

ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและอาร์เซนิกในน้ำเสียด้วยถ่านกระดุก



นางสาวสุชาดา สุทธิพิบูลย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6485-5

ลิขสิทธิ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REMOVAL EFFICIENCY OF LEAD AND ARSENIC FROM WASTEWATER

BY BONE CHARCOAL



Miss Suchada Suttipiboon

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science in Environmental Science (Inter-Departmental)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-17-6485-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและอาร์เซนิกในน้ำเสียด้วยถ่านกระดุก
โดย นางสาวสุชาดา สุทธิพิบูลย์
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ อรทัย ชวาลภาฤทธิ์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ม.ร.ว. ภัทยา ติงศภัทิย์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โฉมิตานนท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมใจ เพ็งปรีชา)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ฐเรศ ศรีสถิตย์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุชาดา สุทธิพิบูลย์ : ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและอาร์เซนิกในน้ำเสียด้วยถ่านกระดูก (REMOVAL EFFICIENCY OF LEAD AND ARSENIC FROM WASTEWATER BY BONE CHARCOAL) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ อรทัย ชวาตภาฤทธิ์, 148 หน้า. ISBN 974-17-6485-5

งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกระดูกที่ใช้เป็นสารดูดซับ ในการกำจัดโลหะหนัก 2 ชนิดจากน้ำเสียสังเคราะห์ ได้แก่ ตะกั่ว (Pb) และ อาร์เซนิก (As (V)) โดยถ่านกระดูกที่ใช้ในการทดลองมีการเตรียมแตกต่างกัน 4 สภาวะ และทำการทดลองแบบแบทช์ เพื่อศึกษาถึงสภาวะการเตรียมถ่านกระดูก และสภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดได้แก่ เวลาสัมผัส และพีเอชน้ำเสียเริ่มต้น ปริมาณถ่านกระดูก รวมถึงการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช และแบบแลงมัวร์ จากนั้นนำสภาวะการทดลองกำจัดตะกั่วที่เหมาะสมไปทำการศึกษา ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของถ่านกระดูกในน้ำเสียจริง โดยตัวแปรควบคุมที่ใช้ตลอดการทดลองแบบแบทช์คือ น้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นโลหะหนักเริ่มต้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาณน้ำเสียที่ใช้ทดลอง 25 มิลลิลิตร และความเร็วในการกวนผสม 250 รอบ/นาที

จากการศึกษาพบว่าถ่านกระดูกสามารถกำจัดตะกั่วได้ดีกว่าอาร์เซนิกมาก และเมื่อเพิ่มพีเอชน้ำเสียจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงขึ้นด้วย ซึ่งถ่านกระดูกสภาวะที่ 3 ที่เตรียมขึ้นจากการกระตุ้นด้วยสารละลาย NaOH ปริมาณถ่าน 20 มิลลิกรัม/ลิตรน้ำเสีย มีความเหมาะสมต่อการกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุดที่พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 6 ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงถึงร้อยละ 100 หรือคิดเป็นความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 401.65 มิลลิกรัมตะกั่ว/กรัมถ่าน และจากผลการวิเคราะห์โครงสร้างของถ่านกระดูกก่อนและหลังการทดลองแสดงให้เห็นว่า กระบวนการกำจัดนั้นเกิดจากการดูดซับตะกั่วโดยไฮดรอกซีอะพาไทต์ ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) เกิดเป็น $Ca_3Pb_7(PO_4)_6(OH)_2$ สำหรับถ่านสภาวะที่ 1 ที่ไม่ผ่านการกระตุ้นใด ๆ นั้นมีความเหมาะสมต่อการกำจัดอาร์เซนิกได้ดีที่สุด คือให้ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 13.76 หรือคิดเป็นความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 1.22 มิลลิกรัมอาร์เซนิก/กรัมถ่าน เมื่อปรับพีเอชน้ำเสียเท่ากับ 6 และจากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับพบว่า ถ่านกระดูกให้ลักษณะการดูดซับตะกั่วและอาร์เซนิกตามแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช สำหรับการทดลองใช้ถ่านกระดูกกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจริงที่มีความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้น 185 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่าสามารถกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจริงได้ถึงร้อยละ 94.33 เมื่อใช้ถ่านกระดูกในปริมาณ 50 มิลลิกรัม/ลิตร

สาขาวิชา.....วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม.....
ปีการศึกษา.....2547.....

ลายมือชื่อนิสิต.....สุชาดา สุทธิพิบูลย์.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....อรทัย ชวาตภาฤทธิ์.....

4589175520: MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORD: BONE CHARCOAL/ HYDROXYAPATITE/ ADSORPTION/ REMOVAL/
HEAVY METAL/ LEAD/ ARSENIC

SUCHADA SUTTIPIBOON: REMOVAL EFFICIENCY OF LEAD AND ARSENIC
FROM WASTEWATER BY BONE CHARCOAL. THESIS ADVISOR: ASSOC.
PROF. ORATHAI CHAVALPARIT, 148 pp. ISBN 974-17-6485-5

This study was conducted to determine the efficiency of heavy metals removal by bone charcoal. Two heavy metals (lead and arsenic) were used in performing batch experiments. The aims of batch experiments were to study effects of conditions for preparing bone charcoal (namely, untreated bone, acid-pretreated bone, alkaline-pretreated bone and activated bone charcoal), times, pH and amount of bone charcoal. Equilibrium studies have been analyzed using the Freundlich and Langmuir isotherm equation. And the aim of lead removal efficiency from industrial wastewater experiment was to study the efficiency of lead by bone charcoal for ensured that the final concentration of lead in wastewater complied with the industrial wastewater standards.

The batch experiment results showed lead was effectively removed by bone charcoal and lead removal efficiency was higher than arsenic. And, in term of initial pH values showed the removal efficiency is increased when the pH of wastewater increased. Considering the results of conditions for preparing bone charcoal that alkaline-pretreated bone had more lead removal efficiency than other bone charcoal, but, untreated bone was found to be the most appropriate bone charcoal to be used in arsenic removal. These showed adsorption capacity of lead on bone charcoal was 401.65 mg g^{-1} of bone charcoal (100% removal) at pH 6, using 20 mg L^{-1} . And adsorption capacity of arsenic on bone charcoal was 1.22 mg g^{-1} of bone charcoal (13.76% removal) at pH 6, using 1.0 g L^{-1} . The mechanism of lead removal was adsorb lead ion by hydroxyapatite ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) and formed structure of Ca-Pb phosphate hydroxide ($\text{Ca}_3\text{Pb}_7(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$). The adsorption isotherm for lead and arsenic fitted in the Frundlich isotherm. According to removal efficiency of lead from industrial wastewater experiment's results showed 94.33% of lead removal by bone charcoal were achieved at initial concentration of 185 mg L^{-1} when using more than 50 mg L^{-1} of bone charcoal.

Field of study Environmental Science Student's signature Suchada Suttiipiboon

Academic Year 2004 Advisor's signature Orathai Chavalparit

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องมาจากความช่วยเหลือของ รองศาสตราจารย์อรรถชัย ชวาลภาฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำความรู้ และช่วย แก้ไขข้อผิดพลาดต่าง ๆ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โฉมิตานนท์ รองศาสตราจารย์ ดร. สมใจ เพ็งปรีชา และรองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์ ที่กรุณาสละเวลามาเป็นคณะกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้าน ทุนอุดหนุนงานวิจัย และ โครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330 ที่ให้การสนับสนุนให้ใช้เครื่องมือ AAS ในการวิเคราะห์โลหะหนักสำหรับงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณภาควิชาสหสาขาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมีเทคนิค และภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อำนวยความสะดวก และ ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือวิจัยต่าง ๆ รวมถึงบริษัทอุตสาหกรรมกระดูก สัตว์ไทย สำหรับกระดูกป่นที่ใช้เป็นวัตถุดิบในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณพี่อู๋ และพี่สันติที่ให้ความรู้ คำแนะนำในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือ วิเคราะห์ต่าง ๆ ขอขอบคุณพี่เหนียวที่แบ่งตัวอย่างน้ำเสียจริงให้ และขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ ที่ให้กำลังใจ และความช่วยเหลือมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา เป็นอย่างสูง สำหรับกำลังใจ และทุนทรัพย์ ทางการศึกษาที่มีให้กับผู้วิจัยตลอดมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 โลหะหนัก.....	4
2.2 ตะกั่ว.....	5
2.3 อาร์เซนิก.....	11
2.4 กระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก.....	18
2.5 ถ่านกระดุก.....	35
2.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	38
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย.....	43
3.1 อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมี.....	43
3.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	44
3.3 ขั้นตอนการเตรียมถ่านกระดุก และน้ำเสียสังเคราะห์.....	46
3.4 การดำเนินการทดลอง.....	48
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	56
4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพ และ โครงสร้างของถ่านกระดุก.....	56
4.2 การศึกษาสภาวะการเตรียมถ่านกระดุก.....	65
4.3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับโลหะหนักด้วยถ่านกระดุก.....	83
4.4 การศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกระดุกเมื่อนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียจริง.....	97

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	104
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	104
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	106
รายการอ้างอิง.....	107
ภาคผนวก.....	111
ภาคผนวก ก.....	112
ภาคผนวก ข.....	117
ภาคผนวก ค.....	134
ภาคผนวก ง.....	143
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	148

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	Hazardous Waste Industries.....	4
ตารางที่ 2.2	ค่าคงที่การละลายของแร่ตะกั่ว.....	6
ตารางที่ 2.3	ชนิดและประโยชน์ของตะกั่วอนินทรีย์.....	6
ตารางที่ 2.4	รูปแบบของตะกั่วในน้ำ.....	8
ตารางที่ 2.5	ลักษณะสมบัติทางกายภาพของอาร์เซนิก.....	12
ตารางที่ 2.6	สปีชีส์ของอาร์เซนิกในแหล่งน้ำธรรมชาติที่ระดับพีเอชต่าง ๆ กัน.....	15
ตารางที่ 2.7	ปริมาณความเข้มข้นของอาร์เซนิกในน้ำที่ถึงจากกิจกรรมประเภทต่าง ๆ.....	17
ตารางที่ 2.8	ข้อดีและข้อจำกัดของกระบวนการตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ และผลึกซัลไฟด์.....	21
ตารางที่ 2.9	องค์ประกอบและสมบัติของถ่านกระดูกเชิงการค้า Brimac 216.....	36
ตารางที่ 2.10	ผลของความสามารถในการดูดซับอาร์เซนิกด้วยถ่านกัมมันต์.....	39
ตารางที่ 2.11	ผลของการเตรียมถ่านกระดูกด้วยกรดในตริกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	40
ตารางที่ 3.1	ผลของเวลาสัมผัสที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก.....	50
ตารางที่ 3.2	ผลของพีเอชน้ำเสียเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก.....	51
ตารางที่ 3.3	การศึกษาไอโซเทอมการดูดติดผิวด้วยถ่านกระดูกในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียสังเคราะห์.....	53
ตารางที่ 4.1	ความสามารถในการดูดซับของถ่านกระดูก และความเข้มข้นของไอโอดีนที่ภาวะสมดุล.....	64
ตารางที่ 4.2	ร้อยละการกำจัด และความเข้มข้นตะกั่วที่เหลือ ณ จุดสมดุล.....	86
ตารางที่ 4.3	ผลข้อมูลจากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับตะกั่ว.....	87
ตารางที่ 4.4	เปรียบเทียบความสามารถของถ่านกระดูกที่เตรียมขึ้นในสภาวะแตกต่างกันเพื่อใช้ในการดูดซับตะกั่วจากน้ำเสีย.....	90
ตารางที่ 4.5	ผลข้อมูลจากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับอาร์เซนิก.....	94
ตารางที่ 4.6	แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารดูดซับชนิดต่าง ๆ ในการดูดซับตะกั่วต่อความจุของสารดูดซับ.....	95
ตารางที่ 4.7	แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารดูดซับชนิดต่าง ๆ ในการดูดซับอาร์เซนิกต่อความจุของสารดูดซับ.....	96
ตารางที่ 4.8	ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียโรงงานผลิตตะกั่วแท่งด้วยถ่านกระดูกปริมาณต่าง ๆ ที่พีเอชน้ำเสียเท่ากับ 6.....	99

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	รูปแบบของตะกั่วในสารละลายที่พีเอชต่างๆ.....	9
รูปที่ 2.2	การกระจายของอาร์เซนิก As (III) และ As (V) กับค่าพีเอชในแหล่งน้ำธรรมชาติ....	16
รูปที่ 2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของสารละลายกับความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ และโลหะฟอสไฟด์.....	20
รูปที่ 2.4	การดูดติดผิวของโมเลกุลแบบหลายชั้นบนผิวของแข็ง.....	27
รูปที่ 2.5	ไอโซเทอมของการดูดติดผิวแบบพื้นฐาน.....	29
รูปที่ 2.6	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์.....	31
รูปที่ 2.7	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบเบเท.....	32
รูปที่ 2.8	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนลิช.....	34
รูปที่ 2.9	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของสารดูดซับชนิดต่าง ๆ โดยพิจารณาจากรูปแบบไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนลิช.....	34
รูปที่ 2.10	สูตรโครงสร้างของไฮดรอกซีอะพาไต์.....	36
รูปที่ 2.11	โครงสร้างผลึกของไฮดรอกซีอะพาไต์.....	37
รูปที่ 3.1	แผนภาพสรุปขั้นตอนการดำเนินการทดลองประสิทธิภาพการกำจัด โลหะหนักด้วยถ่านกระดุก.....	45
รูปที่ 3.2	แผนภาพสรุปขั้นตอนการเตรียมถ่านกระดุกสภาวะต่าง ๆ.....	47
รูปที่ 3.3	กรรมวิธีการผลิตโลหะตะกั่วแท่ง โดยใช้เตาหลอมแบบตั้ง และใช้ Na_2CO_3 เป็นฟลักซ์.....	55
รูปที่ 4.1	ลักษณะของเศษกระดุกสัตว์ที่เป็นวัตถุคิบในการทดลอง.....	56
รูปที่ 4.2	ลักษณะของถ่านกระดุกก่อนการนำไปใช้ทดลอง.....	57
รูปที่ 4.3	ภาพถ่ายของถ่านกระดุกสภาวะที่ 1 ด้วยเครื่อง SEM.....	60
รูปที่ 4.4	ภาพถ่ายของถ่านกระดุกสภาวะที่ 2 ด้วยเครื่อง SEM.....	60
รูปที่ 4.5	ภาพถ่ายของถ่านกระดุกสภาวะที่ 3 ด้วยเครื่อง SEM.....	61
รูปที่ 4.6	ภาพถ่ายของถ่านกระดุกสภาวะที่ 4 ด้วยเครื่อง SEM.....	61
รูปที่ 4.7	องค์ประกอบธาตุที่พบในถ่านกระดุก.....	62
รูปที่ 4.8	พีเอชน้ำเสียภายหลังการทดลองดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกระดุกที่เวลาต่าง ๆ.....	66
รูปที่ 4.9	ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 5 เวลาสัมผัส 180 นาทีด้วยถ่านกระดุกปริมาณต่าง ๆ.....	67

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.10 ร้อยละการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 5 เวลาสัมผัส 180 นาที ด้วย
ถ่านกระดูกปริมาณต่าง ๆ..... 68

รูปที่ 4.11 ผลของพีเอชน้ำเสียหลังการทดลองกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยถ่าน
กระดูกปริมาณต่าง ๆ ที่พีเอช 5 และเวลาสัมผัส 180 นาที..... 69

รูปที่ 4.12 ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อกำจัดด้วยถ่านกระดูก
ปริมาณ 20 มิลลิกรัม/ลิตรน้ำเสีย เวลาสัมผัส 180 นาที ที่พีเอชต่าง ๆ..... 70

รูปที่ 4.13 ร้อยละการกำจัดของตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 10
มิลลิกรัม/ลิตร ด้วยถ่านกระดูก ที่พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นต่าง ๆ..... 71

รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพของถ่านกระดูกในการดูดซับตะกั่วละลายที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์
ภายหลังจากการตกตะกอน ที่พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นต่าง ๆ..... 71

รูปที่ 4.15 ความสามารถในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อกำจัดด้วยถ่านกระดูก
ปริมาณ 20 มิลลิกรัม/ ลิตรน้ำเสีย เวลาสัมผัส 180 นาที ที่พีเอชต่าง ๆ..... 72

รูปที่ 4.16 รูปแบบของตะกั่วในสารละลายที่พีเอชต่าง ๆ..... 73

รูปที่ 4.17 ผลจากการวิเคราะห์ XRD ของการกำจัดตะกั่วด้วยถ่านกระดูกที่พีเอชน้ำเสียต่าง ๆ. 74

รูปที่ 4.18 ผลจากการวิเคราะห์ XRD ของการกำจัดตะกั่วด้วยถ่านกระดูกสถานะที่ 3 ที่พีเอช
น้ำเสียเท่ากับ 4..... 75

รูปที่ 4.19 ความเข้มข้นอาร์เซนิกที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ จากการกำจัดด้วยถ่านกระดูก
สถานะต่าง ๆ 1.0 กรัม/ ลิตรน้ำเสีย ที่เวลา 24 และ 48 ชั่วโมง..... 77

รูปที่ 4.20 ร้อยละการกำจัดอาร์เซนิกด้วยถ่านกระดูกสถานะต่าง ๆ ปริมาณ 1.0 กรัม/ลิตร
น้ำเสีย ที่เวลา 24 และ 48 ชั่วโมง..... 77

รูปที่ 4.21 ความสามารถในการดูดซับอาร์เซนิกด้วยถ่านกระดูกสถานะต่าง ๆ ปริมาณ 1.0
กรัม/ลิตร น้ำเสีย ที่เวลา 24 และ 48 ชั่วโมง..... 78

รูปที่ 4.22 ความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ปรับพีเอชน้ำเสียเริ่มต้น
ต่าง ๆ ด้วยถ่านกระดูก ปริมาณ 1.0 กรัม/ลิตรน้ำเสีย..... 79

รูปที่ 4.23 ร้อยละการกำจัดอาร์เซนิกที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ปรับพีเอชน้ำเสียเริ่มต้น
ต่าง ๆ ด้วยถ่านกระดูก ปริมาณ 1.0 กรัม/ลิตรน้ำเสีย..... 79

รูปที่ 4.24 ความสามารถในการดูดซับอาร์เซนิกในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอชน้ำเสียเริ่มต้น
ต่าง ๆ ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ 1.0 กรัม/ลิตรน้ำเสีย..... 80

รูปที่ 4.25 พีเอชน้ำเสียก่อนและหลังการทดลองกำจัดอาร์เซนิกด้วยถ่านกระดูก..... 81

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.26 ผลของ pH ต่อรูปแบบของสารประกอบอาร์เซนเนต.....	82
รูปที่ 4.27 ผลจากการวิเคราะห์ XRD ของการกำจัดอาร์เซนิกด้วยถ่านกระดูกสถานะที่ 1 ที่ พีเอชน้ำเสียเท่ากับ 6.....	82
รูปที่ 4.28 ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ จากการกำจัดด้วยถ่านกระดูก ปริมาณต่าง ๆ.....	84
รูปที่ 4.29 ร้อยละการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยถ่านกระดูกปริมาณต่าง.....	84
รูปที่ 4.30 ร้อยละการกำจัดเฉลี่ยของตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ ต่าง ๆ.....	85
รูปที่ 4.31 ความสามารถในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ของถ่านกระดูกปริมาณ ต่าง ๆ.....	86
รูปที่ 4.32 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของถ่านกระดูกสถานะที่ 3 ในการกำจัดตะกั่ว ออกจากรน้ำเสียสังเคราะห์.....	87
รูปที่ 4.33 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของถ่านกระดูกสถานะที่ 3 ในการกำจัดตะกั่ว ออกจากรน้ำเสียสังเคราะห์.....	88
รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช ในการทดลองใช้ถ่านกระดูก กำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์.....	89
รูปที่ 4.35 ความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ จากการกำจัดด้วยถ่าน กระดูกปริมาณต่าง ๆ.....	91
รูปที่ 4.36 ร้อยละการกำจัดอาร์เซนิกในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยถ่านกระดูกปริมาณต่าง ๆ.....	92
รูปที่ 4.37 ความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ ภายหลังจากกำจัดด้วยถ่าน กระดูกปริมาณต่าง ๆ ที่ภาวะสมดุล.....	92
รูปที่ 4.38 ร้อยละการกำจัดอาร์เซนิกในน้ำเสียสังเคราะห์ ภายหลังจากกำจัดด้วยถ่านกระดูก ปริมาณต่าง ๆ ที่ภาวะสมดุล.....	93
รูปที่ 4.39 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของถ่านกระดูกสถานะที่ 1 ในการกำจัด อาร์เซนิกออกจากรน้ำเสียสังเคราะห์.....	93
รูปที่ 4.40 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของถ่านกระดูกสถานะที่ 1 ในการกำจัด อาร์เซนิกออกจากรน้ำเสียสังเคราะห์.....	94

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.41 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลองใช้ถ่านกระดูกในการบำบัดน้ำเสียจริง ด้วยวิธี การตกตะกอนร่วมกับการดูดซับ.....	98
รูปที่ 4.42 ลักษณะสีของน้ำเสียจากโรงงานผลิตตะกั่วแห่งเมื่อปรับพีเอชเพิ่มขึ้นตามลำดับ.....	99
รูปที่ 4.43 ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือจากการทดลองกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจริงด้วยถ่าน กระดูกปริมาณต่าง ๆ.....	100
รูปที่ 4.44 ร้อยละการกำจัดของตะกั่วในน้ำเสียจริงด้วยถ่านกระดูกปริมาณต่าง ๆ.....	100
รูปที่ 4.45 ความสูงของตะกอนน้ำเสียที่กำจัดด้วยถ่านกระดูกปริมาตร 50 มิลลิกรัม/ลิตร น้ำเสีย ที่เวลาในการตกตะกอนนาน 20 นาที.....	102
รูปที่ 4.46 แผนภาพแสดงขั้นตอนการใช้ถ่านกระดูกในการบำบัดตะกั่วละลายจากน้ำเสียจริง..	103



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้ ปัญหาสำคัญที่ทั่วโลกสนใจและให้ความสำคัญปัญหาหนึ่งก็คือปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ทั้งทางน้ำ อากาศ ป่าไม้ ระบบนิเวศ เป็นต้น ผลกระทบที่เกิดขึ้น นอกจากจะเป็นการทำลายสถานะสมดุลของธรรมชาติแล้ว ยังส่งผลกลับมาสู่มนุษย์อีกด้วย สาเหตุหนึ่งของปัญหา คือการขยายตัวของอุตสาหกรรมหลายประเภท ซึ่งก่อให้เกิดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตที่ประกอบด้วยสารปนเปื้อนหลากหลายชนิด ขึ้นอยู่กับประเภทของอุตสาหกรรมนั้น ๆ สารปนเปื้อนสำคัญที่เป็นอันตราย และมีความเป็นพิษสูงต่อสิ่งมีชีวิต ได้แก่ โลหะหนักชนิดต่าง ๆ เนื่องจากโลหะหนักสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อน ได้ดีกับอ๊อน หรือ โมเลกุลที่ละลายอยู่ในน้ำ ทำให้ได้สารประกอบหลายชนิดที่มีความเป็นพิษรุนแรงต่างกันไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียให้มีปริมาณอยู่ในค่ามาตรฐานน้ำทิ้งก่อนระบายออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักจากโรงงานอุตสาหกรรมมีอยู่หลายวิธี เช่น การตกตะกอนทางเคมี การแลกเปลี่ยนอ๊อน หรือกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส เป็นต้น ซึ่งวิธีการต่าง ๆ เหล่านี้มีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักได้ดี แต่มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูง ตลอดจนต้องใช้เทคโนโลยี และการจัดการอย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับวิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมีที่นิยมใช้อยู่ในปัจจุบันนี้ แม้จะมีค่าใช้จ่ายไม่สูงมากนัก แต่พบว่าในบางครั้งยังไม่สามารถลดปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียให้ต่ำกว่ามาตรฐานที่ต้องการได้ ส่วนวิธีการบำบัดด้วยกระบวนการดูดติดผิวบนถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ก็ได้รับความนิยมสูงมากเช่นกัน เนื่องจากมีขั้นตอนการใช้งานที่ไม่ซับซ้อน และสามารถกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณเพียงเล็กน้อยในน้ำเสียได้ (Petercele และคณะ, 1999) แต่ก็ยังมีข้อเสีย เนื่องจากถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพนั้นเป็นวัสดุที่มีราคาสูง และต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ถึงแม้ว่าประเทศไทยจะสามารถผลิตขึ้นได้แต่ก็ยังไม่เพียงพอต่อความต้องการ โดยจากข้อมูลการนำเข้าถ่านกัมมันต์ของกรมศุลกากรในปี 2544 ประเทศไทยนำเข้าถ่านกัมมันต์ทั้งหมด 3,120,594 กิโลกรัม (156,116,706 บาท) และเพิ่มขึ้นเป็น 3,278,957 กิโลกรัม (145,201,933 บาท) และ 3,493,984 กิโลกรัม (145,810,837 บาท) ในปี 2545 และ 2546 ตามลำดับ (The Customs Department, 2004)

ดังนั้นหากสามารถหาวัสดุที่มีประสิทธิภาพและราคาถูกลงมาใช้ทดแทนได้ จะช่วยลดต้นทุนและเป็นทางเลือกให้กับผู้ประกอบการอีกทางหนึ่งด้วย ดังเช่นกระดูกสัตว์ที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม หรือโรงฆ่าสัตว์นั้น ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำกลับมาใช้ประโยชน์เพื่อกำจัดโลหะหนักโดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง และยังเป็นกรเพิ่มมูลค่าของเสียที่เกิดขึ้นได้ด้วย ทั้งยังมีประสิทธิภาพในการกำจัดได้ดี โดยพบว่าโครงสร้างของกระดูกมีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์ที่สำคัญคือไฮดรอกซีอะพาไทต์ (hydroxyapatite: HA) หรือแคลเซียมซัลเฟตรูปแบบหนึ่งที่มีสูตรทางเคมีเป็น $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ สำหรับการนำมาใช้งานนั้นจำเป็นต้องแปรสภาพให้อยู่ในรูปของถ่านกระดูกเสียก่อน ซึ่งเตรียมได้โดยการเผาเพื่อให้เกิดกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (carbonization) ที่อุณหภูมิสูง และสามารถนำมาใช้งานได้ทันทีโดยไม่ต้องใช้สารเคมีใดๆ ซึ่งความสามารถของถ่านกระดูกในการกำจัดโลหะหนัก หรือแม้กระทั่งสารปนเปื้อนชนิดอื่นที่ละลายอยู่ในน้ำนั้น เกิดจากองค์ประกอบของ HA ที่เป็นองค์ประกอบหลัก (70-76%) นั้นเอง ส่งผลให้โครงสร้างของถ่านกระดูกประกอบด้วยส่วนที่เป็นประจุบวก (cationic) และประจุลบ (anionic) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดกระบวนการดูดซับโลหะหนัก และสารปนเปื้อนบางชนิดได้ เช่น ตะกั่ว แคดเมียม คลอไรด์ ฟลูออไรด์ เป็นต้น สำหรับตัวอย่างการใช้ประโยชน์จากถ่านกระดูกที่พบอยู่ในปัจจุบันได้แก่ การใช้เป็นสารดูดซับพิษในอุตสาหกรรมอาหาร ใช้ในการกรองน้ำเพื่อลดปริมาณโลหะหนัก และสารปนเปื้อนอื่น รวมถึงการนำไปใช้กรองน้ำในสระว่ายน้ำอีกด้วย จากความสามารถของถ่านกระดูกนี้ จึงเป็นมูลเหตุจูงใจในการศึกษาการนำถ่านกระดูกมาใช้กำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสีย เพื่อเป็นทางเลือกในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียอุตสาหกรรมที่ไม่สามารถกำจัดโลหะหนักในกระบวนการบำบัดเบื้องต้นให้ตรงตามค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดไว้ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว และอาร์เซนิกด้วยถ่านกระดูกที่เตรียมขึ้นในสภาวะต่าง ๆ กัน
- 1.2.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสม ที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว และอาร์เซนิกด้วยถ่านกระดูก ได้แก่ เวลาในการสัมผัส พีเอช และปริมาณถ่านกระดูก
- 1.2.3 ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับตะกั่ว และอาร์เซนิกด้วยถ่านกระดูกโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้างต้น
- 1.2.4 ศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกระดูกในการกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตตะกั่วแห้ง

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 ทดลองกำจัดตะกั่วและอาร์เซนิกด้วยถ่านกระดุกที่เตรียมขึ้นแตกต่างกัน 4 สภาวะ ได้แก่
- ถ่านที่เตรียมจากกระบวนการเผาและนำมาใช้งานทันที
 - ถ่านที่เตรียมจากกระบวนการเผา และกระตุ้นด้วยสารละลายกรดไนตริก
 - ถ่านที่เตรียมจากกระบวนการเผา และกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
 - ถ่านที่เตรียมจากกระบวนการเผา กระตุ้นด้วยกรดไนตริก และเผาที่อุณหภูมิสูงก่อนนำมาใช้งาน
- 1.3.2 ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่ว และอาร์เซนิกจากน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้นโลหะหนักเริ่มต้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ด้วยถ่านกระดุกทั้ง 4 สภาวะ ได้แก่ เวลาในการสัมผัส พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นในช่วง 4-7 เพื่อให้สามารถเลือกใช้ถ่านกระดุกที่มีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับต่อไป
- 1.3.3 ทดลองใช้ถ่านกระดุกสภาวะที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดในการกำจัดตะกั่ว จากน้ำเสียโรงงานผลิตตะกั่วแท่ง ภายใต้สภาวะของเวลาสัมผัส พีเอช และปริมาณถ่านที่เหมาะสม ที่ได้จากการทดลองข้อ 1.3.2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 เป็นแนวทางหนึ่งในการเพิ่มมูลค่า และลดปริมาณของเสียจากโรงฆ่าสัตว์ หรืออุตสาหกรรมกระดุกสัตว์ โดยทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของถ่านกระดุก เพื่อช่วยให้สามารถใช้ถ่านกระดุกที่เตรียมจากวิธีการที่เหมาะสม ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการนำไปใช้งานได้
- 1.4.2 เป็นแนวทางเลือกหนึ่งให้ผู้ประกอบการสามารถเลือกใช้วัสดุที่มีประสิทธิภาพ และราคาถูกไปใช้ในกระบวนการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียอุตสาหกรรมได้
- 1.4.3 พัฒนาถ่านกระดุกที่มีประสิทธิภาพกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โลหะหนัก

โลหะหนัก (heavy metal) หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5.0 ขึ้นไป แต่ไม่รวมถึงโลหะที่เป็นแอลคาไล (alkali) และโลหะแอลคาไลน์เอิร์ท (alkaline earth) โดยทั่วไปบรรจุอยู่ในคาบที่ 4-7 ของตารางธาตุ และมีเลขออกซิเดชัน (oxidation number) ในช่วง 2-9 เช่น ตะกั่ว (Pb) ปรอท (Hg) อาร์เซนิก (As) แคดเมียม (Cd) เป็นต้น คุณสมบัติของโลหะหนักทางกายภาพที่มีความคล้ายคลึงกันคือมีสภาพเป็นของแข็ง ยกเว้นปรอทที่มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ สามารถนำความร้อนได้ดี มีความมันวาว และนำมาตีเป็นแผ่นบาง ๆ ได้ ส่วนคุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญคือมีเลขอะตอมได้หลายค่า ทำให้สามารถรวมตัวกับสารอื่นเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายรูปที่เสถียรกว่าโลหะอิสระ โดยเฉพาะการรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (organometallic compound) สำหรับการปนเปื้อนของโลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อมนั้น ส่วนมากเกิดจากการปลดปล่อยออกมาจากอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และแพร่กระจายเข้าสู่แหล่งดิน น้ำ อากาศ และผลผลิตทางการเกษตร ผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร จนกระทั่งเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ ซึ่งจะ ส่งผลต่อเมตาโบลิซึมของเซลล์สิ่งมีชีวิต (จันทนา สงวนรุ่งวงศ์, 2539)

ตารางที่ 2.1 วัตถุอันตรายจากอุตสาหกรรมต่าง ๆ (Hazardous Waste Industries) (Nemerow และ Dasgupta, 1991)

อุตสาหกรรม	วัตถุอันตราย
Mining and Metallurgy	As, Cd, Cr, Cu, Cn, Pb, Hg, Se, Zn
Paint and Dye	Cd, Cr, Cu, Cn, Pb, Hg, Organics, Se
Pesticide	As, Cl-hydrocarbons, Cn, Pb, Hg, Organics, Zn
Electrical and Electronic	Cu, Cl-hydrocarbons, Cn, Pb, Hg, Se
Printing and Duplicating	As, Cr, Cu, Pb, Organics, Se
Electroplating-Metal Finishing	Cd, Cr, Cu, Cn, Zn
Chemical Manufacturing	Cl-hydrocarbons, Cr, Cu, Pb, Hg, Organics

ตารางที่ 2.1 วัตถุอันตรายจากอุตสาหกรรมต่าง ๆ (Hazardous Waste Industries) (ต่อ)

อุตสาหกรรม	วัตถุอันตราย
Explosives	As, Cu, Pb, Hg
Rubber and Plastic	Cl-hydrocarbons, Cn, Hg, Organics, Zn
Battery	Cd, Pb, Ag, Zn
Pharmaceutical	As, Hg, Organics
Textile	Cr, Cu, Organics
Petroleum and Coal	As, Cl-hydrocarbons, Pb
Pulp and Paper	Hg, Organics
Leather	Cr, Organics

2.2 ตะกั่ว

2.2.1 สมบัติทางกายภาพและเคมี

ตะกั่ว (lead) แทนด้วยสัญลักษณ์ Pb พบได้ทั่วไปในธรรมชาติ โดยมากพบอยู่ 4 ไอโซโทป ได้แก่ Pb-204, 206, 207 และ 208 (World Health Organization, 1977) แต่ชนิดที่เสถียรที่สุดคือ Pb-208 โลหะตะกั่วจัดเป็นธาตุทรานซิชัน (transition) บรรจุอยู่ในหมู่ที่ 4A ของตารางธาตุ มีรัศมีอะตอม 154 พิกโตเมตร และรัศมีไอออน M^{2+} เท่ากับ 120 พิกโตเมตร เป็นโลหะที่มีความอ่อนตัว สามารถตัดหรือรีดได้ง่าย ทนต่อการกัดกร่อนและเฉื่อยต่อปฏิกิริยาทางเคมี มีน้ำหนักอะตอม 207.2 และเลขอะตอม 82 ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 11.34 จุดหลอมเหลว $327^{\circ}C$ และจุดเดือด $1704^{\circ}C$ ใช้พลังงานการแตกตัวเป็นไอออนขั้นที่ 1+2 เท่ากับ 2,167 กิโลจูล/โมล และขั้นที่ 1+2+3+4 เป็น 9,330 กิโลจูล/โมล มีสภาพไฟฟ้าลบเท่ากับ 1.55 สามารถเกิดเป็นสารประกอบได้หลายชนิด เช่น ออกไซด์ของตะกั่วซึ่งพบได้หลายรูปคือ ตะกั่วโมโนออกไซด์ (PbO), ตะกั่วไดออกไซด์ (PbO₂) และ ตะกั่วไตรออกไซด์ (PbO₃) เป็นต้น หรือการรวมตัวกับโลหะชนิดอื่น

นอกจากนี้ตะกัวยังแสดงเลขออกซิเดชันได้หลายค่า แต่จะคงสภาพที่เสถียรในรูปของตะกั่ว +2 หรือ Pb^{2+} สำหรับสภาพการละลายนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของสารประกอบ โดยทั่วไปพบว่าเกลือของตะกั่วไม่สามารถละลายได้ในน้ำ แต่ละลายได้ในเบสเกิดเป็นพ्लัมไบต์ (plumbite: $Pb(OH)_4^{2-}$) ยกเว้นอะซิเตต และไนเตรทที่ละลายในน้ำได้ เกิดเป็นไอออนของ Pb^{2+} ในรูป

ที่ถูกไฮดรอกไซด์หรือ $Pb^{2+}_{(aq)}$ ส่วนแร่ตะกั่วทั่วไปจะพบในรูปที่มีเลขออกซิเดชัน +2 และ +4 โดยพบมากในลักษณะของสารประกอบซัลไฟด์รูปแบบต่าง ๆ ที่สำคัญ ได้แก่ ตะกั่วซัลไฟด์ หรือ กาลีนา (galena: PbS) ตะกั่วคาร์บอเนต หรือเซอร์ไรต์ (cerussite: $PbCO_3$) และตะกั่วซัลเฟต หรือ แองกลีไซต์ (anglesite: $PbSO_4$) ซึ่งแร่ตะกั่วทั้ง 3 ชนิด มีค่าคงที่การละลาย (K_s) แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าคงที่การละลายของแร่ตะกั่ว (อุบลรัตน์ วาริชวัฒนะ, 2544)

แร่ตะกั่ว	ค่าคงที่การละลาย (K_s)
กาลีนา	1.1×10^{-29}
เซอร์ไรต์	1.5×10^{-13}
แองกลีไซต์	1.8×10^{-8}

2.2.2 ประเภทของสารตะกั่ว

ตะกั่วที่นำมาใช้ในวงการอุตสาหกรรมทั่วไปมีอยู่ 2 ประเภท หลัก ๆ คือ

- 1) สารประกอบอนินทรีย์ของตะกั่ว สารประกอบชนิดนี้มีอยู่หลายชนิด ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ชนิดและประโยชน์ของตะกั่วอนินทรีย์ (จุลสารข้อมูล คปอศ., 2535)

ชนิดของตะกั่วอนินทรีย์	ประโยชน์
1. โลหะตะกั่ว	- ใช้ผสมในแท่งโลหะผสม หรือผงเชื่อมบัดกรีโลหะ
2. ออกไซด์ของตะกั่ว ได้แก่	
- ตะกั่วโมโนออกไซด์	- ใช้เป็นสารสีเหลืองผสมทาสีบ้าน
- ตะกั่วไดออกไซด์	- ใช้ทำเป็นขั้วอิเล็กโทรดของแบตเตอรี่รถยนต์ และเครื่องจักร
- ตะกั่วออกไซด์หรือตะกั่วแดง	- ใช้เป็นสีทาโลหะเพื่อป้องกันสนิม

ตารางที่ 2.3 ชนิดและประโยชน์ของตะกั่วอินทรีย์ (ต่อ)

ชนิดของตะกั่วอินทรีย์	ประโยชน์
3. สารประกอบของเกลือตะกั่ว	
- ตะกั่วคาร์บอเนต	- ใช้เป็นแม่สี หรือสีผสมในอุตสาหกรรมการทำสี โดยผสมกับตะกั่วไฮดรอกไซด์ รวมเรียกว่า ตะกั่วขาว
- ตะกั่วโครเมต หรือ Chrome yellow	- ใช้เป็นแม่สี หรือสีผสมในอุตสาหกรรมการทำสี
- ตะกั่วอาร์เซนเนต	- ใช้เป็นยาฆ่าแมลงและปราบศัตรูพืช
- ตะกั่วซิลิเกต	- ใช้ผสมในกระเบื้อง เครื่องเคลือบ หรือเซรามิก เพื่อให้เกิดความเงางามและมีผิวเรียบ

2) สารประกอบอินทรีย์ของตะกั่ว ใช้เป็นสารประกอบตะกั่วในน้ำมัน เช่น สารเตตระเอทิลเลด ($Pb(C_2H_5)_4$) ที่ใช้เป็นสารกันน็อค เพื่อป้องกันการกระตุกของเครื่องยนต์ในเวลาทำงาน ทำให้ค่าออกเทนของน้ำมันสูงขึ้น จึงใช้ผสมในน้ำมันเบนซิน โดยสารประกอบอินทรีย์ของตะกั่วจะมีความเป็นพิษมากกว่าตะกั่วอินทรีย์ เพราะเป็นสารที่ระเหยได้ง่าย และคงตัวอยู่เป็นไอในอากาศ เมื่ออยู่ในสถานะของเหลวจะสามารถซึมผ่านผิวหนังได้ หากถูกเผาไหม้ในเครื่องยนต์จะถูกเปลี่ยนเป็นตะกั่วอินทรีย์ในสภาพของอนุภาคปนออกมากับไอเสียรถยนต์

2.2.3 เคมีของตะกั่วในน้ำ

ตะกั่วที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำธรรมชาตินั้นสามารถพบได้หลายรูปแบบ ซึ่งอาจอยู่ในรูปของสารละลาย หรือตะกอนของตะกั่วก็ได้ ดังตารางที่ 2.4

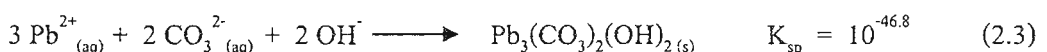
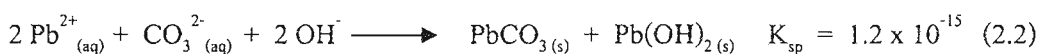
ตารางที่ 2.4 รูปแบบของตะกั่วในน้ำ (Harrison และ Laxen, 1981 อ้างถึงใน ลลิตา, 2544)

size	←———— 1 nm ———— 10 nm ———— 100 nm ———— 1000 nm						
	soluble			colloidal		particulate	
metal species	free metal ions	inorganic ion pairs: organic chelates	organic complexes	metal species bound to high molecular weight organic material	metal species absorbed on colloids	metal incorporated with organic particles and remains of living organisms	mineral solids: adsorbed on solids: precipitates and coprecipitates
example	Pb ²⁺	PbHCO ₃ ⁺ , Pb-EDTA	Pb-fulvic acid	Pb-humic acids	Pb-Fe(OH) ₃ , Pb-MnO ₂	Pb-organic solids	Pb-clay, PbCO _{3(s)}

นอกจากนี้ตะกั่วที่ปนเปื้อนในน้ำที่มีองค์ประกอบทางเคมีต่างกัน เช่น โมเลกุลของสารอื่นที่ละลายอยู่ในน้ำ หรือค่าพีเอช จะส่งผลให้เกิดกลไกทางเคมี และชนิดของตะกั่วได้หลายลักษณะ ดังนี้

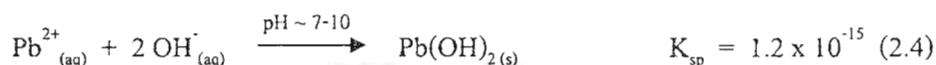
- ตะกั่วในน้ำที่มีคาร์บอเนตไอออน (CO₃²⁻)

โดยทั่วไปในแหล่งน้ำธรรมชาติมักมีส่วนประกอบของ CO₃²⁻ ปนเปื้อนอยู่ด้วย ซึ่งอาจเกิดจากการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศลงสู่ผิวน้ำ หรือการไหลผ่านของแหล่งน้ำไปตามแนวของหินปูนทำให้เกิดการชะละลายของ CO₃²⁻ ออกมา ส่งผลให้ตะกั่วเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของตะกั่วคาร์บอเนต (PbCO₃) ดังสมการ

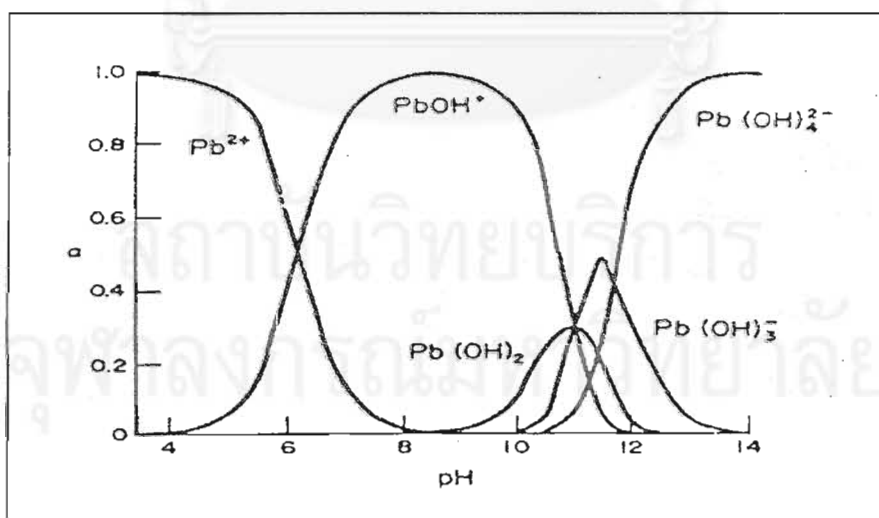
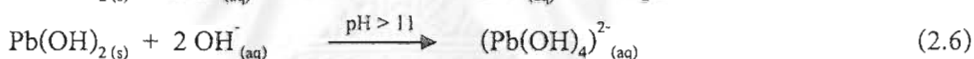
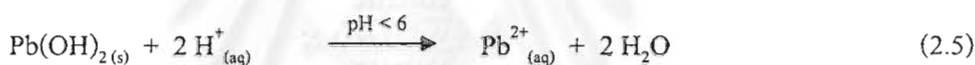


● ตะกั่วในน้ำที่มีค่าพีเอชแตกต่างกัน

เนื่องจากพีเอชของน้ำมีความสำคัญอย่างมากต่อรูปแบบของโลหะหนักซึ่งก็รวมถึง ตะกั่วด้วย โดยพบว่าตะกั่วในสารละลายที่พีเอชไม่สูงเกินไป (ประมาณ 7-10) จะส่งผลให้ ความสามารถในการละลายน้ำของสารประกอบตะกั่วลดลง และเกิดการตกตะกอนออกมา ในรูปของตะกั่วไฮดรอกไซด์ ($\text{Pb}(\text{OH})_2$) ดังนี้



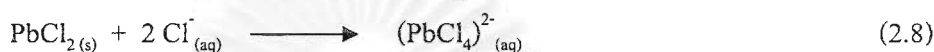
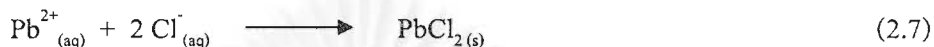
โดย $\text{Pb}(\text{OH})_2$ ที่เกิดขึ้นนี้ จัดเป็นสารที่มีสมบัติการละลายได้ทั้งในสถานะที่เป็นกรด และด่าง (amphoteric hydroxide) ดังนั้นที่ $\text{pH} < 6$ และ $\text{pH} > 11$ $\text{Pb}(\text{OH})_2$ จะละลายอยู่ในรูปของ Pb^{2+} และ $\text{Pb}(\text{OH})_4^{2-}$ ตามสมการที่ 2.5 และ 2.6 นอกจากนี้ยังสามารถพบสารประกอบตะกั่วได้ ในรูปแบบอื่นได้อีก เช่น $\text{Pb}(\text{OH})^+$ หรือ $\text{Pb}(\text{OH})_3^-$ แต่จะพบในอัตราส่วนที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับ ค่าพีเอชของสารละลายซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 รูปแบบของตะกั่วในสารละลายที่พีเอชต่าง ๆ (Fergusson, 1990)

● ตะกั่วในสารละลายกรดเกลือ

ในสารละลายกรดเกลือ รูปแบบของตะกั่วจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของกรดเกลือ นั้น โดยในสารละลายกรดเจือจาง (HCl dil.) ที่มีปริมาณของคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) ไม่สูงนัก จะพบสารประกอบตะกั่วในรูปของตะกอน PbCl₂ แต่หากสารละลายกรดเกลือมีความเข้มข้นสูงขึ้น จนกระทั่งมากเกินไป ตะกอน PbCl₂ ที่เกิดขึ้นจะละลายและเกิดเป็น (PbCl₄)²⁻ ดังสมการที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ



2.2.4 พิษวิทยาของตะกั่ว (จุดสารข้อมูล คปอส, 2535)

2.2.4.1 การดูดซึม

1) *ทางปาก* ซึ่งอาจมาจากอาหาร นุหรี หรือจากที่อื่น ๆ ที่เจือปนมากับภาชนะ โดยประมาณร้อยละ 5-10 ของตะกั่วที่เข้าทางปาก จะถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย ซึ่งในเด็กจะดูดซึมได้ดีกว่าผู้ใหญ่ (ประมาณร้อยละ 40) ในภาวะที่ท้องว่าง หรือได้รับอาหารที่ขาดธาตุแคลเซียม เหล็ก และทองแดง หรือมีสารฟอสเฟตต่ำจะทำให้ตะกั่วถูกดูดซึมได้ดีขึ้น

2) *ทางการหายใจ* ถ้าหายใจเอาควันหรือฟุ้งของตะกั่วที่หลอมเหลวเข้าไป เช่น การหลอมตะกั่วหรือการเชื่อมโลหะ การดูดซึมจะเร็วมาก แต่ถ้าหายใจเอาตะกั่วที่เป็นอนุ (particle) เล็ก ๆ เข้าไป เช่น จากสีเก่าที่หลุดออกมา การดูดซึมจะช้าลง โดยทั่วไปร้อยละ 35-50 ของตะกั่ว จะถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือด อาการที่เกิดขึ้นมักรวดเร็วและรุนแรง

3) *ทางผิวหนัง* ตะกั่วอินทรีย์ถูกดูดซึมเข้าได้ในผิวหนังปกติ ส่วนตะกั่วอนินทรีย์ ในรูปสารละลายจะซึมผ่านไม่ได้ ยกเว้นมีรอยแผลหรือรอยดลอกบนผิวหนัง

2.2.4.2 ชนิดของโรคพิษตะกั่ว

ตะกั่วเป็นโลหะหนักที่มีความเป็นพิษสูง และอาจเกิดอันตรายถึงขั้นเสียชีวิตได้ ถ้าสิ่งมีชีวิตนั้นรับตะกั่วสะสมเข้าสู่ร่างกายในปริมาณสูงเกินความสามารถที่ร่างกายจะทนทานได้ โดยชนิดของโรคพิษตะกั่วแบ่งได้เป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ

1) โรคพิษตะกั่วเฉียบพลัน เกิดในผู้ที่ได้รับตะกั่วครั้งแรก ๆ ในปริมาณมาก ส่วนใหญ่พบในกลุ่มของผู้หลอมตะกั่ว อาการในเด็กเล็กจะปวดท้องอย่างรุนแรง ชัก และอาจถึงขั้นเสียชีวิต ในผู้ใหญ่จะมีอาการคอแห้ง กระหายน้ำ ปวดแสบปวดร้อนในท้อง คลื่นไส้ และอาเจียนร่วมด้วยได้ ถ้าตรวจตะกั่วในเลือดจะพบว่าปริมาณตะกั่วสูงมากถึง 60 ไมโครกรัม ต่อเลือด 100 ซีซี

2) โรคพิษตะกั่วเรื้อรัง เป็นโรคที่พบบ่อยมากกับกลุ่มบุคคลที่ทำงานในอุตสาหกรรม อิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ การทำไอซี ดิสก์ และแผงวงจรรวมฟิวเตอร์ เป็นต้น เนื่องจากผู้รับตะกั่วจะได้รับในปริมาณน้อยแต่ในระยะเวลาที่ยาวนาน ซึ่งสามารถพบปริมาณตะกั่วในกระแสเลือดไม่สูงนัก อาจพบได้ตั้งแต่ 10 ไมโครกรัม ต่อเลือด 100 ซีซี โรคพิษตะกั่วชนิดนี้เป็นปัญหาสำคัญในผู้ทำงาน และผู้ที่อยู่อาศัยในเมืองที่มีมลพิษจากน้ำมันที่มีตะกั่ว หรือบริเวณเหมืองแร่ตะกั่ว โดยอาการที่พบบ่อยคือ อาการของระบบย่อยอาหาร ทำให้เกิดอาการปวดท้อง น้ำหนักลด เบื่ออาหาร คลื่นไส้ อาเจียน ท้องผูก และอาการพิษทางประสาทและสมอง ทำให้เสียการทรงตัว เกิดอาการประสาทหลอน เชื่องซึม ชัก มือเท้าตก เป็นอัมพาต สลบ และอาจเสียชีวิตได้

2.3 อาร์เซนิก

2.3.1 สมบัติทางกายภาพและเคมี

อาร์เซนิก (arsenic: As) หรือสารหนู จัดเป็นธาตุกลุ่มทรานซิชัน บรรจุอยู่ในหมู่ 5 ของตารางธาตุ มีน้ำหนักอะตอม 74.9216 เลขอะตอม 33 และมีเลขรหัสสารซึ่งใช้ประกอบใน Material Safety Data Sheet (MSDS) คือ CAS-No. 7440-38-2 และ UN 1588 โดยสมบัติทางกายภาพของอาร์เซนิกแสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ลักษณะสมบัติทางกายภาพของอาร์เซนิก (Hampel, 1968)

น้ำหนักอะตอม	74.9216
เลขอะตอม	33
โครงสร้างผลึก	รอมโบฮีดรอล (rhombohedral)
สีผิว	เทา
ความถ่วงจำเพาะ	5.7 (crystalline) 2.0 (yellow cubic) 3.7 (black amorphous)
จุดหลอมละลาย	817 °C (28 atm)
จุดเดือด	613 °C (V.P. 1 atm)
ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย	88.5 cal/g
ความร้อนแฝงของการเดือด	102 cal/g
ความร้อนจำเพาะ	0.082 cal/g (20 °C)
สัมประสิทธิ์การขยายตัว	4.7 X 10 in/C (20 °C)
ความต้านทานไฟฟ้า	33.3 μ-cm (20 °C)
ความแข็งตามมาตรา Brinell	147

อาร์เซนิกเป็นสารที่แสดงสมบัติความเป็นโลหะและอโลหะได้ มีเลขออกซิเดชันได้หลายค่าคือ -3, 0, +3 และ +5 แต่ในธรรมชาติส่วนใหญ่จะพบอยู่ในรูป +3 และ +5 และสามารถเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชันระหว่างกันได้ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน (oxidation and reduction process) นอกจากนี้ อาร์เซนิกยังสามารถระเหยได้เร็วมากที่อุณหภูมิ 450 °C และเมื่อไอของอาร์เซนิกเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดเป็นสีเหลือง และไม่มีสมบัติความเป็นโลหะอีกต่อไป แต่จะเปลี่ยนกลับไปเป็นสีน้ำเงินแกมเทา หรือสีดำก็ต่อเมื่อได้รับแสงอุลตราไวโอเลตภายในระยะเวลาอันสั้น สำหรับสมบัติทางกายภาพและเคมีนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะของสารประกอบอาร์เซนิกแต่ละประเภทด้วย

2.3.2 ประเภทของอาร์เซนิก

อาร์เซนิกสามารถพบได้ 3 รูป ได้แก่

- 1) รูปของธาตุหรือโลหะ (*element or metallic arsenic*)
- 2) รูปของสารประกอบ (*arsenic compounds*) ซึ่งอาจพบทั้งในรูปของสารประกอบอนินทรีย์ (*inorganic arsenic*) และสารประกอบอินทรีย์ (*organic arsenic*)
- 3) รูปของก๊าซอาร์ซีน (*arsine: AsH₃*)

อาร์เซนิกที่พบในธรรมชาติโดยทั่วไปพบอยู่ในรูปของสารประกอบมากกว่าธาตุอิสระ ซึ่งจะสะสมตัวอยู่ตามแร่ธาตุต่าง ๆ ในรูปของอาร์เซไนด์ (*arsenide*) ของโลหะ เช่น ทองแดง นิกเกิล เหล็ก และโคบอลต์ เป็นต้น และพบในรูปของอาร์เซนิกซัลไฟด์ (*arsenic sulfide*) ได้แก่ รีอัลการ์ (*realgar: As₄S₄*) และออร์พิเมนต์ (*orpiment: As₂S₃*) เป็นต้น หรืออาจพบในรูปของสารประกอบออกไซด์ ส่วนอาร์เซนิกในน้ำมักพบอยู่ในรูปของอาร์เซไนด์ (*arsenite*) ที่มีเลขออกซิเดชัน +3 หรืออาร์เซเนต (*arsenate*) ที่มีเลขออกซิเดชัน +5 และในด้านอุตสาหกรรมจะพบอาร์เซนิกที่สำคัญในรูปของอาร์เซนิกไตรออกไซด์ (*arsenic trioxide: As₂O₃*) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการถลุงแร่ทองแดงและตะกั่ว

2.3.3 เคมีของอาร์เซนิกในธรรมชาติ

2.3.3.1 ปฏิกริยาทางเคมีของอาร์เซนิกในธรรมชาติ

อาร์เซนิกจะคงรูปอยู่ที่เลขออกซิเดชัน -3, 0, +3 และ +5 โดย As (V) เกิดจากกระบวนการออกซิเดชัน ส่วนที่มีเลขออกซิเดชัน -3, 0 และ +3 เกิดจากกระบวนการรีดักชัน แต่ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปที่เป็นบวก และสามารถเปลี่ยนไปในรูปอื่นได้ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมนั้น ๆ ซึ่งสามารถอธิบายกระบวนการเกิดปฏิกริยาเคมีของอาร์เซนิกได้ดังนี้ (ฉาณเกษม เจริญผล, 2545)

● **กระบวนการรีดักชัน**

ในธรรมชาติ กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ โดยมากเกิดจากกระบวนการย่อยสลายในดินหรือหิน น้ำพุร้อน ไอระเหยจากภูเขาไฟ ซึ่งอาร์เซนิกที่ปะปนอยู่จะถูกสลายด้วยน้ำที่มีสถานะเป็นเบส เกิดเป็นอาร์เซนิกที่อยู่ในรูป As (III) เช่น กรดอาร์เซนิค (arsenous acid: H_3AsO_3) อาร์เซนิกไตรคลอไรด์ (arsenic trichloride: $AsCl_3$) หรืออาร์เซนิกไตรซัลไฟด์ (arsenic trisulfide: As_2S_3) เป็นต้น จากนั้นสารประกอบเหล่านี้จะสลายตัวอย่างรวดเร็วภายใต้สภาวะที่เป็นกรดและเบส เคลื่อนที่ไปตามลำน้ำ และเกิดการตกตะกอนหรือสะสมอยู่กับตะกอนของท้องน้ำได้ นอกจากนี้สารประกอบอาร์เซนิกบางชนิดสามารถเคลื่อนตัวอยู่ในรูปของคอมเพล็กซ์ที่เป็นไอออนบวก ซึ่งเมื่อเจอกับอนุภาคของสารละลายที่มีไอออนลบจะเกิดปฏิกิริยาและตกตะกอนตามผิวหน้าดิน หรือท้องน้ำได้ ในกระบวนการรีดักชัน As (V) สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมี หรือชีวภาพกลับเป็นสารประกอบ As (III) ได้ แต่จะเปลี่ยนเป็น As (0) ได้ยาก

● **กระบวนการออกซิเดชัน**

เกิดจากกระบวนการสุกของหินที่มีอาร์เซนิกปะปนอยู่ โดยจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสภาพแวดล้อมที่มีออกซิเจนและน้ำ ทำให้เกิดสารประกอบอาร์เซเนต เช่น เกลือของกรดอาร์เซนิก (AsO_4^{3-}) และถ้าสภาพแวดล้อมเป็นกรด หรือค่อนข้างเป็นกรด สารประกอบอาร์เซเนตจะเคลื่อนที่ไปได้ไกล แต่ถ้าสภาพแวดล้อมเป็นเบสหรือเป็นกลาง สารประกอบอาร์เซเนตจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) โดยการตกตะกอนร่วมกับออกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียม และเมื่อสารประกอบอาร์เซเนตซึมผ่านไปยังบริเวณที่มีอนุภาคของแร่บางชนิด ดินโคลน หรือเจลลี่สามารถเกิดการดูดซับ และเกิดคีเลชัน (chelation) ทำให้เกิดการตกตะกอน และถ้าบริเวณนั้นมีสารประกอบอินทรีย์พวกฮิวมิก (humic) สะสมอยู่ จะเกิดการตกตะกอน โดยกระบวนการการรวมตัวกับสารอินทรีย์ (organic binding) As (O) ส่วนมากจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแล้วเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ As (III) มากกว่าในรูป As (V) โดยมีออกซิเจนเป็นปัจจัยในการเปลี่ยนแปลง สำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของ As (III) ส่วนใหญ่จะเกิดในสารละลาย หรือในพวกจุลินทรีย์ แต่โดยปกติแล้ว As (III) จะไม่พบในธรรมชาติ มักจะถูกออกซิไดซ์ไปอยู่ในรูปที่มีเลขออกซิเดชัน 0 หรือ +5 ตัวอย่างของสารประกอบอาร์เซนิกที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ได้แก่ $Fe(AsO_4) \cdot 2H_2O$, $Ni(AsO_4) \cdot 8H_2O$ และ H_3AsO_4

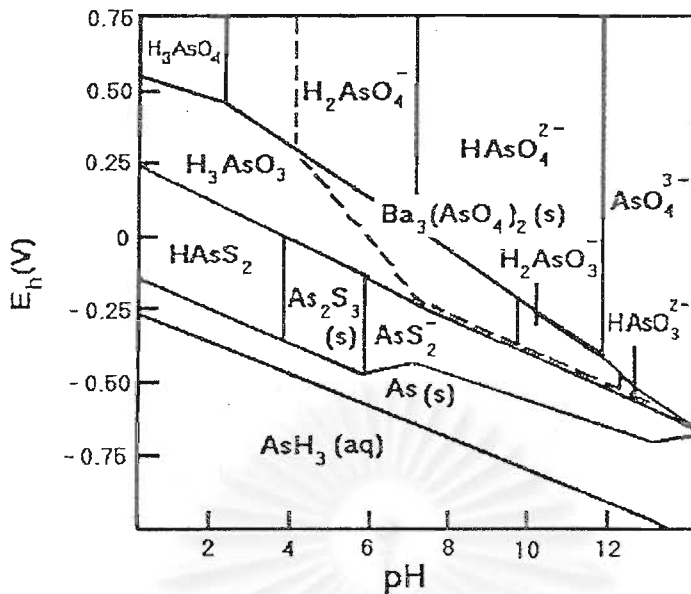
2.3.3.2 เคมีของอาร์เซนิกในน้ำธรรมชาติ

อาร์เซนิกในแหล่งน้ำธรรมชาติส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารประกอบอนินทรีย์ ซึ่งในน้ำที่มีออกซิเจนมักพบอยู่ในรูปของอาร์เซนเตหรือ As (V) ในรูปประจุลบ (anionic) ของเกลือของกรดอาร์เซนิกต่าง ๆ ได้แก่ H_2AsO_4^- ($\text{pK}_{a,2} = 6.97$), HAsO_4^{2-} ($\text{pK}_{a,3} = 11.53$) และ AsO_4^{3-} แต่ในรูปของอาร์เซไนต์หรือ As (III) นั้นพบค่อนข้างน้อย เนื่องจากจะคงรูปอยู่ในสภาวะแวดล้อมแบบไร้ออกซิเจน เช่น ในแหล่งน้ำบาดาล และจะพบอยู่ในรูปที่ไม่มีประจุ (nonionic) คือ H_3AsO_3 ($\text{pK}_{a,1} = 9.20$) และมีประจุเป็นลบ คือ H_2AsO_3^- ($\text{pK}_{a,2} = 12.13$) เป็นส่วนใหญ่ โดยสปีชีส์ของสารประกอบอาร์เซนิกในแหล่งน้ำธรรมชาตินั้นขึ้นอยู่กับช่วงของค่าพีเอช (Lackovic, 2000; Namasivayam, 1998; Raven, 1998 และ Wasay และคณะ, 1996) ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 สปีชีส์ของอาร์เซนิกในแหล่งน้ำธรรมชาติที่ระดับพีเอชต่าง ๆ กัน (Gupta และ Chen, 1978)

pH	As (III)	pH	As (V)
0-9	H_3AsO_3	0-2	H_3AsO_4
10-12	H_2AsO_3^-	3-6	H_2AsO_4^-
13	HAsO_3^{2-}	7-11	HAsO_4^{2-}
14	AsO_3^{3-}	12-14	AsO_4^{3-}

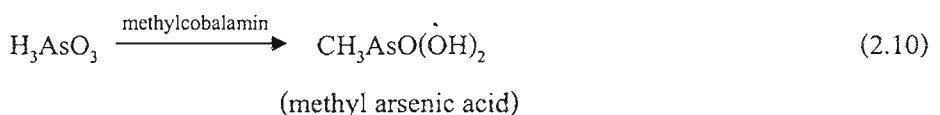
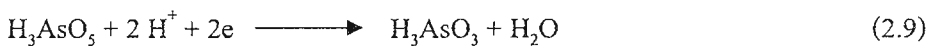
การเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชันหรือสปีชีส์ของอาร์เซนิกในแหล่งน้ำนั้น นอกจากจะขึ้นกับค่าพีเอชแล้วยังขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาเคมีอื่น ๆ ได้แก่ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันรีดักชัน กระบวนการตกผลึก กระบวนการดูดซับ การแลกเปลี่ยนลิแกนด์ (ligand exchange) หรือทั้งหมดร่วมกัน รวมถึงค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล (redoxpotential: E_h) โดยค่า E_h และการกระจายของ As (III) และ As (V) แต่ละสปีชีส์ในแหล่งน้ำกับค่าพีเอชมีความสัมพันธ์กันแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.2

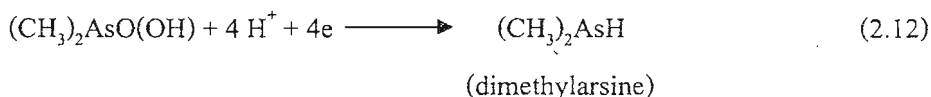
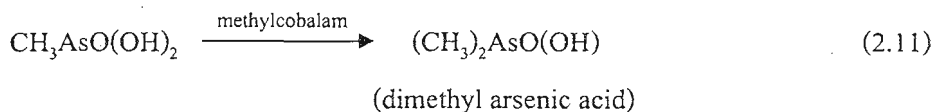


รูปที่ 2.2 การกระจายของอาร์เซนิก As (III) และ As (V) กับค่าพีเอชในแหล่งน้ำธรรมชาติ (Fergusson, 1989)

จากรูปพบว่ากรดอาร์เซเนียสเลขออกซิเดชัน +3 เป็นกรดอ่อนที่แตกตัวได้ต่ำ และจะพบ H_3AsO_3 ได้มากกว่าสปีชีส์อื่นในช่วงพีเอช 2-9 ในทางตรงกันข้ามกรดอาร์เซนิกเลขออกซิเดชัน +5 จะปรากฏในรูปกรดแก่และแตกตัวได้ดี และพบ $HAsO_4^{2-}$ ได้มากกว่าสปีชีส์อื่นในช่วงพีเอช 7-11.5 และ $H_2AsO_4^-$ พบได้มากที่พีเอชต่ำกว่า 7

นอกจากนี้ในแหล่งน้ำยังสามารถพบอาร์เซนิกในรูปของสารประกอบอินทรีย์ได้เช่นกัน ได้แก่ เมทิลเลทอาร์เซนิก (methylated arsenic) แต่พบในปริมาณน้อยมาก คือน้อยกว่า 1.0 ไมโครกรัม/ลิตร ซึ่งเกิดจากการสีกกร่อนของผิวโลกและชะลงสู่แหล่งน้ำ และถูกเปลี่ยนรูปจากอาร์เซนิกเป็นอนุพันธ์ของเมทิลในรูปสารประกอบอินทรีย์โดยแบคทีเรีย ผ่านกระบวนการเมทิลเลชัน/ดีเมทิลเลชัน (methylation/demethylation process) ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้ (นันทนา ชูฉัตร, 2543)





2.3.4 การแพร่กระจายของอาร์เซนิกในสิ่งแวดล้อม

1) แหล่งธรรมชาติ เกิดขึ้นจากการสึกกร่อนของผิวโลก เปลือกโลก หรือจากก๊าซของภูเขาไฟ ซึ่งคาดว่า การแพร่กระจายของอาร์เซนิกจากแหล่งธรรมชาตินี้มีประมาณ 72,000 ตัน/ปี ในรูปของอาร์เซนัสออกไซด์

2) การเกษตร เกิดจากการใช้สารพิษป้องกันศัตรูพืช (pesticide) และจากการใช้ปุ๋ยซูเปอร์ฟอสเฟต (super phosphate) ซึ่งในปุ๋ยจะมีส่วนประกอบของอาร์เซนิกประมาณ 1.0% ส่วนการใช้ยาฆ่าแมลงที่สำคัญคือตะกั่วอาร์เซเนต เป็นผลให้เกิดการปนเปื้อนของอาร์เซนิกในดิน และบางส่วนอาจซึมลงสู่น้ำใต้ดิน และในสัตว์ที่อาศัยอยู่บริเวณพื้นที่ที่ได้รับสาร

3) อุตสาหกรรม การแพร่กระจายที่เกิดจากกิจกรรมด้านอุตสาหกรรม ได้แก่ การเผาถ่านหิน โรงงานถลุงโลหะ เป็นต้น ทำให้เกิดการปนเปื้อนของอาร์เซนิกเข้าสู่อากาศ และลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ ดังในตารางที่ 2.7 ที่แสดงถึงปริมาณอาร์เซนิกในน้ำที่จากกิจกรรมประเภทต่าง ๆ

ตารางที่ 2.7 ปริมาณความเข้มข้นของอาร์เซนิกในน้ำที่จากกิจกรรมประเภทต่าง ๆ (กองมาตรฐานสิ่งแวดล้อม, 2541)

ประเภทกิจกรรม	ความเข้มข้นของอาร์เซนิก (มก./ล.)
โรงงานฟอกหนังสัตว์	0-3,000
โรงงานปุ๋ยไนโตรเจน	0.1-0.8
โรงงานโลหะผสมตะกั่ว-สังกะสี	0.15-0.22
โรงงานผสมโลหะทั้งสแตน-โมลิบดีนัม	0.9

ตารางที่ 2.7 ปริมาณความเข้มข้นของอาร์เซนิกในน้ำทิ้งจากกิจกรรมประเภทต่าง ๆ (ต่อ)

ประเภทกิจกรรม	ความเข้มข้นของอาร์เซนิก (มก./ล.)
โรงงานนิกเกิล	0.04-1.4
โรงงานถลุงตะกั่ว	0.02-0.06
โรงงานดีบุก	0.5
เหมืองทั้งสเดน	0.21-1.35

2.3.5 ความเป็นพิษของอาร์เซนิก

อาร์เซนิกที่เข้าสู่ร่างกายครั้งละเป็นจำนวนมากนั้น สามารถก่อให้เกิดพิษอย่างเฉียบพลันต่อร่างกายได้ แต่ถ้าเข้าสู่ร่างกายทีละน้อย ๆ ร่างกายขับออกมาไม่หมดก็จะก่อให้เกิดพิษอย่างต่อเนื่อง หรือพิษเรื้อรังได้เช่นกัน โดยเฉพาะ As (III) จะส่งผลกระทบต่อเอ็นไซม์ (enzyme) มากกว่า As (V) ซึ่ง As (III) นี้จะถูกออกซิไดซ์อยู่ในรูปของอาร์เซโน (arseno) หรืออาร์เซโนโซ (arsenoso) แล้วจับกับหมู่ซัลไฟดริล (sulfhydryl group: SH) ของโปรตีนในเอ็นไซม์ รวมทั้งจับกับกลูตาไธโอนซีสเตอีน (glutathione cysteine) ในเซลล์ร่างกาย ส่งผลให้กระบวนการออกซิเดชันรีดักชัน และเมตาบอลิซึมของเซลล์ทำงานผิดปกติ นอกจากนี้สารประกอบอาร์เซไนต์สามารถทำปฏิกิริยาการเติมหมู่ฟอสเฟต (phosphorylation) ในกระบวนการทำงานของไมโทคอนเดรีย โดยที่หมู่ AsO จะเข้าแทนที่หมู่ PO ส่งผลให้การทำงานของเอ็นไซม์ในไมโทคอนเดรียไม่สามารถสร้างสาร ATP ได้ และอาร์เซนิกบางชนิด เช่น AsH₃ สามารถรวมตัวกับฮีโมโกลบินแล้วถูกออกซิไดซ์กลายเป็นสารพิษต่อเม็ดเลือดแดง โดยทำให้เม็ดเลือดแดงสลายตัว (hemolysis) เกิดเป็นโรคดีซ่านและโลหิตจางได้

2.4 กระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก

ในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่นั้น สามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการต่าง ๆ อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือหลายอย่างร่วมกัน เช่น กระบวนการออกซิเดชันและรีดักชัน หรือกระบวนการตกผลึกทางเคมีร่วมกับการเกิดโคแอกกูเลชัน เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้กระบวนการใด ๆ ควรต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมดังต่อไปนี้

- ลักษณะ และคุณสมบัติของน้ำเสียก่อนการบำบัด
- คุณภาพของน้ำทิ้งที่ต้องการ
- พื้นที่ที่ใช้ในการบำบัด
- ค่าใช้จ่ายในการบำบัด และการตรวจสอบคุณภาพ
- ความยากง่ายในการเดินระบบและความปลอดภัย
- ความเป็นไปได้ในการกำจัดกากของเสียที่เหลือ หรือการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่

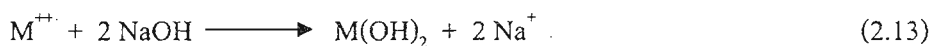
2.4.1 การตกตะกอนผลึกทางเคมี (chemical precipitation)

จัดได้ว่าเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการกำจัดโลหะหนักมากที่สุด โดยการเปลี่ยนรูปจากโลหะที่ละลายน้ำให้อยู่ในรูปของแข็งด้วยกระบวนการทางเคมี เหนี่ยวนำให้เกิดภาวะอิ่มตัวเกินพอ (supersaturation) ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ นิวคลิเอชัน (nucleation) การเกิดผลึก (crystal growth) และการรวมตะกอน (flocculation) กระบวนการนี้จะมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดไอออนของโลหะหนักที่ละลายในน้ำ เหมาะสำหรับการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม และน้ำใต้ดินที่ถูกปนเปื้อน และสามารถใช้ในการบำบัดขั้นต้นเพื่อกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียก่อนการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นพิษได้

สำหรับเทคนิคการตกตะกอนผลึกทางเคมีมีอยู่ 5 ประเภทใหญ่ ๆ คือ การตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์ (hydroxide precipitation) คาร์บอเนต (carbonate precipitation) ซัลไฟด์ (sulfide precipitation) แซนธาต (xanthate precipitation) และการตกตะกอนแต่ละประเภทร่วมกัน (combined precipitation) แต่ที่นิยมใช้กันมากคือ การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ และซัลไฟด์

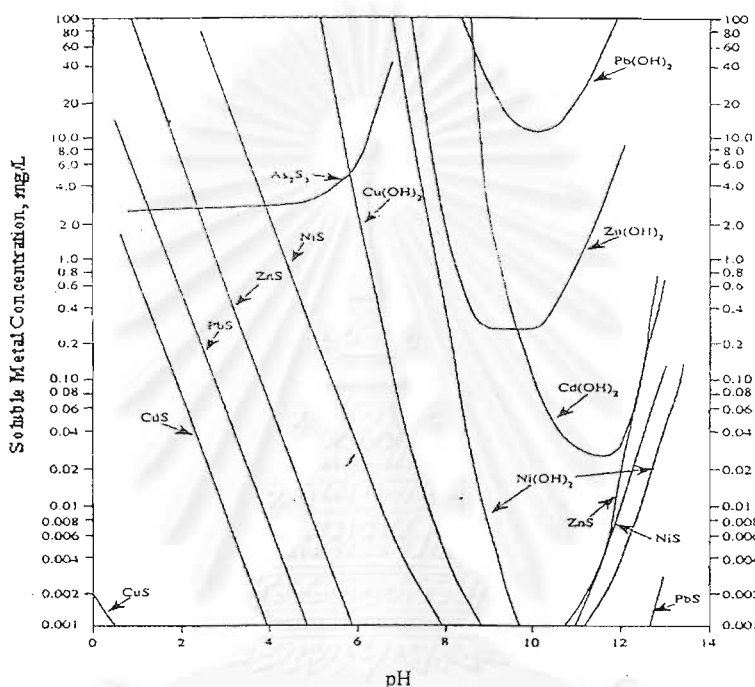
2.4.1.1 การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์

ในกระบวนการนี้ โลหะหนักถูกกำจัดออกได้โดยการเติมสารที่เป็นด่าง เช่น โซดาไฟ (NaOH) หรือปูนขาว (Ca(OH)₂) ดังสมการที่ 2.13 เพื่อปรับค่าพีเอชของน้ำเสียให้ถึงจุดที่ทำให้โลหะมีความสามารถในการละลายต่ำสุด



เมื่อ M^{++} แทนโลหะไอออน

โดยทั่วไปความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ ($M(OH)_2$) ในสารละลายจะลดลงเมื่อพีเอชสูงขึ้น และจะละลายได้ดีที่สุดที่ค่าพีเอชหนึ่ง เรียกว่า ไอโซอิเล็กทริกพอยท์ (isoelectric point) และสามารถละลายกลับได้อีกหากทำการเพิ่มพีเอชขึ้นเรื่อย ๆ ดังรูปที่ 2.3 และพบว่าความสามารถในการละลายต่ำสุดของโลหะทางทฤษฎีมีความแตกต่างกับในทางปฏิบัติอย่างมาก เนื่องจากผลของสารเชิงซ้อน (complexing agent) อุณหภูมิ และ ค่าความแรงไอออน (ionic strength)



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของสารละลายกับความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ และโลหะซัลไฟด์ (William, 1994 อ้างถึงในมณีรัตน์, 2542)

2.4.1.2 การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์

การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ จะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้ไฮดรอกไซด์ในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียอุตสาหกรรม โดยสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอน ได้แก่ โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) โซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ ($NaHS$) หรือเฟอร์รอสซัลไฟด์ (FeS) ปฏิกริยาเคมีเกิดขึ้นตามสมการ 2.14



เมื่อ M^{++} แทนโลหะไอออน

กระบวนการตกตะกอนผลึกทางเคมีทั้งสองนี้มีข้อดี ข้อเสีย และความเหมาะสมต่างกัน ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้เลือกใช้ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น โดยสามารถสรุปข้อดีและข้อจำกัดของกระบวนการทั้ง 2 กระบวนการได้ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ข้อดีและข้อจำกัดของกระบวนการตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์และผลึกซัลไฟด์ (มณีรัตน์ องค์กรบรรณคดี, 2542)

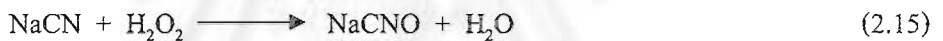
การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์	การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์
<p>ข้อดี</p> <ul style="list-style-type: none"> - การทำงานระบบไม่ซับซ้อน - ง่ายต่อการควบคุมพีเอช - สารเคมีที่ใช้มีราคาถูก ทำให้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างต่ำ <p>ข้อจำกัด</p> <ul style="list-style-type: none"> - ไม่สามารถตกตะกอนที่พีเอชใดพีเอชหนึ่งได้ - ตะกอนไฮดรอกไซด์มีแนวโน้มที่จะละลายกลับได้ ถ้าพีเอชเปลี่ยนแปลงไป - ไม่สามารถกำจัด Cr (VI) ได้ - การบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหลายชนิดปนอยู่ร่วมกัน หรือกรณีที่มีน้ำเสียนีมี chelating agents จะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง - โซลยาไนต์จะรบกวนการตกตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ - ไม่เหมาะกับน้ำเสียที่มีอัตราการไหลสูง และมีความเข้มข้นเปลี่ยนแปลง - เวลาที่ใช้เริ่มและหยุดระบบจะนานกว่ากระบวนการ packed-bed และเมมเบรน 	<p>ข้อดี</p> <ul style="list-style-type: none"> - สามารถใช้กำจัดโลหะที่พีเอชต่ำกว่า 2-3 ได้ - ต้องการเวลากักน้ำในถังปฏิกิริยาน้อย เนื่องจากมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง - ผลของ chelating agents ต่อการตกตะกอนมีน้อย - ปริมาณสลัดจ์โลหะซัลไฟด์เกิดขึ้นน้อย และง่ายต่อการดึงน้ำออก - สามารถเลือกกำจัดโลหะที่ต้องการ และนำกลับ (recovery) ส่วนที่เหลืออยู่ได้ <p>ข้อจำกัด</p> <ul style="list-style-type: none"> - ทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) - เกิดปัญหาความเป็นพิษของซัลไฟด์ - กระบวนการค่อนข้างซับซ้อน และมีค่าใช้จ่ายสูงเมื่อเทียบกับการตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์

2.4.2 กระบวนการออกซิเดชันและรีดักชัน (oxidation and reduction)

เป็นกระบวนการทางเคมีที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะโดยการเติมสารเคมีลงในน้ำเสีย เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับโลหะหนักที่ต้องการกำจัด ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชันของโลหะหนัก เช่น การเปลี่ยน Cr (VI) เป็น Cr (III) ซึ่งจะช่วยลดความเป็นพิษ และช่วยให้กำจัดได้ง่ายขึ้น

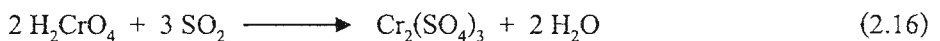
2.4.2.1 การออกซิเดชัน

ปฏิกิริยาออกซิเดชันนิยมใช้สำหรับบำบัดของเสียทั้งที่เป็นและไม่เป็นอันตราย โดยจัดว่าเป็นเทคนิคที่ปลอดภัย และสามารถควบคุมหรือติดตามผลได้สะดวก ส่วนใหญ่ใช้กับของเสียที่เป็นของเหลว สำหรับสารเคมีที่ใช้เป็นตัวทำให้เกิดออกซิเดชัน เรียกว่า ตัวออกซิไดซ์ (oxidizing agents) ได้แก่ อากาศ ออกซิเจน โอโซน ไฮโปคลอไรต์ เปอร์แมงกานेट เป็นต้น เช่น การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนไซยาไนด์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยน CN^- เป็น CN^+ ดังสมการที่ 2.15



2.4.2.2 การรีดักชัน

ส่วนมากใช้ในการบำบัดของเสียอันตราย เช่น การรีดิวซ์ Cr (VI) เป็น Cr (III) ซึ่งมีความเป็นพิษน้อยกว่า (ดังสมการที่ 2.16) และสามารถตกตะกอนในรูป $Cr(OH)_3$ ที่ไม่ละลายน้ำ และกำจัดออกได้ง่าย สำหรับสารเคมีที่ใช้เป็นตัวทำให้เกิดรีดักชัน เรียกว่า ตัวรีดิวซ์ (reducing agents) ได้แก่ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ($NaBH_4$) ไอร์ออน(II) ซัลเฟต ($FeSO_4$) เป็นต้น



2.4.3 กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange)

การแลกเปลี่ยนไอออน หรือการแลกเปลี่ยนไอออนแบบผันกลับ (reversible) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่างไอออนในน้ำ หรือสารละลายที่ต้องการกำจัด กับไอออนในสารที่เป็นของแข็งซึ่งมีอยู่ 2 ชนิด คือ

1) สารของแข็งที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวก (cationic exchanger) หรือเรซิน (resin) โดยทั่วไปเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีการเชื่อมโยง (crosslinked) ระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ และมีหมู่ $-COOH$ หรือ $-SO_3H$ ในโมเลกุล ซึ่งสามารถแลกเปลี่ยนไฮโดรเจนไอออน (H^+) กับไอออนบวกที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ เช่น โลหะหนักต่าง ๆ

2) สารของแข็งที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนลบ (anionic exchanger) สารของแข็งนี้เป็นเรซินเช่นกัน และมีหมู่ $-N^+H_3OH$ หรือ $-N^+R_3OH$ ในโมเลกุลของเรซิน ซึ่งสามารถแลกเปลี่ยนไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) กับไอออนลบที่อยู่ในน้ำ

เทคนิคนี้อาศัยหลักการของความสามารถในการดูดซับของไอออนกับเรซินที่แตกต่างกัน โดยหมู่ฟังก์ชันของเรซินจะถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงข้าม เหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักปริมาณน้อยแต่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง ข้อจำกัดคือ ต้องทำการกำจัดสารปนเปื้อนชนิดอื่นออกก่อนที่จะเข้าสู่ถังเรซิน และยังมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนและดำเนินการสูง

2.4.4 กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส (reverse osmosis: RO)

ระบบนี้อาจเรียกว่า ไฮเพอร์ฟิลเตรชัน (hypeyfiltration) เป็นกระบวนการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียด้วยการกรองผ่านแผ่นเยื่อกรองแบบเยื่อกึ่งซึมผ่านได้ (semi-permeable membrane) ความดันที่สูงกว่าความดันออสโมติก (osmotic pressure) (เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์, 2543) โดยแผ่นเยื่อนี้ทำจากสารเซลลูโลสอะซีเตต และพอลิเอไมด์ และจะยอมให้ตัวทำละลายผ่านได้เท่านั้น จึงเหลือเพียงสารที่ต้องการกำจัดที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ทำให้ได้น้ำทิ้งที่มีคุณภาพ แต่มีข้อจำกัดคือแผ่นเยื่อต้องสามารถทนต่อแรงดันสูง ๆ ได้ และต้องมีการบำบัดขุ่นดินก่อนด้วยการปรับพีเอช แยกสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง และกรองสารแขวนลอยออกก่อน นอกจากนี้ยังมีปัญหาการอุดตันของแผ่นเยื่อด้วย

2.4.5 กระบวนการสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า (electrolytic recovery)

เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า โดยการเปลี่ยนไอออนของโลหะหนักที่อยู่ในสารละลายให้อยู่ในรูปธาตุที่ขั้วแคโทด และจะเกิดก๊าซออกซิเจนที่ขั้วแอโนดตลอดเวลา วิธีนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะสูง ๆ แต่ไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากสิ้นเปลืองพลังงาน และไฟฟ้าสูงมาก

2.4.6 กระบวนการระเหย (evaporation)

เป็นวิธีการง่าย ๆ ที่ทำให้สารมีความเข้มข้นสูงขึ้นโดยการระเหยเอาน้ำออก ซึ่งมีทั้งการระเหยที่บรรยากาศธรรมดา (atmospheric evaporation) และการระเหยภายใต้สภาวะสุญญากาศ (vacuum evaporation) วิธีการนี้ใช้ได้ดีกับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักสูง และต้องใช้ต้นทุนในการดำเนินการสูง

2.4.7 กระบวนการอิเล็กโทรไดอะไลซิส (electrodialysis)

เป็นการแยกไอออนออกจากสารละลายด้วยไฟฟ้าร่วมกับการใช้แผ่นเยื่อสำหรับไอออนแต่ละชนิด (ion selective membrane) ซึ่งกลไกการทำงานของระบบเป็นลักษณะของการแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยระบบประกอบด้วยขั้วเซลล์ประจุบวกและลบ และมีแผ่นเยื่อดังกล่าวที่ทำหน้าที่จับสารปนเปื้อนที่มีประจุบวก แต่จะปล่อยให้สารที่มีประจุลบผ่านไปได้ ความบริสุทธิ์ของไอออนขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านแผ่นเยื่อสำหรับน้ำเสียก่อนเข้าระบบจะต้องนำไปผ่านระบบที่สามารถกำจัดหรือแยกตะกอนเล็ก ๆ และสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ออกจากน้ำเสียก่อน เพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเยื่อ ข้อดีของเทคนิคนี้คือ สามารถกำหนดชนิดไอออนที่ต้องการได้ แต่เป็นเทคนิคที่ต้องใช้ทุนในการก่อสร้างและดำเนินการสูง

2.4.8 กระบวนการดูดติดผิว (adsorption)

การดูดติดผิวหรือการดูดซับ เป็นปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของสารไปเกาะจับ และติดอยู่บนผิวหน้าของของแข็ง หรือของเหลว โดยสารที่มีความสามารถในการดึงโมเลกุล หรือไอออนให้มาเกาะติดที่ผิว เรียกว่า สารดูดซับ (adsorbent) เช่น ถ่านกัมมันต์ ดินเหนียว เป็นต้น และเรียก

โมเลกุลหรือไอออนที่ไปเกาะนั้นว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ซึ่งสามารถพบได้ที่ผิวสัมผัสระหว่างของแข็ง-ก๊าซ ของเหลว-ก๊าซ ของเหลว-ของแข็ง ของเหลว-ของเหลว และของแข็ง-ของแข็ง

กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการควบคุม มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูง และระบบมีความทนทานต่อสารพิษ ซึ่งจะมีผลกระทบต่อระบบชีวภาพ นอกจากนี้ยังต้องการพื้นที่ใช้สอยน้อย ไม่มีกลิ่นเหม็น ไม่มีผลกระทบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพีเอช อุณหภูมิ หรือปริมาณสารอินทรีย์ที่ไม่คงที่ ใช้เงินลงทุนต่ำ ไม่มีสลัดจ์ และระบบมีความยืดหยุ่นสูง สามารถเพิ่มหรือลดขนาดของระบบได้ง่าย

2.4.8.1 ประเภทของสารดูดซับ (มันสิน ตันจุลเวศม์, 2539)

สารดูดซับ คือ สารที่มีความสามารถในการดูดโมเลกุลหรือไอออนต่าง ๆ มาเกาะติดอยู่บริเวณที่ผิวได้ แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

1) *ประเภทสารอนินทรีย์* เช่น ดินเหนียวชนิดต่าง ๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ถ่านกระดูก แอ็คติเวเต็ดซิลิกา (activated silica) เป็นต้น สารดูดซับที่มาจากธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตร/กรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวสูงมาก อย่างไรก็ตามข้อเสียของสารดูดซับประเภทอนินทรีย์นี้ คือสามารถดูดซับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์มีข้อจำกัดมาก

2) *ถ่านกัมมันต์ (activated carbon)* สารดูดซับประเภทนี้อาจจัดเป็นสารอนินทรีย์สังเคราะห์ก็ได้ เป็นสารดูดซับที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากถูกสังเคราะห์ขึ้นเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด คือ ประมาณ 600-1,000 ตารางเมตร/กรัม รูพรุนหรือโพรงภายในเนื้อคาร์บอนมีขนาดตั้งแต่ 20-20,000 อังสตรอม (A°)

3) *ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์* ได้แก่ เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange resin) ซึ่งเป็นสารที่สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่าง ๆ (มักเป็นประเภทที่เรียกว่า macroporous resin) สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตร/กรัม ข้อดีของเรซินคือสามารถปรับคืนสภาพ (regenerate) ได้ง่าย และสารที่ใช้เป็นตัวคืนสภาพก็มีราคาถูก เช่น เกลือแกง

2.4.8.2 กลไกการดูดติดผิว

สำหรับการดูดติดผิวด้วยของแข็งนั้นขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัสของของแข็ง โดยการเกาะจับของโมเลกุลบนสารดูดซับอาจเกิดขึ้นด้วยแรงกายภาพ เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ หรือแรงทางเคมี หรือทั้งสองแรงร่วมกัน ส่วนกลไกการดูดติดผิวสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

1) การดูดติดผิวทางกายภาพ

เกิดจากความแตกต่างของพลังงาน หรือแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (electrical attractive force) อย่างอ่อน ๆ ระหว่างโมเลกุล เรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) ทำให้เกิดการเกาะ หรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและโมเลกุลที่ผิวหน้าของสารดูดซับ เกิดเป็นชั้นหลาย ๆ ชั้นซ้อนทับกัน โดยแต่ละชั้นจะซ้อนทับอยู่เหนือชั้นที่เกิดขึ้นก่อน จำนวนชั้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร โดยกลไกนี้เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดส่วนที่หนาและผันกลับไม่ได้ (irreversible) และเกิดขึ้นแบบไม่เฉพาะ (nonspecific) กล่าวคือ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะไม่เกาะติดอยู่เฉพาะบริเวณใดบริเวณหนึ่งของผิวหน้าสารดูดซับ สำหรับปัจจัยการเกิดขึ้นอยู่กับค่าพีเอช และสารเชิงซ้อนที่ปะปนอยู่ในวัฏภาคของเหลว แต่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ และค่าความแรงไอออน

โดยทั่วไปการดูดติดผิวทางกายภาพสามารถผันกลับได้ และการผันกลับนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับกับสารดูดซับ ถ้าแรงดึงดูดนี้มีค่าน้อย จะทำให้เกิดการปลดปล่อย หรือการคายสารที่ถูกดูดซับออกมา (desorption) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ หรือการเพิ่มอุณหภูมิเข้าไปในปริมาณมาก สำหรับปฏิกิริยาของการดูดติดผิวที่เกิดขึ้นนี้ เป็นแบบปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic) โดยปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับความร้อนแฝงของการกลั่นตัวเป็นของเหลว

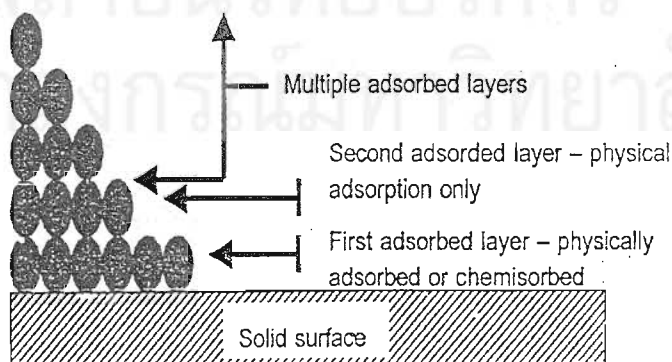
2) การดูดติดผิวทางเคมี

เกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและสารดูดซับ ซึ่งเป็นแรงดึงดูดทางเคมีที่มีความแข็งแรงสูงกว่าแรงจากการดูดติดผิวทางกายภาพ และเป็นแรงที่ทำให้เกิดพันธะเฉพาะ (specific) ที่บริเวณใด ๆ บนผิวของสารดูดซับ เกิดเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่ที่ผิวสัมผัส ทำให้ค่าความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงใกล้เคียงกับค่าของพลังงานพันธะ กลไกอาจเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และผันกลับไม่ได้บางส่วน โดยทั่วไปการดูดซับบริเวณผิวที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะแบบโมเลกุลชั้นเดียว (monolayer) โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจึงไม่สามารถเคลื่อนที่จากผิวหน้าไปยังบริเวณอื่นได้อย่างอิสระ ส่งผลให้ความสามารถในการดูดติดผิวของสารดูดซับลดลง

เกิดการผันกลับได้ยาก นอกจากจะมีการเพิ่มความร้อนเข้าไป ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง และเกี่ยวข้องกับพลังงานกระตุ้น (activation energy) รวมทั้งยังมีการใช้พลังงานความร้อนในการผันกลับของปฏิกิริยาด้วย ทั้งนี้การดูดติดผิวทางเคมีเกิดขึ้นได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ส่วนประกอบของพื้นที่ผิวของแข็งหรือสารดูดซับ ความเข้มข้นของตัวถูกละลาย พิเอช และอุณหภูมิของสารละลาย

นอกจากนี้ยังมีการดูดติดผิวอีกประเภทหนึ่งคือ การดูดติดผิวแบบแลกเปลี่ยน (exchange adsorption) ซึ่งใช้ในการอธิบายถึงการดูดติดผิวในลักษณะของการดึงดูดทางไฟฟ้า และเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างตัวถูกละลายกับสารดูดซับ โดยไอออนของตัวถูกละลายที่มีอยู่เป็นจำนวนมากบริเวณผิวของสารดูดซับ เป็นผลมาจากการดึงดูดทางศักย์ไฟฟ้า (electrostatic attraction) โดยทั่วไป ไอออนที่มีประจุมากกว่า เช่น ไอออนแบบไตรวาเลนต์ (trivalent ions) จะถูกดึงดูดสู่บริเวณที่มีประจุแบบตรงกันข้ามได้แรงกว่าไอออนที่มีประจุน้อยกว่า เช่น ไอออนแบบโมนิวาเลนต์ (monovalent ions) ซึ่งกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นปฏิกิริยาเคมีแบบผันกลับได้ นอกจากนี้ ไอออนที่มีขนาดเล็กจะถูกดึงดูดได้แรงกว่าไอออนที่มีขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะมีความแตกต่างกันระหว่างกระบวนการดูดติดผิวทั้ง 3 ประเภท แต่ก็ยังเป็นการยากที่จะตัดสินว่าการดูดติดผิวบนสารดูดซับจะเกิดขึ้นแบบใดแบบหนึ่งเพียงแบบเดียวบนสารดูดซับนั้น

การเกิดขึ้นการดูดติดผิวนั้น โมเลกุลของสารถูกละลายที่จะเกิดเป็นชั้นแรกสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับผิวของสารดูดซับได้ จึงเกิดการดูดติดผิวทั้งแบบกายภาพและเคมี ส่วนการดูดติดผิวของโมเลกุลในชั้นต่อ ๆ ไป จะเกิดการดูดติดผิวแบบกายภาพเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งรูปแบบของจำนวนชั้นของโมเลกุลมีความสำคัญต่อการเลือกใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในการประเมินความสามารถในการดูดติดผิว หรือไอโซเทอมการดูดติดผิว



รูปที่ 2.4 การดูดติดผิวของโมเลกุลแบบหลายชั้นบนผิวของแข็ง (Myer, 1999)

2.4.8.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว

- สมบัติของสารดูดซับ ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพ และทางเคมี เช่น พื้นที่ผิวสัมผัส (surface area) ขนาดรูพรุน (pore size) และองค์ประกอบทางเคมี (chemical composition) เป็นต้น
- สมบัติของตัวถูกดูดซับ ได้แก่ ขนาดของโมเลกุล ประจุไฟฟ้าของอะตอม หรือโมเลกุล และองค์ประกอบทางเคมี เป็นต้น
- ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกดูดซับ
- ลักษณะของสารละลาย เช่น พีเอช เนื่องจากพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัว เป็นไอออน รวมถึงการละลายน้ำของสารต่าง ๆ และอุณหภูมิ ซึ่งจะมีอิทธิพลต่ออัตราเร็ว และความสามารถในการดูดติดผิว โดยอัตราเร็วของการดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลง
- เวลาที่ใช้ในการดูดติดผิวของระบบ
- ความปั่นป่วนของระบบ

2.4.8.4 จลนพลศาสตร์ของการดูดติดผิว (kinetic adsorption)

ลักษณะของการดูดติดผิว หรือการส่งถ่ายมวลสาร (mass transfer) ที่อยู่ในสารละลายไปยังผิวของแข็ง ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้กำจัดสารปนเปื้อนมี 3 ขั้นตอนที่สำคัญ คือ

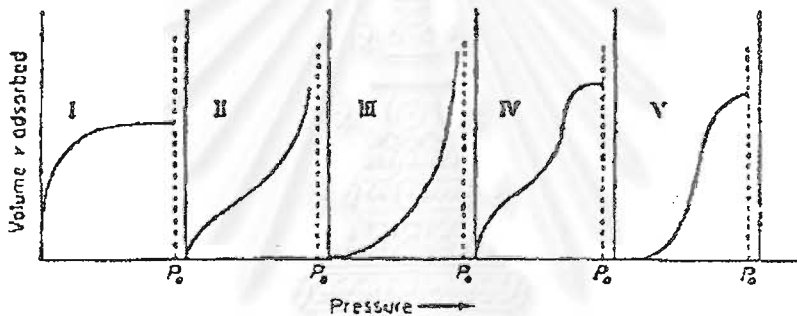
- 1) การถ่ายโอนมวลสาร จากของเหลวหรือก๊าซเข้าสู่บริเวณรอบนอกที่ใกล้กับพื้นผิวของสารดูดซับ หรือทางเข้ารูพรุนของสารดูดซับ
- 2) การแพร่กระจายของมวลสารที่ถูกดูดซับ จากกรอบนอกที่ใกล้กับพื้นผิวของสารดูดซับเข้าสู่ผิวภายในรูพรุนของสารดูดซับ
- 3) การดูดติดผิว โดยโมเลกุลของสารที่อยู่ภายในรูพรุนเกิดการเกาะติดกับผิวของแข็ง ซึ่งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับ 2 ขั้นตอนที่ผ่านมา และคาดว่าภาวะสมดุลเกิดขึ้นระหว่างวัฏภาคทั้งสองนี้

2.4.8.5 สมดุลและไอโซเทอมการดูดติดผิว

ในการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายที่มีผลต่อการดูดซับ สามารถพิจารณาได้จากไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption isotherm) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ (adsorbate) ต่อหน่วยของสารดูดซับ (adsorbant) กับความเข้มข้นที่จุดสมดุลของสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ โดยรูปร่างลักษณะของไอโซเทอมเป็นสิ่งที่ใช้อธิบายกลไกของการดูดซับได้

• ลักษณะของไอโซเทอม

บรูนาออร์ (Brunauer) ได้แบ่งลักษณะของไอโซเทอมออกเป็น 5 แบบ ดังรูปที่ 2.5 โดยกลไกการดูดซับแต่ละแบบสามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 2.5 ไอโซเทอมของการดูดติดผิวแบบพื้นฐาน (Faust และ Aly, 1987)

แบบที่ I เป็นไอโซเทอมของการดูดซับที่ขนาดรูพรุน (pore size) ของสารดูดซับมีขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่มาก โมเลกุลที่ถูกดูดซับจึงสามารถบรรจุลงในรูขนาดเล็ก (micropore) ได้อย่างสมบูรณ์ และมีจุดอิ่มตัวที่แน่นอน (definite saturation limit) โดยเกิดการเรียงตัวบนสารดูดซับเพียงชั้นเดียว (monolayer)

แบบที่ II, III เป็นไอโซเทอมที่สารดูดซับมีการกระจายขนาดของรูพรุนในช่วงกว้าง โดยระบบนี้จะเกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากการเรียงตัวของโมเลกุลเพียงชั้นเดียวจนถึงหลายชั้น (multilayer)

แบบที่ IV เป็นไอโซเทอมของการดูดซับที่ขนาดรูพรุนของสารดูดซับมีขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับมาก จึงเกิดการเรียงตัวของโมเลกุลที่ผิวของสารดูดซับเป็นสองชั้น (bilayer)

แบบที่ V ไอโซเทอมลักษณะนี้เกิดขึ้นเมื่อความแรงของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับมีมากขึ้น

● สมการไอโซเทอมของการดูดซับ

ไอโซเทอมของการดูดซับมีอยู่หลายรูปแบบ แต่ที่นิยมใช้กันมากในการอธิบายทฤษฎีของการดูดซับมีอยู่ 3 สมการ ดังต่อไปนี้

1) ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir adsorption isotherm)

สมมติฐานพื้นฐานของแบบจำลอง ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์

- โมเลกุลที่ถูกดูดซับถูกดูดซับอยู่บริเวณที่แน่นอนบนผิวของสารดูดซับ
- โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีเพียงชนิดเดียว
- พื้นที่ของบริเวณดูดซับมีจำนวนที่แน่นอน ซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นผิว
- พลังงานการดูดซับมีค่าเท่ากันทุก ๆ บริเวณ

การดูดซับของสารละลายโดยสารดูดซับ แสดงดังสมการที่ 2.17

$$X = (X_m b C_e) / (1 + b C_e) \quad (2.17)$$

โดย;

X = ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อปริมาณของสารดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/กรัม)

X_m = ปริมาณของตัวถูกดูดซับมากที่สุดเพื่อสร้างการดูดซับชั้นเดียว (มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/กรัม)

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย ที่ภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร หรือ โมล/ลิตร)

b = ค่าคงที่ของการดูดซับ

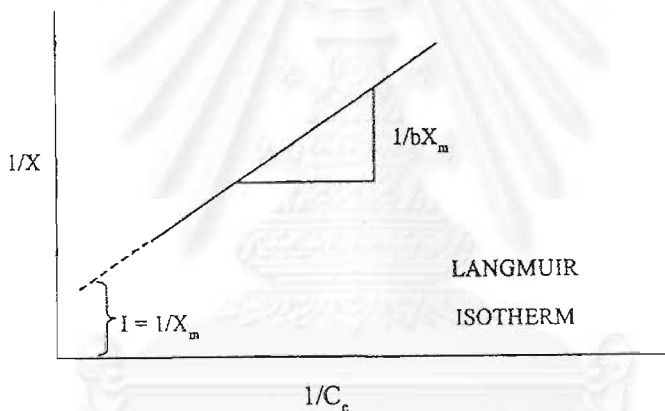
เมื่อ X เข้าสู่ X_m และ C_e เข้าสู่ค่าอนันต์ (infinity; ∞) จะเขียนสมการได้ดังนี้

$$C_e/X = (1/bX_m) + (C_e/X_m) \quad (2.18)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C_e/X กับ C_e ซึ่งเป็นเส้นตรง จะมีความชัน (slope) $1/X_m$ และจุดตัดแกน y (intercept) เท่ากับ $1/bX_m$ และเมื่อหารด้วย C_e จะได้สมการเส้นตรง คือ

$$1/X = (1/X_m) + (1/C_e)(1/bX_m) \quad (2.19)$$

จากสมการที่ 2.19 จะได้กราฟเส้นตรงระหว่าง $1/X$ กับ $1/C_e$ ซึ่งมีความชัน $1/bX_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/X_m$ แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Velencia และ Gloyna, 1972)

2) ไอโซเทอมการดูดซับแบบเบท (BET; Brunauer-Emmett-Teller adsorption isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับแบบเบท พัฒนามาจากสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ ที่คิดจากการดูดซับแบบชั้นเดียวเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น ซึ่งแต่ละโมเลกุลในชั้นดูดซับชั้นแรกจะเป็นบริเวณที่มีโมเลกุลของชั้นที่สองดูดซับอยู่ เช่นเดียวกับชั้นอื่น ๆ ต่อไป โดยแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$X = (X_m b C_e) / (C_s - C_e) (1 + (b-1) C_e / C_s) \quad (2.20)$$

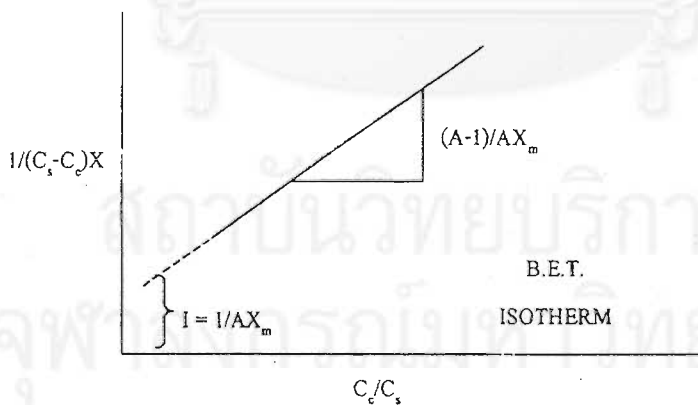
โดย;

- X = ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อปริมาณของสารละลาย (มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/กรัม)
- X_m = ปริมาณของตัวถูกดูดซับมากที่สุดเพื่อสร้างการดูดติดผิวชั้นเดียว (มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/กรัม)
- C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย ที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร หรือ โมล/ลิตร)
- C_s = ความเข้มข้นอิ่มตัวของตัวถูกดูดซับในสารละลาย ณ ทุก ๆ (มิลลิกรัม/ลิตร หรือ โมล/ลิตร)
- b = ค่าคงที่ของการดูดติดผิว

จากสมการที่ 2.20 สามารถเขียนได้เป็น

$$C_e/X(C_s - C_e) = (1/X_m b) + ((b - 1)/X_m b)(C_e/C_s) \quad (2.21)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $C_e/X(C_s - C_e)$ กับ (C_e/C_s) จะได้กราฟเส้นตรง ซึ่งมีความชันเท่ากับ $(b-1)/X_m b$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/X_m b$ แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบเบท (Velencia และ Gloyna, 1972)

3) ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช (*Frundlich adsorption isotherm*)

สมการการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิชใช้กันแพร่หลายที่สุดในการอธิบายการดูดติดผิวในระบบของเหลว ซึ่งมีสมการดังนี้ คือ

$$X/m = KC_e^{1/n} \quad (2.22)$$

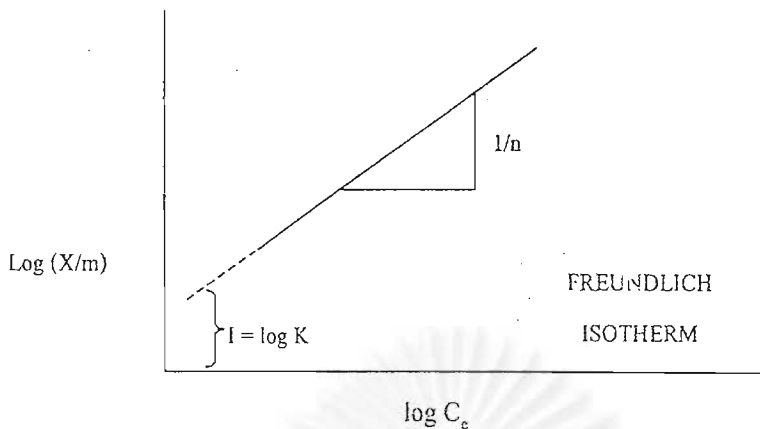
โดย;

- X = ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อปริมาณของสารดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/กรัม)
- C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย ที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร หรือ โมล/ลิตร)
- m = น้ำหนักของสารดูดซับ (กรัม)
- K = ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดติดผิว
- 1/n = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานการดูดติดผิว

จากสมการที่ 2.22 สามารถเขียนสมการในรูปลอการิทึมได้ดังนี้ คือ

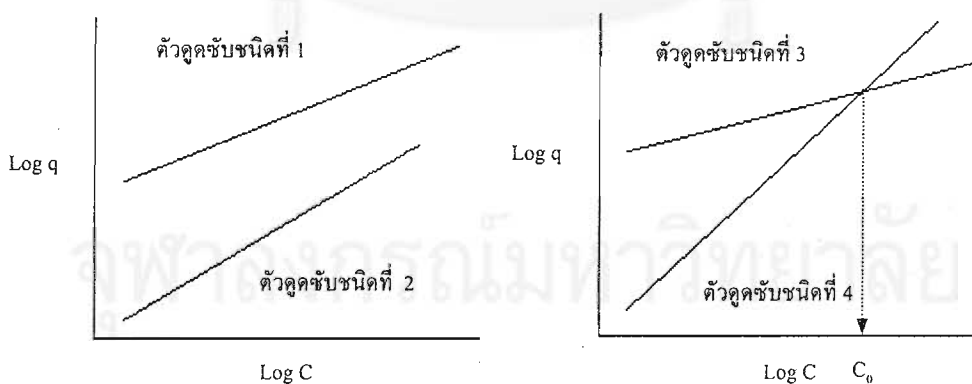
$$\log(X/m) = \log K + 1/n \log C_e \quad (2.23)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log(X/m)$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟเส้นตรง ซึ่งมีความชันเท่ากับ 1/n และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\log K$ ของ $\log(X/m)$ ที่ $\log C_e = 0$ ($C_e = 1$) จากสมการที่ 2.23 แสดงได้ดังรูปที่ 2.8 นอกจากนี้สมการการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิชยังสามารถใช้ค่า n เป็นตัวบอกถึงความสามารถในการดูดติดผิวได้ โดยถ้าค่า $n < 1$ แสดงถึงการดูดติดผิวที่ไม่ดี แต่ถ้าค่า $n > 1$ แสดงถึงการดูดติดผิวที่ดี



รูปที่ 2.8 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรอนด์ลิช (Velencia และ Gloyna, 1972)

ลักษณะของไอโซเทอมยังสามารถใช้ในการพิจารณาว่าสารดูดซับชนิดใดมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่ากัน โดยสามารถดูได้จากรูปที่ 2.9 ก จะเห็นได้ว่าไอโซเทอมของสารดูดซับชนิดที่ 1 สูงกว่าชนิดที่ 2 ในช่วงความเข้มข้นเดียวกัน ส่วนในรูปที่ 2.9 ข สารดูดซับชนิดที่ 3 มีไอโซเทอมสูงกว่าชนิดที่ 4 ในช่วงความเข้มข้นที่ต่ำกว่า C_0 ดังนั้นจึงต้องเลือกสารดูดซับให้เหมาะสมกับช่วงความเข้มข้นที่ต้องการ ในรูปที่ 2.9 ข สารดูดซับชนิดที่ 4 มีความชันมากกว่าชนิดที่ 3 แสดงว่าถ้าต้องการบำบัดแบบมีการไหลอย่างต่อเนื่อง สารดูดซับชนิดที่ 4 มีความเหมาะสมมากกว่าชนิดที่ 3



รูปที่ 2.9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของสารดูดซับชนิดต่าง ๆ โดยพิจารณาจากรูปแบบไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (ชลธา และคณะ, 2538 อ้างถึงในอุบลรัตน์, 2544)

2.5 ถ่านกระดูก

ถ่านกระดูก (bone charcoal) หรือ bone black หรือ animal bone charcoal เป็นผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติ ที่ได้จากการแปรรูปกระดูกสัตว์จำพวกโค กระบือ หรือสัตว์ชนิดอื่น ที่ถูกมนุษย์นำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ มาตั้งแต่อดีตกาล คือประมาณ 2650 ปีก่อนคริสต์ศักราช โดยชาวอียิปต์ จากนั้นในปี ค.ศ. 1811 นักเภสัชศาสตร์ชาวฝรั่งเศสได้ใช้ถ่านกระดูกเป็นสารช่วยกำจัดสี (decolorizing) ต่อมาในศตวรรษที่ 19 นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมน้ำตาล เพื่อใช้เป็นสารฟอกสีน้ำตาลทรายให้ขาว และใช้กันเรื่อยมาจนถึงปัจจุบันนี้ (Ebonex Corporation, 2004)

2.5.1 องค์ประกอบของถ่านกระดูก

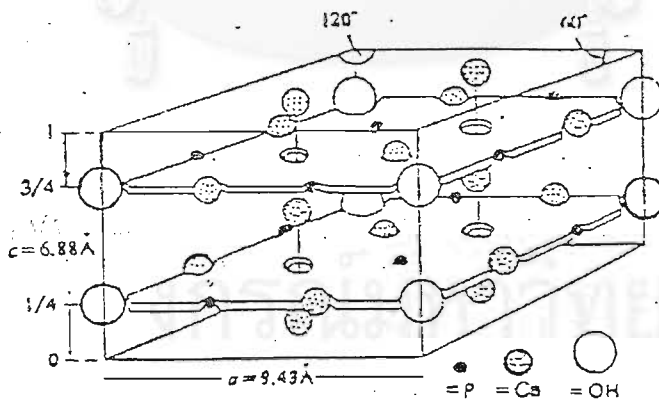
ถ่านกระดูกเป็นสารดูดซับชนิดหนึ่งที่จัดอยู่ในประเภทของสารดูดซับอนินทรีย์ มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 100 ตารางเมตร/กรัม ประกอบด้วยองค์ประกอบหลักที่สำคัญ 2 ส่วน คือ คาร์บอน และไฮดรอกซีอะพาไทต์ (hydroxyapatite) โดยคาร์บอนจะเป็นส่วนที่เกิดการดูดติดผิวของโมเลกุลประจุลบด้วยแรงอ่อน ๆ (weakly anionic molecule) ในขณะที่ไฮดรอกซีอะพาไทต์จะเป็นตัวดูดจับสารประเภทโมเลกุลประจุบวกประเภทไอออนอนินทรีย์ (inorganic ion) ได้หลายชนิด เช่น โลหะหนักชนิดต่าง ๆ ด้วยแรงทางประจุซึ่งจะมีความแข็งแรงกว่าแรงบริเวณผิวคาร์บอน (ebonex corporation, 2004) หรือเกิดการยึดติดทางเคมีของตัวดูดซับภายในโครงร่างของไฮดรอกซีอะพาไทต์ ที่เรียกว่า การเกิดเคมีซอร์บชัน (chemisorption) ส่งผลให้ถ่านกระดูกมีความแตกต่างจากถ่านกัมมันต์ชนิดอื่นที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักเพียงอย่างเดียว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.9 องค์ประกอบและสมบัติของถ่านกระดูกเชิงการค้า Brimac 216 (Irvine และ Knowles, 1997)

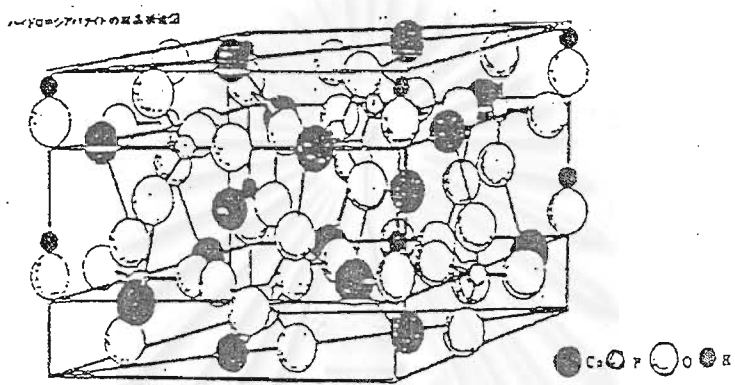
องค์ประกอบ	ปริมาณ
carbon	9-11%
hydroxyapatite	70-76%
calcium carbonate	7-9%
calcium sulphate	0.1-0.2%
iron-as Fe_2O_3	< 0.3%
moisture	5% max
total surface area	100 m^2/g
pore size distribution	7.5-60,000 nm
pore volume	0.225 cm^3/g

ไฮดรอกซีอะพาไทต์ คือ แคลเซียมฟอสเฟตรูปแบบหนึ่งที่มีสูตร โมเลกุล $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ และมีอัตราส่วนของ Ca : P เท่ากับ 1.67 เป็นสารประกอบกลุ่มอะพาไทต์ โดยโครงสร้างผลึกจัดเรียงตัวในรูปแบบของเฮกซะโกนอล (hexagonal system) ที่ประกอบด้วยแคลเซียม (Ca^{2+}) ฟอสเฟต (PO_4^{3-}) และหมู่ไฮดรอกซี (OH) แสดงสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 สูตรโครงสร้างของไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Aoki, 1991 อ้างถึงในคุงุฑทัช, 2537)

จากรูป การจัดเรียงตัวของออกซิเจนจะอยู่ในตำแหน่งของเตตระโกนอล (tetragonal system) ล้อมรอบส่วนของฟอสเฟต ส่วน Ca^{2+} จัดตัวอยู่ใน 2 ตำแหน่ง คือบริเวณคอลัมน์ เรียกว่าคอลัมน์แคลเซียม ซึ่ง Ca^{2+} จะอยู่บนระนาบ $z = 0$ และ $1/2$ อีกตำแหน่งคือบริเวณแกนสกรูบนระนาบ $z = 1/4$ และ $3/4$ โดยคอลัมน์แคลเซียมนี้จะอยู่ในลักษณะอิสระ ทำให้สามารถเคลื่อนย้ายไปตามแนวแกน c ได้ จึงเกิดการหลุดออกจากโครงสร้างได้ง่าย และเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่เรียกว่า Ca-deficient สำหรับส่วนของ OH^- จะถูกล้อมรอบด้วยอะตอมของ Ca^{2+} (รูปที่ 2.11)



รูปที่ 2.11 โครงสร้างผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Aoki, 1991 อ้างถึงในคุณฤทัย, 2537)

2.5.2 การเตรียมและการนำไปใช้

ถ่านกระดูกสามารถเตรียมได้โดยการเผากระดูกสัตว์ที่อุณหภูมิ 1100-1600 °C เพื่อขจัดสารอินทรีย์ออกจนได้ถ่านหรือถ่าน ซึ่งมีสถานะการเตรียม 3 รูปแบบ ดังนี้

- สถานะที่เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์



- สถานะที่เกิดการเผาไหม้แบบจำกัดออกซิเจน



- สถานะที่เกิดการเผาไหม้แบบไม่มีออกซิเจน



หลังจากผ่านขั้นตอนการเผาแล้ว จะได้ถ่านกระดูกที่มีลักษณะเป็นของแข็งแต่เปราะ และเบากว่าทราย มีสีแตกต่างกัน เช่น ขาว เทา หรือดำ เป็นต้น ขึ้นอยู่กับสถานะและปัจจัยในการเผา (เสาวภา พลานนท์, 2544)

ปัจจุบันถ่านกระดูกจัดเป็นเป็นสารดูดซับที่มีประสิทธิภาพ และถูกนำไปใช้ได้อย่างกว้างขวาง เช่น

- ใช้เป็นสารดูดซับสี กลิ่น และรส ในอุตสาหกรรมบางประเภท
- ใช้เป็นสารดูดซับโลหะหนัก ทั้งในระบบบำบัดน้ำเสียโรงงาน หรือในสถานที่เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ
- ใช้ในระบบกรองน้ำ เพื่อลดปริมาณคลอไรด์ ฟลูออไรด์
- ใช้เป็นส่วนผสมในปุ๋ย เพื่อเพิ่มคุณค่าทางอาหารแก่ดิน
- ใช้กำจัดหรือลดปริมาณของสารปราบศัตรูพืช (pesticide) หรือสารปราบวัชพืช (herbicide)

2.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Azab และ Peterson (1989) ศึกษาการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียด้วยสารดูดซับชีวภาพหลายชนิดเปรียบเทียบกับสารดูดซับที่นิยมใช้ทั่วไป คือ ถ่านกัมมันต์ โดยทำการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร ที่พีเอชน้ำเสียเท่ากับ 5.2 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมด้วยเปลือกถั่วลิสง เปลือกวอลนัท (walnut shell) และกระดูกเท่ากับ 68.0%, 46.3% และ 92.6% ตามลำดับ ในขณะที่ถ่านกัมมันต์กำจัดได้ 64.3% และหากทำการเตรียมสารดูดซับในสารละลายเบสก่อน (alkaline-treated sorbent) จะช่วยให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มขึ้นเป็น 99.0%, 99.5%, 99.1%, และ 89.0% ตามลำดับ

Lorenzen และคณะ (1995) ได้ทำการวิจัยถ่านกัมมันต์ 3 ชนิด แตกต่างกันได้แก่ ถ่านจากเปลือกมะพร้าว (coconut-shell carbon) ถ่านหินอัดรูป (peat-base extruded carbon) และถ่านหิน (coal-base carbon) ปริมาณ 5 กรัม/ลิตรน้ำเสีย ในการกำจัด As (V) จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยการทดลองแบบแบตช์ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของถ่านทั้ง 3 ชนิดนี้พบว่า ถ่านหินทั้ง 2 ชนิดสามารถกำจัด As (V) ได้ดีกว่าถ่านจากเปลือกมะพร้าว แม้ว่าถ่านจากเปลือกมะพร้าวจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าคือ 1,200 ตารางเมตร/กรัม ในขณะที่ถ่านหินอัด และถ่านหินมีพื้นที่ผิว 975 และ 1125 ตารางเมตร/กรัม ตามลำดับ แต่ความสามารถในการดูดซับนั้นกลับเป็นผลมาจากปริมาณเถ้าของ

ถ่านทั้ง 3 ชนิดที่มีอยู่ 3%, 5% และ 5.5% ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ถ้าทำความสะอาดถ่านก่อนการทดลอง (pretreatment) ด้วยสารละลายของโลหะจะช่วยให้สามารถดูดซับอาร์เซนิกได้ดีกว่าการใช้ถ่านกัมมันต์เพียงอย่างเดียว แต่ก็ต้องขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่จะนำมาใช้ด้วยดังที่แสดงในตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 ผลของความสามารถในการดูดซับอาร์เซนิกด้วยถ่านกัมมันต์ (Lorenzen และคณะ, 1995)

Pretreatment Metal	pH	As loading (mg As/g C)	Expected Compound	Arsenic/metal Molar Ratio	
				Exp.	Comp.
None	-	2.40	-	-	-
Ba	8.0	1.87	BaHAsO ₄ .H ₂ O	0.77	1.00
Ca (CN)	7.7	1.60	Ca ₃ (AsO ₄) ₂	0.57	0.67
Co	8.0	2.51	Co ₃ (AsO ₄) ₂ .8H ₂ O	1.20	0.67
Cu	6.0	5.79	Cu ₂ AsO ₄ OH	2.30	0.50
Mg	9.0	1.88	Mg ₃ (AsO ₄) ₂ .10H ₂ O	1.10	0.67
Ni	8.0	2.80	Ni ₃ (AsO ₄) ₂ .8H ₂ O	2.50	0.67
Pb	6.5	3.19	Pb(AsO ₄) ₃ Cl	1.40	3.00
Fe (II)	5.0	3.69	Fe ₃ (AsO ₄) ₂	2.00	0.67
Fe (III)	5.0	4.53	FeAsO ₄ .xFe(OH) ₃	3.50	1/(x+1)
Fe (III)	2.0	2.03	FeAsO ₄ .xH ₂ O	1.70	1.00
Zn	8.0	2.56	Zn ₂ AsO ₄ OH	1.90	0.50

Lower และคณะ (1998) ศึกษาปฏิกิริยาระหว่างตะกั่วในสารละลายกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่พีเอชน้ำเสียเท่ากับ 6 และอุณหภูมิทดลองที่ 22 °C พบว่าตะกั่วถูกดูดซับเข้าเป็นส่วนหนึ่งของไฮดรอกซีอะพาไทต์พร้อม ๆ กับที่เกิดการละลายของไฮดรอกซีอะพาไทต์ และเกิดการตกตะกอนเป็นไฮดรอกซีไพโรมอไฟต์ หรือสารประกอบตะกั่วในรูปของแข็งอื่น ๆ ซึ่งกระบวนการตกตะกอนที่เกิดขึ้นนั้น ขึ้นอยู่กับสภาวะการอิ่มตัวเริ่มต้นของไฮดรอกซีไพโรมอไฟต์เป็นส่วนสำคัญ

Dahbi และคณะ (1999) ศึกษาการใช้ถ่านกระดุกเป็นสารดูดซับในการกำจัด Cr^{6+} จากน้ำเสีย โดยทำการเผาเศษกระดุกที่อุณหภูมิสูง และปราศจากอากาศ จากนั้นทำการคัดขนาด ถ่านกระดุกให้อยู่ในช่วง 0.05-0.8 มิลลิเมตร แล้วนำไปทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ Cr^{6+} เพื่อศึกษา ผลของเวลา ปริมาณถ่าน พีเอช และความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ ผลการทดลองพบว่า ถ่านกระดุกปริมาณ 2.0 กรัม สามารถกำจัด Cr^{6+} ได้สูงกว่า 90% ที่พีเอชของน้ำเสียเท่ากับ 1 และ เวลาที่เหมาะสมในการดูดซับ 30 นาที โดยถ้าเพิ่มปริมาณถ่าน จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัด สูงขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังทดลองเตรียมถ่าน โดยการแช่เศษกระดุกในสารละลายกรดและด่าง ก่อนนำไปเผา แต่พบว่าไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด

Wilson และคณะ (2001) ศึกษาการดูดซับไอออนบวกของ Cr (III) และไอออนลบของ Cr (VI) ด้วยถ่านกระดุกเชิงการค้า Brimac 216 ที่มีขนาดอยู่ในช่วง 250-850 ไมโครเมตร จากการทดลองแบบแบทช์เพื่อศึกษาไอโซเทอมการดูดซับพบว่า การทดลองสำหรับไอออนทั้ง 2 ชนิดนี้ มีความเหมาะสมกับสมการไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ที่ทำให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.9931 โดยความสามารถ ในการดูดซับของ Cr (III) และ Cr (VI) เท่ากับ 15 และ 3.5 มิลลิกรัม/กรัมถ่าน ตามลำดับ และยัง พบว่าถ่านกระดุกยังสามารถรีดิวซ์ Cr (VI) ได้บ้างด้วย ซึ่งอาจเป็นผลให้ถ่านสามารถดูดซับ Cr (III) ได้มากกว่า

Dahbi และคณะ (2002) ทำการทดลองต่อเนื่องจากเมื่อปี 1999 โดยเปลี่ยนชนิดของโลหะ เป็น Cr^{3+} ผลการทดลองพบว่า ถ่านกระดุกสามารถกำจัด Cr^{3+} ได้มากกว่า 90% เช่นเดียวกัน แต่ปริมาณถ่านกระดุกที่ใช้เท่ากับ 3.0 กรัม/ลิตร ที่พีเอชน้ำเสียเท่ากับ 3.5 และเวลาในการกำจัด 30 นาที และยังศึกษาผลของการเตรียมถ่าน โดยการแช่ถ่านในกรดในดริคความเข้มข้น 1.0, 2.0 และ 5.0 โมลาร์ ผลที่ได้พบว่าพื้นที่ผิวของถ่านกระดุกมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพในการกำจัด ดังตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 ผลของการเตรียมถ่านกระดุกด้วยกรดในดริคที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (Dahbi และคณะ, 2002)

กรดในดริค (โมลาร์)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตร.ม./ก.)	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
1.0	190	93
2.0	326	74
5.0	630	13

การที่ประสิทธิภาพในการกำจัดลดลงนั้น อาจเป็นผลมาจากองค์ประกอบของออกซิเจน และฟอสเฟตลดลง ทำให้ Cr^{3+} ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยากับตัวดูดซับได้ และหากเตรียมถ่านกระดูก ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1.0 โมลาร์ ร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.0 โมลาร์ จะสามารถ กำจัด Cr^{3+} ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัม/ลิตร ต่อถ่านกระดูก 1.5 กรัม ได้ถึง 99% ในเวลา 1 ชั่วโมง

Daniel และคณะ (2004) ศึกษาผลของการใช้ดินในการกำจัดสารปนเปื้อนที่อยู่ในกลุ่มของ COC's (Constituents of Concern in Soil) ได้แก่ Ac, As, Co, Cr, Cs, Hg, Mn, Pb, Ra, Sr, Tc, Tl, Th และ U เนื่องจากในดินมีสารประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน คือ ซัลไฟด์ ฟอสเฟต และตัวรีดิวซ์ ซึ่งก็คือ เหล็ก (Fe (0)) พบว่าอะพาไทต์ (apatite) หรือสารประกอบฟอสเฟตนี้เป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่มีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักได้ โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอะพาไทต์กับโลหะที่เป็นไปได้อีกมีอยู่ 3 กลไก คือ 1) การเกิดการแลกเปลี่ยนไอออน แต่พบว่ากลไกนี้น่าจะมีความเป็นไปได้ต่ำ เนื่องจากพันธะระหว่างโลหะหรือสารปนเปื้อน (contaminants) กับอะพาไทต์เป็นพันธะอ่อน ๆ 2) การเกิดการแทนที่ของสารที่มีลักษณะคล้ายกัน (isomorphic substitution) ซึ่งสารปนเปื้อนเหล่านี้สามารถเกิดการแทนที่กับ Ca^{2+} , PO_4^{2-} หรือ OH^- ในโครงสร้างของอะพาไทต์ได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดอะตอมของสารด้วย 3) การละลายและการตกตะกอนของอะพาไทต์ (dissolution/precipitation) เป็นกลไกที่มีความเป็นไปได้สูง โดยเกิดจากการละลายของอะพาไทต์และตกตะกอนกับโลหะเป็นไพโรมอไรต์ (pyromorphite) ซึ่งการละลายนี้ขึ้นกับพีเอชของสารละลายด้วย

Xu และคณะ (2002) ศึกษาสารดูดซับชนิดใหม่ในการกำจัดอาร์เซนิก โดยเลือกใช้ Aluminum-loaded Shirasu-Zeolite P1 (Al-SZP1) ที่ถูกเตรียมขึ้นสำหรับเป็นสารดูดซับ As (V) ในน้ำ เมื่อศึกษาไอโซเทอมการดูดซับพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำ ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช และผลของพีเอชน้ำเสียเริ่มต้นในช่วง 3-10 นั้นมีผลเล็กน้อยต่อความสามารถในการดูดซับ ซึ่ง Al-SZP1 มีความสามารถดูดซับ As (V) ได้ดีพอ ๆ กับการใช้แอกติเวตเตดอลูมินา นอกจากนี้ยังพบว่าไอออนของอาร์เซนไนต์ คลอไรด์ ไนเตรต ซัลเฟต โครเมต และอะซิเตตมีอิทธิพลต่อกระบวนการดูดซับด้วย กลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่าง Al-SZP1 กับ As(V) นั้นเป็นแบบการแลกเปลี่ยนลิแกนด์ (ligand-exchange) ระหว่างไอออนของอาร์เซนิกกับกลุ่มไฮดรอกไซด์ที่บริเวณผิวของ Al-SZP1 นั้นเอง

นันทนา (2543) เลือกใช้เศษคอนกรีตเป็นสารดูดซับเพื่อกำจัด As (V) ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการทดลองแบบแบทช์ และแบบคอลัมน์ เศษคอนกรีตที่ใช้มีขนาดต่าง ๆ กัน ได้แก่ 1.0, 1.75, 2.0 และ 2.36 มิลลิเมตร พบว่าเศษคอนกรีตขนาด 1.0 มิลลิเมตร นั้นมีพื้นที่ผิว ปริมาตร ความพรุน และขีดความสามารถในการกำจัด As (V) จากน้ำเสียสังเคราะห์ได้สูงสุด นอกจากนั้น ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดติดผิวแสดงให้เห็นว่า ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชมีความเหมาะสมสำหรับการทดลองมากกว่าไอโซเทอมแบบแลงมัวร์เพราะให้ค่า R^2 เข้าใกล้ 1 มากกว่า สำหรับการทดลองโดยใช้ถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์พบว่า เศษคอนกรีตขนาด 1.0 มิลลิเมตร ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดได้สูงถึง 96.14-100% และเศษคอนกรีตขนาด 1.75, 2.0 และ 2.36 มิลลิเมตร ให้ประสิทธิภาพการกำจัดในช่วง 95.57-100%, 96.71-100% และ 95.92-100% ตามลำดับ โดยสามารถบำบัดให้ความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่เหลือในน้ำเสียมีค่าต่ำกว่า 50 ไมโครกรัม/ลิตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำดื่มเพื่อการบริโภคได้

อุบลรัตน์ (2544) ได้ศึกษาความสามารถในการดูดซับของถ่านกระดูกกับโลหะหนัก 3 ชนิด คือ ตะกั่ว แคดเมียม และโครเมียม โดยก่อนใช้งานได้ศึกษาสภาวะการเตรียมถ่านที่อุณหภูมิเผา 600 800 และ 1000 °C ที่ระยะเวลาในการเผา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง ผลการทดลองสรุปว่า เวลาที่ใช้ในการเผาไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก แต่อุณหภูมิที่เหมาะสมจากการทดลองเท่ากับ 600 °C และถ่านกระดูกสามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุดที่พีเอชเท่ากับ 5 รองลงมาคือแคดเมียมที่พีเอชเท่ากับ 6 แต่ไม่สามารถกำจัดโครเมียมได้

ศุภกิจ (2545) พบว่าการเผาถ่านกระดูกไม่จำเป็นต้องเผาที่อุณหภูมิสูง ๆ ดังที่อุบลรัตน์ (2544) ได้ตั้งสมมติฐานไว้ จึงทำการทดลองเผาที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 °C นาน 1 ชั่วโมง พบว่าที่อุณหภูมิ 500 °C มีความเหมาะสมต่อประสิทธิภาพการกำจัดของถ่านกระดูก จากนั้นนำไปทดสอบการกำจัดโลหะหนัก 2 ชนิด คือ ตะกั่ว และแคดเมียม โดยกระบวนการดูดซับ และหาสภาวะการทดลองที่เหมาะสมกับน้ำเสียสังเคราะห์แบบแบตช์ และน้ำเสียจริงแบบคอลัมน์ พบว่าถ่านกระดูกสามารถดูดซับโลหะตะกั่วได้สูงถึง 617.5 มิลลิกรัม/กรัม ถ่านกระดูก ในช่วงพีเอช 4-6 และดูดซับแคดเมียมได้ 68 มิลลิกรัม/กรัม ถ่านกระดูก ในช่วงพีเอช 5-7

แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์ และเครื่องมือวิเคราะห์

- 1) เตาเผาอุณหภูมิสูง (muffle furnace)
- 2) เครื่องบดวัสดุแบบละเอียด
- 3) ตะแกรงร่อน (sieve) เบอร์ 325 (45 ไมโครเมตร)
- 4) เครื่องร่อนคัดขนาด (sieve shaker)
- 5) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด 5 ตำแหน่ง
- 6) เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
- 7) เครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (magnetic stirrer)
- 8) เครื่องเขย่า (shaker)
- 9) ขวดพลาสติกสำหรับเขย่า
- 10) ชุดกรองสุญญากาศ
- 11) กระดาษกรองเมมเบรนชนิด GF/C
- 12) ตู้ดูดความชื้น (desicater)
- 13) เครื่องจาร์เทสต์ (jar test)
- 14) เครื่องแก้วทั่วไป
- 15) เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer: AAS)
- 16) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscope: SEM)
- 17) เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันสเปกโตรมิเตอร์ (X-Ray Diffraction Spectrometer: XRD)

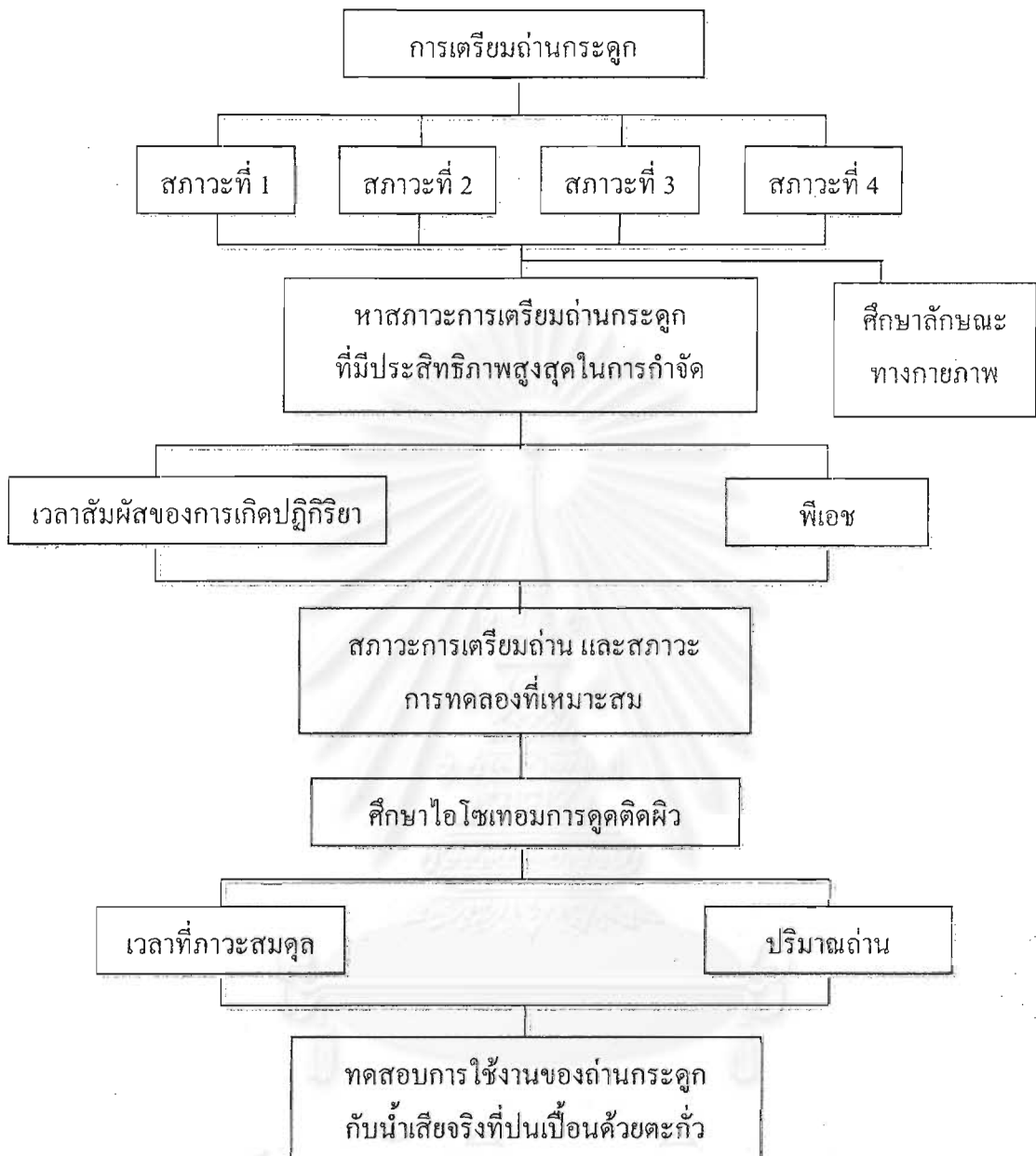
3.1.2 สารเคมี

- 1) ตะกั่วไนเตรท ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$)
- 2) โซเดียมอาร์ซีเนต ($\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)
- 3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
- 4) กรดไนตริก (HNO_3)
- 5) โซเดียมอะซิเตต (CH_3COONa)
- 6) สารละลายมาตรฐานตะกั่วสำหรับวิเคราะห์ AAS
- 7) สารละลายมาตรฐานอาร์เซนิกสำหรับวิเคราะห์ AAS
- 8) ไอโอดีน
- 9) กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
- 10) โซเดียมโรโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)
- 11) โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3)
- 12) โพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI)
- 13) โพแทสเซียมไอโอเดต (KIO_3)
- 14) แป้งมัน (starch)

3.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

งานวิจัยนี้ ทำการทดลองใช้ผ่านกระดุกในการกำจัดโลหะหนัก 2 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว และ อาร์เซนิก โดยทำการทดลองแบบแบบทซ์กับน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักเริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัม/ลิตร เพื่อหาสภาวะการกำจัดที่เหมาะสม และนำสภาวะดังกล่าวไปทดลองกับน้ำเสียจริง การทดลองสามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้ (รูปที่ 3.1)

- ขั้นตอนที่ 1** การศึกษาสภาวะการเตรียมผ่านกระดุกที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการทดลองแบบแบบทซ์
- ขั้นตอนที่ 2** การศึกษาลักษณะทางกายภาพ และ โครงสร้างของผ่านกระดุกที่เตรียมขึ้น
- ขั้นตอนที่ 3** การศึกษาไอโซเทอมการดูดติดผิวด้วยผ่านกระดุกในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียสังเคราะห์
- ขั้นตอนที่ 4** การศึกษาประสิทธิภาพของผ่านกระดุกในการกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียจริง



รูปที่ 3.1 แผนภาพสรุปขั้นตอนการดำเนินการทดลองประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักด้วยถ่านกระดุก

3.3 ขั้นตอนการเตรียมถ่านกระดูก และน้ำเสียสังเคราะห์

3.3.1 การเตรียมถ่านกระดูก

ถ่านกระดูกที่ใช้ในการทดลองถูกเตรียมขึ้นแตกต่างกัน 4 สภาวะ สำหรับการนำไปทดลองกำจัดโลหะหนักในขั้นตอนต่อไป โดยวิธีการเตรียมถ่านกระดูกมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

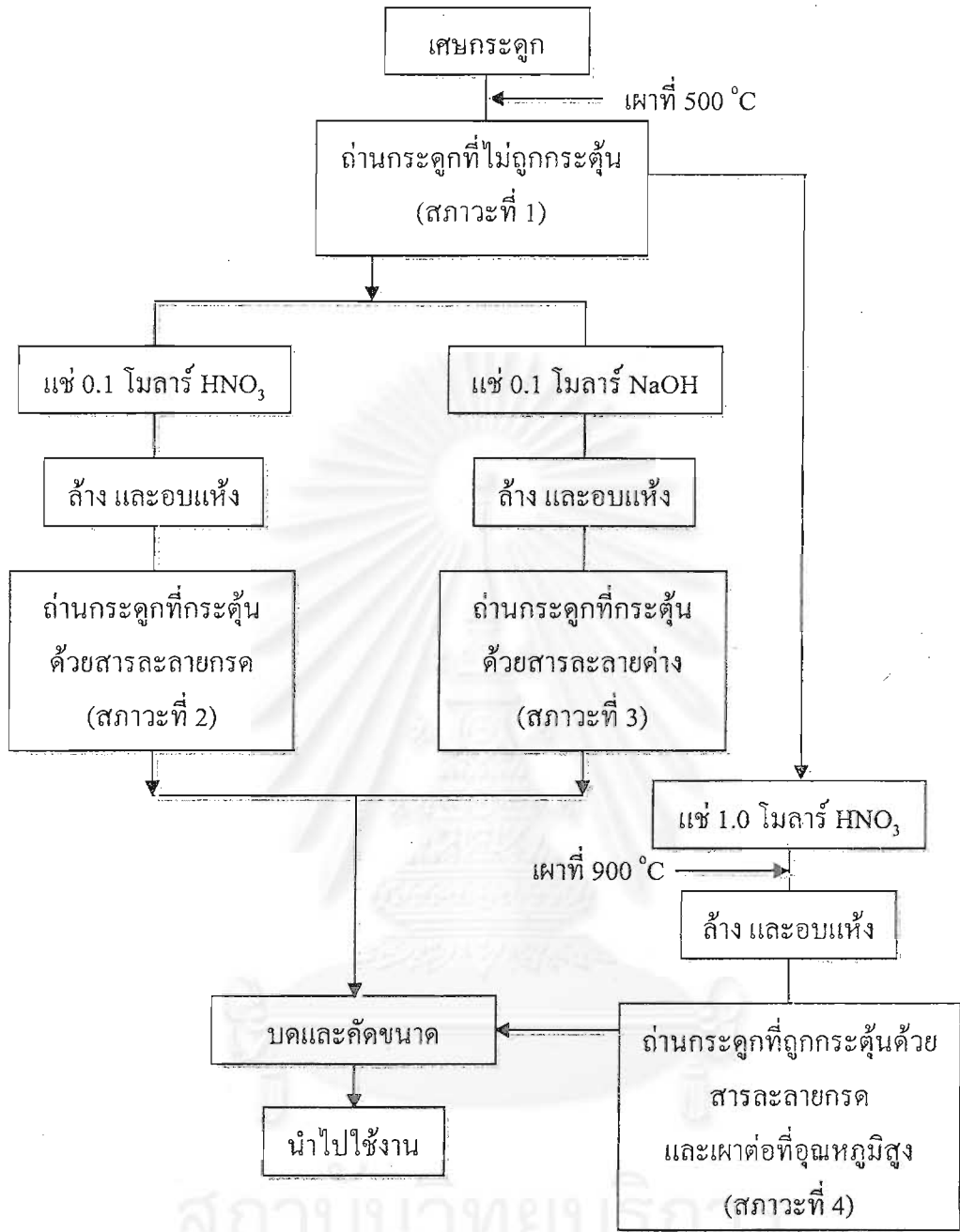
1) ทำการเผาเศษกระดูกแบบใช้ออกซิเจน เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่อุณหภูมิเผา 500°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นตัวลงในตู้ดูดความชื้น จะได้ถ่านกระดูกสภาวะที่ 1 เรียกว่า “ถ่านกระดูกที่ไม่ถูกกระตุ้น”

2) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อที่ 1 แต่หลังจากที่ถ่านกระดูกเย็นตัวลงแล้ว นำถ่านกระดูกปริมาณ 25 กรัม แช่ลงในสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ หรือสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร นาน 48 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นจนเป็นกลาง อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105°C จะได้ถ่านกระดูกสภาวะที่ 2 และ 3 เรียกว่า “ถ่านกระดูกที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายกรด และถ่านกระดูกที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายด่าง” ตามลำดับ

3) ทำการเผาเศษกระดูกที่อุณหภูมิเผา 500°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากถ่านกระดูกเย็นตัวลงแล้ว แบ่งถ่านกระดูกปริมาณ 25 กรัม แช่ลงในสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเผาต่อที่อุณหภูมิ 900°C ล้างถ่านที่ได้ด้วยน้ำกลั่นจนเป็นกลาง อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105°C จะได้ถ่านกระดูกสภาวะที่ 4 เรียกว่า “ถ่านกระดูกที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายกรด และเผาที่อุณหภูมิสูง”

4) นำถ่านกระดูกที่เตรียมขึ้นทั้ง 4 สภาวะ บดให้เป็นผงละเอียด ทำการคัดขนาดผงถ่านด้วยตะแกรงร่อนเบอร์ 325 จะได้ผงถ่านขนาดไม่เกิน 45 ไมโครเมตร

แผนภาพสรุปขั้นตอนการเตรียมถ่านกระดูกนี้ แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนภาพสรุปขั้นตอนการเตรียมถ่านกระดูกสภาวะต่าง ๆ

3.3.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนัก

3.3.2.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว

เริ่มจากเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัม/ลิตร (stock solution) โดยละลายตะกั่วไนเตรต ($Pb(NO_3)_2$) ปริมาณ 1.5999 กรัม ในกรดไนตริกเข้มข้น (16 M) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร และนำสารละลายที่ได้นี้ไปเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ต่อไป

3.3.2.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์อาร์เซนิก

เริ่มจากเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์อาร์เซนิกความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัม/ลิตร (stock solution) โดยละลาย $Na_2HAsO_4 \cdot 7H_2O$ ปริมาณ 4.1633 กรัม ในกรดไนตริกเข้มข้น (16 M) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร และนำสารละลายที่ได้นี้ไปเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์อาร์เซนิกความเข้มข้นอาร์เซนิกเริ่มต้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ต่อไป

3.4 การดำเนินการทดลอง

3.4.1 การศึกษาสภาวะการเตรียมน้ำผ่านกระดุกที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่ว และอาร์เซนิกจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการทดลองแบบแบทช์

ขั้นตอนนี้เป็นทดลองขั้นแรก มีจุดประสงค์เพื่อหาชนิดของถ่านกระดุก และสภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่ถ่านกระดุกสามารถกำจัดได้ดีที่สุด ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการสัมผัส และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย ภายหลังจากการใช้ถ่านกระดุกทั้ง 4 สภาวะ ในการกำจัดตะกั่วและอาร์เซนิก โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

3.4.1.1 ผลของเวลาสัมพัทธ์ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกัว และอาร์เซนิก

- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ตะกัว ความเข้มข้นตะกัวเริ่มต้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร และปรับพีเอชน้ำเสียเท่ากับ 5 แบ่งตัวอย่างน้ำเสียปริมาตร 25 มิลลิลิตร ลงในขวดสำหรับเขย่า
- 2) เติมถ่านกระดูกสถานะที่ 1 ปริมาณ 1.0 กรัม/ลิตรน้ำเสีย ลงในขวดตัวอย่างน้ำเสียข้อ (1)
- 3) นำตัวอย่างไปเขย่าที่ความเร็ว 250 รอบ/นาที และเก็บตัวอย่างในนาที่ที่ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90 120 150 และ 180 รวมเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นวัดพีเอชตัวอย่างน้ำเสียที่เก็บตามเวลาต่าง ๆ นั้น
- 4) นำตัวอย่างทั้งหมดกรองตะกอนออก และเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่กรองได้ วิเคราะห์หาความเข้มข้นของตะกัวที่เหลือด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
- 5) ทำการทดลองซ้ำข้อ (1)-(4) แต่เปลี่ยนชนิดของถ่านกระดูกเป็นสถานะที่ 2, 3 และ 4 ตามลำดับ
- 6) ทำการทดลองซ้ำทั้งหมด โดยเปลี่ยนชนิดโลหะหนักจากตะกัวเป็นอาร์เซนิก และทำการเก็บตัวอย่างที่เวลา 24 และ 48 ชั่วโมง

3.4.1.2 ผลของพีเอชน้ำเสียเริ่มต้นที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพในการกำจัดตะกัวและอาร์เซนิก

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.4.1.1 แต่ปรับพีเอชน้ำเสียเริ่มต้นเป็น 4, 6 และ 7 และทำ blank เพื่อเปรียบเทียบผลที่เกิดจากกระบวนการตกตะกอน โดยทำการทดลองเช่นเดียวกัน แต่ไม่มีการเติมถ่านกระดูกลงในตัวอย่างน้ำเสีย โดยใช้เวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสมที่ได้จากผลการทดลองข้างต้น

สำหรับการทดลองขั้นตอนที่ 1 นี้ สามารถสรุปตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 3.1-3.2

ตารางที่ 3.1 ผลของเวลาสัมพัทธ์ที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก

ตัวแปร	พารามิเตอร์
<u>ตัวแปรอิสระ</u>	
1. สภาพการเตรียมถ่านกระดูก	- ถ่านกระดูกสถานะที่ 1, 2, 3 และ 4
2. ชนิดของโลหะหนัก	- ตะกั่ว และอาร์เซนิก
3. เวลาสัมพัทธ์ของการเกิดปฏิกิริยา	- 10-180 นาที สำหรับตะกั่ว - 24 และ 48 ชั่วโมง สำหรับอาร์เซนิก
<u>ตัวแปรควบคุม</u>	
1. น้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้น	
- ความเข้มข้นโลหะหนัก	- 10 มิลลิกรัม/ลิตร
- พีเอชน้ำเสียเริ่มต้น	- 5
- ปริมาณน้ำเสีย	- 25 มิลลิลิตร
2. ปริมาณถ่านกระดูก	- 1.0 กรัม/ลิตรน้ำเสีย
3. ความเร็วรอบในการเขย่า	- 250 รอบ/นาที
<u>ตัวแปรตาม</u>	
1. น้ำเสียสังเคราะห์หลังการทดลอง	- ความเข้มข้นโลหะหนักที่เหลือ - พีเอชหลังการทดลอง
2. ประสิทธิภาพการกำจัด	- ร้อยละการกำจัด

ตารางที่ 3.2 ผลของพีเอชน้ำเสียเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก

ตัวแปร	พารามิเตอร์
<u>ตัวแปรอิสระ</u>	
1. สภาพการเตรียมถ่านกระดูก	- ถ่านกระดูกสถานะที่ 1, 2, 3 และ 4
2. ชนิดของโลหะหนัก	- ตะกั่ว และอาร์เซนิก
3. พีเอช	- 4, 5, 6 และ 7
<u>ตัวแปรควบคุม</u>	
1. น้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้น	
- ความเข้มข้นโลหะหนัก	- 10 มิลลิกรัม/ลิตร
- ปริมาณน้ำเสีย	- 25 มิลลิลิตร
2. ความเร็วรอบในการเขย่า	- 250 รอบ/นาที
3. เวลาสัมผัสของการเกิดปฏิกิริยา	- (จากการทดลองข้อ 3.4.1.1)
<u>ตัวแปรตาม</u>	
1. น้ำเสียสังเคราะห์หลังการทดลอง	- ความเข้มข้นโลหะหนักที่เหลือ
	- พีเอชพีเอชหลังการทดลอง
2. ประสิทธิภาพการกำจัด	- ร้อยละการกำจัด

3.4.2 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับด้วยถ่านกระดูกในการกำจัดตะกั่ว และอาร์เซนิกจากน้ำเสียสังเคราะห์

3.4.2.1 น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอชน้ำเสียตามค่าที่ได้จากผลการทดลองข้อ 3.4.1.2 และแบ่งตัวอย่างน้ำเสีย 25 มิลลิลิตร ในขวดสำหรับเขย่า จากนั้นเติมถ่านกระดูกสถานะที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุดจากการทดลองข้อ 3.4.1 ปริมาณ 5, 7, 10, 20, 50 และ 100 มิลลิกรัม/ลิตรน้ำเสีย นำตัวอย่างไปเขย่าที่ความเร็ว 250 รอบ/นาที ทำการเก็บตัวอย่างทุก 10 นาที ในช่วงเวลาที่ 1 และเก็บต่อไปในช่วงเวลาที่ 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 18 และ 24 ชั่วโมง วัดพีเอชของตัวอย่างน้ำเสียหลังการทดลอง และนำไปกรองตะกอนออก เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการกรองไปวิเคราะห์ความเข้มข้นตะกั่วที่เหลือด้วยเครื่องอะตอมมิก แอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งสามารถสรุปการทดลองได้ดังตารางที่ 3.3

3.4.2.2 น้ำเสียสังเคราะห์อาร์เซนิก

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์อาร์เซนิกความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอชน้ำเสียตามค่าที่ได้จากผลการทดลองข้อ 3.4.1.2 และแบ่งตัวอย่างน้ำเสีย 25 มิลลิลิตร ในขวดสำหรับเขย่า จากนั้นเติมถ่านกระดูกสถานะที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุดจากการทดลองข้อ 3.4.1 ปริมาณ 0.5, 1, 3, 5, 10, 30, 50 และ 100 กรัม/ลิตรน้ำเสีย นำตัวอย่างไปเขย่าที่ความเร็ว 250 รอบ/นาที ทำการเก็บตัวอย่างที่ 1, 3, 6, 12, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง วัดพีเอชของตัวอย่างน้ำเสียหลังการทดลอง และนำไปกรองตะกอนออก เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการกรองไปวิเคราะห์ความเข้มข้นอาร์เซนิกที่เหลือด้วยเครื่องอะตอมมิก แอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งสามารถสรุปการทดลองได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดติดผิวด้วยถ่านกระดูกในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสีย
สังเคราะห์

ตัวแปร	พารามิเตอร์
<u>ตัวแปรอิสระ</u>	
1. สภาพะการเตรียมถ่านกระดูก	- (จากการทดลองข้อ 3.4.1)
2. ชนิดของโลหะหนัก	- ตะกั่ว และอาร์เซนิก
3. เวลาสัมผัสของการเกิดปฏิกิริยา	- 0-24 ชั่วโมง สำหรับตะกั่ว - ชั่วโมงที่ 0-72 ชั่วโมง สำหรับอาร์เซนิก
4. ปริมาณถ่านกระดูก	- 5, 7, 10, 20, 50 และ 100 มิลลิกรัม/ลิตร น้ำเสีย สำหรับตะกั่ว - ปริมาณ 0.5, 1, 3, 5, 10, 30, 50 และ 100 กรัม/ลิตรน้ำเสีย สำหรับอาร์เซนิก
<u>ตัวแปรควบคุม</u>	
1. น้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้น	
- ความเข้มข้นโลหะหนัก	- 10 มิลลิกรัม/ลิตร
- พีเอชน้ำเสียเริ่มต้น	- (จากการทดลองข้อ 3.4.1.2)
- ปริมาตรน้ำเสีย	- 25 มิลลิลิตร
2. ความเร็วรอบในการเขย่า	- 250 รอบ/นาที
<u>ตัวแปรตาม</u>	
1. น้ำเสียสังเคราะห์หลังการทดลอง	- ความเข้มข้นโลหะหนักที่เหลือ - พีเอชหลังการทดลอง
2. ประสิทธิภาพการกำจัด	- ร้อยละการกำจัด

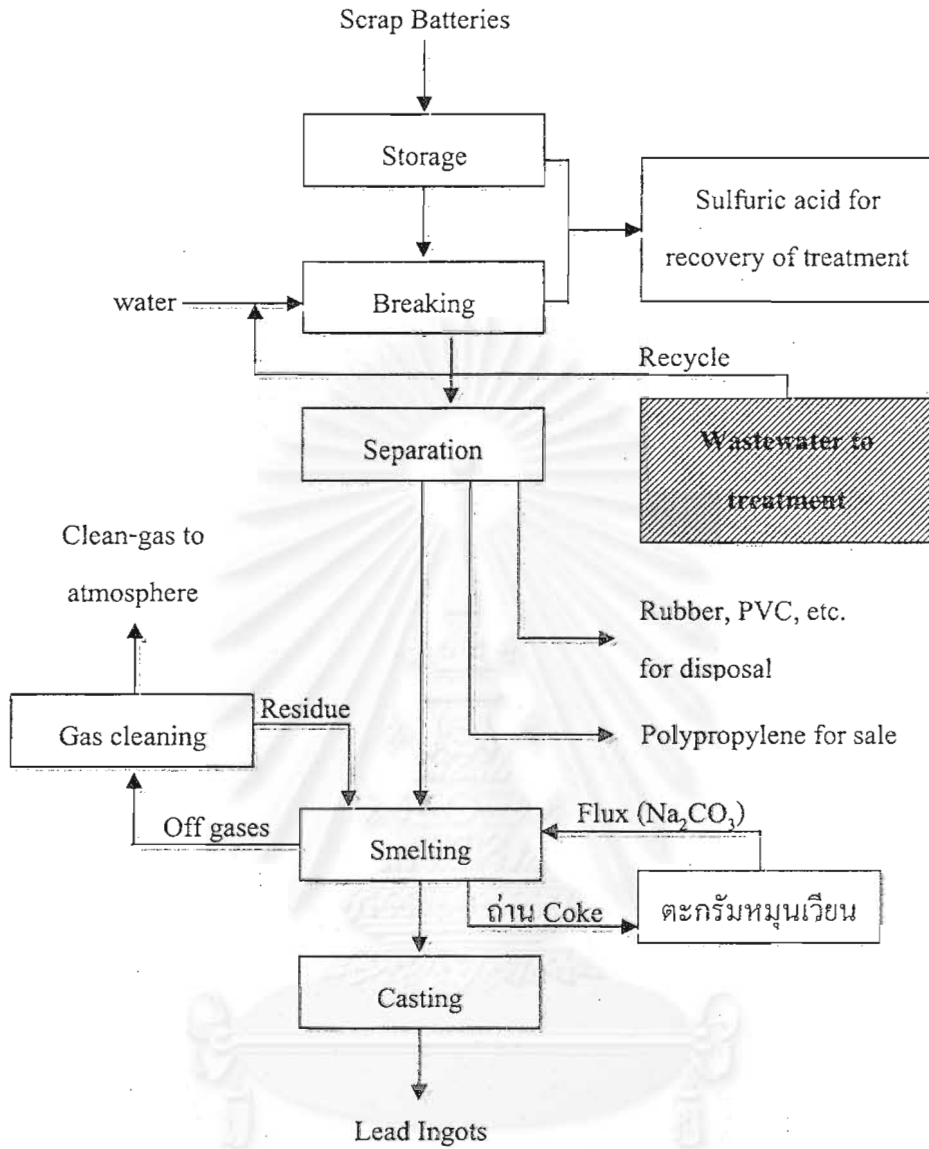
3.4.3 การศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกระดุกในการกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตตะกั่ว แห้ง

การทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียจริงด้วยถ่านกระดุก โดยเลือกใช้สภาวะการทดลองที่เหมาะสมทั้งหมด ได้แก่ สภาวะการเตรียมถ่านกระดุก พีเอชน้ำเสีย เริ่มต้น และเวลาสัมผัสที่ใช้ในการกำจัดตะกั่วจากการทดลองขั้นตอนที่ 3.4.2 และทำการทดลอง โดยวิธีการตกตะกอนด้วยเครื่องจาร์เทสต์ ซึ่งรายละเอียดของการทดลองแสดงดังนี้

- 1) ปรับพีเอชน้ำเสียจริงเริ่มต้นที่ได้จากการทดลองที่ 3.4.1.2 และแบ่งใส่บีกเกอร์ จาร์เทสต์ให้มีปริมาตรตัวอย่างน้ำเสีย 600 มิลลิลิตร จำนวน 6 บีกเกอร์
- 2) เติมถ่านกระดุกลงไปปริมาณ 10, 30, 50, 70 และ 100 มิลลิกรัม/ลิตรน้ำเสีย ใน บีกเกอร์ที่ 1 ถึง 5 สำหรับบีกเกอร์ที่ 6 ไม่ต้องเติมถ่านกระดุก (blank)
- 3) ทำการกวนตัวอย่างด้วยความเร็ว 120 รอบ/นาที นาน 30 นาที
- 4) ตั้งทิ้งให้ตกตะกอน 20 นาที จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำใสส่วนบนไปทำการย่อย (digestion) เพื่อหาความเข้มข้นของตะกั่วทั้งหมด สำหรับตัวอย่างน้ำที่เหลือให้นำไปกรอง และเก็บ สารละลายที่กรองได้ เพื่อหาความเข้มข้นของตะกั่วละลายที่เหลือในน้ำเสีย

ตัวอย่างน้ำเสียจริงที่ใช้ในการทดลอง เป็นน้ำทิ้งอุตสาหกรรมการผลิตตะกั่วแห้งจากการ หลอมแบดเตอรีเก่าที่ไม่ใช่แล้ว ขั้นตอนการผลิตแสดงดังรูปที่ 3.3 โดยน้ำเสียจากกระบวนการผลิต นั้นเกิดจากขั้นตอนการผ่าแยกชิ้นส่วนแบดเตอรีเก่า (breaking and separation) ซึ่งได้มีการฉีดพ่นน้ำ เพื่อหล่อเย็นใบเลื่อยที่ใช้ผ่าแยกชิ้นส่วนแบดเตอรี และเพื่อล้างคราบน้ำกรด และน้ำยาอิเล็กทรอนิกส์ ไตรไลต์ ออกจากชิ้นส่วนก่อนเข้าสู่เตาหลอม ซึ่งน้ำเสียทั้งหมดนี้ได้ถูกส่งไปยังระบบบำบัดต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3 กรรมวิธีการผลิตโลหะตะกั่วแห่งโดยใช้เตาหลอมแบบตั้ง และใช้ Na_2CO_3 เป็นฟลักซ์

หมายเหตุ



แสดงจุดเก็บตัวอย่าง

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของถ่านกระดูก

งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว และอาร์เซนิกในน้ำเสียด้วยถ่านกระดูก โดยกระดูกสัตว์ที่ถูกนำมาเป็นวัสดุคัปตั้งต้นในการทดลองได้รับความอนุเคราะห์จากมหาวิทยาลัยเกษตรกรรมกระดูกสัตว์ จำกัด ซึ่งเป็นกระดูกของสัตว์จำพวกโคและกระบือ จากอวัยวะต่าง ๆ ส่วนปะปนกัน และผ่านขั้นตอนการล้างด้วยไฮโปคลอไรต์ จากการสังเกตพบว่า เศษกระดูกเหล่านี้มีความแข็งมาก และมีลักษณะของสีแตกต่างกันไป ได้แก่ สีเทา สีเหลือง น้ำตาลอ่อน หรือเทาแกมดำ (ดังรูปที่ 4.1) ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีภายในถ่านกระดูกที่มาจากอวัยวะที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.1 ลักษณะของเศษกระดูกสัตว์ที่เป็นวัสดุคัปในการทดลอง

เศษกระดูกที่ได้ถูกนำมาเตรียมเป็นสารดูดซับเรียกว่า ถ่านกระดูก (bone charcoal) ที่สภาวะการเตรียมแตกต่างกัน โดยขั้นตอนการเตรียมเริ่มจาก การเผาเศษกระดูกแบบใช้ออกซิเจนที่อุณหภูมิ $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ นาน 2 ชั่วโมง และเตรียมเป็นถ่าน 4 สภาวะ ดังนี้

- **ถ่านสภาวะที่ 1** เป็นกระดูกที่เตรียมโดยกระบวนการเผาแบบใช้ออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 500 °C และนำมาใช้ร่อนกันที่ไซโลไม่ถูกกระดูก
- **ถ่านสภาวะที่ 2** เป็นกระดูกที่เตรียมโดยกระบวนการเผาแบบใช้ออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 500 °C และกระดูกนี้ด้วยสารละลายกรดไนตริก ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์
- **ถ่านสภาวะที่ 3** เป็นกระดูกที่เตรียมโดยกระบวนการเผาแบบใช้ออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 500 °C และกระดูกนี้ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์
- **ถ่านสภาวะที่ 4** เป็นกระดูกที่เตรียมโดยกระบวนการเผาแบบใช้ออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 500 °C จากนั้นทำการกระดูกด้วยกรดไนตริก ความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ และนำไปเผาต่อที่อุณหภูมิ 900 °C

ลักษณะของถ่านกระดูกที่ 4 สภาวะ ภายหลังจากทำการศึกษาค้นหาขนาดผ่านตะแกรงร่อนขนาด 45 ไมโครเมตร (sieve No. 325) แสดงดังรูปที่ 4.2 ซึ่งเห็นถึงความเปลี่ยนแปลงของสีถ่านที่เตรียมขึ้นตามสภาวะที่เตรียม โดยสีของถ่านสภาวะที่ 1 ถึง 3 มีสีน้ำตาลอมมือนดิน เนื่องจากทำการเผาที่อุณหภูมิเดียวกันคือ 500 °C ในขณะที่ถ่านสภาวะที่ 4 มีสีเทา เนื่องจากผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่าทำให้สารปนเปื้อนต่าง ๆ ถูกกำจัดออกไปได้มากกว่า



ก) ถ่านกระดูกที่ได้จากการเผา (500 °C) โดยไม่ถูกกระดูก
(ถ่านสภาวะที่ 1)



ข) ถ่านกระดูกที่ได้จากการเผา (500 °C) และกระตุ้นด้วยสารละลายกรดไนตริก
(ถ่านสถานะที่ 2)



ค) ถ่านกระดูกที่ได้จากการเผา (500 °C) และกระตุ้นด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
(ถ่านสถานะที่ 3)

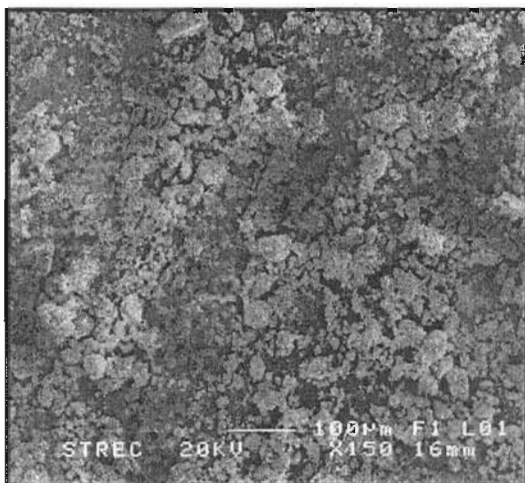


- ๔) นำคาร์บอนที่ได้จากการเผา (500 °C) และถูกกระตุ้นด้วยกรดไนตริก และนำไปเผาต่อที่ 900 °C (ตามสภาวะที่ ๔)

รูปที่ 4.2 ลักษณะของคาร์บอนที่เตรียมไว้ใช้ทดลอง

4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวขององค์ประกอบทางเคมีของคาร์บอนที่เตรียมด้วยเครื่อง SEM

จากการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของคาร์บอนที่มีย่านค่าต่ำกว่า หรือเท่ากับ 45 ไมโครเมตร ด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยายต่ำเพื่อแสดงให้เห็นลักษณะรูปร่างของคาร์บอน และกำลังขยายสูงเพื่อแสดงให้เห็นลักษณะพื้นผิว และรูปร่าง ดังรูปที่ 4.3, 4.4, 4.5 และ 4.6 ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า คาร์บอนที่เตรียมขึ้นทั้ง 4 สภาวะนี้ ส่วนใหญ่มีรูปร่างคล้ายลักษณะพื้นผิวก่อนซึ่งจะขรุขระ ซึ่งเกิดจากการเกาะกันของอนุภาคเล็ก ๆ รวมตัวของคาร์บอนที่มีอนุภาคใหญ่กว่า ทำให้เกิดเป็นโพรงเล็ก ๆ บริเวณผิว

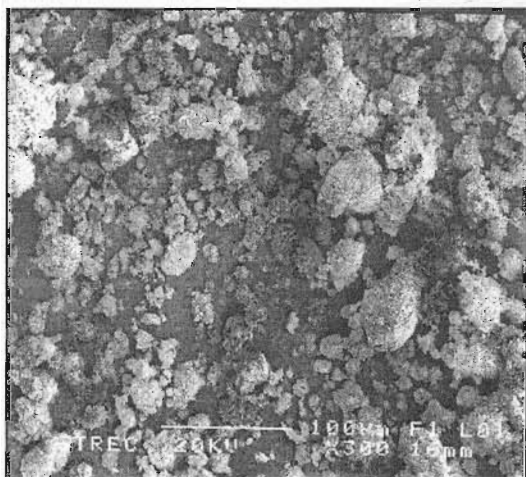


ก) กำลังขยาย 150 เท่า

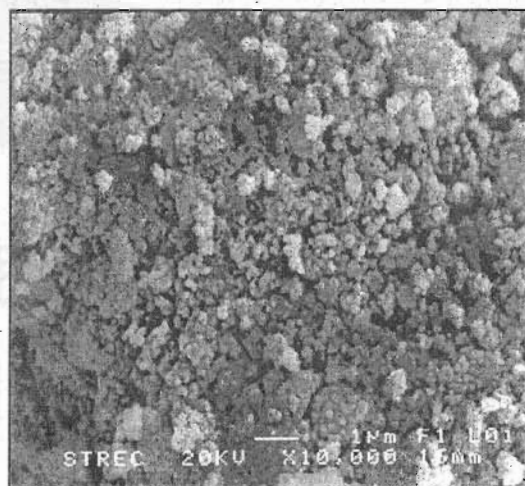


ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า

รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายของถ่านกระดูกที่เตรียมจากการเผาโดยไม่ถูกกระตุ้น ด้วยเครื่อง SEM.

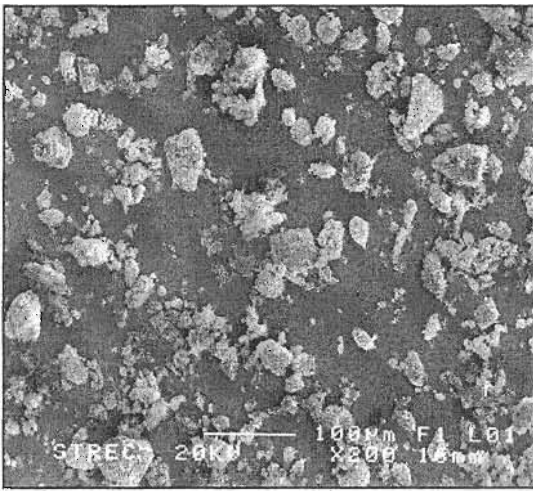


ก) กำลังขยาย 300 เท่า

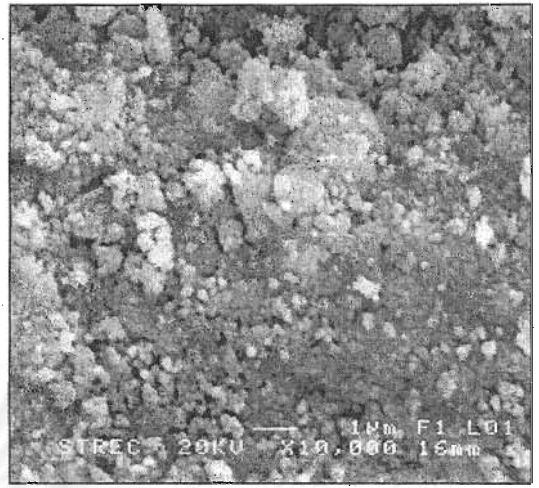


ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า

รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายของถ่านกระดูกที่เตรียมจากการเผา และกระตุ้นด้วยสารละลายกรดไนตริก ด้วยเครื่อง SEM

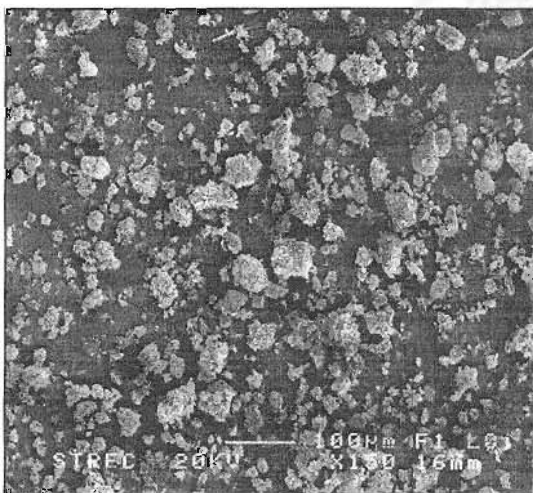


ก) กำลังขยาย 200 เท่า

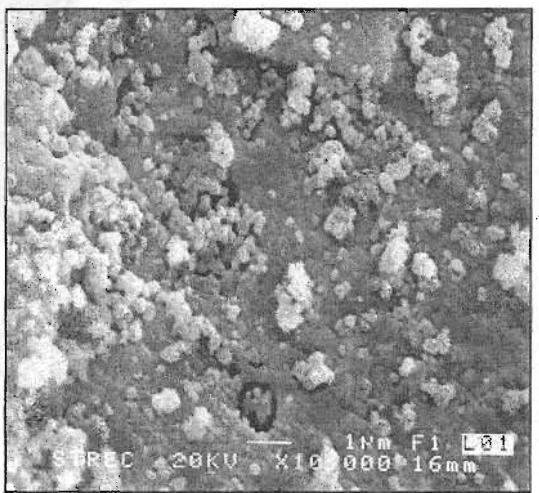


ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า

รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายของถ่านกระดูกที่เตรียมจากการเผา และกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ด้วยเครื่อง SEM



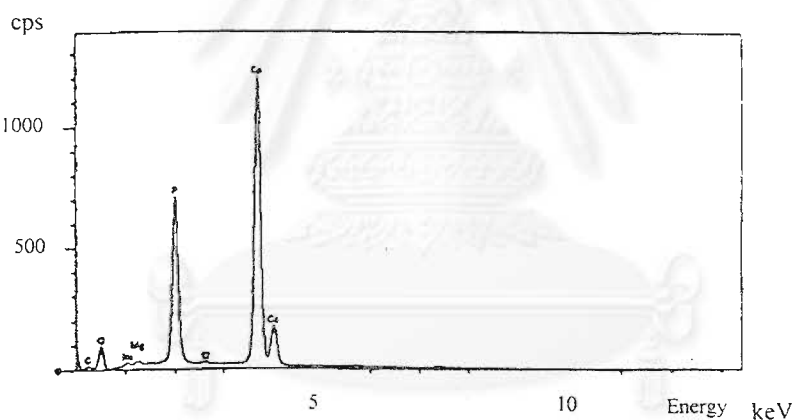
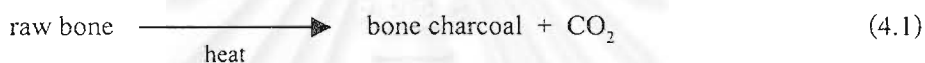
ก) กำลังขยาย 150 เท่า



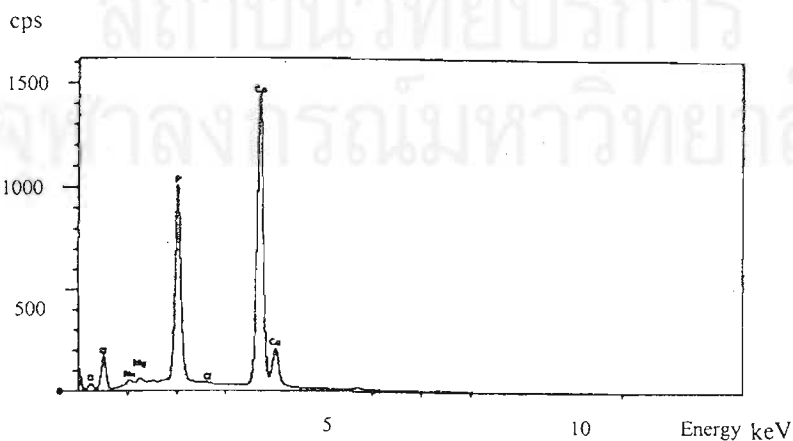
ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า

รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายของถ่านกระดูกที่เตรียมจากการเผา และถูกกระตุ้นด้วยกรดไนตริก และนำไปเผาต่อที่ 900 °C ด้วยเครื่อง SEM

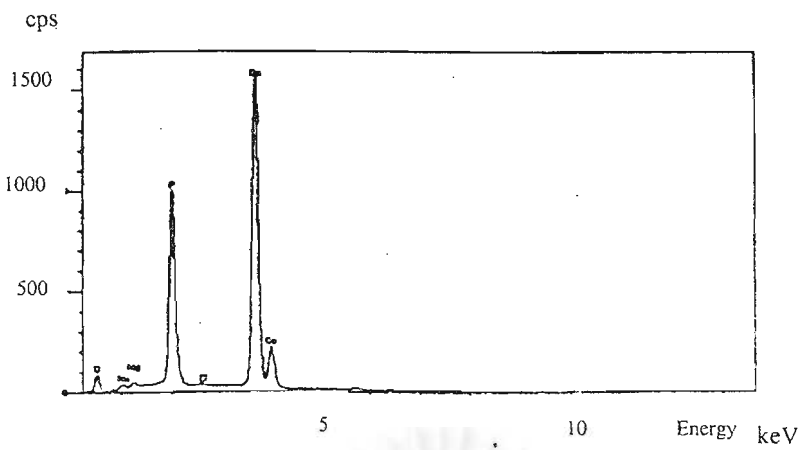
นอกจากนี้ข้อมูลด้านองค์ประกอบธาตุของถ่านกระดูกสามารถวิเคราะห์ได้โดยเครื่อง SEM/EDX ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.7 พบว่าธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักที่พบในถ่านกระดูกทุกสภาวะประกอบด้วยแคลเซียม (Ca) ฟอสฟอรัส (P) และออกซิเจน (O) โดยถ่านสภาวะเดียวกันจะมีองค์ประกอบของ Ca มากที่สุด รองลงมาคือ P และ O ตามลำดับ ซึ่งจะมีสัดส่วนแตกต่างกันไปตามแต่ละสภาวะของถ่านกระดูกที่เตรียมขึ้น และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบองค์ประกอบธาตุในแต่ละสภาวะการเตรียมจะเห็นได้ว่า ถ่านกระดูกที่กระตุ้นด้วยกรด และค่า (ถ่านสภาวะที่ 2 และ 3) มีปริมาณของ Ca และ P ใกล้เคียงกันแต่สูงกว่าถ่านที่ไม่ถูกกระตุ้น และถ่านที่กระตุ้นด้วยกรดและเผาที่ 900 °C (ถ่านสภาวะที่ 1 และ 4) นอกจากนี้ยังพบโซเดียม (Na) แมกนีเซียม (Mg) และคลอไรด์ (Cl) อีกด้วยในปริมาณเล็กน้อย และพบองค์ประกอบของคาร์บอน (C) น้อยมากเช่นกัน เนื่องมาจากถ่านกระดูกได้ถูกเตรียมขึ้นในสภาวะที่เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ดังสมการที่ 4.1



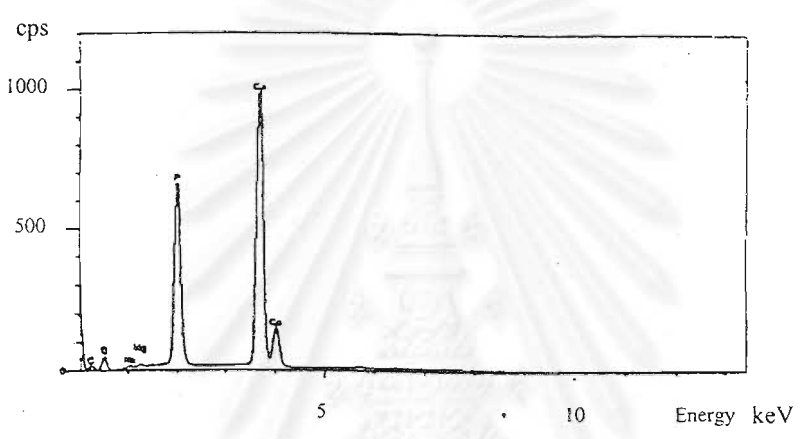
ก) ถ่านกระดูกที่เตรียมจากการเผาโดยไม่ถูกกระตุ้น



ข) ถ่านกระดูกที่เตรียมจากการเผา และกระตุ้นด้วยสารละลายกรดในตริก



ค) ถ่านกระดูกที่เตรียมจากการเผา และกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์



ง) ถ่านกระดูกที่เตรียมจากการเผา และถูกกระตุ้นด้วยกรดไนตริก และนำไปเผาต่อที่ 900 °C

รูปที่ 4.7 องค์ประกอบธาตุที่พบในถ่านกระดูก

4.1.2 ผลการศึกษาองค์ประกอบของไฮดรอกซีอะพาไตต์ในถ่านกระดูกด้วยเครื่อง XRD

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ถ่านกระดูก 4 สภาวะ ด้วยเครื่อง XRD เป็นข้อมูลที่สามารถใช้ยืนยันองค์ประกอบ หรือ โครงสร้างผลึกภายในถ่านกระดูกได้ โดยพบว่าถ่านกระดูกนั้นมีองค์ประกอบของสารไฮดรอกซีอะพาไตต์อยู่จริง ซึ่งสามารถพบสารประกอบนี้ได้ภายในถ่านกระดูกที่เตรียมขึ้นทุกสภาวะดังที่แสดงไว้ตามภาคผนวก ค รูปที่ ก-1 ถึง ก-4 โดยลักษณะของพีค (peak) ที่เครื่อง XRD ตรวจวัดได้จะเห็นว่าถ่านกระดูกสภาวะที่ 1, 2 และ 3 พีคของไฮดรอกซีอะพาไตต์ (HA) แสดงให้เห็น ได้ชัดเจนที่สเกล 2θ (แกน x) ที่ 26, 29, 31-34, 40, 47, 49-50, 53 องศา โดยประมาณ ในขณะที่ถ่านกระดูกสภาวะที่ 4 มีสัญญาณรบกวน (noise) ต่ำ จึงทำให้เห็นพีคของไฮดรอกซีอะพาไตต์ชัดเจนมากกว่าการเตรียมที่สภาวะอื่น กล่าวคือพีคมีลักษณะ sharp แต่ละพีคแยกจากกันอย่างเห็นได้ชัด อาจเป็นเพราะถ่านสภาวะที่ 4 ผ่านขั้นตอนการกระตุ้น และถูก

เตรียมขึ้นที่อุณหภูมิสูงถึง 900 °C จึงทำให้สารปนเปื้อนต่าง ๆ ถูกกำจัดออกไปไม่ทำให้เกิดการบดบังของสัญญาณ รวมถึงอิทธิพลของอุณหภูมิการเผา ดังที่ Phatumvanit และ Legros (1997) และ สุภกิจ (2545) ได้สรุปไว้เช่นเดียวกันว่า ความเป็นผลึก (crystalline) ของไฮดรอกซีอะพาไทต์จะสูงขึ้นตามอุณหภูมิเผาที่เพิ่มขึ้นเห็นได้จากพีคของถ่านสถานะที่ 4 นั้นมีความสูงมากกว่าพีคของถ่านสถานะอื่น ๆ และมีจำนวนมากกว่าด้วย ซึ่งในการศึกษานี้จะศึกษาถึงความสัมพันธ์ของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของถ่านกระดูกด้วย

4.1.3 ผลการศึกษาค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine Number) ของถ่านกระดูก

การทดสอบความสามารถในการดูดซับไอโอดีน หรือการหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ เป็นคุณสมบัติประการหนึ่งของถ่านกัมมันต์ที่ใช้กำหนดความจุของการดูดซับของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสารที่มีโมเลกุลต่ำ การทดสอบนั้นเพื่อให้ทราบว่าถ่าน หรือสารดูดซับที่ใช้ในการทดลองมีความสามารถในการดูดซับได้ดีเพียงใด ทำให้ทราบข้อมูลแนวโน้มของพื้นที่ผิวของถ่านได้อย่างคร่าว ๆ กล่าวคือ ถ้าค่าไอโอดีนนัมเบอร์จากการทดลองมีค่าสูง แสดงว่าถ่านมีพื้นที่ผิวในการดูดซับสูงกว่าถ่านที่ให้ค่าไอโอดีนต่ำ แต่หากต้องการทราบค่าของพื้นที่ผิวของถ่านอย่างแท้จริงควรใช้เทคนิคสำหรับวัดค่าพื้นที่ผิวของถ่าน โดยเฉพาะจะให้ค่าที่แท้จริงมากกว่าสำหรับวิธีการทดลองหาค่าการดูดซับไอโอดีนตามภาคผนวก ง ของถ่านกระดูกทั้ง 4 สถานะ แสดงผลการทดลองที่ได้ตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความสามารถในการดูดซับของถ่านกระดูก และความเข้มข้นของไอโอดีนที่ภาวะสมดุล

ถ่านกระดูก	น้ำหนักถ่านที่ใช้ (ก.)	ความสามารถในการดูดซับ (มก./ก. ถ่าน)	ความเข้มข้นไอโอดีนที่สมดุล (นอร์มัล)
สถานะที่ 1	1.0	182.77	0.0751
	4.0	52.64	0.0731
สถานะที่ 2	1.0	186.23	0.0748
	4.0	55.18	0.0723
สถานะที่ 3	1.0	189.94	0.0746
	4.0	56.53	0.0716
สถานะที่ 4	1.0	162.17	0.0766
	4.0	42.53	0.0760

ค่าไอโอดีนนมเบอร์สามารถหาได้จากการพล็อตกราฟระหว่างค่าความสามารถในการดูดซับไอโอดีน (x/m) กับความเข้มข้นที่ภาวะสมดุลของสารละลายไอโอดีน (C) ดังรูปที่ ง-1 โดยการทดลองจำเป็นต้องใช้ถ่าน หรือสารดูดซับในปริมาณที่ทำให้ค่า C มีค่าเท่ากับ 0.01, 0.02 และ 0.03 นอร์มัล ซึ่งจากการทดลองครั้งที่ 1 ปริมาณถ่านกระดูกที่ใช้ 1.0 กรัม ทำให้ได้ค่า C ของถ่านสถานะที่ 1, 2, 3 และ 4 เท่ากับ 0.0751, 0.0748, 0.0746 และ 0.0766 นอร์มัล ตามลำดับ ซึ่งค่า C ที่ได้มีค่าสูงกว่าค่า C ที่กำหนดไว้ดังกล่าว จึงทำการเพิ่มปริมาณถ่านเป็น 4.0 กรัม เพื่อต้องการลดค่า C ลง ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นที่ได้มีค่าลดลงจากเดิมน้อยมาก คือยังอยู่ที่ค่าประมาณ 0.07 นอร์มัล เช่นเดิม แสดงว่าถ่านกระดูกทั้งหมดนี้มีรูพรุน หรือพื้นที่ผิวน้อยมาก แม้จะเพิ่มปริมาณถ่านมากขึ้น 4 เท่า ค่า C ที่ได้ยังคงไม่เปลี่ยนแปลง ทำให้ไม่สามารถพล็อตกราฟเพื่อหาค่าไอโอดีนนมเบอร์ออกมาได้ แต่จากค่าความสามารถในการดูดซับไอโอดีนที่ได้จากการทดลองนี้ยังคงบอกได้ว่าในปริมาณถ่านที่เท่ากัน ถ่านกระดูกทุกสถานะมีความสามารถในการดูดซับใกล้เคียงกัน โดยถ่านกระดูกสถานะที่ 3 มีความสามารถในการดูดซับสูงสุด รองลงมาได้แก่ ถ่านสถานะที่ 2, 1 และ 4 ตามลำดับ (สถานะที่ $3 > 2 > 1 > 4$) และเมื่อเปรียบเทียบค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกระดูกที่เตรียมขึ้นกับค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ หรือ มอก. 900-2532 ซึ่งได้กำหนดไว้ว่าค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 600 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าถ่านกระดูกทั้ง 4 สถานะมีความสามารถในการดูดซับไอโอดีนต่ำกว่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ที่กำหนดไว้มาก และสำหรับถ่านกระดูกในระดับการค้าที่มีขายทั่วไปในท้องตลาดนั้นก็พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะไม่สูงมากนัก เช่น ถ่านกระดูกจากบริษัท READE มีพื้นที่ผิว 20-45 ตารางเมตร/กรัมถ่าน (reade company, 2005) ถ่านกระดูก Brimac 216 มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 100 ตารางเมตร/กรัมถ่านและถ่านกระดูกจากบริษัท Ebonex นั้นมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 50 ตารางเมตร/กรัมถ่าน (ebonex coporation, 2005)

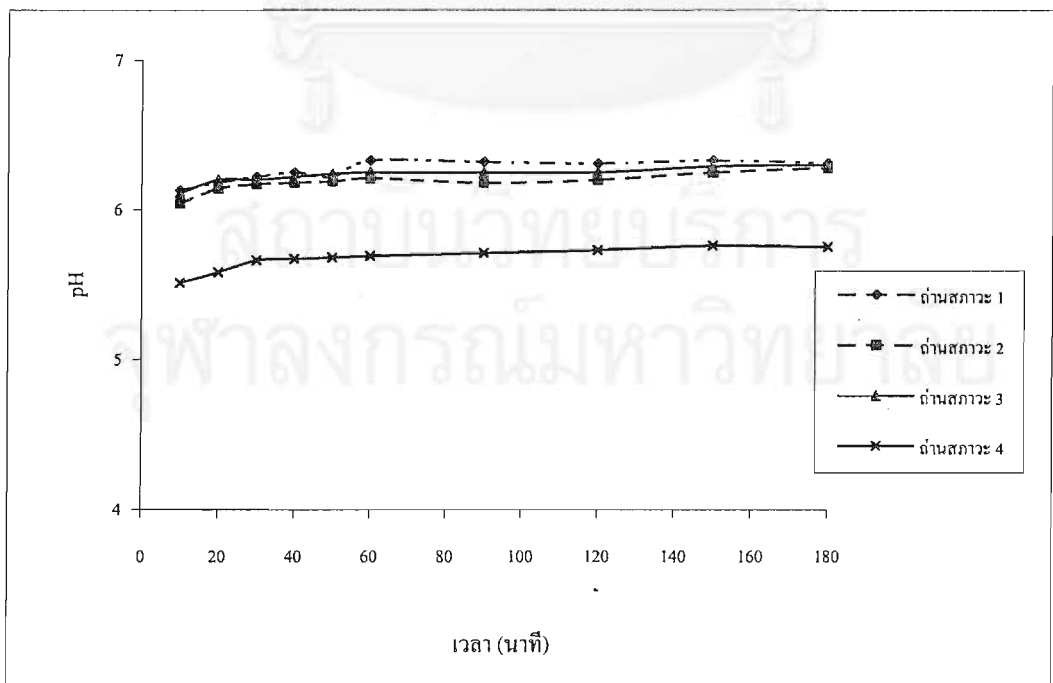
4.2 การศึกษาสถานะการเตรียมถ่านกระดูก

การทดลองนี้ เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของถ่านกระดูกที่เตรียมขึ้นทั้ง 4 สถานะ เพื่อให้สามารถเลือกใช้ถ่านกระดูกที่เตรียมขึ้นในสถานะที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการกำจัดโลหะตะกั่ว และอาร์เซนิก โดยเริ่มจากการทดลองหาเวลาสัมผัสของการเกิดปฏิกิริยา พิเศษของน้ำเสียเริ่มต้นที่ถ่านกระดูกสามารถกำจัดโลหะหนักได้ดีที่สุด และปริมาณถ่าน ที่เหมาะสมที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักให้ได้ตามค่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม

4.2.1 น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว

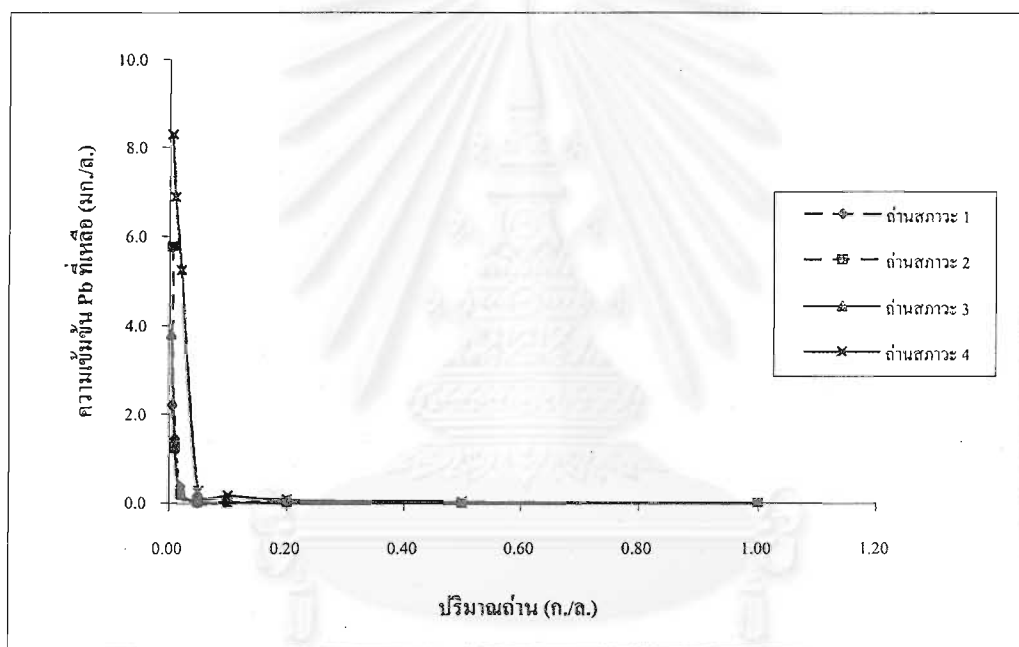
4.2.1.1 ผลของเวลาสัมผัสที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการทดลองแบบแบทช์

จากการทดลองใช้ถ่านกระดูกปริมาณ 1.0 กรัม/ลิตรน้ำเสีย ในการกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งมีความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ที่พีเอชน้ำเสียเท่ากับ 5 โดยทำการเก็บตัวอย่างทุก 10 นาที ในช่วงชั่วโมงแรก และทุก 30 นาที ในช่วงชั่วโมงที่ 2 และ 3 ผลการทดลองเป็นไปตามภาคผนวก ก ตารางที่ ก-1 พบว่าถ่านกระดูกสามารถกำจัดตะกั่วได้หมดภายในนาที่ที่ 10 เช่นเดียวกันทุกสถานะ ทำให้ไม่สามารถหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมจากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยข้อมูลของความเข้มข้นตะกั่วที่เหลือหลังการทดลองได้ แต่สามารถศึกษาได้จากแนวโน้มของพีเอชน้ำเสียที่ทำให้ปฏิกิริยาดำเนินเข้าสู่ภาวะสมดุล ซึ่งเมื่อพิจารณาผลของพีเอชน้ำเสียภายหลังการทดลองพบว่า พีเอชของถ่านกระดูกสถานะที่ 1, 2, 3 และ 4 อยู่ในช่วง 6.13-6.33, 6.04-6.28, 6.11-6.30 และ 5.51-5.76 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าพีเอชน้ำเสียหลังการทดลองของถ่านกระดูก มีแนวโน้มเริ่มจะคงที่เมื่อใช้เวลาสัมผัสนาน 60 นาที เป็นต้นไป แสดงว่าปฏิกิริยาการดูดซับมีแนวโน้มเริ่มเข้าสู่ภาวะสมดุลไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงพีเอชภายในระบบ ดังนั้นเพื่อให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลอย่างสมบูรณ์จึงเลือกใช้เวลาสัมผัสที่นานเกินพอสำหรับการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดตะกั่วด้วยถ่านกระดูกคือ 180 นาที



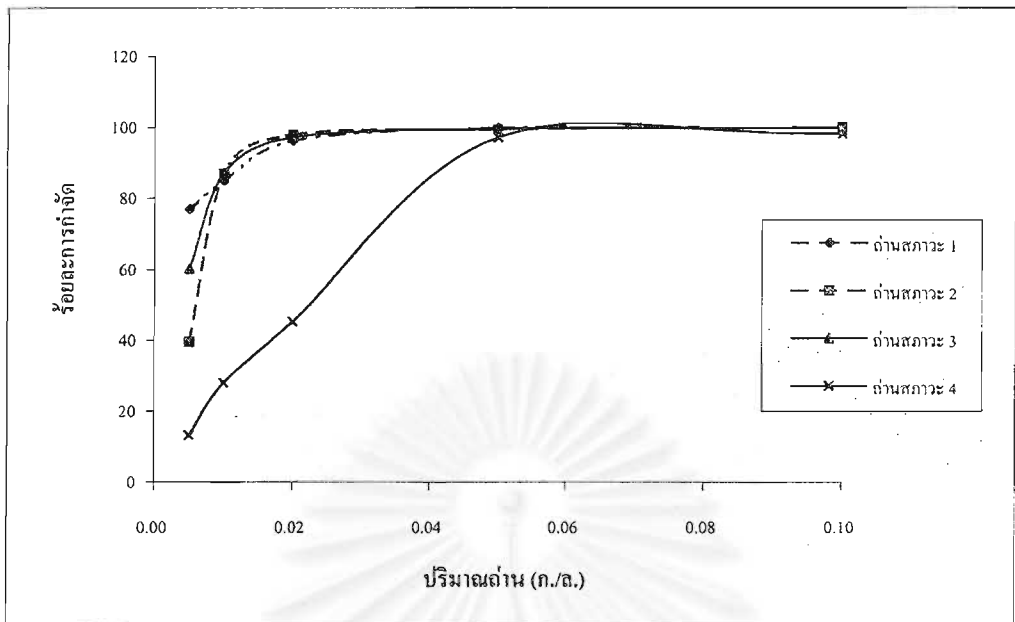
รูปที่ 4.8 พีเอชน้ำเสียภายหลังทดลองดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกระดูกที่เวลาต่าง ๆ

นอกจากนั้นยังพบว่า ผลการทดลองที่แสดงดังภาคผนวก ก ตารางที่ ก-1 นั้น ส่วนใหญ่มีค่าความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือหลังการทดลองน้อยมาก ทำให้เครื่องมือวิเคราะห์ไม่สามารถวัดผลได้ จึงถือได้ว่าถ่านกระดูกปริมาณ 1.0 กรัม/ลิตรน้ำเสีย สามารถกำจัดตะกั่วได้หมดภายใน 10 นาทีแรกเท่านั้น (ประสิทธิภาพการกำจัด 100%) ส่งผลให้การทดลองดังกล่าวไม่สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพเพื่อหาปริมาณของถ่านกระดูกที่เหมาะสมในแต่ละสภาวะการเตรียมได้ จึงปรับเปลี่ยนการทดลองโดยลดปริมาณถ่านกระดูกลงตามภาคผนวก ก ตารางที่ ก-2 ได้แก่ 5, 10, 20, 50, 100, 200 และ 500 มิลลิกรัม/ลิตรน้ำเสีย และใช้เวลาสัมผัสนาน 180 นาที ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.9 และ 4.10



รูปที่ 4.9 ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 5 เวลาสัมผัส 180 นาที ด้วยถ่านกระดูกปริมาณต่าง ๆ

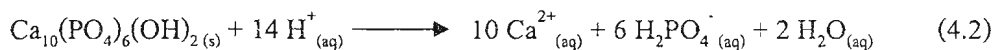
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



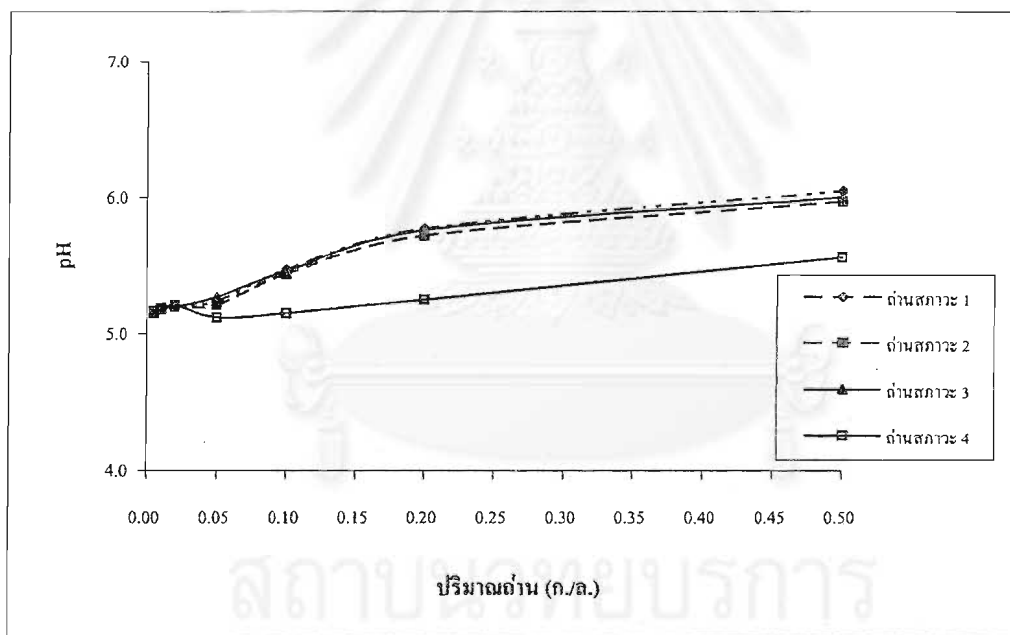
รูปที่ 4.10 ร้อยละการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 5 เวลาสัมผัส 180 นาที ด้วยถ่านกระดูกปริมาณต่าง ๆ

จากรูปจะเห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกระดูกขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดก็สูงขึ้นด้วย โดยถ่านกระดูกสถานะที่ 1, 2 และ 3 มีประสิทธิภาพการกำจัดโลหะดีกว่าถ่านกระดูกสถานะที่ 4 ซึ่งเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการกำจัดของถ่านกระดูกปริมาณ 5 มิลลิกรัม/ลิตรน้ำเสีย ยังมีความแตกต่างกันอยู่ในแต่ละสถานะถ่าน โดยถ่านกระดูกสถานะที่ 1 สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุดคือ 76.93% ในขณะที่ถ่านสถานะที่ 2, 3 และ 4 กำจัดได้ 39.57%, 60.10% และ 13.14% ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มการใช้ถ่านกระดูกปริมาณเท่ากับ 10 มิลลิกรัม/ลิตรน้ำเสีย หรือมากกว่ากลับพบว่า ถ่านสถานะที่ 1, 2 และ 3 ให้ประสิทธิภาพการกำจัดได้ความเข้มข้นตะกั่วที่เหลือใกล้เคียงกัน และที่ปริมาณถ่าน 20 มิลลิกรัม/ลิตรน้ำเสีย ถ่านกระดูกสถานะที่ 1, 2 และ 3 สามารถกำจัดตะกั่วในน้ำเสียเหลือความเข้มข้น 0.372, 0.203 และ 0.282 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ส่วนถ่านสถานะที่ 4 ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดต่ำที่สุดซึ่งต้องใช้ถ่านปริมาณมากถึง 100 มิลลิกรัม/ลิตรน้ำเสีย จึงจะสามารถกำจัดตะกั่วให้อยู่ในค่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมได้ (0.2 มิลลิกรัม/ลิตร) สำหรับค่าพีเอชภายหลังการทดลองที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นอยู่ในช่วง 5.16-6.25 เนื่องจากถ่านกระดูกเอง เพราะเมื่อปริมาณถ่านกระดูกสูงขึ้นจะทำให้พีเอชของน้ำเสียสูงขึ้นตามไปด้วยดังรูปที่ 4.11 ซึ่งเกิดจากไฮดรอกซีอะพาไต์ในถ่านกระดูกสามารถเกิดการละลาย (dissolution) เกิดเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์

(Ca²⁺) และไดไฮโดรเจนฟอสเฟตไอออน (H₂PO₄⁻) โดยไฮโดรเจนไอออน (H⁺) จะถูกใช้ในการสร้าง H₂PO₄⁻ และ H₂O ตามสมการที่ 4.2



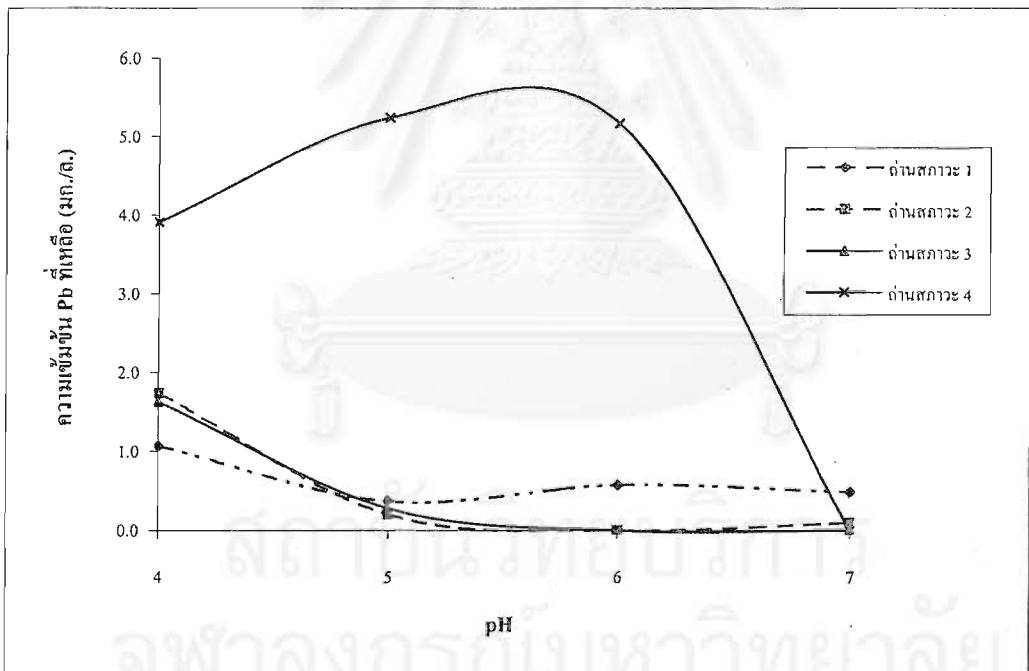
ดังนั้น เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณถ่านกระดูกที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด เพื่อเลือกปริมาณถ่านกระดูกที่เหมาะสม จึงได้เลือกใช้ถ่านปริมาณ 20 มิลลิกรัม/ลิตรน้ำเสีย สำหรับการศึกษาคผลของพีเอชน้ำเสียเริ่มต้นต่อไป เนื่องจากยังมีความสามารถในการกำจัดตะกั่วให้อยู่ในค่าประมาณของมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมได้ถ้าทำการปรับค่าพีเอชน้ำเสียให้เหมาะสม รวมถึงยังเป็นการประหยัดปริมาณ และค่าใช้จ่ายของถ่านกระดูกอีกทางหนึ่งด้วย



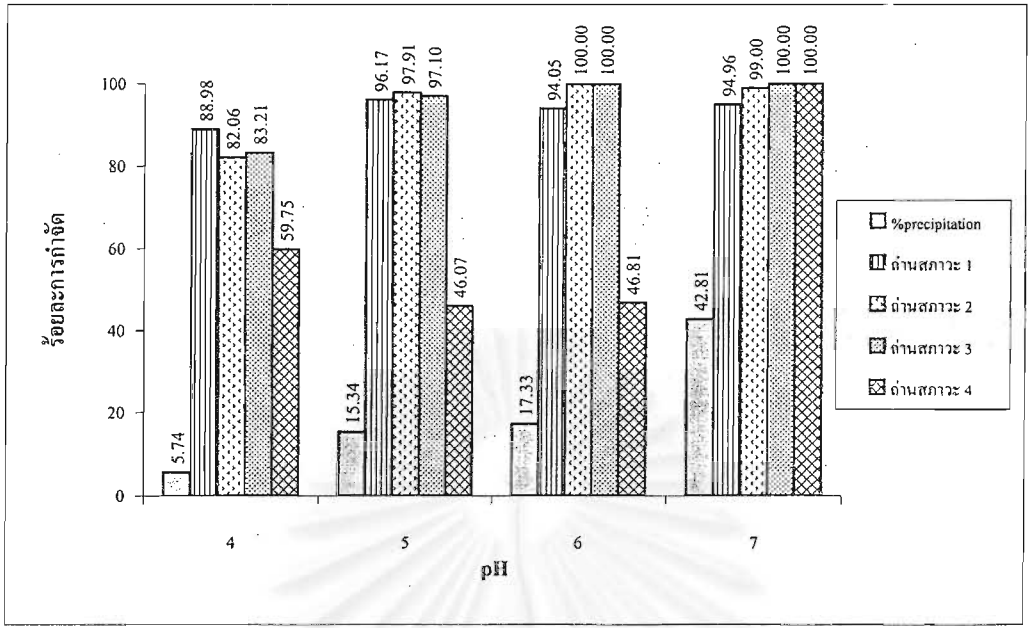
รูปที่ 4.11 ผลของพีเอชน้ำเสียหลังการทดลองกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยถ่านกระดูก ปริมาณต่าง ๆ ที่พีเอช 5 และเวลาสัมผัส 180 นาที

4.2.1.2 ผลของพีเอชน้ำเสียเริ่มต้น ที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการทดลองแบบแบทช์

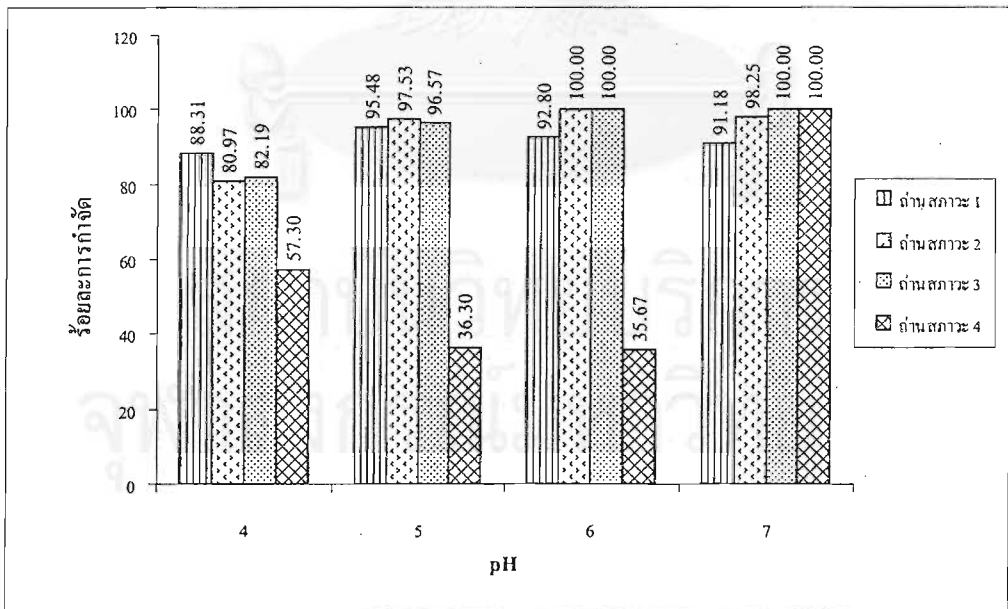
เมื่อทำการทดลองใช้ถ่านกระดูกทั้ง 4 สภาวะ ในการกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร โดยเลือกใช้ปริมาณของถ่านที่เหมาะสมที่ได้จากผลการทดลอง 4.2.1.1 คือ ปริมาณ 20 มิลลิกรัม/ลิตรน้ำเสีย จากการทดลองดังกล่าวจะเห็นว่าในช่วงพีเอช 4 ถึง 6 นั้น ถ่านกระดูก สภาวะที่ 1, 2 และ 3 มีประสิทธิภาพการกำจัดใกล้เคียงกัน อยู่ระหว่างร้อยละ 82.06-88.98, 96.17-97.91 และ 94.05-100 ที่พีเอชน้ำเสียเริ่มต้น 4, 5 และ 6 ตามลำดับ ดังตารางที่ ก-3 ในภาคผนวก ก โดยถ่านสภาวะที่ 4 มีประสิทธิภาพการกำจัดต่ำที่สุด แต่เมื่อทำการปรับพีเอชน้ำเสียเริ่มต้นเป็น 7 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของถ่านกระดูกทั้ง 4 สภาวะสูงมากกว่าร้อยละ 94.96 ความเข้มข้นตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหลือภายหลังการกำจัด และประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วแสดงดังรูปที่ 4.12 และ 4.13



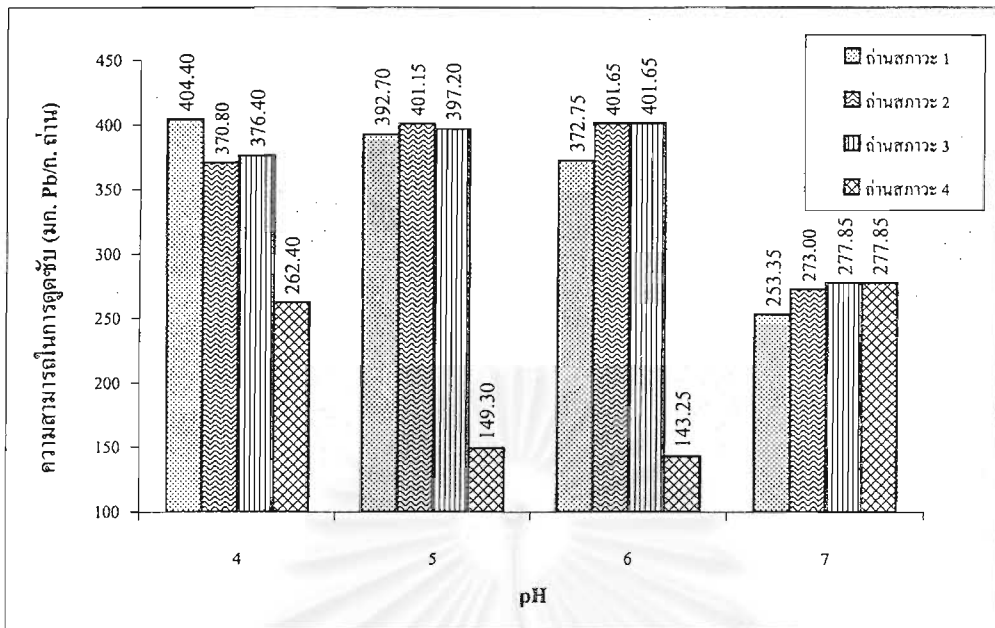
รูปที่ 4.12 ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อกำจัดด้วยถ่านกระดูกปริมาณ 20 มิลลิกรัม/ลิตรน้ำเสีย เวลาสัมผัส 180 นาที ที่พีเอชต่าง ๆ



รูปที่ 4.13 ร้อยละการกำจัดของตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ด้วยถ่านกระดุก ที่พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นต่าง ๆ



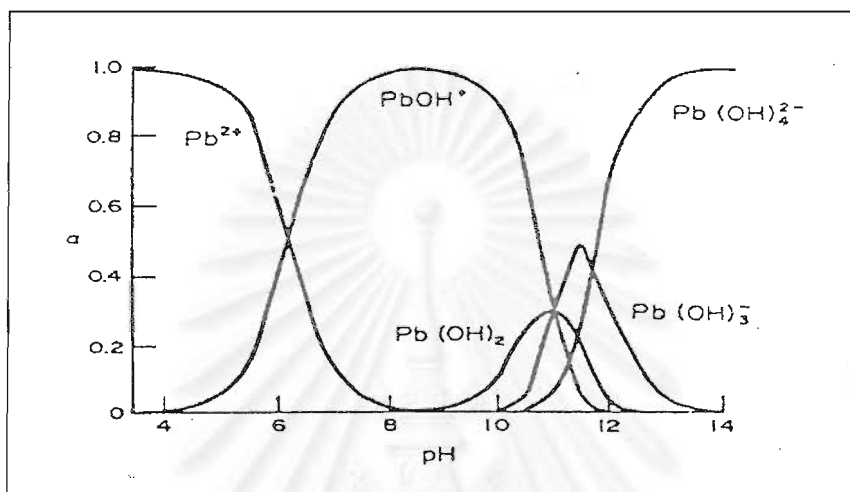
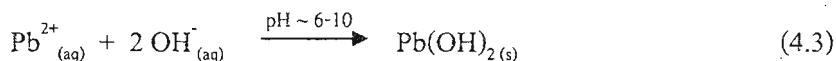
รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพของถ่านกระดุกในการดูดซับตะกั่วละลายที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ ภายหลังจากการตกตะกอน ที่พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นต่าง ๆ



รูปที่ 4.15 ความสามารถในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อกำจัดด้วยถ่านกระดูก ปริมาณ 20 มิลลิกรัม/ ลิตรน้ำเสีย เวลาสัมผัส 180 นาที ที่พีเอชต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มพีเอชของน้ำเสียเริ่มต้นสูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของถ่านกระดูกสูงขึ้นด้วยทุกสภาวะ (ยกเว้นสภาวะที่ 4) และมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันที่พีเอชเท่ากับ 5 คือ 96.17%, 97.91% และ 97.10% สำหรับสภาวะที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ส่วนที่พีเอชเท่ากับ 6 ถ่านกระดูกสภาวะที่ 2 และ 3 สามารถกำจัดตะกั่วได้สูงสุดถึง 100% ในขณะที่ถ่านสภาวะที่ 1 และ 4 สามารถกำจัดได้ 94.05% และ 46.81% ตามลำดับ ดังนั้นในช่วงพีเอช 4-6 ถ่านกระดูกสภาวะที่ 1, 2 และ 3 ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วได้ดี ในขณะที่ถ่านกระดูกสภาวะที่ 4 มีประสิทธิภาพในการกำจัดต่ำอย่างมาก และจะเห็นว่า เมื่อพีเอชสูงขึ้นร้อยละการตกตะกอนก็มากขึ้นตาม แสดงว่ากระบวนการกำจัดที่เกิดขึ้นไม่ได้เกิดจากกระบวนการดูดซับเพียงอย่างเดียว แต่เกิดจากกระบวนการตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์ควบคู่ไปด้วย เนื่องจากความสามารถในการละลายของโลหะส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับการค่าพีเอช โดยตะกั่วสามารถเกิดเป็นสปีชีส์ของตะกั่วไฮดรอกไซด์ได้ดังสมการที่ 4.3 ในช่วงพีเอช ประมาณ 6-10 (รูปที่ 4.16) ดังจะเห็นได้ชัดเจนเมื่อทำการทดลองที่พีเอชน้ำเสียเท่ากับ 7 ร้อยละการเกิดตะกอนของตะกั่วไฮดรอกไซด์สูงถึง 42.81 และจากการพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดโดยกระบวนการดูดซับตะกั่วละลายที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ภายหลังจากการเกิดกระบวนการตกตะกอนไปแล้วนั้น แสดงดังรูปที่ 4.14 สำหรับที่พีเอชน้ำเสียเท่ากับ 6 ถ่านกระดูกที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดและด่าง มีความสามารถในการ

ดูดซับตะกั่วได้สูงที่สุด (รูปที่ 4.15) ดังนั้นสถานะของพีเอชน้ำเสียเริ่มต้นสำหรับการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วคือ พีเอช 6

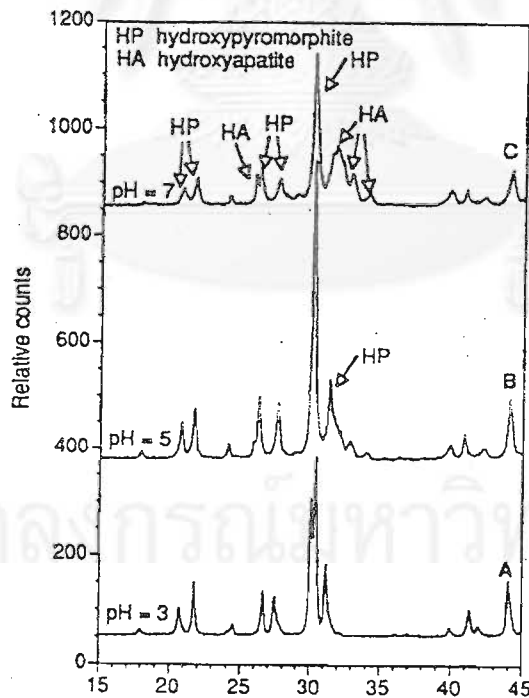
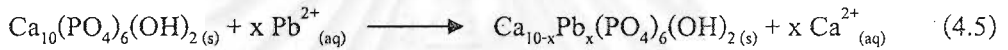
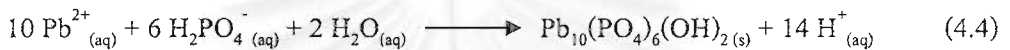


รูปที่ 4.16 รูปแบบของตะกั่วในสารละลายที่พีเอชต่าง ๆ (Fergusson, 1990)

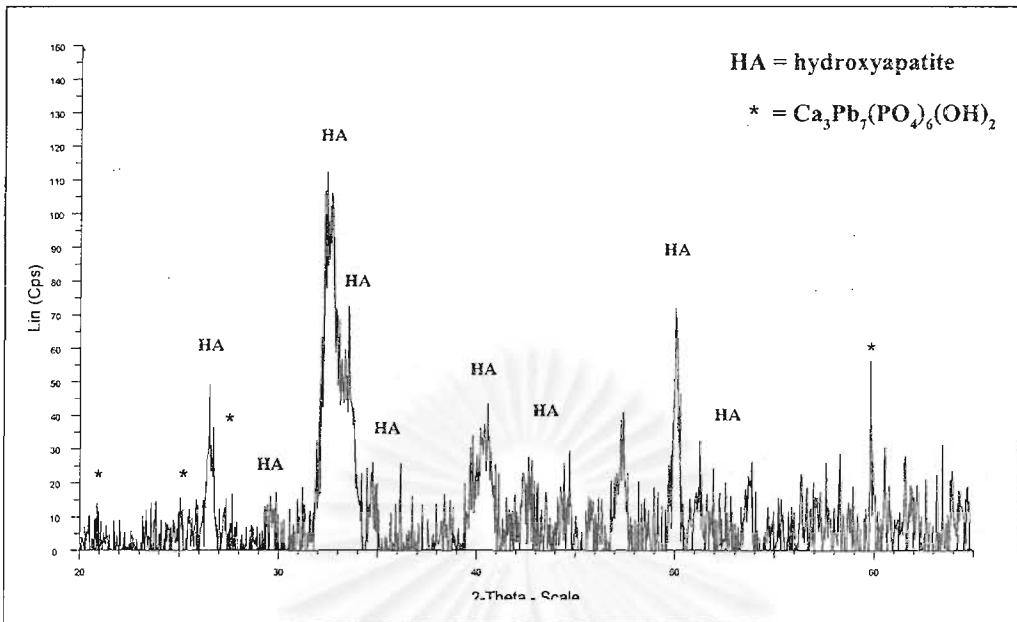
การที่ถ่านกระดูกสถานะที่ 2 และ 3 มีความสามารถในการกำจัดตะกั่วได้ใกล้เคียงกัน และมีประสิทธิภาพการกำจัดดีกว่าถ่านสถานะที่ 1 และ 4 นั้น อาจเป็นผลเนื่องมาจากปริมาณ P ในถ่านกระดูกนั่นเอง โดยผลจากการวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการด้วยเครื่อง EDX ดังรูปที่ 4.7 (ข) และ (ค) สังเกตเห็นได้ว่าความสูงของพีค P ของถ่านสถานะที่ 2 และ 3 ใกล้เคียงกันมากที่สุด แถกแกน y ประมาณ 1000 ในขณะที่ถ่านสถานะที่ 1 และ 4 อยู่ที่สเกลประมาณ 700 ซึ่งจากที่ Dahbi และคณะ (2002) ได้รายงานไว้ว่าการที่พีคของ P มีปริมาณสูง แสดงว่ามีปริมาณฟอสเฟตมากด้วย ทำให้มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้มากกว่าสารดูดซับที่มีฟอสเฟตปริมาณน้อย และการที่ถ่านสถานะที่ 4 มีประสิทธิภาพในการกำจัดต่ำนั้น อาจเป็นสาเหตุมาจากการเตรียมถ่านที่ใช้อุณหภูมิในการเผาสูง ทำให้เกิดผลึกของไฮดรอกซีอะพาไตต์ที่มีความแข็งแรงของพันธะภายในโมเลกุล และเกิดเป็นอออนลบได้ยากจึงเกิดกลไกการดูดซับกับอออนบวกของโลหะได้น้อย

สำหรับที่พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 4 ให้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของถ่านกระดูกสถานะที่ 1 สูงกว่าสถานะที่ 2, 3 และ 4 นี้ อาจเป็นผลมาจากปฏิกิริยาการกำจัดตะกั่วที่พีเอชต่ำ ตามการทดลองของ Ma และคณะ (1993) ที่กล่าวว่าไฮดรอกซีอะพาไตต์สามารถละลาย

ได้ที่พีเอชต่ำ ๆ (สมการที่ 4.2) และเกิดการตกตะกอนกับตะกั่วไอออนเป็นไฮดรอกซีไพโรมอร์ไฟต์ (hydroxypyromorphite or lead phosphate hydroxide: HP) ดังสมการที่ 4.4 ผลการทดลองที่ได้เป็น ดังรูปที่ 4.18 ซึ่ง Ma และคณะได้ทำการทดลองกับถ่านกระดูกที่ไม่ผ่านสารเคมีใด ๆ เช่นเดียวกับ ถ่านกระดูกสถานะที่ 1 ของการทดลองนี้ แต่กลไกดังกล่าวกลับไม่เกิดกับถ่านสถานะที่ 2 และ 3 เพราะจากการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบของถ่านกระดูกสถานะที่ 3 หลังการทดลองที่พีเอชน้ำเสีย เท่ากับ 4 นั้น ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของฟิสิกไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ตรวจวัดได้ก่อนการทดลอง ดังรูปที่ 4.18 รวมถึงที่พีเอช 5, 6 และ 7 ก็ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกัน (รูปที่ ค-5 ถึง ค-8) แต่กลับพบฟิสิกของ $\text{Ca}_3\text{Pb}_7(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ เกิดขึ้น ซึ่งเป็นผลของกลไกการแลกเปลี่ยนไอออน ตามสมการที่ 4.5



รูปที่ 4.17 ผลจากการวิเคราะห์ XRD ของการกำจัดตะกั่วด้วยถ่านกระดูกที่พีเอชน้ำเสียต่าง ๆ (Ma และคณะ, 1993)



รูปที่ 4.18 ผลจากการวิเคราะห์ XRD ของการกำจัดตะกั่วด้วยถ่านกระดูกสถานะที่ 3 ที่พีเอช น้ำเสียเท่ากับ 4

4.2.1.3 สรุปผลของสภาวะการเตรียมถ่านกระดูกที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการกำจัด ตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการทดลองแบบแบตช์

จากการศึกษาเวลาสัมผัส และพีเอชน้ำเสียเริ่มต้นที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพ การกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกระดูกสามารถสรุปได้ว่า เวลาที่ใช้ในการสัมผัส ระหว่างถ่านกระดูกและตะกั่วคือ 180 นาที ปริมาณของถ่านกระดูก 20 มิลลิกรัม/ลิตรน้ำเสีย และพีเอชน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 6 โดยจากผลการทดลองที่พีเอชนี้ ทำให้สามารถเลือกใช้สภาวะ การเตรียมของถ่านกระดูกที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วจากน้ำเสีย สังเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป ได้แก่ ถ่านกระดูกที่ถูกกระตุ้นด้วยกรด (ถ่านสถานะที่ 2) และ ถ่านกระดูกที่ถูกกระตุ้นด้วยด่าง (ถ่านสถานะที่ 3) เนื่องจากให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากัน และมีประสิทธิภาพสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกระดูกที่ไม่ถูกกระตุ้น (ถ่านสถานะที่ 1) และ ถ่านที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดและเผาที่อุณหภูมิ $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ถ่านสถานะที่ 4) ดังที่ได้สรุปในผลการทดลอง ที่ 4.2.1.2

ดังนั้น หากพิจารณาถ่านกระดูกสถานะที่ 2 และ 3 โดยการเปรียบเทียบรายจ่าย ของสารเคมีที่ใช้เตรียมถ่านทั้ง 2 สถานะนี้พบว่า ในการเตรียมถ่านปริมาณ 1 กิโลกรัม ต้องใช้

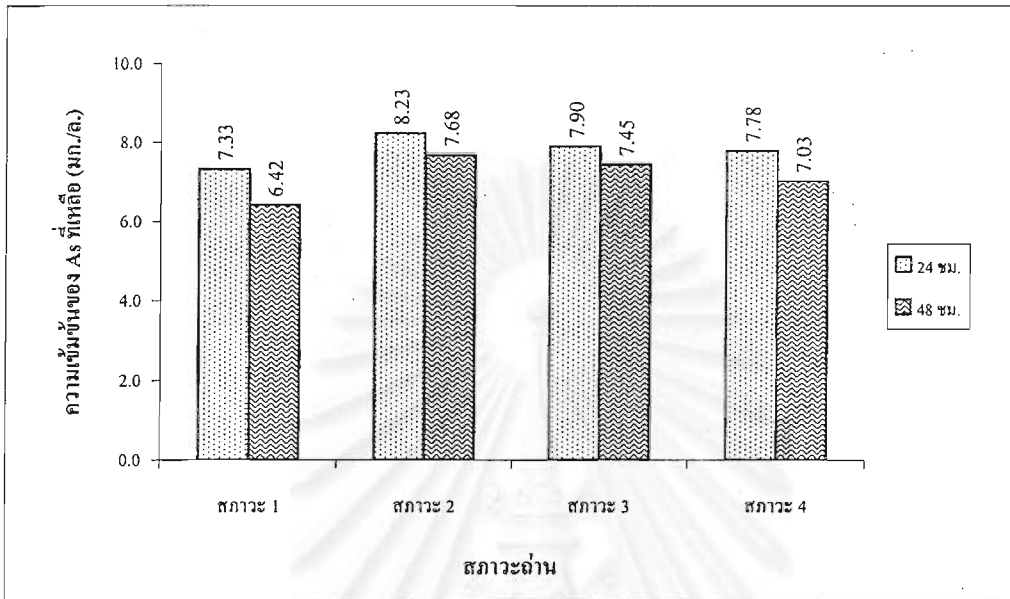
สารละลาย HNO_3 และ NaOH ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 2000 มิลลิลิตร จากสารละลายกรด และต่างดั่งกล่าวในระดับการค้า (commercial grade) โดยราคาของสารละลาย HNO_3 ความเข้มข้น 15 โมลาร์ จะอยู่ในช่วง 40-50 บาท/ลิตร และ NaOH (ของแข็ง) จะอยู่ในช่วง 30-35 บาท/กิโลกรัม ดังนั้นเมื่อใช้ HNO_3 (15 โมลาร์) 13.3 มิลลิลิตร/กิโลกรัมถ่าน จะมีค่าใช้จ่ายจริงอยู่ในช่วง 0.5-0.6 บาท ในขณะที่ใช้ NaOH ปริมาณ 8 กรัม/กิโลกรัมถ่าน จะมีค่าใช้จ่ายจริงอยู่ในช่วง 0.2-0.3 บาท โดยประมาณ จากข้อมูลทางด้านค่าใช้จ่ายที่ได้ จึงทำการเลือกใช้ถ่านกระดุกที่ถูกกระตุ้นด้วยด่าง สำหรับการทดลองขั้นตอนต่อไป เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายที่ถูกลงกว่า

4.2.2 น้ำเสียสังเคราะห์อาร์เซนิก

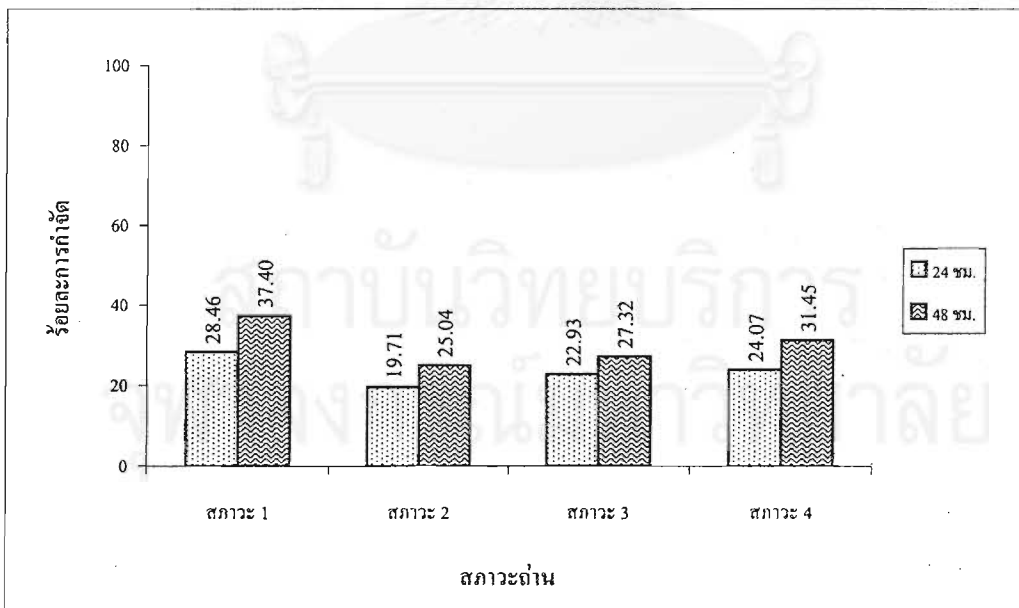
4.2.2.1 ผลของเวลาสัมผัสที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนิกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยการทดลองแบบแบทช์

การศึกษานี้ทำการทดลองใช้ถ่านกระดุกกำจัดอาร์เซนิกในน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้นอาร์เซนิกเริ่มต้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร โดยเลือกใช้อาร์เซนิกที่อยู่ในรูปของสารประกอบ อาร์เซเนต หรือ $\text{As}(\text{V})$ มาทำการทดลอง ปรับพีเอชน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 5 และใช้ถ่านกระดุก สภาวะต่าง ๆ ปริมาณ 1.0 กรัม/ลิตรน้ำเสีย จากนั้นนำไปเขย่าที่ความเร็ว 250 รอบ/นาที เป็น เวลานาน 24 และ 48 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดังภาคผนวก ก ตารางที่ ก-4 ซึ่งสังเกตได้ว่า ประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิกของถ่านกระดุกทั้ง 4 สภาวะนั้นต่ำมาก คือให้ประสิทธิภาพ การกำจัดอยู่ในช่วง 19.71-28.46% และ 25.04-37.40% ในระยะเวลาสัมพัสนาน 24 และ 48 ชั่วโมง ตามลำดับ อย่างไรก็ตามพบว่าเวลาในการสัมผัสของการเกิดปฏิกิริยามีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด อาร์เซนิกด้วย โดยเมื่อให้เวลาในการสัมพัสนานขึ้น ถ่านกระดุกสามารถกำจัดอาร์เซนิกได้สูงขึ้น เช่นกันในทุกสภาวะถ่าน ดังรูปที่ 4.19 และ 4.20 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของถ่าน ทั้ง 4 สภาวะ พบว่าถ่านสภาวะที่ 1 ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าถ่านสภาวะที่ 2, 3 และ 4 ไม่ว่าจะเวลา ในการเกิดปฏิกิริยาจะเท่ากับ 24 หรือ 48 ชั่วโมง ก็ตาม สำหรับความสามารถของถ่านกระดุกในการ ดูดซับอาร์เซนิกภายใน 24 ชั่วโมง อยู่ในช่วง 2.020-2.917 มิลลิกรัม/กรัมถ่าน และ 2.567-3.833 มิลลิกรัม/กรัมถ่าน ภายในเวลา 48 ชั่วโมง เท่านั้น (รูปที่ 4.21) สรุปได้ว่าจากผลการทดลองดังกล่าว จึงทำการเลือกใช้ถ่านกระดุกสภาวะที่ 1 ที่เวลาสัมพัสนานเท่ากับ 48 ชั่วโมง นำไปใช้สำหรับ การศึกษาผลของพีเอชของน้ำเสียเริ่มต้นที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิกด้วยถ่านกระดุกใน ขั้นตอนต่อไป และเนื่องจากประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิกที่ได้นั้นมีประสิทธิภาพต่ำ จึงเลือกใช้ ถ่านกระดุกที่ไม่ถูกกระตุ้น (ถ่านสภาวะที่ 1) ปริมาณ 1.0 กรัม/ลิตรน้ำเสีย สำหรับการทดลอง ผลของพีเอชน้ำเสียเริ่มต้น โดยไม่ทำการทดลองหาปริมาณถ่านที่เหมาะสมในการกำจัดอาร์เซนิก

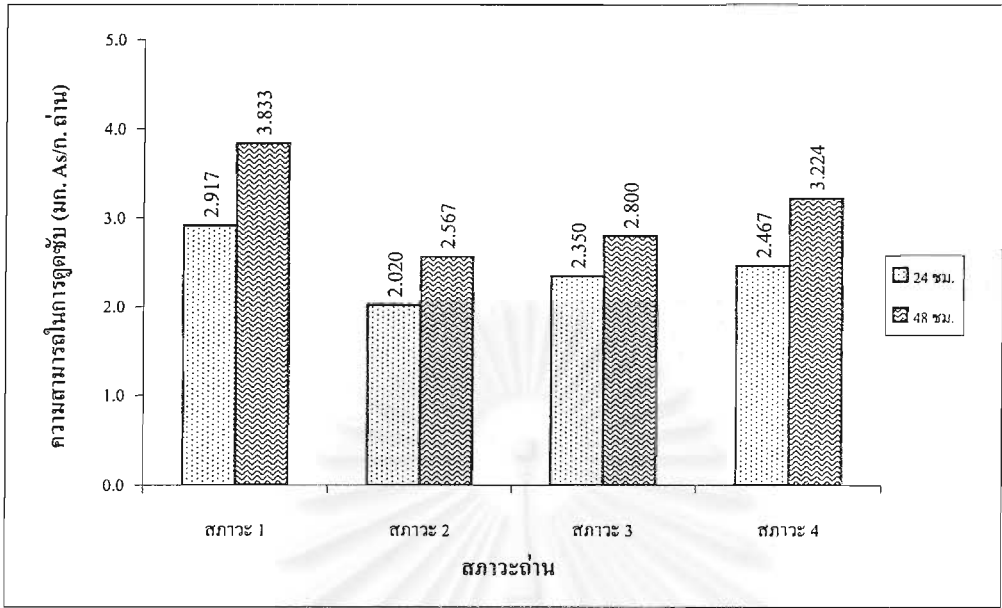
ในหัวข้อที่ 4.2 นี้ จะนำไปทดลองในห้องปฏิบัติการไอโซเทอมการดูดซับอาร์เซนิกจากน้ำเสียสังเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 4.19 ความเข้มข้นอาร์เซนิกที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ จากการกำจัดด้วยถ่านกระดุกสถานะต่าง ๆ 1.0 กรัม/ลิตรน้ำเสีย ที่เวลา 24 และ 48 ชั่วโมง



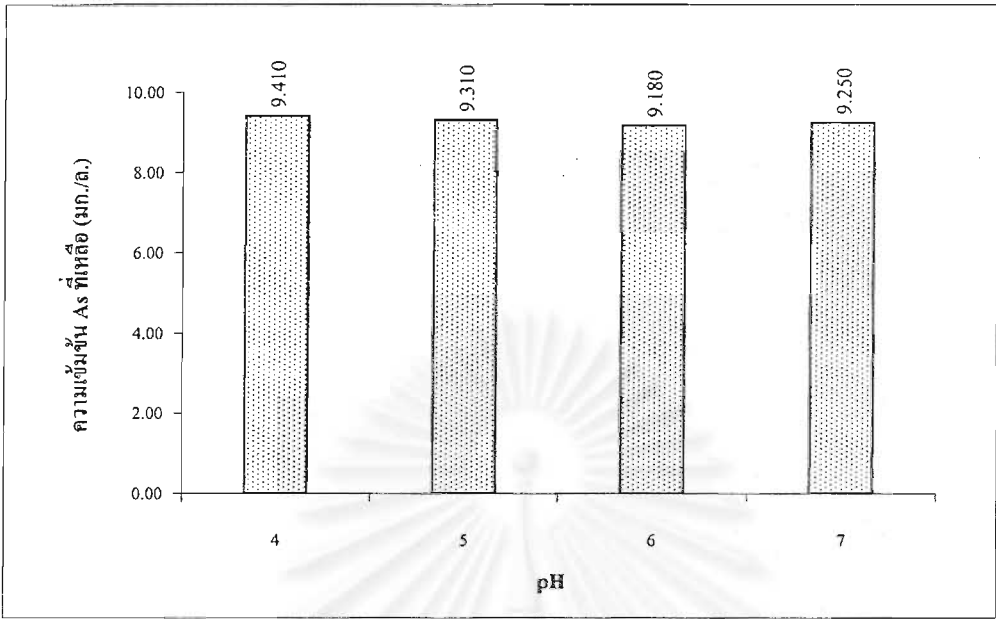
รูปที่ 4.20 ร้อยละการกำจัดอาร์เซนิกด้วยถ่านกระดุกสถานะต่าง ๆ ปริมาณ 1.0 กรัม/ลิตรน้ำเสีย ที่เวลา 24 และ 48 ชั่วโมง



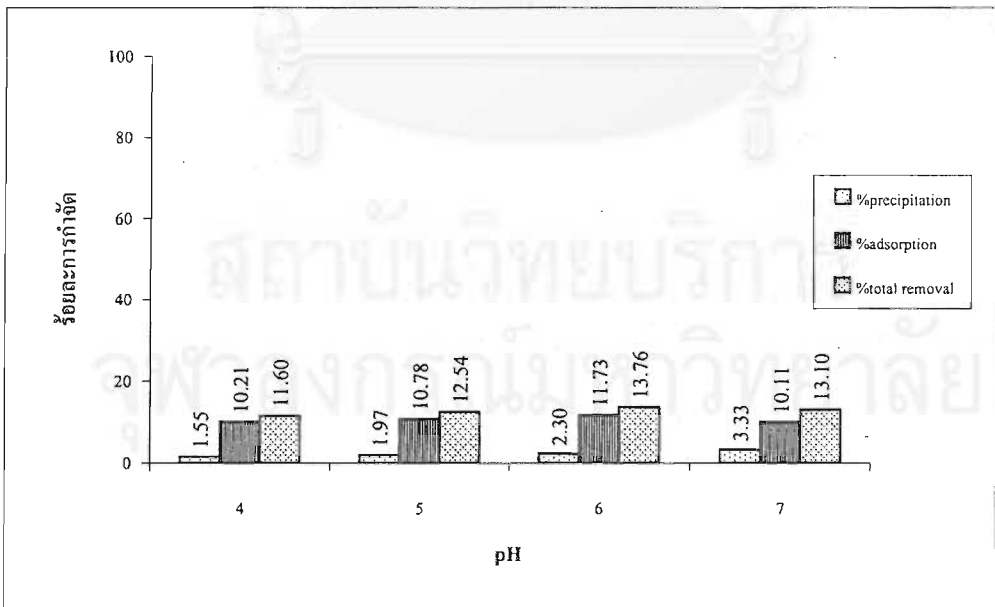
รูปที่ 4.21 ความสามารถในการดูดซับอาร์เซนิกด้วยถ่านกระดูกสภาวะต่าง ๆ ปริมาณ 1.0 กรัม/ลิตรน้ำเสีย ที่เวลา 24 และ 48 ชั่วโมง

4.2.2.2 ผลของพีเอชน้ำเสียเริ่มต้น ที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนิกจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการทดลองแบบแบทช์

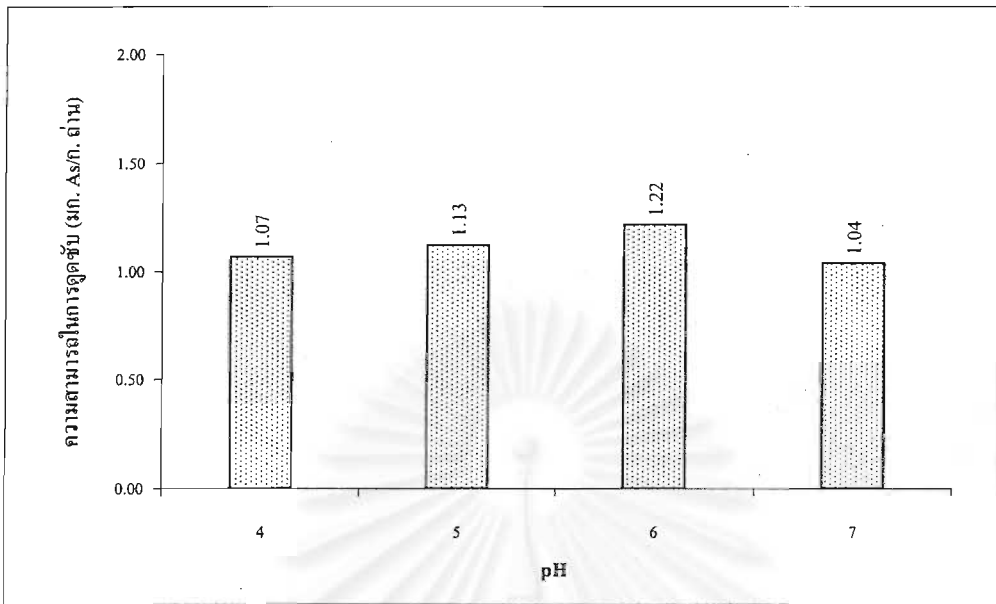
จากการศึกษาผลของพีเอชน้ำเสียเริ่มต้นที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิกด้วยถ่านกระดูกที่ไม่ถูกกระตุ้นปริมาณ 1.0 กรัม/ลิตรน้ำเสีย ที่พีเอชน้ำเสียเริ่มต้น 4, 5, 6 และ 7 เวลาสัมผัสนาน 48 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองดังภาคผนวก ก ตารางที่ ก-5 พบว่าการเปลี่ยนแปลงพีเอชส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิกอยู่บ้างแต่ไม่มากนัก ส่งผลให้ความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่เหลืออยู่หลังการทดลองแสดงข้อมูลได้ดังรูปที่ 4.22 คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดโดยรวม (การตกตะกอนร่วมกับการดูดซับ) เท่ากับ 11.60%, 12.54%, 13.76% และ 13.10% ตามลำดับ สำหรับกระบวนการกำจัดส่วนใหญ่เป็นผลมาจากกระบวนการดูดซับมากกว่ากระบวนการตกตะกอนซึ่งมีร้อยละการตกตะกอนอยู่ในช่วง 1.55-3.33 เท่านั้นดังรูปที่ 4.23 ซึ่งแม้จะกล่าวได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดส่วนมากเกิดจากกระบวนการดูดซับก็ตาม แต่ถ่านกระดูกก็ยังมีความสามารถในการดูดซับอาร์เซนิกได้น้อยมากเช่นกันดังที่เห็นในรูป 4.24 แสดงให้เห็นว่าถ่านกระดูกที่เตรียมขึ้นสำหรับ งานวิจัยนี้ไม่เหมาะสำหรับนำมาใช้เป็นสารดูดซับอาร์เซนิกที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียได้



รูปที่ 4.22 ความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ปรับพีเอชน้ำเสียเริ่มต้นต่าง ๆ ด้วยถ่านกระดูก ปริมาณ 1.0 กรัม/ลิตรน้ำเสีย

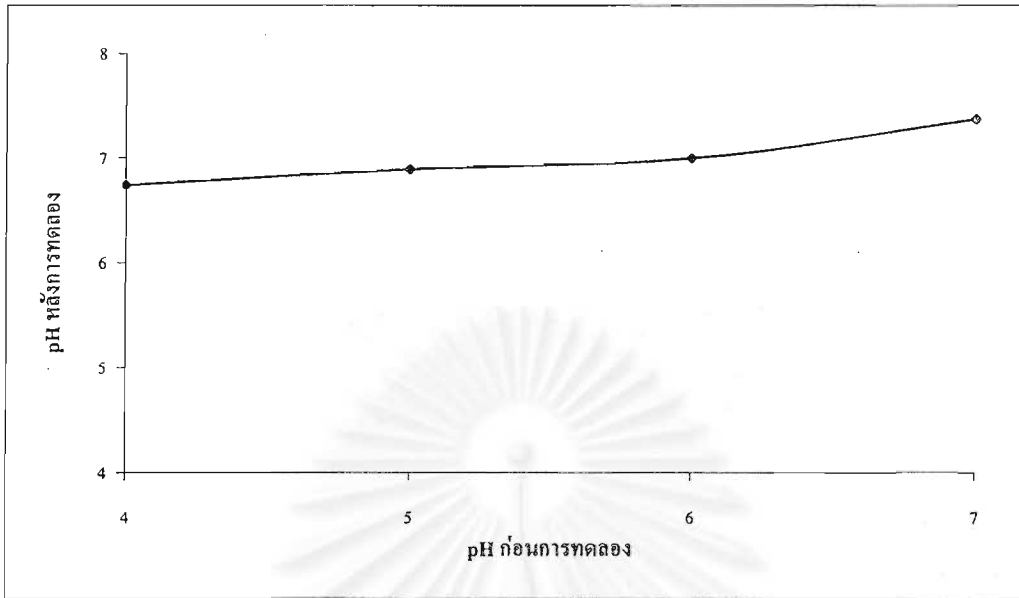


รูปที่ 4.23 ร้อยละการกำจัดอาร์เซนิกในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ปรับพีเอชน้ำเสียเริ่มต้นต่าง ๆ ด้วยถ่านกระดูก ปริมาณ 1.0 กรัม/ลิตรน้ำเสีย



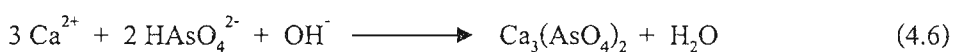
รูปที่ 4.24 ความสามารถในการดูดซับอาร์เซนิกในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นต่าง ๆ ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ 1.0 กรัม/ลิตรน้ำเสีย

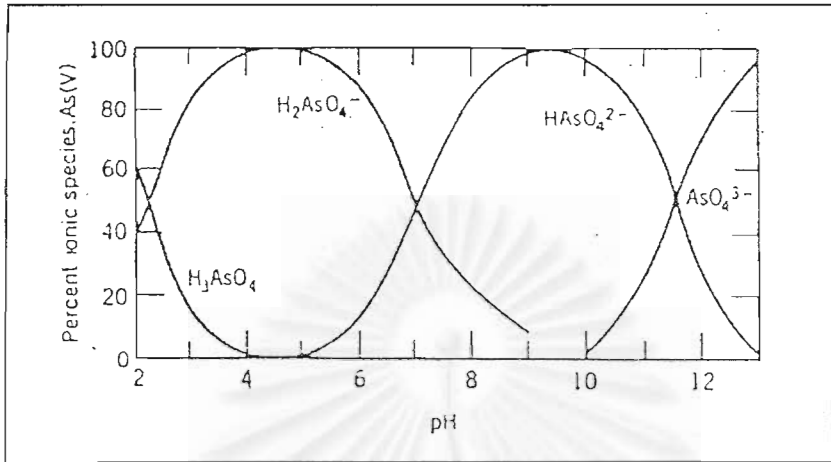
อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองที่ได้ยังสามารถบอกถึงแนวโน้มในการกำจัดอาร์เซนิกด้วยถ่านกระดูกได้อยู่ นั่นคือจากรูปที่ 4.23 เห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงพีเอชน้ำเสียในช่วงพีเอช 4-7 นั้นส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิกน้อยมาก เนื่องจากร้อยละการกำจัดอาร์เซนิกจากน้ำเสียที่พีเอชต่าง ๆ ดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วง 11.60-13.76% แต่ที่พีเอช 6 ถ่านกระดูกมีประสิทธิภาพในการกำจัดเหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากให้ผลของร้อยละการกำจัดโดยการดูดซับเท่ากับ 11.73% มากกว่าที่พีเอชน้ำเสีย 4, 5 และ 7 (ร้อยละการกำจัดที่พีเอช 6 > 7 > 5 > 4) โดยสาเหตุที่ทำให้ถ่านกระดูกมีความสามารถในการกำจัดอาร์เซนิกค่อนข้างต่ำนั้น เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของพีเอชน้ำเสียที่เพิ่มขึ้นหลังการทดลองอยู่ในช่วง 6.74-7.37 ดังรูปที่ 4.25



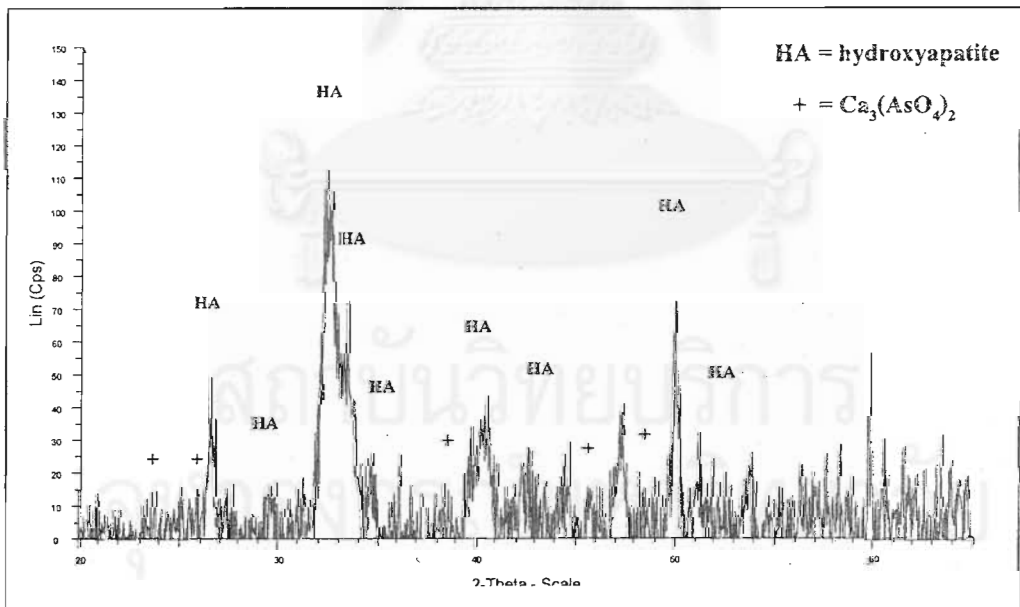
รูปที่ 4.25 พีเอชน้ำเสียก่อนและหลังการทดลองกำจัดอาร์เซนิกด้วยถ่านกระดูก

โดยรูปแบบสปีชีส์ของสารประกอบอาร์เซนิกขึ้นอยู่กับพีเอชของสารละลาย ซึ่งที่พีเอชต่ำ ๆ (pH 0-2) สารประกอบอาร์เซนิกสามารถคงความเสถียรอยู่ในรูปที่มีประจุเป็นกลาง และเมื่อพีเอชสูงขึ้นสปีชีส์ของอาร์เซนิกจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของประจุลบมากขึ้นคือ -1 , -2 และ -3 ที่พีเอชของสารละลายมากกว่า 3, 7 และ 12 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.26 ซึ่งที่พีเอชมากกว่า 7 ทำให้เกิดสารประกอบอาร์เซนิกในรูปของ HAsO_4^{2-} ดังนั้นแคลเซียมไอออนในไฮดรอกไซด์อะพาไรต์จึงสามารถทำปฏิกิริยากับ HAsO_4^{2-} ที่มีอยู่ในสารละลายละลายได้ เกิดเป็น $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ ตรงตามผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ที่พบพีคของสารประกอบ $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ ดังรูปที่ 4.27 ซึ่งกลไกการกำจัดอาร์เซนิกโดยถ่านกระดูกนั้นน่าจะมีลักษณะเช่นเดียวกับที่นันทนา (2543) ได้ทำการทดลองกำจัดอาร์เซนิกด้วยเศษคอนกรีต ซึ่งมีแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นองค์ประกอบ ภายใต้สภาวะของสารละลายที่มีพีเอชในช่วง 7-11 โดยกลไกการกำจัดนั้นเกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างแคลเซียมไอออนกับ HAsO_4^{2-} ดังสมการที่ 4.6





รูปที่ 4.26 ผลของ pH ต่อรูปแบบของสารประกอบอาร์เซนิต (Ferguson และ Gavis, 1972)



รูปที่ 4.27 ผลจากการวิเคราะห์ XRD ของการกำจัดอาร์เซนิกด้วยถ่านกระดูกสภาวะที่ 1 ที่พีเอช น้ำเสียเท่ากับ 6

4.2.2.3 สรุปผลของสภาวะการเตรียมถ่านกระดูกที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิกจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการทดลองแบบเบทซ์

ผลการศึกษาการกำจัดอาร์เซนิกในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นอาร์เซนิกเริ่มต้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ด้วยถ่านกระดูกสภาวะต่าง ๆ ปริมาณ 1.0 กรัม/ลิตรน้ำเสีย พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 5 พบว่าเวลาสัมผัสที่ทำให้ถ่านทุกสภาวะมีประสิทธิภาพสูงสุดคือ 48 ชั่วโมง และที่เวลาสัมผัสนี้ถ่านกระดูกทั้งหมดให้ประสิทธิภาพในการกำจัดใกล้เคียงกัน แต่ถ่านกระดูกที่ไม่ถูกกระตุ้นให้ประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดีที่สุด จึงเลือกใช้ถ่านดังกล่าวปริมาณ 1.0 กรัม/ลิตรน้ำเสียในการศึกษาผลของพีเอชน้ำเสียเริ่มต้นที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิกต่อไป โดยทำการปรับพีเอชน้ำเสียอยู่ในช่วง 4-7 พบว่าให้ประสิทธิภาพการกำจัดใกล้เคียงกัน และผลการกำจัดเป็นผลมาจากกระบวนการดูดซับมากกว่าการตกตะกอน ซึ่งพีเอชน้ำเสียที่ทำให้ถ่านกระดูกสภาวะที่ 1 มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงที่สุดคือที่พีเอช 6 ดังนั้นในสภาวะการทดลองเพื่อศึกษาไอโซเทอมการดูดซับอาร์เซนิกในขั้นตอนต่อไปคือ ถ่านกระดูกที่ไม่ถูกกระตุ้นปริมาณ 1.0 กรัม/ลิตร พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 6

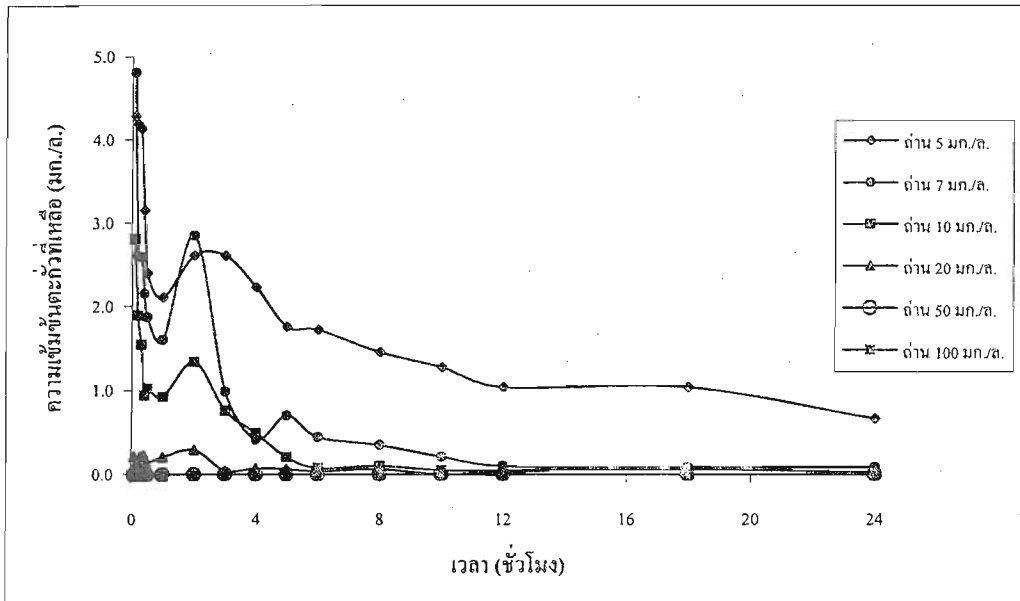
4.3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับโลหะหนักด้วยถ่านกระดูก

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ เป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายที่มีผลต่อการดูดซับ ซึ่งขณะที่กระบวนการดูดซับดำเนินไปนั้น ตัวถูกละลายหรือสารถูกดูดซับยังมีโอกาสที่จะหลุดออกจากสารดูดติดผิวได้ (desorption) ส่งผลให้ความเข้มข้นของสารละลายในระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา จนกระทั่งระบบได้เข้าสู่สภาวะสมดุล ซึ่งเป็นสภาวะที่ตัวถูกละลายเกิดการถูกดูดซับ และหลุดออกจากตัวดูดซับในจำนวนที่เท่า ๆ กัน ที่เวลาเดียวกัน โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของสารละลายอีกต่อไป ดังนั้นก่อนทำการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาเวลาที่เหมาะสมหรือเวลาที่ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลเสียก่อนเพื่อควบคุมให้ความเข้มข้นของสารละลายในระบบคงที่

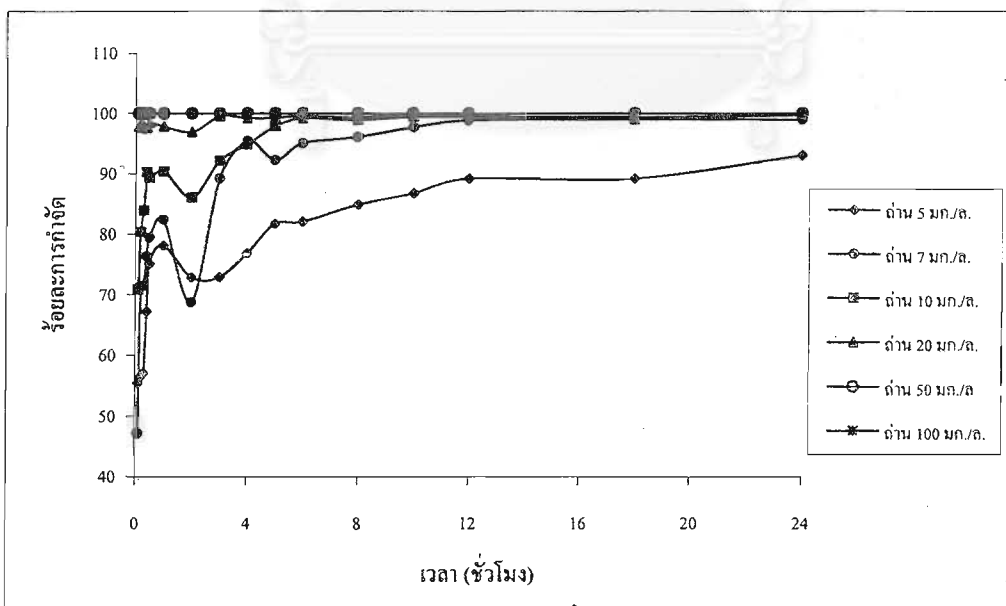
4.3.1 น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว

จากการทดลองกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ด้วยถ่านกระดูกที่ถูกกระตุ้นด้วยค่า (ถ่านสภาวะที่ 3) ปริมาณ 5, 7, 10, 20, 50 และ 100 มิลลิกรัม/ลิตรน้ำเสีย และปรับพีเอชน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 6 ซึ่งเป็นพีเอชที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดได้สูงสุด โดยทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือ ณ เวลาต่าง ๆ

รวมเวลา 24 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข1-ข6 และแสดงผลได้ดังรูปที่ 4.28 และ 4.29

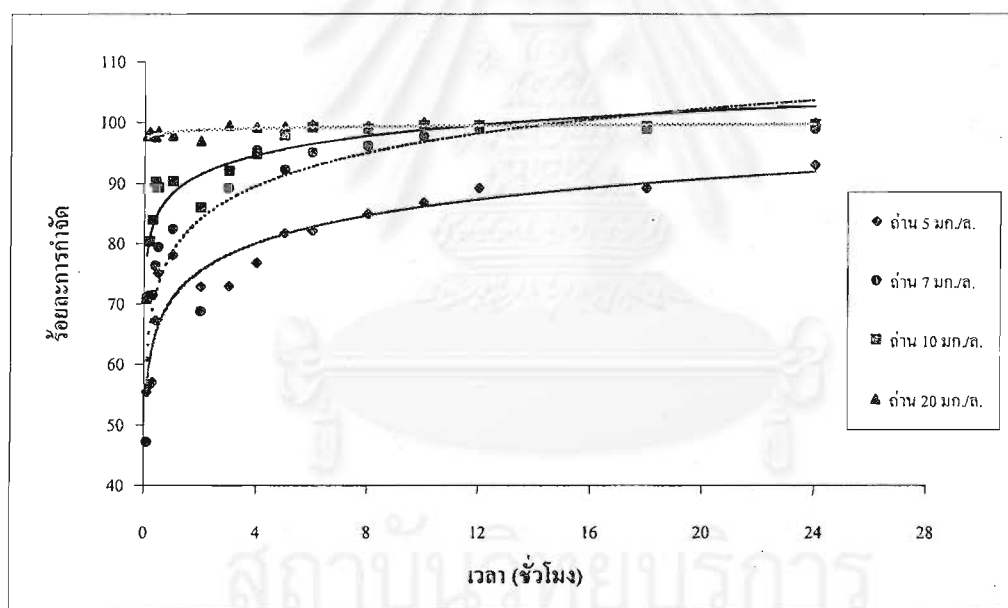


รูปที่ 4.28 ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ จากการกำจัดด้วยถ่านกระดูก ปริมาณต่าง ๆ



รูปที่ 4.29 ร้อยละการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยถ่านกระดูกปริมาณต่าง ๆ

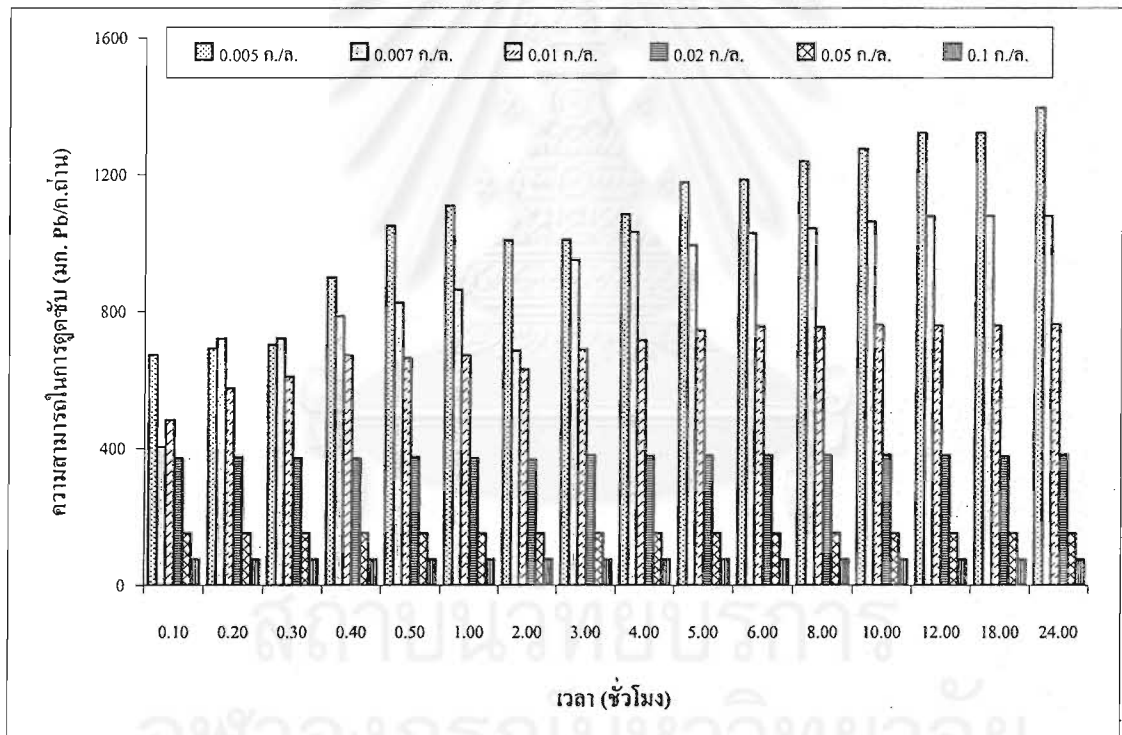
จากผลการทดลองพบว่า ถ่านกระดุกสามารถกำจัดตะกั่วได้ภายในระยะเวลาอันรวดเร็ว โดยเฉพาะถ่านกระดุกปริมาณ 50 และ 100 มิลลิกรัม/ลิตรน้ำเสีย สามารถกำจัดได้หมดภายในเวลา 10 นาทีแรก และจากรูปที่ 4.29 แสดงให้เห็นว่า เมื่อทำการเพิ่มปริมาณถ่านกระดุกมากขึ้นเวลาที่ใช้ในการกำจัดตะกั่วจะลดลง โดยถ่านกระดุกปริมาณ 5, 7, 10 และ 20 มิลลิกรัม/ลิตรน้ำเสีย ใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลเท่ากับ 24, 12, 10 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำมาพล็อตกราฟขึ้นใหม่ โดยใช้ค่าเฉลี่ยข้อมูลจะได้กราฟดังรูปที่ 4.30 ซึ่งสามารถนำมาหาความเข้มข้น ณ จุดสมดุลได้ดังตารางที่ 4.2 เห็นได้ว่าการใช้ปริมาณถ่านกระดุกที่แตกต่างกัน ส่งผลให้เวลาของการเข้าสู่สมดุลของระบบต่างกันไปด้วย โดยถ้าใช้ถ่านปริมาณน้อยลงเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุลก็จะนานขึ้น และในขณะที่กลไกการดูดซับดำเนินไปความสามารถในการดูดซับของถ่านมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลา สัมผัสของการเกิดปฏิกิริยา ส่วนที่เวลาสัมผัสเดียวกันจะทำให้ความสามารถในการดูดซับของถ่านลดลงเมื่อปริมาณถ่านเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.30 ร้อยละการกำจัดเฉลี่ยของตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยถ่านกระดุกปริมาณต่าง ๆ

ตารางที่ 4.2 ร้อยละการกำจัด และความเข้มข้นตะกั่วที่เหลือ ณ จุดสมดุล

ปริมาณถ่าน (มก./ล. น้ำเสีย)	เวลาสมดุล (ชั่วโมง)	สมการเส้นแนวโน้ม ลอการิทึม	ร้อยละการกำจัด ตะกั่ว (%)	ความเข้มข้น ตะกั่วที่เหลือ (มก./ล.)
5	24	$y = 6.6251 \ln(x) + 70.884$	80.03	1.921
7	12	$y = 7.873 \ln(x) + 78.696$	87.19	1.167
10	10	$y = 4.5132 \ln(x) + 88.412$	92.93	0.682
20	6	$y = 0.4225 \ln(x) + 98.469$	98.80	0.116

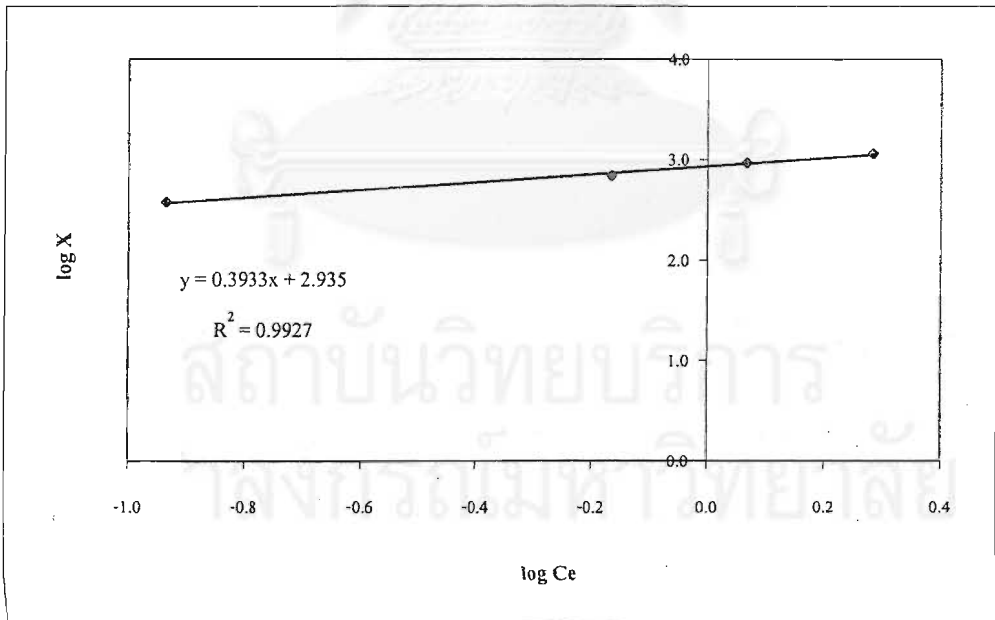


รูปที่ 4.31 ความสามารถในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียดังเคราะห์ ของถ่านกระดุกปริมาณต่าง ๆ

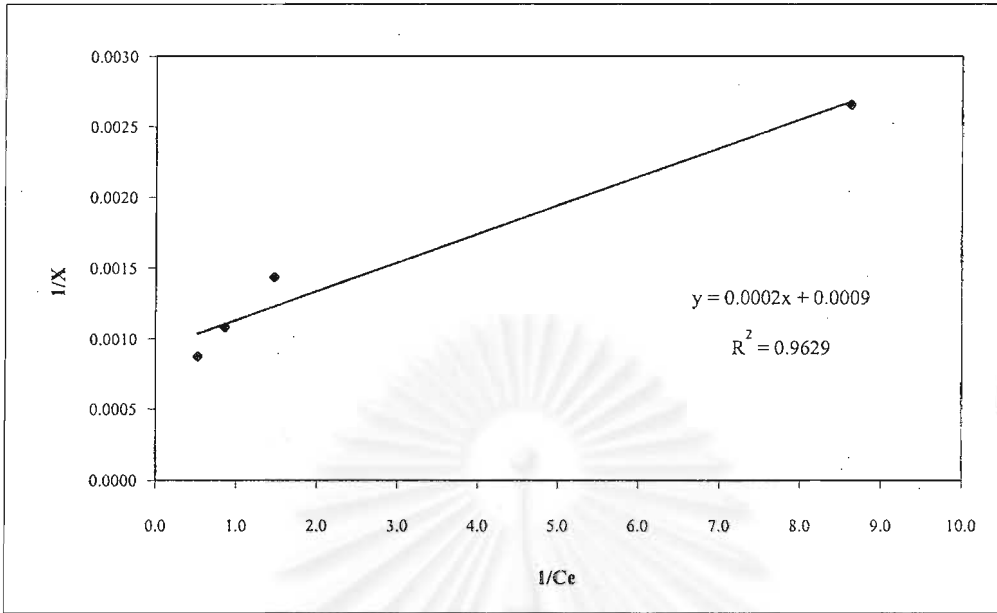
ดังนั้น เมื่อนำผลข้อมูลจากตารางที่ 4.2 จำนวน และแทนค่าข้อมูลที่ได้ในตาราง ข-7 ลงในสมการไอโซเทอมการดูดซับทั้งแบบฟรุนดลิชและแบบแลงมัวร์ ทำให้ได้ผลการศึกษาดังรูปที่ 4.32 และ 4.33 ตามลำดับ โดยผลของไอโซเทอมการดูดซับที่ได้แสดงให้เห็นจากสมการเชิงเส้น และค่า R^2 ตาม ตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลข้อมูลจากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับตะกั่ว

	ไอโซเทอมการดูดซับ แบบฟรุนดลิช	ไอโซเทอมการดูดซับ แบบแลงมัวร์
สมการเชิงเส้น	$\log X = 0.3933 \log C_e + 2.935$	$1/X = 0.0002 (1/C_e) + 0.0009$
R^2	0.9927	0.9629
ความชัน (slope)	0.3933	0.0002
จุดตัดแกน y (intercept)	2.935	0.0009



รูปที่ 4.32 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของถ่านกระดูกสถานะที่ 3 ในการกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียสังเคราะห์

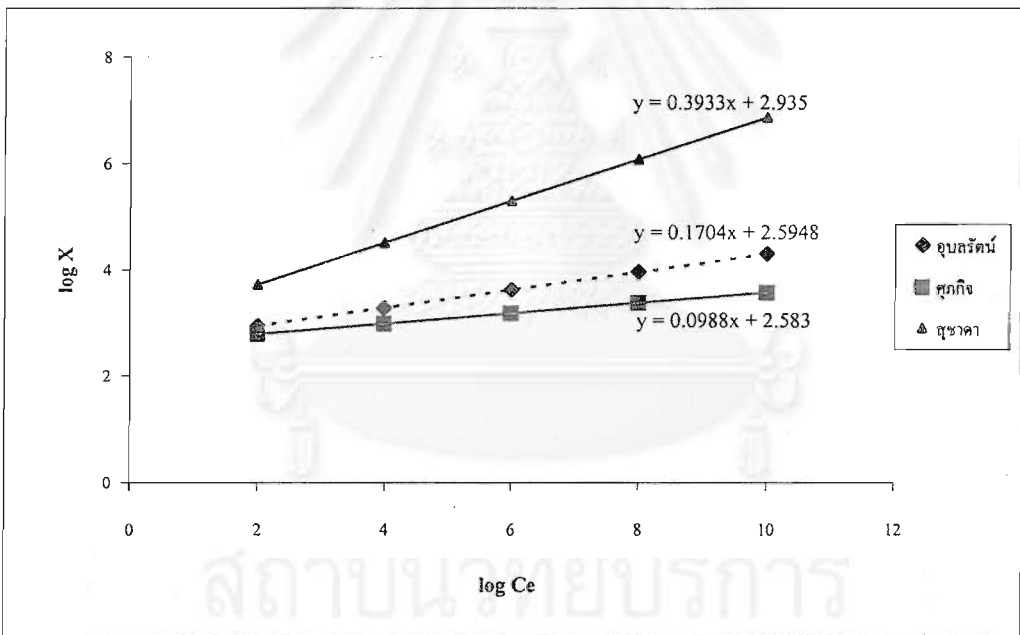


รูปที่ 4.33 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของถ่านกระดูกสถานะที่ 3 ในการกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียสังเคราะห์

นั่นคือ ลักษณะของการดูดซับตะกั่วด้วยถ่านกระดูกสถานะที่ 3 จากน้ำเสียสังเคราะห์ ตะกั่ว ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ที่พีเอช 6 มีแนวโน้มเป็นไปตามกลไกการดูดซับทั้งสมการไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชและแบบแลงมัวร์ แต่เหมาะสมกับไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชมากกว่า เนื่องจากค่า R^2 ของสมการแบบฟรุนดลิชมีค่า 0.9927 ในขณะที่แบบแลงมัวร์เท่ากับ 0.9629 ซึ่งผลที่ได้เป็นเช่นเดียวกับที่อุบลรัตน์ (2544) และศุภกิจ (2545) ได้ทำการทดลองไว้

นอกจากนี้ ค่าความชันยังสามารถบอกถึงความสามารถในการดูดซับได้ด้วย โดยสมการไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชที่มีความชันเท่ากับ $1/n$ นั้น ถ้า $n > 1$ แสดงถึงว่า ตัวดูดซับที่ใช้มีความสามารถในการดูดซับตัวถูกละลายหรือตัวถูกดูดซับได้ดีเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น และถ้า $1 < n < 10$ แสดงว่าปฏิกิริยาการดูดซับกำลังดำเนินไปได้ด้วยดี แต่ถ้า $1/n$ มีค่าน้อยกว่า 1 มาก ๆ ($1/n \ll 1$) ความสามารถในการกำจัดจะค่อย ๆ ลดลงตามความเข้มข้นที่น้อยลงด้วย (Samuel และ Osman, 1987) จากรูปที่ 4.31 ค่า n จากสมการ ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 2.543 ซึ่งแสดงว่าถ่านกระดูกที่ใช้ทดลองนี้มีประสิทธิภาพในการเป็นตัวดูดซับที่ดี เช่นเดียวกับอุบลรัตน์ (2544) ซึ่งใช้ถ่านกระดูกที่เตรียมขึ้นที่อุณหภูมิเผา 600 °C นาน 12 ชั่วโมง และศุภกิจ (2545) ที่เตรียมถ่านกระดูกจากการเผาที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง ในการกำจัดตะกั่วความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 100

มิลลิกรัม/ลิตร โดยค่า n ที่ได้จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 5.869 และ 10.121 ตามลำดับ เมื่อทำการพล็อตกราฟไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชดังรูปที่ 4.34 จะเห็นว่า ที่ความเข้มข้นเดียวกัน ถ่านกระดูกของงานวิจัยฉบับนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดมากกว่างานวิจัยของอุบลรัตน์ และศุภกิจ (สุซาดา > อุบลรัตน์ > ศุภกิจ) นอกจากนี้ยังสามารถใช้ค่า K ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารดูดซับได้ด้วย เนื่องจากเป็นค่าที่แสดงถึงความหนาแน่นของการดูดติดผิวเมื่อ C มีค่าเท่ากับ i โดยค่า K ที่มากส่งผลให้ความหนาแน่นของการดูดติดผิวมากด้วย ซึ่งค่า K ที่ได้จากการทดลองนี้มีค่าเท่ากับ 860.99 และเมื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับตะกั่วของถ่านกระดูกที่ถูกเตรียมขึ้นในสถานะที่แตกต่างกันนั้น แสดงดังตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าถ่านกระดูกนั้นถูกพัฒนา ปรับปรุงให้ดีขึ้น ซึ่งจากตารางเห็นได้ว่าถ่านที่ถูกเผาที่อุณหภูมิต่ำนั้นให้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วได้มากกว่าการเผาที่อุณหภูมิสูง และหากนำมากระตุ้นด้วยสารละลายกรดหรือด่างความเข้มข้นต่ำ (ประมาณ 0.1 โมลาร์) จะช่วยให้ประสิทธิภาพของถ่านกระดูกที่เตรียมไว้สูงขึ้นได้ด้วย



รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบ ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช ในการทดลองใช้ถ่านกระดูกกำจัด ตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์

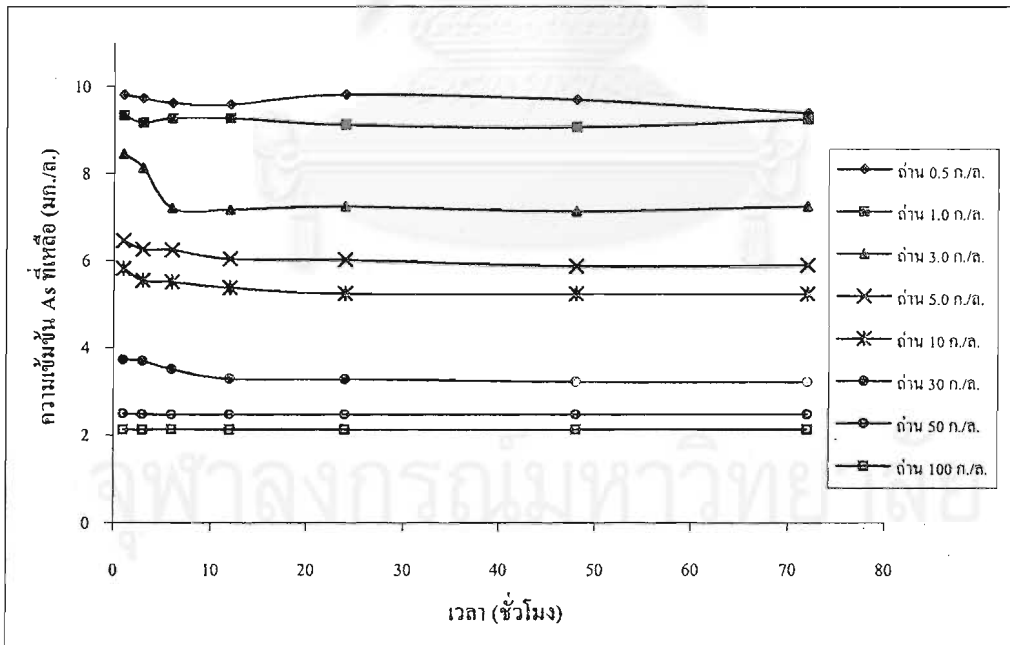
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบความสามารถของถ่านกระดูกที่เตรียมขึ้นในสถานะแตกต่างกัน เพื่อใช้ในการดูดซับตะกั่วจากน้ำเสีย

รายการอ้างอิง	สถานะการเตรียม	ความสามารถในการดูดซับ (มก./ก.)
Jonathan, Ian และ Symon, 2004	<ul style="list-style-type: none"> - อุณหภูมิเผา 700 °C นาน 1 ชั่วโมง - ขนาด 0.25-0.85 มิลลิเมตร - ไม่ล้างน้ำ (unwashed) - ล้างน้ำ (washed) - ขนาด 0.15-0.85 มิลลิเมตร 	<p>108</p> <p>151</p> <p>207</p>
อุบลรัตน์, 2544	<ul style="list-style-type: none"> - อุณหภูมิเผา 600 °C นาน 12 ชั่วโมง - ขนาด 0.42-0.84 มิลลิเมตร - pH น้ำเสียเริ่มต้น 5 	458.55
ศุภกิจ, 2545	<ul style="list-style-type: none"> - อุณหภูมิเผา 500 °C นาน 1 ชั่วโมง - ขนาด 0.42-0.84 มิลลิเมตร - pH น้ำเสียเริ่มต้น 5 	617.5
งานวิจัยนี้	<ul style="list-style-type: none"> - อุณหภูมิเผา 500 °C นาน 1 ชั่วโมง - กระตุ้นด้วยสารละลาย NaOH - ขนาดไม่มากกว่า 45 ไมโครเมตร - pH น้ำเสียเริ่มต้น 6 	1111

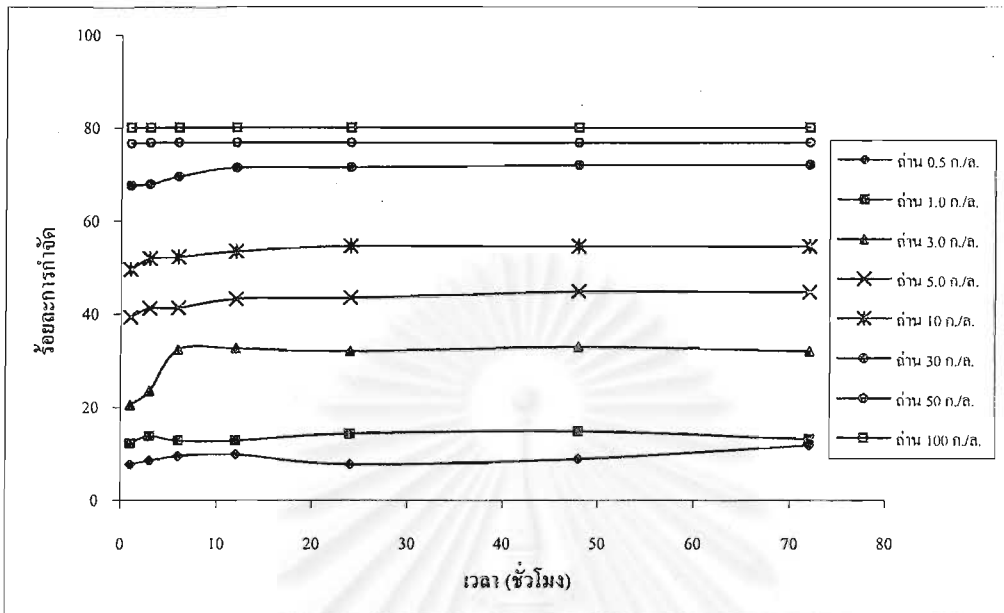
4.3.2 น้ำเสียสังเคราะห์อาร์เซนิก

ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับอาร์เซนิกจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกระดูกที่ไม่ถูกกระตุ้นปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 0.5, 1, 3, 5, 10, 30, 50 และ 100 กรัม/ลิตรน้ำเสีย ที่พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 6 และเก็บตัวอย่างตามเวลาต่าง ๆ เป็นเวลารวม 72 ชั่วโมง ซึ่งจากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่เหลือแสดงผลตามภาคผนวก ข ตารางที่ ข-8 ถึง ข-15 และจากรูปที่ 4.35 และ 4.36

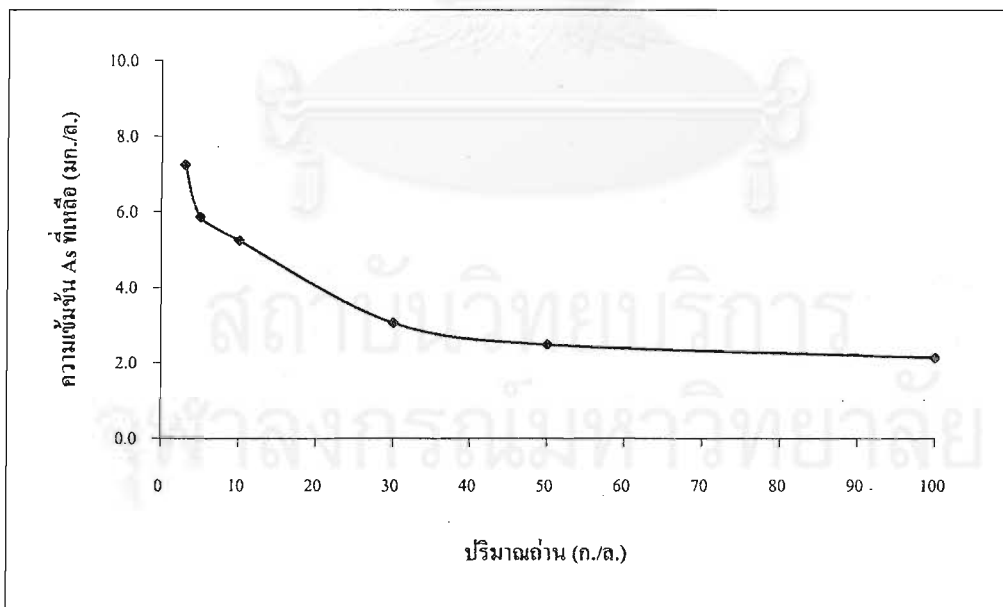
พบว่าปริมาณถ่านกระดุกมีผลต่อการกำจัดอาร์เซนิก โดยเห็นได้จากการเพิ่มปริมาณถ่านสูงขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดก็สูงขึ้นด้วยเช่นกัน และการใช้เวลาเข้าสู่ภาวะสมดุลนั้นในถ่านปริมาณน้อย ต้องใช้เวลาในการเข้าสู่ภาวะสมดุลนานกว่าการใช้ถ่านปริมาณสูง ๆ ดังเช่นถ่านปริมาณ 0.5 และ 1.0 กรัม/ลิตรน้ำเสีย ยังคงมีแนวโน้มของเวลาในการเข้าสู่ภาวะสมดุลที่จะเพิ่ม หรือลดลงต่อไปได้อีกถ้าเพิ่มเวลาของระบบให้มากขึ้น ในขณะที่ถ่านปริมาณ 3, 5, 10 และ 30 กรัม/ลิตรน้ำเสีย เริ่มเข้าสู่ภาวะสมดุลที่เวลา 72, 48, 24 และ 12 ชั่วโมง ตามลำดับ หรือถ้าใช้ถ่านปริมาณ 50 และ 100 กรัม/ลิตรน้ำเสีย เวลาในการเข้าสู่สมดุลของระบบลดลงเหลือเพียง 1-3 ชั่วโมงเท่านั้น และความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ ณ ภาวะสมดุลนี้ เท่ากับ 7.237, 5.863, 5.236, 3.292, 2.478 และ 2.128 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ (รูปที่ 4.37) และประสิทธิภาพการกำจัดของถ่านกระดุกที่ภาวะสมดุลแสดงดังรูปที่ 4.38 สำหรับข้อมูลที่ได้จากการคำนวณความเข้มข้น และความสามารถในการดูดซับที่ภาวะสมดุลนี้แสดงดังตารางที่ ข-16 ซึ่งเมื่อนำผลที่ได้มาพล็อต กราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับของถ่าน 1.0 กรัม และความเข้มข้นของอาร์เซนิกในน้ำเสียที่ภาวะสมดุลตามสมการของไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช และแลงมัวร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.39 และ 4.40



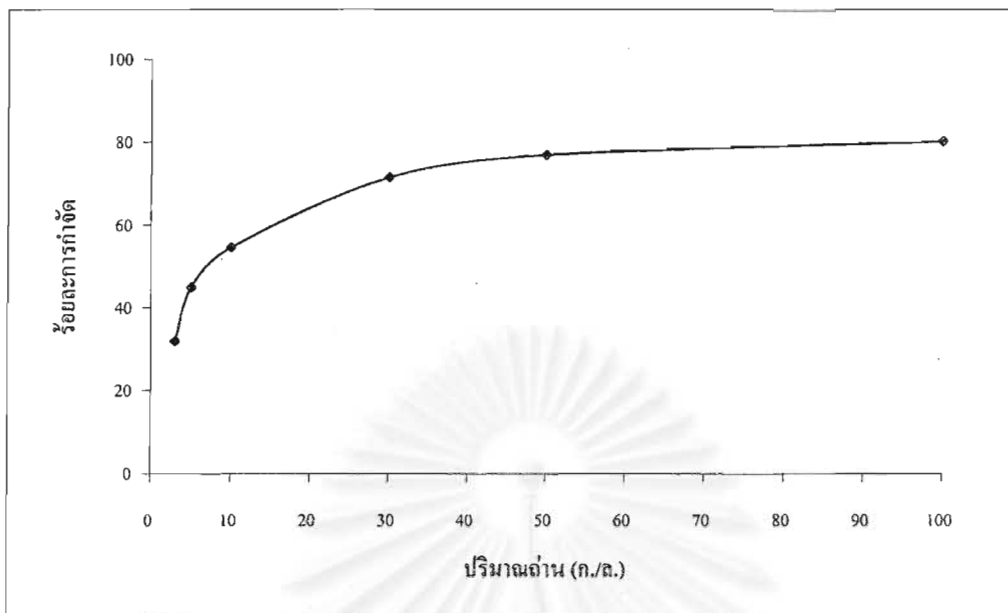
รูปที่ 4.35 ความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ จากการกำจัดด้วยถ่านกระดุก ปริมาณต่าง ๆ



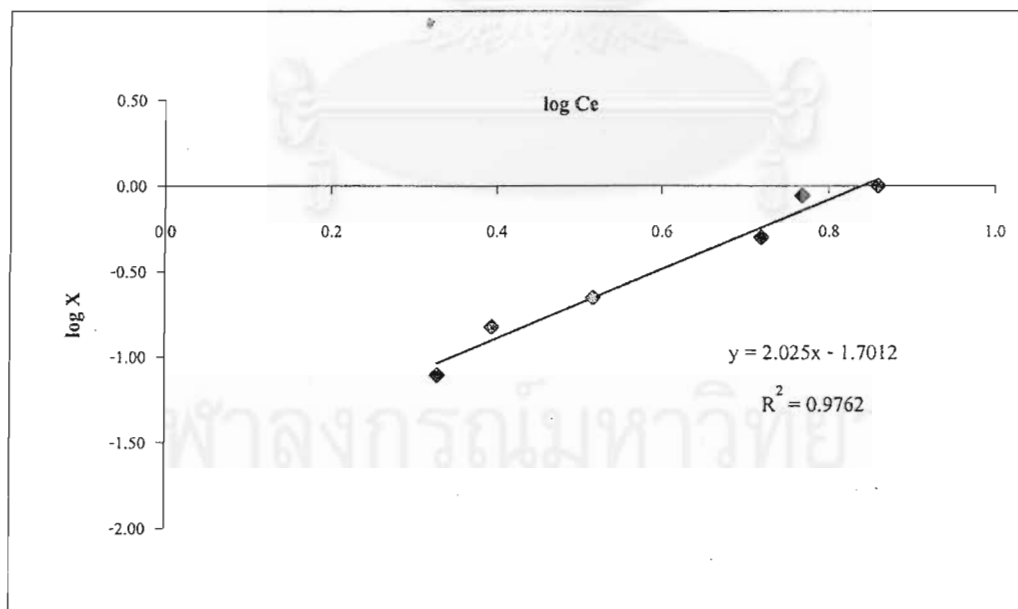
รูปที่ 4.36 ร้อยละการกำจัดอาร์เซนิกในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยถ่านกระดุกปริมาณต่าง ๆ



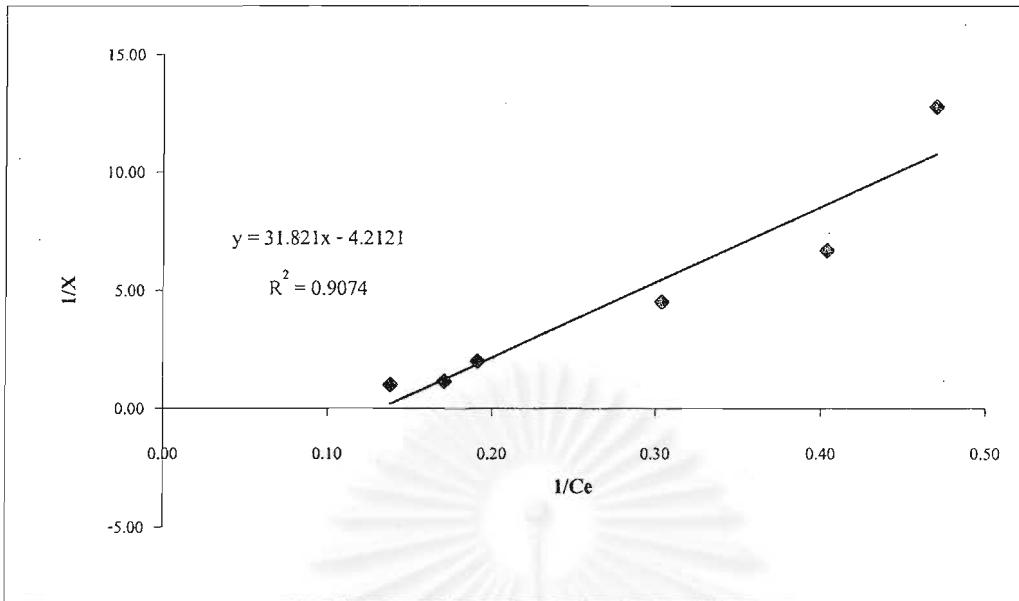
รูปที่ 4.37 ความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ ภายหลังจากกำจัดด้วยถ่านกระดุกปริมาณต่าง ๆ ที่ภาวะสมดุล



รูปที่ 4.38 ร้อยละการกำจัดอาร์เซนิกในน้ำเสียสังเคราะห์ ภายหลังจากกำจัดด้วยถ่านกระดุก ปริมาณต่าง ๆ ที่ภาวะสมดุล



รูปที่ 4.39 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของถ่านกระดุกสภาวะที่ 1 ในการกำจัดอาร์เซนิก ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์



รูปที่ 4.40 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของถ่านกระดูกสถานะที่ 1 ในการกำจัดอาร์เซนิกออกจากน้ำเสียสังเคราะห์

จากการทดลองพบว่า เมื่อใช้ปริมาณถ่านกระดูกสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับอาร์เซนิกนั้นลดลงจาก 0.998 มิลลิกรัม/กรัมถ่าน ในถ่านปริมาณ 3 กรัม/ลิตรน้ำเสีย จนเหลือ 0.078 มิลลิกรัม/กรัมถ่าน ในถ่านปริมาณ 100 กรัม/ลิตรน้ำเสีย โดยผลของไอโซเทอมที่ได้สามารถแสดงสมการเชิงเส้น และค่า R^2 ดังตารางที่ 4.5 ซึ่งค่า R^2 ของไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชมีค่ามากกว่าแบบแลงมัวร์ ดังนั้นลักษณะของการใช้ถ่านกระดูกในการดูดซับอาร์เซนิกจึงเหมาะสมกับแบบฟรุนดลิชมากกว่า และค่า n และ K ที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.4938 และ 0.02 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 ผลข้อมูลจากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับอาร์เซนิก

	ไอโซเทอมการดูดซับ แบบฟรุนดลิช	ไอโซเทอมการดูดซับ แบบแลงมัวร์
สมการเชิงเส้น	$\log X = 2.025 \log C_e - 1.7012$	$1/X = 31.821 (1/C_e) - 4.2121$
R^2	0.9762	0.9074
ความชัน (slope)	2.025	31.821
จุดตัดแกน y (intercept)	-1.7012	-4.2121

จากการศึกษาถึงความสามารถของถ่านกระดุกที่ใช้เป็นสารดูดซับตะกั่ว และอาร์เซนิก นั้น จะเห็นว่าถ่านกระดุกมีความสามารถในการกำจัดตะกั่วได้ดีมาก โดยจากการทดลองเตรียมถ่าน กระดุกขึ้นทั้งหมด 4 สภาวะ พบว่าถ่านกระดุก 3 สภาวะ ได้แก่ ถ่านที่ไม่ถูกกระตุ้น (สภาวะที่ 1) ถ่านที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายกรด (สภาวะที่ 2) และถ่านที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายด่าง มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วได้สูงกว่า 80% ในช่วงพีเอชน้ำเสียเท่ากับ 4-7 และจากการศึกษา ไอโซเทอมการดูดซับ 2 แบบ คือ สมการการดูดซับแบบฟรุนดลิช และแลงมัวร์ ผลจากสมการ ไอโซเทอมที่ได้แสดงให้เห็นว่าถ่านกระดุกมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้กำจัดตะกั่วใน น้ำเสียได้ ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับ (adsorbent capacity) ต่าง ๆ กับถ่านกระดุกที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลาย NaOH ในการทดลองนี้ ดังตารางที่ 4.6 จะเห็นว่า ถ่านกระดุกสามารถดูดซับตะกั่วได้สูงถึง 1111.11 มิลลิกรัม ตะกั่ว/กรัมถ่านกระดุก

ตารางที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารดูดซับชนิดต่าง ๆ ในการดูดซับตะกั่ว ต่อความจุของสารดูดซับ

Adsorbents	Adsorbent capacity (mg/g)	References
lignin	1865	Babel และ Kurniawan, 2003
waste slurry	1030	Babel และ Kurniawan, 2003
zeolite	175	Babel และ Kurniawan, 2003
Hardwood bark	72.47	Am, Youngwoo และ Pual, 2005
black gram husk	49.97	Asma และคณะ, 2005
northern anatolian smectites	36.11	Cigdem และคณะ. 2000
siderite	10.32	Mehmet และ Arzu, 2005
กะลามะพร้าว	8.37	สุจันย์ คู่ยเสงี่ยม, 2544
กะลาปาล์ม	2.58	สุจันย์ คู่ยเสงี่ยม, 2544
ถ่านกระดุก	1111	งานวิจัยนี้

และจากการทดลองใช้ถ่านกระดูกในการกำจัดอาร์เซนิกในน้ำเสีย พบว่าถ่านกระดูกให้ประสิทธิภาพในการดูดซับอาร์เซนิกได้ดี คือสามารถดูดซับอาร์เซนิกได้สูงสุด 0.02 มิลลิกรัม/กรัม ถ่านเท่านั้นแต่จะสามารถดูดซับอาร์เซนิกได้มากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกระดูก และเมื่อเปรียบเทียบกับสารดูดซับชนิดต่าง ๆ จะเห็นว่าสารดูดซับชนิดอื่นก็มีความสามารถดูดซับอาร์เซนิกได้ดีเช่นกันเช่นกัน ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารดูดซับชนิดต่าง ๆ ในการดูดซับอาร์เซนิกต่อความจุของสารดูดซับ (Namasivayam, 1998 และ Guibal, 1999 อ้างถึงในรามนรี เนตรวิเชียร, 2543)

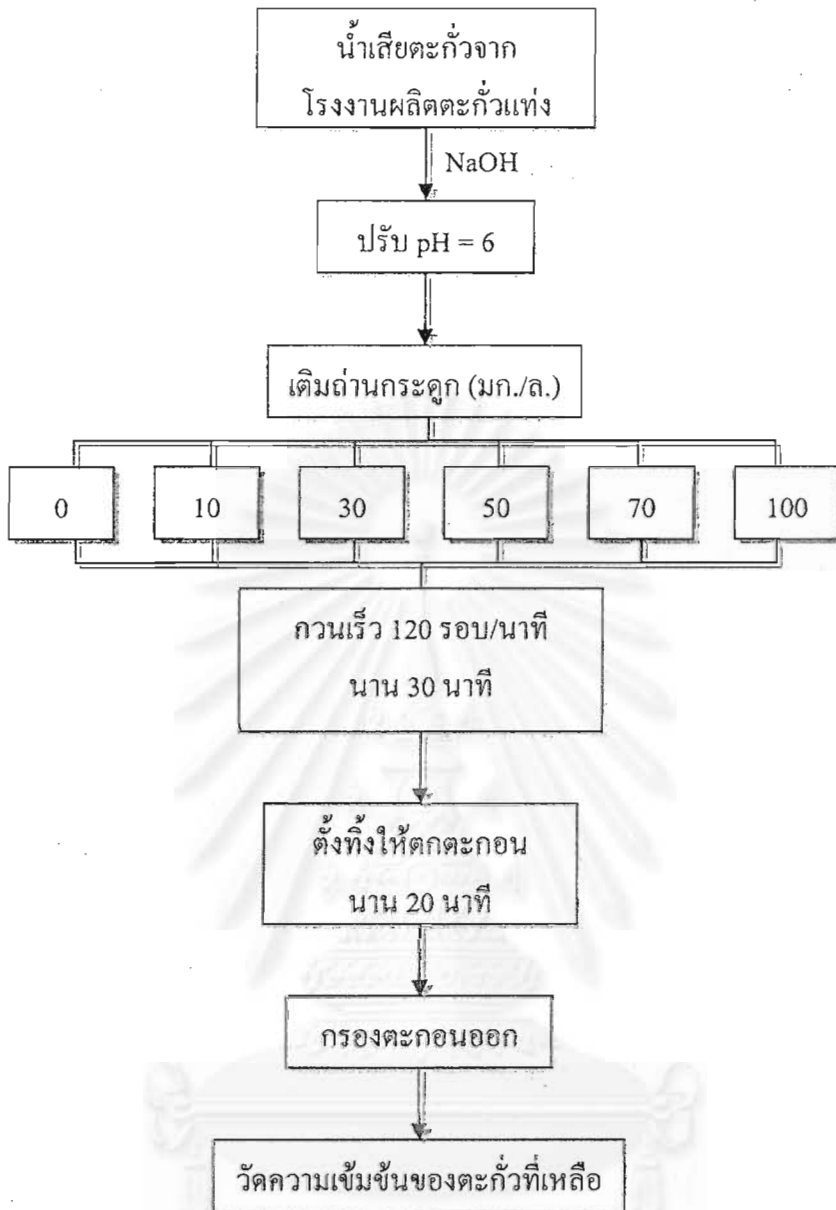
Adsorbents	Adsorbent capacity (mg/g)
hydrous Fe oxide with poloacrylamine	43.00
molybdate-impregnates chitosan beads (MICB)	37.47
chemviron F-400 GAC	20.22
Cu ²⁺ - impregnated Chemviron F-400 GAC	17.23
activated alumina	11.24-23.97
Y (III)- impregnated alumina	14.45
alumina	13.64
La (III) – impregnated alumina	12.88
waste Fe(III)/Cr(III) hydroxide	11.02
La (III) – impregnated silica gel	8.85
Activated bauxite	3.89
activated carbon darco	3.75
Ag ⁺ - impregnated Chemviron F-400 GAC	2.24
activated carbon	1.05
Al ₂ O ₃ /Fe(OH) ₃	0.09

4.4 การศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกระดุกเมื่อนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียจริง

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตตะกั่วแห่งหนึ่ง ได้ทำการทดลองการกำจัดด้วยวิธีการตกตะกอน เนื่องจากขั้นตอนการศึกษาไอโซเทอมที่ผ่านมาพบว่า ปริมาณถ่านกระดุกที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 20 มิลลิกรัม/ลิตรน้ำเสีย เท่านั้น ดังนั้นจึงน่าจะมีความเหมาะสมมากกว่าหากใช้ถ่านกระดุกเป็นสารดูดซับชนิดผงเช่นเดียวกับการใช้งานของถ่านกัมมันต์ชนิดผง (powder activated carbon: PAC) ที่นิยมใช้เติมก่อนกระบวนการตกตะกอน หรือการกรองน้ำ

สำหรับการทดลองกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียจริงด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมกับการดูดซับ โดยใช้ถ่านกระดุกที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH (ถ่านสภาวะที่ 3) พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 6 และทดลองเติมถ่านกระดุกปริมาณต่าง ๆ กันคือ 10, 30, 50, 70 และ 100 มิลลิกรัม/ลิตรน้ำเสีย จากนั้นนำไปทดสอบการตกตะกอนด้วยเครื่องจาร์เทสต์ โดยการกวนเร็วที่ความเร็ว 120 รอบ/นาที เป็นเวลานาน 30 นาที และตั้งทิ้งให้ตกตะกอนนาน 20 นาที ดังรูปที่ 4.41 จากการสังเกตน้ำเสียก่อนการทดลองพบว่าน้ำเสียมีลักษณะสีเหลืองอ่อน ๆ มีสิ่งปนเปื้อนขนาดเล็กปะปนอยู่พอประมาณ พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นที่วัดได้อยู่ในช่วง 0.97-1.25 และเมื่อทดลองปรับพีเอชน้ำเสียด้วย NaOH พบว่าเมื่อพีเอชสูงขึ้นน้ำเสียเริ่มเปลี่ยนสีเป็นสีส้มเข้มมากขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงที่พีเอช 6 น้ำเสียที่ได้มีสีส้มชัดเจน (รูปที่ 4.42) และหากตั้งทิ้งไว้จะเกิดการตกตะกอนทันที โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วในน้ำเสียจริงที่วัดได้มีค่าตะกั่วทั้งหมด (total lead) เท่ากับ 185 มิลลิกรัม/ลิตร และตะกั่วละลาย (dissolve lead) 3.60 มิลลิกรัม/ลิตร ภายหลังจากการทดลองได้ดำเนินการเสร็จสิ้นสามารถวัดความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำเสียที่เหลือ และประสิทธิภาพในการกำจัดได้ผลดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.43 และ 4.44

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.41 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลองใช้ถ่านกระดูกในการบำบัดน้ำเสียจริงด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมกับการดูดซับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียโรงงานผลิตตะกั่วแห่ง สี่วตามกระชูด ปริมาณต่าง ๆ ที่พีเอชน้ำเสียเท่ากับ 6

ปริมาณ ถ้ำน (มก.)	ความเข้มข้นตะกั่วที่เหลือ (มก./ล.)			ประสิทธิภาพการกำจัด (%)			pH สุดท้าย
	Pb _{total}	Pb _{disolve}	Pb _{precipitate}	Pb _{total}	Pb _{disolve}	Pb _{precipitate}	
0	0.497	0.254	0.243	99.73	92.94	99.87	5.96
10	0.441	0.225	0.216	99.76	93.75	99.88	6.54
30	0.450	0.215	0.235	99.76	94.03	99.87	6.83
50	0.436	0.204	0.232	99.76	94.33	99.87	7.01
70	0.446	0.189	0.257	99.76	94.75	99.86	7.25
100	0.450	0.167	0.283	99.76	95.36	99.84	7.34



ก) pH 3-4

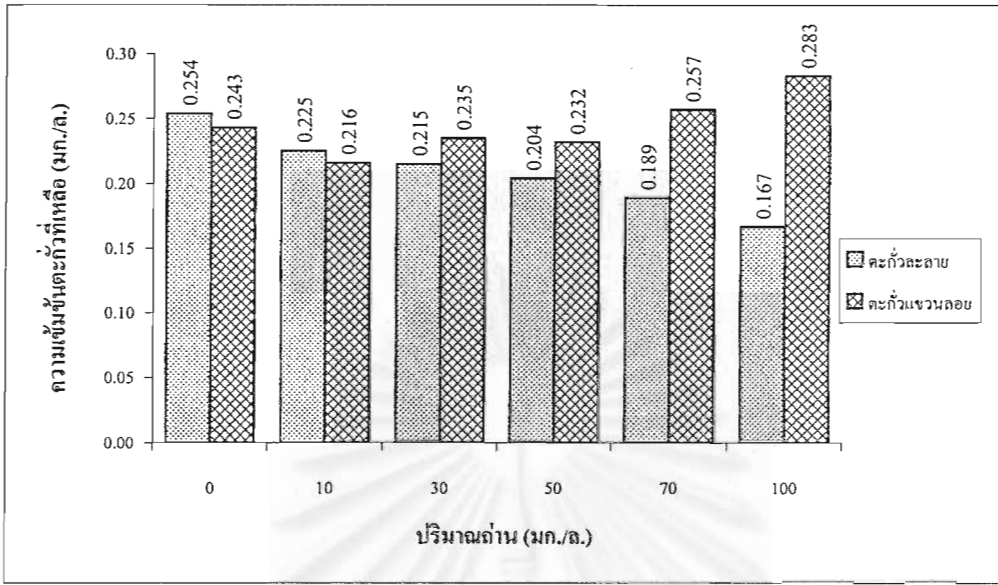


ข) pH 4-5

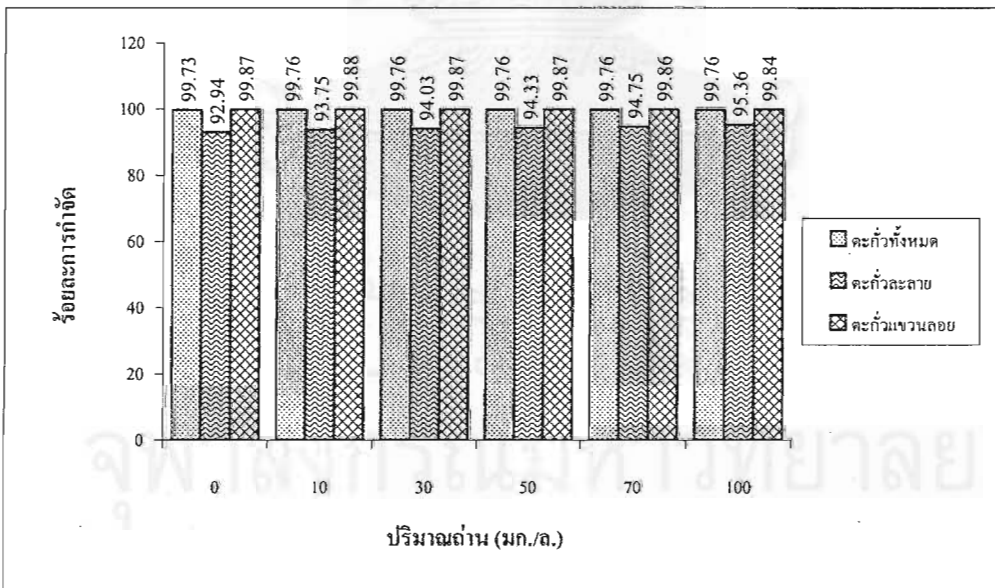


ค) pH 6

รูปที่ 4.42 ลักษณะสีของน้ำเสียจากโรงงานผลิตตะกั่วแห่ง สี่วตามกระชูดเมื่อปรับพีเอชเพิ่มขึ้นตามลำดับ



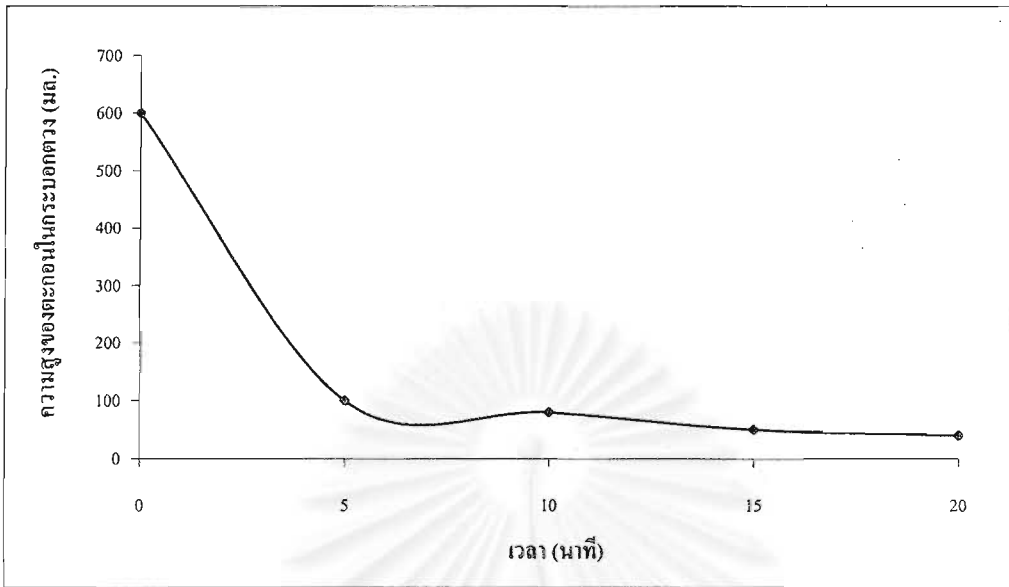
รูปที่ 4.43 ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือจากการทดลองกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจริงด้วยถ่านกระดูกปริมาณต่าง ๆ



รูปที่ 4.44 ร้อยละการกำจัดของตะกั่วในน้ำเสียจริงด้วยถ่านกระดูกปริมาณต่าง ๆ

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อทำการปรับพีเอชน้ำเสียเท่ากับ 6 แล้ว ความเข้มข้นที่เหลือจากกระบวนการตกตะกอนของตะกั่วทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 0.497 มิลลิกรัม/ลิตร จากความเข้มข้นเริ่มต้น 185 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นร้อยละการตกตะกอนเท่ากับ 99.73 และเมื่อทำการทดลองเติมถ่านกระดูกลงไป ปริมาณแตกต่างกันดังกล่าว กลับพบว่าความเข้มข้นที่เหลือจากการดูดซับของตะกั่วทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วง 0.436-0.450 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันและไม่มีแนวโน้มของการลดลงอย่างเป็นลำดับเมื่อปริมาณถ่านกระดูกเพิ่มสูงขึ้น แสดงว่าถ่านกระดูกไม่มีผลต่อการกำจัดตะกั่วที่อยู่ในลักษณะของแข็ง หรือคอลลอยด์ (colloid) ที่ไม่ละลายในสารละลาย หรืออยู่ในรูปของสารประกอบที่ทำให้ถ่านกระดูกไม่สามารถดูดซับได้ แต่ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วทั้งหมดในน้ำเสียจริงเกิดจากกระบวนการตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์เป็นหลัก สำหรับความเข้มข้นของตะกั่วละลายที่เหลือสามารถสรุปได้ว่า ภายหลังจากทดลองเติมถ่านกระดูกนั้น มีค่าลดลงอย่างแปรผันตามปริมาณถ่านที่เพิ่มขึ้น แม้ว่ากระบวนการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียส่วนใหญ่เป็นผลเนื่องมาจากกระบวนการตกตะกอนด้วย NaOH เช่นกัน เนื่องจากค่าพีเอชหลังการทดลองให้ค่าอยู่ในช่วงการตกตะกอนของตะกั่ว แต่จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.5 นั้น ความเข้มข้นตะกั่วละลายที่เหลือจากการปรับพีเอชน้ำเสียก่อนเติมถ่านกระดูกนั้นมีค่าเท่ากับ 0.254 มิลลิกรัม/ลิตร ส่งผลให้กระบวนการตกตะกอนด้วยสารด่างเพียงอย่างเดียว ไม่สามารถกำจัดตะกั่วให้ได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้ง (0.2 มิลลิกรัม/ลิตร) น้ำเสียนี้จึงไม่สามารถปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ แต่เมื่อใช้ถ่านกระดูกเป็นตัวช่วยกำจัดตะกั่วละลายที่เหลือจากการตกตะกอนด้วยสารด่างแล้ว พบว่าน้ำเสียจริงภายหลังจากบำบัดมีค่าลดลงต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่กำหนด เมื่อใช้ถ่านกระดูกในปริมาณที่เหมาะสมคือ 50 มิลลิกรัม/ลิตรน้ำเสีย หรือมากกว่า และสำหรับตะกั่วแขวนลอยที่ไม่สามารถกำจัดได้ด้วยถ่านกระดูก แต่ก็สามารถนำไปกำจัดได้ด้วยวิธีการอื่นได้

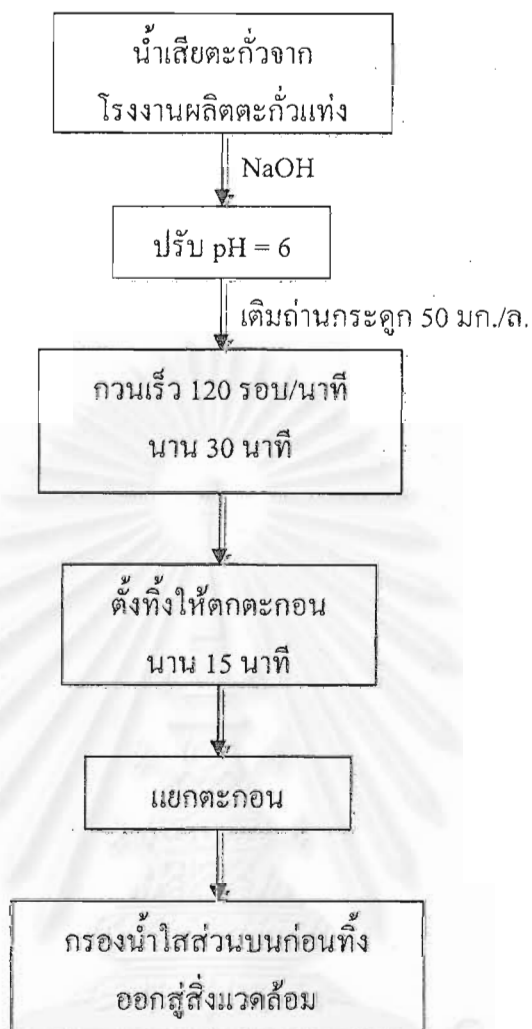
นอกจากนี้ จากการทดลองตกตะกอนน้ำเสียจริงตะกั่วภายหลังจากการกวนสารละลายด้วยใบพัดที่ความเร็ว 120 รอบ/นาที โดยใช้น้ำเสียที่กำจัดด้วยถ่านกระดูกปริมาณ 50 มิลลิกรัม/ลิตร น้ำเสีย และใช้เวลาในการตกตะกอนนาน 20 นาที จากนั้นวัดความสูงของปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นในกระบอกตวงขนาด 1000 มิลลิลิตร ที่เวลา 5, 10, 15 และ 20 นาที พบว่าจากปริมาณน้ำเสีย 600 มิลลิลิตร เมื่อเวลาผ่านไปสามารถวัดปริมาณตะกอนได้ที่ความสูง 100, 80, 50 และ 40 มิลลิลิตร ที่เวลา 5, 10, 15 และ 20 นาที ตามลำดับ ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.45



รูปที่ 4.45 ความสูงของตะกอนน้ำเสียที่กำจัดด้วยถ่านกระดุกปริมาณ 50 มิลลิกรัม/ลิตรน้ำเสีย

จากรูปแสดงให้เห็่นว่าน้ำเสียสามารถตกตะกอนได้อย่างรวดเร็ว โดยตะกอนที่เกิดขึ้นภายหลังการทดลองกวนน้ำเสียจริงด้วยใบกวน และทิ้งให้ตกตะกอนนาน 20 นาที พบว่าในช่วง 0-5 นาที ตะกอนน้ำเสียยังไม่เกิดการรวมตัวของตะกอนได้ดี จนกระทั่งเมื่อเวลาผ่านไป ตะกอนดังกล่าวเกิดการรวมตัวกัน ได้มากขึ้นทำให้น้ำหนักของตะกอนเพิ่มสูงขึ้นจึงเกิดการจมตัวลง ส่งผลให้ความสูงของตะกอนลดลงด้วย และเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนน้ำเสียในบ่อพักตะกอนภายหลังจากการบำบัดด้วยถ่านกระดุกแล้วคือ 15 นาที สรุปได้ว่าวิธีการที่เหมาะสมในการบำบัดตะกั่วในน้ำเสียจริงสามารถทำการทดลองได้ตามขั้นตอนดังนี้ (รูปที่ 4.46)

- 1) ตกตะกอนน้ำเสียด้วย NaOH โดยปรับพีเอชน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 6
- 2) กำจัดตะกั่วละลายออกจากน้ำเสียด้วยถ่านกระดุกที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย NaOH หรือถ่านสภาวะที่ 3 ปริมาณ 50 มิลลิกรัม/ลิตรน้ำเสีย
- 3) ทำการกวนเร็วโดยวิธีการกวนด้วยแท่งแม่เหล็กที่ความเร็ว 120 รอบ/นาที นาน 30 นาที
- 4) ตกตะกอนน้ำเสียนาน 15 นาที และวัดความเข้มข้นของตะกั่วละลายที่เหลือ



รูปที่ 4.46 แผนภาพแสดงขั้นตอนการใช้ถ่านกระจุกในการบำบัดตะกั่วละลายจากน้ำเสียจริง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาความสามารถของถ่านกระดูกที่ใช้เป็นสารดูดซับโลหะหนัก 2 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว และอาร์เซนิก โดยทำการทดลองแบบแบทช์เพื่อศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ และทำการทดลองกับน้ำเสียจริงที่มีตะกั่วปนเปื้อนอยู่ รวมถึงการเลือกใช้อ่านกระดูกที่เตรียมขึ้นแตกต่างกัน 4 สภาวะ ซึ่งเหมาะต่อการนำไปใช้งานที่แตกต่างกันไป ผลการวิจัยที่ได้สรุปได้ดังนี้

5.1.1 ผลของสภาวะการเตรียมถ่านกระดูก

ถ่านกระดูกที่เตรียมขึ้นสำหรับใช้ในงานวิจัยนี้ ถูกเตรียมขึ้นทั้งหมด 4 สภาวะ ได้แก่ ถ่านกระดูกที่ไม่ถูกกระตุ้นด้วยสารเคมีใด ๆ ถ่านกระดูกที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายกรดและต่าง ถ่านกระดูกที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดและทำการเผาต่อที่อุณหภูมิสูง พบว่าถ่านกระดูกแต่ละสภาวะมีความเหมาะสมต่อการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิดได้ต่างกัน โดยถ่านกระดูกที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรดและต่าง หรือถ่านกระดูกสภาวะที่ 2 และ 3 ตามลำดับ มีความเหมาะสมสำหรับการกำจัดตะกั่วใกล้เคียงกัน แต่เนื่องจากราคาต้นทุนของถ่านที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่างนั้นต่ำกว่าของถ่านที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรด การทดลองนี้จึงเลือกให้ถ่านกระดูกที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายต่างมีความเหมาะสมในการกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์มากที่สุด ในขณะที่ถ่านกระดูกที่ไม่ถูกกระตุ้น หรือถ่านสภาวะที่ 1 นั้นเหมาะสมสำหรับการกำจัดอาร์เซนิกในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ดีที่สุด

5.1.2 ประสิทธิภาพของถ่านกระดูก

ในการเลือกใช้อ่านกระดูกเป็นสารดูดซับโลหะตะกั่ว และอาร์เซนิกนั้นพบว่า ถ่านกระดูกมีความสามารถในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะถ่านกระดูกที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรดและต่าง ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุดที่พีเอชเท่ากับ 6 คือ 100% ในขณะที่ถ่านกระดูกที่ไม่ถูกกระตุ้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดได้ดี

รองลงมาคือ 94.05% ส่วนถ่านสภาวะที่ 4 แม้จะให้ประสิทธิภาพต่ำที่สุดแต่ก็ยังสามารถในการกำจัดตะกั่วได้ 46.81% ในเวลาสัมผัส 180 นาที แต่สำหรับอาร์เซนิกแล้วพบว่า ถ่านกระดุกไม่มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการกำจัดอาร์เซนิก ออกจากน้ำเสีย เนื่องจากให้ประสิทธิภาพการกำจัดต่ำในถ่านทุกสภาวะ

5.1.3 ผลของพีเอชน้ำเสียเริ่มต้น

จากการศึกษาในช่วงพีเอชน้ำเสียเริ่มต้น 4-7 นั้นพบว่า เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วและอาร์เซนิกจะสูงขึ้นตามค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้น โดยเกิดจากผลของกระบวนการดูดซับร่วมกับการตกตะกอน โดยเฉพาะที่พีเอชสูง ๆ ร้อยละของการตกตะกอนจะสูงขึ้นตาม แต่สำหรับพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ และการทดสอบกับน้ำเสียจริงพบว่าที่พีเอชเท่ากับ 6 มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการเลือกใช้ถ่านกระดุกที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่าง และถ่านที่ไม่ถูกกระตุ้นในการกำจัดตะกั่ว และอาร์เซนิกตามลำดับ เพราะให้ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะสูงที่สุดคือ 100% สำหรับตะกั่วและ 11.46% สำหรับอาร์เซนิก

สำหรับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทดลองดูดซับด้วยถ่านกระดุกสภาวะที่ 3 ที่พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 6 พบว่าการกำจัดเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างตะกั่วอ็อกไซด์กับแคลเซียมในไฮดรอกซีอะพาไตต์เกิดเป็นสารประกอบ $\text{Ca}_3\text{Pb}_2(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ในขณะที่กลไกการกำจัดอาร์เซนิกน่าจะเกิดจากกลไกระหว่างแคลเซียมอ็อกไซด์ทำปฏิกิริยากับ HAsO_4^{2-} เกิดเป็นสารประกอบ $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$

5.1.4 สมการไอโซเทอมการดูดซับ

จากผลการศึกษาสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรูนดลิช และสมการการดูดซับแบบแลงมัวร์ พบว่าการกำจัดตะกั่วด้วยถ่านกระดุกนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยสมการไอโซเทอมการดูดซับทั้ง 2 แบบ เนื่องจากให้ค่า R^2 ใกล้เคียงกันคือ 0.9927 และ 0.9629 ตามลำดับ แต่สำหรับการทดลองกำจัดอาร์เซนิกด้วยถ่านกระดุกนั้นมีความเหมาะสมกับสมการไอโซเทอมแบบฟรูนดลิชมากกว่า โดยให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.9762 และ 0.9074 สำหรับสมการการดูดซับแบบแลงมัวร์

5.1.5 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจริง

ผลการทดลองที่ได้พบว่า ถ่านกระดูกสามารถกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจริงได้ โดยช่วยในกำจัดตะกั่วละลายที่เหลือในน้ำเสียหลังจากการตกตะกอนด้วยสารด่างที่ปรับพีเอชน้ำเสียเท่ากับ 6 ให้อยู่ในค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ ซึ่งปริมาณถ่านกระดูกที่เหมาะสมในการกำจัดคือ 50 มิลลิกรัม/ลิตร ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงถึง 94.33%

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดของถ่านกระดูก ที่เตรียมขึ้นจากการเผาแบบไม่ใช้ออกซิเจน เพื่อดูผลของการดูดซับโลหะหนักด้วยคาร์บอนร่วมกับไฮดรอกซีอะพาไทต์
- 2) ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้สารเคมี หรือวัสดุอื่น ๆ ร่วมกับถ่านกระดูกในการกำจัดอาร์เซนิกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดให้สูงขึ้น
- 3) ศึกษาพัฒนาการนำถ่านกระดูกไปใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียแบบต่อเนื่องต่อไป

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติกองมาตรฐานสิ่งแวดล้อม. 2541. สารหนู. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2543. การจัดการเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม. (ม.ป.ท.).
- จันทร์นา สงวนรุ่งวงศ์. 2539. การกำจัดโลหะหนักโดยใช้จีเอ็มแอลอย. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- คุณฤทัย พงษ์เก่า. 2538. พฤติกรรมมลพิษของไฮดรอกซีอะพาไต์ที่เตรียมจากถ้ำกระดูก วัวควาย. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.
- ฉาณเกษม เจริญผล. 2545. การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับและการลดปริมาณอาร์เซนิกในน้ำ โดยใช้ถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- นันทนา ชูฉัตร. 2543. ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ด้วยตัวกลางเศษคอนกรีต. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มณีรัตน์ องค์กรวัฒนดี. 2542. การกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ โดยใช้โซเดียม โบโรไฮไดรด์. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันทุลเวศม์. 2539. วิศวกรรมประปาเล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รามนรี เนตรวิเชียร. 2543. การกำจัดสารหนูในรูปอาร์เซนิตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้โคโคแซน แบบเม็ด. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ลลิตา นิต์ศนจรกุล. 2544. การกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการดูดติดผิวโดยใช้ ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชา สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศุภกิจ พัฒนเดชะ. 2545. การใช้ถ่านกระดูกกำจัดตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสีย. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศูนย์ข้อมูลคณะกรรมการประสานงานองค์กรพัฒนาเอกชนเพื่อการสาธารณสุขมูลฐาน (คปอศ.).

2535. ตะกั่ว. จุลสารศูนย์ข้อมูลคปอศ. ปีที่ 2 ฉบับที่ 2 (เมษายน-กันยายน): 7-79.

สุจินี คุ้มเสียม. 2544. การกำจัดตะกั่วและปรอทจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มและกะลามะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เสาวภา พลานนท์. 2544. ประสิทธิภาพการดูดซับเหล็ก(II) บนถ่านกระดูกและอลูมินากัมมันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาการสอนเคมี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

อุตสาหกรรม กระทรวง. 2532. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์. กรุงเทพมหานคร.

อุบลรัตน์ วาริชวัฒนะ. 2544. การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้ถ่านกระดูก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

Am, J., Youngwoo, S. and Paul, L. B. 2005. The removal of heavy metals in urban runoff by sorption on mulch. Environmental Pollution. 133(1): 117-127.

Asma, S., Muhammed, I. and Waheed, A. 2005. Removal and recovery of lead (II) from single and multimetal (Cd, Cu, Ni, Zn) solutions by crop milling waste (black gram husk). J. Hazard Mater. 117(1): 65-73.

Azab, M. S. and Peterson, P. J. 1989. The removal of cadmium from water by the use of biological sorbents. Wet. Sci. Tech. 21: 1705-1706.

Babel, S. and Kurniawan, TA. 2003. Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review. J. Hazard Mater. 97(1-3): 219-243.

Cigdem, A., Ridvan, S., Nuray, S., Sema, B., Yuda, Y. and Omer, G. 2000. Heavy metal removal from aquatic systems by northern anatolian smectites. Turk J Chem. 24: 209-215.

Dahbi, S., Azzi, M. and Guardia, M. 1999. Removal of hexavalent chromium from wastewater by bone charcoal. Fresenius J. Anal. Chem. 363(4): 404-407.

Dahbi, S., Azzi, M., Saib, N., Guardia, M., Faure, R. and Durand, R. 2002. Removal of trivalent chromium from tannery waste waters using bone charcoal. Anal Bioanal Chem 374: 540-546.

- Daniel, K., Anna, K. and Cathy, C. Reduction of contaminant mobility at the TNX outfall delta through the use of apatite and zero-valent iron as soil amendments (U). Available from: <http://www.srs.gov/general/pubs/fulltext/tr2002370.pdf> (25/05/2004).
- Ebonex Corporation. Bone Char. Available from: <http://www.ebonex.com/bapp.htm#water> (12/03/2004).
- Faust, S. D. and Aly, O. M. 1987. Adsorption process for water treatment. Butterworth Publishers.
- Fergusson, J. E. 1989. The heavy elements: Chemistry, environment impact and health effect. New York: Pergamon Press.
- Fergusson, J. E. 1990. The heavy elements: Chemistry, environment impact and health effects. Great Britain: BPC Wheatons.
- Gupta, S. K. and Chen. 1978. Arsenic removal by adsorption. J. WPCF, 493-506.
- Hampel, C. A. 1968. The encyclopedia of the chemical element. Van Nostrand Reinhold. New York.
- Irvine, G. D. and Knowles, M. J. 1997. Bone charcoal: a new concept in the treatment of plating effluents. Product Finishing 50(9): 12-13.
- Jonathan, W., Ian, P., and Symon, T. Adsorption of heavy metals by natural charcoal (bone charcoal): its potential as a water treatment cleanup. Available from: <http://triplestore.aktors.org/~sw/3Sbrowser/?resource=http://nlp.shef.ac.uk> (22/04/2004).
- Lackovic, J. A. 2000. Inorganic arsenic removal by zero-valent iron. Environmental Engineering Science 17(1): 29-39.
- Lorenzen, L., Deventer, J. S. J. and Landi, W. M. 1995. Factors affecting the mechanism of the adsorption of arsenic species on activated carbon. Minerals Engineering 8(4/5): 557-569.
- Lower, S. K., Mauric, PA. and Traina, SJ. 1998. Aqueous Pb sorption by hydroxyapatite: applications of atomic force microscopy to dissolution, nucleation, and growth studies. The American Mineralogist 83: 147-158.
- Ma, Q. Y., Traina, S. J. and Logan, T. J. 1993. In situ lead immobilization by apatite. Environ. Sci. Technol. 27: 1803-1810.
- Mehmet, E. and Arzu, O. Lead adsorption from aqueous solution onto siderite. Available from: <http://www.sciencedirect.com> (25/01/2005).
- Myer, D. 1999. Surface, interface and colloids: principal and applications. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons.

- Namasivayam, C. 1998. Removal of arsenic (V) from aqueous solution using industrial solid waste: Adsorption rate and equilibrium studies. Ind. Eng. Chem. Res. 37: 4816-4822.
- Nemerow, N. L. and Dasgupta, A. 1991. Industrial and hazardous waste treatment. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Peternele, W. S., Winkler-Hechenleitner, A. A. and Pineda, E. A. G. 1999. Adsorption of Cd (II) and Pb (II) onto functionalized formic lignin from sugar cane bagasse. Bioresource Technology 68(1): 95-100.
- Phatumvanit, P. and Legros, R. Z. 1997. Characteristics of bone char related to efficiency of fluoride removal from highly fluoridated water. Fluoride 30(4): 207-218.
- Raven, K. P. 1998. Arsenite and arsenate adsorption on ferrihydrite: kinetics, equilibrium, and adsorption envelopes. Environmental Science and Technology 32(3): 344-349.
- READE Company. Lamp Black. Available from: http://www.reade.com/Products/Carbons/lamp_black.html (25 /01/2005).
- Samuel D. F. and Osman M. A. 1987. Adsorption process for water treatment. Bullerworth Publisher.
- The Customs Department. Import-Export Statistics. Available from: <http://www.customers.go.th/Statistic/StatisticIndex.jsp> (3/07/2004).
- Velencia, G. and Gloyna, E. F. 1972. On the synthesis of activated carbon column design data. Technical report EHE-72-11 CRWR 90. Civil of engineering department. The University of Texas at Austin.
- Wasay, S. A., Haron, MD., Uchiumi, A. and Tolkunage, S. 1996. Removal of arsenic and arsenate ions from aqueous solution by basid Yttrium carbonate. Water Research 30(5): 1143-1148.
- Wilson, J. A., Demis, J., Pulford, I. D. and Thomas, S. 2001. Sorption of Cr (III) and Cr (VI) by natural (bone) charcoal. Environmental Geochemistry and Health 23: 291-295.
- World Health Organization. 1977. Environmental Health Criteria 3: Lead. Geneva.
- Xu, YH., Nakajima, T., and Ohki, A. 2002. Adsorption and removal of arsenic (V) from drinking water by aluminum-loaded Shirasu-zeolite. J. Hazard Mater 92(3): 275-287.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ผลการศึกษาสภาวะการเตรียมถ่านกระดูกที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วและอาร์เซนิก
จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยการทดลองแบบแบทช์

ตารางที่ ก-1 ผลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับตะกั่ว ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ 1.0 กรัม/
ลิตร น้ำเสีย ที่พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 5

เวลา (นาที)	ถ่านสถานะที่ 1		ถ่านสถานะที่ 2		ถ่านสถานะที่ 3		ถ่านสถานะที่ 4	
	pH _r	C _r	pH _r	C _r	pH _r	C _r	pH _r	C _r
10	6.13	N.D.	6.04	N.D.	6.11	0.078	5.51	N.D.
20	6.18	N.D.	6.14	N.D.	6.20	N.D.	5.58	N.D.
30	6.22	N.D.	6.17	N.D.	6.20	N.D.	5.66	N.D.
40	6.25	N.D.	6.18	N.D.	6.22	N.D.	5.67	N.D.
50	6.22	N.D.	6.19	N.D.	6.24	N.D.	5.68	N.D.
60	6.33	N.D.	6.21	N.D.	6.25	N.D.	5.69	N.D.
90	6.32	N.D.	6.18	N.D.	6.25	N.D.	5.71	N.D.
120	6.31	N.D.	6.20	N.D.	6.25	N.D.	5.73	N.D.
150	6.33	N.D.	6.25	N.D.	6.29	N.D.	5.76	N.D.
180	6.31	N.D.	6.28	N.D.	6.30	N.D.	5.75	N.D.

เมื่อ

C_r = ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)

pH_r = พีเอชน้ำเสียหลังการทดลอง

ตารางที่ ก-2 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยถ่านกระดูกปริมาณต่าง ๆ ที่พอเหมาะเริ่มต้นเท่ากับ 5 และเวลาสัมผัส 180 นาที

m	ถ่านสถานะที่ 1			ถ่านสถานะที่ 2			ถ่านสถานะที่ 3			ถ่านสถานะที่ 4		
	pH _r	C _r	% removal	pH _r	C _r	% removal	pH _r	C _r	% removal	pH _r	C _r	% removal
5	5.16	2.203	76.93	5.17	5.772	39.57	5.16	3.811	60.10	5.15	8.296	13.14
10	5.19	1.446	84.86	5.19	1.264	86.77	5.18	1.235	87.07	5.18	6.880	27.97
20	5.20	0.372	96.11	5.20	0.203	97.87	5.20	0.282	97.05	5.21	5.240	45.14
50	5.24	0.015	99.84	5.21	0.055	99.41	5.27	0.040	99.57	5.12	0.273	97.05
100	5.47	0.011	99.88	5.44	N.D.	100.00	5.46	0.017	99.82	5.15	0.174	98.12
200	5.77	N.D.	100.00	5.72	0.051	99.51	5.76	N.D.	100.00	5.25	0.078	99.25
500	6.05	N.D.	100.00	5.97	N.D.	100.00	6.00	N.D.	100.00	5.56	0.033	99.68

เมื่อ

m = ปริมาณถ่านกระดูก (มิลลิกรัม/ลิตรน้ำเสีย)

C_r = ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)

pH_r = พีเอชน้ำเสียหลังการทดลอง

% removal = ร้อยละการกำจัด

ตารางที่ ก-3 ประสิทธิภาพการกำจัดและความสามารถในการดูดซับตะกั่ว ด้วยถ่านกระดุกปริมาณ 20 มิลลิกรัม/ลิตรน้ำเสีย โดยใช้เวลาดำย 180 นาที ที่พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นต่างๆ

pH _i	C _b	ถ่านสถานะที่ 1			ถ่านสถานะที่ 2			ถ่านสถานะที่ 3			ถ่านสถานะที่ 4		
		C _r	%removal _p	x/m	C _r	%removal _p	x/m	C _r	%removal _p	x/m	C _r	%removal _p	x/m
4	9.159	1.071	88.31	404.40	1.743	80.97	370.80	1.631	82.19	376.40	3.911	59.75	262.40
5	8.226	0.372	95.48	392.70	0.203	97.53	401.15	0.282	96.57	397.20	5.240	46.07	149.30
6	8.033	0.578	92.80	372.75	N.D.	100.00	401.65	N.D.	100.00	401.65	5.168	46.81	143.25
7	5.557	0.490	91.18	253.35	0.097	98.25	273.00	N.D.	100.00	277.85	N.D.	100.00	277.85

เมื่อ

C_b = ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือโดยไม่เติมถ่านกระดุก (มิลลิกรัม/ลิตร)

C_r = ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)

pH_i = พีเอชน้ำเสียเริ่มต้น

% removal_p = ร้อยละการกำจัดโดยการตกตะกอน

% removal_s = ร้อยละการกำจัดโดยการดูดซับ

% removal_t = ร้อยละการกำจัด โดยการตกตะกอนร่วมกับ การดูดซับ

x/m = ความสามารถในการดูดซับของถ่านกระดุก (มิลลิกรัม Pb/กรัมถ่านกระดุก)

ตารางที่ ก-4 ผลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับอาร์เซนิก ด้วยถ่านกระดูกสถานะต่าง ๆ ปริมาณถ่าน 1.0 กรัม/ลิตรน้ำเสีย ที่พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 5

เวลา (ชั่วโมง)	สถานะถ่าน	pH _r	C _r	%removal	x/m
24	สถานะ 1	6.23	7.333	28.46	2.917
	สถานะ 2	6.15	8.233	19.71	2.020
	สถานะ 3	6.31	7.900	22.93	2.350
	สถานะ 4	5.17	7.783	24.07	2.467
48	สถานะ 1	6.41	6.417	37.40	3.833
	สถานะ 2	6.36	7.683	25.04	2.567
	สถานะ 3	6.25	7.450	27.32	2.800
	สถานะ 4	5.99	7.026	31.45	3.224

เมื่อ

C_r = ความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)

pH_r = พีเอชน้ำเสียหลังการทดลอง

% removal = ร้อยละการกำจัด

x/m = ความสามารถในการดูดซับของถ่านกระดูก (มิลลิกรัม As/กรัมถ่านกระดูก)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-5 ประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิกด้วยถ่านกระดูกสถานะที่ 1 ปริมาณถ่าน 1.0 กรัม/ลิตรน้ำเสีย โดยใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 48 ชั่วโมง ที่พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นต่าง ๆ

pH _i	C _i	pH _f	C _b	C _f	%removal _p	%removal _a	%removal _t	x/m
4	10.65	6.74	10.480	9.410	1.55	10.21	11.60	1.07
5	10.65	6.89	10.435	9.310	1.97	10.78	12.54	1.13
6	10.65	7.00	10.400	9.180	2.30	11.73	13.76	1.22
7	10.65	7.37	10.290	9.250	3.33	10.11	13.10	1.04

เมื่อ

- C_i = ความเข้มข้นของอาร์เซนิกเริ่มต้น (มิลลิกรัม/ลิตร)
 C_b = ความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่เหลือโดยไม่เติมถ่านกระดูก (มิลลิกรัม/ลิตร)
 C_f = ความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)
 pH_i = พีเอชน้ำเสียเริ่มต้น
 pH_f = พีเอชน้ำเสียหลังการทดลอง
 % removal_p = ร้อยละการกำจัดโดยการตกตะกอน
 % removal_a = ร้อยละการกำจัดโดยการดูดซับ
 % removal_t = ร้อยละการกำจัดโดยการตกตะกอนร่วม
 x/m = ความสามารถในการดูดซับของถ่านกระดูก (มิลลิกรัม As/กรัมถ่านกระดูก)

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในการกำจัดตะกั่วและอาร์เซนิก
จากน้ำเสียสังเคราะห์

ตารางที่ ข-1 ผลของเวลาที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับตะกั่ว ด้วยถ่าน
กระดูกสถานะที่ 3 ปริมาณ 5 มิลลิกรัม/ลิตรน้ำเสีย พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 6

เวลา (ชั่วโมง)	pH _f	C _b	C _f	% removal _f	x/m
0.10	6.30	7.649	4.284	55.46	672.9
0.20	6.22	7.649	4.189	56.45	691.9
0.30	6.11	7.649	4.135	57.01	702.7
0.40	6.14	7.649	3.153	67.22	899.1
0.50	6.09	7.649	2.399	75.06	1049.9
1.00	6.16	7.649	2.104	78.13	1108.9
2.00	6.08	7.649	2.610	72.87	1007.7
3.00	6.11	7.649	2.604	72.93	1008.9
4.00	6.02	7.649	2.227	76.85	1084.3
5.00	6.04	7.649	1.760	81.70	1177.7
6.00	6.05	7.649	1.721	82.11	1185.5
8.00	6.01	7.649	1.453	84.89	1239.1
10.00	6.02	7.649	1.274	86.76	1274.9
12.00	6.07	7.649	1.038	89.21	1322.1
18.00	6.01	7.649	1.040	89.19	1321.7
24.00	6.01	7.649	0.667	93.07	1396.3

เมื่อ

- C_b = ความเข้มข้นของตะกั่วหลังปรับพีเอช (มิลลิกรัม/ลิตร)
 C_r = ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)
 pH_r = พีเอชน้ำเสียหลังการทดลอง
 $\% \text{ removal}$ = ร้อยละการกำจัด
 x/m = ความสามารถในการดูดซับของถ่านกระดุก (มิลลิกรัม Pb/กรัม ถ่านกระดุก)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-2 ผลของเวลาที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับตะกั่ว ด้วยถ่าน
กระดูกสภาวะที่ 3 ปริมาณ 7 มิลลิกรัม/ลิตรน้ำเสีย พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 6

เวลา (ชั่วโมง)	pH _f	C _b	C _f	% removal _t	X
0.10	5.95	7.649	4.811	47.18	405.4
0.20	5.98	7.649	2.609	71.35	720.0
0.30	5.96	7.649	2.599	71.46	721.4
0.40	6.01	7.649	2.153	76.36	785.1
0.50	6.03	7.649	1.874	79.42	825.0
1.00	6.04	7.649	1.604	82.39	863.6
2.00	5.99	7.649	2.847	68.74	686.0
3.00	5.98	7.649	0.986	89.17	951.9
4.00	6.1	7.649	0.415	95.44	1033.4
5.00	6.02	7.649	0.702	92.29	992.4
6.00	6.04	7.649	0.446	95.10	1029.0
8.00	5.98	7.649	0.349	96.17	1042.9
10.00	6.04	7.649	0.208	97.72	1063.0
12.00	6.04	7.649	0.100	98.90	1078.4
18.00	6.03	7.649	0.083	99.09	1080.9
24.00	6.04	7.649	0.088	99.03	1080.1

- เมื่อ
- C_b = ความเข้มข้นของตะกั่วหลังปรับพีเอช (มิลลิกรัม/ลิตร)
- C_f = ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)
- pH_f = พีเอชน้ำเสียหลังการทดลอง
- % removal = ร้อยละการกำจัด
- x/m = ความสามารถในการดูดซับของถ่านกระดูก (มิลลิกรัม Pb/กรัม ถ่านกระดูก)

ตารางที่ ข-3 ผลของเวลาที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับตะกั่ว ด้วยถ่าน
 กระจุกสถานะที่ 3 ปริมาณ 10 มิลลิกรัม/ลิตรน้ำเสีย พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 6

เวลา (ชั่วโมง)	pH _f	C _b	C _f	% removal _t	X
0.10	6.30	7.649	2.812	70.81	483.7
0.20	6.22	7.649	1.891	80.37	575.8
0.30	6.03	7.649	1.547	83.94	610.2
0.40	6.11	7.649	0.941	90.23	670.8
0.50	6.09	7.649	1.025	89.36	662.4
1.00	6.06	7.649	0.927	90.38	672.2
2.00	5.98	7.649	1.342	86.07	630.7
3.00	6.07	7.649	0.761	92.10	688.8
4.00	6.15	7.649	0.495	94.86	715.4
5.00	6.23	7.649	0.204	97.88	744.5
6.00	6.17	7.649	0.075	99.22	757.4
8.00	6.15	7.649	0.099	98.97	755.0
10.00	6.16	7.649	0.050	99.48	759.9
12.00	6.12	7.649	0.048	99.50	760.1
18.00	6.12	7.649	0.060	99.38	758.9
24.00	6.02	7.649	0.025	99.74	762.4

เมื่อ

C_b = ความเข้มข้นของตะกั่วหลังปรับพีเอช (มิลลิกรัม/ลิตร)

C_f = ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)

pH_f = พีเอชน้ำเสียหลังการทดลอง

% removal = ร้อยละการกำจัด

x/m = ความสามารถในการดูดซับของถ่านกระจุก (มิลลิกรัม Pb/กรัม
 ถ่านกระจุก)

ตารางที่ ข-4 ผลของเวลาที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับตะกั่ว ด้วยถ่าน
กระดูกสถานะที่ 3 ปริมาณ 20 มิลลิกรัม/ลิตรน้ำเสีย พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 6

เวลา (ชั่วโมง)	pH _t	C _b	C _f	% removal _t	X
0.10	6.57	7.649	0.213	97.79	371.8
0.20	6.10	7.649	0.150	98.44	375.0
0.30	6.16	7.649	0.213	97.79	371.8
0.40	6.26	7.649	0.230	97.61	371.0
0.50	6.31	7.649	0.141	98.54	375.4
1.00	6.16	7.649	0.205	97.87	372.2
2.00	6.31	7.649	0.292	96.97	367.9
3.00	6.00	7.649	0.045	99.53	380.2
4.00	6.22	7.649	0.073	99.24	378.8
5.00	6.28	7.649	0.063	99.35	379.3
6.00	6.15	7.649	0.038	99.61	380.6
8.00	6.12	7.649	0.060	99.38	379.5
10.00	6.24	7.649	0.000	100.00	382.5
12.00	6.26	7.649	0.028	99.71	381.1
18.00	6.36	7.649	0.088	99.09	378.1
24.00	6.03	7.649	0.000	100.00	382.5

เมื่อ

C_b = ความเข้มข้นของตะกั่วหลังปรับพีเอช (มิลลิกรัม/ลิตร)

C_f = ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)

pH_t = พีเอชน้ำเสียหลังการทดลอง

% removal = ร้อยละการกำจัด

x/m = ความสามารถในการดูดซับของถ่านกระดูก (มิลลิกรัม Pb/กรัม
ถ่านกระดูก)

ตารางที่ ข-5 ผลของเวลาที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับตะกั่ว ด้วยถ่าน
 กระจุกสภาวะที่ 3 ปริมาณ 50 มิลลิกรัม/ลิตรน้ำเสีย พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 6

เวลา (ชั่วโมง)	pH _r	C _b	C _r	% removal _t	X
0.10	6.40	7.649	N.D.	100.00	153.0
0.20	6.49	7.649	N.D.	100.00	153.0
0.30	6.49	7.649	N.D.	100.00	153.0
0.40	6.60	7.649	N.D.	100.00	153.0
0.50	6.50	7.649	N.D.	100.00	153.0
1.00	6.63	7.649	N.D.	100.00	153.0
2.00	6.55	7.649	N.D.	100.00	153.0
3.00	6.45	7.649	N.D.	100.00	153.0
4.00	6.41	7.649	N.D.	100.00	153.0
5.00	6.42	7.649	N.D.	100.00	153.0
6.00	6.74	7.649	N.D.	100.00	153.0
8.00	6.53	7.649	N.D.	100.00	153.0
10.00	6.58	7.649	N.D.	100.00	153.0
12.00	6.84	7.649	N.D.	100.00	153.0
18.00	6.80	7.649	N.D.	100.00	153.0
24.00	6.75	7.649	N.D.	100.00	153.0

เมื่อ

C_b = ความเข้มข้นของตะกั่วหลังปรับพีเอช (มิลลิกรัม/ลิตร)

C_r = ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)

pH_r = พีเอชน้ำเสียหลังการทดลอง

% removal = ร้อยละการกำจัด

x/m = ความสามารถในการดูดซับของถ่านกระจุก (มิลลิกรัม Pb/กรัม
 ถ่านกระจุก)

ตารางที่ ข-6 ผลของเวลาที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับตะกั่ว ด้วยถ่าน
กระดูกสถานะที่ 3 ปริมาณ 100 มิลลิกรัม/ลิตรน้ำเสีย พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 6

เวลา (ชั่วโมง)	pH _f	C _b	C _f	% removal _t	X
0.10	6.61	7.649	N.D.	100.00	76.5
0.20	6.67	7.649	N.D.	100.00	76.5
0.30	6.65	7.649	N.D.	100.00	76.5
0.40	6.68	7.649	N.D.	100.00	76.5
0.50	6.68	7.649	N.D.	100.00	76.5
1.00	6.71	7.649	N.D.	100.00	76.5
2.00	6.76	7.649	N.D.	100.00	76.5
3.00	6.75	7.649	N.D.	100.00	76.5
4.00	6.71	7.649	N.D.	100.00	76.5
5.00	6.73	7.649	N.D.	100.00	76.5
6.00	6.78	7.649	N.D.	100.00	76.5
8.00	6.78	7.649	N.D.	100.00	76.5
10.00	6.74	7.649	N.D.	100.00	76.5
12.00	6.88	7.649	N.D.	100.00	76.5
18.00	6.93	7.649	N.D.	100.00	76.5
24.00	6.99	7.649	N.D.	100.00	76.5

เมื่อ

C_b = ความเข้มข้นของตะกั่วหลังปรับพีเอช (มิลลิกรัม/ลิตร)

C_f = ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)

pH_f = พีเอชน้ำเสียหลังการทดลอง

% removal = ร้อยละการกำจัด

x/m = ความสามารถในการดูดซับของถ่านกระดูก (มิลลิกรัม Pb/กรัม
ถ่านกระดูก)

ตารางที่ ข-7 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับตะกั่ว ด้วยถ่านกระดูกสถานะที่ 3 ปริมาณต่าง ๆ จากน้ำเสียสังเคราะห์ พีเอช 6 ที่สภาวะสมดุล

C_0	C_e	x	m	X	$\text{Log } C_e$	$\text{Log } X$	$1/X$	$1/C_e$	T_e
7.649	1.921	5.728	0.005	1145.500	0.284	3.059	0.001	0.521	24
7.649	1.167	6.482	0.007	926.000	0.067	2.967	0.001	0.857	12
7.649	0.682	6.967	0.01	696.700	-0.166	2.843	0.001	1.466	8
7.649	0.116	7.533	0.02	376.650	-0.936	2.576	0.003	8.621	6
7.649	-	-	0.05	-	-	-	-	-	-
7.649	-	-	0.10	-	-	-	-	-	-

เมื่อ

- C_0 = ความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้น (มิลลิกรัม/ลิตร)
 C_e = ความเข้มข้นของตะกั่วที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)
 x = ความเข้มข้นของตะกั่วที่ถูกกำจัด (มิลลิกรัม/ลิตร)
 m = ปริมาณถ่านกระดูก (กรัม/ลิตรน้ำเสีย)
 X = ความสามารถในการดูดซับของถ่านกระดูก (มิลลิกรัม Pb/กรัมถ่านกระดูก)
 T_e = เวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุล (ชั่วโมง)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-8 ผลของเวลาที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับอาร์เซนิกด้วยถ่าน
กระดูกสถานะที่ 1 ปริมาณ 0.5 กรัม/ลิตรน้ำเสีย พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 6

เวลา (ชั่วโมง)	pH _f	C _b	C _r	% removal	x/m
1.00	7.0	10.230	9.819	7.72	0.822
3.00	7.0	10.230	9.732	8.53	0.996
6.00	7.0	10.230	9.627	9.52	1.206
12.00	7.0	10.230	9.588	9.89	1.284
24.00	7.0	10.230	9.819	7.72	0.822
48.00	7.0	10.230	9.696	8.87	1.068
72.00	7.47	10.230	9.379	11.85	1.702

เมื่อ

- C_b = ความเข้มข้นของอาร์เซนิกหลังปรับพีเอช (มิลลิกรัม/ลิตร)
 C_r = ความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)
 pH_f = พีเอชน้ำเสียหลังการทดลอง
 % removal = ร้อยละการกำจัด
 x/m = ความสามารถในการดูดซับของถ่านกระดูก (มิลลิกรัม As/กรัม ถ่านกระดูก)

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-9 ผลของเวลาที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับอาร์เซนิกด้วยถ่าน
 กระจุกสถานะที่ 1 ปริมาณ 1.0 กรัม/ลิตรน้ำเสีย พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 6

เวลา (ชั่วโมง)	pH _r	C _b	C _r	% removal	x/m
1.00	7.15	10.230	9.337	12.25	0.893
3.00	7.33	10.230	9.169	13.83	1.061
6.00	7.14	10.230	9.269	12.89	0.961
12.00	7.36	10.230	9.272	12.86	0.958
24.00	7.55	10.230	9.116	14.32	1.114
48.00	7.38	10.230	9.059	14.86	1.171
72.00	7.20	10.230	9.245	13.11	0.985

เมื่อ

- C_b = ความเข้มข้นของอาร์เซนิกหลังปรับพีเอช (มิลลิกรัม/ลิตร)
 C_r = ความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)
 pH_r = พีเอชน้ำเสียหลังการทดลอง
 % removal = ร้อยละการกำจัด
 x/m = ความสามารถในการดูดซับของถ่านกระจุก (มิลลิกรัม As/กรัม
 ถ่านกระจุก)

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-10 ผลของเวลาที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับอาร์เซนิก ด้วยถ่านกระดูกสถานะที่ 1 ปริมาณ 3.0 กรัม/ลิตรน้ำเสีย พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 6

เวลา (ชั่วโมง)	pH _r	C ₀	C _r	% removal	x/m
1.00	7.57	10.230	8.456	20.53	0.591
3.00	7.44	10.230	8.134	23.55	0.699
6.00	7.70	10.230	7.201	32.32	1.010
12.00	7.74	10.230	7.165	32.66	1.022
24.00	7.68	10.230	7.237	31.98	0.998
48.00	7.65	10.230	7.130	32.99	1.033
72.00	7.44	10.230	7.237	31.98	0.998

เมื่อ

C₀ = ความเข้มข้นของอาร์เซนิกหลังปรับพีเอช (มิลลิกรัม/ลิตร)

C_r = ความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)

pH_r = พีเอชน้ำเสียหลังการทดลอง

% removal = ร้อยละการกำจัด

x/m = ความสามารถในการดูดซับของถ่านกระดูก (มิลลิกรัม As/กรัม ถ่านกระดูก)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-11 ผลของเวลาที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับอาร์เซนิก ด้วยถ่าน
 กระจุกสถานะที่ 1 ปริมาณ 5.0 กรัม/ลิตรน้ำเสีย พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 6

เวลา (ชั่วโมง)	pH _r	C _b	C _r	% removal	x/m
1.00	7.70	10.230	6.452	39.36	0.756
3.00	7.61	10.230	6.254	41.22	0.795
6.00	7.88	10.230	6.241	41.34	0.798
12.00	7.88	10.230	6.037	43.26	0.839
24.00	7.94	10.230	5.915	44.41	0.863
48.00	7.85	10.230	5.863	44.90	0.873
72.00	7.51	10.230	5.884	44.70	0.869

เมื่อ

- C_b = ความเข้มข้นของอาร์เซนิกหลังปรับพีเอช (มิลลิกรัม/ลิตร)
 C_r = ความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)
 pH_r = พีเอชน้ำเสียหลังการทดลอง
 % removal = ร้อยละการกำจัด
 x/m = ความสามารถในการดูดซับของถ่านกระจุก (มิลลิกรัม As/กรัม
 ถ่านกระจุก)

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-12 ผลของเวลาที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับอาร์เซนิก ด้วยถ่าน
 กระจุกสถานะที่ 1 ปริมาณ 10 กรัม/ลิตรน้ำเสีย พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 6

เวลา (ชั่วโมง)	pH _r	C _b	C _r	% removal	x/m
1.00	7.72	10.230	5.810	49.66	0.442
3.00	7.55	10.230	5.538	52.01	0.469
6.00	7.60	10.230	5.504	52.31	0.473
12.00	7.56	10.230	5.371	53.46	0.486
24.00	7.72	10.230	5.236	54.63	0.499
48.00	7.83	10.230	5.235	54.64	0.500
72.00	7.70	10.230	5.233	54.65	0.500

เมื่อ

- C_b = ความเข้มข้นของอาร์เซนิกหลังปรับพีเอช (มิลลิกรัม/ลิตร)
 C_r = ความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)
 pH_r = พีเอชน้ำเสียหลังการทดลอง
 % removal = ร้อยละการกำจัด
 x/m = ความสามารถในการดูดซับของถ่านกระจุก (มิลลิกรัม As/กรัม
 ถ่านกระจุก)

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-13 ผลของเวลาที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับอาร์เซนิกด้วย ถ่านกระดูกสถานะที่ 1 ปริมาณ 30 กรัม/ลิตรน้ำเสีย พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 6

เวลา (ชั่วโมง)	pH _f	C _b	C _f	% removal	x/m
1.00	8.30	9.963	3.733	67.65	0.208
3.00	8.31	9.963	3.702	67.92	0.209
6.00	8.43	9.963	3.512	69.57	0.215
12.00	8.26	9.963	3.292	71.47	0.222
24.00	8.30	9.963	3.280	71.58	0.223
48.00	7.99	9.963	3.221	72.09	0.225
72.00	7.74	9.963	3.215	72.14	0.225

เมื่อ

- C_b = ความเข้มข้นของอาร์เซนิกหลังปรับพีเอช (มิลลิกรัม/ลิตร)
 C_f = ความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)
 pH_f = พีเอชน้ำเสียหลังการทดลอง
 % removal = ร้อยละการกำจัด
 x/m = ความสามารถในการดูดซับของถ่านกระดูก (มิลลิกรัม As/กรัม ถ่านกระดูก)

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-14 ผลของเวลาที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับอาร์เซนิกด้วยถ่าน
กระดูกสภาวะที่ 1 ปริมาณ 50 กรัม/ลิตรน้ำเสีย พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 6

เวลา (ชั่วโมง)	pH _r	C ₀	C _r	% removal	x/m
1.00	8.38	9.963	2.497	76.67	0.149
3.00	8.40	9.963	2.478	76.85	0.150
6.00	8.40	9.963	2.474	76.89	0.150
12.00	8.39	9.963	2.474	76.89	0.150
24.00	8.29	9.963	2.472	76.90	0.150
48.00	8.04	9.963	2.473	76.90	0.150
72.00	8.23	9.963	2.470	76.92	0.150

เมื่อ

C₀ = ความเข้มข้นของอาร์เซนิกหลังปรับพีเอช (มิลลิกรัม/ลิตร)

C_r = ความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)

pH_r = พีเอชน้ำเสียหลังการทดลอง

% removal = ร้อยละการกำจัด

x/m = ความสามารถในการดูดซับของถ่านกระดูก (มิลลิกรัม As/กรัม
ถ่านกระดูก)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-15 ผลของเวลาที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับอาร์เซนิกด้วยถ่าน
กระดูกสถานะที่ 1 ปริมาณ 100 กรัม/ลิตรน้ำเสีย พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 6

เวลา (ชั่วโมง)	pH _r	C _b	C _r	% removal	x/m
1.00	8.56	9.963	2.128	80.12	0.078
3.00	8.46	9.963	2.129	80.11	0.078
6.00	8.46	9.963	2.131	80.09	0.078
12.00	8.50	9.963	2.129	80.11	0.078
24.00	8.39	9.963	2.130	80.10	0.078
48.00	8.41	9.963	2.128	80.12	0.078
72.00	8.50	9.963	2.126	80.14	0.078

เมื่อ

- C_b = ความเข้มข้นของอาร์เซนิกหลังปรับพีเอช (มิลลิกรัม/ลิตร)
 C_r = ความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)
 pH_r = พีเอชน้ำเสียหลังการทดลอง
 % removal = ร้อยละการกำจัด
 x/m = ความสามารถในการดูดซับของถ่านกระดูก (มิลลิกรัม As/กรัม ถ่านกระดูก)

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-16 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับอาร์เซนิก ด้วยถ่านกระดุกสถานะที่ 1 ปริมาณต่าง ๆ จากน้ำเสียสังเคราะห์ พีเอช 6 ที่สภาวะสมดุล

C_0	C_e	x	m	X	$\text{Log } C_e$	$\text{Log } X$	$1/X$	$1/C_e$	T_e
10.230	-	-	0.5	-	-	-	-	-	-
10.230	-	-	1.0	-	-	-	-	-	-
10.230	7.237	2.993	3.0	0.998	0.860	-0.001	1.002	0.138	72
10.230	5.863	4.367	5.0	0.873	0.768	-0.059	1.145	0.171	48
10.230	5.236	4.994	10.0	0.499	0.719	-0.302	2.002	0.191	24
9.963	3.292	6.671	30.0	0.222	0.517	-0.653	4.497	0.304	12
9.963	2.478	7.485	50.0	0.150	0.394	-0.825	6.680	0.404	3
9.963	2.128	7.835	100.0	0.078	0.328	-1.106	12.763	0.470	1

เมื่อ

- C_0 = ความเข้มข้นของอาร์เซนิกเริ่มต้น (มิลลิกรัม/ลิตร)
 C_e = ความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)
 x = ความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่ถูกกำจัด (มิลลิกรัม/ลิตร)
 m = ปริมาณถ่านกระดุก (กรัม/ลิตรน้ำเสีย)
 X = ความสามารถในการดูดซับของถ่านกระดุก (มิลลิกรัม As/กรัมถ่านกระดุก)
 T_e = เวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุล (ชั่วโมง)

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

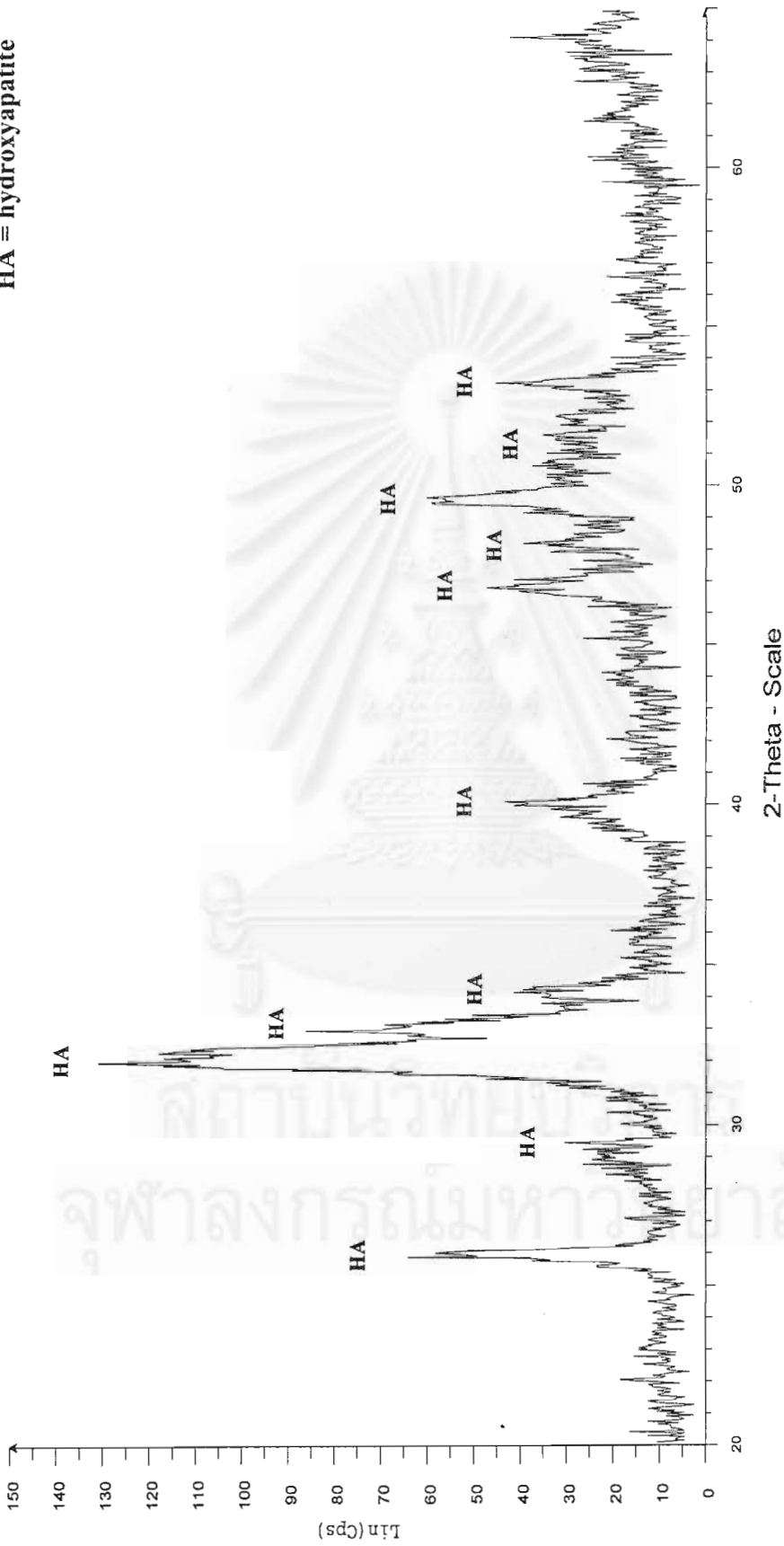
ภาคผนวก ค

ผลการศึกษาคู่ประกอบของถ่านกระดูกก่อนและหลังการทดลอง
โดยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

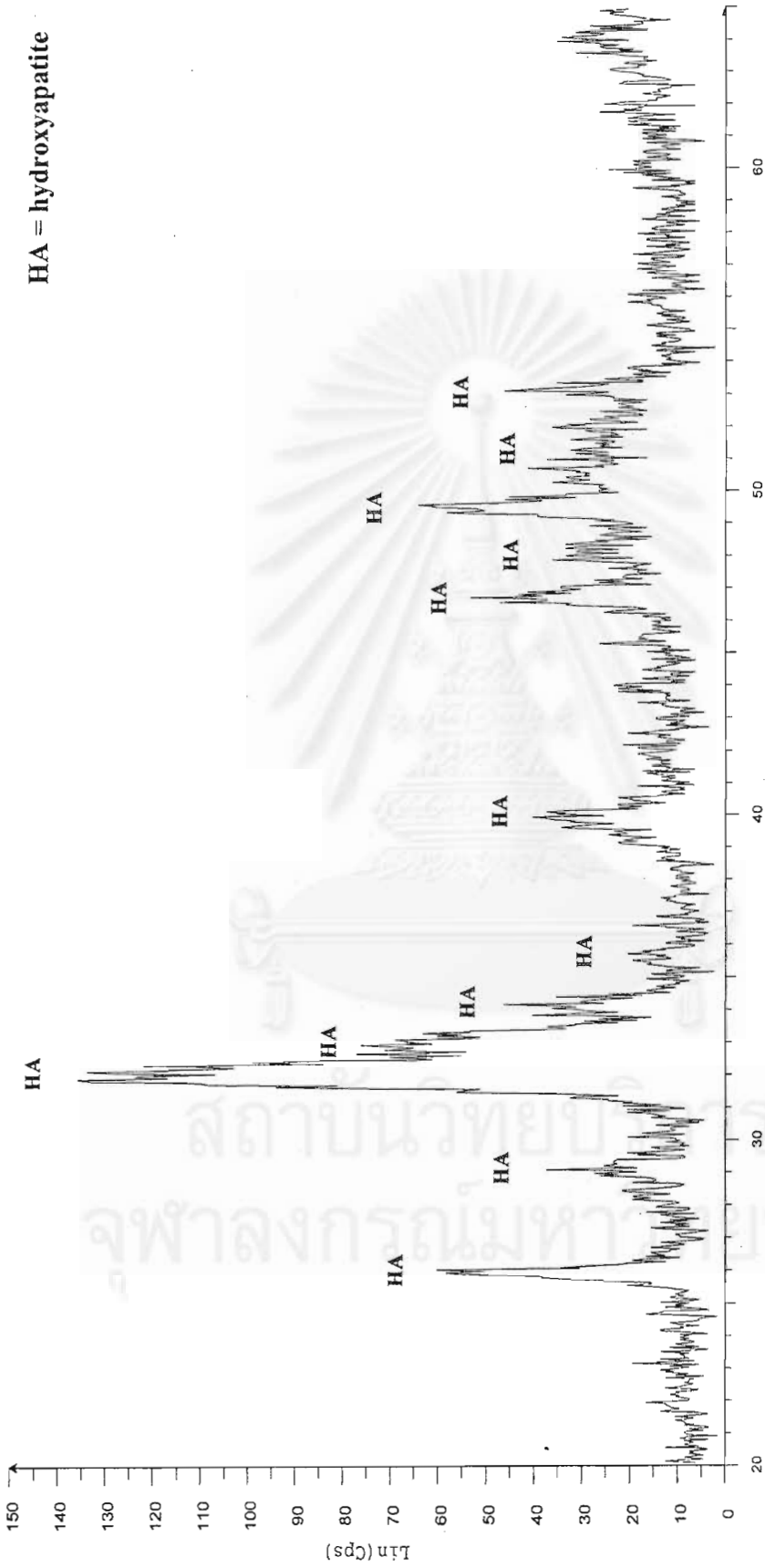
HA = hydroxyapatite



\\d:\vrd\STATE 1-1-1.RAW - File: STATE 1-1-1.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 20.000 ° - End: 65.000 ° - Step: 0.040 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started:

รูปที่ ๓-1 ผลการวิเคราะห์สารประกอบอะพาไทต์ของถ่านกระดุกสถานะที่ 1 (ก่อนการทดลอง) เมื่อ HA คือ ไฮดรอกซีอะพาไทต์

HA = hydroxyapatite

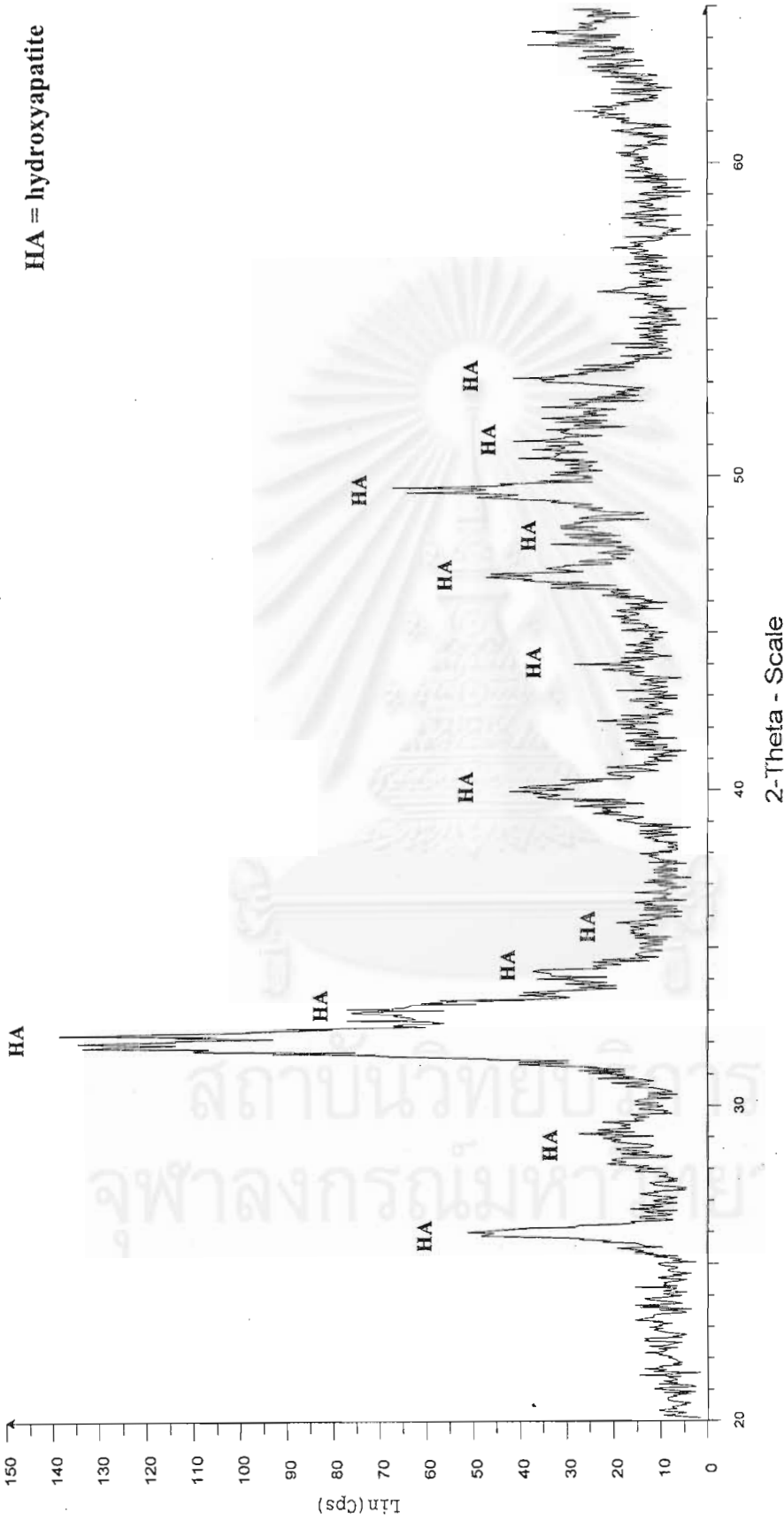


2-Theta - Scale

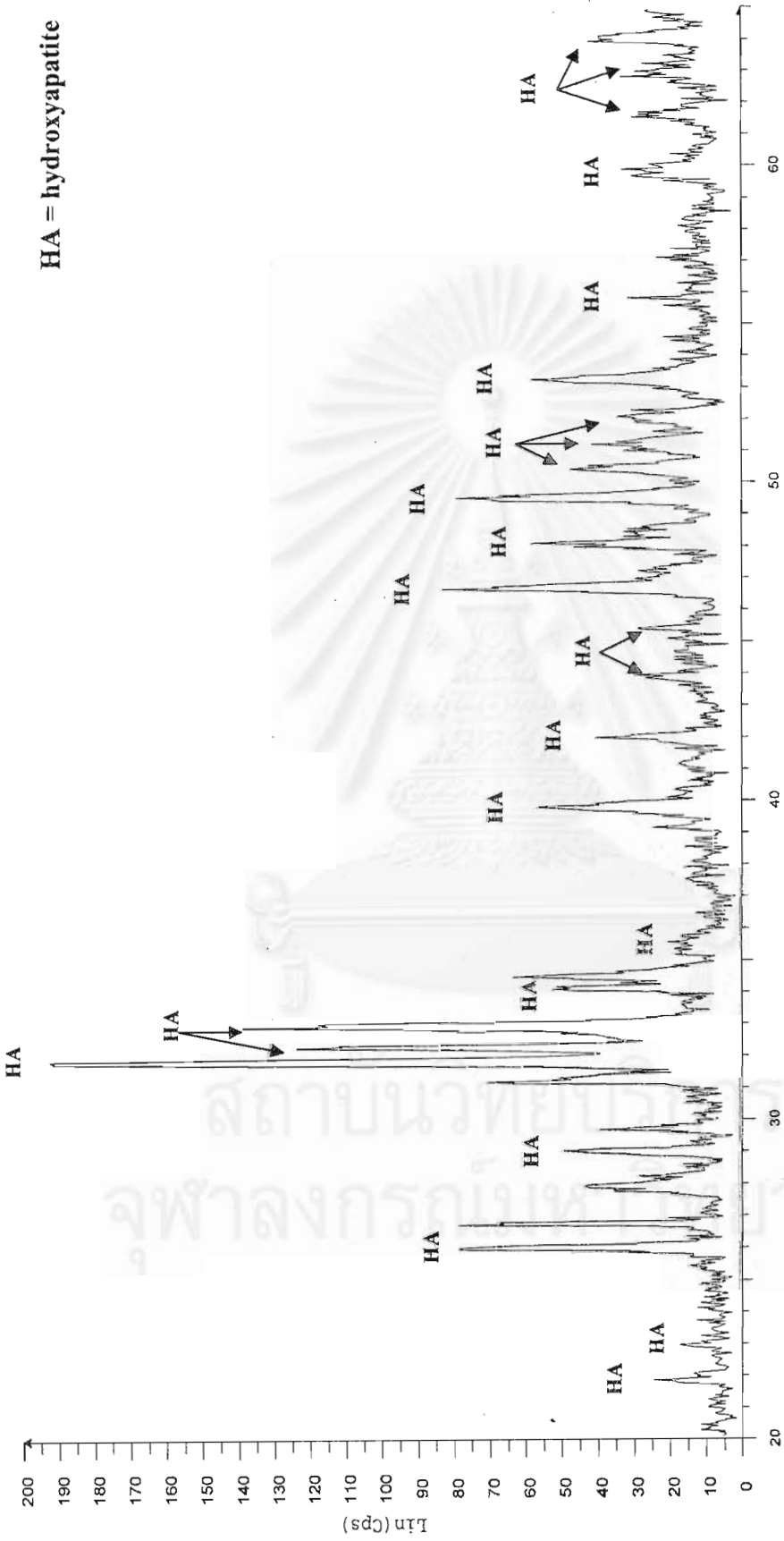
HA\vdHNO3-1.RAW - File: Hno3-1.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 20.000 ° - End: 65.000 ° - Step: 0.040 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Th

รูปที่ ก-2 ผลการวิเคราะห์สารประกอบอะพาไทต์ของผ่านกระดูกภาวะที่ 2 (ก่อนการทดลอง) เมื่อ HA คือ ไฮดรอกซีอะพาไทต์

HA = hydroxyapatite



HA = hydroxyapatite

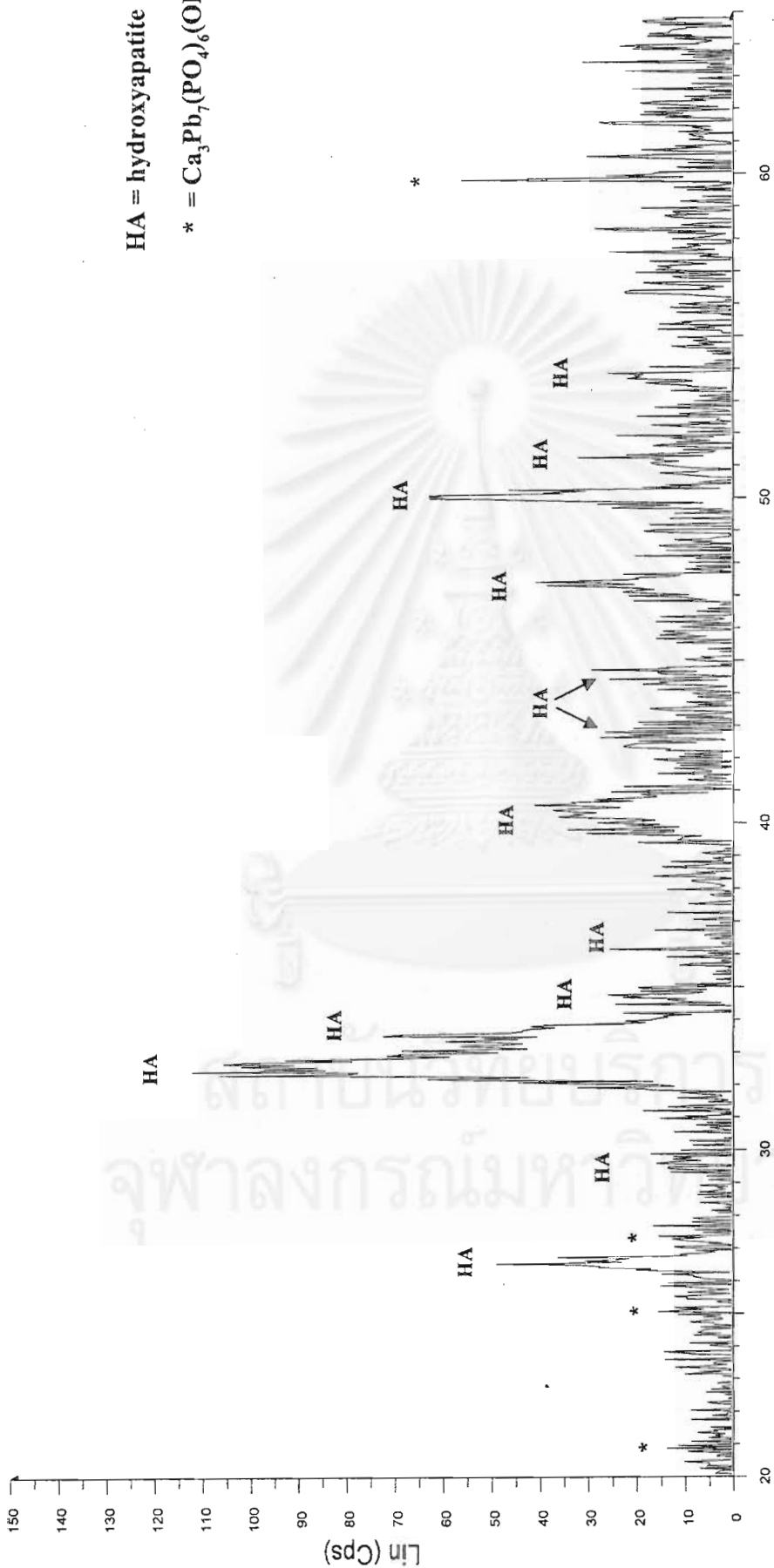


2-Theta - Scale

HA\d:\rd\activate1.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 20.000 ° - End: 65.000 ° - Step: 0.040 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2

รูปที่ ก-4 ผลการวิเคราะห์สสารประกอบอะพาไทต์ของถ่านกระดุกสถานะที่ 4 (ก่อนการทดลอง) เมื่อ HA คือ ไฮดรอกซีอะพาไทต์

HA = hydroxyapatite

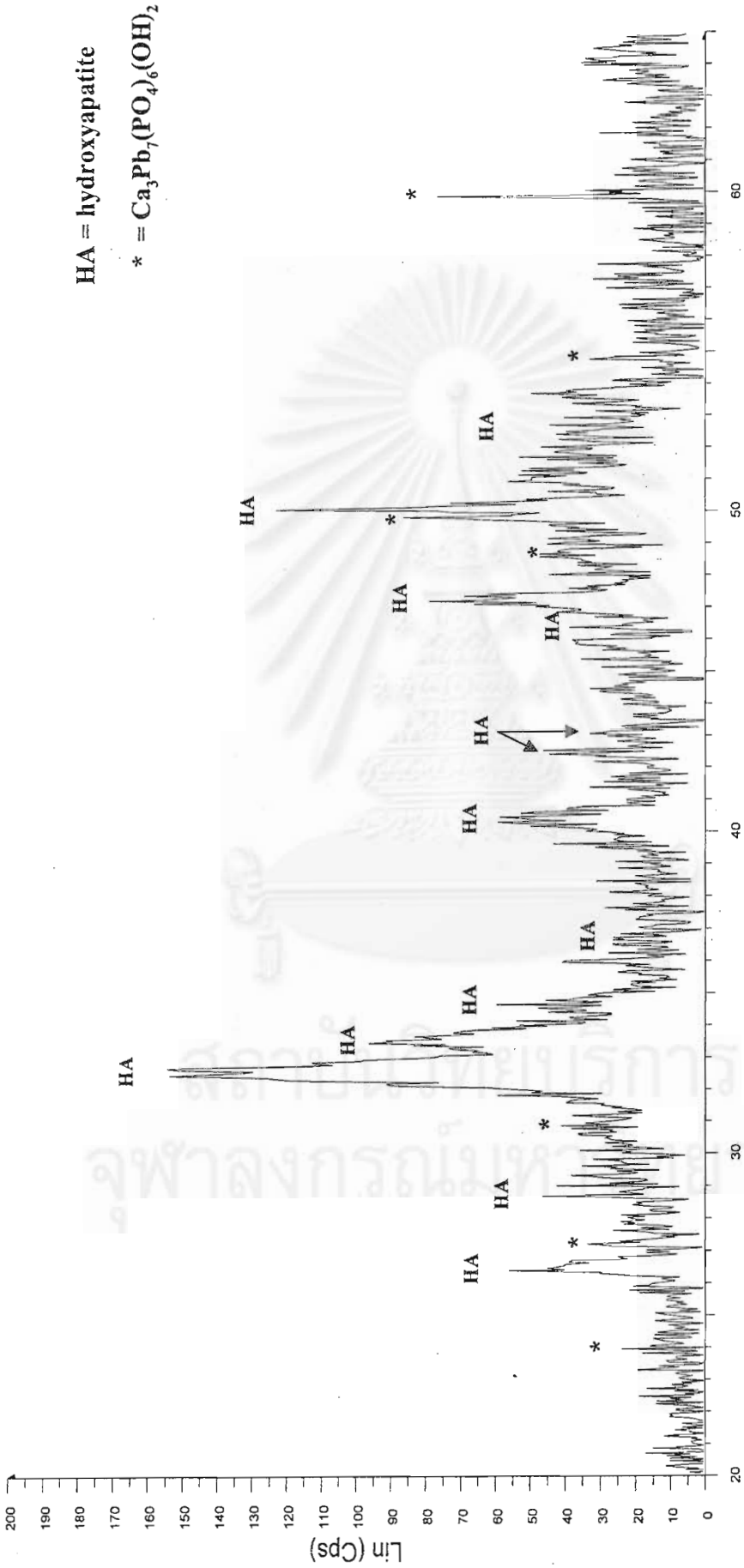


2-Theta - Scale

d:\xrd\ph4.RAW - File: ph4.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 20.000 ° - End: 65.000 ° - Step: 0.040 ° - s - 2-Theta: 20.000 ° - Phi: Operations: Background 1.000,1.000 | Import

รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์สารประกอบอะพาไทต์ของถ่านกระดูกสภาวะที่ 3 ที่เขื่อนน้ำเสียวท่ากับ 4 (หลังการทดลอง) เมื่อ HA คือ ไฮดรอกซีอะพาไทต์ และ * คือแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์

ฟอสเฟตไฮดรอกไซด์



HA = hydroxyapatite



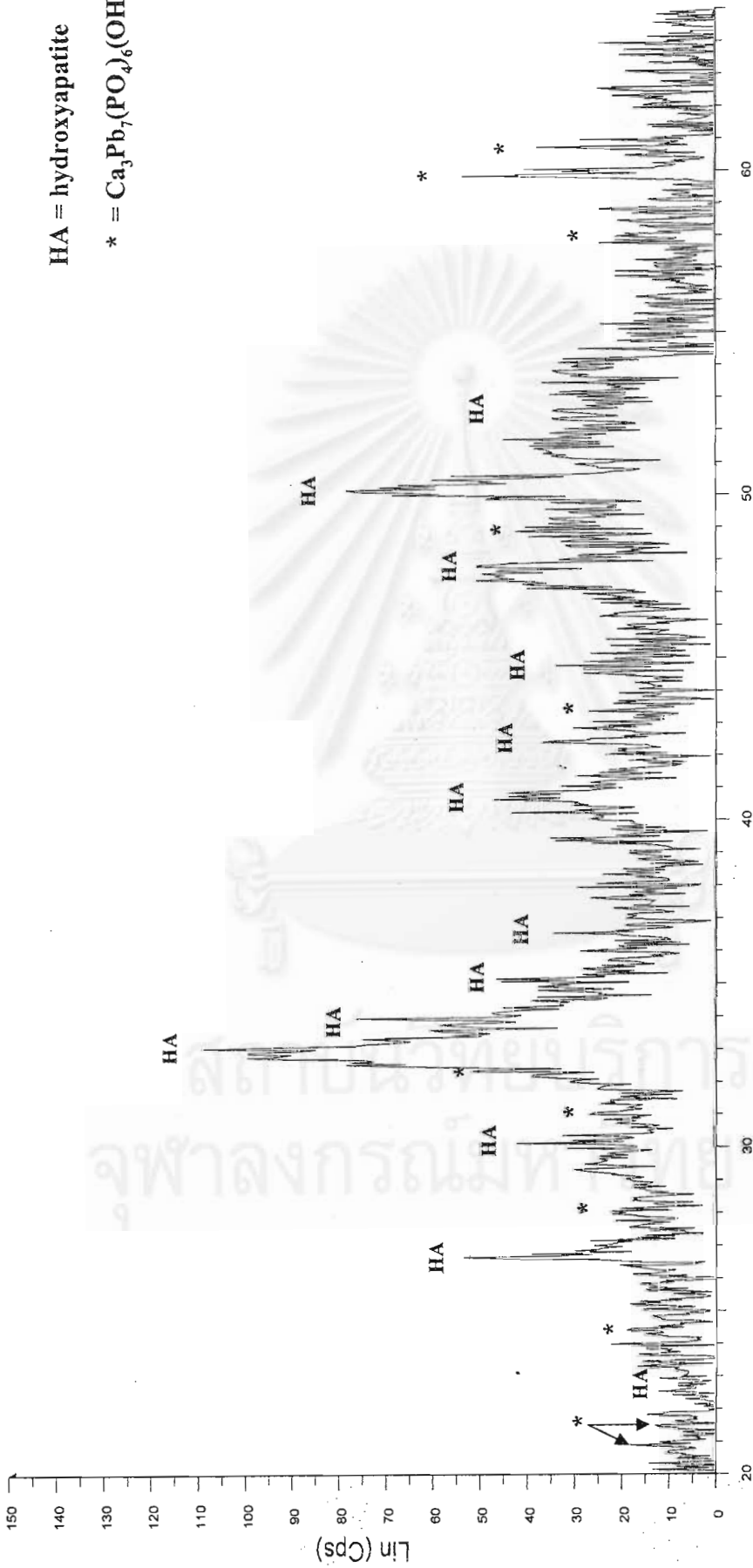
2-Theta - Scale

EXD:\rd\pH5.RAW - File: pH5.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 20.000 ° - End: 65.000 ° - Step: 0.040 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 20.000 ° - Phi: Operations: Background 0.000, 1.000 | Import

รูปที่ ๓-๖ ผลการวิเคราะห์สารประกอบอะพาไทต์ของแผ่นกระดูกภาวะที่ 3 ที่เอชพีเอชเท่ากับ 5 (หลังการทดลอง) เมื่อ HA คือ ไฮดรอกซีอะพาไทต์ และ * คือแคลเซียมฟอสเฟตไฮดรอกไซด์

ฟอสเฟตไฮดรอกไซด์

HA = hydroxyapatite



2-Theta - Scale

File: ph6.RAW - Type: 2ThTh locked - Start: 20.000 ° - End: 65.000 ° - Step: 0.040 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 20.000 ° - Phi: Operations: Background 0.000, 1.000 | Import

รูปที่ ๓-7 ผลการวิเคราะห์สารประกอบอะพาไทต์ของถ่านกระดุกสภาวะที่ 3 พิสูจน์แล้วเกี่ยวกับ 6 (หลังการทดลอง) เมื่อ HA คือ ไฮดรอกซีอะพาไทต์ และ * คือแคลเซียมดีด

ฟอสเฟต ไฮดรอกซีไซด์

ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์

วิธีการทดสอบความสามารถในการดูดซับไอโอดีนนี้ ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D 4607-94 ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารดูดซับหรือถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดสอบความสามารถในการดูดซับไอโอดีนในหน่วยมิลลิกรัมต่อถ่าน 1 กรัม โดยมีรายละเอียดในการทดลองดังนี้

การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเจือจาง (5% โดยน้ำหนัก)

ทำการตวงกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นจำนวน 70 มิลลิลิตร ผสมในน้ำกลั่นปริมาตร 550 มิลลิลิตร

2. สารละลายโซเดียมโซโอซัลเฟต (0.100 นอร์มัล)

เตรียมโซเดียมโซโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) น้ำหนัก 24.820 กรัม ละลายในน้ำต้มเดือดปริมาตร 75 ± 25 มิลลิลิตร จากนั้นเติมโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ปริมาณ 0.10 ± 0.01 กรัม ผสมลงไป (เพื่อลดการย่อยสลายของแบคทีเรีย) ปรับปริมาตรสารละลายที่ได้ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร เก็บสารละลายที่ได้ในขวดสีชา และสามารถใช้ได้ภายใน 4 วัน

3. สารละลายไอโอดีน (0.100 นอร์มัล)

ผสมเกล็ดไอโอดีนปริมาณ 12.700 กรัม กับโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) ปริมาณ 19.100 กรัม ในบีกเกอร์ด้วยน้ำกลั่นประมาณ 50-60 มิลลิลิตร จากนั้นตั้งสารละลายทิ้งไว้อย่างน้อย 4 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่าไม่เกิดผลึกไอโอดีนขึ้นอีก ปรับปริมาตรสารละลายที่ได้ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร และเก็บสารละลายที่ได้ในขวดสีชา

4. สารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต (0.100 นอร์มัล)

อบโพแทสเซียมไอโอเดต (KIO_3) ประมาณ 4 กรัม หรือมากกว่า ที่อุณหภูมิ $110 \pm 5^\circ\text{C}$ นาน 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในตู้ดูดความชื้น จากนั้นชั่ง KIO_3 มา 3.5667 กรัม ละลายในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรสารละลายที่ได้ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร

5. น้ำแป้ง

เตรียมแป้งหนัก 1.0 ± 0.5 กรัม ในน้ำปริมาตรประมาณ 40 มิลลิลิตร เติมน้ำแป้งที่มีลักษณะคล้ายแป้งเปียกที่ได้ผสมในน้ำต้มเดือดให้มีปริมาตรรวม 1000 มิลลิลิตร ต่อก่ออีกประมาณ 4-5 นาที น้ำแป้งที่เตรียมได้สามารถใช้ภายในวันที่เตรียมเท่านั้น

วิธีการเทียบมาตรฐานสารละลาย

1. การเทียบมาตรฐานสารละลายโซเดียมโซโอซัลเฟต

ปิเปตสารละลาย KIO_3 25 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ (erlenmeyer flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร ผสม KI ลงไป 2.00 ± 0.01 กรัม เขย่าให้ผลึก KI ละลาย จากนั้นเติมกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้นปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงไป ทำการไตเตรตด้วยสารละลายโซเดียมโซโอซัลเฟตจนกระทั่งได้สารละลาย สีเหลืองอ่อน หยคน้ำแป้งลงไปแล้วไตเตรตต่อจนได้สารละลายใสไม่มีสี

ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโซโอซัลเฟตคำนวณได้จาก

$$N_1 = (P \times R)/S$$

เมื่อ N_1 = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโซโอซัลเฟต (นอร์มัล)

P = ปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต (มิลลิลิตร)

R = ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต (นอร์มัล)

S = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมโซโอซัลเฟตที่ใช้ในการไตเตรต (มิลลิลิตร)

2. การเทียบมาตรฐานสารละลายไอโอดีน

ปิเปตสารละลายไอโอดีน 25 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ทำการไตเตรตกับสารละลายโซเดียมโซโอซัลเฟตจนกระทั่งได้สารละลายสีเหลืองอ่อน หยคน้ำแป้งลงไปแล้วไตเตรตต่อจนได้สารละลายใสไม่มีสี

ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนคำนวณได้จาก

$$N_2 = (S \times N_1)/I$$

- เมื่อ N_1 = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (นอร์มัล)
 N_2 = ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (นอร์มัล)
 S = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไตเตรต (มิลลิลิตร)
 I = ปริมาตรไอโอดีน (มิลลิลิตร)

วิธีการทดลอง

1. บดและคัดขนาดตัวอย่างถ่านกัมมันต์ให้มีขนาดละเอียดน้อยกว่า 250 ไมโครเมตร
2. อบตัวอย่างให้แห้งที่อุณหภูมิ 110-120 °C นาน 2 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในตู้ดูดความชื้น
3. ชั่งตัวอย่าง และจดบันทึกน้ำหนักตัวอย่างเท่ากับ M ด้วยเครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง ในขวดรูปชมพู่ โดยน้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ต้องทำให้ความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายไอโอดีน (C) มีค่าน้อยกว่า เท่ากับ และมากกว่า 0.02 นอร์มัล (กำหนดให้ $C = 0.01, 0.02$ และ 0.03 นอร์มัล) ซึ่งสามารถดูน้ำหนักโดยประมาณของตัวอย่างได้จากตารางที่ ง-1
4. ปิเปตสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเจือจางปริมาตร 10 มิลลิลิตร เติมน้ำในถ่านที่ชั่งไว้ และนำไปต้มให้เดือดประมาณ 10 วินาที แกว่งเบา ๆ ให้ผงถ่านทุกส่วนชุ่มด้วยสารละลายกรด เพื่อเป็นการกำจัดเถ้าหรือซัลเฟอร์ออกจากผิวของถ่านกัมมันต์
5. ปิเปตสารละลายไอโอดีน 100 มิลลิลิตร เติมน้ำลงไป แล้วนำไปเขย่าอย่างแรงเป็นเวลา 30 วินาที
6. นำตัวอย่างไปกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 ทิ้งสารละลายที่กรองได้ ปริมาตร 20 มิลลิลิตรแรก
7. ปิเปตตัวอย่างสารละลายที่เหลือจากการกรองปริมาตร 50 มิลลิลิตร
8. ไตเตรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จนกระทั่งได้สารละลายสีเหลืองอ่อน หยคน้ำแป้งลงไปแล้วไตเตรตต่อจนได้สารละลายใสไม่มีสี

ค่าความสามารถในการดูดซับไอโอดีน หรือค่าการดูดซับจำเพาะ (x/m) และความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายไอโอดีน สามารถคำนวณได้จาก

$$x/m = [A - (2.2 \times B \times S)]/M$$

$$C = (N_1 \times S)/50$$

เมื่อ x/m = ความสามารถในการดูดซับไอโอดีนต่อกรัมถ่านกัมมันต์ที่ใช้ดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม ถ่านกัมมันต์)

$A = N_2 \times 12693.0$

$B = N_1 \times 126.93$

S = ปริมาตรของสารละลายโซเดียม ไฮโอซัลเฟตที่ใช้ในการไตเตรต (มิลลิลิตร)

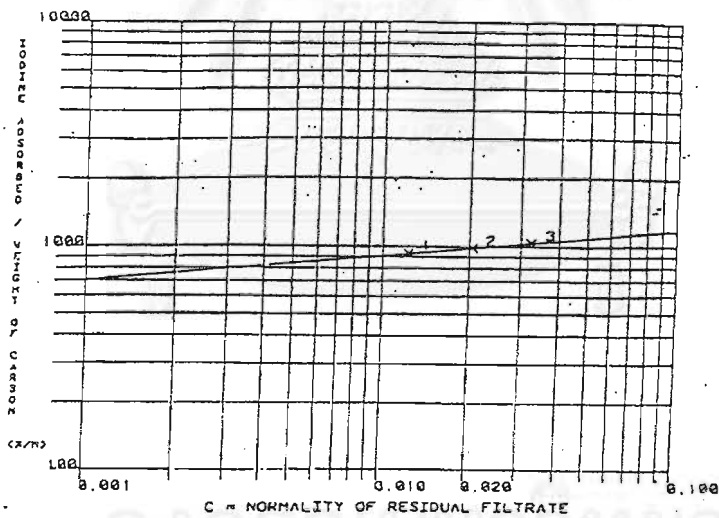
M = น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ (กรัม)

C = ความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายไอโอดีน (นอร์มัล)

N_1 = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียม ไฮโอซัลเฟต (นอร์มัล)

9. สร้างกราฟไอโซเทอมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\text{Log } (x/m)$ กับค่า $\text{Log } C$ ที่ C เท่ากับ 0.01, 0.02 และ 0.03 นอร์มัล จะได้กราฟเส้นตรง ดังรูปที่ ง-1 จากกราฟทำให้สามารถหาค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine number: IA) จากสมการเส้นตรง (Y) ได้ดังนี้

$IA = 10^Y$ (มิลลิกรัม/กรัม)



LAB NO. 4 OCT '83-3
 TDB NO. 604 PAGE 22
 TECH. PRP

POINT 1	
X/M	- 932
C	- 0.012
POINT 2	
X/M	- 964
C	- 0.020
POINT 3	
X/M	- 1040
C	- 0.032
IODINE NO.	- 964
SLOPE	- 0.111
CORR. COEF.	- 0.999

รูปที่ ง-1 กราฟไอโซเทอมการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์

ตารางที่ ง-1 นำหนักโดยประมาณของตัวอย่างถ่านกัมมันต์ (M) ที่ใช้วิเคราะห์ค่าไอโอดีน

M				M			
E	C = 0.01	C = 0.02	C = 0.03	E	C = 0.01	C = 0.02	C = 0.03
300	3.766	3.300	2.835	1550	0.729	0.639	0.549
350	3.228	2.829	2.430	1600	0.706	0.619	0.531
400	2.824	2.457	2.126	1650	0.684	0.600	0.515
450	2.510	2.200	1.890	1700	0.664	0.582	0.500
500	2.259	1.980	1.701	1750	0.645	0.566	0.486
550	2.054	1.800	1.546	1800	0.628	0.550	0.472
600	1.883	1.650	1.417	1850	0.610	0.535	0.460
650	1.738	1.523	1.308	1900	0.594	0.521	0.447
700	1.614	1.414	1.215	1950	0.579	0.508	0.436
750	1.506	1.320	1.134	2000	0.565	0.495	0.425
800	1.412	1.237	1.063	2050	0.551	0.483	0.415
850	1.329	1.164	1.000	2100	0.538	0.471	0.405
900	1.255	1.100	0.945	2150	0.525	0.460	0.396
950	1.189	1.042	0.895	2200	0.513	0.450	0.388
1000	1.130	0.990	0.850	2250	0.502	0.440	0.378
1050	1.076	0.943	0.810	2300	0.491	0.430	0.370
1100	1.027	0.900	0.773	2350	0.481	0.421	0.362
1150	0.982	0.861	0.739	2400	0.471	0.412	0.354
1200	0.941	0.825	0.709	2450	0.461	0.404	0.347
1250	0.904	0.792	0.680	2500	0.452	0.396	0.340
1300	0.869	0.761	0.654	2550	0.443	0.388	0.333
1350	0.837	0.733	0.630	2600	0.434	0.381	0.327
1400	0.807	0.707	0.607	2650	0.426	0.374	0.321
1450	0.779	0.683	0.586	2700	0.418	0.367	0.315
1500	0.753	0.666	0.567	2750	0.411	0.360	0.309

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสุชาดา สุทธิพิบูลย์ เกิดเมื่อวันที่ 2 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2523 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรี อดิการศึกษาวិทยาศาสตร์บัณฑิต (วท.บ.) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา เมื่อปีการศึกษา 2544 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิทยาศาสตร์ มหาบัณฑิต หลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี การศึกษา 2545



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย