

การกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียโดยใช้เปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่



นางสาว จรรยาพร พุ่มงาม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-9800-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REMOVAL OF LEAD FROM WASTE WATER BY COCKLE SHELL  
AND MUSSEL SHELL



Miss Chanyaporn Poomngam

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Inter-department of Environmental Science

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-9800-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียโดยใช้เปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู
โดย	นางสาวจรรยาพร พุ่มงาม
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิไลวรรณ อุทุมพฤษ์พร

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(ศาสตราจารย์ ดร. สุชาดา กิระนันทน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิพัฒน์ พัฒนผลไพบูลย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิไลวรรณ อุทุมพฤษ์พร)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กำธร ธีรคุปต์)

.....กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. อภิชาติ อิ่มยิ้ม)

จรรยาพร พุ่มงาม : การกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียโดยใช้เปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่  
(REMOVAL OF LEAD FROM WASTE WATER BY COCKLE SHELL AND MUSSEL SHELL)

อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. วิไลวรรณ อุทุมพุกษพร. 67 หน้า. ISBN 974-17-9800-8.

การวิจัยนี้เป็นการนำเปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ภายในประเทศมาใช้กำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียโดยทำการทดสอบแบบไม่ต่อเนื่องหรือแบบแบตช์เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการดูดซับและใช้สมการพหุนามศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ และศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของเปลือกหอยโดยการทดสอบแบบต่อเนื่องโดยใช้คอลัมน์

เปลือกหอยแครงซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุนรวมทั้งปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตมากกว่าเปลือกหอยแมลงภู่สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีกว่าเปลือกหอยแมลงภู่ ผลการนำเปลือกหอยขนาดต่างกันไปอบที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าเปลือกหอยแครงขนาด 20-60 เมช ซึ่งนำไปตากแดดสามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุด โดยมีค่าคงที่การดูดซับของพหุนามเท่ากับ  $9.46 \times 10^5$  มิลลิกรัมต่อกรัมเปลือกหอย การกำจัดตะกั่วเกิดได้ดีในช่วงพีเอช 6.3-8.8 และประสิทธิภาพลดลงเมื่อพีเอชลดลง กลไกการกำจัดเกิดจากการละลายของแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแครงตามด้วยการตกผลึกของเฮรัสไซต์ (เลดคาร์บอเนต) และถูกดูดซับบริเวณผิวหน้าของเปลือกหอย

การทดสอบแบบต่อเนื่องในการทดสอบคอลัมน์โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแบตเตอรี่ ซึ่งมีค่าความเข้มข้นของตะกั่ว 5.98 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าคอลัมน์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.9 เซนติเมตรบรรจุเปลือกหอยแครงสูง 2.3 เซนติเมตรสามารถบำบัดน้ำปนเปื้อนตะกั่วได้ 6 ลิตร ก่อนที่น้ำผ่านคอลัมน์จะมีความเข้มข้นตะกั่วสูงเกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดไว้ และความสามารถในการดูดซับแบบต่อเนื่องเท่ากับ 8.6 มิลลิกรัมต่อกรัมเปลือกหอยแครง

## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สหสาขาวิชา วิทยาศาสตร์สุขภาพแวล้อม

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สุขภาพแวล้อม

ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนิติ.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

##4389054020 : MAJOR ENVIRONMENT SCIENCE

KEY WORD:COCKLE SHELL / MUSSEL SHELL / ADSORPTION / LEAD/ CALCIUM CARBONATE

CHANYAPORN POOMNGAM : REMOVAL OF LEAD FROM WASTE WATER BY COCKLE SHELL AND MUSSEL SHELL. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. WILAIWAN UTOOMPRURKPORN, Ph.D., 67 pp.

ISBN 974-17-9800-8

Cockle shells and mussel shells, residual materials available locally, were used to study the removal of lead from waste water. The non-continuous or a batch test was used to evaluate the adsorption efficiency under various factors. Freundlich adsorption isotherm was used in this system. The continuous study using column was applied in order to evaluate the performance of shells.

The specific surface area, pore size and amount of calcium carbonate in cockle shells were higher than mussel shells. Study of efficiency of the shells using various size of shells dried at different temperature showed that cockle shells of 20-60 meshsize dried under sunshine in summer had the best of lead removal. The adsorption constant from Freundlich adsorption isotherm was found to be  $9.46 \times 10^5$  milligrams lead per gram cockle shell. The optimum pH for the lead adsorption was between 6.3-8.8 and the adsorption decreased with pH. The removal occurred mainly through the dissolution of  $\text{CaCO}_3$  followed by the precipitation of cerrussite (lead carbonate) near the surface of the shells. Micro precipitates formed were then adsorbed to the surface of shell particles.

The continuous adsorption column test has been performed for breakthrough curve construction using lead-contaminated water collected from a battery factory. The lead concentration of the water was 5.98 mg/L. The column with a diameter of 1.9 cm packed with cockle shells of 2.3 cm high could treat the lead contaminated water up to 6 litres before the lead concentration in the effluent was above 0.2 mg/L which was the standard for waste water set by the Ministry of Industry. Adsorption capacity was 8.6 milligram lead per gram cockle shell.

Inter-department of Environmental Science

Field of study Environmental Science

Academic year 2002

Student's signature.....

Advisor' signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลาย ๆ ฝ่าย ดังนั้นจึงขอแสดงความขอบคุณทุกท่าน ดังมีรายนามต่อไปนี้

กราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิไลวรรณ อุทุมพฤษ์พร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้ทั้งความรู้ ความช่วยเหลือ คำชี้แนะ รวมทั้งให้หลักการและข้อคิดต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อศิษย์ ทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

กราบขอบพระคุณ อาจารย์ มาละดี ทัยคุปต์ ที่ให้ความรู้ คำแนะนำในงานวิจัย หลักการ และความช่วยเหลือด้านเครื่องมือวิเคราะห์ X-Ray Diffractometer

กราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิพัฒน์ พัฒนาผลไพบุลย์ ผู้อำนวยการหลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กำธร ธีรคุปต์ และอาจารย์ ดร. อภิชาติ อิมยิ้ม ที่ได้สละเวลาอันมีค่า มาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ อีกทั้งยังได้ให้ข้อคิด ข้อเสนอแนะ รวมทั้งหลักการต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอขอบคุณ องค์การแบตเตอรี่ ถ. สรรพาวุธ กรุงเทพฯ สำหรับน้ำป้อนเบื่อนตะกั่ว ที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ใช้ห้องปฏิบัติการ วัสดุอุปกรณ์ และสารเคมี ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และมูลนิธิชิน โสภณพานิช

ขอบคุณ เพื่อนๆ และทุกคน ที่คอยช่วยเหลือในการทำการทดลองและคอยให้กำลังใจตลอดการวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้กราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และให้กำลังใจตลอดมาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
คำย่อ.....	ฎ
บทที่ 1	
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2	
การสำรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ประโยชน์ของตะกั่ว.....	3
2.2 ตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงาน.....	4
2.3 ค่ามาตรฐานของตะกั่วในทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม.....	5
2.4 พิษของตะกั่ว.....	5
2.5 กระบวนการดูดซับของตะกั่วบนตัวดูดซับ.....	6
2.6 รูปแบบของตะกั่วในน้ำ.....	11
2.7 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย.....	15
บทที่ 3	
วิธีการดำเนินการวิจัย.....	18
3.1 วัสดุ.....	18
3.2 อุปกรณ์.....	18
3.3 วิธีการวิเคราะห์.....	19

## สารบัญ(ต่อ)

### บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล.....	23
4.1 ผลการศึกษาลักษณะเปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู.....	23
4.2 ผลการศึกษาความสามารถในการกำจัดตะกั่วแบบไม่ต่อเนื่อง.....	28
4.3 ผลการศึกษาไอโซเทอม.....	30
4.4 ผลการศึกษากลไกการกำจัดตะกั่วด้วยเปลือกหอยแครง.....	35
4.5 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วโดยใช้คอลัมน์.....	37

### บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	47
5.1 สรุปการศึกษา.....	47
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	48
รายการอ้างอิง.....	50
ภาคผนวก.....	52
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	67

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภท.....	4
ตารางที่ 4.1 แสดงความสามารถการกำจัดตะกั่วโดยใช้เปลือกหอยแครง และเปลือกหอยแมลงภู่นาน 10-20 เมช และ 20-60 เมช.....	28
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการศึกษาไอโซเทอมของเปลือกหอยแครง.....	31
ตารางที่ 4.3 แสดงผลการศึกษาไอโซเทอมของเปลือกหอยแมลงภู่นาน.....	31
ตารางที่ 4.4 แสดงความหมายของค่า K และ $1/n$ จากสมการ Freundlich.....	34
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความเข้มข้นตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านคอลัมน์ บรรจุเปลือกหอยแครงขนาด 20-60 เมช หนัก 10 กรัม.....	38
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความเข้มข้นตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานแบตเตอรี่หลังผ่านคอลัมน์ บรรจุเปลือกหอยแครงขนาด 20-60 เมช หนัก 10 กรัม.....	41

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

รูปที่ 2.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich.....	9
รูปที่ 2.2 แสดง Breakthrough Curveของการทดสอบคอลัมน์.....	10
รูปที่ 2.3 ไดอะแกรม Eh-pH ของตะกั่ว (ระบบ Pb-O-H-S-C).....	12
รูปที่ 2.4 ไดอะแกรมสปีชีส์ของตะกั่วในน้ำ.....	10
รูปที่ 2.5 แสดงการละลายของแร่ในระบบ Pb-O-H-S-C ที่ 25 องศาเซลเซียส.....	14
รูปที่ 3.1 แสดงเปลือกหอยแครงขนาด 10-20 เมช , 20-60 เมช.....	20
รูปที่ 3.2 แสดงเปลือกหอยแมลงภู่ขนาด 10-20 เมช , 20-60 เมช .....	20
รูปที่ 4.1 แสดง CaCO <sub>3</sub> รูป aragonite และ calcite ของเปลือกหอยแครง.....	24
รูปที่ 4.2 แสดง CaCO <sub>3</sub> รูป aragonite และ calcite ของเปลือกหอยแมลงภู่.....	25
รูปที่ 4.3 ลักษณะพื้นผิวเปลือกหอยแครงจากกล้อง SEM กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	27
รูปที่ 4.4 ลักษณะพื้นผิวเปลือกหอยแมลงภู่จากกล้อง SEM กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	27
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดตะกั่วโดยใช้เปลือกหอยแครง และเปลือกหอยแมลงภู่ที่เวลาต่างกัน.....	29
รูปที่ 4.6 ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของเปลือกหอยแครงขนาด 20-60 เมช อบที่อุณหภูมิต่างกัน.....	33
รูปที่ 4.7 ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของเปลือกหอยแมลงภู่ขนาด 20-60 เมช อบที่อุณหภูมิต่างกัน.....	33
รูปที่ 4.8 ภาพถ่าย SEM บนผิวเปลือกหอยแครงก่อนและหลังการกำจัดตะกั่ว.....	36
รูปที่ 4.9 Breakthrough Curve แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำเสียปนเปื้อน ตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 19.87 mg/l กับ % C/C <sub>0</sub> .....	39
รูปที่ 4.10 Breakthrough Curve แสดงความสัมพันธ์ ของ BV และ % /C <sub>0</sub> .....	39
รูปที่ 4.11 Breakthrough Curve แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำเสียปนเปื้อน ตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 5.98 mg/l กับ % C/C <sub>0</sub> .....	42
รูปที่ 4.12 Breakthrough Curve แสดงความสัมพันธ์ ของ BV และ % C/C <sub>0</sub> .....	42
รูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์โลหะบนเปลือกหอยแครงก่อนกำจัดตะกั่วด้วยเทคนิค XRF.....	44
รูปที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์โลหะบนเปลือกหอยแครงหลังกำจัดตะกั่วด้วยเทคนิค XRF.....	45
รูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์โลหะบนเปลือกหอยแครงหลังกำจัดตะกั่วปนเปื้อนจาก โรงงานแบตเตอรี่ด้วยเทคนิค XRF.....	46

## คำย่อ

### คำย่อ

AAS

BET

SEM

XRD

XRF

BV

### คำเต็ม

Atomic Absorption Spectrometer

Brunauer, Emmett and Teller method

Scanning Electron Microscopy

X-Ray Diffractometer

X-Ray Fluorescence

Bed Volume



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาการปนเปื้อนของตะกั่วในแหล่งน้ำเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้แหล่งน้ำเสื่อมโทรม ก่อให้เกิดโรคและปัญหาด้านสุขภาพอนามัยของประชาชน แม้ว่าในน้ำทิ้งจะมีปริมาณน้อย แต่ตะกั่วสามารถสะสมตัวมากขึ้นในแหล่งน้ำทำให้มนุษย์มีโอกาสสะสมตะกั่วในร่างกายจนถึงขีดอันตรายได้ การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมนิยมใช้วิธีการทำให้ตกตะกอนโดยเติมสารเคมี เช่น ปูนขาว หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ลงไปในน้ำเสีย เพื่อไปทำปฏิกิริยากับตะกั่วที่ละลายอยู่ในน้ำเกิดเป็นตะกอนแยกออกจากรน้ำ โดยทั่วไปนิยมตกตะกอนเป็นตะกั่วไฮดรอกไซด์ด้วยการเติมปูนขาวหรือโซดาไฟ (Harrison, 1981) แต่วิธีการนี้สิ้นเปลืองสารเคมีและค่าใช้จ่ายสูง การนำวัสดุเหลือใช้ทางธรรมชาติมาใช้นับว่าเป็นอีกทางเลือกหนึ่งซึ่งประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัดและยังเป็นการนำวัสดุเหลือใช้มาก่อให้เกิดประโยชน์ ปัจจุบันพบว่าผู้นิยมบริโภคหอยเป็นจำนวนมากโดยเฉพาะหอยแครงและหอยแมลงภู่ ดังนั้นปริมาณการเลี้ยงจึงเพิ่มมากขึ้น โดยเฉลี่ยผลผลิตต่อไร่ประมาณ 12 ตันต่อปีคิดเป็นเนื้อหอยประมาณ 5 ตัน (Thaianimal, 2002) ที่เหลืออีก 7 ตันคือเปลือกหอยซึ่งถือเป็นขยะจากการบริโภค เนื่องจากเปลือกหอยแมลงภู่มี  $\text{CaCO}_3$  และโปรตีนเป็นองค์ประกอบสำคัญ (Rick, 2001) สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อลดปริมาณตะกั่วในน้ำได้ โดยการตกตะกอนตะกั่วคาร์บอเนตด้วย  $\text{CaCO}_3$  จากวัสดุธรรมชาติเช่น coral sand ในรูป aragonite และดูดซับที่บริเวณพื้นผิววัสดุ (Suzuki et al., 1993) ส่วนเปลือกหอยแครงก็มี  $\text{CaCO}_3$  เป็นองค์ประกอบสำคัญเช่นกัน ดังนั้นจึงได้เลือกเปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่มาใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสีย

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เปลือกหอยเป็นตัวกลางในการลดปริมาณตะกั่วในน้ำเสีย
- 2.เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างเปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่ในการลดปริมาณตะกั่วในน้ำเสีย

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.เตรียมตัวอย่างเปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่ขนาดต่างกันและอบที่อุณหภูมิต่างกัน
- 2.เปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ของเปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่ โดยพิจารณาจากการทำไอโซเทอมการดูดซับ เพื่อคัดเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับตะกั่ว
3. ศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของเปลือกหอยโดยใช้น้ำตะกั่วปนเปื้อนผ่านคอลัมน์ซึ่งบรรจุเปลือกหอย

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.เพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม
- 2.สามารถนำเศษวัสดุธรรมชาติเหลือใช้และหาได้ง่ายมาก่อให้เกิดประโยชน์
- 3.ประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียและลดปริมาณการใช้สารเคมี

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### การสำรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตะกั่วเป็นธาตุทรานซิชัน (transition elements) เป็นโลหะหนักหมู่ 4 A ลำดับที่ 5 มีเลขอะตอม 82 เลขมวล 207.19 เลขออกซิเดชัน 0, 2+, 4+ โดยสถานะ 2+ เป็นสถานะที่เสถียร รัศมีอะตอม(โควาเลนต์) 154 pm รัศมีไอออน  $M^{2+}$  เป็น 120 pm ความหนาแน่น 11.3 กรัม/ลูกบาศก์เมตร จุดหลอมเหลว 327 องศาเซลเซียส จุดเดือด 1744 องศาเซลเซียส การนำไฟฟ้าดี ออกไซด์ของตะกั่วอยู่ในรูป  $PbO$   $PbO_2$  และ  $Pb_3O_4$  ซึ่ง  $Pb^{2+}$  จะเสถียรกว่า  $Pb^{4+}$  เกือบของตะกั่ว 2+ โดยทั่วไปจะไม่ละลายน้ำยกเว้นแอสिटเรต และไนเตรต เมื่อละลายน้ำก็จะให้อิออน  $Pb^{2+}$  ที่ถูกไฮเดรต เกือบของตะกั่ว 2+ ทุกชนิดละลายได้ในเบสจำนวนมาก

#### 2.1 ประโยชน์ของตะกั่วทางอุตสาหกรรม

ตะกั่วถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมายได้แก่

- 2.1.1 นำไปใช้ในรูปของตะกั่วออกไซด์ในอุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมกระจก และเครื่องเคลือบบางชนิด
- 2.1.2 ใช้ทำหม้อแบตเตอรี่ และอุตสาหกรรมหุ้มสายเคเบิลไฟฟ้าต่าง ๆ ประมาณร้อยละ 25 ของผลผลิต
- 2.1.3 สารตะกั่วเตตระเอทิลเลด (tetraethyllead  $Pb(C_2H_5)_4$ ) ซึ่งเป็นตัวเติมในน้ำมันเบนซินพลังสูง และเพื่อให้เครื่องยนต์เดินเรียบขึ้น (antinox) แต่ปัจจุบันลดการใช้ลงแล้ว
- 2.1.4 เป็นส่วนผสมสำคัญในอุตสาหกรรมทำท่อต่าง ๆ และท่อพีวีซี
- 2.1.5 ใช้ในการผลิตหัวกระสุนปืน
- 2.1.6 ใช้ในอุตสาหกรรมโลหะผสมต่าง ๆ
  - 2.1.6.1 ตะกั่วผสมดีบุก เป็นโลหะบัดกรี (solder)
  - 2.1.6.2 ตะกั่วผสมพลวง เป็นโลหะตัวพิมพ์ (type metal)
  - 2.1.6.3 ตะกั่วผสมดีบุกและทองแดง เป็นโลหะพิวเตอร์ (pewter)
  - 2.1.6.4 ตะกั่วผสมบิสมีต์ ดีบุก และแคดเมียม เป็นโลหะผสมที่เรียกว่า Wood's alloy
  - 2.1.6.5 ใช้ในระบบสัญญาณไฟไหม้อัตโนมัติซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่ 70 องศาเซลเซียส

## 2.2 ตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงาน

ตารางที่ 2.1 ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภท

ประเภทโรงงาน	ตะกั่ว (mg/L)
การผลิตแบตเตอรี่	
ตะกั่วอยู่ในสถานะ	
อนุภาคแขวนลอย	5-48
สารละลาย	0.5-25
การผลิตหลอดโทรทัศน์	380-400
การผลิตตัวพิมพ์	1.65
การผลิตแก้ว	0.43-100
การเคลือบเครื่องลายคราม	2.9
การทำเหมืองแร่	0.018-0.098
การผลิตวัตถุระเบิด	6.5
การกลั่นน้ำมัน	
ตะกั่วอินทรีย์	126.7-144.8
ตะกั่วอนินทรีย์	66.1-84.9
การผลิตสี	1.1-10.0
การหล่อโลหะ	29-170
การผลิตวงแหวนลูกสูบ	94.6

ที่มา Patterson (1985)

## 2.3 ค่ามาตรฐานของตะกั่วในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ.2539) ได้กำหนดความเข้มข้นตะกั่วในน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานจะต้องมีค่าไม่มากกว่า 0.2 mg/L

## 2.4 พิษของตะกั่ว

เมื่อตะกั่วเข้าสู่ร่างกายไม่ว่าจะโดยทางปาก ทางการหายใจ หรือทางผิวหนัง จึงก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์ และเนื่องจากตะกั่วมีทั้งตะกั่วอินทรีย์และตะกั่วอนินทรีย์ อาการพิษที่เกิดจึงมีลักษณะแตกต่างกัน

อันตรายของตะกั่วต่อระบบภายในร่างกายสิ่งมีชีวิตมีดังนี้

### 2.4.1 ระบบการสร้างเม็ดเลือด

พิษของตะกั่วทำให้เกิดโรคโลหิตจาง โดยรบกวนการทำงานของเอนไซม์ที่สังเคราะห์ Heme หลายชนิด และยับยั้งการใช้เหล็ก ทำให้ฮีโมโกลบินลดลง

### 2.4.2 ระบบประสาท

ตะกั่วมีพิษทำลายระบบประสาท ทำให้เกิดอาการเฉื่อยชา เมื่อยล้าง่าย อัมพาต ช้อมือช้อเท้าตก วิงเวียนศีรษะ กล้ามเนื้อทำงานไม่สัมพันธ์กันทำให้หกล้มง่าย นอนไม่หลับ หงุดหงิด ตกใจง่าย สมองเสื่อมช้า ความจำเสื่อม มึนงง และชัก

### 2.4.3 ระบบไต

ตะกั่วทำความเสียหายต่อไต ทำให้มีการขับกรดอะมิโน น้ำตาลและฟอสเฟต ออกมากับปัสสาวะมากผิดปกติ เนื่องจากตะกั่วรวมตัวกับโปรตีนของเซลล์ภายในไต ทำให้หลอดไตทำงานผิดปกติ

### 2.4.4 กระเพาะและลำไส้

พิษตะกั่วทำให้ปวดท้องอย่างรุนแรง อุจจาระมีเลือดปน หากมีอาการมากจะมีความรู้สึกมีรสโลหะในปาก (กิตติ, 2528)

### 2.4.5 ระบบสืบพันธุ์

พิษตะกั่วมีผลต่อการมีประจำเดือนของสตรีและส่งผลให้แท้งบุตรได้ (วรรณภา, 2540)

นอกจากนี้ตะก้วยังก่อให้เกิดผลกระทบทางอ้อม เช่น ทำให้ความต้านทานต่อโรคไข้ไทฟอยด์ลดลง (เปี่ยมศักดิ์, 2534) สะสมในร่างกายเมื่อเข้าสู่กระแสเลือดแล้วจะถูกพาไปทั่วร่างกาย ตะกั่วถูกขับจากร่างกายทางไตและเหงื่อ และสามารถพบตะกั่วในน้ำนมมารดา ในคนปกติมีตะกั่วในปัสสาวะประมาณ 50-80 ไมโครกรัมต่อลิตร ผู้ใหญ่ไม่ควรมีตะกั่วในเลือดเกินกว่า 40



ไมโครกรัมต่อเดซิลิตร (สมพูล, 2532) ส่วนในเด็กไม่ควรมีตะกั่วในเลือดเกินกว่า 10 ไมโครกรัมต่อเดซิลิตร (WHO, 1996)

## 2.5 กระบวนการดูดซับ (adsorption) ของตะกั่วบนตัวดูดซับ

กระบวนการดูดซับเป็นวิธีการหนึ่งที่ยอมรับกันมากในด้านการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากสามารถกำจัดสารปนเปื้อนขนาดเล็กจนถึงขนาดโมเลกุล ซึ่งไม่อาจกำจัดได้โดยวิธีการตกตะกอนหรือการกรองแบบธรรมดา โดยอาศัยความสามารถเฉพาะตัวของสารในการดึงดูดโมเลกุลของสารปนเปื้อนให้มาเกาะที่ผิวของสารดูดซับ โดยเรียกปรากฏการณ์ที่สารปนเปื้อนมาเกาะที่ผิวว่า กระบวนการดูดซับ (adsorption) ตัวที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) ส่วนโมเลกุลที่มาเกาะติดที่ผิวตัวดูดซับเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ปรากฏการณ์การดูดซับนี้เกิดขึ้นระหว่าง 2 พื้นผิว (surface) โดยที่ตัวถูกดูดซับจะไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งได้แก่พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นผิวระหว่างของแข็งกับก๊าซ พื้นผิวระหว่างของแข็งกับของแข็งและพื้นผิวระหว่างของเหลวกับของเหลว

### 2.5.1 ประเภทของตัวดูดซับ (adsorbent) แบ่งได้ 3 ประเภท

#### 2.5.1.1 สารอนินทรีย์

สารอนินทรีย์ ได้แก่ ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ แอคติเวตเต็ดซิลิกา (activated silica) เป็นต้น สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50 – 200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่ตัวดูดซับประเภทสารอนินทรีย์นี้สามารถจับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิดทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับประเภทสารอนินทรีย์มีข้อจำกัดมาก

#### 2.5.1.2 ถ่านกัมมันต์ (activated carbon)

ถ่านกัมมันต์อาจจัดเป็นสารอนินทรีย์สังเคราะห์ แต่เป็นตัวดูดซับที่ดีกว่าสารอนินทรีย์ชนิดอื่นๆ จึงเป็นที่นิยมกันมากเนื่องจากเป็นถ่านที่ผ่านการกระตุ้นเพื่อให้ความพรุนมากและมีพื้นที่ผิวภายในสูง โดยทั่วไปมีพื้นที่ผิวประมาณ 450 – 1,500 ตารางเมตรต่อกรัม (Weber, 1981) และมีความพรุนตั้งแต่ 10 – 10,000 อังสตรอม (Hesster, 1963)

#### 2.5.1.3 สารอินทรีย์สังเคราะห์

สารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange resin) สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300 – 500 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งถือว่ามีความต่ำเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ แต่เรซินมีข้อได้เปรียบมากกว่าคือ สามารถปรับสภาพนำมาใช้ใหม่ได้ง่าย และสารที่ใช้มีราคาถูก (มันสิน, 2538)

## 2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ประสิทธิภาพการดูดซับจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

### 2.5.2.1 ขนาดพื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุนของสารดูดซับ

พื้นที่ผิวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับรูพรุน หากรูพรุนมีมากทำให้มีพื้นที่ผิวดูดซับมาก ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น การดูดซับจะเกิดได้ดีเมื่อโมเลกุลตัวถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนเล็กน้อยหากรูพรุนมีมากแต่ขนาดเล็กก็ไม่ได้ทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น ส่วนขนาดของสารดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับความสามารถในการดูดซับ เนื่องจากปฏิกิริยาที่พื้นผิวเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของพื้นที่ผิว อัตราการดูดซับจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ เมื่อสารดูดซับนั้นไม่มีรูพรุน

### 2.5.2.2 สมบัติของสารที่ถูกดูดซับ

#### 2.5.2.2.1 ความสามารถในการละลาย

สารที่มีความสามารถในการละลายสูง จะถูกดูดซับได้น้อย เนื่องจากก่อนเกิดกระบวนการดูดซับจะต้องมีการทำลายพันธะของตัวถูกละลาย และตัวทำละลายก่อนที่จะเกิดการดูดซับ ซึ่งถ้าไม่มีการทำลายพันธะก็จะไม่สามารถดูดซับได้ โดยทั่วไปแล้วความสามารถในการละลายของสารประกอบอินทรีย์ในน้ำจะลดลงเมื่อความยาวของพันธะลูกโซ่ยาวขึ้น

#### 2.5.2.2.2 น้ำหนักและขนาดของโมเลกุล

ถ้าน้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลงและโมเลกุลที่มีโครงสร้างเป็นกิ่ง (branched chain) จะถูกดูดซับได้ดีกว่าโมเลกุลที่เป็นโซ่ตรง (straight chain)

### 2.5.2.3 ค่าความเป็นกรดต่าง (pH)

การดูดซับขึ้นกับสภาพความเป็นขั้วของพื้นผิวดูดซับ เช่นหาก pH ลดลงส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออน ( $H_3O^+$ ) ที่พื้นผิวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้การดูดซับไอออนลบเกิดขึ้นได้มาก (Ford, 1981)

### 2.5.2.4 อุณหภูมิ

การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic) ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลง การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยไม่มีผลกระทบมากนักต่อกระบวนการดูดซับ

### 2.5.2.5 ความปั่นป่วน

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับอัตราการขนส่งโมเลกุลของระบบ ซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (film diffusion) และการแพร่เข้าสู่รูพรอง (pore diffusion) ในระบบที่ของเหลวมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มของของเหลวที่ล้อมรอบสาร

ดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ในทางกลับกันถ้าความปั่นป่วนของของเหลวในระบบสูง ความหนาของชั้นฟิล์มจะลดลงทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็ว

#### 2.5.2.6 เวลาสัมผัส

เวลาสัมผัสเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ และอายุการใช้งานของคอลัมน์ สารละลายควรจะมีเวลาเก็บกักในชั้นของสารดูดซับนานประมาณ 30 นาที

#### 2.5.3 การศึกษาความสามารถในการดูดซับ

มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หลายรูปแบบที่นำมาใช้อธิบายถึงข้อมูลของการดูดซับซึ่งเป็นผลมาจากการพัฒนาทางทฤษฎี และจากผลการทดลองโดยแบบจำลองที่รู้จักทั่วไปได้แก่ ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) ไอโซเทอมการดูดซับแบบเบท (BET, Brunauer Emmerett-Teller Adsorption Isotherm) และไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชเป็นแบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการอธิบายการดูดซับในระบบของเหลว ซึ่งจะนำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

การดูดซับแบบฟรุนดลิช เป็นการดูดซับแบบที่ตัวถูกดูดซับเรียงซ้อนกันหลายๆ ชั้น ด้วยพันธะอ่อนๆ

$$q_e = x/m = KC^{1/n}$$

โดยที่  $q_e$  = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (mg/g)

$x$  = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับ (mg)

$m$  = ปริมาณของตัวดูดซับ (g)

$K$  = ค่าคงที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับ

$C$  = ความเข้มข้นสมดุลของตัวถูกดูดซับ (mg/L)

$1/n$  = ค่าคงที่แสดงถึงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย

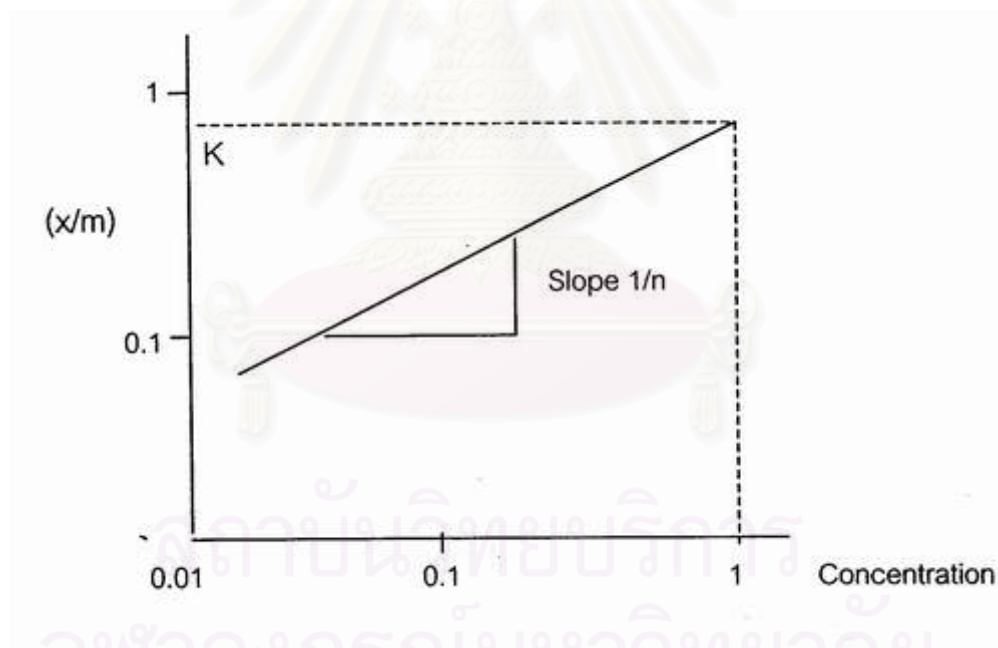
เนื่องจากสมการฟรุนดลิชเป็นฟังก์ชันแบบเอ็กโปเนนเชียล (exponential) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ ดังนี้

$$\log (x/m) = \log K + (1/n) \log C$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log(x/m)$  กับ  $\log C$  จะได้เส้นตรงซึ่งมีความชันเท่ากับ  $1/n$  และมีจุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $\log K$  เมื่อ  $\log C = 0$  ( $C = 1$ ) กราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich แสดงดังรูปที่ 2.1 สามารถหาค่า  $K$  และ  $1/n$  ได้โดยที่  $1/n =$  ความชันของกราฟ และ  $K =$  ค่า  $x/m$  ที่ค่า  $C = 1$

หากค่า  $K$  และ  $1/n$  มีค่าต่ำ แสดงถึงความสามารถในการดูดซับจะต่ำในทุกค่าความเข้มข้น แต่ถ้า  $1/n$  สูงแสดงว่า ความสามารถในการดูดซับนี้จะขึ้นกับความเข้มข้น เช่น หากความเข้มข้นต่ำ ความสามารถในการดูดซับจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อความเข้มข้นสูงความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้นอย่างมาก

ค่า  $1/n$  ที่ได้ส่วนใหญ่จะมีค่าน้อยกว่า 1 สำหรับค่า  $1/n$  ที่เกือบจะเท่ากับ 1 แสดงถึงการดูดซับที่ดี

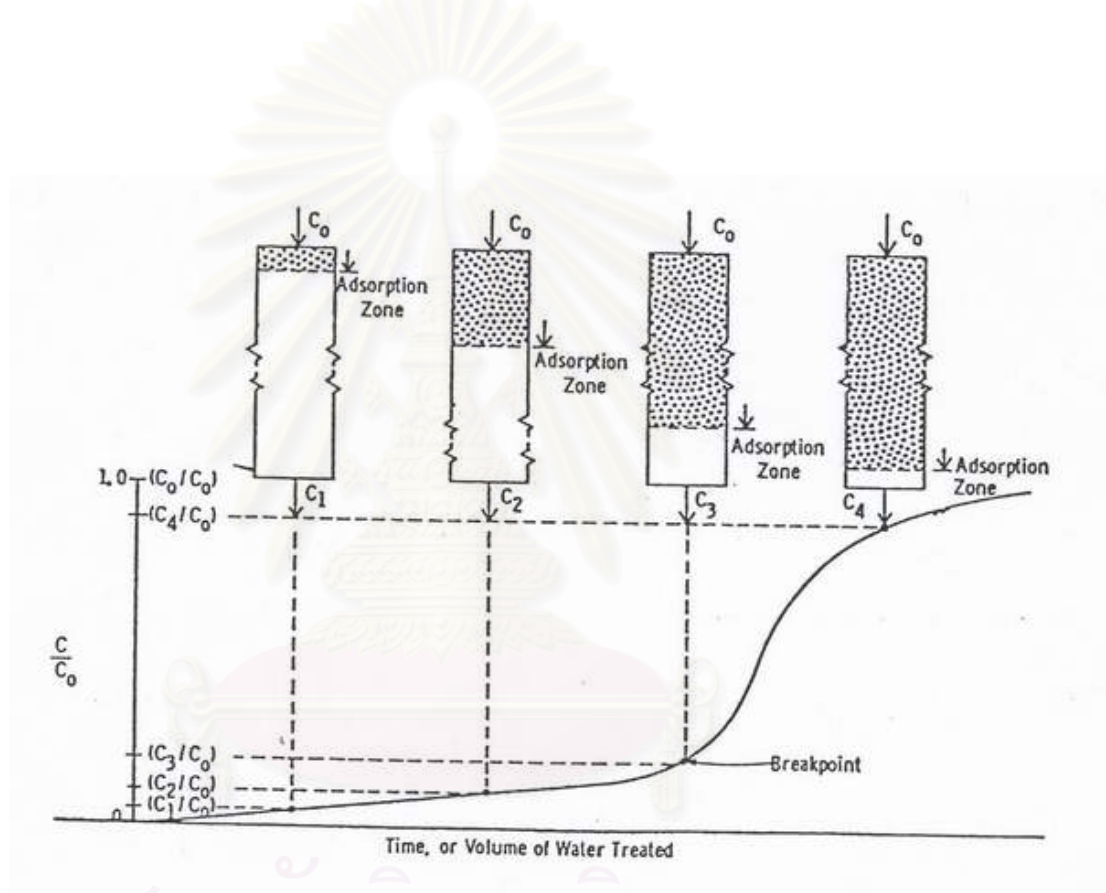


รูปที่ 2.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich

ที่มา Weber (1981)

## 2.5.4 การศึกษาอายุการใช้งานของตัวดูดซับและการศึกษาค่าคงที่

การศึกษาในขั้นนี้กระทำโดยผ่านน้ำที่ปนเปื้อนอย่างต่อเนื่องเข้าสู่คอลัมน์ ซึ่งบรรจุตัวดูดซับ เมื่อน้ำไหลผ่านชั้นตัวดูดซับเป็นระยะเวลาหนึ่ง จะมีสารปนเปื้อนเกาะติดที่ผิวตัวดูดซับ ทำให้ตัวดูดซับค่อยๆ หมดประสิทธิภาพตามปริมาณน้ำที่ไหลผ่านชั้นตัวดูดซับ ดังนั้นความเข้มข้นของสารปนเปื้อนจึงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ดังรูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นของปริมาณน้ำที่ผ่านชั้นตัวดูดซับแล้วต่อความเข้มข้นเริ่มต้นเทียบกับปริมาตรที่ใช้ เรียกว่า Breakthrough Curve



รูปที่ 2.2 แสดง Breakthrough Curve ของการทดสอบคอลัมน์  
ที่มา Weber (1981)

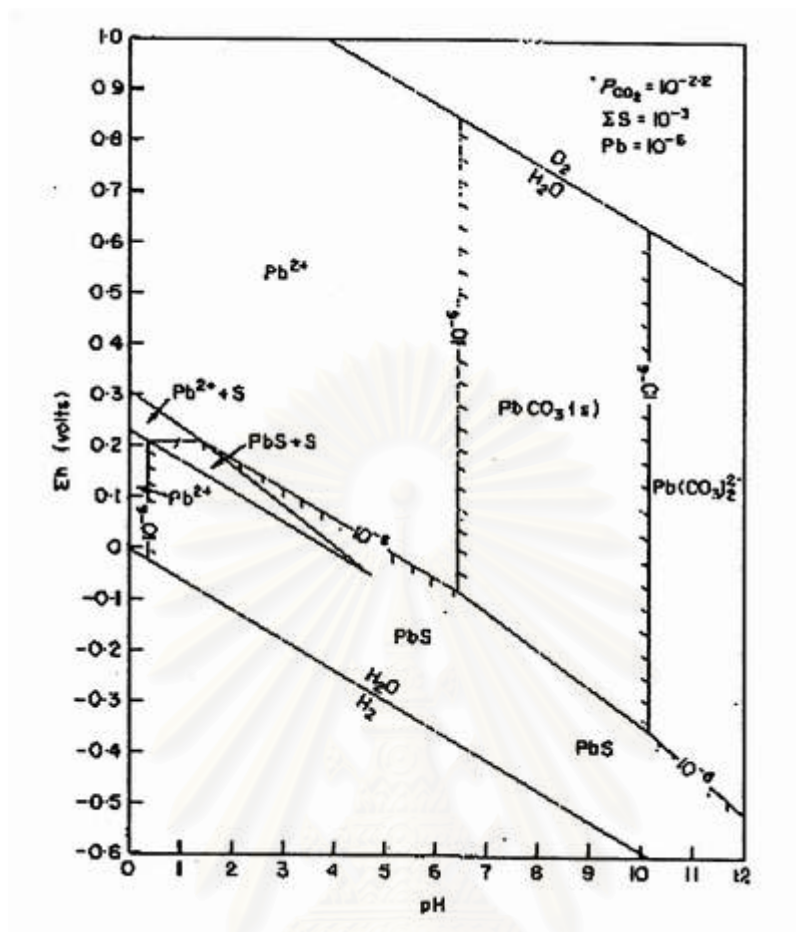
## 2.6 รูปแบบของตะกั่วในน้ำ

การเปลี่ยนแปลงของธาตุต่างๆ ในสิ่งแวดล้อมสามารถอธิบายได้ด้วยไดอะแกรม Eh-pH ในรูปที่ 2.3 ซึ่งค่า Eh ที่มากกว่า 0 คือสภาวะ oxidizing ส่วนค่า Eh ที่ต่ำกว่า 0 คือสภาวะ reducing

ใน Eh-pH ไดอะแกรม แสดงขอบเขตการเปลี่ยนแปลงของตะกั่ว ซึ่งตะกั่วจะอยู่ในรูปของสารประกอบใดขึ้นกับ พีเอช (pH) และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล (Eh) ในสิ่งแวดล้อมนั้น ที่ pH ในช่วง 6.5–10 ตะกั่วละลายน้ำได้น้อยและอยู่ในรูป  $\text{PbCO}_3$  และที่ pH มากกว่า 10 อยู่ในรูป  $\text{Pb}(\text{CO}_3)_2^{2-}$  ส่วนที่ pH ต่ำกว่า 6 ตะกั่วอยู่ในรูปละลายน้ำได้ ( $\text{Pb}^{2+}$ )

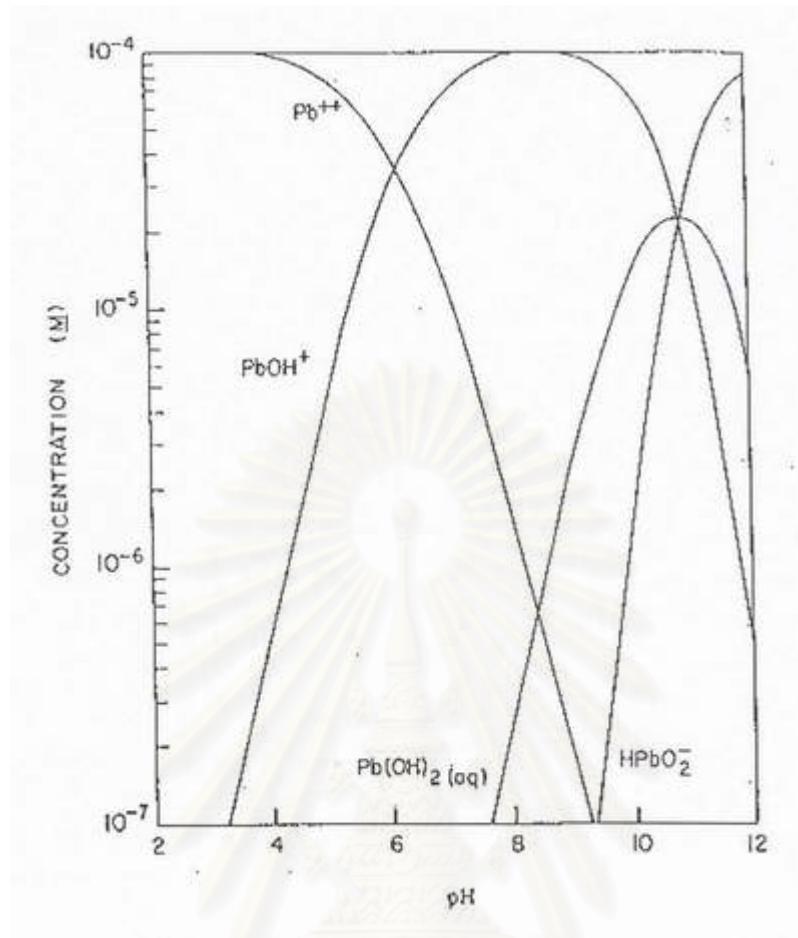
ไอออนของตะกั่วในน้ำมีได้หลายรูปขึ้นกับค่า pH ดังรูปที่ 2.4 ที่ pH ในช่วง 3-10 ไอออนของตะกั่วส่วนใหญ่อยู่ในรูป  $\text{PbOH}^+$  รองลงมาคือ  $\text{Pb}^{2+}$  ส่วน  $\text{Pb}(\text{OH})_2$  มีบ้างเล็กน้อย

การละลายของแร่ในระบบ Pb-O-H-S-C ที่ 25 องศาเซลเซียส, 1 atm ภายใต้สภาวะ oxidizing ดังรูปที่ 2.5 ที่ pH ในช่วง 7-10  $\text{PbCO}_3$  (cerrussite) อยู่ในรูปที่เสถียรซึ่งละลายน้ำได้น้อย



รูปที่ 2.3 ไดอะแกรม Eh-pH ของตะกั่ว (ระบบ Pb-O-H-S-C)  
 ที่มา Rose, Hawkes and Webb (1979)

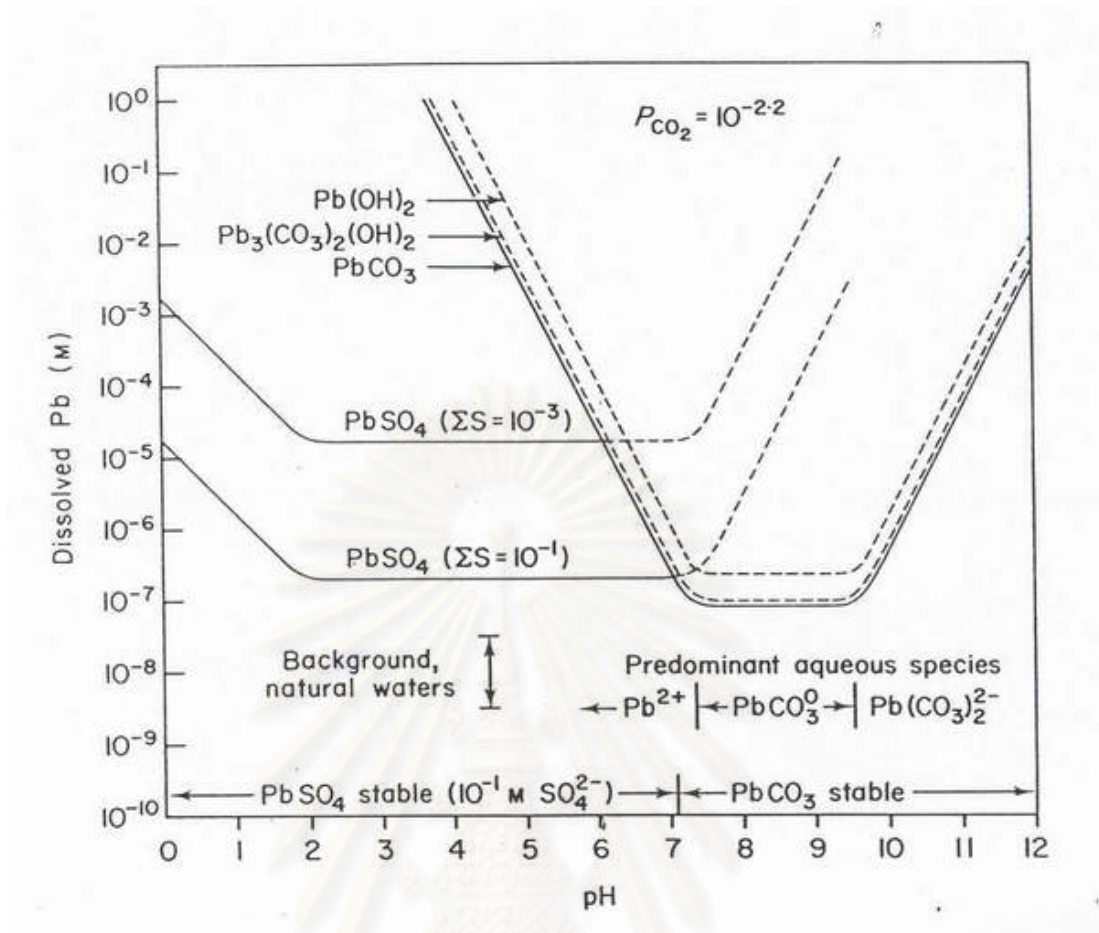
สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.4 ไดอะแกรมสปีชีส์ของตะกั่วในน้ำ  
ที่มา Fuerstenau and Palmer (1976)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 2.5 แสดงการละลายของแร่ในระบบ Pb-O-H-S-C ที่ 25 องศาเซลเซียส, 1 atm ภายใต้สภาวะ Oxidizing เส้นประแสดง metastable solubilities  
ที่มา Rose, Hawkes and Webb (1979)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2.7 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียมีหลายวิธี ได้แก่ การตกตะกอน (precipitation) การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) การระเหย (evaporation) รีเวิร์สออสโมซิส (reverse osmosis) การสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) อิเล็กโทรไดอะไลซิส (electrodialysis) ออกซิเดชัน-รีดักชัน (oxidation-reduction) ซึ่งวิธีออกซิเดชัน-รีดักชันและการตกตะกอนนิยมใช้ควบคู่กันในระบบการกำจัดโลหะหนักสำหรับโรงงานชุบเคลือบขนาดกลางและเล็กซึ่งกำหนดโดยกรมโรงงาน กระทรวงอุตสาหกรรม เป็นวิธีที่ใช้กันมากในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียของประเทศไทย

การบำบัดน้ำเสียที่มีตะกั่วปนเปื้อนในช่วงแรกๆ ได้มีนักวิจัยหลายท่านใช้วิธีการนำสารเคมีมาใช้ตกตะกอนและมีการนำวัสดุต่างๆ มาพัฒนาเป็นตัวดูดซับ เช่น ในปี ค.ศ.1981 Jakkris ได้ศึกษาการลดปริมาณตะกั่วในน้ำทิ้งจากโรงงานแบตเตอรี่ โดยวิธีทำให้ตกตะกอนด้วยปูนขาว (lime precipitation) โดยเติมปูนขาวจนกระทั่งน้ำเสียมี pH อยู่ระหว่าง 8.5 – 9.0 หลังจากนั้นปล่อยให้ตกตะกอนพบว่า pH ดังกล่าวสามารถลดปริมาณตะกั่วได้ 98.16-98.64 % ใช้เวลา 10-30 นาที ในการทำให้เกิดตะกอน แต่อย่างไรก็ตามปริมาณตะกั่วที่ยังเหลืออยู่ในน้ำทิ้งยังคงมีปริมาณสูงกว่าที่โรงงานอุตสาหกรรมกำหนด (1981 อ้างถึงใน นัยนา หาญโรดม, 2536) ปี ค.ศ. 1985 Kitwudh ศึกษาการลดปริมาณตะกั่วในน้ำทิ้งจากโรงงานแบตเตอรี่ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยน้ำปูนใสก่อนแล้ว โดยใช้วัสดุกรอง 3 ชนิดคือ ทราาย ถ่านไม้ และแอนทราไซท์ สามารถลดปริมาณตะกั่วได้สูงกว่า 90 % โดยทราายกรองขนาด 0.25 มม. มีประสิทธิภาพลดปริมาณตะกั่วได้สูงสุดถึง 98.66 % ถ่านไม้สามารถลดปริมาณตะกั่วได้ 97.49 % และแอนทราไซท์ มีประสิทธิภาพลดปริมาณตะกั่วได้สูงสุดถึง 94.36 % (1985 อ้างถึงใน นัยนา หาญโรดม, 2536)

ปี พ.ศ. 2529 พรสวรรค์ได้ศึกษาวิธีการกำจัดสารตะกั่วในน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ โดยวิธีการตกตะกอนทางเคมี พบว่า NaOH และ  $\text{Ca(OH)}_2$  สามารถตกตะกอนตะกั่วได้ดีที่ pH 9.4-10.4 และใช้เวลาในการตกตะกอนประมาณ 2 ชั่วโมง  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  สามารถตกตะกอนตะกั่วได้ดีที่ pH 7.0-10.3 เวลาที่ใช้ในการตกตะกอนประมาณ 4 ชั่วโมง  $\text{Na}_2\text{S}$  สามารถตกตะกอนตะกั่วได้ดีที่ pH 7.6-10.8 เวลาที่ใช้ในการตกตะกอนประมาณ 1.5 ชั่วโมง ความเข้มข้นของตะกั่วหลังจากตกตะกอนด้วยสารเคมีทั้ง 4 ชนิดดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่โรงงานอุตสาหกรรมกำหนด (0.2 mg/L)

งานวิจัยข้างต้นนี้ส่วนใหญ่เป็นการตกตะกอนโดยใช้สารเคมีซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและทำกันมานาน แต่มีข้อเสียคือ ในกรณีที่โลหะหนักหลายชนิดปนอยู่ด้วยกันในน้ำเสีย การตกตะกอนโลหะหนักพร้อมๆ กันหลายชนิดจำเป็นต้องปรับพีเอชให้แตกต่างกันไปแล้วแต่ชนิดของโลหะหนัก ซึ่งจะต้องแยกประเภทของโลหะหนักออกมากำจัดทีละชนิดทำให้ยุ่งยากในการปฏิบัติ นอกจากนั้นการ

ตกตะกอนยังเกิดได้ช้าและไม่สามารถแยกออกจากน้ำทิ้งได้อย่างเด็ดขาด อาจมีตะกอนบางส่วนไหลกลับ หรือละลายกลับไปกับน้ำที่จะปล่อยออกสู่ท่อระบายน้ำ และข้อเสียที่สำคัญคือตะกอนที่ได้จากการตกตะกอนสามารถละลายได้เมื่อพีเอชเหมาะสมในสิ่งแวดล้อม

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงควรวางวิธีการกำจัดโลหะหนักให้อยู่รูปคงตัวในธรรมชาติ เพื่อให้ไม่ไหลกลับมาส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในอนาคต และจะต้องเป็นวิธีที่ประหยัดต้นทุน ง่ายต่อการบำบัด และหลีกเลี่ยงการใช้สารเคมีให้มากที่สุดซึ่งงานวิจัยในช่วงหลังได้มีนักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาวิธีการกำจัดโลหะหนักโดยการนำวัสดุธรรมชาติมาใช้

ในปี ค.ศ. 1988 Okimen และคณะทำการศึกษากำจัด  $Cd^{2+}$   $Ni^{2+}$  และ  $Pb^{2+}$  ในน้ำเสียโดยใช้เปลือกเมล็ดแตงโม ทำการทดสอบทั้งแบบแบดซ์และคอลัมน์ ขนาดของเปลือกเมล็ดแตงโม 300 – 425 ไมโครเมตร การทดสอบแบบแบดซ์ ใช้กำจัด  $Cd^{2+}$   $Ni^{2+}$  และ  $Pb^{2+}$  ความเข้มข้นเริ่มต้น 100, 200, 300, 400 และ 500 mg/L ด้วยเปลือกเมล็ดแตงโมที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพทางเคมี เปรียบเทียบกับเปลือกเมล็ดแตงโมที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพทางเคมีด้วย EDTA พบว่าเปลือกเมล็ดแตงโมที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพทางเคมีสามารถกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่าและในการทดสอบแบบคอลัมน์โดยใช้คอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ยาว 35 เซนติเมตร บรรจุเปลือกเมล็ดแตงโมที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพผ่านน้ำเสียด้วยอัตราเร็ว 1 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ความเข้มข้น 100 mg/L พบว่าสามารถกำจัดตะกั่วได้ 62-92 % และสามารถ Recovery  $Pb^{2+}$  ได้ 70% ปี ค.ศ. 1986 Shiina ทำการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักด้วยการใช้ปะการังเผาขนาด 60 เมช ที่อุณหภูมิต่างๆ เปรียบเทียบกันพบว่าที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพในการดูดซับ Zn ดีที่สุด และเมื่อนำปะการังนี้มาบำบัดน้ำเสียจริงที่มี Zn, Cu, และ Pb พบว่าประสิทธิภาพบำบัดเท่ากับ 96-100%, 97-100% และ 93-97% ตามลำดับ ในปี ค.ศ.1991 Suzuki และคณะศึกษาการใช้ประโยชน์ของหินปูนในสิ่งมีชีวิตเพื่อกำจัดโลหะหนัก โดยนำปะการังบดละเอียดขนาด 200-400 เมช มาเขย่าในน้ำตัวอย่างที่มี Pb, Cd และ Mn พบว่าประสิทธิภาพการบำบัด 99%, 49% และ 45% ตามลำดับ ปี ค.ศ. 1993 Suzuki และคณะศึกษาการลดปริมาณโลหะหนักที่มีไอออน  $2+$  ได้แก่ Cd, Cu และ Pb ในรูปเกลือไนเตรดด้วย coral Sand ซึ่งมี calcium carbonate เป็นองค์ประกอบหลักพบว่า calcium carbonate ในรูป aragonite form สามารถลดปริมาณตะกั่วได้ดีในรูปสารละลายโดยความสามารถในการลดปริมาณตะกั่วขึ้นอยู่กับ pH และ อุณหภูมิของ coral Sand โดยอุณหภูมิ 403 K ที่ pH 5.5-6.1 จะสามารถลดได้สูงสุดและความสามารถจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 523 K เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น calcium carbonate จะเปลี่ยนรูปจาก aragonite form เป็น calcite form ปี ค.ศ. 1995 Hockett และคณะศึกษา Barnacle Shell ซึ่งมี calcium carbonate เป็นองค์ประกอบหลักพบว่าโลหะหนักในน้ำซึ่งประกอบด้วยสตรอนเตียม แมงกานีส หรือ ตะกั่ว จะถูกสะสมไว้ที่ Barnacle

Shell ในปี ค.ศ. 1996 Lee และคณะศึกษากการตกตะกอนตะกั่วด้วยเปลือกปูโดยวิธี Micro precipitation พบว่าการกำจัดตะกั่วส่วนใหญ่จะตกตะกอนในรูปของ  $Pb_3(CO_3)_2(OH)_2$  และ  $PbCO_3$  โกล์พื้นผิวของเปลือกปู ช่วง pH 5.5-11.0 โดยตะกั่วจะตกตะกอนด้วย calcium carbonate ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญที่อยู่ในเปลือกปู ในปี ค.ศ.1996 Rashchi และคณะศึกษารูปแบบการตกตะกอนตะกั่วและแคลเซียมบนผิวซิลิกาในรูปเกลือซัลเฟตและคาร์บอเนตภายใต้สภาวะต่างด้วยการใช้ zeta potential measurements, scanning electron microscopy และ X-ray photoelectron spectroscopy พบว่าเกลือซัลเฟตตกตะกอนในรูป Pb-oxide/hydroxide บนผิวซิลิกา ส่วนเกลือคาร์บอเนตตกตะกอนในรูป Pb-carbonate/hydroxy carbonate นอกจากนี้ปี ค.ศ. 1996 Delgado และคณะได้ทำการศึกษาการลดปริมาณตะกั่วในดินที่มีปริมาณคาร์บอเนตมาก ความเค็มและ pH แตกต่างกัน เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนและตกตะกอนคาร์บอเนต ผลการศึกษาพบว่าปริมาณคาร์บอเนตมีความสำคัญในการกำจัดตะกั่วในดิน ถ้าปริมาณคาร์บอเนตมาก สามารถกำจัดตะกั่วได้มาก ปี ค.ศ. 1997 Lee และคณะศึกษาคุณสมบัติของเปลือกปูในการกำจัดตะกั่วในน้ำพบว่า 99 % ของตะกั่วถูกกำจัดโดย เปลือกปู โดยประสิทธิภาพในการกำจัดขึ้นกับระยะเวลาสัมผัสระหว่างน้ำเสียและเปลือกปู ปริมาณเปลือกปู และ pH ในปี พ.ศ. 2540 ศุภวรรณศึกษากการลดปริมาณตะกั่วโดยใช้เปลือกไข่พบว่าเปลือกไข่ซึ่งมี calcium carbonate และเยื่อโปรตีนสามารถใช้ลดปริมาณตะกั่วในน้ำเสียได้กว่า 99 % โดยความสามารถขึ้นกับขนาดอนุภาคของเปลือกไข่ สัดส่วนระหว่างความเร็วการไหลต่อปริมาตรของเปลือกไข่ในคอลัมน์และระดับ pH

เนื่องจากเปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่เป็นวัสดุธรรมชาติเหลือใช้ภายในประเทศซึ่งมี  $CaCO_3$  เป็นองค์ประกอบหลักอีกทั้งมีแนวโน้มในการกำจัดตะกั่วทำนองเดียวกันกับงานวิจัยข้างต้น จึงได้ถูกเลือกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วัสดุ

##### 3.1.1 วัสดุที่ใช้เป็นตัวดูดซับ

3.1.1.1 เปลือกหอยแครง (Shell of *Anadara granosa*)

3.1.1.2 เปลือกหอยแมลงภู่ (Shell of *Perna viridis*)

##### 3.1.2 น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

3.1.2.1 น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากห้องปฏิบัติการ

3.1.2.2 น้ำเสียจริงจากโรงงานแบตเตอรี่

#### 3.2 อุปกรณ์

##### 3.2.1 อุปกรณ์สำหรับเตรียมตัวดูดซับ

3.2.1.1 ตู้อบความร้อน : Mommert 8540. Germany.

3.2.1.2 เตาเผา : Muffle furnace, Fisher 10-650-126. USA.

3.2.1.3 ตะแกรงคัดขนาดเบอร์ 10, 20 และ 60 เมช

3.2.1.4 ครอบขนาดกลาง

##### 3.2.2 อุปกรณ์สำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ

3.2.2.1 เครื่องวัดความเป็นกรดต่าง : pH ISE conductivity meter Denver Instrument 250. USA.

3.2.2.2 เครื่องเขย่า (shaker)

3.2.2.3 เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง : Mettler AE 200S. Switzerland.

3.2.2.4 อุปกรณ์พลาสติกและเครื่องแก้วต่างๆ

##### 3.2.3 อุปกรณ์สำหรับใช้ทดลองแบบคอลัมน์

3.2.3.1 ถังพลาสติกมีฝาปิด ขนาด 60 ลิตร

3.2.3.2 คอลัมน์แก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร

3.2.3.3 ถังบรรจุน้ำขนาด 30 ลิตร

3.2.3.4 สายยางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 เซนติเมตรและ 1.3 เซนติเมตร

### 3.2.4 เครื่องมือในการวิเคราะห์

3.2.4.1 วิเคราะห์ปริมาณตะกั่วและปริมาณ  $\text{CaCO}_3$  ด้วย Atomic Absorption Spectrometer (AAS) : Varian 220 FS. Australia.

3.2.4.2 วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของเปลือกหอยด้วย Brunauer, Emmett and Teller method (BET) : ASAP 2000. USA.

3.2.4.3 วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของเปลือกหอยด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM) : Jeol JSM 5800LV. USA.

3.2.4.4 วิเคราะห์หา Calcite และ Aragonite ในเปลือกหอยด้วย X-Ray Diffractometer (XRD) : Phillip X'Pert. Germany.

3.2.4.5 วิเคราะห์หาธาตุด้วย X-Ray Fluorescence (XRF) : USA.

### 3.3 วิธีกรวิเคราะห์

การศึกษาแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการเตรียมเปลือกหอยสำหรับทดลอง ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาความสามารถในการดูดซับตะกั่วโดยการทดสอบแบบไม่ต่อเนื่อง (batch test) และการทดสอบแบบต่อเนื่อง (column test) ขั้นตอนที่ 3 เป็นการนำน้ำปนเปื้อนตะกั่วจากโรงงานแปดเตอรี มาใช้กับคอลัมน์

#### 3.3.1 การเตรียมตัวดูดซับจากเปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่

3.3.1.1 เก็บเปลือกหอยแครงและหอยแมลงภู่มาทำความสะอาดโดยการล้างน้ำและต้มด้วยน้ำเดือดเพื่อช่วยให้เนื้อเยื่อที่ติดค้างหลุดออก

3.3.1.2 นำเปลือกหอยไปผึ่งให้แห้งและบดให้ละเอียด แร่งให้มีขนาด 10-20 และ 20-60 เมช

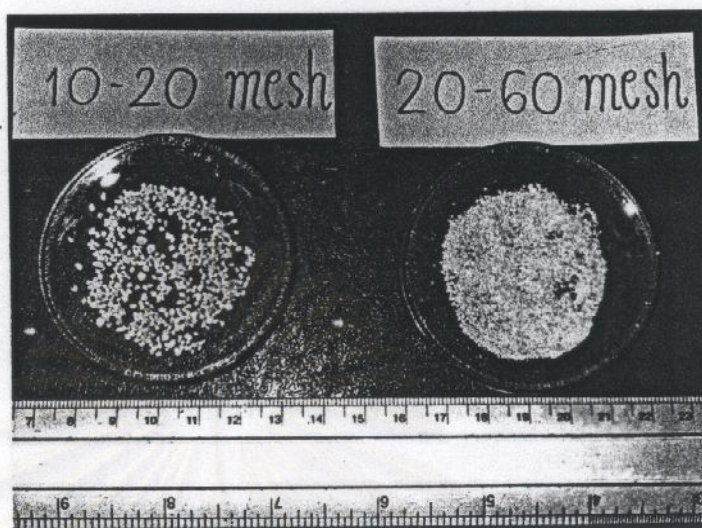
3.3.1.3 ล้างให้สะอาดอีกครั้งด้วยน้ำกลั่น

3.3.1.4 นำเปลือกหอยอบที่อุณหภูมิ  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  (อุณหภูมิตากแดดฤดูร้อน),  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ  $520\text{ }^{\circ}\text{C}$

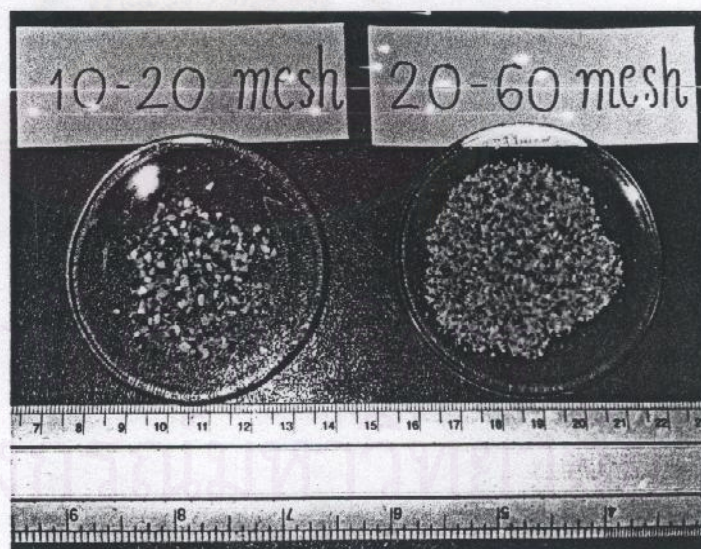
3.3.1.5 วิเคราะห์หาปริมาณ  $\text{CaCO}_3$  ด้วย Atomic Absorption Spectrometer (AAS)

3.3.1.6 วิเคราะห์หา  $\text{CaCO}_3$  ในรูป calcite และ aragonite ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

3.3.1.7 วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนของเปลือกหอยด้วย Brunauer, Emmett and Teller method (BET)



รูปที่ 3.1 แสดงเปลือกหอยแครงขนาด 10-20 เมช และ 20-60 เมช



รูปที่ 3.2 แสดงเปลือกหอยแมลงภู่นาขนาด 10-20 เมช และ 20-60 เมช

### 3.3.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

เตรียมสารละลายเลดไนเตรดที่ความเข้มข้น 1000 mg/L จากเลดไนเตรด  $Pb(NO_3)_2$  โดยชั่ง  $Pb(NO_3)_2$  1.599 กรัม ละลายน้ำกลั่นปริมาตรเป็น 1 ลิตร จากนั้นเตรียมสารละลายเลดไนเตรดที่ความเข้มข้น 20 mg/L โดยเจือจางด้วยน้ำกลั่น

### 3.3.3 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการใช้เปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่กำจัดตะกั่วในรูปสารละลายเลดไนเตรด

#### 3.3.3.1 ศึกษาผลของเวลาสัมผัสที่เหมาะสม

ชั่งเปลือกหอย 0.1 กรัม ลงในหลอดพลาสติก เติมสารละลายเลดไนเตรดความเข้มข้น 20 mg/L ปริมาตร 50 มิลลิลิตร นำไปเขย่าบนเครื่องเขย่า เวลา 20 นาที 40 นาที 60 นาที 120 นาที และ 240 นาที ที่อุณหภูมิห้อง แยกส่วนใสของสารละลายที่ได้มาวัดปริมาณตะกั่วที่เหลือด้วย AAS จากนั้นนำมาคำนวณค่าความสามารถในการกำจัดตะกั่วของเปลือกหอยทั้งสองชนิด เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ในน้ำกับเวลาที่ใช้

#### 3.3.3.2 ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับตะกั่ว

ชั่งเปลือกหอย 0.01, 0.05, 0.1 และ 0.2 กรัม ขนาดที่เหมาะสม เติมสารละลายเลดไนเตรดความเข้มข้น 20 mg/L ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง แยกส่วนใสของสารละลายที่ได้มาวัดปริมาณตะกั่วที่เหลือด้วย AAS จากนั้นนำมาหาไอโซเทอมการดูดซับโดยเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือ (C) กับปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ (x/m) บนกราฟลอการิทึม พิจารณาตัวดูดซับที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดตะกั่วเพื่อทำคอลัมน์ต่อไป

#### 3.3.3.3 ศึกษาประสิทธิภาพแบบคอลัมน์กับน้ำเสียสังเคราะห์

นำตัวดูดซับที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วปริมาณ 10 กรัม บรรจุลงในคอลัมน์พลาสติกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร ผ่านน้ำตัวอย่างที่ปนเปื้อนตะกั่วความเข้มข้น 20 mg/L ด้วยอัตราเร็วคงที่ 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง มีทิศทางการไหลเป็นแบบไหลลงในคอลัมน์ เก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการกรองตามช่วงเวลามาวัด pH และความเข้มข้นตะกั่วที่เหลือ เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นตะกั่วที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้นเริ่มต้น ( $C_0$ ) กับปริมาตรน้ำ



#### 3.3.3.4 ศึกษาประสิทธิภาพแบบคอสม์กับน้ำเสียจริง

ทำการศึกษาแบบเดียวกับน้ำเสียสังเคราะห์ในข้อ 3.3.3.3 โดยใช้ น้ำเสียจริงจากโรงงานแปดเตอริมาศึกษา โดยก่อนนำน้ำไปใช้ทดลอง ทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 1 คืน วัด pH และปริมาณตะกั่วก่อนการทดลอง วัดปริมาณตะกั่วและ pH หลังผ่านคอสม์ตามช่วงเวลาต่างๆ ที่เหมาะสม เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นตะกั่วที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้นเริ่มต้น ( $C_0$ ) กับปริมาตรน้ำ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล

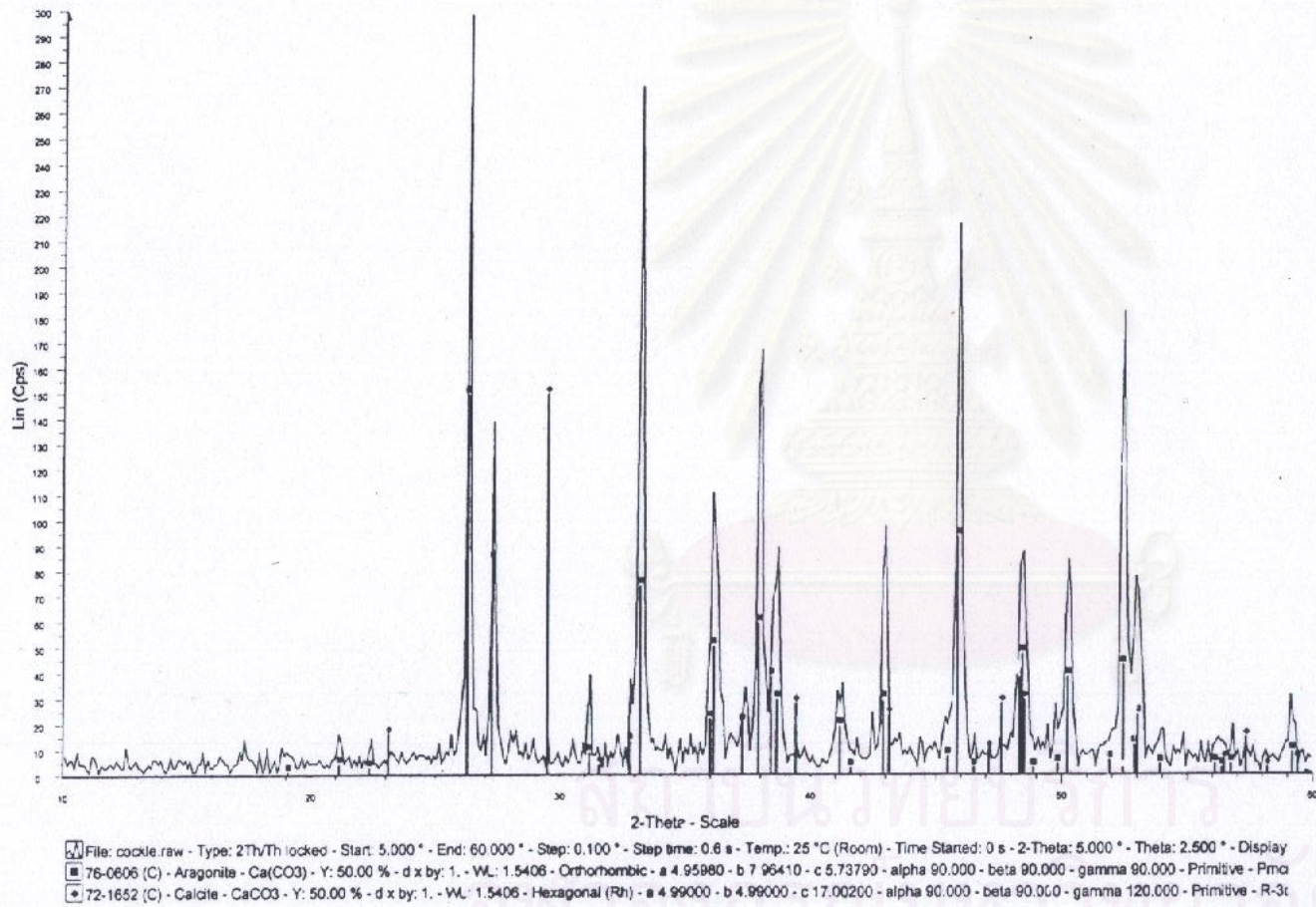
ผลการศึกษาการใช้เปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่ ประกอบด้วยการศึกษาถึงลักษณะพื้นผิวและองค์ประกอบทางเคมีของเปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่ และศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์จากห้องปฏิบัติการและน้ำเสียจริง

#### 4.1 ผลการศึกษาลักษณะเปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่

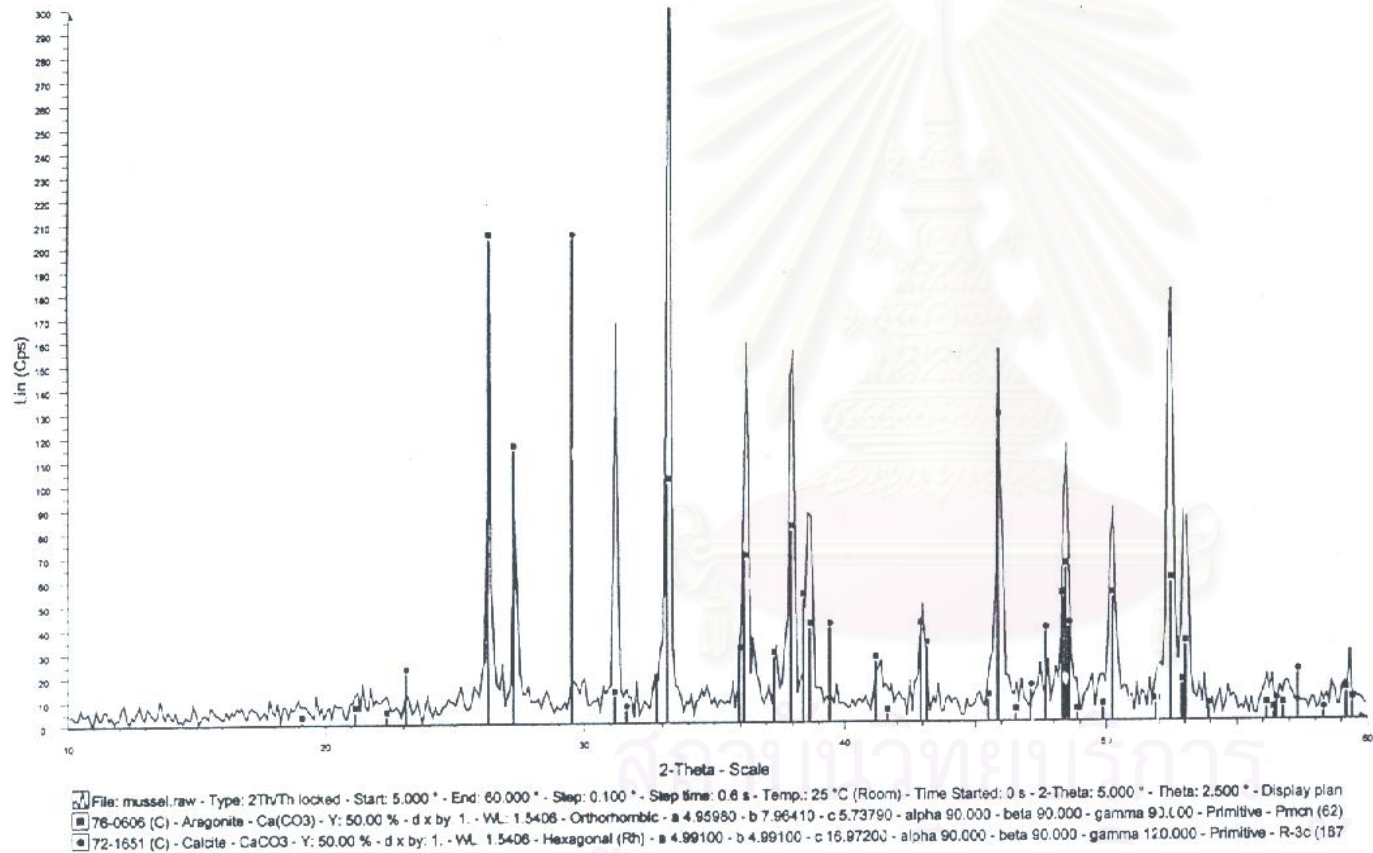
นำเปลือกหอยแครงและหอยแมลงภู่มาทำความสะอาดโดยการล้างน้ำและต้มด้วยน้ำเดือดเพื่อช่วยให้เนื้อเยื่อที่ติดค้างหลุดออก นำเปลือกหอยไปผึ่งให้แห้งและบดให้ละเอียด แร่งให้มีขนาด 10-20 และ 20-60 เมช ล้างให้สะอาดอีกครั้งด้วยน้ำกลั่นบริสุทธิ์ นำเปลือกหอยอบที่อุณหภูมิ 30 °C (อุณหภูมิตากแดดฤดูร้อน) , 100 °C , 130 °C , 200 °C และ 520 °C วิเคราะห์หาปริมาณ  $\text{CaCO}_3$  ด้วย AAS และหาองค์ประกอบของ  $\text{CaCO}_3$  ในรูป calcite และ aragonite ด้วย XRD และดูลักษณะพื้นผิวของเปลือกหอยแครงและหอยแมลงภู่ด้วย SEM วัดพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนด้วย BET พบว่า

##### 4.1.1 การศึกษาองค์ประกอบของเปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่

เปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่มีองค์ประกอบหลักที่สำคัญคือแคลเซียมคาร์บอเนต วิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS พบว่าในเปลือกหอยแต่ละชนิดมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตแตกต่างกันโดยเปลือกหอยแครงมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตประมาณร้อยละ 96.83 ส่วนเปลือกหอยแมลงภู่มีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตประมาณร้อยละ 86.65 และเมื่อทำการตรวจหาองค์ประกอบของเปลือกหอยทั้ง 2 ชนิดด้วย XRD พบว่าเปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่มีแคลเซียมคาร์บอเนตทั้งรูป aragonite และ calcite แสดงไว้ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 แสดง CaCO<sub>3</sub> รูป aragonite และ calcite ของเปลือกหอยแครง



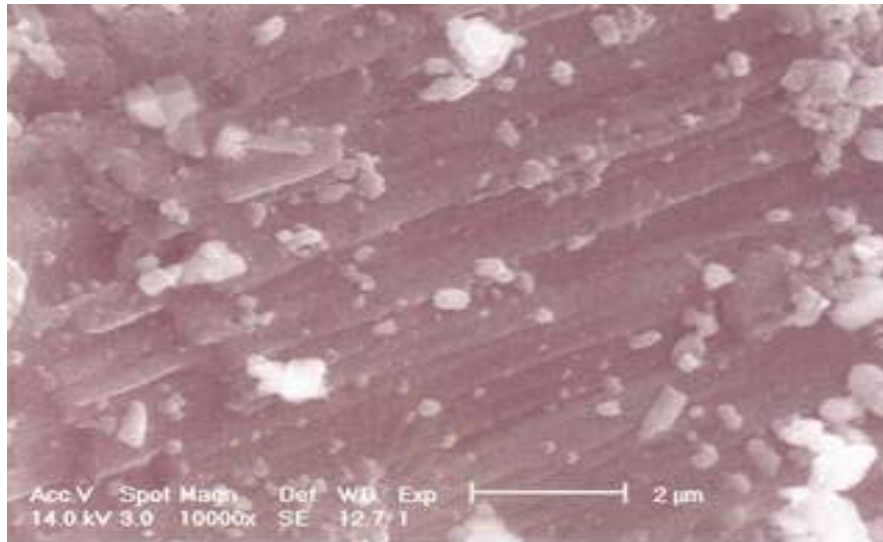
รูปที่ 4.2 แสดง CaCO<sub>3</sub> รูป aragonite และ calcite ของเปลือกหอยแมลงภู

#### 4.1.3 พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนของเปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่

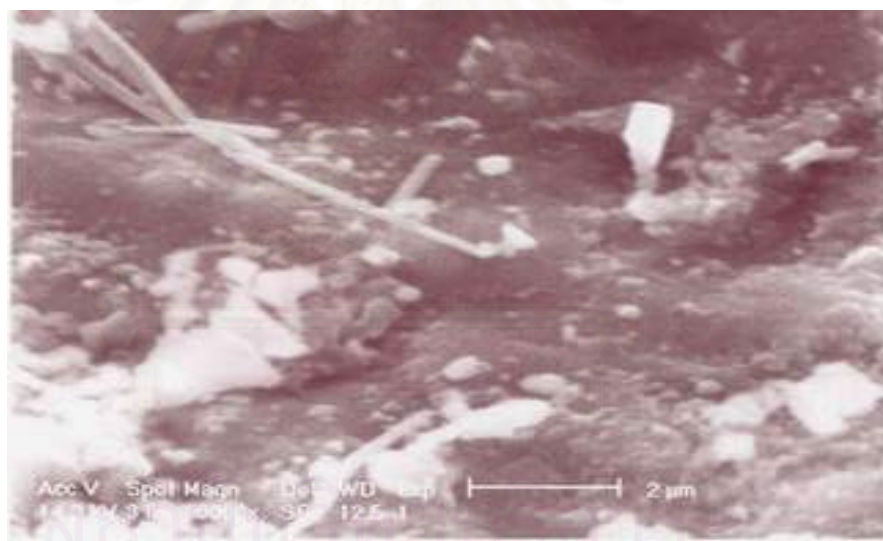
ผลการตรวจวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) โดยวิธี BET พบว่าเปลือกหอยแครงขนาด 20-60 เมช มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 0.7572 ตารางเมตรต่อกรัม ในขณะที่พื้นที่ผิวจำเพาะของเปลือกหอยแมลงภู่ขนาด 20-60 เมช มีค่าเพียง 0.1260 ตารางเมตรต่อกรัม เห็นได้ว่าเปลือกหอยแครงมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าเปลือกหอยแมลงภู่ และขนาดรูพรุนของเปลือกหอยแครงมีค่า 78.0138 อังสตรอม ในขณะที่เปลือกหอยแมลงภู่ไม่สามารถบอกขนาดรูพรุนได้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.3 ลักษณะพื้นผิวของเปลือกหอยแครงจากกล้อง SEM กำลังขยาย 10,000 เท่า



รูปที่ 4.4 ลักษณะพื้นผิวของเปลือกหอยแมลงภู่มจากกล้อง SEM กำลังขยาย 10,000 เท่า

## 4.2 ผลการศึกษาความสามารถในการกำจัดตะกั่วแบบไม่ต่อเนื่อง (batch test)

### 4.2.1 ผลการศึกษาเบื้องต้น

ผลการทดสอบแบบไม่ต่อเนื่อง ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 20 mg/L ปริมาตร 50 ml pH 5.05 ซึ่งเป็น pH จากการละลายของ  $Pb(NO_3)_2$  ในน้ำกลั่น เขย่าในเวลาต่างๆ กัน วัด pH และปริมาณตะกั่วที่เหลือในสารละลาย ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1

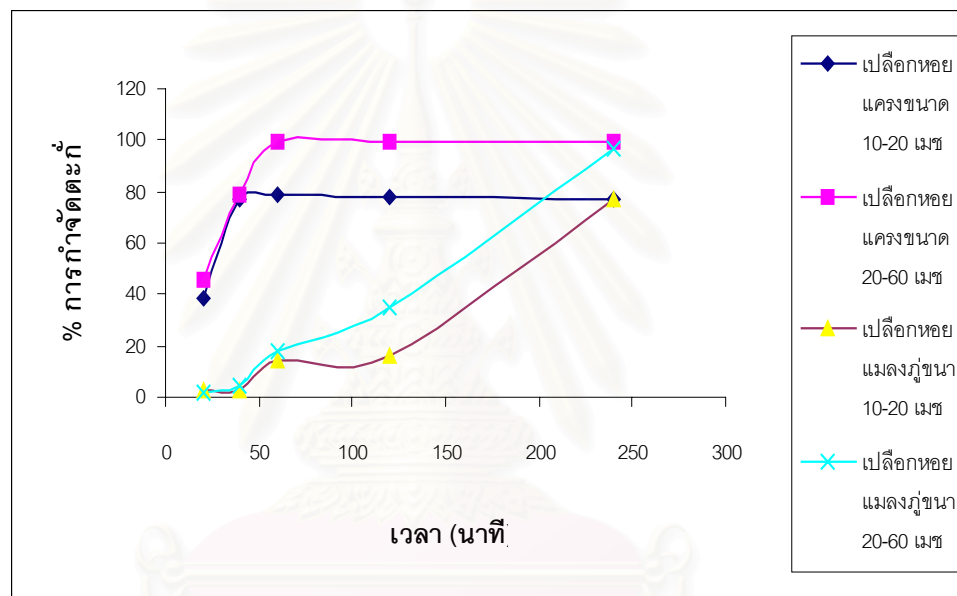
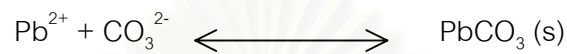
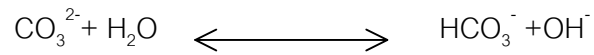
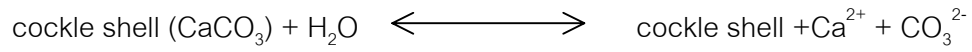
ตารางที่ 4.1 แสดงความสามารถการกำจัดตะกั่วโดยใช้เปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่ ขนาด 10-20 เมช และ 20-60 เมช

ชนิดตัวดูดซับ	เวลา (นาที)									
	20		40		60		120		240	
	pH	% R	pH	% R	pH	% R	pH	% R	pH	% R
เปลือกหอยแครงขนาด 10-20 เมช	5.39	38.76	5.70	77.25	6.54	79.22	6.58	78.35	6.55	77.02
เปลือกหอยแครงขนาด 20-60 เมช	5.19	45.85	5.43	78.66	6.61	99.48	6.67	99.62	6.68	99.59
เปลือกหอยแมลงภู่ขนาด 10-20 เมช	5.10	2.86	5.16	2.25	5.25	14.43	5.28	16.13	5.67	77.00
เปลือกหอยแมลงภู่ขนาด 20-60 เมช	5.11	1.60	5.17	4.06	5.25	17.53	5.50	34.86	5.97	97.14

% R หมายถึง เปอร์เซ็นต์การกำจัดตะกั่ว (lead removal)

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าค่า pH ของสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 5.05 มาอยู่ในช่วง 5.1-6.6 เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกหอยเกิดการละลายน้ำจะให้สารละลายที่เป็นเบส ทั้งนี้เพราะเกลือของกรดอ่อนและเบสแก่ละลายน้ำแตกตัวเป็นแอนไอออนและแคตไอออน แอนไอออนของกรดอ่อนละลายน้ำได้  $OH^-$  (Brown and Lemay, 1985) และแคลเซียมไอออนเป็นแคตไอออนของเบสแก่เมื่อละลายน้ำจึงทำให้พีเอชเพิ่มขึ้น ส่วน  $CO_3^{2-}$  จับกับไอออนของตะกั่วเกิดเป็น  $PbCO_3(s)$  โดยในการทดลองนี้ใช้เวลาน้อยที่สุดคือ 20 นาที เปลือกหอยแครงขนาด 20-60 เมช สามารถกำจัดตะกั่วได้ถึง 45.85 % และเมื่อเวลาผ่านไปหนึ่งชั่วโมง การกำจัดตะกั่วเพิ่มขึ้นจนถึง 99.48 % เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การกำจัดตะกั่วเพิ่มขึ้นอีกเพียงเล็กน้อย สังเกตได้ว่าเปลือกหอยแครงสามารถกำจัดตะกั่วได้ดีกว่าเปลือกหอยแมลงภู่ในเวลาสัมผัสเท่ากันแต่หลังจากเวลาผ่านไป 240 นาที เปลือกหอยแมลงภู่สามารถกำจัดตะกั่วได้ถึง 97.14 % และเปลือกหอย

ขนาด 20-60 เมช สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีกว่าขนาด 10-20 เมช เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดตะกั่วโดยใช้เปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภูที่เวลาต่างกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



#### 4.3 ผลการศึกษาไอโซเทอร์ม

จากการทดลองกำจัดตะกั่ว โดยใช้เปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่ในปริมาณต่างๆ กันและใช้น้ำตะกั่วสังเคราะห์ความเข้มข้น 20 mg/L ปริมาตร 50 มิลลิลิตร pH 5.05 ซึ่งเป็น pH จากการละลายของ  $Pb(NO_3)_2$  ในน้ำกลั่น เขย่าเป็นเวลา 1 ชั่วโมง วัด pH และปริมาณตะกั่วที่เหลือในสารละลาย ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3 เขียนกราฟไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วตามสมการ Freundlich ได้ดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 อ่านค่าคงที่ K และ  $1/n$  จากกราฟตามสมการ Freundlich

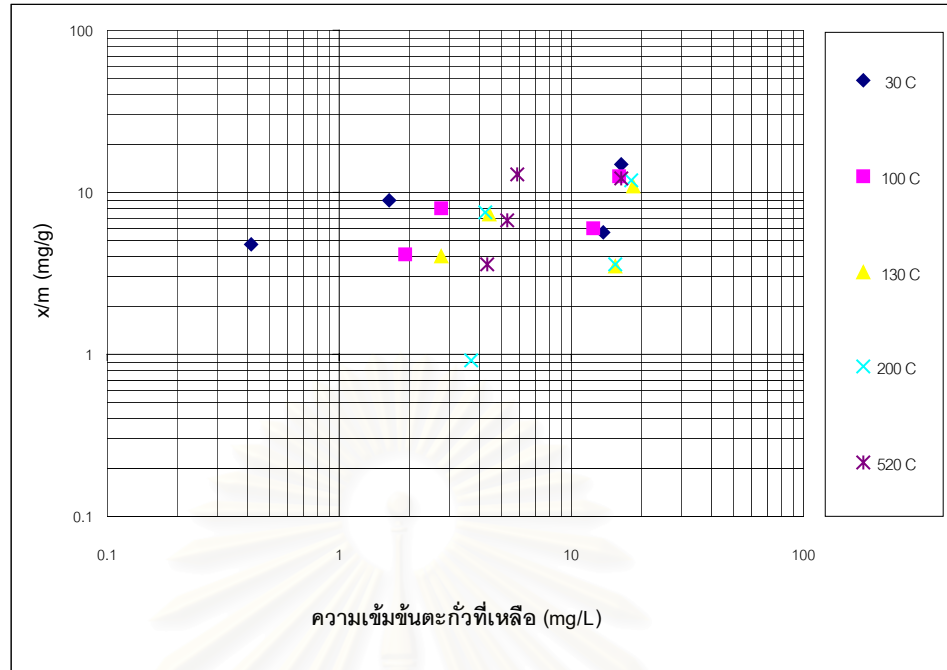
จากตารางที่ 4.4 สามารถนำมาอธิบายเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับระหว่างเปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่ได้ว่าเปลือกหอยแครงมีค่า K สูงกว่าเปลือกหอยแมลงภู่ทุกอุณหภูมิ แสดงว่าเปลือกหอยแครงมีความสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีกว่าเปลือกหอยแมลงภู่ โดยที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสหรืออุณหภูมิตากแดดฤดูร้อนมีค่า K สูงที่สุด ดังนั้นเปลือกหอยที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดน้ำเสียได้แก่เปลือกหอยแครงขนาด 20-60 เมช ตากแดดฤดูร้อน โดยทั่วไปเมื่อเส้นไอโซเทอมความชันมากจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงเมื่อนำไปใช้ในระบบสัมผัส ส่วนเส้นไอโซเทอมความชันน้อยจะเหมาะสมที่จะใช้ในการบำบัดน้ำเสียแบบแบตช์

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการศึกษาไอโซเทอมของเปลือกหอยแครง

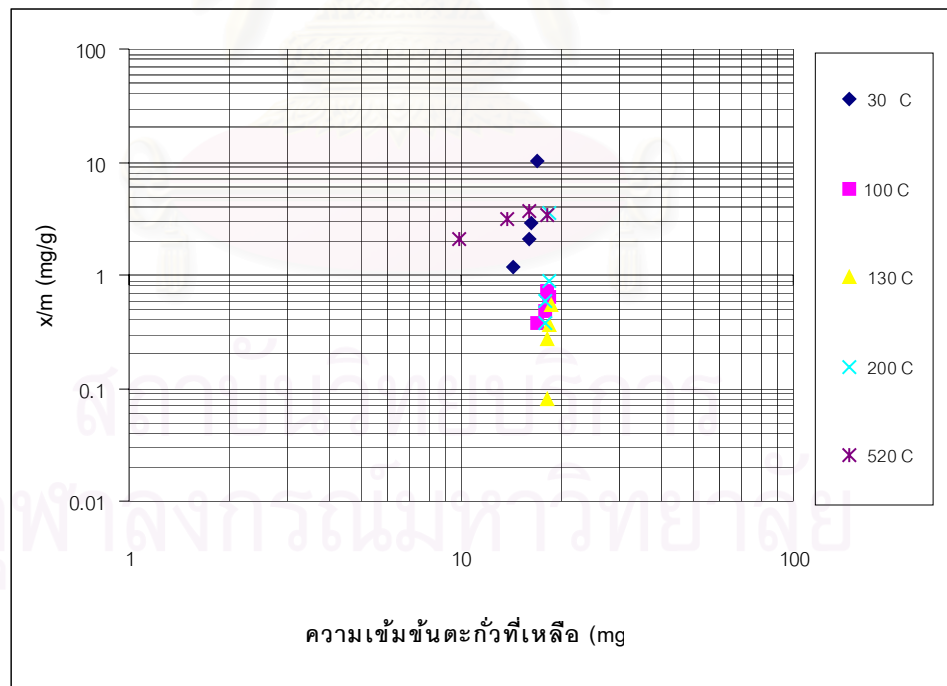
ชนิดตัวดูดซับ	น้ำหนัก (กรัม)	pH			ความเข้มข้นตะกั่ว (mg/L)				x/m (mg/g)	% Removal
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
เปลือกหอยแครง	0.00	5.05	5.05	5.05	19.28	19.28	19.28	19.28	-	0.00
ขนาด 20-60 เมช	0.01	5.28	5.49	5.48	16.02	16.48	16.51	16.34	14.70	15.25
ที่อุณหภูมิ	0.05	5.81	5.82	5.82	13.75	13.72	13.41	13.63	5.65	29.31
30 องศาเซลเซียส	0.10	6.76	6.82	6.86	-	1.84	1.41	1.63	8.83	93.05
	0.20	6.74	6.66	6.64	0.32	0.55	0.39	0.42	4.72	97.82
เปลือกหอยแครง	0.00	5.09	5.09	5.09	18.62	18.62	18.62	18.62	-	0.00
ขนาด 20-60 เมช	0.01	5.56	5.75	5.6	15.95	16.31	16.04	16.10	12.60	13.53
ที่อุณหภูมิ	0.05	5.84	5.84	5.85	12.98	12.49	12.21	12.56	6.06	32.55
100 องศาเซลเซียส	0.10	6.43	6.21	6.53	-	2.78	2.71	2.74	7.94	94.58
	0.20	6.5	6.61	6.53	1.97	1.93	1.87	1.92	4.18	97.26
เปลือกหอยแครง	0.00	5.06	5.06	5.06	18.96	18.96	18.96	18.96	-	0.00
ขนาด 20-60 เมช	0.01	5.31	5.39	5.26	18.43	18.36	18.37	18.39	10.90	3.01
ที่อุณหภูมิ	0.05	5.77	5.67	5.51	-	15.15	15.70	15.43	3.53	22.73
130 องศาเซลเซียส	0.10	6.34	6.55	6.04	4.61	4.58	4.23	4.47	7.25	75.69
	0.20	6.75	7.98	7.77	2.55	2.84	2.91	2.77	4.05	84.94
เปลือกหอยแครง	0.00	5.10	5.10	5.10	19.17	19.17	19.17	19.17	-	0.00
ขนาด 20-60 เมช	0.01	6.17	6.08	5.99	18.44	18.03	18.30	18.26	11.80	4.75
ที่อุณหภูมิ	0.05	6.32	6.23	6.68	15.63	-	15.46	15.55	3.62	22.43
200 องศาเซลเซียส	0.10	8.23	7.91	8.19	-	4.62	3.90	4.26	7.46	71.47
	0.20	8.76	8.83	8.61	3.60	-	3.79	3.70	0.93	84.77
เปลือกหอยแครง	0.00	5.07	5.07	5.07	18.87	18.87	18.87	18.87	-	0.00
ขนาด 20-60 เมช	0.01	5.55	5.65	5.66	17.98	15.28	16.07	16.44	12.15	12.88
ที่อุณหภูมิ	0.05	5.94	5.95	5.91	6.28	-	5.50	5.89	12.98	60.73
520 องศาเซลเซียส	0.10	6.00	6.31	6.33	5.22	7.51	3.01	5.25	6.81	72.18
	0.20	6.76	6.79	6.98	4.12	4.59	-	4.36	3.63	81.40

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการศึกษาไอโซเทอมของเปลือกหอยแมลงภู

ชนิดตัวดูดซับ	น้ำหนัก (กรัม)	pH			ความเข้มข้นตะกั่ว (mg/L)				x/m (mg/g)	% Removal
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
เปลือกหอยแมลงภู	0.00	5.05	5.05	5.05	19.10	19.10	19.10	19.10	-	0.00
ขนาด 20-60 เมช	0.01	5.31	4.83	4.88	17.04	16.93	17.08	17.02	10.40	10.89
ที่อุณหภูมิ	0.05	5.21	4.84	5.26	16.18	16.49	16.02	16.23	2.87	15.03
30 องศาเซลเซียส	0.10	5.51	5.56	5.75	15.29	16.75	-	16.02	1.54	22.15
	0.20	5.72	5.75	5.42	14.45	14.43	14.00	14.29	1.20	25.18
เปลือกหอยแมลงภู	0.00	5.11	5.11	5.11	18.64	18.64	18.64	18.64	-	0.00
ขนาด 20-60 เมช	0.01	5.17	4.98	4.31	18.63	18.33	18.58	18.51	0.65	0.70
ที่อุณหภูมิ	0.05	5.15	5.31	5.02	18.16	18.12	-	18.14	0.50	3.92
100 องศาเซลเซียส	0.10	5.37	5.22	5.43	18.06	-	17.97	18.02	0.31	5.20
	0.20	5.63	5.8	5.85	-	16.78	16.92	16.85	0.45	8.21
เปลือกหอยแมลงภู	0.00	5.07	5.07	5.07	18.71	18.71	18.71	18.71	-	0.00
ขนาด 20-60 เมช	0.01	5.38	5.34	5.27	18.61	18.56	18.64	18.60	0.55	0.59
ที่อุณหภูมิ	0.05	5.39	5.37	5.33	18.28	18.32	18.44	18.35	0.36	1.92
130 องศาเซลเซียส	0.10	5.63	5.39	5.34	18.10	18.21	18.24	18.18	0.27	2.84
	0.20	5.65	5.72	5.62	18.17	18.05	-	18.11	0.15	4.22
เปลือกหอยแมลงภู	0.00	5.07	5.07	5.07	19.17	19.17	19.17	19.17	-	0.00
ขนาด 20-60 เมช	0.01	5.7	5.71	5.72	18.85	18.65	17.88	18.46	3.55	3.70
ที่อุณหภูมิ	0.05	6.05	6.03	6.04	18.43	17.97	18.48	18.29	0.88	4.59
200 องศาเซลเซียส	0.10	6.95	7.04	6.92	17.90	17.96	18.05	17.97	0.60	6.26
	0.20	8.85	9.13	9.12	-	17.95	18.10	18.03	0.29	7.93
เปลือกหอยแมลงภู	0.00	5.05	5.05	5.05	18.87	18.87	18.87	18.87	-	0.00
ขนาด 20-60 เมช	0.01	5.29	4.99	4.44	18.45	18.09	18.07	18.20	3.35	3.55
ที่อุณหภูมิ	0.05	5.36	5.29	5.4	16.34	15.50	-	15.92	2.95	19.66
520 องศาเซลเซียส	0.10	5.69	5.62	5.64	14.16	-	13.22	13.69	2.59	32.64
	0.20	5.74	5.76	5.77	9.62	-	10.12	9.87	2.25	43.46



รูปที่ 4.6 ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของเปลือกหอยแครงขนาด 20-60 เมช  
อบที่อุณหภูมิต่างกัน



รูปที่ 4.7 ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของเปลือกหอยแมลงภู่นขนาด 20-60 เมช  
อบที่อุณหภูมิต่างกัน

จากการทดลองกำจัดตะกั่วด้วยเปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่ โดยใช้เปลือกหอยในปริมาณต่างๆ กันโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 20 mg/L ปริมาตร 50 ml เขย่าในหลอดพลาสติกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง วัด pH และวัดปริมาณตะกั่วที่เหลือในสารละลาย นำผลที่ได้มาเขียนกราฟไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วตามสมการ Freundlich อ่านค่าคงที่ K และ 1/n (ดูการคำนวณจากภาคผนวก ข)

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าคงที่การดูดซับจากสมการ Freundlich

อุณหภูมิ (°C)	เปลือกหอยแครง		เปลือกหอยแมลงภู่	
	1/n	K (mg/g)	1/n	K (mg/g)
30	0.3122	$9.46 \times 10^5$	2.7922	$6.01 \times 10^{-41}$
100	0.3477	$6.3 \times 10^4$	0.1781	$2.3 \times 10^{-3}$
130	0.1887	$3.13 \times 10^4$	0.8612	$3.52 \times 10^{-16}$
200	0.3414	$2.44 \times 10^2$	5.5281	$1.55 \times 10^{-99}$
520	0.4534	$1.87 \times 10^5$	0.1761	3.2218

สมการ Freundlich

$$x/m = KC^{1/n}$$

$$\log (x/m) = \log K + (1/n) \log C$$

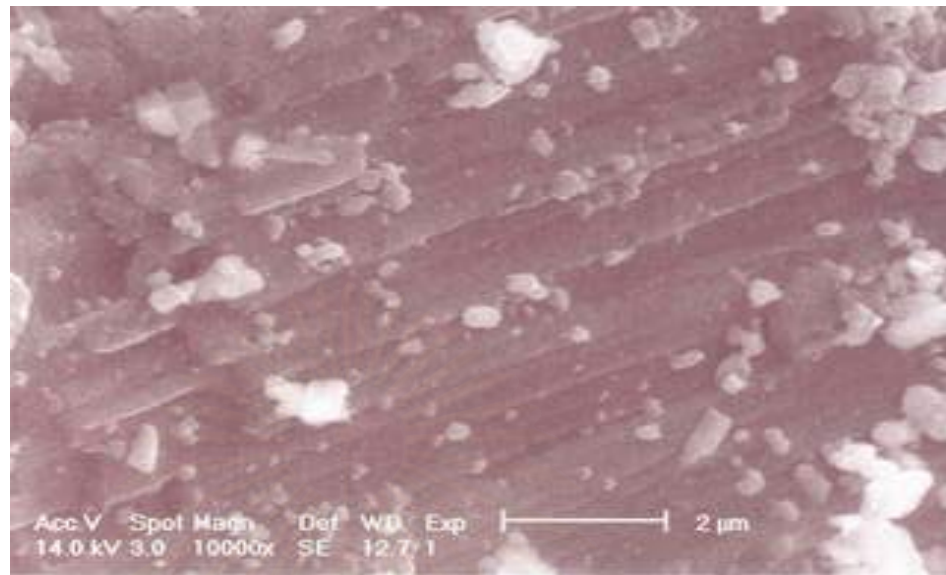
จากกราฟเส้นตรงในสเกล log-log สามารถอ่านค่า K และ 1/n ได้โดย K=ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับและ 1/n = ความชันของเส้นตรง

#### 4.4 ผลการศึกษากลไกการกำจัดตะกั่วด้วยเปลือกหอยแครง

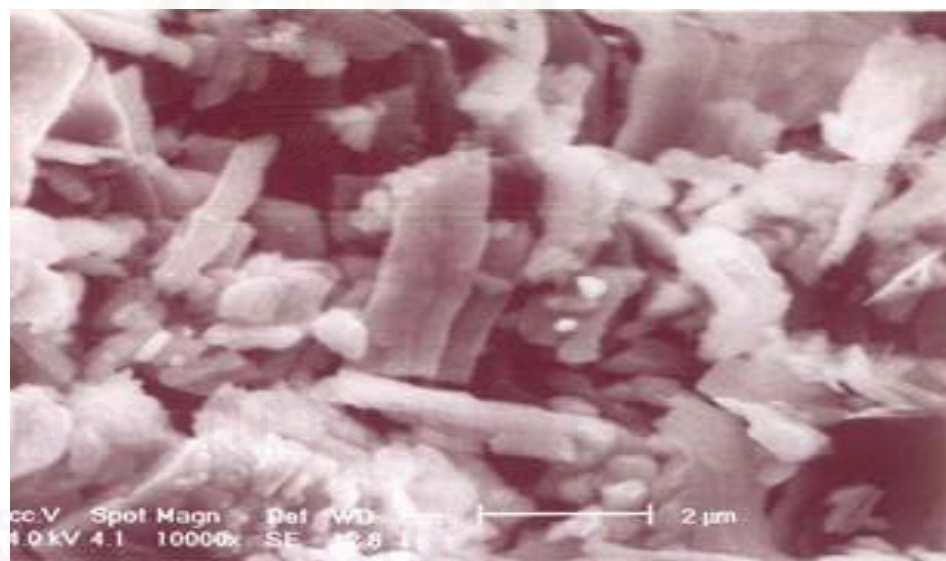
นำเปลือกหอยแครงขนาด 20-60 เมช ปริมาณ 1 กรัม มาเขย่ากับน้ำที่ปนเปื้อนตะกั่ว ความเข้มข้น 1,000 mg/L ปริมาตร 20 ml นำเปลือกหอยแครงหลังที่ผ่านการกำจัดตะกั่วมา วิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM และ XRF เพื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของเปลือกหอยแครงก่อน และหลังการกำจัดตะกั่ว และตรวจหาชนิดของสารประกอบก่อนและหลังการกำจัดตะกั่ว จาก การศึกษาพบว่าเปลือกหอยแครงก่อนการกำจัดตะกั่วจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสเป็นริ้วเห็นได้ชัด ส่วน ลักษณะพื้นผิวหลังจากการเขย่ากับน้ำที่ปนเปื้อนตะกั่วความเข้มข้น 1,000 mg/L ปริมาตร 20 ml พบว่าหอยแครงมีผลึกรูปเข็มมาเกาะอย่างหนาแน่นซึ่งน่าจะเป็นผลึกของ currusite ตามรูปที่ 4.8 b) และจากการตรวจวิเคราะห์โลหะด้วย XRF พบว่าเปลือกหอยแครงก่อนการกำจัดตะกั่ว ประกอบด้วยแคลเซียม (Ca) เหล็ก (Fe) และสตรอนเชียม (Sr) แต่หลังจากการกำจัดตะกั่วแล้ว โลหะที่พบประกอบด้วยแคลเซียม (Ca) เหล็ก (Fe) สตรอนเชียม (Sr) และตะกั่ว (Pb) จากรูปที่ 4.13 และ 4.14

การกำจัดตะกั่วเกิดขึ้นเนื่องจากการละลายของแคลเซียมคาร์บอเนตจากผิวกระดองปู แล้วเกิดการตกผลึกเป็นตะกั่วคาร์บอเนตไถ่ๆ ผิวกระดองปูบริเวณที่มีความเข้มข้นของ คาร์บอเนตไอออนสูง (Lee et al,1997) และจากการศึกษาของ (Suzuki et.al., 1994) พบว่า ทรายปะการังซึ่งอบที่อุณหภูมิต่างกันมีความสามารถในการกำจัดตะกั่วจะต่างกันโดย  $\text{CaCO}_3$  ในรูป aragonite มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วดีกว่ารูป calcite จากการทดลองพบว่า เปลือกหอยแครงซึ่งอบที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นรูป aragonite มีความสามารถในการกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Suzuki และคณะ เหตุผลหนึ่งที่น่า จะเกิดขึ้นในการกำจัดตะกั่วคือปฏิกิริยาการแทนที่ (displacement) โดยไอออนของตะกั่วเข้า แทนที่แคลเซียมไอออนในแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเป็นโครงสร้างของเปลือกหอยแครง เนื่องจาก ค่า  $K_{sp}$  (solubility product constant) ของ  $\text{CaCO}_3$  สูงกว่าค่า  $K_{sp}$  ของ  $\text{PbCO}_3$  ( $K_{sp} \text{CaCO}_3 = 4.8 \times 10^{-9}$ ,  $K_{sp} \text{PbCO}_3 = 1.58 \times 10^{-13}$ ) จึงเกิดเป็น  $\text{PbCO}_3$  (s)

จากงานวิจัยที่มีผู้ศึกษาไว้แล้วข้างต้นประกอบกับผลการศึกษา คาดว่าการกำจัดตะกั่วที่ เกิดขึ้นน่าจะมาจากการละลายของแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแครงแล้วเกิดการตกผลึก (precipitation) กับไอออนตะกั่วบริเวณใกล้ผิวเปลือกหอยแครงซึ่งมีความเข้มข้นคาร์บอเนต ไอออนสูงพอที่จะทำให้ผลคูณการละลายมีค่ามากกว่าค่า  $K_{sp}$  ของ  $\text{PbCO}_3$  จึงได้เป็นตะกั่ว คาร์บอเนตและมีน้ำล้อมรอบ 2 โมเลกุล ( $\text{PbCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) แล้วเกิดการดูดซับ (adsorption) บนผิว เปลือกหอยแครง



a) ลักษณะพื้นผิวเปลือกหอยแครงก่อนการกำจัดตะกั่วจากถัอง SEM กำลังขยาย 10,000 เท่า



b) ลักษณะพื้นผิวเปลือกหอยแครงหลังการกำจัดตะกั่วจากถัอง SEM กำลังขยาย 10,000 เท่า

รูปที่ 4.8 ภาพถ่าย SEM บนผิวเปลือกหอยแครงก่อนและหลังการกำจัดตะกั่ว

#### 4.5 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วโดยใช้คอลัมน์

จากการทดลองศึกษาแบบไม่ต่อเนื่องข้างต้นพบว่าเปลือกหอยแครงขนาด 20-60 เมช เป็นวัสดุที่เหมาะสมในการนำมากำจัดตะกั่ว และเมื่อนำมาทดสอบแบบต่อเนื่องโดยใช้คอลัมน์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 เซนติเมตร ใช้เปลือกหอยแครงปริมาณ 10 กรัม ทิศทางการไหลแบบไหลลง (down flow) อัตราเร็วคงที่ 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง ทำการเก็บตัวอย่างที่ผ่านคอลัมน์ตามช่วงเวลาที่เหมาะสม นำมาวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วที่เหลือ นำข้อมูลที่ได้มาสร้าง Breakthrough Curve ระหว่าง % ความเข้มข้นตะกั่วที่เหลือ ( C ) ต่อความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น (C<sub>0</sub>) กับ ปริมาตรของน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ เมื่อใช้หน่วยปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านเป็นค่าปริมาตรบรรจุของคอลัมน์ (Bed Volume :BV) โดยปริมาตรน้ำ 1 BV = 6.52 มิลลิลิตร



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



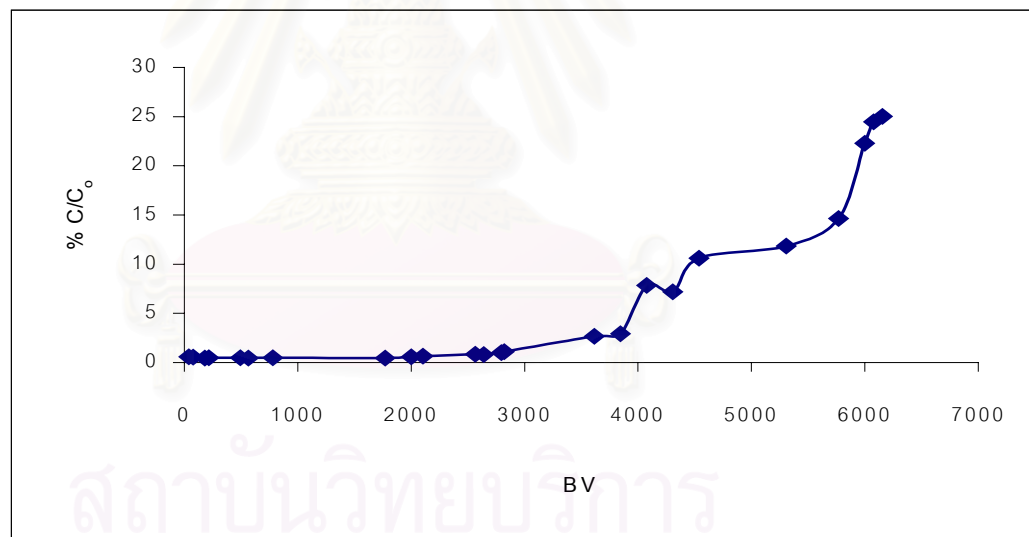
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความเข้มข้นตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านคอลัมน์บรรจุเปลือกหอย  
 แครงขนาด 20-60 เมช หนัก 10 กรัม

เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	Bed Volume(BV)	pH	ความเข้มข้น ตะกั่ว(mg/L)	% (C/C <sub>0</sub> )
30	0.25	38.46	8.87	0.12	0.60
60	0.50	76.92	8.85	0.11	0.55
140	1.17	179.49	8.88	0.09	0.45
170	1.42	217.95	8.89	0.10	0.50
335	2.79	429.49	8.74	0.10	0.50
440	3.67	564.10	8.79	0.09	0.45
610	5.08	782.05	8.78	0.10	0.50
1380	11.50	1769.23	8.88	0.09	0.45
1560	13.00	2000.00	8.56	0.12	0.60
1640	13.67	2102.56	8.51	0.13	0.65
2000	16.67	2564.10	8.32	0.17	0.86
2060	17.17	2641.03	8.11	0.16	0.81
2180	18.17	2794.87	7.84	0.20	1.01
2200	18.33	2820.51	7.65	0.22	1.11
2820	23.50	3615.38	7.46	0.53	2.67
3000	25.00	3846.15	7.33	0.58	2.92
3180	26.50	4076.92	6.87	1.56	7.85
3360	28.00	4307.69	6.83	1.43	7.20
3540	29.50	4538.46	6.79	2.11	10.62
4140	34.50	5307.69	6.67	2.35	11.83
4500	37.50	5769.23	6.55	2.91	14.65
4680	39.00	6000.00	6.42	4.43	22.29
4740	39.50	6076.92	6.38	4.86	24.46
4800	40.00	6153.85	6.35	4.97	25.01

\*ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น (C<sub>0</sub>) เท่ากับ 19.87 mg/L



รูปที่ 4.9 Breakthrough Curve แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำเสียปนเปื้อน ตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 19.87 mg/L กับ % C/C<sub>0</sub>.



รูปที่ 4.10 Breakthrough Curve แสดงความสัมพันธ์ของ BV และ % C/C<sub>0</sub>.

เมื่อน้ำตะกั่วสังเคราะห์ซึ่งมี pH 5.11 ผ่านคอลัมน์บรรจุเปลือกหอยซึ่งมี  $\text{CaCO}_3$  เป็นองค์ประกอบพบว่า น้ำที่ผ่านคอลัมน์มี pH อยู่ในช่วง 6.3 – 8.8 แสดงผลดังตารางที่ 4.2 ในช่วงแรกน้ำมี pH สูงถึง 8.8 เนื่องมาจากการละลายของ  $\text{CaCO}_3$  เป็น  $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{CO}_3^{2-}$  ซึ่งเป็นปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของกรดอ่อน-เบสแก่และการละลายของเบสแก่ ซึ่งสามารถกำจัดตะกั่วได้ดี เนื่องจาก  $\text{CO}_3^{2-}$  และอิออนของตะกั่วเกิดการตกตะกอน (precipitation) เป็นผลึก  $\text{PbCO}_3$  มาเกาะบริเวณพื้นผิวเปลือกหอย เมื่อเวลาผ่านไป pH ของน้ำที่ผ่านคอลัมน์ค่อยๆ ลดลง ส่วนความเข้มข้นของตะกั่วค่อยๆ เพิ่มขึ้น เนื่องจาก  $\text{CO}_3^{2-}$  ถูกใช้ไปเรื่อยๆ พื้นที่ผิวเปลือกหอยค่อยๆ ลดลงเนื่องจากการเกาะติดของ  $\text{PbCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  บนผิวเปลือกหอยแฉง

จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 จะเห็นว่าสามารถใช้เปลือกหอยแฉงขนาด 20 – 60 เมช อบที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสสามารถบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ได้ปริมาณสูงถึง 2795 เท่าของปริมาณบรรจุเปลือกหอยของคอลัมน์หรือประมาณ 18 ลิตร ก่อนที่น้ำที่ผ่านคอลัมน์จะมีปริมาณตะกั่วเกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมกำหนด (0.2 mg/L)

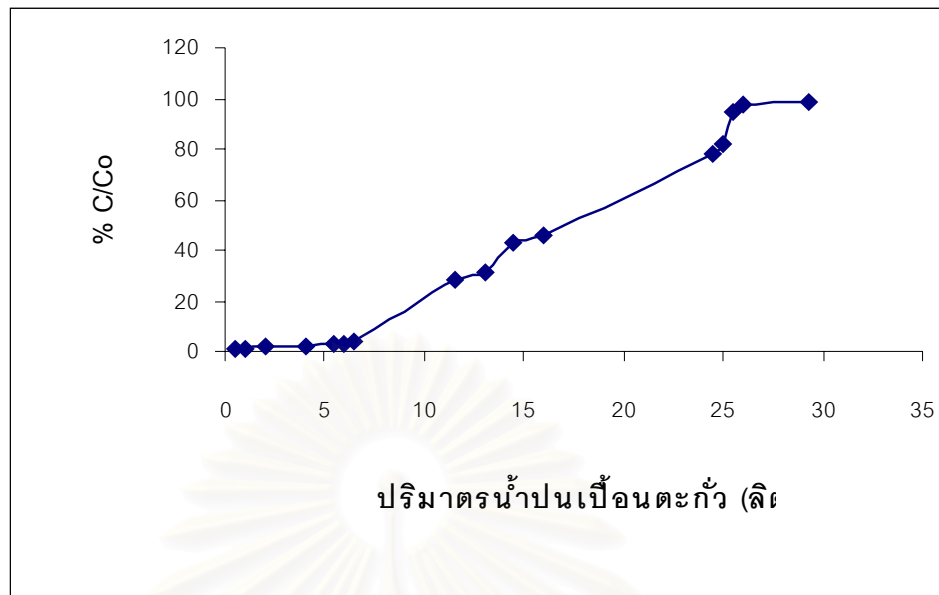
เมื่อน้ำผ่านคอลัมน์จนกระทั่ง pH ลดเหลือ 6.3 ซึ่งเป็นค่าที่  $\text{PbCO}_3$  อยู่ในรูปที่เริ่มจะไม่เสถียร ดังนั้นโอกาสที่ตะกั่วจะถูกจับในรูป  $\text{PbCO}_3$  นั้นค่อนข้างน้อย แต่ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าคอลัมน์ยังสามารถกำจัดตะกั่วได้ค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลสนับสนุนได้ว่าอาจเกิดการแลกเปลี่ยนอิออนบริเวณพื้นผิวเปลือกหอยร่วมด้วย โดย  $\text{Pb}^{2+}$  เข้าแทนที่  $\text{Ca}^{2+}$  ทำให้เกิด  $\text{PbCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  บนพื้นผิวเปลือกหอยจึงสามารถกำจัดตะกั่วได้เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความเข้มข้นตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานแบตเตอรี่หลังผ่านคอลัมน์  
บรรจุเปลือกหอยแครงขนาด 20-60 เมช หนัก 10 กรัม

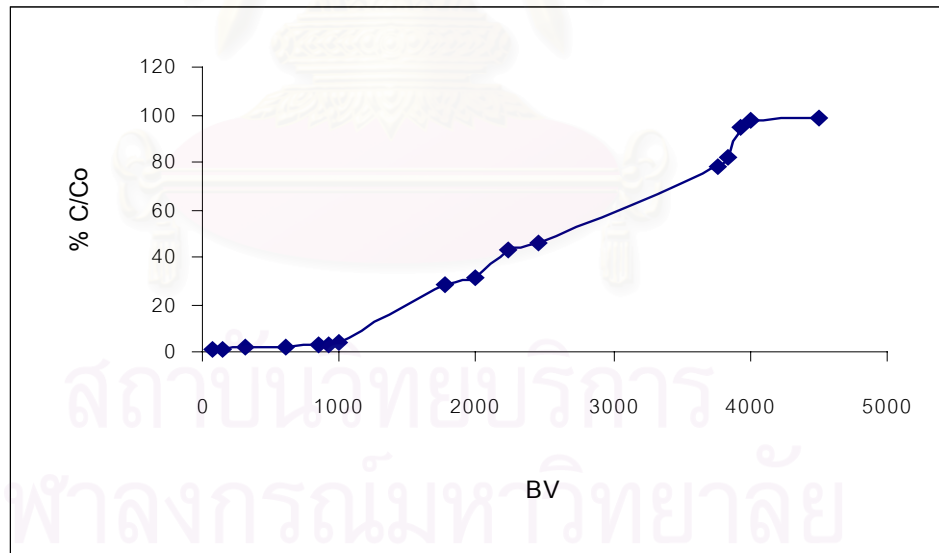
เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	Bed Volume(BV)	pH	ความเข้มข้นตะกั่ว( mg/L)	%(C/C <sub>0</sub> )
60	0.50	76.92	8.87	0.08	1.34
120	1.00	153.85	8.85	0.07	1.17
240	2.00	307.69	8.88	0.09	1.51
480	4.00	615.38	8.74	0.11	1.84
660	5.50	846.15	8.79	0.15	2.51
720	6.00	923.08	8.79	0.19	3.18
780	6.50	1000.00	7.76	0.21	3.51
1380	11.50	1769.23	7.08	1.71	28.60
1560	13.00	2000.00	6.85	1.86	31.10
1740	14.50	2230.77	6.74	2.56	42.81
1920	16.00	2461.54	6.67	2.73	45.65
2940	24.50	3769.23	6.44	4.67	78.09
3000	25.00	3846.15	6.02	4.92	82.27
3060	25.50	3923.08	5.42	5.66	94.65
3120	26.00	4000.00	5.37	5.81	97.16
3510	29.25	4500.00	5.26	5.88	98.33

\*ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น (C<sub>0</sub>) เท่ากับ 5.98 mg/L

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.11 Breakthrough Curve แสดงความสัมพันธ์ของน้ำเสียปนเปื้อนตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 5.98 mg/l กับ % C/Co

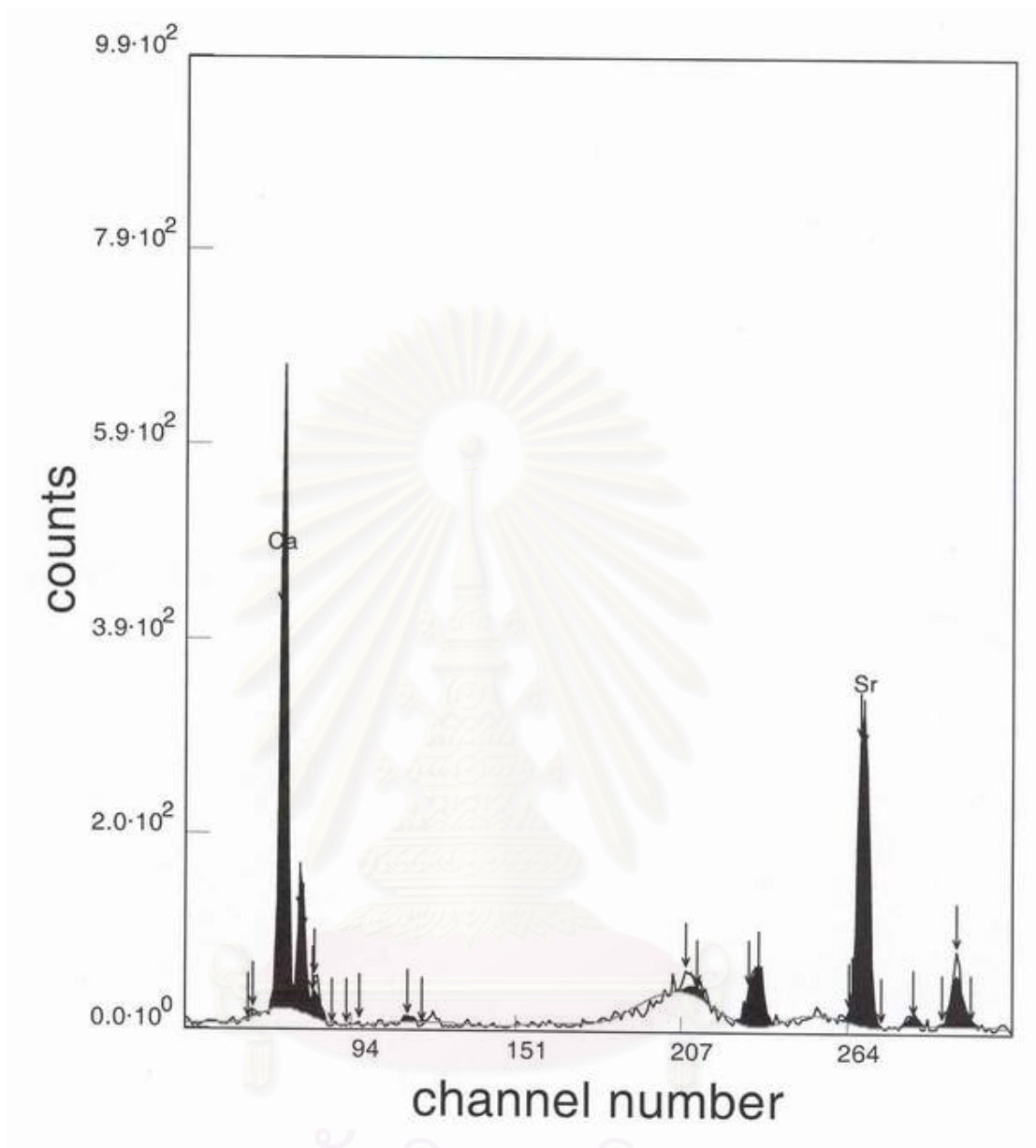


รูปที่ 4.12 Breakthrough Curve แสดงความสัมพันธ์ของ BV กับ % C/Co

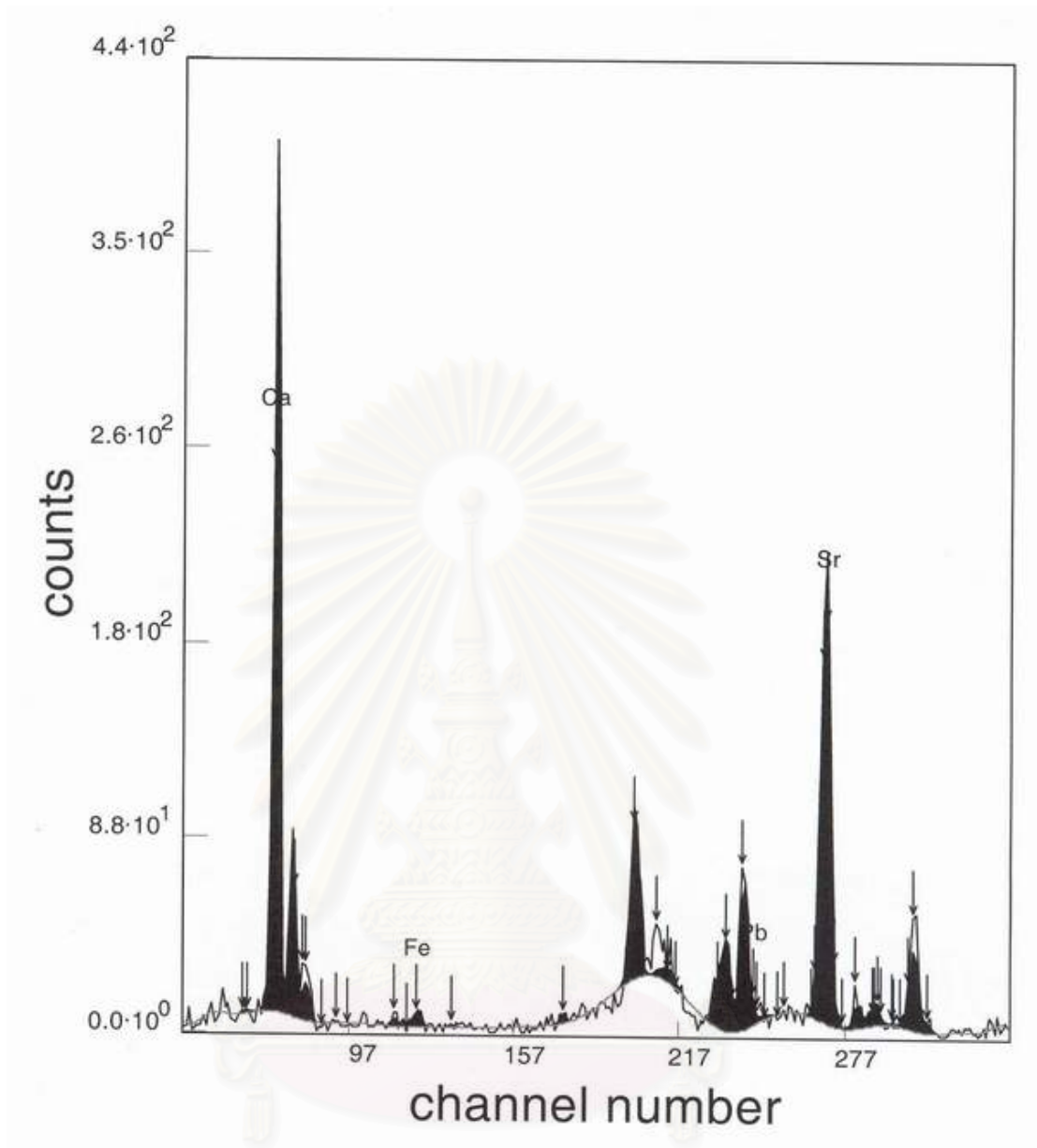
เมื่อน้ำตะกั่วจากองค์การแบดเตอร์ซึ่งมี pH 1.86 ความเข้มข้นตะกั่ว 5.98 ผ่านคอลัมน์บรรจุเปลือกหอยแครงซึ่งมี  $\text{CaCO}_3$  เป็นองค์ประกอบพบว่าน้ำเสียมี pH สูงถึง 8.8 และลดลงเรื่อยๆ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ส่วนความเข้มข้นตะกั่วเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งเป็นไปตามแนวโน้มเดียวกันกับผลการทดสอบกับน้ำเสียสังเคราะห์

ผลการทดสอบที่ได้สนับสนุนเหตุผลในการกำจัดตะกั่วว่าน่าจะเกิดจากการละลายของแคลเซียมคาร์บอเนตของเปลือกหอยจากนั้น  $\text{CO}_3^{2-}$  จับกับไอออนของตะกั่วเกิดเป็น  $\text{PbCO}_3(\text{s})$  มาเกาะที่ผิวเปลือกหอย และยังน่าจะเกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไอออนของตะกั่วและไอออนของแคลเซียมบนผิวเปลือกหอยจนกระทั่งเปลือกหอยหมดความสามารถในการกำจัดตะกั่วทำให้ความเข้มข้นตะกั่วในน้ำก่อนและหลังผ่านคอลัมน์มีค่าเท่ากัน

จากรูปที่ 4.11 และ 4.12 จะเห็นว่าสามารถใช้เปลือกหอยแครงขนาด 20 – 60 เมช อปที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสสามารถบำบัดน้ำเสียจากองค์การแบดเตอร์ได้ปริมาณสูงถึง 923 เท่าของปริมาณบรรจุเปลือกหอยของคอลัมน์หรือประมาณ 6 ลิตร ก่อนที่น้ำที่ผ่านคอลัมน์จะมีปริมาณตะกั่วเกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมกำหนด (0.2 mg/L) และยังสามารถใช้ได้จนถึง 4500 เท่าของปริมาณบรรจุเปลือกหอยของคอลัมน์เปลือกหอยแครงทั้งหมดประสิทธิภาพอย่างสมบูรณ์และจากการคำนวณปริมาณเปลือกหอยแครง 1 กรัมสามารถดูดซับตะกั่วได้ 8.6 มิลลิกรัม

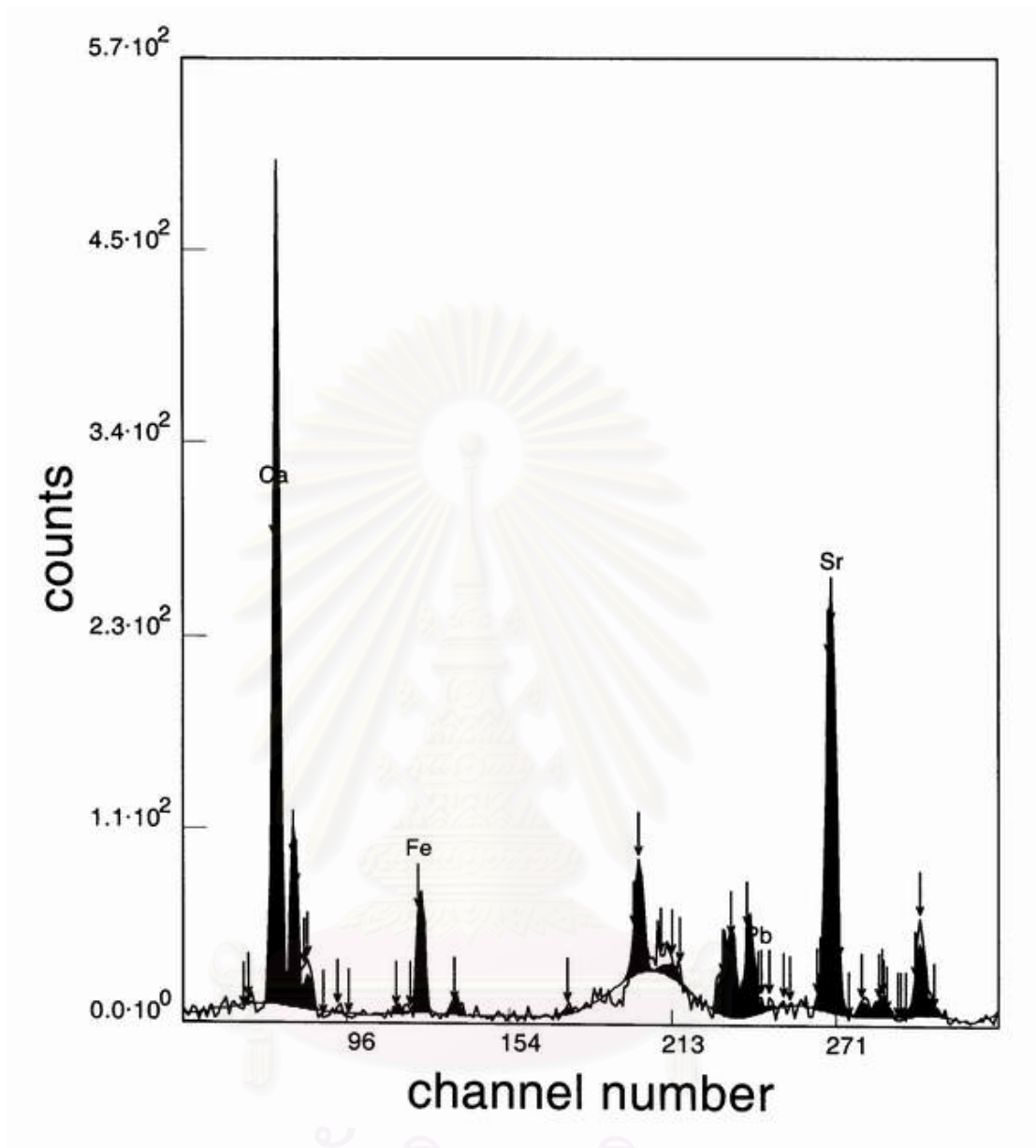


รูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์โลหะบนเปลือกหอยแครงก่อนการกำจัดตะกั่วด้วยเทคนิค XRF



รูปที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์โลหะบนเปลือกหอยแครงหลังการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้น 1000 mg/L ด้วยเทคนิค XRF





รูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์โลหะบนเปลือกหอยแครงหลังการกำจัดตะกั่วปนเปื้อนจากโรงงาน แบตเตอรี่ความเข้มข้น 5.98 mg/L ด้วยเทคนิค XRF

## สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษากำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียโดยใช้เปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่สรุปได้ว่าการพัฒนาเปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่มาใช้บำบัดน้ำที่ปนเปื้อนตะกั่วมีความเป็นไปได้โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสามารถในการกำจัดตะกั่ว ซึ่งการทดลองนี้แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ การเตรียมเปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่ การศึกษาความสามารถในการกำจัดตะกั่วทั้งแบบไม่ต่อเนื่องและแบบต่อเนื่อง ด้วยน้ำปนเปื้อนตะกั่วสังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการและน้ำที่ปนเปื้อนตะกั่วจากองค์การเบตเตอร์ ถนนสรรพาวุธ กรุงเทพฯ มาทำการทดสอบคอลัมน์

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาลักษณะพื้นผิวของเปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่ด้วย Brunauer, Emmett and Teller method (BET) พบว่าพื้นผิวของเปลือกหอยแครงมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าของเปลือกหอยแมลงภู่โดยเปลือกหอยแครงมีพื้นที่ผิวสัมผัสด 0.7572 ตารางเมตรต่อกรัม เปลือกหอยแมลงภู่มีพื้นที่ผิวสัมผัสด 0.1260 ตารางเมตรต่อกรัม เปลือกหอยแครงมีขนาดรูพรุน 78.0138 อังสตรอม ส่วนเปลือกหอยแมลงภู่ไม่มีรูพรุน จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของเปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่ด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) เห็นได้ว่าเปลือกหอยแครงมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าและมีลักษณะเป็นคลื่น

จากการศึกษาองค์ประกอบของเปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่พบว่าเปลือกหอยทั้ง 2 ชนิดมีแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ในรูป aragonite และ calcite เป็นองค์ประกอบหลักโดยเปลือกหอยแครงมีแคลเซียมคาร์บอเนตสูงถึงร้อยละ 96.83 เปลือกหอยแมลงภู่มีแคลเซียมคาร์บอเนตสูงถึงร้อยละ 86.65

ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาความสามารถแบบไม่ต่อเนื่อง (batch test) และแบบต่อเนื่อง (continuous test) ด้วยการใช้ น้ำเสียสังเคราะห์พบว่าในช่วง 20 นาทีแรกในการกำจัดตะกั่วเปลือกหอยแครงขนาด 20-60 เมช สามารถกำจัดตะกั่วได้ 45.85 % และสามารถกำจัดได้กว่า 99% เมื่อเวลาผ่านไป 60 นาทีและการกำจัดตะกั่วเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยเมื่อเวลาผ่านไปมากกว่า 60 นาที ส่วนเปลือกหอยแมลงภู่สามารถกำจัดตะกั่วได้ 97.14 % เมื่อเวลาผ่านไป 240 นาที

จากการเปรียบเทียบความสามารถของเปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่ จากการทำไอโซเทอม พบว่าเปลือกหอยแครงขนาด 20-60 เมช ที่อบด้วยอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสหรืออุณหภูมิตากแดดดูร้อน มีความสามารถในการกำจัดตะกั่วดีที่สุด พิจารณาจากค่า K และ  $1/n$  ซึ่งคำนวณจากสมการ Freundlich พบว่าค่า K เท่ากับ  $9.46 \times 10^5$  มิลลิกรัม ตะกั่วต่อกรัมเปลือกหอยที่ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 1 mg/L และเมื่อทำการทดลองแบบต่อเนื่องโดยใช้คอลัมน์ พบว่าคอลัมน์สามารถบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีตะกั่วปนเปื้อน 20 mg/L ได้ ปริมาตร 2795 เท่าของปริมาตรบรรจุเปลือกหอยในคอลัมน์หรือประมาณ 18 ลิตร โดยที่ปริมาณตะกั่วในน้ำไม่เกินค่ามาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรมกำหนด (0.2 mg/L)

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF ยืนยันได้ว่าการกำจัดตะกั่วในน้ำน่าจะเกิดจากปฏิกิริยาแทนที่ (displacement) โดยไอออนของตะกั่วเข้าแทนที่ไอออนของแคลเซียมในแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของเปลือกหอยแมลงภู่ คาดว่าน่าจะเกิดจากการละลายของแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแล้วเกิดการตกผลึก (precipitation) กับไอออนตะกั่วบริเวณใกล้เคียง ผิวเปลือกหอยซึ่งมีความเข้มข้นคาร์บอเนตไอออนค่อนข้างสูงเกิดเป็นตะกั่วคาร์บอเนต ( $PbCO_3$ )

ขั้นตอนที่ 3 ทดลองบำบัดน้ำเสียจากองค์การเบตเตอร์พบว่าคอลัมน์ปริมาตร 1 ลิตร สามารถบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนตะกั่วความเข้มข้น 5.98 mg/L ได้มากถึง 923 เท่าของปริมาตรบรรจุเปลือกหอยในคอลัมน์หรือประมาณ 6 ลิตร ก่อนที่ความเข้มข้นตะกั่วในน้ำที่ผ่านคอลัมน์จะสูงเกินค่ามาตรฐานที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนด (0.2 mg/L) และความสามารถเต็มที่ในการบำบัดของคอลัมน์สูงถึง 4500 เท่าของปริมาตรบรรจุคอลัมน์ คำนวณความสามารถในการดูดซับตะกั่วแบบต่อเนื่องเท่ากับ 8.6 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมเปลือกหอย

ดังนั้นการนำเปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่มาใช้บำบัดน้ำที่ปนเปื้อนตะกั่วเป็นวิธีการที่ทำได้ง่ายเนื่องจากเป็นวัสดุเหลือใช้ทางธรรมชาติ ซึ่งสามารถลดปริมาณตะกั่วให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในการใช้บำบัดน้ำเสียในระดับครัวเรือน และโรงงานอุตสาหกรรมที่มีตะกั่วปนเปื้อน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ควรมีการศึกษาถึงสภาวะที่อาจส่งผลต่อความสามารถในการละลายของตะกั่วออกจากเปลือกหอยแครงที่ใช้กรองน้ำแล้ว ซึ่งอาจกลับคืนสู่สิ่งแวดล้อมหากอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม

- 5.2.2 ควรมีการศึกษาการลดปริมาณเหล็กในน้ำเสียโดยการใช้เปลือกหอยแครงเพิ่มเติม เนื่องจากผลการวิจัยพบว่าเปลือกหอยแครงสามารถดูดซับเหล็กได้ด้วยดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.15
- 5.2.3 ควรมีการศึกษาวัสดุธรรมชาติอื่น ๆ ที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบหลักเพื่อหาความสามารถในการกำจัดตะกั่วหรือโลหะหนักอื่น ๆ เพื่อพัฒนาเป็นทางเลือกในการบำบัดน้ำเสียต่อไป



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- กิตติ เอกอำพล. 2538. ความเป็นพิษของโลหะหนัก. อุตสาหกรรมภาวะแวดล้อม. 4 (ตุลาคม-พฤศจิกายน 2528) : 26-28.
- นัยนา หาญโรดม. 2536. การลดปริมาณสารละลายตะกั่วโดยใช้เส้นผม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เปี่ยมศักดิ์ เมินะเสวต. 2534. แหล่งน้ำกับปัญหามลพิษ. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พรสวรรค์ มหาโชคเลิศวัฒนา. 2529. การกำจัดตะกั่วในน้ำที่โรงงานอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่โดยวิธีตกตะกอนทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- มันสิน ตันทุลเวศน์. 2538. วิศวกรรมการประปาเล่ม 1. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, วรรณดา ตันยีนยงค์. 2540. เรื่องน่ารู้เกี่ยวกับโลหะหนักในน้ำยาล้างถ้วยชาม, วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ. 45 (พฤษภาคม 2540) : 29-31.
- ศุภวรรณ กฤษณะทรัพย์. 2540. การลดปริมาณสารตะกั่วโดยใช้เปลือกไข่. วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาเภสัชศาสตร์ คณะเภสัชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สมพุด ฤกษ์ลักษณ์. 2532. ผลกระทบของตะกั่วต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ , อุตสาหกรรมภาวะแวดล้อม. 8 (กุมภาพันธ์ 2532) : 12-19.
- Thaianimal. 2002. หอยแมลงภู่ [Online]. แหล่งที่มา : <http://www.thaianimal.com/firstpage/chemnit.html> [19 พฤษภาคม 2545]

### ภาษาอังกฤษ

- Brown, T.L. and Lemay, H.E.Jr. 1985. Chemistry The Central Science. 3d ed. New jersey : Prentice-Hall ,Inc.
- Delgado, G.R, Herruzo, F.G., Maroto, J.M. and Vereda, C. 1996. Influence of Soil Carbonate in Lead Fixation, Environtal Science Health. 31 : 2099-2109,
- Ford, D.L. 1981. Waste Water Characteristic and Treatment. Activated Carbon Adsorption for Waste water Treatment, pp.1-27. Perrich J.R. eds. Fla. : CRC Press ,Inc.
- Fuersteneu., M.C. and Palmer ,B.R. 1976. Anionic Flotation of Oxids and Silicates . Flotation, pp. 148-196. New York : SME of AIME .
- Harrison, R. M., and Laxen, D. H. 1981. Lead Pollution causes and control. London : Chapman and Hall.

- Hassler, J.W. 1963. Activated Carbon. New York : Chemical Publishing Company, Inc.
- Hockett, D., Ingram, P., and Furgey, A. L. 1995. Strontium and Manganese Uptake in the Barnacle Shell : Electron Probe Microanalysis Imaging to Attain Fine Temporal Resolution of Biomineralization Activity. Marine Environmental Research 43: 131-143.
- Lee, M.Y., Park, J.M., and Yang, J.W. 1996. Micro precipitation of lead on the surface of crab shell particle. Process Biochemistry 32: 617-677.
- Lee, M.Y., Lee, S.H., Kajiuchi, T., and Yang, J.W. 1997. Characteristic of lead removal by crab shell particle. Process Biochemistry 33: 749-753.
- Okieiman, F.E. and Onyenkpa, V.U. 1989. Removal of Heavy Metal Ions from Aqueous Solutions with Melon Seed Husks. Biological Waste. 29 : 11-16.
- Patterson, J.W. and Patzelt, R. 1985. Treatment of Priority Pollutants with Resins. Application of Adsorption to Wastewater Treatment., pp. 5-28. Eckenfelder, W.W. Jr., eds. T.N. : Enviro Press, Inc.
- Rashchi, F., Xu, Zhenghe., and Finch, J. A. 1996. Adsorption on silica in Pb-and Ca- $\text{SO}_4$ - $\text{CO}_3$  systems. Physicochemical and engineering Aspects 132 : 159-171.
- Rick, G. 2001. Freshwater mussel (outer shell)[Online]. Availale from : <http://bioweb.uwlax.edu/zoolab/>[2002, May 19]
- Rose, A.W., Hawkes, H.E. and Webb, J.S. 1979. Geochemistry in Mineral Explorattion. 2d ed. London. : Academic press, Inc.
- Shiina, S. 1986. Heavy Metal Wastewater Treatment by Use of Calcined Coral Limestone. PPM. 12 : 14-20.
- Suzuki, Y., and Takeuchi, Y. 1991. Utilization of Coral Limestone. Jurnal of Chemical Emgineering of Japan 9 : 34-39.
- Suzuki, Y., and Takeuchi, Y. 1993. Uptake of few divalent heavy metal ion species from their aqueos solution by coral sand heat treated and various temperatures. Jurnal of Chemical Emgineering of Japan 27 (2) : 165-170.
- Weber, W. J.Jr. 1981. Application of Adsorption to wastewater Treatment., pp.5-28. Eckenfelder, W.W.Jr., eds. T.N. : Enviro Press, Inc.
- World Health Organization. 1996. Guideline for Drinking-Water Quality. 2d ed. WHO, Geneva.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณปริมาตรของตัวดูดซับในคอลัมน์

การคำนวณปริมาตรของตัวดูดซับในคอลัมน์

Bed Volume (BV) = ปริมาตรของตัวดูดซับในคอลัมน์

$$BV = \frac{(\pi d^2 h)}{4} \text{ (cm}^3\text{)}$$

เมื่อ d = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในคอลัมน์ (cm)

h = ความสูงของตัวดูดซับในคอลัมน์ (cm)

การคำนวณ

จากการทดลองคอลัมน์ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (d) เท่ากับ 1.9 เซนติเมตร

ความสูงของตัวดูดซับ 2.3 เซนติเมตร

$$BV = \frac{(\pi \times 1.9^2 \times 2.3)}{4} \times \frac{1}{1000} \text{ ลิตร}$$

$$1 \text{ BV} = 0.0065 \text{ ลิตร}$$

ค่ามาตรฐานตะกั่วในน้ำที่โรงงานอุตสาหกรรมที่ยอมรับได้เท่ากับ 0.2 mg/Lแต่น้ำเสียจริงจากองค์การเบตเตอร์ที่นำมาใช้มีตะกั่วปนเปื้อนความเข้มข้น 5.98 mg/L

ดังนั้นอายุการใช้งานของตัวดูดซับจากเปลือกหอยแครงสามารถให้น้ำกรองผ่านค่ามาตรฐานน้ำทิ้งตะกั่วเท่ากับ 923 BV หรือปริมาตรน้ำ 6 ลิตร

อายุการใช้งานของตัวดูดซับจากเปลือกหอยแครงสามารถใช้งานจนหมดประสิทธิภาพเท่ากับ 4500 BV หรือปริมาตรน้ำ 29.25 ลิตร

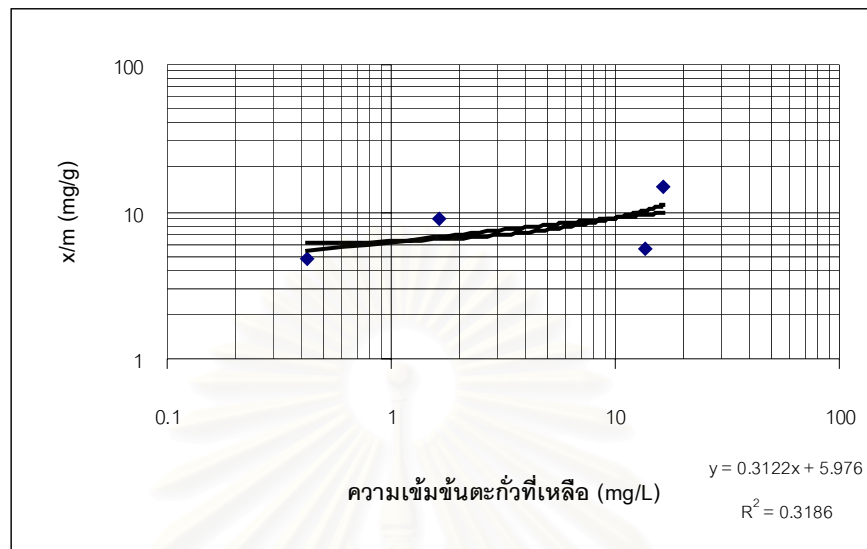
เมื่ออัตราเร็วของน้ำผ่านคอลัมน์เท่ากับ 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง สรุปได้ว่าอายุการใช้งานของตัวดูดซับจากเปลือกหอยแครงสามารถให้น้ำกรองผ่านค่ามาตรฐานน้ำทิ้งตะกั่วเท่ากับ 12 ชั่วโมง อายุการใช้งานของตัวดูดซับจากเปลือกหอยแครงสามารถใช้งานจนหมดประสิทธิภาพเท่ากับ 58.5 ชั่วโมง



ภาคผนวก ข

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณความสามารถในการดูดซับแบบต่อเนื่อง



สมการเส้นตรงคือ  $Y = ax + b$

$$Y = 0.3122x + 5.976$$

จากสมการ จะได้  $a = 0.3122$

และ  $b = 5.976$

ค่า  $R^2$  ของสมการ  $= 0.3186$

จากสมการฟรุนดิช  $\log x/m = \log K + (1/n) \log C$

$$\text{เมื่อ } \log C = 1 \text{ mg/L}$$

$$\text{จะได้ } b = \log K$$

$$\text{ดังนั้น } K = 10^b$$

เมื่อนำค่า a และ b มาแทนในสมการจะได้

$$K = 10^{5.976} \text{ mg/g}$$

$$K = 9.46 \times 10^5 \text{ mg/g}$$

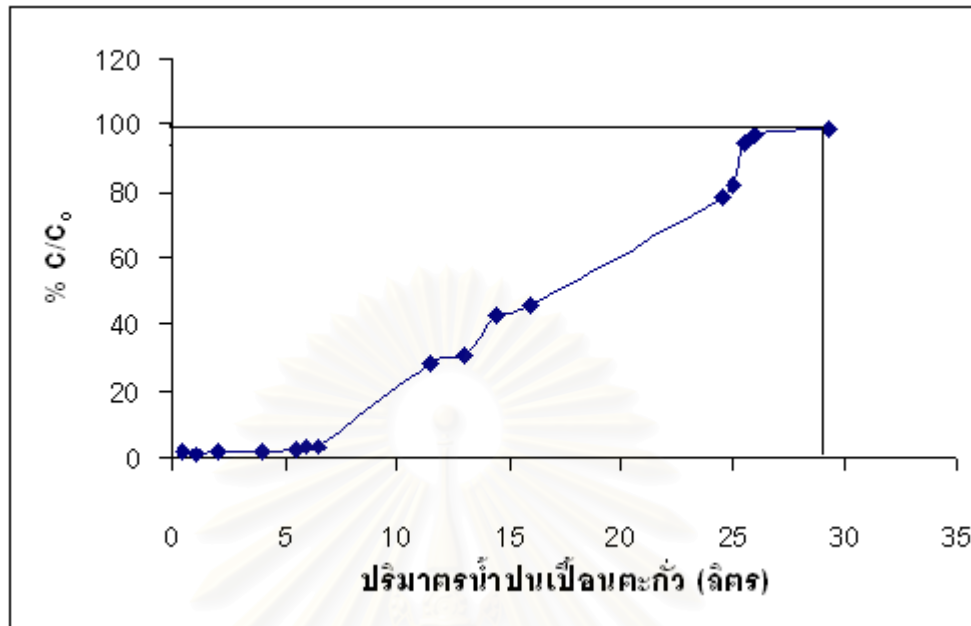
$$\text{และ } a = 1/n = 0.3122$$



ภาคผนวก ค

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค การคำนวณความสามารถในการดูดซับแบบต่อเนื่อง



วิธีการคำนวณ (Vermeulen, et al., 1973)

การคำนวณ (Vermeulen, et al., 1973)

$$\begin{aligned}
 \text{Adsorption Capacity} &= \text{พื้นที่เหนือเส้นกราฟ} \times \text{ความเข้มข้นตะกัวเริ่มต้น} \\
 &= 1/2 \times 29.25 \text{ ลิตร} \times (98.33/100) \times 5.98 \\
 &= 44 \text{ ลิตร} \times 5.98 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร} = 86 \text{ มิลลิกรัม}
 \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้น adsorption capacity = 86 มิลลิกรัม

เปลือกหอยแครง 10 กรัม มีความสามารถดูดซับตะกัวได้ 86 มิลลิกรัม

ดังนั้น เปลือกหอยแครง 1 กรัม จะมีความสามารถดูดซับตะกัวได้ 8.6 มิลลิกรัม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ง วิธีวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของเปลือกหอย

วิธีวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมดของเปลือกหอยนี้ เป็นวิธีของ Brunauer , Emmett and Teller method หรือ BET method ซึ่งวิธีนี้อาศัยหลักการของการดูดผิวบนชั้นเดียว (monolayer) ที่อุณหภูมิจุดเดือดปกติ (-195.8 องศาเซลเซียส) บนผิวหน้าของเปลือกหอย วิธีวิเคราะห์มีดังนี้

### 1. เครื่องมือ

- เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวรุ่น ASAP 2000 ของบริษัท Micromeritics
- เครื่องคอมพิวเตอร์ พร้อมโปรแกรมคำนวณ
- หลอดใส่ตัวอย่าง

### 2. การเตรียมตัวอย่าง

- ใช้ตัวอย่างเปลือกหอยขนาด 20-60 เมช
- อบตัวอย่างให้แห้งที่ 150 องศาเซลเซียส
- ชั่งและบันทึกน้ำหนักของหลอดใส่ตัวอย่าง ให้ละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4
- ใส่ตัวอย่างลงในหลอด ให้มีน้ำหนักประมาณ 0.3-0.5 กรัม
- นำไปล้างโมเลกุลปนเปื้อนที่อยู่บนผิวเปลือกหอย (degas ) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันสุญญากาศ
- ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างและหลอดใส่ตัวอย่าง เพื่อให้ทราบน้ำหนักของตัวอย่างหลัง degas เพื่อให้ทราบน้ำหนักของตัวอย่าง (W)

### 3. การวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิว

- กำหนดความดันสัมพัทธ์ที่สมดุล (P/P<sub>0</sub>) ทั้งหมด 10 จุด
- ผ่านไนโตรเจนที่ปราศจากออกซิเจน ซึ่งมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.35 จนกระทั่งความดันสัมพัทธ์ที่ภาวะสมดุลเท่ากับที่กำหนด บันทึกปริมาตรของก๊าซไนโตรเจนที่ใช้

## 4. การคำนวณ

การหาพื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมด

-นำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกนราบคือความดันสัมพัทธ์ ( $P/P_0$ ) แกนตั้งฉากคือปริมาณของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ในเทอมของ  $[W (P/P_0) - 1] - 1$  จะได้เส้นความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $S$  จุดตัดบนแกนตั้งฉากคือ  $I$  สามารถคำนวณพื้นที่ผิว ( $S_{BET}$ ) ได้ดังนี้

$$S_{BET} \text{ (ตารางเมตรต่อกรัม)} = N Acs / [(S+I) * (MW)]$$

โดย  $N$  = เลขอาโวกาโดร ( $6.02 \times 10^{23}$  โมเลกุลต่อโมล)

$Acs$  = พื้นที่หน้าตัดของโมเลกุลไนโตรเจน  
(16.2 ตารางอังสตรอม)

$MW$  = น้ำหนักโมเลกุลของไนโตรเจน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาคผนวก จ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก จ ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

### ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

ฉบับที่ 2 (พ.ศ.2539)

ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535  
เรื่อง กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน

อาศัยอำนาจตามความในข้อ 14 แห่งกฎกระทรวงฉบับที่ 2(พ.ศ. 2535) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 ที่ระบุว่า “ห้ามระบายน้ำทิ้งออกจากโรงงานเว้นแต่ได้ทำการอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างจนน้ำทิ้งนั้นมีลักษณะเป็นไปตามที่รัฐมนตรีกำหนดโดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา แต่ทั้งนี้ต้องไม่ใช้วิธีทำให้เจือจาง (Dilution)” รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรมจึงออกประกาศกำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน ดังนี้

#### ข้อ 1 คำจำกัดความ

น้ำทิ้ง หมายถึง น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบกิจการ โรงงานอุตสาหกรรมที่ระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อม และให้หมายความรวมถึงน้ำเสียจากการใช้น้ำของคนงาน รวมทั้งจากกิจกรรมอื่นใน

ข้อ 2 น้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานต้องมีคุณสมบัติดังนี้

- (1) ความเป็นกรดและด่าง (pH) มีค่าไม่น้อยกว่า 5.5 และไม่มากกว่า 9.0
- (2) ที่ดีเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids) ต้องมีค่าดังนี้
  - 2.1 ค่าที่ดีเอส ไม่มากกว่า 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
  - 2.2 น้ำทิ้งซึ่งระบายออกจากโรงงานลงสู่แหล่งน้ำที่มีความเค็ม (Salinity)มากกว่า 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
- (3) สารแขวนลอย (Suspended Solids) ไม่มากกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดแต่ต้องไม่มากกว่า 150 มิลลิกรัมต่อลิตร
- (4) โลหะหนักมีค่าดังนี้
  - 4.1 ปรอท (Mercury) ไม่มากกว่า 0.0005 มิลลิกรัมต่อลิตร
  - 4.2 ซีลีเนียม (Selenium) ไม่มากกว่า 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร
  - 4.3 แคดเมียม (Cadmium) ไม่มากกว่า 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร
  - 4.4 ตะกั่ว (Lead) ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
  - 4.5 อาร์เซนิก (Arsenic) ไม่มากกว่า 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาคผนวก ฉ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก จ แสดงตำแหน่งธาตุจากผลการวิเคราะห์โลหะด้วยเทคนิค XRF

Document filename: cockle shell

Model ID: powder

Fitting Region: channels 35-338,Chisquare= 1.5

Line	E(KEV)	Peak area	st.dev	Chi-sq
Ca-KA1	3.691	1742	44	1.7
Ca-KB1	4.013	418	11	10.6
Fe-KA1	6.399	44	9	0.3
Fe-KB1	7.059	7	1	1.0
Sr-KA1	14.165	931	26	2.9
Sr-KA2	14.098	484	13	2.8
Sr-KB1	15.832	229	6	2.6
Sr-KB2	16.085	29	1	3.0
Pb-L2M4	12.614	12	6	1.2
Pb-L2N4	14.764	3	1	0.8
Pb-L3M5	10.552	19	10	2.0

Document filename" cockle shell + Pb 1000 m/L

Model ID: powder

Fitting Region: channels 35-338,Chisquare= 1.6

Line	E(KEV)	Peak area	st.dev	Chi-sq
Ca-KA1	3.691	1060	34	1.9
Ca-KB1	4.013	255	8	8.9
Fe-KA1	6.399	24	7	3.3
Fe-KB1	7.059	4	1	2.8
Sr-KA1	14.165	591	20	2.8
Sr-KA2	14.098	307	11	2.1
Sr-KB1	15.832	145	5	2.9
Sr-KB2	16.085	19	1	1.9
Pb-L1M3	12.793	15	1	1.3
Pb-L1M2	12.306	14	1	1.3
Pb-L1N3	15.218	5	0	1.3
Pb-L1N2	15.101	4	0	0.7
Pb-L2M4	12.614	183	10	1.1
Pb-L2N4	14.764	41	2	1.2
Pb-L2M1	11.349	5	0	1.7
Pb-L3M5	10.552	274	15	6.1
Pb-L3M4	10.450	31	2	5.8
Pb-L3N5	12.623	59	3	1.1
Pb-L3N4	12.601	7	0	1.1
Pb-L3M1	9.185	15	1	1.1
Pb-L3N1	12.143	4	0	1.0
Pb-L3O5	13.015	9	0	2.5

Document filename" cockle shell + waste water of battery factory

Model ID: powder

Fitting Region: channels 35-338,Chisquare= 1.6

Line	E(KEV)	Peak area	st.dev	Chi-sq
Ca-KA1	3.691	1314	37	3.4
Ca-KB1	4.013	316	9	6.6
Fe-KA1	6.399	224	16	5.1
Fe-KB1	7.059	36	3	1.2
Sr-KA1	14.165	683	22	1.3
Sr-KA2	14.098	355	11	1.0
Sr-KB1	15.832	168	5	1.5
Sr-KB2	16.085	22	1	1.7
Pb-L1M3	12.793	13	1	0.5
Pb-L1M2	12.306	11	1	2.2
Pb-L1N3	15.218	4	0	0.8
Pb-L1N2	15.101	3	0	0.8
Pb-L1O3	15.765	1	0	2.0
Pb-L1M5	13.377	1	0	3.0
Pb-L2M4	12.614	150	9	1.0
Pb-L2N4	14.764	34	2	0.6
Pb-L2M1	11.349	4	0	1.9
Pb-L2N1	14.308	1	0	1.5
Pb-L2O4	15.178	5	0	0.7
Pb-L3M5	10.552	226	14	3.0
Pb-L3M4	10.450	26	2	3.6
Pb-L3N5	12.623	48	3	1.0
Pb-L3N4	12.601	5	0	1.3
Pb-L3M1	9.185	12	1	1.2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวจรรยาพร พุ่มงาม

เกิดวันที่ 6 กรกฎาคม พ.ศ. 2517

ที่อยู่ถาวร 23/2 หมู่ 5 ซ.สุขสวัสดิ์ 14 ถ.สุขสวัสดิ์ เขตจอมทอง กรุงเทพฯ 10150

### ประวัติการศึกษา

-การศึกษาระดับอนุปริญญา	:สถานศึกษาเคมีปฏิบัติ กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม	2540
-การศึกษาระดับปริญญาตรี	:ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2542

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย