก์จากถ่านกระดูก
ซึ่งเตรียมจากสัดส่วนซิงก์คลอไรด์ ต่อ กระจุกบดเป็น 1:1 ปริมาณ 0.8 กรัมต่อลิตร
น้ำตัวอย่าง พีเอช 7 และความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 0, 10 มิลลิกรัม/ลิตร

เวลาเก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง : นาที)	ความเข้มข้นซิงก์ (มิลลิกรัม/ลิตร)		พีเอช สุดท้าย
	น้ำเสียแคดเมียม 0 มิลลิกรัม/ลิตร	น้ำเสียแคดเมียม 50 มิลลิกรัม/ลิตร	
3:00	1.75	2.90	7.06
6:00	1.40	2.60	7.06
8:00	2.00	2.85	7.06
12:00	2.50	3.05	7.08
24:00	2.30	2.60	7.10
36:00	2.60	2.55	7.11
48:00	2.65	2.75	7.12
60:00	2.55	2.70	7.12
72:00	2.65	2.75	7.13

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายจักรพงษ์ แสนชัย เกิดวันที่ 21 พฤษภาคม 2520 ที่จังหวัดเชียงใหม่ สำเร็จการศึกษา ระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนปิ่นสร้อยแยดวิทยาลัย จังหวัดเชียงใหม่ สำเร็จการศึกษาปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน เมื่อปีการศึกษา 2542 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรม ศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2546



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย