

การดูดซับตะกั่วโดยการพัฒนาตัวกลางดูดซับที่ได้จาก

กระดองปูและเปลือกหอยแครง

Adsorption of Lead by Developed Adsorbents from

Crab Shell and Cockle Shell

สิริชืน ตะนุสะ

Sirichuen Tanusa

เลขหมู่	OD ๕๕๗ (๒๒ ๒๕๔๓) ๑๐๒
Order Key	28815
Bib Key	177589
	1 0 ๑.๑. 2543

วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Master of Science Thesis in Environmental Management

Prince of Songkla University

2543

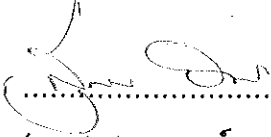
ชื่อวิทยานิพนธ์ การดูดซับตะกั่วโดยการพัฒนาตัวกลางดูดซับที่ได้จากกระดองปูและ
เปลือกหอยแครง

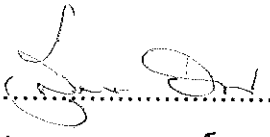
ผู้เขียน นางสาวสิริชาน ตะนุสะ


สาขาวิชา การจัดการสิ่งแวดล้อม


คณะกรรมการที่ปรึกษา


คณะกรรมการสอบ



..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล อารีย์กุล)

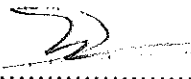

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล อารีย์กุล)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ์ บุญนวน)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ์ บุญนวน)



..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กัลยาณี คุปตานนท์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กัลยาณี คุปตานนท์)


..... กรรมการ
(ดร.สมทิพย์ ด้านธีรวิชย์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พนิต เชิดชูพงษ์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม

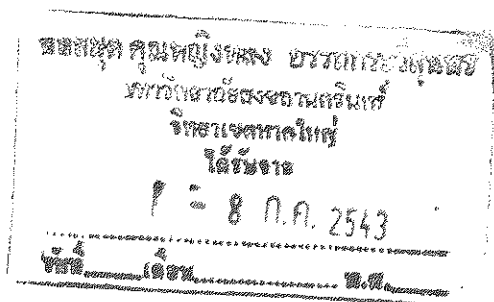

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.นพรัตน์ บำรุงรักษ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์ การดูดซับตะกั่วโดยการพัฒนาตัวกลางดูดซับที่ได้จากกระดองปูและเปลือกหอยแครง
ผู้เขียน นางสาวสิริขันธ์ ตะนุสะ
สาขาวิชา การจัดการสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2543

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับตะกั่วด้วยตัวดูดซับที่เตรียมจากกระดองปูและเปลือกหอยแครงซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่น โดยทำการทดสอบแบบไม่ต่อเนื่องเพื่อประเมินความสามารถในการดูดซับตะกั่ว ตัวดูดซับที่เตรียมมีความแตกต่างกันทั้งชนิดของวัสดุดิบ ขนาด และสารที่ใช้กระตุ้น พบว่ากระดองปูขนาด 16-80 เมชกระตุ้นด้วยกรดเกลือมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้ดีที่สุด ซึ่งคำนวณค่าคงที่จากสมการการดูดซับของ Freundlich มีค่าเท่ากับ 1,050 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมกระดองปู และในการทดสอบแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ของตัวดูดซับโดยใช้น้ำที่มีตะกั่วปนเปื้อนจากเหมืองตะกั่ว-ดินกร้างที่ตำบลถ้ำทะลุ อำเภอบันนังสตา จังหวัดยะลาซึ่งมีความเข้มข้น 0.042 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าคอลัมน์สามารถใช้กับน้ำปนเปื้อนตะกั่วได้มากถึง 500 เท่าของปริมาตรบรรจุของคอลัมน์ ก่อนน้ำที่ผ่านคอลัมน์จะมีความเข้มข้นตะกั่วขึ้นสูงถึง 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่องค์การอนามัยโลกได้กำหนดไว้ ทั้งนี้ความสามารถเต็มทีของคอลัมน์สามารถใช้กับน้ำปนเปื้อนได้สูงถึง 7,125 เท่าของปริมาตรบรรจุของคอลัมน์



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ด้วยความกรุณาให้คำปรึกษา เสนอแนะแนว
ทางและตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่อง ตลอดจนคอยติดตามความก้าวหน้าอยู่เสมอ จากอาจารย์ที่
ปรึกษาคือรองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล อารีย์กุล และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม คือ ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ดร.พิชญ์ บุญนวล และผู้ช่วยศาสตราจารย์กัลยาณี คุปตานนท์ ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณมา ณ
โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบคุณ ดร.สมทิพย์ ด้านธีรวิชัย และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์พนิต เชิดชูพงษ์ ที่ได้
กรุณาช่วยแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นและขอขอบคุณ
ดร.อดิศักดิ์ เกียรติ ที่ช่วยแนะนำจุดเก็บตัวอย่างน้ำในตำบลถ้ำทะลุ อำเภอบันนังสตา จังหวัดยะลา

ขอขอบคุณคณะกรรมการจัดการสิ่งแวดล้อม และภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความสะดวกในด้านสถานที่ วัสดุอุปกรณ์
การวิจัย และขอขอบคุณ คุณยุพิน จันทร์รัตน์ ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการ
ใช้ห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่กรุณาให้ทุนอุดหนุนวิจัยในการศึกษาครั้งนี้ ขอขอบคุณ
ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติที่ได้
ให้ความอนุเคราะห์ในการให้บริการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุด้วยเครื่อง Quantachrome
Gas Sorption และขอขอบคุณ คุณภัทรวรรณ คณะวงศ์ผู้ทำการวิเคราะห์

ขอขอบคุณ คุณรัชกร แซ่เจิน คุณหทัยกาญจน์ ไพรัตน์กร และคุณสมชัย ชัยเสนที่ได้
ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ คุณพี่ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจสำคัญ
ตลอดมา และสุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกท่านที่ไม่สามารถกล่าว
นามได้ทั้งหมดในที่นี้ ไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

สิริชื่น ตะนุสะ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
Abstract	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(8)
รายการภาพประกอบ	(9)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 การตรวจเอกสาร	4
1.3 วัตถุประสงค์	28
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	28
2. วิธีการวิจัย	29
2.1 วัสดุ	29
2.2 อุปกรณ์	29
2.3 ขอบเขตและวิธีการวิจัย	30
2.4 วิธีการวิเคราะห์	33
3. ผลการศึกษา	37
3.1 ผลการศึกษาลักษณะของกระดองปูและเปลือกหอย	37
3.2 ผลการศึกษาความสามารถในการกำจัดตะกั่วแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test)	45
3.3 กลไกการกำจัดตะกั่วด้วยกระดองปู	52
3.4 การศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานจากคอลัมน์	65
3.5 การลดปริมาณตะกั่วในน้ำจากตำบลถ้ำทะลุ อำเภอบันนังสตา จังหวัดยะลา	69
4. บทสรุปและข้อเสนอแนะ	73
4.1 บทสรุป	73
	(6)

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.2 ข้อเสนอแนะ	75
บรรณานุกรม	76
ภาคผนวก	80
ภาคผนวก ก. วิธีการวิเคราะห์	80
ภาคผนวก ข. ผลการตรวจวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธี BET	85
ภาคผนวก ค ตัวอย่างการคำนวณปริมาตรของตัวดูดซับในคอลัมน์ และการนำไปใช้	92
ภาคผนวก ง ตัวอย่างการคำนวณความสามารถในการดูดซับแบบต่อเนื่อง	95
ภาคผนวก จ เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและวิเคราะห์	97
ภาคผนวก ฉ ผลงานที่ได้รับการเผยแพร่จากวิทยานิพนธ์	99
ประวัติผู้เขียน	111

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 แร่ที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ	13
1.2 การลดปริมาณตะกั่วด้วยการดูดซับ	26
1.3 สรุปความสามารถในการดูดซับตะกั่วของ Low-Cost Sorbents	27
2.1 วิธีการวิเคราะห์ทางเคมีของน้ำปนเปื้อนตะกั่ว	33
3.1 % การกำจัดตะกั่วโดยใช้กระดองปูและเปลือกหอย	45
3.2 ข้อมูลการศึกษาไอโซเทอร์มจากกระดองปู	47
3.3 ข้อมูลการศึกษาไอโซเทอร์มจากเปลือกหอย	48
3.4 ค่าคงที่การดูดซับจากสมการ Freundlich	50
3.5 อธิบายความหมายของค่า K และ $1/n$ จากสมการ Freundlich	51
3.6 ผลการวิเคราะห์กระดองปูที่ผ่านการกำจัดตะกั่วแล้วด้วยเทคนิค FTIR	53
3.7 ค่าความเข้มข้นตะกั่วในน้ำหลังผ่านคอลัมน์บรรจุกระดองปูหนัก 10 กรัม	66
3.8 ผลการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างจากตำบลถ้ำทะลุ อำเภอบันนังสตา จังหวัดยะลา	69
3.9 ค่าความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำจากตำบลถ้ำทะลุ อำเภอบันนังสตา จังหวัดยะลาหลังผ่านคอลัมน์	70

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Freundlich	8
1.2 แสดง Breakthrough Curve ของการทดสอบแบบคอลัมน์	9
1.3 สูตรโครงสร้างของโคตินและโคโตแซน	11
1.4 ไดอะแกรม Eh-pH ของตะกั่ว (ระบบ Pb-O-H-S-C)	17
1.5 ไดอะแกรมของสปีชีส์ตะกั่วในน้ำ	18
1.6 แสดงการละลายของแร่ในระบบ Pb-O-H-S-C	19
1.7 ไดอะแกรม Eh-pH ของคาร์บอน	20
2.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการศึกษา	34
2.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำความสะอาดกระดองปูและเปลือกหอย	35
2.3 แสดงกระดองปูม้าและเปลือกหอยแครงที่เตรียมได้	35
2.4 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมกระดองปูและเปลือกหอย	36
3.1 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในเปลือกหอยด้วย X-Ray Diffraction (XRD)	38
3.2 กราฟมาตรฐานเปรียบเทียบเพื่อหาสารประกอบในเปลือกหอย ด้วย X-Ray Diffraction (XRD)	39
3.3 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในกระดองปูด้วย X-Ray Diffraction (XRD)	40
3.4 กราฟมาตรฐานเปรียบเทียบเพื่อหาสารประกอบในกระดองปู ด้วย X-Ray Diffraction (XRD)	41
3.5 ลักษณะพื้นผิวด้านหลังกระดองปูจากกล้อง SEM	43
3.6 ลักษณะพื้นผิวด้านในกระดองปูจากกล้อง SEM	43
3.7 ลักษณะพื้นผิวระหว่างชั้นกระดองปูจากกล้อง SEM	44
3.8 ลักษณะพื้นผิวเปลือกหอยจากกล้อง SEM	44
3.9 กราฟ % การกำจัดตะกั่วด้วยกระดองปู	46
3.10 กราฟ % การกำจัดตะกั่วด้วยเปลือกหอย	46
3.11 ไอโซเทอร์มการดูดซับตะกั่วของตัวดูดซับขนาด 16-80 เมช	49
3.12 ไอโซเทอร์มการดูดซับตะกั่วของตัวดูดซับขนาด 8-16 เมช	49

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
3.13 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในกระดองปูก่อน (Crab1) และหลังกำจัดตะกั่ว (Crab2) ด้วย X-Ray Diffraction (XRD)	54
3.14 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในกระดองปูที่ใช้กำจัดตะกั่ว ด้วย X-Ray Diffraction (XRD)	55
3.15 กราฟมาตรฐานเปรียบเทียบเพื่อหาสารประกอบในกระดองปู ด้วย X-Ray Diffraction (XRD)	56
3.16 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างสารประกอบในกระดองปูก่อน และหลังกำจัดตะกั่วด้วย FTIR	57
3.17 กราฟมาตรฐาน CaCO_3 เปรียบเทียบเพื่อหาโครงสร้างของ สารประกอบด้วย FTIR	58
3.18 กราฟมาตรฐาน PbCO_3 เปรียบเทียบเพื่อหาโครงสร้างของ สารประกอบด้วยเทคนิค FTIR	59
3.19 ลักษณะพื้นผิวกระดองปูที่ผ่านการกำจัดตะกั่วแล้วด้วยกล้อง SEM	60
3.20 ลักษณะพื้นผิวกระดองปูที่ผ่านการกำจัดตะกั่วแล้ว ด้วยกล้อง SEM	61
3.21 SEM และ EDS บนผิวกระดองปู	62
3.22 ชุดทดลองแบบต่อเนื่องในห้องปฏิบัติการ	65
3.23 Breakthrough Curve ของตะกั่วที่ความเข้มข้น 5.0 mg/l	67
3.24 Breakthrough Curve ของตะกั่วที่ความเข้มข้น 5.0 mg/l	67
3.25 Breakthrough Curve ของน้ำปนเปื้อนตะกั่วจากตำบลถ้ำทะเล	71
3.26 Breakthrough Curve ของน้ำปนเปื้อนตะกั่วจากตำบลถ้ำทะเล	71
ข-1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของเปลือกหอยครั้งที่ 1	86
ข-2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของเปลือกหอยครั้งที่ 2	87
ข-3 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของเปลือกหอยครั้งที่ 3	88
ข-4 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของกระดองปูครั้งที่ 1	89
ข-5 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของกระดองปูครั้งที่ 2	90

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
ข-6 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของกระดองปูครั้งที่ 3	91
ค-1 ตัวอย่างการคำนวณปริมาตรกระดองปูในคอลัมน์และการนำไปใช้	94
ง-1 ตัวอย่างการคำนวณความสามารถการดูดซับแบบต่อเนื่อง	96
จ-1 เครื่องเขย่า (Shaker) ในการทดสอบแบบไม่ต่อเนื่อง	98
จ-2 เครื่องสตรipping โพลีโพรเทอโนมิเตอร์ (Stripping Potentiometer)	98

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

ปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นมากมายในปัจจุบัน เป็นผลมาจากการพัฒนาประเทศ เพื่อความเจริญก้าวหน้าในทุกๆ ด้าน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำเอาทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่มาใช้ให้เกิดประโยชน์ ดังเช่น การทำเหมืองแร่ที่ต้องมีกระบวนการต่างๆ มากมายเพื่อให้ได้มาซึ่งแร่ที่ต้องการและมีความบริสุทธิ์สูง ส่วนเพื่อนแร่ที่ไม่ต้องการก็ถูกปล่อยทิ้งกลายเป็นของเสียอันตราย ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของประชาชน

อำเภอบันนังสตา จังหวัดยะลา เป็นแหล่งต้นน้ำลำธารของลุ่มน้ำปัตตานี มีเหมืองแร่ที่มีประวัติการทำเหมืองดีบุกมากกว่า 100 ปีซึ่งแร่ดีบุกนี้มีตะกั่วและสารหนูเป็นเพื่อนแร่ ปัจจุบันเหมืองแร่เหล่านี้ได้ปิดกิจการไปแล้ว แต่มีการทิ้งมูลดินทรายจากการทำเหมืองไว้ทำให้ตะกั่วและสารหนูเกิดการแพร่กระจายลงสู่แม่น้ำลำคลอง แหล่งน้ำดื่มน้ำใช้ของประชาชน ซึ่งโลหะหนักเหล่านี้ไม่สามารถถูกย่อยสลายให้ความเป็นพิษลดลงได้ ปริมาณตะกั่ว สารหนู และแคดเมียมในกองมูลดินทรายจากการทำเหมืองบริเวณต้นน้ำลำธารของแม่น้ำปัตตานีสูงถึง 0.25 -1.5 % , 0.17-0.57 % และ 6.4-33.6 ppm. ตามลำดับ (สุรพล อารีย์กุล และกัลยาณี คุปตานนท์, 2536)

นอกจากนี้ยังมีปัญหาการปนเปื้อนตะกั่วในน้ำดื่มมาใช้ในครัวเรือนสามารถเกิดได้จากการกักกรองในท่อประปาและก๊อกน้ำ พบว่าตะกั่วในน้ำดื่มมีค่าเกินมาตรฐานในหลายเมืองของประเทศสหรัฐอเมริกา ฝรั่งเศส และอังกฤษ สาเหตุก็เนื่องมาจากตะกั่วในท่อประปาและก๊อกน้ำถูกกักกรองหรือละลายน้ำได้ซึ่งขึ้นกับปฏิกิริยาทางเคมี น้ำกระด้างซึ่งมีแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นองค์ประกอบสามารถตกตะกอนตะกั่วให้กลายเป็นสารประกอบเคลือบผิวภายในท่อช่วยลดอัตราการละลายของตะกั่วลงได้

นันทนา สันตติวุฒิ, นพรัตน์ สุรพฤกษ์ และ มัทนา อึ้งสุประเสริฐ (2530) ศึกษาปริมาณโลหะหนักในน้ำบริเวณปากแม่น้ำรอบอ่าวไทย 17 สายและคลองอีก 2 สายที่ระบายลงสู่อ่าวไทยระหว่างปี 2527-2529 โดยเก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของ แคดเมียม, โครเมียม ทองแดง, ปรอท, ตะกั่ว และสังกะสี รวมทั้งสิ้น 132 ตัวอย่าง พบว่าปริมาณโลหะหนักส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพแหล่งน้ำผิวดินของสำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ยกเว้นปริมาณตะกั่วที่พบบริเวณปากแม่น้ำปรางมูรี, แม่น้ำบางประกง, แม่น้ำตราด, แม่น้ำประแส

และแม่น้ำปัตตานี มีค่าเฉลี่ยระหว่าง 0.06-0.11 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค่ามาตรฐานตะกั่วในแหล่งน้ำ 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยเฉพาะแม่น้ำปัตตานีพบปริมาณตะกั่วในน้ำเท่ากับ 0.11 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าเท่ากันทั้งในฤดูแล้งและฤดูฝน แสดงว่ากิจกรรมที่เป็นแหล่งปล่อยตะกั่วลงในแม่น้ำปัตตานี มีค่าสม่ำเสมอทั้งในฤดูแล้งและในฤดูฝน สาเหตุประการหนึ่งอาจได้รับน้ำทิ้งจากการทำเหมืองแร่ดีบุกในบริเวณต้นน้ำ

ณรงค์ ณ เชียงใหม่ (2531) ศึกษาคุณภาพแหล่งน้ำภาคใต้เมื่อปี พ.ศ. 2530 โดยเก็บตัวอย่างน้ำจากแม่น้ำ 13 สาย และแหล่งน้ำอื่น ๆ วัดปริมาณตะกั่วในน้ำตัวอย่างที่เก็บจากแม่น้ำปัตตานี บริเวณโรงสูบน้ำการประปาสวนภูมิภาค (จังหวัดยะลา) มีค่า 0.07 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าเกินมาตรฐานขององค์การอนามัยโลก

ประนอม ภูวนัตตชัย (2532) ศึกษาความเข้มข้นของตะกั่วในแม่น้ำของประเทศไทย จำนวน 35 สาย ระหว่างปี 2521-2531 และเก็บตัวอย่างในแม่น้ำปัตตานี จำนวน 43 ตัวอย่าง พบว่าร้อยละ 58.1 ของตัวอย่าง มีตะกั่วเกินค่ามาตรฐาน (0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร) และพบค่าสูงสุด 15.1 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อ 26 สิงหาคม 2529 ซึ่งเกินกว่าค่ามาตรฐานแหล่งน้ำดิบเพื่อการประปาขององค์การอนามัยโลก อาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพของประชาชนที่ใช้น้ำจากแม่น้ำปัตตานีเพื่อการอุปโภคบริโภค

Geater, et al. (1996) ศึกษาปริมาณตะกั่วในเลือดเด็กนักเรียนชั้นประถมศึกษาอายุระหว่าง 6-15 ปี ในพื้นที่ลุ่มน้ำปัตตานีซึ่งมีระดับตะกั่วในสิ่งแวดล้อมสูง พบว่าระดับตะกั่วในเลือดสูงสุดที่โรงเรียนบ้านถ้ำทะเลบริเวณเหมืองแร่ดีบุกเก่าในตำบลถ้ำทะเล อ.บันนังสตา จ.ยะลา รองลงมาคือโรงเรียนเทศบาล 3 ใน อ.เมือง จ.ปัตตานี ซึ่งตั้งอยู่ใกล้กับอุตสาหกรรมที่มีการใช้ Pb_3O_4 มากกว่า 95 % ของนักเรียนทั้ง 2 โรงเรียนมีปริมาณตะกั่วในเลือดสูงกว่าค่ามาตรฐานที่ WHO กำหนดไว้ (10 $\mu\text{g}/\text{dl}$) และนักเรียนโรงเรียนบ้านถ้ำทะเลที่มีปริมาณตะกั่วในเลือดมากกว่า 20 $\mu\text{g}/\text{dl}$ มีปริมาณสูงถึง 24% ในขณะที่นักเรียนโรงเรียนเทศบาล 3 มีปริมาณเพียง 9.8 % สารตะกั่วนี้มีผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของเด็กโดยตรง เพราะปริมาณตะกั่วเพียงเล็กน้อยสามารถทำอันตรายแก่สมองและระบบประสาทของเด็ก ทำให้ IQ ของเด็กต่ำลง สูญเสียสมาธิ การทรงตัวไม่ดี และมีผลต่อการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่มีหมู่ ซัลไฟดริล (-SH) ยับยั้งการสร้าง Heme และการใช้เหล็ก ทำลายระบบไต ทำให้สมองเสื่อมและเสียชีวิตในที่สุด (วรรณภา, 2540)

ปัญหาตะกั่วปนเปื้อนที่เกิดขึ้นในตำบลถ้ำทะเล อำเภอบันนังสตา จังหวัดยะลานั้น ทางรัฐบาลได้เข้าแก้ปัญหาโดยมอบหมายให้กรมทรัพยากรธรณีทำการควบคุมมลพิษของมูลดินทรายที่เกิดจากการทำเหมือง โดยทำเป็นหลุมฝังกลบแบบปลอดภัย (Secure Landfill) แต่ยังไม่มีการ

จัดหาแหล่งน้ำดื่มน้ำใช้ที่ปลอดภัยจากตะกั่วให้แก่ประชาชน ดังนั้นการจัดหาแหล่งน้ำดื่มน้ำใช้ที่ปลอดภัยให้แก่ประชาชนที่อยู่ในเขตที่มีการปนเปื้อนของตะกั่วสูงจึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยต้องมีระบบบำบัดรวมเพื่อการลดปริมาณตะกั่วในน้ำให้อยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยต่อการอุปโภค หรือส่งเสริมให้ชาวบ้านในพื้นที่ห่างไกลมีระบบบำบัดน้ำขนาดครัวเรือน เช่นระบบที่ใช้กรอง โดยใช้สารกรองที่หาได้ง่ายจากวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่น

การบำบัดตะกั่วมีหลายวิธีซึ่งใช้กันในปัจจุบัน เช่น การตกตะกอน การดูดซับ การแลกเปลี่ยนไอออน รีเวิร์สออสโมซิส แต่ละวิธีมีขีดจำกัดในการใช้งานที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีการใหม่ๆ ที่สะดวกและมีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วในน้ำ กระบวนการบำบัดที่มีพื้นฐานจากสิ่งมีชีวิตเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ปลอดภัย ง่ายต่อการใช้งานและประหยัดค่าใช้จ่าย ซึ่งกระดองปูม้าและเปลือกหอยแครง เป็นวัสดุเหลือใช้ที่หาได้ง่ายในท้องถิ่นภาคใต้ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) สามารถใช้เป็นสารตกตะกอนในการบำบัดโลหะหนักได้ เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถจับกับโลหะหนักในรูป โลหะ-คาร์บอเนตได้อย่างแข็งแรงและเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Patterson, *et al.*, 1997) องค์ประกอบหลักในกระดองปูนอกจากจะมีแคลเซียมคาร์บอเนตแล้วยังมีไคตินเป็นองค์ประกอบร่วมด้วย ซึ่งไคตินเป็นสารพอลิเมอร์ธรรมชาติและเป็นตัวดูดซับทางชีวภาพ (Biosorbent) ที่มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดโลหะหนัก ไคตินประกอบด้วยหน่วยของ (1-4)-2-acetamido-2-deoxy-D-glucose ซึ่งกลุ่มของ Acetamido เป็น Chelators ที่ไม่เฉพาะเจาะจงและสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโลหะหนักได้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการกำจัดตะกั่วจากวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่น รวมทั้งนำวัสดุที่ได้มาใช้กรองน้ำที่ปนเปื้อนตะกั่ว ซึ่งง่ายต่อการนำมาประยุกต์ดัดแปลงใช้ในครัวเรือน เพื่อความปลอดภัยในการอุปโภค บริโภคของประชาชน

1.2 การตรวจเอกสาร

เนื่องจากการวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการบำบัดน้ำที่มีตะกั่วปนเปื้อนด้วยการใช้กระดองปูม้าและเปลือกหอยแครง ซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติที่เหลือทิ้งในท้องถิ่น มีไคตินและแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบ เพื่อลดปริมาณตะกั่วในน้ำ รายละเอียดในการศึกษามีดังนี้

1.2.1 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

กระบวนการดูดซับเป็นวิธีการหนึ่งที่ถูกนิยมนำมาใช้กันมากในด้านการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากสามารถกำจัดสารปนเปื้อนขนาดเล็กจนถึงขั้นโมเลกุล ซึ่งไม่อาจกำจัดได้โดยวิธีการตกตะกอนหรือการกรองแบบธรรมดา โดยอาศัยความสามารถเฉพาะตัวของสารในการดึงโมเลกุลของสารปนเปื้อนให้มาเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ เรียกปรากฏการณ์ที่สารปนเปื้อนมาเกาะที่ผิวว่า กระบวนการดูดซับ (Adsorption) ตัวที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียก ตัวดูดซับ (Adsorbent) ส่วนโมเลกุลที่มาเกาะติดที่ผิวตัวดูดซับเรียก ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ปรากฏการณ์การดูดซับนี้เกิดขึ้นระหว่าง 2 พื้นผิว (Surface) โดยที่ตัวถูกดูดซับจะไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งได้แก่ พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นผิวระหว่างของแข็งกับก๊าซ พื้นผิวระหว่างของแข็งกับของแข็ง และพื้นผิวระหว่างของเหลวกับของเหลว กระบวนการดูดซับเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น สารอินทรีย์และโลหะถูกดูดซับในดินหรือตะกอนดินในทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นโดยมนุษย์ เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนจากอากาศและน้ำ กระบวนการดูดซับนี้มีการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมหลายด้านด้วยกัน เช่น การใช้ดินเหนียวดูดซับยาฆ่าแมลงในดินหรือดูดซับโลหะหนักจาก Landfill เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

1.2.1.1 ประเภทของตัวดูดซับ (Adsorbent) แบ่งได้ 3 ประเภท

1.2.1.1.1 สารอนินทรีย์ ได้แก่ ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ แอคติเวตเต็ดซิลิกา (Activated Silica) เป็นต้น สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่ตัวดูดซับประเภทสารอนินทรีย์นี้สามารถจับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิดทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับประเภทสารอนินทรีย์มีข้อจำกัดมาก

1.2.1.1.2 ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) อาจจัดเป็นสารอนินทรีย์สังเคราะห์แต่เป็นตัวดูดซับที่ดีกว่าสารอนินทรีย์ชนิดอื่นๆ จึงเป็นที่นิยมกันมากเนื่องจากเป็นถ่านที่ผ่านการกระตุ้นเพื่อให้ความพรุนมากและมีพื้นที่ผิวภายในสูง โดยทั่วไปมีพื้นที่ผิวประมาณ 450 -1,500 ตารางเมตรต่อกรัม (Weber, 1981) และมีขนาดรูพรุนตั้งแต่ 10 -10,000 อังสตรอม

(Hessler, 1963) ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากชิ้นส่วนของพืชและสัตว์ จะมีแร่ธาตุที่เป็นอันตรายน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหิน (ดำรง และ อภิสิริ, 2533)

1.2.1.1.3 ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Resin) สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300 - 500 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งถือว่ามีค่าต่ำเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ แต่เรซินมีข้อได้เปรียบมากกว่าคือ สามารถปรับสภาพนำมาใช้ใหม่ได้ง่ายและสารที่ใช้มีราคาถูก เช่น เกลือแกง (มันสิน, 2538)

1.2.1.2 รูปแบบของการดูดซับ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1.2.1.2.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ยึดติดกับผิวตัวดูดซับ (Adsorbent) โดยแรงแวนเดอร์วาลส์ที่อ่อน (Weak Van Der Waal's force) เรียกกระบวนการดูดติดผิวตัวดูดซับนี้ว่า การดูดซับ (Adsorption) ซึ่งเป็นกระบวนการแบบผันกลับได้ (Reversible Process) ส่วนกระบวนการที่ตัวดูดซับหลุดออกจากผิวตัวดูดซับ เรียกว่า Desorption โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับในลักษณะซ้อนกันเป็นหลายชั้นเรียกว่า Multilayer

1.2.1.2.2 การดูดซับทางเคมี (Chemisorption) โมเลกุลของตัวถูกดูดซับยึดติดอยู่กับผิวของตัวดูดซับโดยพันธะเคมีที่แข็งแรง ซึ่งมีความแข็งแรงมากกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์และยากต่อการเกิด Desorption การดูดซับทางเคมีนี้โมเลกุลตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่เป็นชั้นเดียว เรียกว่า Monolayer (เขียวชาญ, 2535)

1.2.1.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

1.2.1.3.1 สมบัติของตัวดูดซับ

ก) พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน พื้นที่ผิวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับรูพรุน หากรูพรุนมีมากทำให้มีพื้นที่ผิวดูดซับมาก ดังนั้นความสามารถในการดูดซับก็จะมากขึ้น การดูดซับจะเกิดได้ดีเมื่อโมเลกุลตัวถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนเล็กน้อย หากรูพรุนมีมากแต่มีขนาดเล็กหรือรูพรุนขนาดใหญ่แต่ปากรูพรุนมีขนาดเล็ก ก็ไม่ทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น

1.2.1.3.2 สมบัติของสารที่ถูกดูดซับ

ก) ความสามารถในการละลาย สารที่มีความสามารถในการละลายสูง จะถูกดูดซับได้น้อย เนื่องจากก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับขึ้นจะต้องมีการทำลายพันธะของตัวถูกละลายและตัวทำละลายก่อนที่จะเกิดการดูดซับ ซึ่งถ้าไม่มีการทำลายพันธะก็จะไม่สามารถเกิดการดูดซับได้

ข) น้ำหนักและขนาดของโมเลกุล ถ้าน้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น และโมเลกุลที่มีโครงสร้างเป็นกิ่ง (Branched Chain) จะถูกดูดซับได้ดีกว่าโมเลกุลที่เป็นโซ่ตรง (Straight Chain)

ค) ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) การดูดซับขึ้นกับสภาพความเป็นขั้วของพื้นผิวตัวดูดซับ เช่น หาก pH ลดลงส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ที่พื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้การดูดซับไอออนลบเกิดได้มากขึ้น (Ford, 1981)

ง) อุณหภูมิ การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับไปยังรูพรุนของตัวดูดซับเร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับอ่อนลง (Broughton, 1981)

1.2.1.4 การศึกษาความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity)

ความสามารถในการดูดซับเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกละลายต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ไปกับความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ ณ จุดสมดุล เพื่อคัดเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมที่สุด โดยอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ (Isotherm)

1.2.1.4.1 Langmuir Isotherm

การดูดซับแบบ Langmuir เป็นพื้นฐานของการดูดซับอื่นๆ ซึ่งมีสมมติฐานว่ามีการดูดซับสูงสุดสัมพันธ์กับโมเลกุลตัวถูกละลายที่จัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ มีพลังงานของการดูดซับคงที่ ไม่มีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวถูกละลายในแนวระนาบบนพื้นผิวตัวดูดซับ (Patterson and Patzelt, 1981)

$$Q = \frac{Q_m b C}{1 + b C}$$

Q	=	จำนวนโมลของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักที่ความเข้มข้น C
Q _m	=	จำนวนโมลของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักตัวดูดซับที่จัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียว (monolayer) บนพื้นผิวตัวดูดซับ
C	=	ความเข้มข้นที่จุดสมดุล (mg/l , M)
b	=	ค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับพลังงาน

จัดเป็นสมการเส้นตรงจะได้

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_m} + \frac{1}{bQ_m} \frac{(1)}{C}$$

1.2.1.4.2 Freundlich Isotherm

การดูดซับแบบ Freundlich นี้เป็นการดูดซับแบบที่ตัวถูกดูดซับเรียงซ้อนกันหลายชั้น ด้วยพันธะอ่อนๆ

$$q_e = X/M = KC^{1/n}$$

เมื่อ	q _e	=	ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (mg/g)
	X	=	ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับ (mg)
	M	=	ปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (g)
	C	=	ความเข้มข้นสมดุลของตัวถูกดูดซับ (mg/l หรือ M)
	K	=	ค่าคงที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับ (mg/g)
	1/n	=	ค่าคงที่ที่แสดงถึงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย (Concentration Dependence)

สมการ Freundlich เมื่อเขียนกราฟค่า X/M และ C จากการทดลอง ลงบนกราฟ Log-Log จะได้ดังสมการ

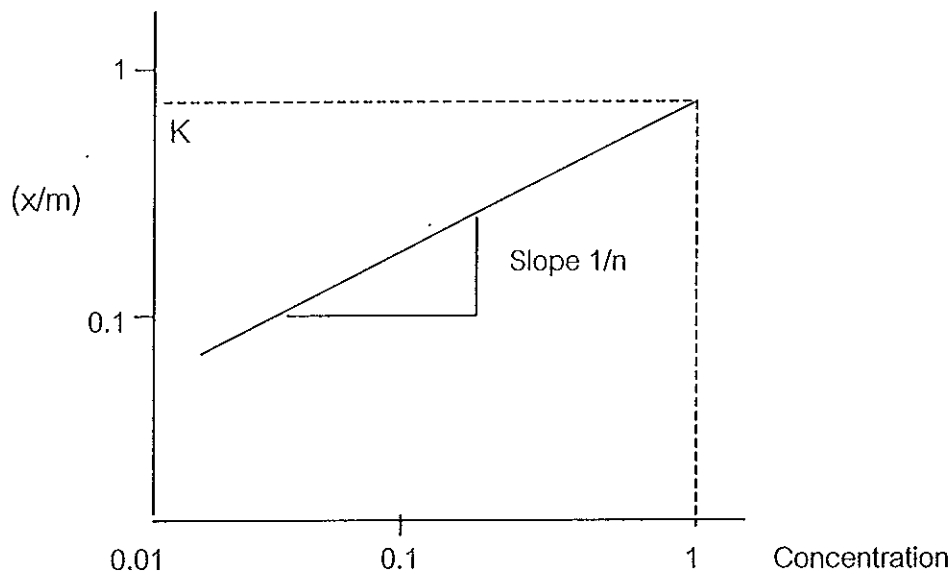
$$\log (x/m) = \log K + 1/n \log C$$

สามารถหาค่า K และ 1/n ได้โดยที่

1/n = ความชันของกราฟ

K = ค่า X/M ที่ค่า C = 1 ตามภาพประกอบ 1.1

หากค่า K และ 1/n มีค่าต่ำ ความสามารถในการดูดซับจะต่ำในทุกค่าความเข้มข้น แต่ถ้า 1/n สูงแสดงว่า ความสามารถในการดูดซับนี้จะขึ้นกับความเข้มข้น เช่น หากความเข้มข้นต่ำ ความสามารถในการดูดซับจะลดลงอย่างรวดเร็ว และในทางตรงกันข้ามเมื่อความเข้มข้นสูง ความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้นอย่างมาก

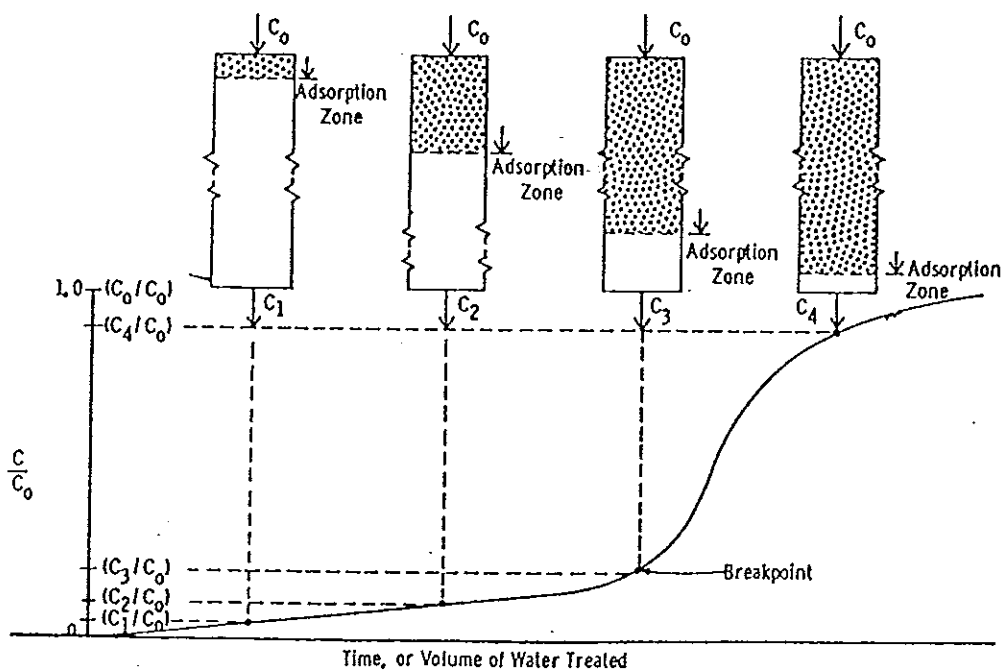


ภาพประกอบ 1.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Freundlich

การหาไอโซเทอร์มการดูดซับนั้น กระทำได้โดยนำตัวดูดซับที่บดละเอียดปริมาณที่แตกต่างกัน มาเขย่ากับน้ำที่มีสารปนเปื้อน จนถึงจุดสมดุลของการดูดซับ จากนั้นแยกน้ำใสออกมา วิเคราะห์ปริมาณสารปนเปื้อนที่เหลือ ผลการทดสอบที่ได้นำไปใช้คัดเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งานนั้นๆ

1.2.1.5 การศึกษาอายุการใช้งานของตัวดูดซับและการศึกษาค่าคงที่

การศึกษาในขั้นนี้กระทำโดยผ่านน้ำที่ปนเปื้อนอย่างต่อเนื่องเข้าสู่คอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับ เมื่อน้ำไหลผ่านชั้นตัวดูดซับเป็นระยะเวลาหนึ่ง จะมีสารปนเปื้อนเกาะติดที่ผิวตัวดูดซับ ทำให้ตัวดูดซับค่อยๆ หมดประสิทธิภาพตามปริมาณน้ำที่ไหลผ่านชั้นตัวดูดซับ ดังนั้นความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำที่ผ่านการดูดซับจึงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ดังภาพประกอบ 1.2 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นของปริมาณน้ำที่ผ่านชั้นตัวดูดซับแล้วต่อความเข้มข้นเริ่มต้นเทียบกับปริมาณที่ใช้ เรียกว่า Breakthrough Curve



ภาพประกอบ 1.2 แสดง Breakthrough Curve ของการทดสอบแบบคอลัมน์
ที่ มา Weber (1981)

1.2.2 ไคติน-ไคโตแซน

1.2.2.1 ไคติน (Chitin)

ไคตินเป็นสารอินทรีย์ประเภทคาร์โบไฮเดรต ซึ่งรู้จักกันดีว่าเป็นสารให้ความแข็งแรงแก่เปลือกสัตว์จำพวก กุ้ง หอย ปู แมลง และพบในผนังเซลล์ของเชื้อราและสาหร่ายบางชนิด ไคตินเป็นสารพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีความคล้ายคลึงกับเซลลูโลสของผนังเซลล์ของพืชเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงมีการสกัดสารไคตินจากสิ่งมีชีวิตมาใช้ประโยชน์มากมาย จากการสกัดไคตินจากเปลือกกุ้งและเปลือกปู พบว่า เปลือกกุ้งมีไคติน 14-27% ส่วนเปลือกปูมีไคตินประมาณ 13-15 % เทียบน้ำหนักแห้ง ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐกิจในการสกัดไคตินจากสิ่งมีชีวิต แหล่งที่เป็นไปได้มีเพียง 2 แหล่งคือ จากกุ้ง (หัวกุ้งและเปลือกกุ้ง) และการหมักเชื้อรา ไคตินเองอาจไม่น่าสนใจในเชิงเคมีเท่าใดนัก สูตรโครงสร้างดังภาพประกอบ 1.3 เนื่องจากเป็นสารพอลิเมอร์ที่ไร้ประจุทำให้ยากต่อการละลายในสารละลายทั่วไป แต่สารที่ดัดแปลงจากไคตินซึ่งเรียกว่า ไคโตแซน (Chitosan) เป็นสารที่มีศักยภาพในการที่จะประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ มากกว่า (วิสิฐ และ วันทนีย์, 2535)

1.2.2.2 ไคโตแซน (Chitosan)

ไคโตแซนมีชื่อทางเคมีว่า Poly-β-(1→4) 2-amino-2deoxy-D-glucan มีสูตรโครงสร้างดังภาพประกอบ 1.3 ไคโตแซนสามารถผลิตได้จากไคติน โดยการแยกเอาหมู่ Acetyl ออก (Deacetylation) เหลือเพียงหมู่อะมิโน (-NH₂) ความสามารถในการใช้งานของไคโตแซนขึ้นกับหมู่อะมิโน (-NH₂) เมื่อหมู่อะมิโนละลายจะรับโปรตอนกลายเป็น (-NH₃)⁺ ทำให้ไคโตแซนมีประจุบวก ซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคที่มีประจุลบ ซึ่งแขวนลอยหรือละลายอยู่ในน้ำ (ธีรพล, 2534)

1.2.2.3 การใช้ประโยชน์ของไคติน-ไคโตแซน

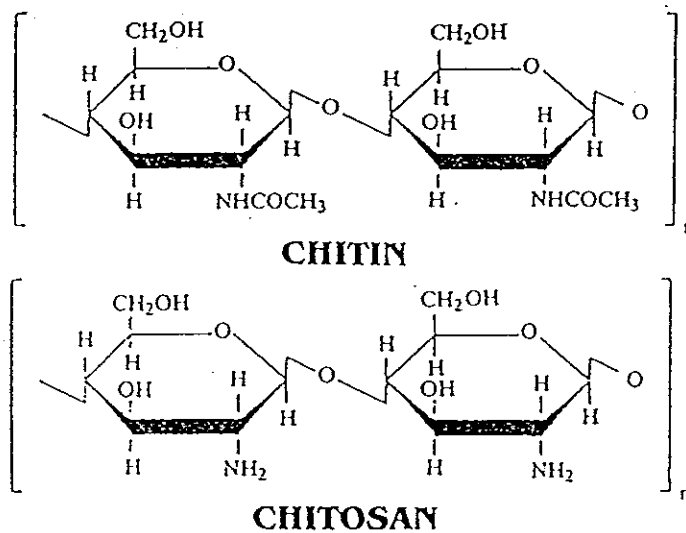
1.2.2.3.1 ด้านอุตสาหกรรม นำมาบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรม เช่น นำไคโตแซนมากำจัดของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้ง โดยใช้ไคตินและไคโตแซนเป็นตัวคีเลตจับโลหะหนัก เช่น ปรอท สังกะสี ทองแดง ยูเรเนียม โคโรเนียม แคดเมียม ในประเทศญี่ปุ่นไคตินถูกนำมาใช้ทำให้น้ำบริสุทธิ์สำหรับดื่ม ในประเทศนอร์เวย์นำไคโตแซนมาเพิ่มความใสให้น้ำในสระว่ายน้ำ และบ่อแร่ โดยที่ไคโตแซนจะจับจุลินทรีย์และช่วยกำจัดโลหะ

1.2.2.3.2 ด้านการแพทย์ นำไคตินและไคโตแซนมาผลิตวัสดุเร่งการรักษาบาดแผล เช่น ทำเส้นใยฟองน้ำ ด้ายเย็บแผล ผิวนั่งเทียม เพื่อเพิ่มความรวดเร็วในการรักษาบาดแผลผ่าตัด และแผลไฟไหม้

1.2.2.3.3 ด้านอุตสาหกรรมอาหาร นำไคโตแซนมาทำมายองเนส เนยถั่ว และในอนาคตอาจนำมาใช้เป็นวัสดุห่อหุ้มอาหาร ซึ่งมีความแข็งแรงและไม่เป็นพิษ เช่น ปลูกหุ้มไส้กรอก วัสดุห่ออาหารเข้าเตาอบ

1.2.2.3.4 ด้านอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ ไคตินมีศักยภาพในการผลิตกระดาษ เพราะเพิ่มไคตินเพียง 1% โดยน้ำหนักจะเพิ่มความทนทานของกระดาษและเร่งอัตราเร็วในการแยกน้ำออกจากเยื่อกระดาษ

1.2.2.3.5 อุตสาหกรรมผลิตเครื่องสำอาง นำไคโตแซนมาทำเครื่องสำอาง ประทินผิวและบำรุงรักษามุม ไคตินนำมาเป็นส่วนผสมในโลชั่น แชมพู สบู่เหลว โฟมอาบน้ำ ยาสีฟัน (วิสิฐ, 2532)



ภาพประกอบ 1.3 สูตรโครงสร้างของไคตินและไคโตแซน

1.2.3 ตะกั่ว

1.2.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตะกั่ว

ตะกั่วเป็นธาตุตัวที่ 5 ของหมู่ 4 A ในตารางธาตุ ซึ่งใช้สัญลักษณ์ทางเคมีว่า Pb มีเลขออกซิเดชัน 0, +2, +4 ตะกั่วมีสถานะออกซิเดชัน +2 ที่เสถียร สมบัติทางกายภาพของตะกั่วประกอบด้วย ความหนาแน่น 11.3 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร จุดหลอมเหลว 327 องศาเซลเซียส จุดเดือด 1744 องศาเซลเซียส การนำไฟฟ้าดี ออกไซด์ของตะกั่วอยู่ในรูป PbO , PbO_2 และ Pb_3O_4 ซึ่ง Pb^{2+} จะเสถียรกว่า Pb^{4+} เกลือของตะกั่ว $2+$ โดยทั่วไปไม่ละลายน้ำ ยกเว้น อะซิเตต และไนเตรท เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวอย่างอิสระให้ไอออน Pb^{2+}

ตะกั่วส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแร่ เช่น แร่กาลีนา (Galena) แร่เซอร์ไซต์ (Cerussite) และแร่แองกลีไซต์ (Anglesite) แร่ซึ่งมีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ ได้แสดงไว้ในตาราง 1.1

1.2.3.2 ประโยชน์ของตะกั่ว

1.2.3.2.1 โลหะตะกั่ว

คุณสมบัติคงทนต่อการผุกร่อน อ่อนตัว หลอมเหลวง่าย รวมทั้งมีคุณสมบัติในการป้องกันการแผ่รังสี ตะกั่วจึงใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมดังนี้

- ก) หล่อตัวพิมพ์
- ข) หุ้มสายเคเบิล สายไฟฟ้า สายโทรศัพท์
- ค) ทำหัวกระสุนปืน
- ง) ชุบเคลือบโลหะอื่นเพื่อป้องกันสนิม
- จ) เชื่อมบัดกรี
- ฉ) อุปกรณ์ป้องกันรังสีจากเครื่องเอกซเรย์ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู
- ช) โลหะผสม (Alloy) ต่างๆ เช่น
 - ตะกั่วผสมดีบุก เป็นโลหะบัดกรี (Solder)
 - ตะกั่วผสมพลวง เป็นโลหะตัวพิมพ์
 - ตะกั่วผสมดีบุกและทองแดง เป็นโลหะพิวเตอร์ (Pewter)
 - ใช้ในระบบสัญญาณไฟไหม้อัตโนมัติซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่ 70°C

ตาราง 1.1 แร่ที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ

ชนิดของแร่	สูตรโมเลกุล	ชนิดของแร่	สูตรโมเลกุล
Anglesite	$PbSO_4$	Lanarkite	Pb_2SO_5
Beudantite	$[Pb,Fe,S(AsO_3)]$	Leadhillite	$Pb_4SO_4(CO_3)_2(OH)_2$
Boulangerite	$Pb_5Sb_4S_{11}$	Linarite	$(PbCu)_2SO_4(OH)$
Bournonite	$CuPbSbS_3$	Maneghinite	$Pb_{13}Sb_7S_{23}$
Cannizzarite	$Pb_3Bi_5S_{11}$	Minetite	$Pb_5Cl(AsO_4)_3$
Cerrussite	$PbCO_3$	(Campyite)	
Cotunnit	$PbCl_2$	Nasorite	$PbSbO_2Cl$
Crocoite	$PbCrO_4$	Phosgenite	$Pb_2Cl_2CO_3$
Curite	$Pb_2U_5O_{17} \cdot 4H_2O$	Plumbojarosite	$PbFe_6(SO_4)_4(OH)_{12}$
Descloizite	$Pb(Zn,Cu)VO_4OH$	Pyromorphite	$Pb_5Cl(PO_4)_3$
Fornacite	(Pb,Cu,Cro_4,AsO_4)	Sartorite	$PbAs_2S_4$
Galena	PbS	Stolzite	$PbWO_4$
Gummit	(Pb,U,Th,OH)	Vanadinite	$Pb_5Cl(VO_4)_3$
Jamesonite	$Pb_4FeSb_6S_{14}$	Vauquelinite	(Pb,Cu,Cro_4,AsO_4)
Jordanite	$Pb_{14}As_7S_{24}$	Wulfenite	$PbMoO_4$

ที่มา Moore, *et al.* (1979)

1.2.3.2.2 ตะกั่วอินทรีย์

ก) ตะกั่วออกไซด์ (Lead oxide) Lead mono-oxide (PbO) Lead dioxide (PbO₂) Lead red oxide (Pb₂O₄) ใช้ในอุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมแบตเตอรี่ อุตสาหกรรมกระจก อุตสาหกรรมเครื่องเคลือบ

ข) ตะกั่วคาร์บอเนต (Lead carbonate) ตะกั่วซัลเฟต (Lead sulfate) และตะกั่วโครเมต ใช้ในอุตสาหกรรมสี

ค) ตะกั่วอะซิเตต (Lead acetate) เป็นเกลือของตะกั่วที่ละลายน้ำได้ดีและใช้ในเครื่องสำอางค์และครีมไฝผม

ง) ตะกั่วไนเตรต (Lead nitrate) ใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติกและอุตสาหกรรมยาง

1.2.3.2.3 ตะกั่วอินทรีย์

ก) ตะกั่วเตตระเอทิล Tetraethyl lead (TEL) และ ตะกั่วเตตระเมทิล Tetramethyl lead (TML) ใช้เป็นสารเพิ่มค่าออกเทนและให้เครื่องยนต์เดินเรียบ (Antiknock) ในน้ำมันเชื้อเพลิง เป็นตะกั่วที่นำมาใช้ใหม่ไม่ได้ เพราะเมื่อเผาแล้วกลายเป็นไอ เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

1.2.3.3 การเข้าสู่ร่างกาย

ตะกั่วเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง ดังนี้

1.2.3.3.1 ทางเดินหายใจ

ก๊าซหรือละอองของตะกั่วและฝุ่นขนาดเล็กกว่า 0.75 ไมครอนสามารถผ่านสู่ถุงลมในปอดและผ่านสู่กระแสเลือด ฝุ่นขนาดใหญ่จะติดค้างบริเวณทางเดินหายใจ ตอนบน เช่น จมูก ช่วงต่อระหว่างโพรงจมูก คอและหลอดลมใหญ่ซึ่งร่างกายจะขับออกในรูปของเสมหะ

1.2.3.3.2 ทางเดินอาหาร

เกิดจากการปนเปื้อนในอาหาร น้ำ โดยวิธีใดวิธีหนึ่ง เช่น ปนเปื้อนมากับอาหาร มือที่หยิบอาหาร การสูบบุหรี่ขณะทำงาน ตะกั่วจะผ่านสู่กระเพาะอาหาร รวมทั้งการกลืนเสมหะ ทางเดินอาหารจะดูดซึมตะกั่วสู่กระแสเลือดประมาณ 10 % ส่วนที่เหลือถูกขับออกทางอุจจาระ

1.2.3.3.3 ทางผิวหนัง

เฉพาะตะกั่วอินทรีย์เท่านั้นที่ซึมผ่านทางผิวหนังได้ (สมพูล, 2532)

1.2.3.4 การแพร่กระจายและการสะสมของตะกั่วในร่างกาย

ตะกั่วเป็นธาตุที่ไม่มีหน้าที่เกี่ยวกับเมตาบอลิซึมในร่างกาย ดังนั้นเมื่อตะกั่วเข้าสู่ร่างกายไม่ว่าจะโดยทางปาก ทางการหายใจ หรือทางผิวหนังจึงก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์ เช่นเดียวกับปรอทที่ทำให้เกิดโรคมินามาตะ หรือสารหนูที่ทำให้เกิดโรคพิษสารหนู ทั้งนี้พบว่า ตะกั่วมีความเป็นพิษมากกว่าแคดเมียม ปรอทและพลวง ถึง 5 เท่า (อุดมรัตน์, 2529) และเนื่องจากตะกั่วมีทั้งตะกั่วอินทรีย์และตะกั่วอนินทรีย์ อาการพิษที่เกิดขึ้นจึงมีลักษณะแตกต่างกัน

นอกจากนี้ตะกัวยังก่อให้เกิดผลกระทบทางอ้อม เช่น ทำให้ความต้านทานต่อโรคไข้ไทฟอยด์ลดลง (เปี่ยมศักดิ์, 2534) สำหรับการสะสมตะกั่วในร่างกายเมื่อเข้าสู่กระแสเลือด แล้ว จะถูกพาไปทั่วร่างกาย สามารถพบตะกั่วได้ในทุกส่วน ตะกั่วส่วนใหญ่สะสมอยู่ในกระดูกถึง 95 % หรือประมาณ 6.60 - 7.82 ไมโครกรัมต่อกรัม ลิ้นหัวใจและสมองมีตะกั่ว 0.05-0.09 ไมโครกรัมต่อกรัม ไทรอยด์ กล้ามเนื้อ ปอด กระเพาะ ลำไส้มีตะกั่ว 0.14-0.19 ไมโครกรัมต่อกรัม ไต ม้าม ตับ และตับอ่อน มีตะกั่ว 0.65-0.80 ไมโครกรัมต่อกรัม เส้นผมมีตะกั่ว 2-80 ไมโครกรัมต่อกรัม ตะกั่วถูกขับจากร่างกายทางไตและเหงื่อ และสามารถพบตะกั่วในน้ำนมมารดา ในคนปกติมีตะกั่วในปัสสาวะประมาณ 50-80 ไมโครกรัมต่อลิตร ผู้ใหญ่ไม่ควรมีตะกั่วในเลือดเกินกว่า 40 ไมโครกรัมต่อเดซิลิตร (สมพูล, 2532) ส่วนในเด็กไม่ควรมีตะกั่วในเลือดเกินกว่า 10 ไมโครกรัมต่อเดซิลิตร (WHO, 1996)

1.2.3.5 ความเป็นพิษของตะกั่ว

อันตรายของตะกั่วต่อระบบภายในร่างกายสิ่งมีชีวิตมีดังนี้

1.2.3.5.1 ระบบการสร้างเม็ดเลือด พิษตะกั่วทำให้เกิดโรคโลหิตจาง โดยรบกวนการทำงานของเอนไซม์ที่สังเคราะห์ Heme หลายชนิด และยับยั้งการใช้เหล็ก ทำให้ฮีโมโกลบินลดลง

1.2.3.5.2 ระบบประสาท ตะกั่วมีพิษทำลายระบบประสาท ทำให้เกิดอาการเฉื่อยชา เมื่อยล้าง่าย อัมพาต ช้อมือ-ช้อเท้าตก วิงเวียนศีรษะ กล้ามเนื้อทำงานไม่สัมพันธ์กันทำให้หนักล้าง่าย นอนไม่หลับ หงุดหงิด ตกใจง่าย สมองเสื่อมช้า ความจำเสื่อม มึนงง และ ชัก

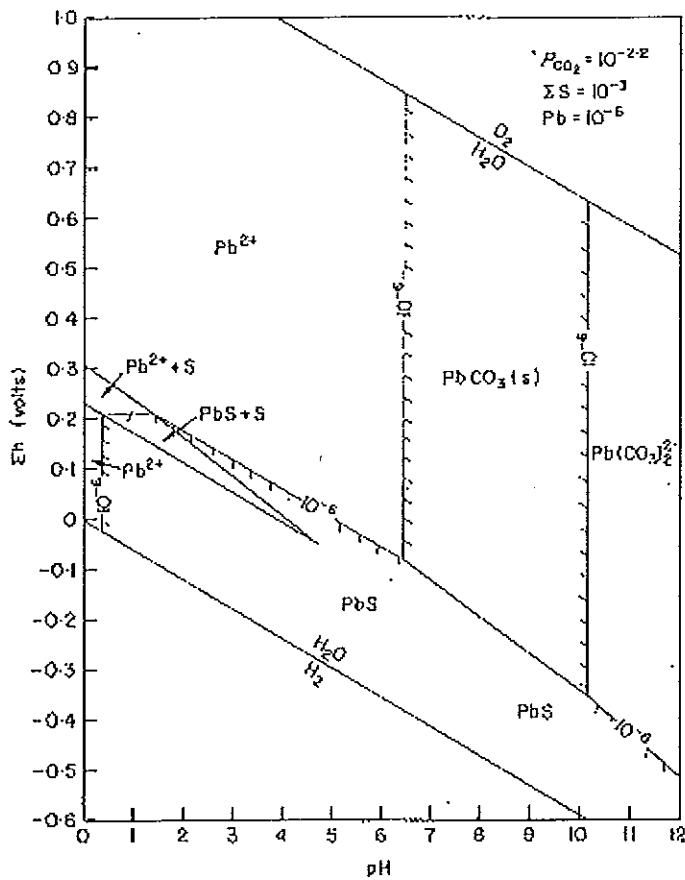
1.2.3.5.3 ระบบไต ตะกั่วทำความเสียหายต่อท่อไต ทำให้มีการขับกรดอะมิโน น้ำตาลและฟอสเฟต ออกมากับปัสสาวะมากผิดปกติ ทั้งนี้เนื่องจาก ตะกั่วรวมตัวกับโปรตีนของ เซลล์ภายในไต ทำให้หลอดไตทำงานผิดปกติ

1.2.3.5.4 กระเพาะและลำไส้ เมื่อได้รับพิษตะกั่วจะทำให้ปวดท้องรุนแรง อุจจาระ มีเลือดปน หากมีอาการมากจะมีความรู้สึกมีรสโลหะในปาก (กิตติ, 2528)

1.2.3.5.5 ระบบสืบพันธุ์ พิษตะกั่วมีผลต่อการมีประจำเดือนของสตรี และ อาจมีผลทำให้เกิดการแท้งบุตรได้ (วรรณภา, 2540)

1.2.4 ความสัมพันธ์ Eh-pH ของตะกั่วในสิ่งแวดล้อม

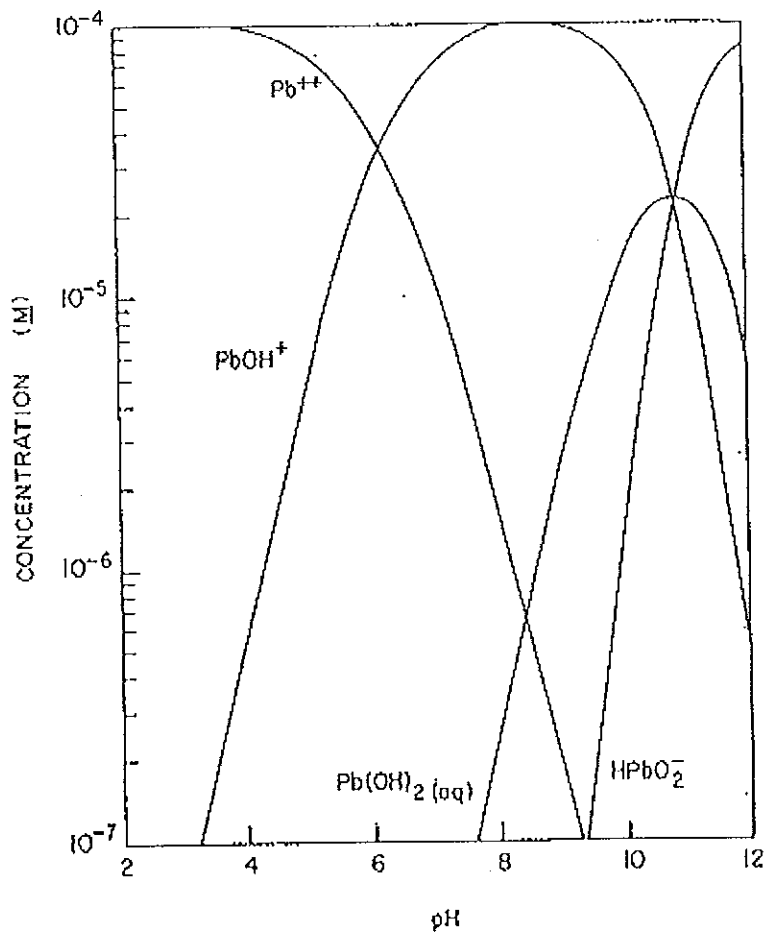
การเปลี่ยนแปลงของธาตุต่างๆ ในสิ่งแวดล้อมสามารถอธิบายได้ด้วยไดอะแกรม Eh-pH ในภาพประกอบ 1.4 ซึ่งค่า Eh ที่มากกว่า 0 คือสภาวะ Oxidizing ส่วนค่า Eh ที่ต่ำกว่า 0 คือสภาวะ Reducing



ภาพประกอบ 1.4 ไดอะแกรม Eh-pH ของตะกั่ว (ระบบ Pb-O-H-S-C)

ที่มา Rose, Hawkes and Webb (1979)

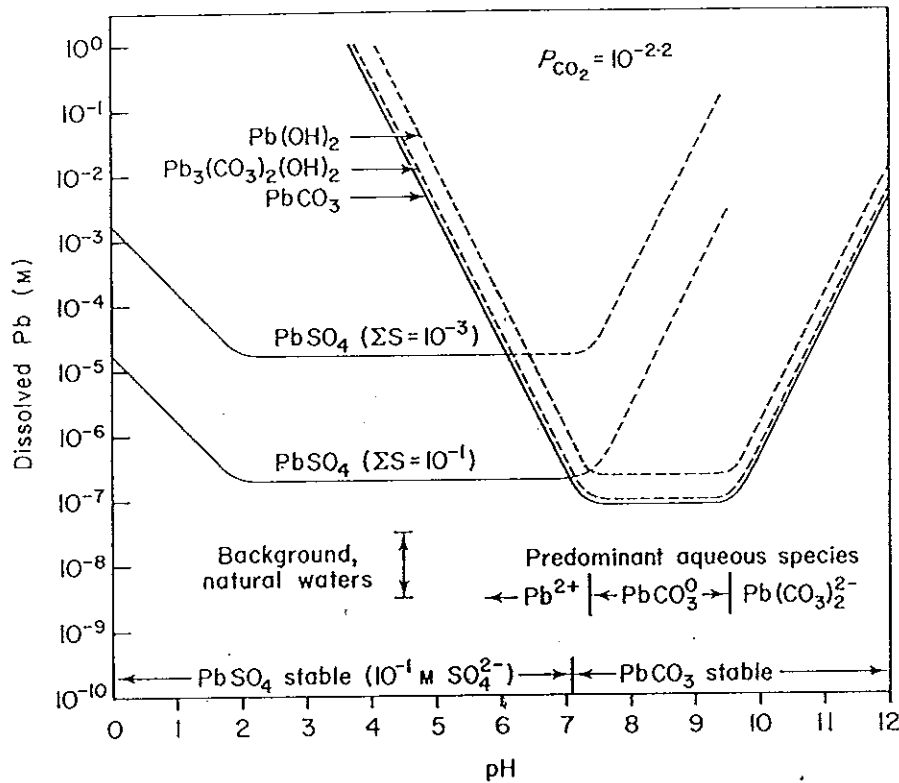
ใน Eh-pH ไดอะแกรม แสดงขอบเขตการเปลี่ยนแปลงของตะกั่ว ซึ่งตะกั่วจะอยู่ในรูปของสารประกอบใดขึ้นกับ พีเอช (pH) และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล (Eh) ในสิ่งแวดล้อมนั้น ที่ pH ในช่วง 6.5-10 ตะกั่วละลายน้ำได้น้อยอยู่ในรูป $PbCO_3$ และที่ pH มากกว่า 10 อยู่ในรูป $Pb(CO_3)_2^{2-}$ ส่วนที่ pH ต่ำกว่า 6 ตะกั่วอยู่ในรูปละลายน้ำได้ (Pb^{2+})



ภาพประกอบ 1.5 ไดอะแกรมสปีชีส์ของตะกั่วในน้ำ

ที่มา Fuerstenau and Palmer (1976)

อิออนของตะกั่วในน้ำมีได้หลายรูปขึ้นกับค่า pH ดังภาพประกอบ 1.5 ที่ pH ในช่วง 3 - 10 อิออนของตะกั่วส่วนใหญ่อยู่ในรูป $PbOH^+$ รองลงมาคือ Pb^{2+} ส่วน $Pb(OH)_2$ มีบ้างเล็กน้อย

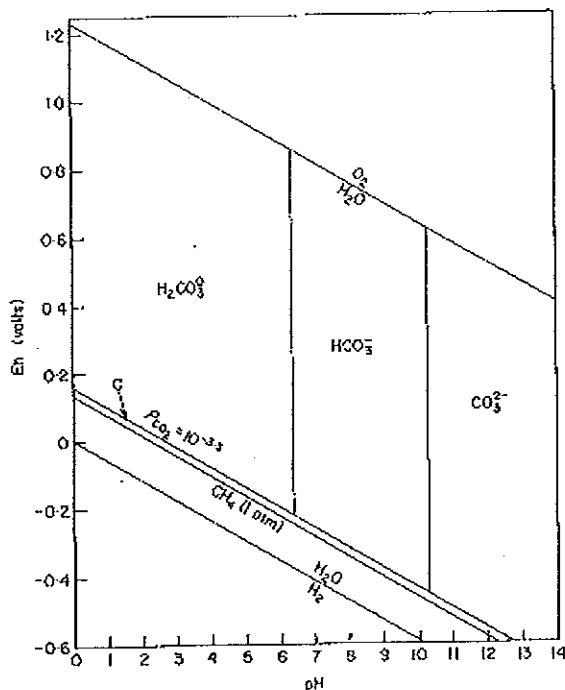


ภาพประกอบ 1.6 แสดงการละลายของแร่ในระบบ Pb-O-H-S-C ที่ 25 องศาเซลเซียส, 1 atm ภายใต้สภาวะ Oxidizing, $P_{CO_2} 10^{-2.2}$ atm (ในดินและน้ำใต้ดิน) เส้นประแสดง metastable solubilities

ที่มา Rose, Hawkes and Webb (1979)

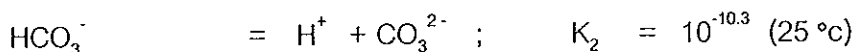
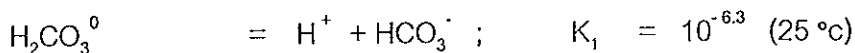
ที่ pH ในช่วง 7-10 $PbCO_3$ (Cerussite) อยู่ในรูปที่เสถียรซึ่งละลายน้ำได้น้อย ส่วน $Pb_3(CO_3)_2(OH)_2$ (Hydrocerussite) อยู่ในรูปที่เกือบจะเสถียร ปริมาณตะกั่วที่ละลายในสภาวะ oxidation มีขีดจำกัดประมาณ $10^{-6.5}$ M ตามภาพประกอบ 1.6

1.2.5 รูปแบบของคาร์บอน (C) ในสารละลาย



ภาพประกอบ 1.7 ไดอะแกรม Eh-pH ของคาร์บอน
ที่มา Rose, Hawkes and Webb (1979)

ในสภาวะ Oxidizing สปีชีส์ของคาร์บอนที่เสถียรอยู่ในรูป $H_2CO_3^0$, HCO_3^- , และ CO_3^{2-}
ความสัมพันธ์ของแต่ละสปีชีส์ในภาพประกอบ 1.7 แสดงดังสมการ



ความดันของ CO_2 ในบรรยากาศปกติประมาณ $10^{-3.5}$ atm ส่วนในดินและน้ำใต้ดิน
ความดันของ CO_2 สูงกว่าซึ่งอยู่ในช่วง $10^{-1.0} - 10^{-2.5}$ atm

ภายใต้สภาวะ Reducing กราไฟต์และสารประกอบคาร์บอน มีความเสถียร ทำให้
ปฏิกิริยา Oxidation-Reduction ของคาร์บอนเกิดได้ช้า แต่แบคทีเรียและจุลชีพอื่น ๆ สามารถเร่ง
ปฏิกิริยาให้เกิดได้เร็วขึ้น ดังนั้นสปีชีส์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกิดจากแบคทีเรียมากกว่าปัจจัยอื่น

1.2.6 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย มีหลายวิธีดังนี้

1.2.6.1 การตกตะกอน (Precipitation) เป็นวิธีที่นิยมใช้มานานแล้ว โดยเติมสารเคมีลงไปให้น้ำทิ้ง เพื่อทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่ละลายอยู่ เกิดตะกอนแยกออกจากน้ำได้ ตัวอย่าง เช่น การใช้ไฮดรอกไซด์ (Hydroxide) ออกไซด์ (Oxide) คาร์บอเนต (Carbonate) ซัลไฟด์ (Sulphide) โลหะหนักแต่ละชนิดสามารถตกตะกอนได้ที่พีเอชแตกต่างกัน เช่น ตะกั่วตกตะกอนไฮดรอกไซด์ได้ดีที่พีเอช 7.5-9.5 แคดเมียมสามารถตกตะกอนไฮดรอกไซด์ได้ดีที่พีเอช 9.5-12.5 ตะกั่ว (Pb) และสังกะสี (Zinc) ถ้าปรับพีเอชให้สูงมากเกินไปจะเกิดเป็นพอลิเมอร์และชิงเคท ซึ่งสามารถกลับไปละลายน้ำได้อีก การตกตะกอนไฮดรอกไซด์จึงต้องเลือกปรับพีเอชให้เหมาะสมสำหรับโลหะแต่ละชนิดในน้ำเสีย

1.2.6.2 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) วิธีนี้อาศัยเรซิน (Resin) เป็นตัวแยกโลหะหนักออกจากสารละลาย โดยให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลายกับไอออนบนผิวเรซิน ซึ่งเรซินที่เป็นตัวแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange resin) เป็นพวกกรดอินทรีย์ที่ไม่ละลาย (Insoluble Organic Acid) อาจเป็นพวกซัลโฟนิก หรือ คาร์บอกซิลิกแอซิด (Sulfonic or Carboxylic Acid) จากรายงานของ Nazaki and Hatotani (1967) ซึ่งกำจัดตะกั่วที่อยู่ในรูปของเตตราเอทิลเลด (Tetraethyl Lead) ด้วยการใส่เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกพวกคาร์บอกซิลิกแอซิด พบว่าสามารถลดปริมาณตะกั่วจาก 126.7 มิลลิกรัมต่อลิตรลงเหลือ 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับแคดเมียมมีการใช้วิธีนี้ในการกำจัดบ้าง แต่ไม่ค่อยเป็นที่นิยมมากนักเนื่องจากต้องใช้เรซินที่มีความจำเพาะเจาะจง วิธีการแลกเปลี่ยนไอออนนี้เหมาะสำหรับกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง มีข้อจำกัดคือ ถ้าน้ำเสียมีสารปนเปื้อนชนิดอื่นอยู่ต้องกำจัดออกก่อนที่จะผ่านเข้าเรซิน เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุด เช่น น้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ปนอยู่ ต้องกำจัดออกก่อนโดยผ่านเข้าไปในคอลัมน์ถ่านกัมมันต์

1.2.6.3 การระเหย (Evaporation) เป็นวิธีง่าย ๆ ที่ใช้กันมากวิธีหนึ่ง โดยการกำจัดน้ำออกจากน้ำเสีย จะใช้ได้ผลดีในกรณีที่มีปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียมีปริมาณมากเท่านั้น

1.2.6.4 รีเวิร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) วิธีนี้กำจัดโลหะหนักโดยใช้ความดันสูงผ่าน เซมิเพอร์มิเอเบิล เมมเบรน (Semi-Permeable Membrane) ซึ่งจะยอมให้ไอออนบางชนิดเท่านั้นที่ผ่านได้และต้องใช้ความดันสูงและต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเลือกเมมเบรนที่จะต้องให้ทนต่อความดัน ความเป็นกรดและด่าง ตัวอย่าง เมมเบรน (Membrane) ที่ใช้ได้แก่ เซลลูโลสอะซีเตท (Cellulose Acetate) พอลิเอมีด (Polyamide) พอลิฟูแรน (Polyfuran) วิธีนี้ใช้กำจัด

โลหะหนักในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating Waste) น้ำเสียจากกระบวนการล้างภาพ (Photographic Processing Effluents)

1.2.6.5 การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction) เป็นวิธีการที่แยกโลหะหนักออกจากสารละลาย โดยการเติมตัวทำละลายซึ่งสามารถละลายโลหะหนักได้ดีกว่า วิธีนี้มีข้อเสียคือ ค่าใช้จ่ายของตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดค่อนข้างสูง

1.2.6.6 อิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis) วิธีการนี้ใช้กระแสไฟฟ้าแยกโลหะหนักออกโดยให้ผ่านพอลิเมอร์เมมเบรน (Permeable Membrane) ข้อเสียของวิธีการนี้ คือ ราคาแพง

1.2.6.7 ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction) ใช้มากในโรงงานชุบโลหะ ซึ่งมีสารประกอบโลหะต่าง ๆ เจือปนอยู่ ในการกำจัดต้องเติมสารเคมีลงไปเพื่อทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโลหะหนักที่ต้องการกำจัด ทำให้โลหะหนักเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่เป็นพิษหรือตกตะกอนได้ สารเคมีที่เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เช่น ออกซิเจน (Oxygen) โอโซน (Ozone) คลอรีน (Chlorine) ไฮโปคลอไรต์ (Hypochlorite) เปอร์แมงกาเนต (Permanganate) ส่วนสารเคมีที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน ได้แก่ เฟอรัสซัลเฟต (Ferrous Sulfate) โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ (Sodium Metabisulfite) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur Dioxide)

ตัวอย่างวิธีออกซิเดชัน-รีดักชัน และการทำให้ตกตะกอน ซึ่งใช้ควบคู่กันในระบบการกำจัดโลหะหนักสำหรับโรงงานชุบ เคลือบขนาดกลางและเล็กกำหนดโดยกรมโรงงาน กระทรวงอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถทำแบบ Batch Process และเป็นวิธีที่ใช้กันมากในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียในประเทศไทย โดยเฉพาะการตกตะกอน ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและทำกันมานาน แต่มีข้อเสียคือ ในกรณีที่มีโลหะหนักหลายชนิดปนอยู่ด้วยกันในน้ำเสียการตกตะกอนโลหะหนักพร้อม ๆ กันหลายชนิดด้วยการตกตะกอนทางเคมีนั้นจำเป็นต้องปรับพีเอชให้แตกต่างกันไปแล้วแต่ชนิดของโลหะหนัก ซึ่งจะต้องแยกประเภทของโลหะหนักออกมากำจัดที่ละชนิดซึ่งทำให้ยุ่งยากในการปฏิบัติ นอกจากนั้นยังมีข้อเสียเกี่ยวกับการตกตะกอนที่เกิดได้ช้า และไม่สามารถแยกตะกอนกับน้ำที่จะทิ้งได้อย่างเด็ดขาด กล่าวคืออาจมีตะกอนบางส่วนที่ไหลกลับไปกับน้ำ หรือละลายกลับไปกับน้ำที่ปล่อยออกสู่ท่อระบายน้ำ และข้อเสียสุดท้ายซึ่งเป็นส่วนที่น่าจะก่อให้เกิดปัญหาต่อไปกับสิ่งแวดล้อมในอนาคตอย่างแน่นอนคือ ตะกอนที่ได้จากการตกตะกอนซึ่งสามารถละลายได้ในพีเอชที่เหมาะสมในสิ่งแวดล้อม เมื่อนำไปทิ้งหรือฝังในดินที่ไม่เหมาะสมอันจะก่อให้เกิดปัญหากับสิ่งแวดล้อมต่อไปได้อีก เพื่อแก้ปัญหานี้อาจกระทำได้ 2 วิธีคือ ส่งเสริมการวิจัยให้มีการนำเอาโลหะหนักกลับมาใช้ใหม่ให้เกิดประโยชน์ หรือหาวิธีการกำจัดโลหะหนักให้

อยู่ในรูปที่คงตัวในธรรมชาติ. เพื่อไม่ให้กลับมากกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในอนาคตแต่จะเลือกใช้วิธีใดต้องคำนึงถึง ต้นทุนในการผลิต การดูแลรักษาและที่สำคัญคือ วิธีในการบำบัดต้องสะดวกและหลีกเลี่ยงการใช้สารเคมีให้มากที่สุด

1.2.7 การลดปริมาณตะกั่ว

การบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนตะกั่วด้วยกระบวนการดูดซับที่ผ่านมา ได้มีนักวิจัยหลายท่านสนใจต่อเนืองกัน โดยเน้นที่การนำวัสดุต่างๆ มาพัฒนาเป็นตัวดูดซับ เช่น เปลือกหอมแดง ช้างข้าวโพด เปลือกเมล็ดแดงโม ปะการัง กระดองปู และวัสดุอื่นๆ เป็นต้น สรุปได้ดังตาราง 1.2

Kumar, Pawan and Dara (1981) ได้ศึกษาการใช้เปลือกหอมแดงกำจัด Cu^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Hg^{2+} และ Pb^{2+} ในน้ำเสีย ทำการทดลองทั้งแบบ Batch และ Column โดยนำเปลือกหอมแดงแห้งบดเป็นผง 1 ส่วน แช่ใน Formaldehyde 39 % 5 ส่วน และ H_2SO_4 0.2 M 20 ส่วน เป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50°C ล้างน้ำกลั่นจนมีพีเอช 4.5 อบที่ 50°C นาน 24 ชั่วโมง นำมาทดลองแบบคอลัมน์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก 40, 100, 130 และ 220 mg/l อัตราเร็วน้ำผ่านคอลัมน์ 3 เท่าของปริมาตรบรรจุของคอลัมน์ต่อชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า เปลือกหอมแดงสามารถกำจัด Cu^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} และ Hg^{2+} ได้ 1.62, 1.35, 1.22, 1.55, 1.3 และ 0.82 meq/g เปลือกหอมแดง ตามลำดับ

Odozi, Okeke and Lartry (1985) ได้ศึกษาการจับ Pb^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} และ Ca^{2+} ในน้ำเสียโดยใช้ช้างข้าวโพด ชี้อ้อย และเปลือกหอมแดงทำการทดสอบทั้งแบบ Batch และ Column พีเอชของน้ำเสี้ยงเคราะห์อยู่ในช่วง 5.6 - 8.2 โดยใช้คอลัมน์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับแบบคอลัมน์ระหว่างตัวดูดซับที่บรรจุช้างข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วยฟีนอล อีกคอลัมน์บรรจุส่วนผสมของช้างข้าวโพด ชี้อ้อย และเปลือกหอมแดงที่ปรับสภาพด้วยฟีนอล และฟอร์มาลดีไฮด์ น้ำเสียผ่านคอลัมน์ด้วยอัตราเร็ว 2-3 เท่าของปริมาตรบรรจุของคอลัมน์ต่อชั่วโมง พบว่าช้างข้าวโพด ชี้อ้อยและเปลือกหอมแดงที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี มีสมบัติเป็น Cation Exchange Resin และช้างข้าวโพด ชี้อ้อย และเปลือกหอมแดงที่เป็นเรซินที่มีขนาดเล็ก (300 ไมโครเมตร) สามารถกำจัดโลหะหนักที่ได้มากกว่าเรซินขนาดใหญ่ (150 ไมโครเมตร) เรซินที่ทำจากส่วนผสมของช้างข้าวโพด ชี้อ้อย และเปลือกหอมแดง สามารถกำจัดโลหะหนักได้ 76-88 % สูงกว่าเรซินที่ทำจากช้างข้าวโพดอย่างเดียว ซึ่งกำจัดโลหะหนักได้ 65-79 %

Okieimen and Onyenikpa (1988) ทำการศึกษาการกำจัด Cd^{2+} , Pb^{2+} ในน้ำเสียโดยใช้เปลือกเมล็ดแตงโม ทำการทดสอบทั้งแบบ Batch และ Column ขนาดของเปลือกเมล็ดแตงโม 300-425 ไมโครเมตร การทดสอบแบบ Batch ใช้กำจัด Cd^{2+} , Pb^{2+} และ Ni^{2+} ความเข้มข้นเริ่มต้น 100, 200, 300, 400 และ 500 mg/l ด้วยเปลือกเมล็ดแตงโมที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพทางเคมี เปรียบเทียบกับเปลือกเมล็ดแตงโมที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วย EDTA พบว่าเปลือกเมล็ดแตงโมที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการทางเคมี สามารถกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่าและในการทดสอบแบบคอลัมน์ใช้กำจัด Pb^{2+} ด้วยเปลือกเมล็ดแตงโมที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพทางเคมี โดยใช้คอลัมน์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ยาว 35 เซนติเมตร อัตราเร็วน้ำผ่านคอลัมน์ 1 มิลลิลิตร/นาที ที่ความเข้มข้น 100 mg/l พบว่า สามารถกำจัด Pb^{2+} ได้ 62-92 % และสามารถ Recovery Pb^{2+} ได้ 70%

Shiina (1986) ทำการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักด้วยการใช้ปะการังเผาขนาด 60 เมช ที่อุณหภูมิต่างๆ เปรียบเทียบกัน พบว่าปะการังเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพในการดูดซับ Zn ดีที่สุด และเมื่อนำปะการังนี้มาบำบัดน้ำเสียจริงที่มี Zn, Cu และ Pb ปนเปื้อน ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 96-100%, 97-100%, และ 93-97% ตามลำดับ

Suzuki (1991) ได้ทำการศึกษาการใช้ประโยชน์ของหินปูนในสิ่งมีชีวิตเพื่อกำจัดโลหะหนัก โดยการนำปะการังบดละเอียดขนาด 200-400 mesh มาแช่ในน้ำตัวอย่างที่มี Pb, Cd และ Mn ปนเปื้อน ประสิทธิภาพการบำบัด 99 %, 49 % และ 45% ตามลำดับ จากนั้นนำปะการังบดมาเป็นส่วนผสมในการทำกระดาษกรองเพื่อใช้กรองน้ำที่มี Pb, Cd และ Mn พบว่าการใช้ปะการัง 70% ผสมกับกระดาษสาของญี่ปุ่น ใช้เป็นกระดาษกรองให้ผลในการลดปริมาณตะกั่วได้ดีกว่าการใช้ปะการังผสมเพียง 50%

Sag and Kutsal (1995) ได้ทำการศึกษาการดูดซับ Pb, Ni, Cu โดยใช้แบคทีเรียชื่อ *Z. ramigera* พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 25-45 °C ค่าความจุในการดูดซับ Pb, Ni และ Cu มีค่าเท่ากับ 0.085, 0.054, 0.035 กรัมต่อกรัมแบคทีเรีย ตามลำดับ

Orumwense (1996) ศึกษาการกำจัดตะกั่วจากน้ำโดยการดูดซับบน Kaolinitic Clay พบว่าการดูดซับตะกั่วเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูงและสภาวะเป็นกรด จากผลการทดลองถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 30 °C เป็น 50 °C ทำให้ค่าการดูดซับตะกั่วเพิ่มขึ้นจาก 5.203 มิลลิกรัมต่อกรัม มาเป็น 8.612 มิลลิกรัมต่อกรัม พีเอช 5.5 ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นปฏิกิริยาแบบ endothermic

Delgado, *et al.* (1996) ได้ทำการศึกษาการลดปริมาณตะกั่วในดินที่มีปริมาณคาร์บอนเนต ความเค็มและพีเอช แตกต่างกัน เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนและตกตะกอนคาร์บอนเนต ผลการศึกษาพบว่าปริมาณคาร์บอนเนตมีความสำคัญในการกำจัดตะกั่วในดิน ถ้าปริมาณคาร์บอนเนตมาก สามารถกำจัดตะกั่วได้มาก ซึ่งถ้าในธรรมชาติมีปริมาณคาร์บอนเนตสูง จะสามารถลดปริมาณตะกั่วที่ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้

Lee, *et al.* (1997) ทำการตกตะกอนตะกั่วบนผิวอนุภาคกระดองปู (Shell of *Protunus trituberculatus*) โดยนำกระดองปูขนาด 25 -100 เมช ปริมาณ 0.5 กรัม ต่อสารละลาย 1 ลิตร นำมาดูดซับสารละลาย Lead Nitrate พบว่าความสามารถในการดูดซับของอนุภาคกระดองปูเท่ากับ 1,300 mg Pb /g กระดองปู พีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 5.5 -11.0 กลไกการบำบัดเกิดผ่านการละลายของ CaCO_3 ตามด้วยการตกตะกอน PbCO_3 ที่ผิวอนุภาค แล้วเกิดการดูดซับบนผิวอนุภาคกระดองปู

Lee, *et al.* (1998) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว พบว่าเวลาผ่านไป 2 ชั่วโมง สามารถกำจัดตะกั่วได้ประมาณ 99 % ที่ pH เริ่มต้น 3.0 ส่วน Competing Ions (Cd^{2+} , Cu^{2+} , Fe^{2+} และ Zn^{2+}) ไม่มีอิทธิพลต่อการกำจัดตะกั่วจากสารละลาย อาจเนื่องมาจากตะกั่วสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับคาร์บอนเนตได้ดีกว่าไอออนอื่นหรืออาจเนื่องมาจากในสารละลายมีปริมาณคาร์บอนเนตมากเกินพอที่จะกำจัดโลหะหนักตัวอื่นออกจากสารละลายพร้อมกันได้

Bailey, *et al.* (1999) รวบรวมข้อมูลจากผู้วิจัยหลายท่านความสามารถในการดูดซับโลหะหนักจากวัสดุธรรมชาติ เพื่อแสดงศักยภาพในการใช้งานของตัวดูดซับราคาถูก ซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติที่เหลือใช้ ผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้จากการผลิต (By-Product) และของเสียจากอุตสาหกรรม ดังแสดงในตาราง 1.3

ตาราง 1.2 การลดปริมาณตะกั่วด้วยการดูดซับ

Adsorbent	ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น (mg/l)	ขนาด Adsorbent	ประสิทธิภาพการบำบัด	เอกสารอ้างอิง
กระดองปู	20	25-100 mesh	1300mg/g*	Lee, et al. (1997)
ปะการัง	10	200-400 mesh	100%	Suzuki. (1991)
ปะการังเผา	ช่วง 1-10	60 mesh	97%	Shiina. (1986)
แอคติเวตเต็ด คาร์บอน	10	325 mesh	92%	Netzer.(1982)
Kaolinitic clay	10		3mg/g*	Orumwense.(1996)
Granulated Blast Furnace Slag	92	0.25 mm.	97-98%	Dimitrova and Mehandgiev. (1998)

* แสดง ค่าความสามารถในการดูดซับ (mg/g)

ตาราง 1.3 สรุปความสามารถในการดูดซับตะกั่วของ Low-Cost Sorbents

Sorbent	Adsorption Capacities (mg/g)
Bark	
Redwood	182
Chitosan	796
Clay	58
Bentonite	6
Tailored bentonited	58
Chaina clay	0.289
Wollastonite	0.217
Biomass	
Chlorella minutissima	9.74
Penicillium chrysogenum	116
Rice hulls	11.4
Lignin	1587
Modified wool	135
Peat moss	
Modified peat	230
Restunsuo peat	20
Sphagnum moss peat	40
Seaweed	344
Zeolite	155.4

1.3 วัตถุประสงค์

- 1.3.1 เพื่อศึกษาการนำวัสดุจากธรรมชาติที่เหลือใช้ในท้องถิ่นมาทดลองดูดซับตะกั่วในน้ำ
- 1.3.2 เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับตะกั่วของตัวดูดซับจากวัสดุที่ได้จากข้อ 1.3.1
- 1.3.3 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวดูดซับแต่ละชนิดที่ใช้ในกระบวนการลดปริมาณตะกั่วในน้ำ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

- 1.4.1 นำเอาวัสดุธรรมชาติซึ่งเหลือใช้ในท้องถิ่นกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการลดปริมาณตะกั่วในน้ำ
- 1.4.2 ผลการศึกษาสามารถนำไปพัฒนาใช้ในการบำบัดน้ำที่มีการปนเปื้อนของตะกั่วให้ลดระดับลงเพื่อไม่ก่อให้เกิดอันตรายในการอุปโภคและบริโภค
- 1.4.3 แนวทางในอนาคต เพื่อพัฒนาเทคนิคการลดปริมาณตะกั่วในน้ำ รวมทั้งอาจนำวิธีดังกล่าวไปใช้ในการพัฒนาการกำจัดโลหะหนักชนิดอื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 2

วิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ทำวิจัยประกอบด้วย วัสดุดิบที่ใช้ทำตัวดูดซับ น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง และสารเคมีระดับคุณภาพวิเคราะห์

2.1.1 วัสดุดิบที่ใช้ทำตัวดูดซับ

2.1.1.1 เปลือกหอยแครง (*Shell of Anadara granosa*)

2.1.1.2 กระดองปูม้า (*Shell of Portunus Pelagecus*)

2.1.2 น้ำตัวอย่างที่ใช้ทำการทดลอง

2.1.2.1 น้ำตัวอย่างที่เตรียมจากห้องปฏิบัติการเคมี

2.1.2.2 น้ำตัวอย่างที่ปนเปื้อนตะกั่วในอำเภอวังน้อย จ.อยุธยา

2.1.3 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง และการวิเคราะห์ทางเคมีอยู่ในระดับคุณภาพวิเคราะห์ ยกเว้น H_2O_2 อยู่ในระดับเชิงพาณิชย์ (Commercial Grade)

2.2 อุปกรณ์

2.2.1 อุปกรณ์สำหรับเตรียมตัวดูดซับ

2.2.1.1 ตู้อบ (Oven) ; Memmert UE 400 Germany

2.2.1.2 เครื่องบดตัวอย่าง ; Fritsch Pulverisette Germany

2.2.1.3 ตะแกรงคัดขนาดเบอร์ 8 , 16 , 80 เมช

2.2.2 อุปกรณ์สำหรับใช้ทดลองในห้องปฏิบัติการ

2.2.2.1 เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง (pH meter) รุ่นมกคลสุช ของศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

2.2.2.2 เครื่องเขย่า (Shaker) ; DS LDB Rotator Model : USR 2800A

2.2.2.3 เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) ; RT 7 Sorvall : DUPONT

2.2.2.4 เครื่องชั่งละเอียด (Analytical Balance) ; Sartorius Model B 3100S
Germany

2.2.2.5 เครื่องแก้วต่างๆ

2.2.3 อุปกรณ์สำหรับใช้ทดลองแบบคอลัมน์

2.2.3.1 ถังพลาสติกมีฝาปิด ขนาด 150 ลิตร

2.2.3.2 คอลัมน์แก้ว ขนาด ϕ 2.3 cm. ยาว 20 cm.

2.2.3.3 เครื่องสูบน้ำ

2.2.4 เครื่องมือในการวิเคราะห์ปริมาณตะกั่ว

2.2.4.1 เครื่องสตรippingโพเทนชิโอมิเตอร์ (Stripping Potentiometer) ; TraceLab PSU22 Radiometer Copenhagen

2.2.4.2 เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Flame Atomic Absorption Spectrophotometer) ; GBC 902 Australia

2.3 ขอบเขตและวิธีการวิจัย

2.3.1 ขอบเขตของการวิจัย

2.3.1.1 เตรียมตัวดูดซับจากกระดองปู และ เปลือกหอยแครง

2.3.1.2 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับตะกั่วในน้ำ ของตัวดูดซับแต่ละชนิด ที่เตรียมได้ โดยพิจารณาจากการทำไอโซเทอร์มการดูดซับ (Adsorption Isotherm) และค่าคงที่ เพื่อคัดเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วที่สุด

2.3.1.3 ศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของตัวดูดซับจากคอลัมน์เพื่อแสดง Breakthrough Curve โดยพิจารณาความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลืออยู่ในน้ำ

2.3.2 วิธีการวิจัย

การศึกษาแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ในขั้นตอนแรกเป็นการเตรียมวัสดุที่เหลือใช้ในท้องถิ่น ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาความสามารถในการดูดซับตะกั่ว โดยการทดสอบแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch Test) และการทดสอบแบบต่อเนื่อง (Column Test) ส่วนขั้นตอนที่ 3 เป็นการนำน้ำที่ปนเปื้อน ตะกั่วจากตำบลถ้าทะลุ อ.บ้านวังस्ता จ.ยะลา มาใช้กับคอลัมน์ซึ่งรายละเอียดของวิธีการศึกษา แสดงในภาพประกอบ 2.1

2.3.2.1 การเตรียมตัวดูดซับจากวัสดุธรรมชาติที่เหลือใช้ในท้องถิ่น

วัสดุธรรมชาติที่เหลือใช้ในท้องถิ่นที่ใช้ในการทดลองนี้มี 2 ชนิด

ก) กระดองปูม้า (Shell of *Portunus Pelagicus*)

ข) เปลือกหอยแครง (Shell of *Anadara Granosa*)

ขั้นตอนนี้เป็น การเตรียมตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิด ซึ่งแตกต่างกันทั้งประเภท วัสดุ ดิบ ขนาด และกรดที่ใช้ในการกระตุ้น ดังนี้

2.3.2.1.1 นำกระดองปูและเปลือกหอยแครงมาล้างน้ำและแช่ในสารละลาย 10% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อทำความสะอาด กำจัดกลิ่น และ สารอินทรีย์ ล้างน้ำสะอาดหลายๆ ครั้ง ทำให้แห้ง บดละเอียดแบ่งเป็น 2 ขนาด ขนาดใหญ่ (8-16 เมช) และขนาดเล็ก (16-80 เมช) จากนั้นนำมาทำความสะอาดอีกครั้งด้วยกรด โดยแบ่ง เป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ กระดองปูม้า และเปลือกหอยแครง ดังภาพประกอบ 2.2

ก) กระดองปู บดละเอียดทั้ง 2 ขนาด (8-16 เมช และ 16-80 เมช) แบ่งแช่ในสารละลายกรดเกลือ 5% (HCl) หรือน้ำส้มสายชู 5% (CH_3COOH) นาน 1 ชั่วโมง เพื่อ ทำความสะอาดผิวของวัสดุดิบ ล้างด้วยน้ำสะอาดหลายๆ ครั้ง จนที่เอชของน้ำมีค่าสูงกว่า 7 นำ มาอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง (ภาพประกอบ 2.3) วัสดุดิบที่เตรียมได้มีดังนี้

- กระดองปูขนาด 8-16 เมช แช่กรดเกลือ
- กระดองปูขนาด 16-80 เมช แช่กรดเกลือ
- กระดองปูขนาด 8-16 เมช แช่น้ำส้มสายชู
- กระดองปูขนาด 16-80 เมช แช่น้ำส้มสายชู

ข) เปลือกหอยแครง บดละเอียดทั้ง 2 ขนาด (8-16 เมช และ 16-80 เมช) แบ่งแช่ในสารละลายกรดเกลือ 5% หรือน้ำส้มสายชู 5% นาน 1 ชั่วโมง เพื่อทำความสะอาด ผิวของวัสดุดิบ ล้างด้วยน้ำสะอาดหลายๆ ครั้ง อบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง (ภาพประกอบ 2.3) วัสดุดิบที่เตรียมได้มีดังนี้

- เปลือกหอยแครงขนาด 8-16 เมช แช่กรดเกลือ
- เปลือกหอยแครงขนาด 16-80 เมช แช่กรดเกลือ
- เปลือกหอยแครงขนาด 8-16 เมช แช่น้ำส้มสายชู
- เปลือกหอยแครงขนาด 16-80 เมช แช่น้ำส้มสายชู

2.3.2.2 การศึกษาความสามารถในการกำจัดตะกั่วแบบไม่ต่อเนื่อง

2.3.2.2.1 เตรียมน้ำที่ปนเปื้อนตะกั่ว

ก) เตรียมน้ำตะกั่วที่ความเข้มข้น 1,000 mg/l จาก Lead nitrate $Pb(NO_3)_2$ โดยชั่ง $Pb(NO_3)_2$ 1.599 กรัม ละลายน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 1 ลิตร นำมาเจือจางจนมีความเข้มข้นตามที่ต้องการ

2.3.2.2.2 การศึกษาเบื้องต้น

ก) นำกระดองปูและเปลือกหอยแครงที่เตรียมได้ปริมาณ 0.2 กรัม เติมลงในน้ำที่มีตะกั่วปนเปื้อนความเข้มข้น 1 mg/l ปริมาตร 100 ml. ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml

ข) เขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยเวลาที่ต่างกัน : 0.33, 0.67, 1, 2, 5 และ 10 ชั่วโมงตามลำดับ

ค) แยกน้ำใสออกโดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge)

ง) วิเคราะห์ปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ในน้ำเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ในน้ำ (C) กับเวลาที่ใช้

2.3.2.2.3 ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับตะกั่ว

ก) ชั่งกระดองปูและเปลือกหอยที่เตรียมได้ปริมาณ 0, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0 และ 2.0 กรัมตามลำดับ เติมลงในน้ำซึ่งมีน้ำปนเปื้อนตะกั่วความเข้มข้น 1 mg/l ปริมาตร 100 ml. ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml.

ข) เขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 1.0 ชั่วโมง จากนั้นแยกน้ำตะกั่วออกจากกระดองปูโดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) วิเคราะห์ปริมาณตะกั่วที่เหลือในน้ำ หาไอโซเทอร์มการดูดซับโดยเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นตะกั่วที่เหลือ (C) กับปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ (X/M) บนกราฟลอการิทึม

ค) พิจารณาตัวดูดซับที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วที่สุด เพื่อใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

2.3.2.3.3 ศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานแบบคอลัมน์

ก) นำตัวดูดซับที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วปริมาณ 10 กรัม

บรรจุลงในคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.3 cm. ยาว 20 cm.

ข) ผ่านน้ำตัวอย่างที่ปนเปื้อนตะกั่วความเข้มข้น 5 mg/l ด้วยอัตราเร็วคงที่ 1.2 ลิตรต่อชั่วโมง มีทิศทางการไหลเป็นแบบไหลลง (downflow) ลงในคอลัมน์ เก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการกรองตามช่วงเวลา มาวัดพีเอช เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นตะกั่วที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0) กับปริมาตรน้ำ

2.3.2.3 การศึกษาการลดปริมาณตะกั่วในน้ำจากตำบลท่าทะเล อำเภอบ้านฉาง

จังหวัดยะลา

ก่อนนำน้ำไปใช้ทดลอง ทิ้งให้ตกตะกอนตามธรรมชาติเป็นเวลา 1 คืน วัด

ค่า pH ปริมาณตะกั่ว ความกระด้าง ความเป็นด่าง ปริมาณแคลเซียม ดังตาราง 2.1

2.3.2.3.1 นำน้ำปนเปื้อนตะกั่วในตำบลท่าทะเล อำเภอบ้านฉาง จังหวัด

ยะลา ที่ได้จากน้ำปลายแป็บซึ่งชาวบ้านต่อท่อเพื่อรองรับน้ำจากภูเขาหินปูนที่ผ่านการทำเหมือง ดิบุกปนตะกั่วในอดีตนำมาใช้อุปโภคบริโภคในครัวเรือน ซึ่งเป็นน้ำที่มีตะกั่วปนเปื้อนในระดับสูง (Geater, et al. 1996) มาผ่านคอลัมน์ เพื่อศึกษาการลดปริมาณตะกั่วและประสิทธิภาพการใช้งานของคอลัมน์

2.4 วิธีการวิเคราะห์

ตาราง 2.1 วิธีการวิเคราะห์ทางเคมีของน้ำปนเปื้อนตะกั่ว

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
ปริมาณตะกั่ว	Stripping Potentiometry
พีเอช	pH meter
ความกระด้าง	EDTA Titration
ความเป็นด่าง	Direct Titration
ปริมาณแคลเซียม	Atomic Absorption Spectrophotometry

Ref : (APHA, AWWA and WEF, 1992)

ขั้นตอนการวิจัย

เตรียมวัสดุจากกระดองปูม้าและเปลือกหอยแครง



ศึกษา Adsorption Isotherm



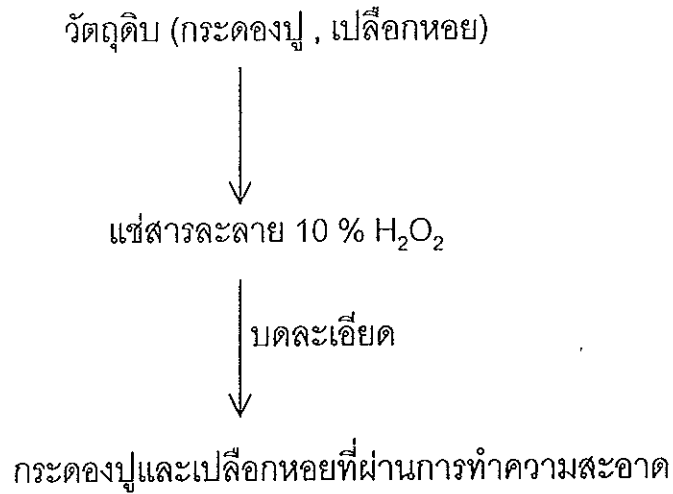
เลือกวัสดุที่สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุด



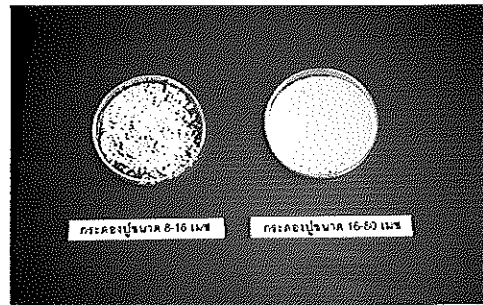
ศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานจากคอลัมน์

ภาพประกอบ 2.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการศึกษา

แสดงขั้นตอนการเตรียมกระดองปูและเปลือกหอย

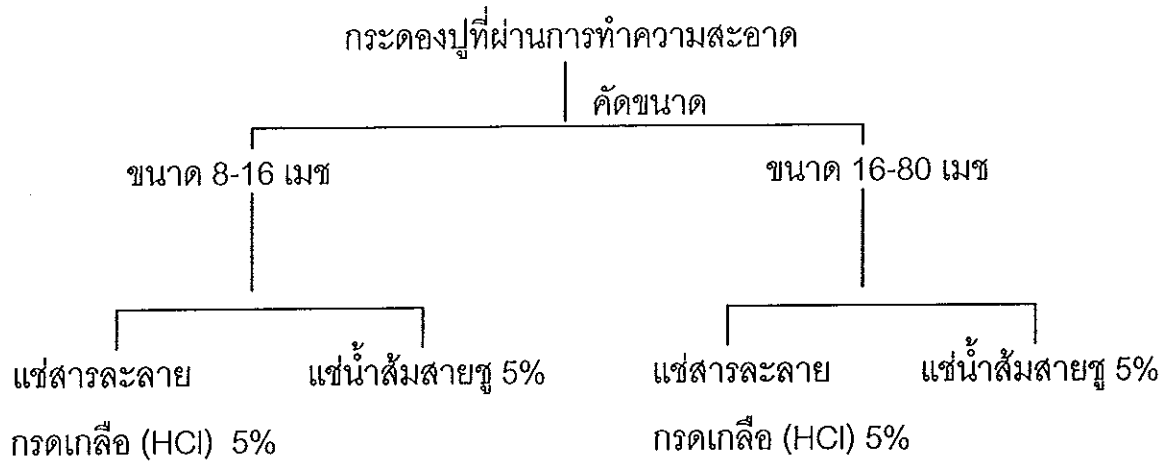


ภาพประกอบ 2.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำความสะอาดกระดองปูและเปลือกหอย

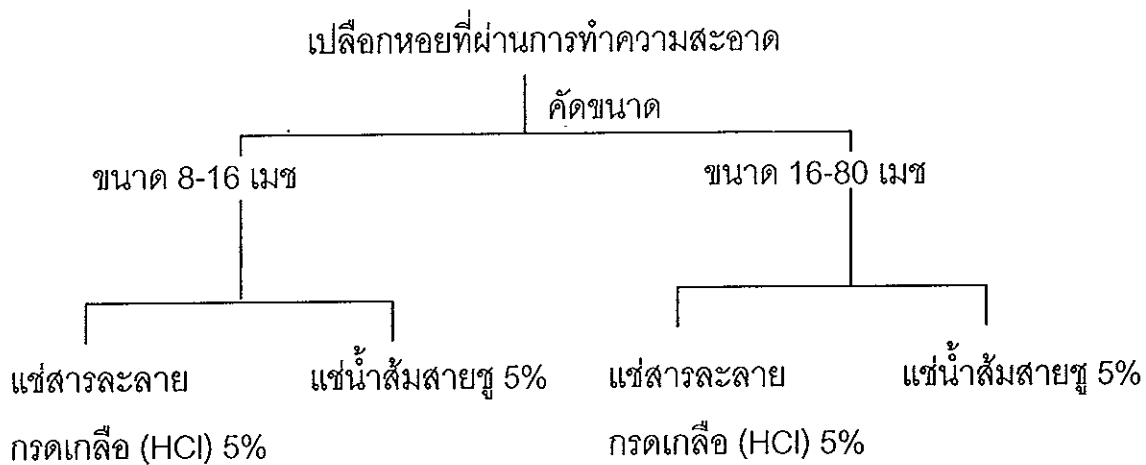


ภาพประกอบ 2.3 แสดงกระดองปูม้าและเปลือกหอยแครงที่เตรียมได้

ก) การเตรียมกระดองปูม้า



ข) การเตรียมเปลือกหอยแครง



ภาพประกอบ 2.4 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมกระดองปูและเปลือกหอย

บทที่ 3

ผลการศึกษา

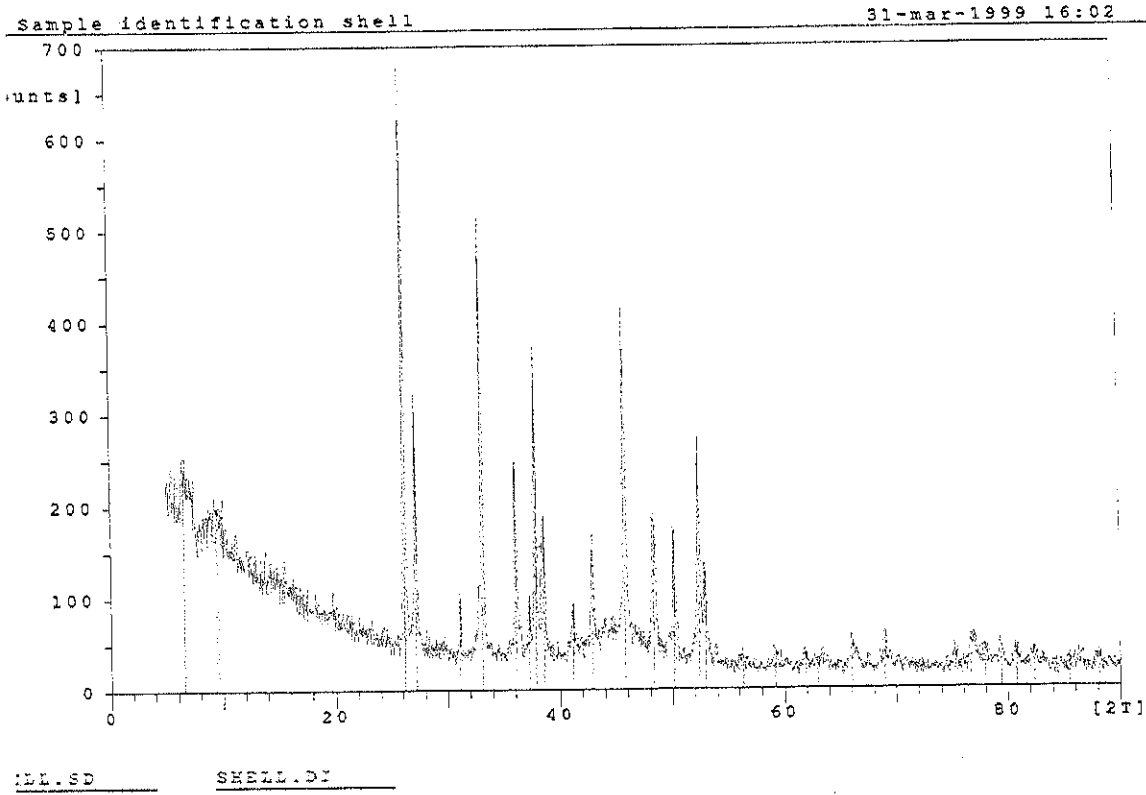
นำเสนอผลการวิจัยการกำจัดตะกั่วโดยใช้กระดองปูม้าและเปลือกหอยแครง ซึ่งมีการศึกษาลักษณะพื้นผิวและองค์ประกอบทางเคมีของทั้งกระดองปูและเปลือกหอยที่ใช้ ศึกษากลไกการกำจัดตะกั่วในน้ำ โดยใช้ น้ำตะกั่วสังเคราะห์ที่เตรียมจากห้องปฏิบัติการ และน้ำที่ปนเปื้อนตะกั่วจากพื้นที่ในตำบลถ้ำทะลุ อำเภอบันนังสตา จังหวัดยะลา ซึ่งการนำเสนอเป็นแบบตาราง ภาพประกอบ และอภิปรายผล แยกเป็นการทดลองย่อยๆ ตามลำดับ เพื่อความสะดวกและทำความเข้าใจ

3.1 ผลการศึกษาลักษณะของกระดองปูและเปลือกหอย

นำกระดองปูม้า (Shell of *Portunus Pelagicus*) และเปลือกหอยแครง (Shell of *Anadara Granosa*) เตรียมได้โดยการนำมาแช่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10% เพื่อทำความสะอาด ทำให้แห้ง บดละเอียด มาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 8-16 เมช และ 16-80 เมช นำมาแช่กรดเกลือหรือน้ำส้มสายชูตามวิธีที่ได้กล่าวไว้แล้วในวิธีดำเนินการวิจัย จากนั้นนำมาศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD : Phillip X'Pert) และ ดูลักษณะพื้นผิวด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM : Jeol JSM5800LV)

3.1.1 การศึกษาองค์ประกอบของเปลือกหอยและกระดองปู

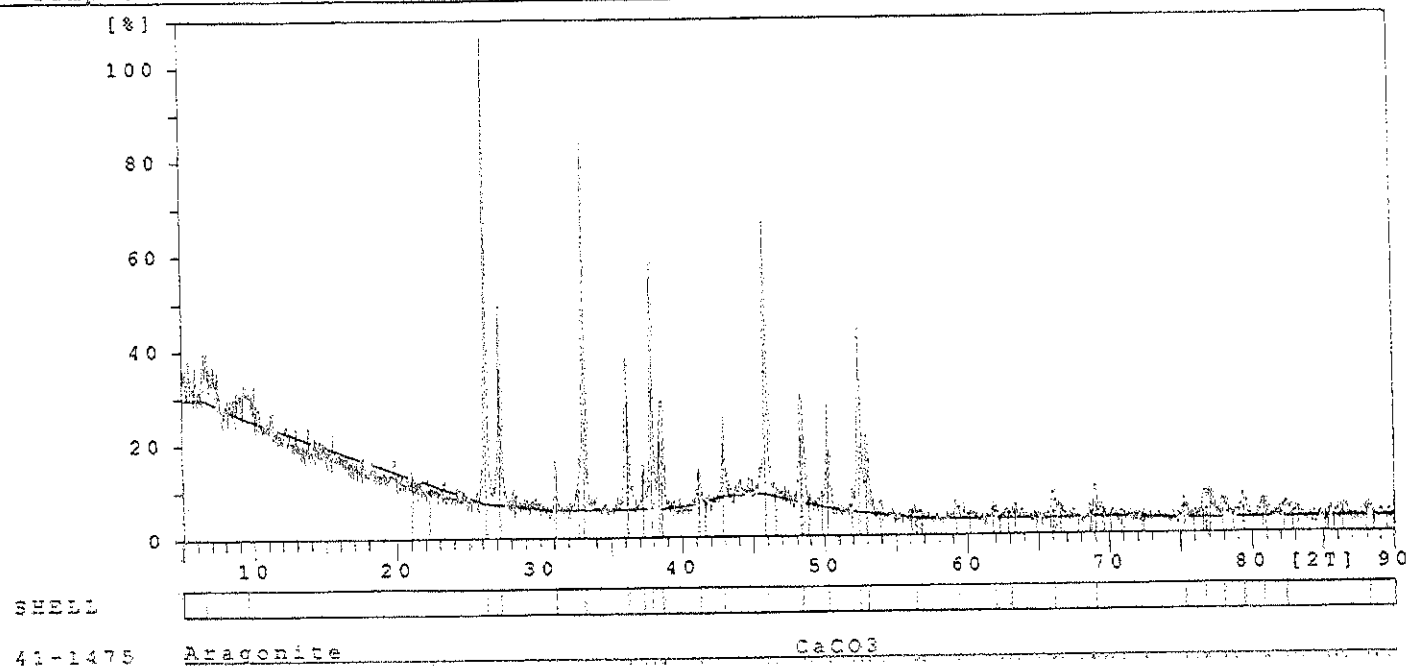
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) ตามภาพประกอบ 3.1 และ 3.2 พบว่า องค์ประกอบหลักของเปลือกหอย คือ Aragonite (CaCO_3) และ องค์ประกอบหลักของกระดองปูม้าคือ Calcite Magnesian $(\text{Ca,Mg})\text{CO}_3$ ตามภาพประกอบ 3.3 และ 3.4 สัดส่วนระหว่างปริมาณ Ca และ Mg ในกระดองปูเท่ากับ 3.6 : 1 ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer(AAS) และการไทเทรต พบว่าแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบหลักส่วนใหญ่ของทั้งกระดองปูและเปลือกหอย



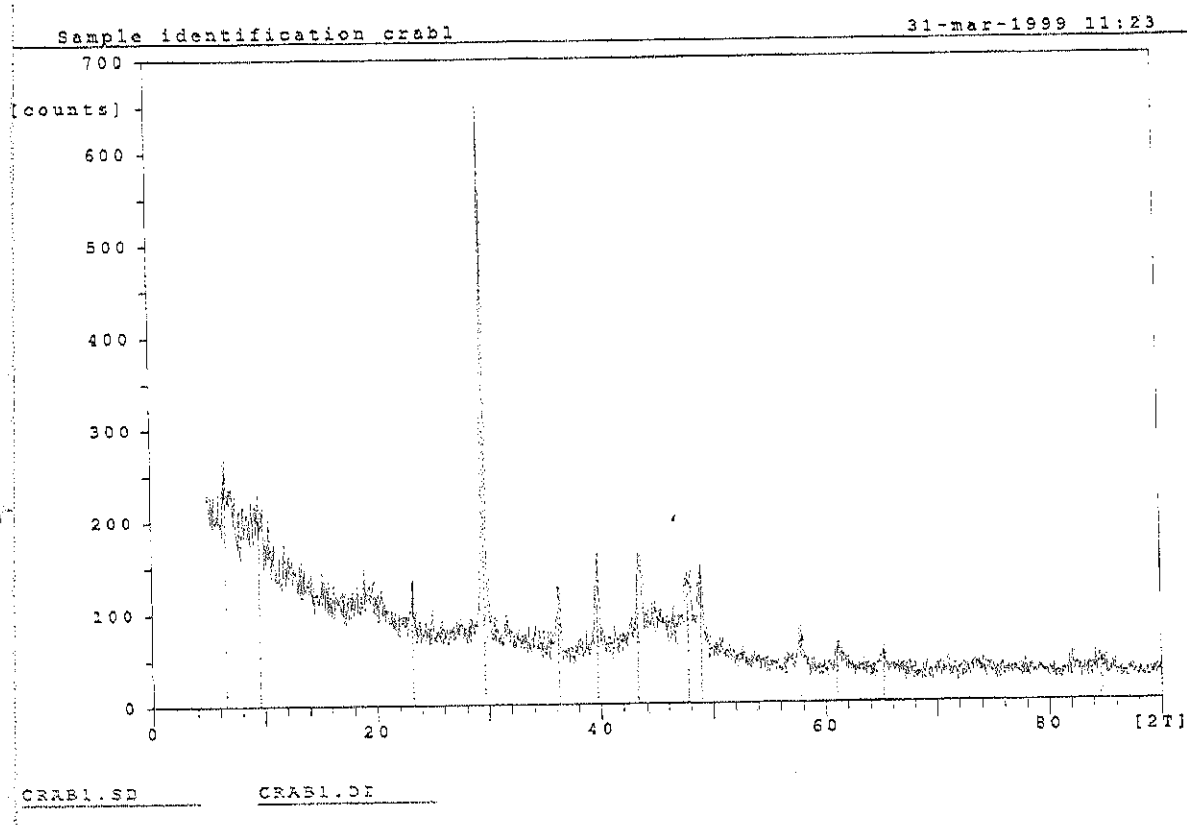
ภาพประกอบ 3.1 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในเปลือกหอยด้วย X-Ray Diffraction (XRD)

Sample ident.: shell

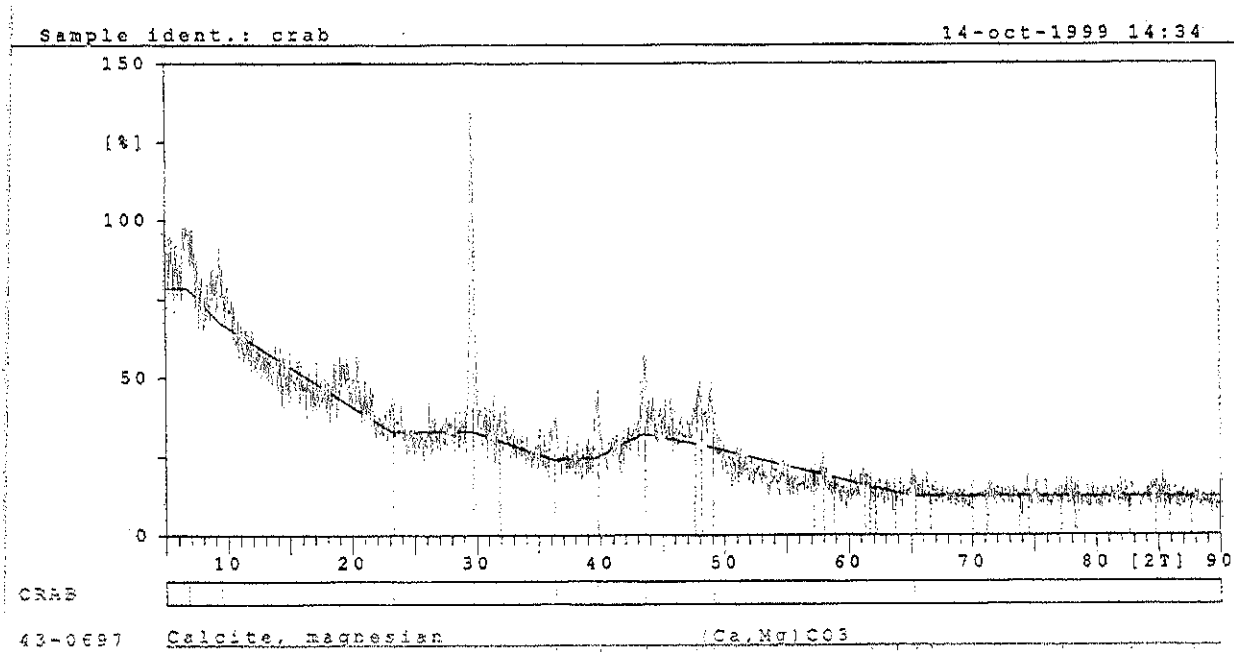
31-mar-1999 16:09



ภาพประกอบ 3.2 กราฟมาตรฐานเปรียบเทียบเพื่อหาสารประกอบในเปลือกหอยด้วย X-Ray Diffraction (XRD)



ภาพประกอบ 3.3 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในกระดองปูด้วย X-Ray Diffraction (XRD)

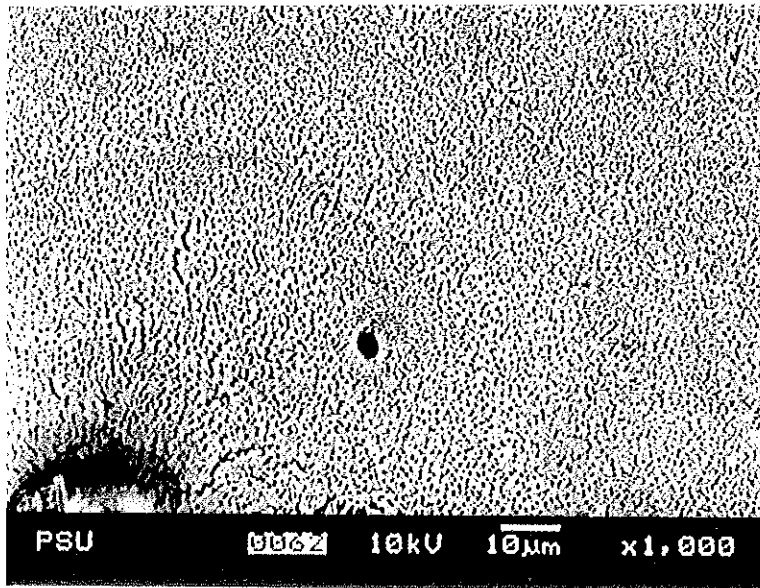


ภาพประกอบ 3.4 กราฟมาตรฐานเปรียบเทียบเพื่อหาสารประกอบในกระดองปูด้วย X-Ray Diffraction (XRD)

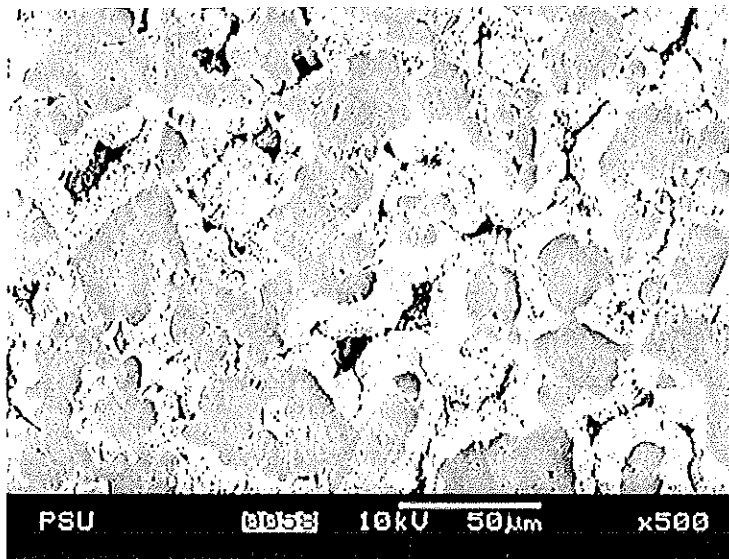
3.1.2 ลักษณะพื้นผิวของกระดองปูและเปลือกหอย

จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ของกระดองปูและเปลือกหอยในภาพประกอบ 3.5 – 3.8 พบว่าลักษณะพื้นผิวของกระดองปูมีความหลากหลายมาก ดังจะเห็นได้จากพื้นผิวด้านหลังกระดองปูซึ่งมีรูพรุนเล็กๆ ขนาด 0.5-1 ไมโครเมตรมากมาย (ภาพประกอบ 3.5) ในขณะที่พื้นผิวด้านในมีความเรียบมากกว่า (ภาพประกอบ 3.6) ส่วนพื้นผิวระหว่างชั้นมีลักษณะเป็นตาข่ายมองเห็นเป็นชั้นๆ มีโพรงเล็กๆ ลึกลงไป (ภาพประกอบ 3.7) นอกจากนี้ในการศึกษาพื้นผิวของกระดองปูตัวเล็กและกระดองปูตัวใหญ่ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนยังพบว่ากระดองปูตัวเล็กที่มีอายุน้อยค่อนข้างมีรูพรุนน้อยกว่ากระดองปูตัวใหญ่ที่มีอายุมาก สอดคล้องกับ Warner (1977) ซึ่งกล่าวว่าแคลเซียมคาร์บอเนตในกระดองปูทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงกับโครงสร้างจะมีในปูตัวเล็กมากกว่าปูตัวใหญ่ เพื่อช่วยป้องกันการถูกทำร้ายจากศัตรู และจะค่อยๆ ลดปริมาณลงเมื่อกระดองปูมีอายุมากขึ้น สำหรับพื้นผิวเปลือกหอยในภาพประกอบ 3.8 มีลักษณะคล้ายแผ่นหินเรียบไม่ค่อยเห็นรูพรุนมากนัก

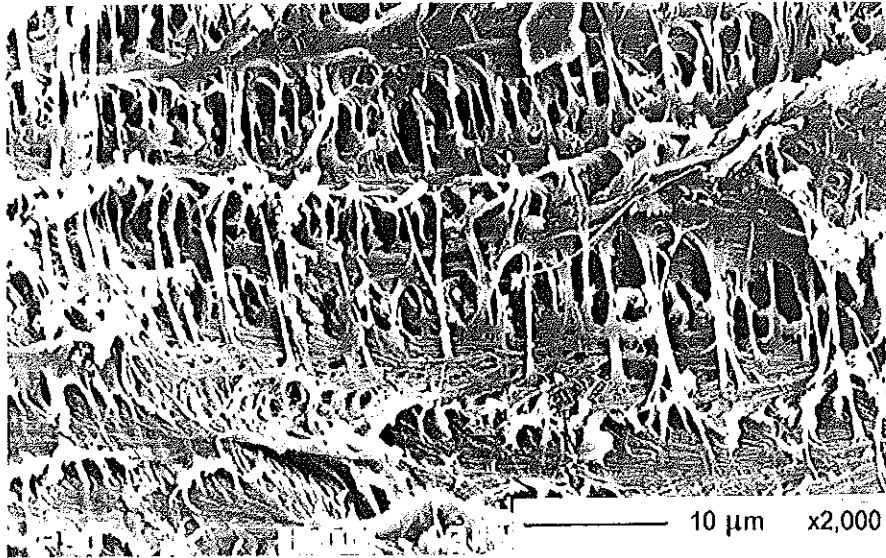
ผลการตรวจวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area) โดยวิธี BET ด้วยเครื่อง Quantachrome Gas Sorption พบว่ากระดองปูขนาด 16-80 เมช มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงถึง 35 ตารางเมตรต่อกรัม ในขณะที่เปลือกหอยขนาด 16-80 เมช มีพื้นที่ผิวจำเพาะเพียง 0.24 ตารางเมตรต่อกรัม (ดูข้อมูลผลการตรวจวัดได้จากภาคผนวก ข) จะเห็นได้ว่ากระดองปูมีพื้นที่ผิวมากกว่าเปลือกหอย ดังนั้นกระดองปูน่าจะมีแนวโน้มในการกำจัดตะกั่วได้ดีกว่าเปลือกหอยที่ขนาดเดียวกัน



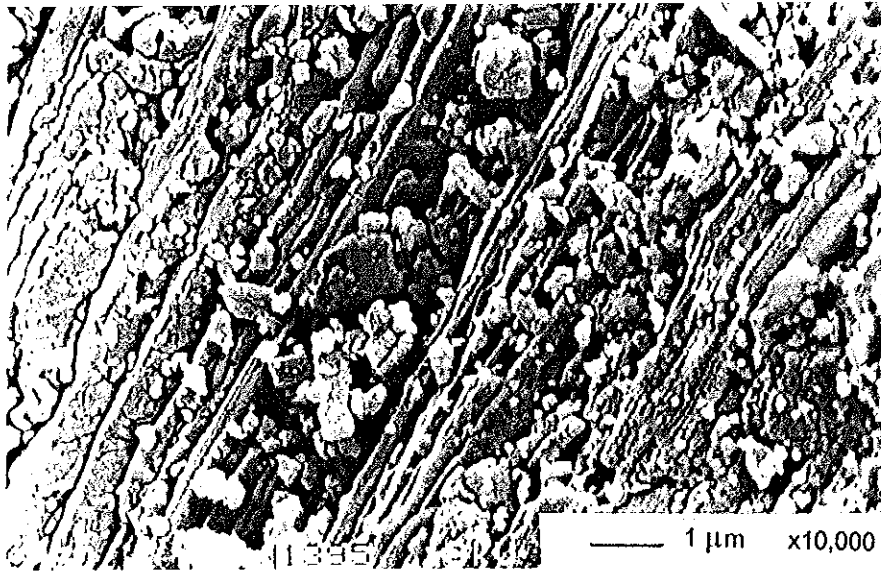
ภาพประกอบ 3.5 ลักษณะพื้นผิวด้านหลังกระดองปูจากกล้อง SEM



ภาพประกอบ 3.6 ลักษณะพื้นผิวด้านในกระดองปูจากกล้อง SEM



ภาพประกอบ 3.7 ลักษณะพื้นผิวระหว่างชั้นกระดองปูจากกล้อง SEM



ภาพประกอบที่ 3.8 ลักษณะพื้นผิวเปลือกหอยจากกล้อง SEM

3.2 ผลการศึกษาความสามารถในการกำจัดตะกั่วแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test)

3.2.1 ผลการศึกษาเบื้องต้น

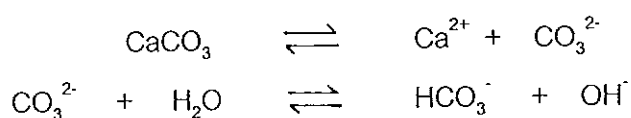
การทดสอบแบบไม่ต่อเนื่อง ใช้น้ำตะกั่วสังเคราะห์ความเข้มข้น 1 mg/l ปริมาตร 100 ml. pH 5.5 ซึ่งเป็นค่า pH ที่เกิดจากการละลายของ $Pb(NO_3)_2$ โดยตรงในน้ำกลั่น ดังตาราง 3.1

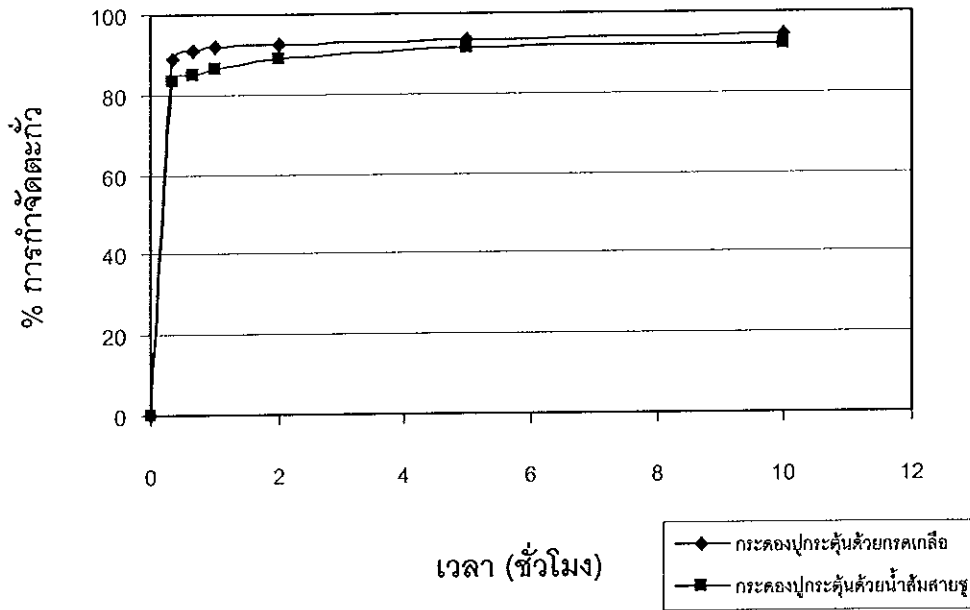
ตาราง 3.1 % การกำจัดตะกั่วโดยใช้กระดองปูและเปลือกหอย

ชนิดตัวดูดซับ	เวลา (ชั่วโมง)											
	0.33		0.67		1		2		5		10	
	pH	%R	pH	%R	pH	%R	pH	%R	pH	%R	pH	%R
กระดองปูกระตุ้นกรดเกลือ	8.9	89.2	8.9	90.9	8.9	91.9	8.9	92.6	8.9	93.3	8.7	94.5
กระดองปูกระตุ้นน้ำส้มสายชู	9.3	83.2	9.4	84.8	9.4	86.7	9.4	88.7	9.4	91.3	9.2	91.7
เปลือกหอยกระตุ้นกรดเกลือ	8.9	79.9	9.0	84.8	9.0	86.8	9.0	88.2	8.9	88.9	8.5	89.3
เปลือกหอยกระตุ้นน้ำส้มสายชู	8.8	81.2	8.9	82.7	8.9	87.7	8.9	88.1	8.9	89.4	8.2	89.7

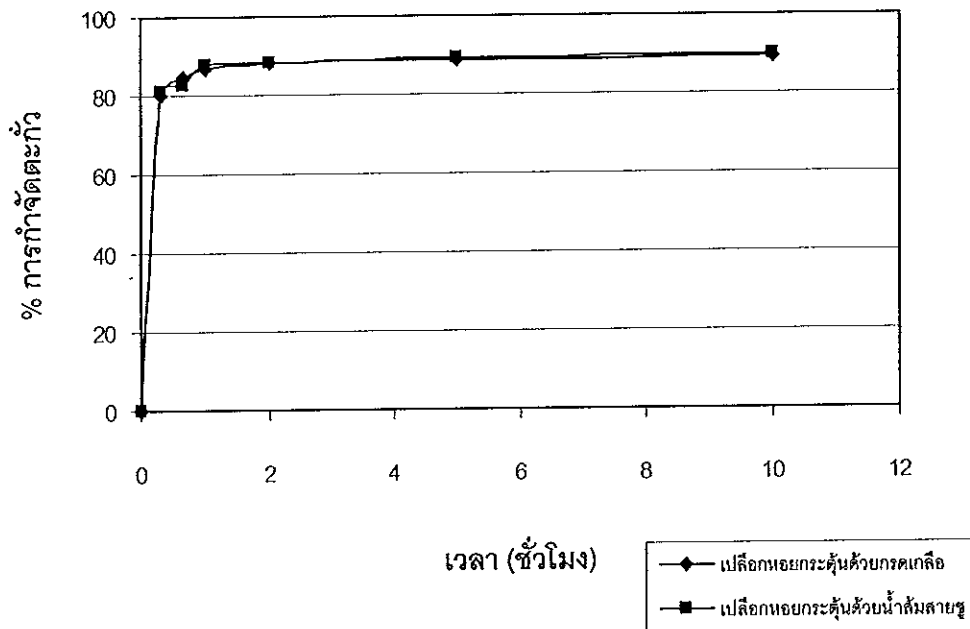
หมายเหตุ % R แทน % การกำจัดตะกั่ว (Lead Removal)

จะเห็นได้จากตาราง 3.1 และภาพประกอบ 3.9 และ 3.10 ค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 5.5 มาอยู่ในช่วง 8.8-9.4 เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตในกระดองปูเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสเมื่อละลายน้ำจะให้สารละลายที่เป็นเบส ทั้งนี้เพราะเกลือของกรดอ่อน-เบสแก่ละลายน้ำแตกตัวเป็นแอนไอออนและแคตไอออน แอนไอออนของกรดอ่อนละลายน้ำได้ OH^- ดังสมการ (Brown and Lemay, 1985) และแคลเซียมไอออนเป็นแคตไอออนของเบสแก่เมื่อละลายน้ำจึงทำให้พีเอชเพิ่มขึ้น ส่วน CO_3^{2-} จับกับไอออนของตะกั่วเกิดเป็น $PbCO_3(s)$ โดยในการทดลองนี้ใช้เวลาน้อยที่สุดคือ 0.33 ชั่วโมงหรือ 20 นาที สามารถกำจัดตะกั่วได้ถึง 80-89 % และเมื่อเวลาผ่านไปถึงชั่วโมงที่ 10 % การกำจัดตะกั่วเพิ่มขึ้นอีกเพียงเล็กน้อย โดยเพิ่มขึ้นจากเดิมเป็น 89-94% และพบว่ากระดองปู 1 กรัม ละลายน้ำให้ Ca^{2+} ออกมาประมาณ 5 mg/l





ภาพประกอบ 3.9 กราฟ % การกำจัดตะกั่วด้วยกระตองปุ



ภาพประกอบ 3.10 กราฟ % การกำจัดตะกั่วด้วยเปลือกหอย

3.2.2 ผลการศึกษาไอโซเทอร์ม

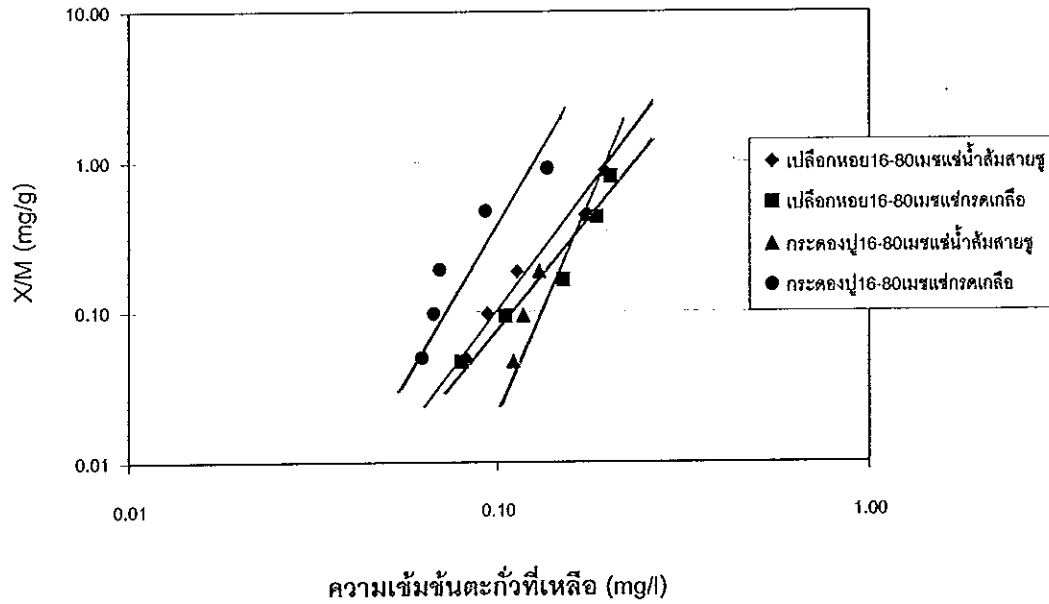
จากการทดลองการกำจัดตะกั่ว โดยใช้กระดองปูและเปลือกหอยในปริมาณต่าง ๆ กัน และใช้น้ำตะกั่วสังเคราะห์ความเข้มข้น 1 mg/l ปริมาตร 100 ml. เขย่าในขวดรูปชมพู่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง วัดพีเอช แล้วแยกน้ำใสมาวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วที่เหลือในสารละลาย ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3.2 และ 3.3 เขียนกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับตะกั่วตามสมการ Freundlich ได้ดังภาพประกอบ 3.11 และ 3.12 และอ่านค่าคงที่ K และ $1/n$ จากกราฟตามสมการ Freundlich

ตาราง 3.2 ข้อมูลการศึกษาไอโซเทอร์มจากกระดองปู

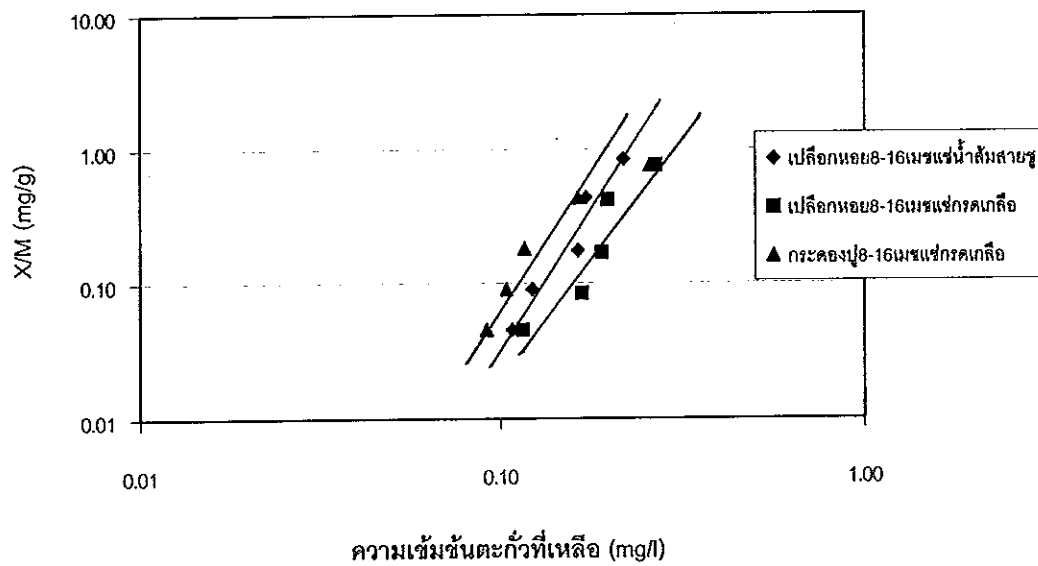
ชนิดตัวดูดซับ	น้ำหนัก (กรัม)	pH			ความเข้มข้นตะกั่ว (mg/l)				X/M (mg/g)	% Removal
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย		
กระดองปูขนาด 16-80 เมช กระตุ้นด้วย น้ำส้มสายชู	0.0	5.5	5.5	5.5	1.080	1.090	1.010	1.060	-	0.00
	0.1	8.8	8.7	8.6	0.195	0.187	0.210	0.197	0.863	81.42
	0.2	9.1	9.0	9.0	0.189	0.156	0.194	0.179	0.440	83.11
	0.5	9.3	9.3	9.3	0.140	0.103	0.151	0.131	0.185	87.64
	1.0	9.5	9.4	9.4	0.130	0.095	0.130	0.118	0.094	88.87
	2.0	9.5	9.5	9.5	0.119	0.092	0.122	0.111	0.047	89.53
กระดองปูขนาด 16-80 เมช กระตุ้นด้วย กรดเกลือ	0.0	5.5	5.5	5.5	1.010	1.050	1.100	1.050	-	0.00
	0.1	7.6	7.8	7.6	0.133	0.157	0.122	0.137	0.913	86.95
	0.2	8.2	8.8	8.1	0.084	0.112	0.085	0.093	0.478	91.14
	0.5	8.7	8.9	8.9	0.080	0.072	0.060	0.070	0.196	93.33
	1.0	9.2	9.3	9.3	0.078	0.070	0.058	0.068	0.098	93.52
	2.0	9.6	9.7	9.7	0.071	0.067	0.053	0.063	0.049	94.00
กระดองปูขนาด 8-16 เมช กระตุ้นด้วย กรดเกลือ	0.0	5.5	5.5	5.5	1.010	1.010	1.050	1.020	-	0.00
	0.1	6.3	6.1	6.1	0.310	0.190	0.300	0.266	0.754	73.92
	0.2	7.5	7.5	7.9	0.189	0.143	0.166	0.166	0.427	83.73
	0.5	8.7	8.6	8.8	0.108	0.119	0.125	0.117	0.180	88.53
	1.0	9.1	9.6	9.2	0.107	0.095	0.115	0.105	0.091	89.71
	2.0	9.4	9.8	9.4	0.092	-	-	0.092	0.046	90.98

ตาราง 3.3 ข้อมูลการศึกษาไอโซเทอร์มจากเปลือกหอย

ชนิด	น้ำหนัก (กรัม)	pH			ความเข้มข้นตะกั่ว (mg/l)				X/M (mg/g)	% Removal
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย		
เปลือกหอยขนาด 16-80 เมช กระตุ้นด้วย น้ำส้มสายชู	0.0	5.5	5.5	5.5	1.080	1.050	1.100	1.076	-	0.00
	0.1	8.0	7.8	8.0	0.194	0.192	0.202	0.196	0.880	81.78
	0.2	8.7	8.6	8.5	0.183	0.176	0.160	0.173	0.451	83.92
	0.5	8.9	8.7	8.6	0.100	0.131	0.113	0.114	0.192	89.41
	1.0	9.0	8.9	8.9	0.074	0.104	0.104	0.094	0.098	91.26
	2.0	9.1	9.0	9.0	0.062	0.095	0.093	0.083	0.049	92.29
เปลือกหอยขนาด 8-16 เมช กระตุ้นด้วย น้ำส้มสายชู	0.0	5.5	5.5	5.5	1.011	1.016	1.105	1.044	-	0.00
	0.1	7.4	7.4	7.0	0.153	0.240	0.270	0.221	0.823	78.83
	0.2	8.5	8.5	8.4	0.151	0.169	0.204	0.174	0.435	83.33
	0.5	8.7	8.7	8.6	0.147	0.155	0.197	0.166	0.175	84.10
	1.0	8.9	8.9	8.8	0.142	0.144	0.086	0.124	0.092	88.12
	2.0	9.0	8.9	9.0	0.086	0.133	-	0.109	0.046	89.56
เปลือกหอยขนาด 16-80 เมช กระตุ้นด้วย กรดเกลือ	0.0	5.5	5.5	5.5	0.980	1.010	1.050	1.013	-	0.00
	0.1	8.9	8.7	8.7	0.270	0.204	0.198	0.224	0.785	77.89
	0.2	9.0	8.8	8.8	0.188	0.179	0.194	0.187	0.413	81.54
	0.5	9.0	8.9	8.8	0.185	0.167	0.184	0.178	0.167	82.43
	1.0	9.1	8.9	8.8	0.106	0.107	0.106	0.106	0.097	89.54
	2.0	9.1	9.0	9.0	0.058	0.086	0.076	0.073	0.047	92.79
เปลือกหอยขนาด 8-16 เมช กระตุ้นด้วย กรดเกลือ	0.0	5.5	5.5	5.5	0.980	1.010	1.100	1.030	-	0.00
	0.1	7.0	6.5	6.5	0.250	0.301	0.262	0.271	0.759	73.69
	0.2	7.6	7.7	7.8	0.182	0.221	0.198	0.200	0.415	80.58
	0.5	8.4	8.5	8.5	0.178	0.205	0.191	0.191	0.167	81.46
	1.0	8.8	8.6	8.6	0.169	0.181	0.162	0.170	0.086	83.50
	2.0	8.9	8.7	8.9	0.111	0.121	0.115	0.115	0.045	88.83



ภาพประกอบ 3.11 ไอโซเทอร์มการดูดซับตะกั่วของตัวดูดซับขนาด 16-80 เมช



ภาพประกอบ 3.12 ไอโซเทอร์มการดูดซับตะกั่วของตัวดูดซับขนาด 8-16 เมช

ตาราง 3.4 ค่าคงที่การดูดซับจากสมการ Freundlich

ขนาด	กรดกระตุ้น	ค่าคงที่	เปลือกหอย	กระดองปู
16-80 เมช	กรดเกลือ	1/n	2.58	3.61
		K (mg/g)	20.9	1050
	น้ำส้มสายชู	1/n	3.34	4.64
		K (mg/g)	113	810
8-16 เมช	กรดเกลือ	1/n	3.66	3.67
		K (mg/g)	66.4	100
	น้ำส้มสายชู	1/n	3.46	-
		K (mg/g)	66	-

สมการ Freundlich

$$X/M = KC^{1/n}$$

หรือ

$$\log X/M = \log K + 1/n \log C$$

จากกราฟเส้นตรงในสเกล log-log สามารถอ่านค่า K และ 1/n ได้

$$1/n = \text{ความชันของเส้นตรง}$$

$$K = X/M \text{ (mg/g) เมื่อ } C = 1 \text{ mg/l}$$

ความสามารถในการดูดซับเมื่อความเข้มข้นสาร
ปนเปื้อนเท่ากับ 1mg/l

ตาราง 3.5 อธิบายความหมายของค่า K และ 1/n จาก สมการ Freundlich

1/n	K	คำอธิบาย
ต่ำ	สูง	ความสามารถในการดูดซับสูงและจะเปลี่ยนตามความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในอัตราที่ไม่สูงมากนัก
	ต่ำ	ความสามารถในการดูดซับต่ำในทุกช่วงความเข้มข้น
สูง	สูง	ความสามารถในการดูดซับสูงมากเมื่อความเข้มข้นสูง และความสามารถในการดูดซับจะลดลงอย่างมากเมื่อความเข้มข้นต่ำ
	ต่ำ	ความสามารถในการดูดซับสูงเมื่อความเข้มข้นสูง และความสามารถในการดูดซับต่ำเมื่อความเข้มข้นต่ำ

จากค่า K และ 1/n ที่อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับสาร (ตาราง 3.5) นำมาอธิบายเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับตะกั่วของตัวดูดซับแต่ละชนิด เมื่อพิจารณาเฉพาะขนาด 16-80 เมช พบว่า เส้นกราฟกระดองปูอยู่สูงกว่า และมีค่า K สูงกว่าของเปลือกหอย แสดงว่ากระดองปูมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้ดีกว่าเปลือกหอย แต่ค่าความชัน (1/n) ของกระดองปูสูงกว่านั้นคือที่ความเข้มข้นต่ำเปลือกหอยสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีกว่า

เมื่อพิจารณาที่ขนาด 8-16 เมชพบว่า กระดองปูมีค่า K สูงกว่าเปลือกหอยในขณะที่ค่าความชันของเส้นกราฟหรือ 1/n ใกล้เคียงกัน แสดงว่ากระดองปูที่กระตุ้นด้วยกรดเกลือมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วดีกว่าเปลือกหอยที่กระตุ้นด้วยกรดเกลือและน้ำส้มสายชูทุกช่วงความเข้มข้น และพบว่าขนาดมีผลต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่ว โดยที่ตัวดูดซับขนาดเล็กสามารถดูดซับตะกั่วได้มากกว่า ซึ่งพิจารณาได้จากกระดองปูขนาดต่างกันแต่กระตุ้นด้วยกรดเกลือเหมือนกันมีค่า 1/n ใกล้เคียงกันคือประมาณ 3.6 แต่ค่า K ของกระดองปูขนาดเล็กกว่า (16-80 เมช) มีค่าสูงถึง 1,050 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมกระดองปู ในขณะที่กระดองปูขนาด 8-16 เมช มีค่า K เพียง 100 มิลลิกรัมต่อกรัม แสดงว่ากระดองปูขนาดเล็กกว่าสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีกว่ากระดองปูขนาดใหญ่ในทุกช่วงความเข้มข้น เนื่องจากตัวดูดซับขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับขนาดใหญ่ และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกระตุ้นต่างชนิดกัน ในกรณีของกระดองปูจะเห็นว่าการกระตุ้นด้วยกรดเกลือได้ตัวดูดซับที่มีคุณสมบัติการดูดซับดีกว่าการกระตุ้นด้วยน้ำส้มสายชู โดยจะเห็นได้ว่ามีค่า K สูงกว่าและค่า 1/n ต่ำ

กว่าด้วย (ดูตาราง 3.4) ทั้งนี้ในกรณีของเปลือกหอยขนาด 16-80 เมชจะแตกต่างกัน เพราะตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยกรดเกลือแม้ว่าจะมีค่า $1/n$ ต่ำกว่าแต่ค่า K ก็ต่ำกว่าด้วยในขณะที่ตัวดูดซับขนาด 8-16 เมชที่เตรียมจากเปลือกหอยนั้นมีคุณสมบัติค่อนข้างใกล้เคียงกันไม่ว่าจะกระตุ้นด้วยกรดเกลือหรือน้ำส้มสายชู ทั้งนี้โดยสรุปกระดองปูที่กระตุ้นด้วยกรดเกลือมีค่า K สูงโดดเด่นกว่าตัวดูดซับชนิดอื่นๆ แสดงว่ากระดองปูที่กระตุ้นด้วยกรดเกลือมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วดีที่สุดในที่นี้ ดังนั้นจึงนำมาทดลองในขั้นต่อไปด้วยเหตุผลต่างๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

3.3 กลไกการกำจัดตะกั่วด้วยกระดองปู

เพื่อศึกษากลไกของการกำจัดตะกั่วโดยใช้กระดองปู จึงนำกระดองปูขนาด 16-80 เมชที่กระตุ้นด้วยกรดเกลือปริมาณ 0.5 กรัมมาเขย่ากับน้ำที่ปนเปื้อนตะกั่วความเข้มข้น 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วนำกระดองปูมาทำให้แห้ง บดเป็นผงละเอียด นำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD : Phillip X'Pert) และ Fourier Transform Infrared Spectrometry (FTIR : Boker EQUINOX55)

ผลการวิเคราะห์กระดองปูและเปลือกหอยก่อนใช้งานด้วยเทคนิค XRD จากผลในภาพประกอบ 3.1-3.4 ยืนยันว่ากระดองปูและเปลือกหอยมีองค์ประกอบหลักคือ แคลเซียมคาร์บอเนต และผลการวิเคราะห์กระดองปูที่ผ่านการกำจัดตะกั่วแล้ววิเคราะห์ด้วยเทคนิคเดียวกันดังภาพประกอบ 3.13 ถึง 3.15 พบว่าเกิดสารประกอบตะกั่วในรูปของตะกั่วคาร์บอเนต (Lead carbonate hydrate : $PbCO_3 \cdot 2H_2O$)

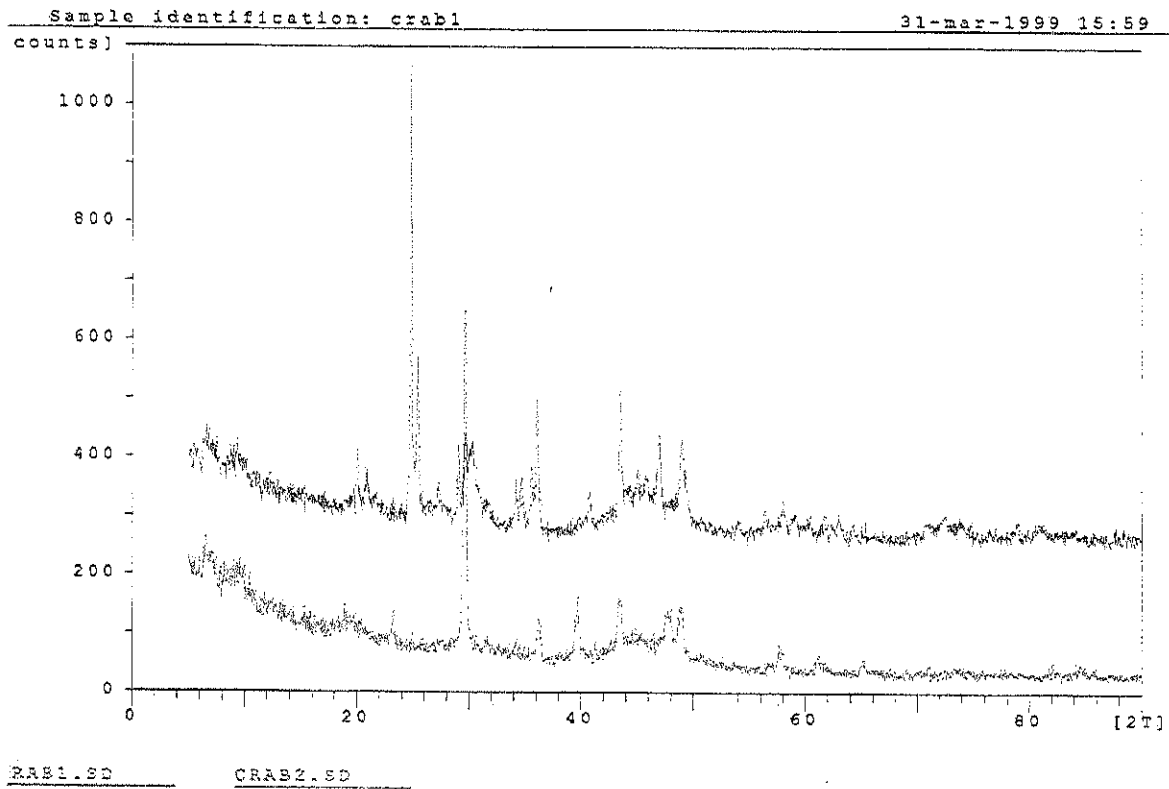
สำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ข้อมูล FTIR Spectra ที่ได้ เป็นสิ่งที่ยากในการจะระบุหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบที่เกิดขึ้น เนื่องจากในกระดองปูมีสารประกอบหลายชนิด ทั้งสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ ทำให้พีคของสารเกิดการซ้อนทับกันจนบดบังพีคของของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ในการที่จะระบุหมู่ฟังก์ชันได้ชัดเจนต้องทำสารนั้นให้บริสุทธิ์ก่อนจะนำมาวิเคราะห์

ข้อมูล FTIR ของกระดองปูก่อนและหลังการกำจัดตะกั่วในภาพประกอบ 3.16 พบว่าองค์ประกอบทางเคมีคล้ายคลึงกับข้อมูลของ Lee, *et al.* (1997) ซึ่งได้บอกบางหมู่ฟังก์ชันของกระดองปูไว้ดังนี้ พีคที่ 3854 แสดงแถบดูดกลืนของ H_2O พีคที่ 3422 แสดงแถบดูดกลืนของ $-OH$ พีคที่ 2989 แสดงแถบดูดกลืนของ $-CH$ พีคที่ 1658 แสดงแถบดูดกลืนของ $-NHCOCH$ และพีคที่ 1443 , 873 แสดงแถบดูดกลืนของ CO_3^{2-} จากภาพประกอบ 3.16 ซึ่งแสดงพีคของกระดองปูก่อน (Crab) และหลังการดูดซับ (Crab+Pb1) จะเห็นว่าพีคที่ปรากฏส่วนใหญ่คล้ายคลึงกัน แต่แตกต่างกันตรงพีคที่ 837 และ 678 และจากข้อมูลผลการทดลองด้วย

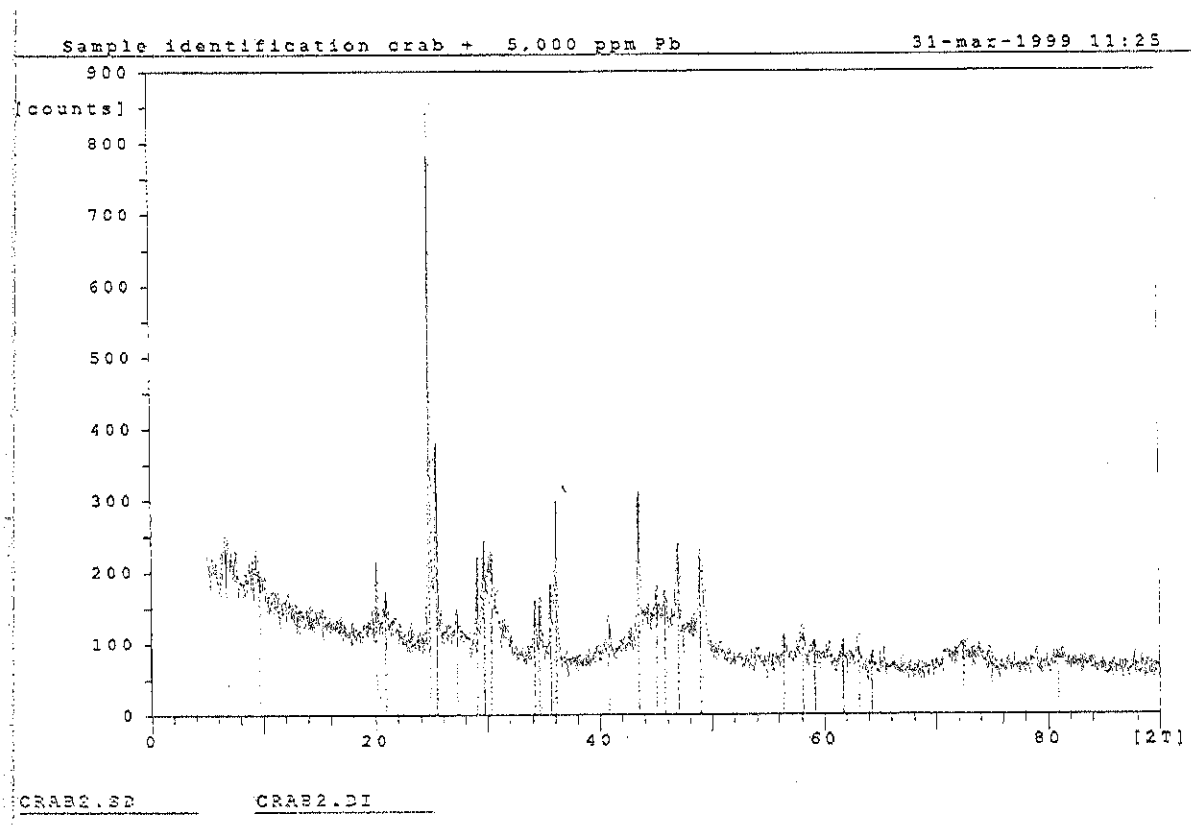
เทคนิค XRD ข้างต้นที่ได้ว่า สารประกอบที่เกิดขึ้นภายหลังจากการนำกระดองปูที่ผ่านการกำจัดตะกั่วแล้วคือ $PbCO_3 \cdot 2H_2O$ ดังนั้นจึงนำสเปกตรัมของสารมาตรฐาน $CaCO_3$ (ภาพประกอบ 3.17) และ $PbCO_3$ (ภาพประกอบ 3.18) มาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้พบว่า $CaCO_3$ แสดงพีคที่ 2522, 1797, 1419, 875 และ 712 และ $PbCO_3$ แสดงพีคที่ 1398, 1050, 837 และ 678 ดังแสดงในภาพประกอบ 3.15 และ 3.17 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จาก Lee, *et al.* (1997) และ สเปกตรัม FTIR ของ สารมาตรฐาน $PbCO_3$ และ $CaCO_3$ ทำให้สามารถบอกหมู่ฟังก์ชันและสารประกอบที่เกิดขึ้นในกระดองปูได้ดังในตาราง 3.6

ตาราง 3.6 ผลการวิเคราะห์กระดองปูที่ผ่านการกำจัดตะกั่วแล้ว ด้วยเทคนิค FTIR

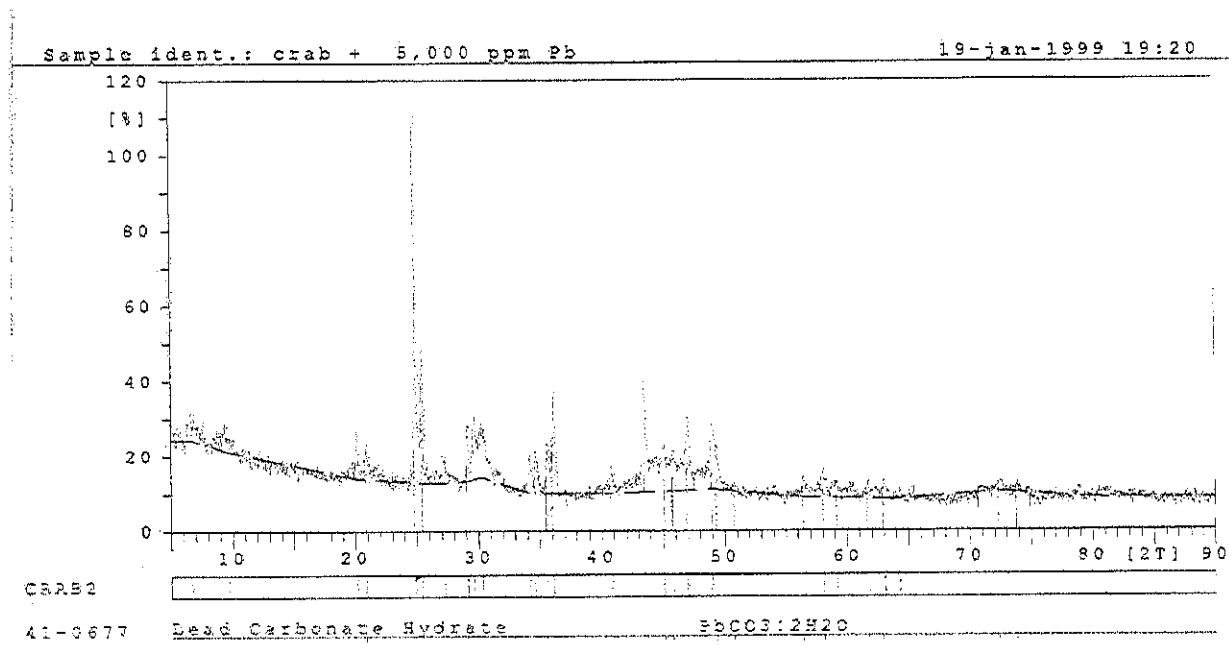
พีคที่ (cm^{-1})	แสดงแถบดูดกลืนของ	หมายเหตุ
3434	-OH	หมู่ของสารประกอบไคตินและ Lee, <i>et al.</i> (1997)
1658	-NHCOCH	หมู่ของสารประกอบไคตินและ Lee, <i>et al.</i> (1997)
1423	$-CO_3^{2-}$	กราฟมาตรฐาน $CaCO_3$ และ Lee, <i>et al.</i> (1997)
874	$CaCO_3$	กราฟมาตรฐาน $CaCO_3$
837 และ 678	$PbCO_3$	กราฟมาตรฐาน $PbCO_3$



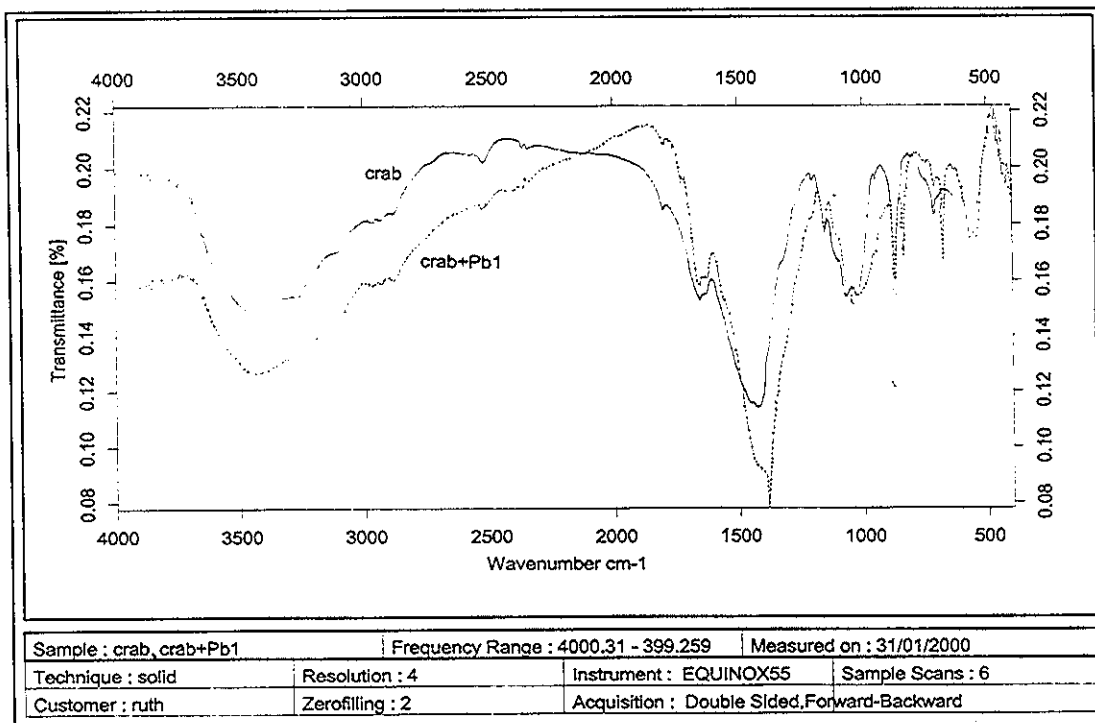
ภาพประกอบ 3.13 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในกระดองปูก่อน (Crab1) และหลังกำจัดตะกั่ว (Crab2) ด้วย X-Ray Diffraction (XRD)



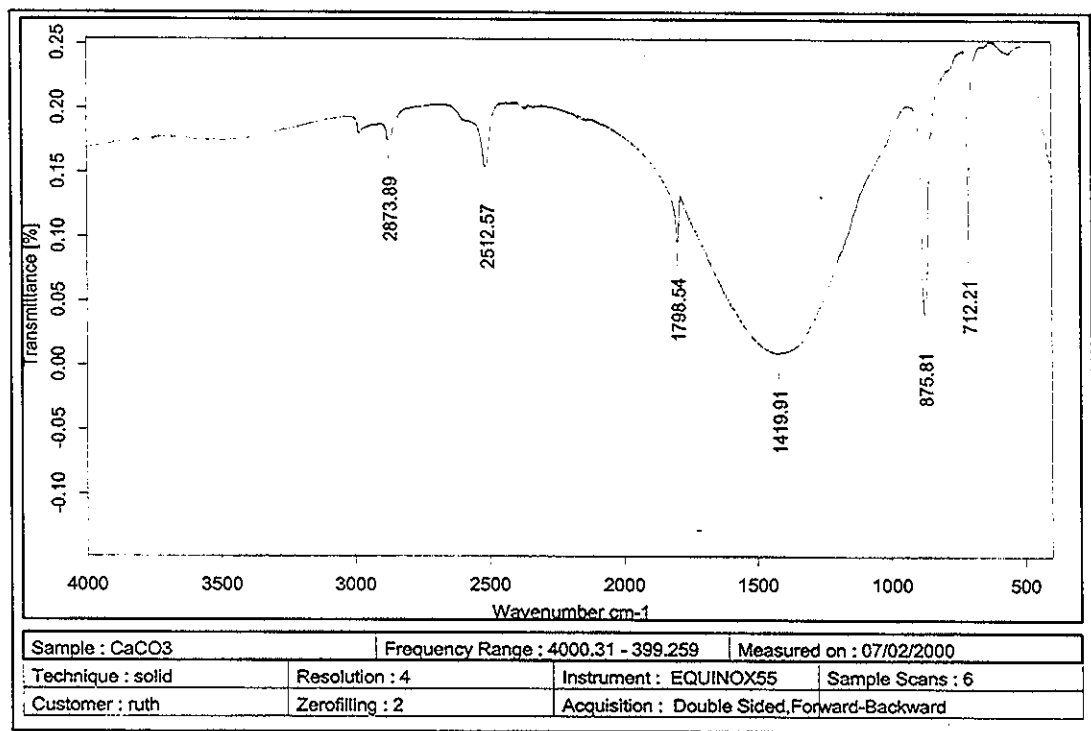
ภาพประกอบ 3.14 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในกระดองปูที่ใช้กำจัดตะกั่ว ด้วย X-Ray Diffraction (XRD)



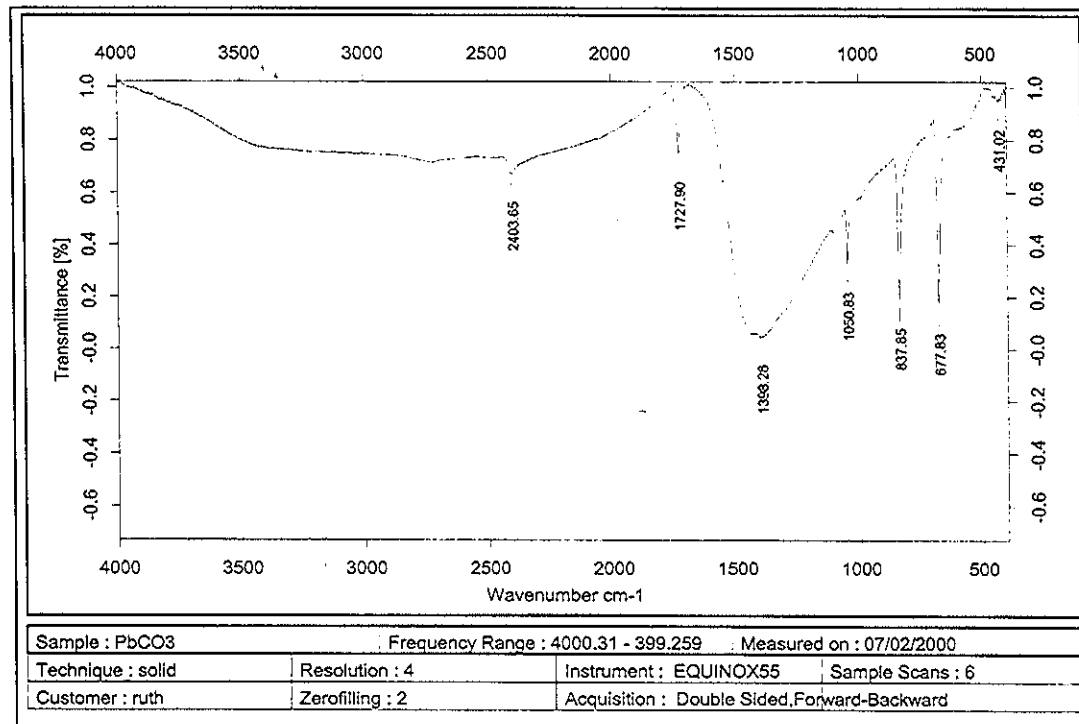
ภาพประกอบ 3.15 ภาพมาตรฐานเปรียบเทียบเพื่อหาสารประกอบในกระดองปูด้วย X-Ray Diffraction (XRD)



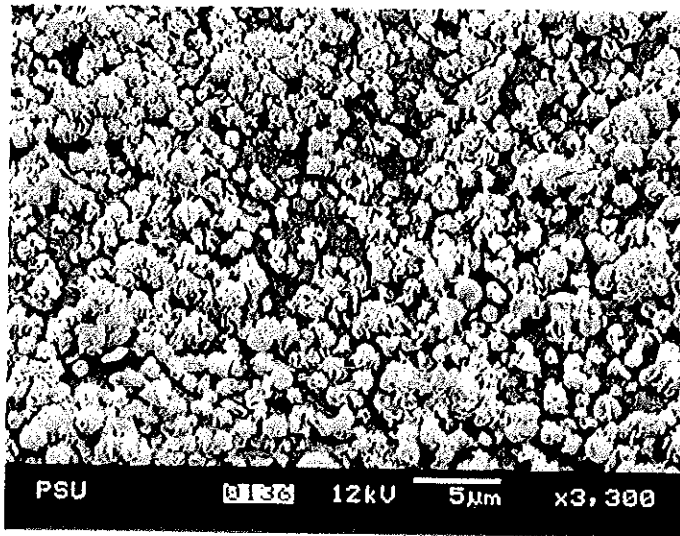
ภาพประกอบ 3.16 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างสารประกอบในกระดองปูก่อนและหลังการกำจัดตะกั่วด้วย FTIR



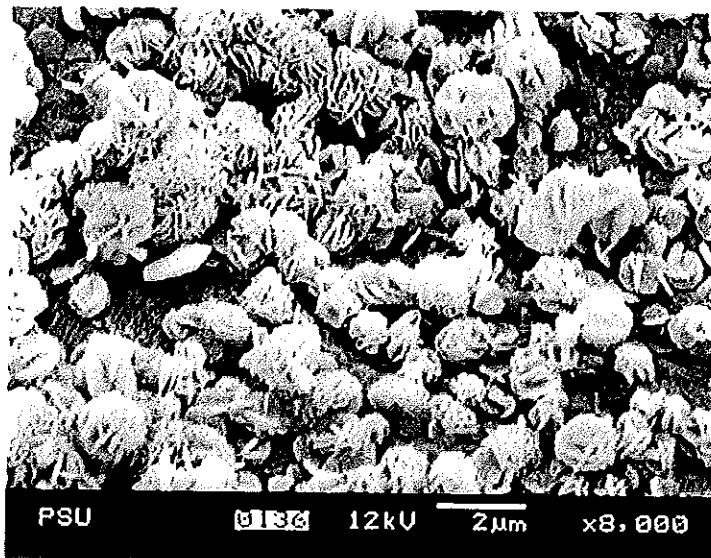
ภาพประกอบ 3.17 ภาพมาตรฐาน CaCO₃ เปรียบเทียบเพื่อหาโครงสร้างของสารประกอบด้วย FTIR



ภาพประกอบ 3.18 กราฟมาตรฐาน $PbCO_3$ เปรียบเทียบเพื่อหาโครงสร้างของสารประกอบด้วย FTIR



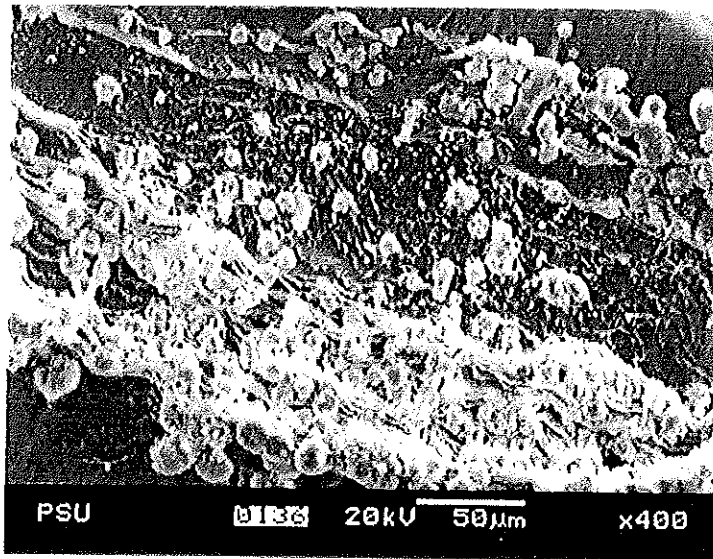
a) กำลังขยาย 3,300 เท่า



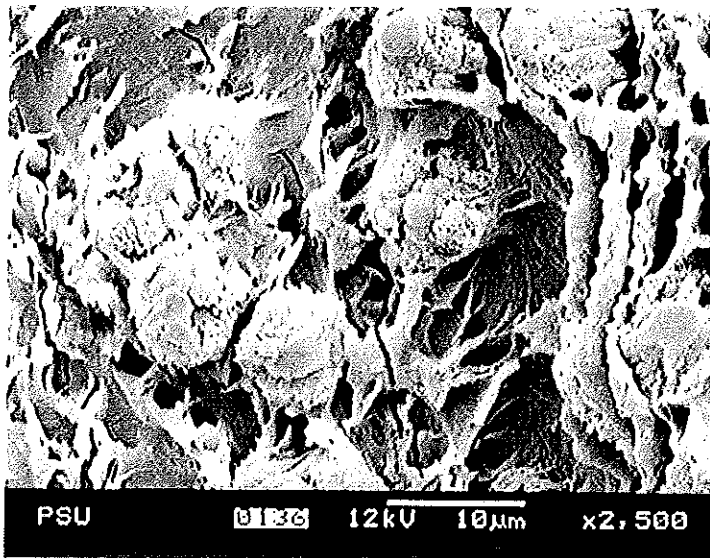
b) กำลังขยาย 8,000 เท่า

แสดงการเกาะติดของตะกั่วคาร์บอนที่ผิวด้านหลังกระดองปู

ภาพประกอบ 3.19 ลักษณะพื้นผิวของกระดองปูที่ผ่านการกำจัดตะกั่วแล้วด้วยกล้อง SEM



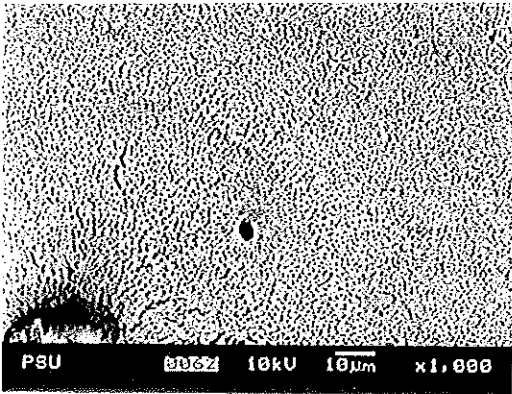
a) กำลังขยาย 400 เท่า



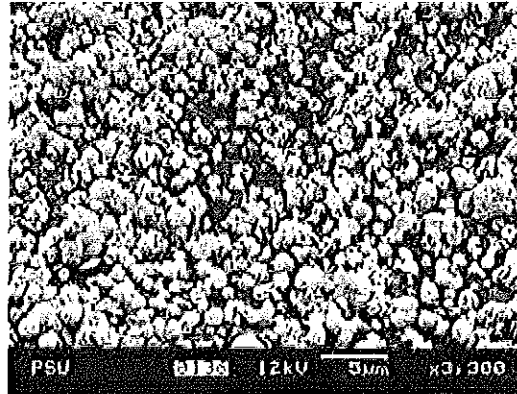
b) กำลังขยาย 2,500 เท่า

แสดงการเกาะติดของตะกั่วคาร์บอนเนตที่ผิวระหว่างชั้นของกระดองปู

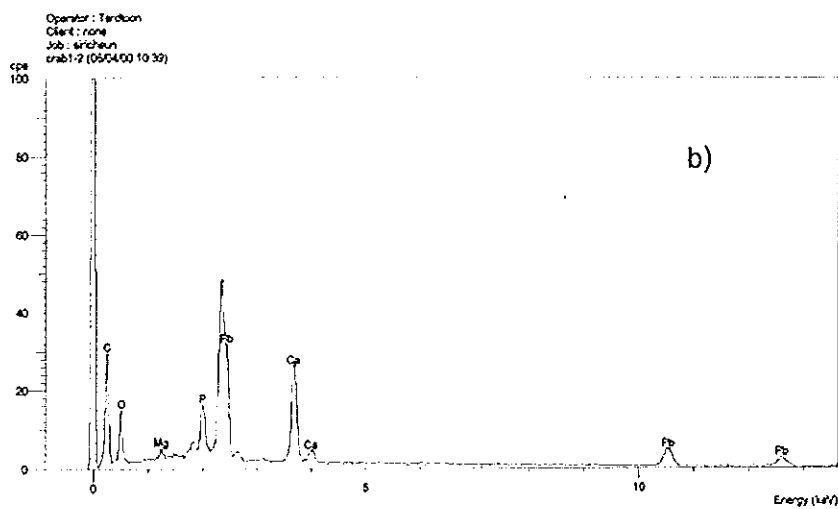
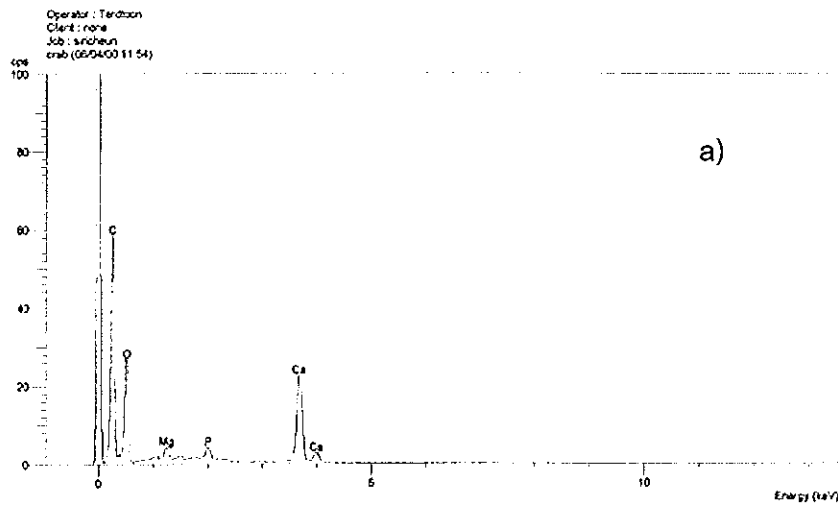
ภาพประกอบ 3.20 ลักษณะพื้นผิวของกระดองปูที่ผ่านการกำจัดตะกั่วแล้วด้วยกล้อง SEM



a) กระจกอบปุ๋ยก่อนใช้กำจัดตะกั่ว



b) กระจกอบปุ๋ยหลังจากกำจัดตะกั่วแล้ว



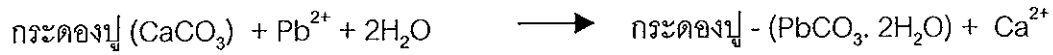
ภาพประกอบ 3.21 SEM และ EDS บนผิวกระจกอบปุ๋ย

ผลการวิเคราะห์กระดองปูที่ผ่านการกำจัดตะกั่วแล้วด้วยเทคนิค XRD และ FTIR สามารถสรุปได้ว่า สารประกอบตะกั่วที่ผิวกระดองปูอยู่ในรูปตะกั่วคาร์บอเนต $PbCO_3$ ซึ่งยืนยันได้ชัดเจนยิ่งขึ้นจากภาพถ่ายด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM : Jeol JSM5800LV) ดังภาพประกอบ 3.19 และ 3.20 ซึ่งจะเห็นอนุภาคเล็กๆ ขนาดประมาณ 1-2 ไมโครเมตรเกาะกระจายอยู่ตามผิวของกระดองปู โดยมีลักษณะเป็นรูปผลึกคล้ายกับผลึกของ Cerussite ($PbCO_3$) ดังภาพประกอบ 3.19 ดูเหมือนว่าผลึกเหล่านี้เกิดจากการตกผลึกบริเวณชั้นน้ำใกล้ผิวกระดองปูแล้วมาเกาะติดที่ผิวกระดองปู ในขณะที่ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวระหว่างชั้นของกระดองปู (ภาพประกอบ 3.20) ดูเหมือนว่ามีการก่อผลึกและโตขึ้นมาจากกระดองปูโดยตรง

กล้อง SEM ซึ่งต่อพ่วงกับเครื่อง EDS (Energy dispersive Spectrometer) ซึ่งกล้อง SEM ใช้ดูลักษณะพื้นผิวกระดองปู และเครื่อง EDS ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบบนพื้นผิวกระดองปูที่เห็นจากกล้อง SEM ดังภาพประกอบ 3.21 ซึ่งแสดงลักษณะและองค์ประกอบพื้นผิวของกระดองปูก่อนและหลังการกำจัดตะกั่ว จะเห็นว่ากระดองปูก่อนกำจัดตะกั่ว (a) พีคของแคลเซียมสูงแต่กระดองปูที่ผ่านการกำจัดตะกั่วแล้ว (b) ปรากฏพีคของตะกั่วเพิ่มขึ้นมาแสดงว่าอนุภาคที่เกาะอยู่บนพื้นผิวกระดองปูที่เห็นจากกล้อง SEM นั้นเป็นอนุภาคของตะกั่ว

จากการศึกษาของ Sturchio, *et al.* (1997) ซึ่งศึกษาการดูดซับตะกั่วที่ผิวแคลไซต์ โดยเทคนิค Synchrotron X-Ray Standing Wave (XSW) พบว่าประมาณ 60% ของอิออนตะกั่วถูกดูดซับได้โดยเกิดการแลกเปลี่ยนอิออนกับอิออนของแคลเซียมในโครงผลึกของแคลไซต์บริเวณพื้นผิว และอีก 40% ของอิออนตะกั่วที่ถูกดูดซับบนผิวนั้น เขาได้ตั้งข้อสังเกตว่าอาจเกิดจากการดูดซับทางกายภาพของโมเลกุลตะกั่วที่มีน้ำล้อมรอบหรือเกิดสารประกอบเชิงซ้อน หรืออาจเกิดการผสมผสานของการดูดซับทางเคมีกับพีซีซีของตะกั่วในรูปแบบต่างๆ หรืออาจเกี่ยวข้องกับสิ่งปนเปื้อนพวกไฮโดรคาร์บอนบนผิวแคลไซต์ ในขณะที่ Lee, *et al.* (1997) ทำการตกตะกอนตะกั่วบนผิวอนุภาคกระดองปูและได้สรุปว่า การกำจัดตะกั่วเกิดโดยการละลายของแคลเซียมคาร์บอเนตจากกระดองปู แล้วเกิดการตกผลึกเป็นตะกั่วคาร์บอเนตใกล้ๆ ผิวกระดองปูบริเวณที่มีความเข้มข้นของคาร์บอเนตอิออนสูง จากนั้นถูกดูดซับบนผิวกระดองปูบริเวณที่มีสารโคตินซึ่งเหมือนกับ Sturchio, *et al.* (1996) ที่ตั้งข้อสังเกตไว้ว่าตะกั่วที่ถูกดูดซับอีก 40 % นั้นอาจเกี่ยวข้องกับสิ่งปนเปื้อนพวกไฮโดรคาร์บอนบนผิวแคลไซต์ ดังนั้นเหตุผลหนึ่งที่น่าจะเกิดขึ้นในการกำจัดตะกั่วจากผลการทดลองที่ได้ คือ ปฏิกริยาการแทนที่ (Displacement) โดยอิออนของตะกั่วเข้าแทนที่แคลเซียมอิออนในแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นโครงสร้างของกระดองปู เนื่องจากค่า K_{sp} (Solubility

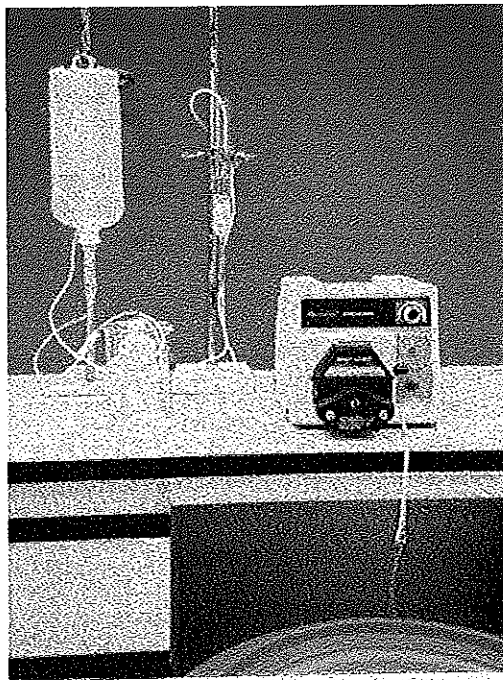
Product Constant) ของ CaCO_3 สูงกว่า K_{sp} ของ PbCO_3 ($K_{sp} \text{CaCO}_3 = 4.8 \times 10^{-9}$, $K_{sp} \text{PbCO}_3 = 1.5 \times 10^{-13}$) จึงเกิดเป็น PbCO_3 (s) และได้แคลเซียมไอออนออกมาในสารละลายดังสมการ



จากงานวิจัยที่มีผู้ศึกษาไว้แล้วข้างต้นประกอบกับผลการศึกษาและภาพประกอบ 3.13 - 3.21 ที่ได้คาดว่า การกำจัดตะกั่วที่เกิดขึ้นน่าจะมาจากการละลายของแคลเซียมคาร์บอเนตจากกระดองปูแล้วเกิดการตกผลึก (Precipitation) กับไอออนตะกั่วบริเวณใกล้ผิวกระดองปูซึ่งมีความเข้มข้นคาร์บอเนตไอออนสูงพอที่จะทำให้ผลคูณการละลายมีค่ามากกว่าค่า $K_{sp} \text{PbCO}_3$ จึงได้เป็นตะกั่วคาร์บอเนตและมีน้ำล้อมรอบ 2 โมเลกุล ($\text{PbCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) แล้วเกิดการดูดซับ (Adsorption) บนผิวกระดองปู

3.4 การศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานจากคอลัมน์

จากการทดลองแบบไม่ต่อเนื่องที่ผ่านมามีพบว่าวัสดุที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่ว คือ กระจดอง ปูขนาด 16-80 เมชที่กระตุ้นด้วยกรดเกลือ และเมื่อนำมาทดสอบแบบต่อเนื่องโดยใช้คอลัมน์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.3 เซนติเมตร ใช้กระจดองปูหนัก 10 กรัม มีทิศทางการไหลของน้ำ เป็นแบบ down flow (ภาพประกอบ 3.22) อัตราเร็ว 1.2 ลิตรต่อชั่วโมง ทำการเก็บน้ำตัวอย่างที่ผ่านคอลัมน์ตามช่วงเวลาที่เหมาะสม นำมาวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วที่เหลือโดยทำ 2 ซ้ำ ได้ผลดัง ตาราง 3.7 และนำข้อมูลนำมาสร้าง Breakthrough Curve ระหว่าง % ความเข้มข้นตะกั่วที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น (C_0) กับปริมาตรของน้ำไหลผ่านคอลัมน์ (ในภาพประกอบ 3.23) และในภาพประกอบ 3.24 เมื่อใช้หน่วยปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านเป็นค่าปริมาตรบรรจุของคอลัมน์ (Bed Volume : BV) โดยที่ปริมาตรน้ำ 1 BV เท่ากับ 16 มิลลิลิตร

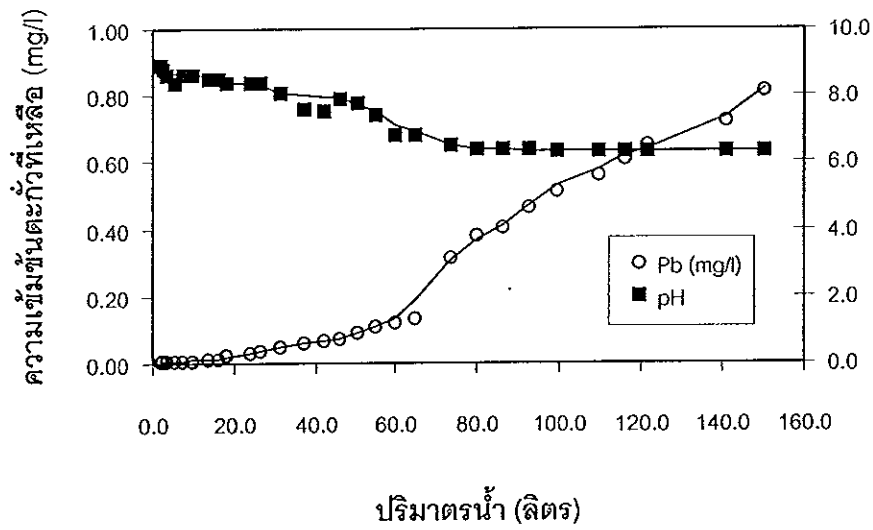


ภาพประกอบ 3.22 ชุดทดลองแบบต่อเนื่องในห้องปฏิบัติการ

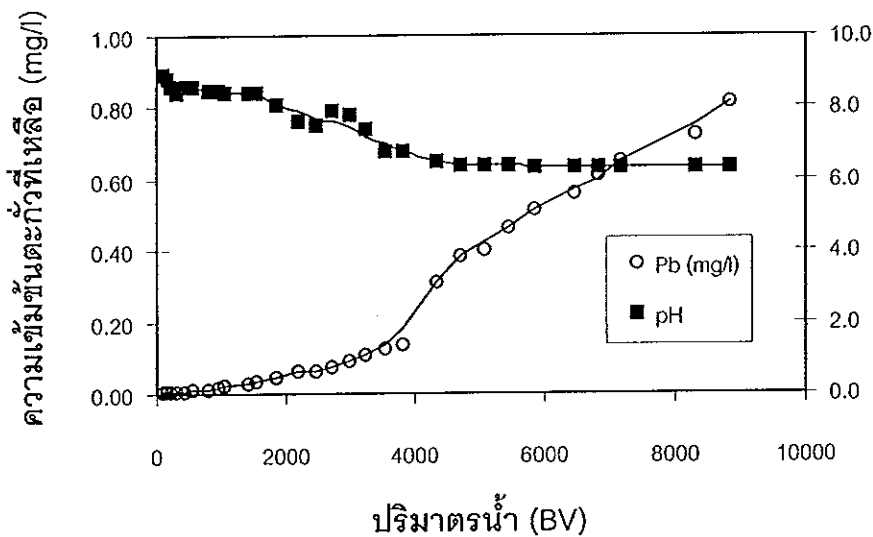
ตาราง 3.7 ค่าความเข้มข้นตะกั่วในน้ำหลังผ่านคอลัมน์บรรจุกระดองปูหนัก 10 กรัม

เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	ปริมาตรน้ำ (BV)	pH	ความเข้มข้นตะกั่ว (mg/l)		% (C/Co)
				ค่าเฉลี่ย	SD	
90	1.8	105.88	8.9	0.006	0.001	0.11
120	2.4	141.18	8.8	0.006	0.001	0.11
180	3.6	211.76	8.6	0.006	0.001	0.11
260	5.2	305.88	8.4	0.008	0.001	0.15
360	7.2	423.53	8.6	0.008	0.000	0.16
480	9.6	564.71	8.6	0.009	0.001	0.18
690	13.8	811.76	8.5	0.013	0.001	0.25
810	16.2	952.94	8.5	0.015	0.001	0.29
900	18.0	1058.82	8.4	0.022	0.001	0.42
1200	24.0	1411.76	8.4	0.028	0.001	0.54
1320	26.4	1552.94	8.4	0.037	0.001	0.71
1560	31.2	1835.29	8.1	0.048	0.001	0.94
1870	37.4	2200.00	7.6	0.060	0.002	1.15
2100	42.0	2470.59	7.5	0.064	0.002	1.23
2310	46.2	2717.65	7.9	0.072	0.001	1.41
2526	50.5	2970.59	7.8	0.088	0.001	1.71
2745	55.0	3235.29	7.4	0.107	0.001	2.09
2985	60.0	3529.41	6.8	0.122	0.001	2.38
3235	64.7	3805.88	6.8	0.134	0.001	2.62
3675	73.5	4323.53	6.5	0.314	0.005	6.12
4005	80.0	4705.88	6.4	0.382	0.011	7.68
4320	86.4	5082.35	6.4	0.401	0.004	7.79
4635	92.7	5452.94	6.4	0.466	0.004	9.12
4970	99.4	5847.06	6.3	0.515	0.011	10.00
5505	110.1	6476.47	6.3	0.558	0.014	11.19
5805	116.1	6829.41	6.3	0.608	0.010	11.84
6090	121.8	7164.71	6.3	0.650	0.007	12.91
7050	141.0	8294.12	6.3	0.721	0.011	14.06
7410	150.0	8823.53	6.3	0.815	0.004	16.01

หมายเหตุ : ความเข้มข้นเริ่มต้น (Co) เท่ากับ 5.0 mg/l



ภาพประกอบ 3.23 Breakthrough Curve ของตะกั่วที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5.0 mg/l



ภาพประกอบ 3.24 Breakthrough Curve ของตะกั่วที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5.0 mg/l
BV : ปริมาตรบรรจุของคอลัมน์

เมื่อน้ำตะกั่วสังเคราะห์ที่มีพีเอช 5.1 ผ่านคอลัมน์บรรจุกระดูกงูซึ่งมี CaCO_3 เป็นองค์ประกอบพบว่าน้ำที่ผ่านคอลัมน์มีพีเอชอยู่ในช่วง 6.3 - 8.9 แสดงผลดังตาราง 3.7 ในช่วงแรกน้ำมีพีเอชค่อนข้างสูง (pH 8.9) เนื่องจากการละลายของ Ca^{2+} และ CO_3^{2-} (ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของกรดอ่อน-เบสแก่และการละลายของเบสแก่) และสามารถกำจัดตะกั่วได้ดี เพราะ CO_3^{2-} และไอออนของตะกั่วเกิดการตกผลึก (Precipitation) เป็น $\text{PbCO}_3(\text{s})$ มาเกาะที่ผิวกระดูกงู เมื่อเวลาผ่านไปพีเอชของน้ำที่ผ่านคอลัมน์ค่อยๆ ลดลง ขณะเดียวกันความเข้มข้นตะกั่วของน้ำที่ผ่านคอลัมน์ค่อยๆ เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะปริมาณ CO_3^{2-} ได้ถูกใช้ไป และพื้นที่ผิวกระดูกงูนั้นลดลง เนื่องจากการเกาะติดของ $\text{PbCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ บนผิวกระดูกงู

เมื่อน้ำผ่านคอลัมน์ในปริมาณที่สูงมากแล้ว จนค่าพีเอชตกลงเหลือ 6.3 ซึ่งเป็นค่าที่ PbCO_3 อยู่ในรูปที่เริ่มจะไม่เสถียร (ภาพประกอบ 1.4) โอกาสที่ตะกั่วจะถูกจับในรูป $\text{PbCO}_3(\text{s})$ นั้นค่อนข้างน้อย แต่ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าคอลัมน์ยังสามารถกำจัดตะกั่วได้ค่อนข้างสูง เพราะฉะนั้นจากเหตุผลเหล่านี้จึงเป็นเหตุผลสนับสนุนว่าอาจเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบนพื้นผิวกระดูกงูขึ้นร่วมด้วย โดยที่ Pb^{2+} เข้าไปแทนที่ Ca^{2+} ทำให้พื้นผิวกระดูกงูเกิดเป็น PbCO_3 จึงสามารถกำจัดตะกั่วได้เพิ่มขึ้น

3.5 การลดปริมาณตะกั่วในน้ำจากตำบลถ้ำทะลุ อำเภอบันนังสตา จังหวัดยะลา

เพื่อทดสอบการนำคอลล์มันไปใช้กับแหล่งน้ำจริงๆ จึงใช้คอลล์มันทดสอบกับน้ำปนเปื้อนตะกั่วในตำบลถ้ำทะลุ อำเภอบันนังสตา จังหวัดยะลา ซึ่งต้องนำน้ำมาตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 1 คืน แล้วนำมาผ่านคอลล์มันที่บรรจุด้วยตัวดูดซับปริมาณ 10 กรัม อัตราเร็วน้ำผ่านคอลล์มัน 2 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นอัตราเร็วที่เหมาะสมกับคอลล์มันที่ใช้เพื่อให้อัตราเร็วน้ำไหลเข้าเท่ากับอัตราเร็วน้ำไหลออกจากคอลล์มัน เก็บน้ำแต่ละช่วงเวลานำมาวิเคราะห์ทางเคมีได้ผลดังตาราง 3.8 และ 3.9

ตาราง 3.8 ผลการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างจากตำบลถ้ำทะลุ อำเภอบันนังสตา จังหวัดยะลา

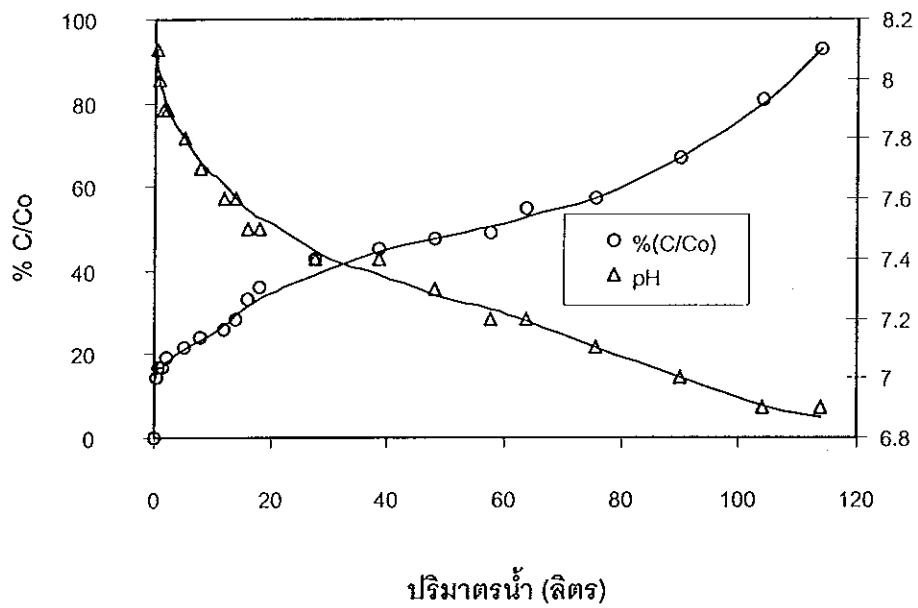
Parameter	ผลการวิเคราะห์	
	น้ำก่อนเข้าระบบ	น้ำออกจากระบบ
pH	7.35	*
Alkalinity mg/l as CaCO ₃	34	50
Hardness mg/l as CaCO ₃	104	108
ปริมาณตะกั่ว (mg/l)	0.042	*
ปริมาณแคลเซียม (mg/l)	32.5	34

หมายเหตุ : * เป็นค่าพีเอชและความเข้มข้นของตะกั่วโดยขึ้นกับปริมาตรหรือเวลาที่ใช้

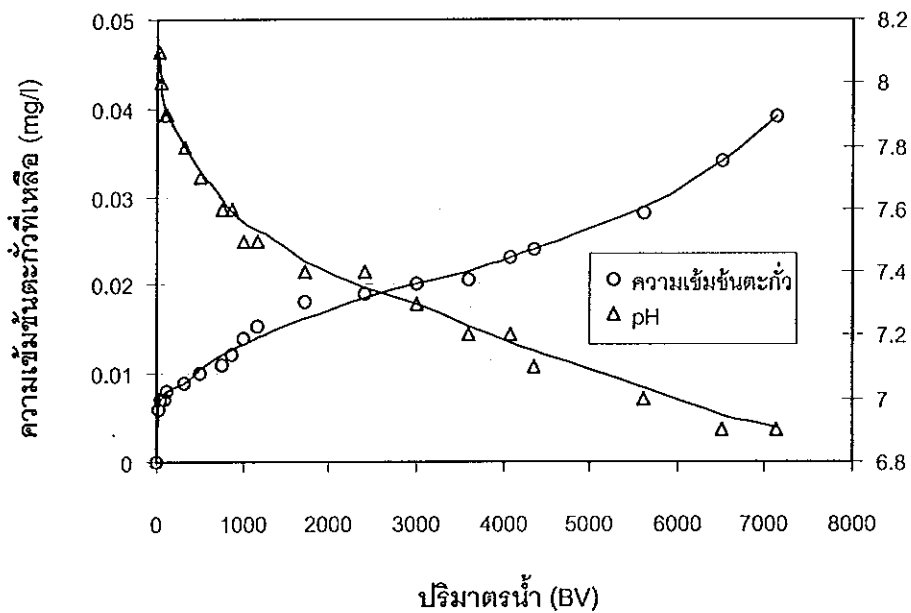
ตาราง 3.9 ค่าความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำ จากอำเภอบันนังสตา จังหวัดยะลา หลังผ่านคอลัมน์

เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	ปริมาตรน้ำ (BV)	pH	ความเข้มข้นตะกั่ว (mg/l)		% (C/Co)
				ค่าเฉลี่ย	SD	
10	0.3	21	8.1	0.006	0.001	14.29
20	0.7	41	8.0	0.007	0.000	16.67
40	1.3	83	7.9	0.007	0.001	16.67
60	2.0	125	7.9	0.008	0.001	19.05
150	5.0	313	7.8	0.009	0.001	21.43
240	8.0	500	7.7	0.010	0.001	23.81
350	12.0	750	7.6	0.011	0.000	26.19
410	14.0	875	7.6	0.012	0.001	28.57
470	16.0	1000	7.5	0.014	0.001	33.33
530	18.0	1170	7.5	0.015	0.001	36.19
830	27.6	1725	7.4	0.018	0.001	42.86
1160	38.6	2412	7.4	0.019	0.001	45.24
1440	48.0	3000	7.3	0.020	0.002	47.62
1730	57.6	3600	7.2	0.021	0.001	48.81
1910	63.6	4090	7.2	0.023	0.001	54.76
2270	75.6	4350	7.1	0.024	0.001	57.14
2750	90.0	5625	7.0	0.028	0.003	66.67
3120	104.0	6500	6.9	0.034	0.003	80.95
3420	114	7125	6.9	0.039	0.002	92.86

หมายเหตุ ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 0.042 mg/l



ภาพประกอบ 3.25 Breakthrough Curve ของน้ำปนเปื้อนตะกั่วจากตำบลถ้ำทะเล



ภาพประกอบ 3.26 Breakthrough Curve ของน้ำปนเปื้อนตะกั่วจากตำบลถ้ำทะเล

ผลการวิเคราะห์น้ำก่อนและหลังผ่านคอลัมน์ ค่า Alkalinity ซึ่งบอกระดับของ CO_3^{2-} และ HCO_3^- , ค่า Hardness ซึ่งบอกระดับของแคลเซียม และปริมาณแคลเซียมที่ออกมาในน้ำ แสดงในตาราง 3.8 ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งหมดล้วนมีค่าเพิ่มขึ้น สนับสนุนสิ่งที่เกิดขึ้นในการกำจัด ตะกั่วว่าน่าจะเกิดการละลายของแคลเซียมคาร์บอเนตจากกระดองปู จากนั้น CO_3^{2-} จับกับอิออนของตะกั่วเกิดเป็น PbCO_3 (s) มาเกาะที่ผิวกระดองปู อีกทั้งยังน่าจะเกิดการแลกเปลี่ยนอิออนระหว่างอิออนของตะกั่วและอิออนของแคลเซียมบนผิวกระดองปู จนกระทั่งกระดองปูหมดความสามารถในการกำจัดตะกั่ว ทำให้ความเข้มข้นตะกั่วในน้ำก่อนและหลังผ่านคอลัมน์มีเท่ากัน

จากภาพประกอบ 3.25 และ 3.26 จะเห็นว่าสามารถใช้กระดองปูขนาด 16-80 เมชที่ กระตุ้นด้วยกรดเกลือมาบำบัดน้ำปนเปื้อนตะกั่วที่บ้านถ้ำทะลุได้ โดยบำบัดได้ปริมาตรสูงถึง 500 เท่าของปริมาตรบรรจุของคอลัมน์ก่อนน้ำที่ผ่านคอลัมน์จะมีปริมาณตะกั่วเกินค่ามาตรฐานน้ำดื่มที่ องค์การอนามัยโลกกำหนด (0.01 mg/l) และยังสามารถใช้ได้จนถึง 7,125 เท่าของปริมาตรบรรจุของคอลัมน์ กระดองปูจึงหมดประสิทธิภาพอย่างสมบูรณ์ (ดูคำนวณจากภาคผนวก ค) และจากการคำนวณปริมาณกระดองปู 1 กรัม สามารถดูดซับตะกั่วได้ 0.18 มิลลิกรัม (ดูคำนวณจากภาคผนวก ง)

บทที่ 4

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

4.1 บทสรุป

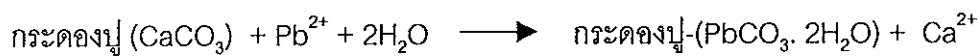
การพัฒนากระดองปูและเปลือกหอยแครงมาใช้บำบัดน้ำที่ปนเปื้อนตะกั่วนั้นมีความเป็นไปได้ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสามารถในการกำจัดตะกั่ว ซึ่งการทดลองนี้แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ การเตรียมกระดองปูและเปลือกหอย การศึกษาความสามารถในการกำจัดตะกั่วทั้งแบบไม่ต่อเนื่องและแบบต่อเนื่อง ด้วยน้ำปนเปื้อนตะกั่วที่สังเคราะห์ขึ้นในห้องปฏิบัติการ และน้ำที่ปนเปื้อนตะกั่วจากตำบลถ้ำทะลุ อำเภอบันนังสตา จังหวัดยะลา มาทำการทดสอบแบบคอลัมน์

ขั้นตอนที่ 1 เป็นการเตรียมและศึกษาลักษณะพื้นผิวของกระดองปูและเปลือกหอย ซึ่งผ่านการทำความสะอาด คัดขนาด และนำมาแช่กรด นำมาศึกษาองค์ประกอบของเปลือกหอยและกระดองปูพบว่าทั้ง 2 ชนิดมี แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นองค์ประกอบหลัก

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการศึกษาความสามารถในการกำจัดตะกั่วแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch Test) และแบบต่อเนื่อง (Continuous Test) ด้วยการให้น้ำตะกั่วสังเคราะห์ ซึ่งแบ่งย่อยเป็นหลายการทดลอง ในการศึกษาเบื้องต้นพบว่า ในช่วง 20 นาทีแรกอัตราการกำจัดตะกั่วเป็นไปอย่างรวดเร็ว สามารถกำจัดตะกั่วได้ 80-89 % เมื่อเวลาผ่านไป % การกำจัดตะกั่วเพิ่มขึ้นอีกเพียงเล็กน้อย และจากการเปรียบเทียบความสามารถของกระดองปูและเปลือกหอยจากการทำไอโซเทอร์ม พบว่ากระดองปูขนาด 16-80 เมชที่กระตุ้นด้วยกรดเกลือมีความสามารถในการกำจัดตะกั่วดีที่สุดที่พิจารณาจากค่า K และ $1/n$ ซึ่งคำนวณจากสมการ Freundlich พบว่าค่า K เท่ากับ 1,050 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมกระดองปูที่ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อทำการทดลองแบบต่อเนื่องโดยใช้คอลัมน์ พบว่าคอลัมน์สามารถบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนตะกั่วความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ปริมาตร 500 เท่าของปริมาตรบรรจุของคอลัมน์ โดยที่ปริมาณตะกั่วในน้ำไม่เกินค่ามาตรฐานขององค์การอนามัยโลกกำหนด (0.01 mg/l)

จากการศึกษาลักษณะ พื้นผิวและรูพรุนกระดองปูและเปลือกหอยด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) เห็นได้ว่า กระดองปูมีตาข่ายมากมายและเป็นชั้นๆ อีกทั้งยังมีรูพรุนทั่วไป ส่วนลักษณะพื้นผิวเปลือกหอยคล้ายแผ่นหิน มีรูพรุนไม่มากนัก และในการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area) โดยวิธี BET พบว่ากระดองปูมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงถึง 35 ตารางเมตรต่อกรัม ในขณะที่เปลือกหอยมีพื้นที่ผิวจำเพาะเพียง 0.24 ตารางเมตรต่อกรัม

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD, FTIR และภาพถ่ายพื้นผิวด้วยกล้อง SEM และ EDS คาดว่า การกำจัดตะกั่วในน้ำน่าจะเกิดปฏิกิริยาแทนที่ (Displacement) โดยอิออนของตะกั่วเข้าแทนที่อิออนของแคลเซียมในแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นโครงสร้างของกระดูกงู ดั่งสมการ และปฏิกิริยาที่ 2 ที่คาดว่าน่าจะเกิดขึ้นคือการละลายของแคลเซียมคาร์บอเนตจากกระดูกงู แล้วเกิดการตกผลึก (Precipitation) กับอิออนตะกั่วบริเวณใกล้ๆ ผิวกระดูกงู ซึ่งมีความเข้มข้นของคาร์บอเนตอิออนค่อนข้างสูง เกิดเป็นสารประกอบตะกั่วคาร์บอเนต ($PbCO_3$) แล้วถูกดูดซับ (Adsorbed) ที่ผิวกระดูกงูบริเวณที่มีไคติน



ขั้นตอนที่ 3 ทดลองบำบัดน้ำตะกั่วแบบคอลัมน์ โดยใช้ น้ำที่ปนเปื้อนตะกั่วจากตำบลถ้ำทะเล อำเภอบ้านฉาง จังหวัดระยอง พบว่าคอลัมน์ปริมาตร 1 ลิตรสามารถบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนตะกั่วความเข้มข้น 0.042 mg/l ได้มากถึง 500 ลิตร ก่อนที่ความเข้มข้นตะกั่วในน้ำที่ผ่านคอลัมน์จะสูงเกินค่ามาตรฐานที่องค์การอนามัยโลกกำหนด (0.01 mg/l) และความสามารถเต็มตัวของคอลัมน์ใช้กับน้ำตะกั่วปนเปื้อนได้สูงถึง 7,125 ลิตร คำนวณความสามารถในการดูดซับตะกั่วแบบต่อเนื่องเท่ากับ 0.18 mg ตะกั่ว/g กระดูกงู (ภาคผนวก ง)

ในการนำคอลัมน์ไปใช้งานจริงอาจเพิ่มชั้นถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ในช่วงแรกและช่วงสุดท้ายของการกรองน้ำ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกรองน้ำ และลดความกระด้าง สี และกลิ่น เนื่องจากถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับสารปนเปื้อนอื่นๆ ซึ่งเป็นการลดภาระบรรจุ (Loading) ให้แก่กระดูกงู และเป็นการเพิ่มความพูนให้กับตัวดูดซับ อีกทั้งถ่านกัมมันต์ยังสามารถลดปริมาณตะกั่วได้ส่วนหนึ่ง (Netzer, 1982) หรือในการกรองน้ำอาจนำกระดูกงูมาผสมกับถ่านกัมมันต์ ในอัตราส่วน 1:10 ซึ่งช่วยให้การไหลของน้ำดีขึ้นและให้ผลในการลดปริมาณตะกั่วดีกว่าการใช้ถ่านกัมมันต์เพียงอย่างเดียวถึง 5 เท่า (Lee, et al., 1998) และที่สำคัญถ่านกัมมันต์สามารถผลิตได้เองจากวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่น

ดังนั้นการนำกระดูกงูและเปลือกหอยมาใช้บำบัดน้ำที่ปนเปื้อนตะกั่ว เป็นกระบวนการที่ทำได้ง่าย สามารถลดปริมาณตะกั่วให้อยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยต่อการอุปโภคและบริโภค อีกทั้งยังเป็นการนำวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่นกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.2 ข้อเสนอแนะ

4.2.1 ผลการศึกษาพบว่าเปลือกหอยมีแนวโน้มที่จะใช้งานได้ดีในช่วงความเข้มข้นต่ำๆ ดังนั้นควรมีการศึกษาการนำเปลือกหอยมาใช้ดูดซับตะกั่วโดยอาจรวมถึงเปลือกหอยน้ำจืดด้วย

4.2.2 หากสารโคตินในกระดองปูมีผลในการดูดซับตะกั่วจริง ควรมีการศึกษาการพัฒนาตัวดูดซับที่มีองค์ประกอบร่วมกันระหว่างโคตินและแคลเซียมคาร์บอเนตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ

4.2.3 ควรมีการศึกษารายละเอียดต่างๆ เกี่ยวกับกระดองปู เช่น ชนิด อายุและถิ่นที่อยู่อาศัยที่เหมาะสม เพื่อให้ได้กระดองปูที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วที่ดีที่สุด

4.2.4 ควรมีการศึกษาอิออนที่อาจมีผลต่อการกำจัดตะกั่วในน้ำ

4.2.5 ควรมีการศึกษาถึงสภาวะที่อาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการละลายของตะกั่วออกจากกระดองปูที่ใช้กรองน้ำแล้ว ซึ่งอาจกลับคืนสู่สิ่งแวดล้อมหากอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม

บรรณานุกรม

- กิตติ เอกอำพล. 2528. "ความเป็นพิษของโลหะหนัก", *จุลสารสภาวะแวดล้อม*. 4 (ตุลาคม-พฤศจิกายน 2528), 26-28.
- เชี่ยวชาญ อุตวิชาติ. 2535. *เคมีเชิงฟิสิกส์*. สงขลา: ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ณรงค์ ณ เชียงใหม่. 2531. "คุณภาพแหล่งน้ำภาคใต้", *สงขลานครินทร์*. 10 (ตุลาคม - ธันวาคม 2531), 417-432.
- ดำรง ชุมมงคล และ อภิสัทธ์ เจริญกุล. 2533. "การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ NaCl เป็นตัวกระตุ้น", *วิศวกรรมสาร*. 43 (พฤศจิกายน - ธันวาคม 2533), 96-99.
- ธีระพล ประมวลกิจจา. 2534. "อุตสาหกรรมผลิตโคตินและโคโตแซนจากเปลือกกุ้ง", *อุตสาหกรรมสาร*. 34 (ธันวาคม 2534), 3-7.
- นันทนา สันตติวุฒิ, นพรัตน์ สุรพฤษ และ มัทนา อึ้งสุประเสริฐ. 2530. "ปริมาณโลหะหนักในน้ำบริเวณปากแม่น้ำรอบอ่าวไทย", *การอนามัยสิ่งแวดล้อม*. 10 (กันยายน-ธันวาคม 2530), 43-58.
- ประนอม ภูวนัตตชัย. 2532. "ความเข้มข้นตะกั่วในแม่น้ำของประเทศไทย", ใน *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 27 30 มกราคม-1 กุมภาพันธ์ 2532*, 283-293. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต. 2534. *แหล่งน้ำกับปัญหามลพิษ*. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันฑุลเวศน์. 2538. *วิศวกรรมการประปาเล่ม1*. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- _____ . 2538. *วิศวกรรมการประปาเล่ม2*. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วรรณภา ตันยีนยงค์. 2540. "เรื่องน่ารู้เกี่ยวกับโลหะหนักในน้ำยาล้างถ้วยชาม", *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ*. 45 (พฤษภาคม 2540), 29-31.
- วิสิฐ จະวะสิต. 2532. "การประยุกต์ใช้สารสกัดจากเปลือกปูและกุ้งในอุตสาหกรรมอาหาร", *วารสารการประมง*. 45 (พฤศจิกายน-ธันวาคม 2535), 43-47.
- วิสิฐ จະวะสิต และวันทนีย์ วรวงศ์ทัต. 2535. "คุณสมบัติและการใช้ประโยชน์ของโคโตแซนซึ่งผลิตจากกากเหลือทิ้งของโรงงานแปรรูปกุ้งและปูในประเทศไทย", *วารสารการประมง*. 45 (กันยายน-ตุลาคม 2535), 1099-1110.
- สมพุด กฤตลักษณ์. 2532. "ผลกระทบของตะกั่วต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์", *จุลสารสภาวะแวดล้อม*. 8 (กุมภาพันธ์ 2532), 12-19.

- สุรพล อารีย์กุล และ กัลยาณี คุปตานนท์. 2536. แหล่งที่มาของตะกั่วในแม่น้ำปัดตานี.
สงขลา : ภาควิชาเหมืองแร่และโลหะวิทยา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- อุดมลักษณ์ ศรีทัศน์ย์. 2529. พิษของโลหะหนักต่อสุขภาพอนามัย. กรุงเทพฯ : กรมอนามัย
กระทรวงสาธารณสุข.
- APHA , AWWA and WEF. 1992. Standard Method for the Examination of Water and
Wastewater. 18 th ed. New York : American Public Health Association.
- Bailey, S.E., Olin, T.J., Bricka, R.M. and Adrian ,D.D. 1999. "A Review of Potentially
Low-Cost Sorbents for Heavy Metals", Water Research. 33 (1999), 2469-2479.
- Broughton, C.W. 1981. "Principle of Liquid-Phase Adsorption", In Application of
Adsorption to Wastewater Treatment., pp.29-66. Eckenfelder, Wealay
W.Jr.,eds.T.N.Enviro Press,Inc.
- 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
Carbonates in Lead Fixation", J. Environmental Science Health. 31 (1996),
2099-2109.
- Dimitrova,S.V. and Mehandgiev, D.R. 1998. "Lead Removal from Aqueous Solution by
Granulated Blast-Furnace Slage", Water Research. 32 (1998), 3289-3292.
- Ford, D.L. 1981. "Wastewater Characteristic and Treatment ", In Activated Carbon
Adsorption for Wastewater 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", In
Flotation., pp. 148-196. New York : SME of AIME.
- Garrels, R.M. 1960. Mineral Equilibria at Low Temperature and Pressure. NewYork.
- Geater, A., Chompikul, J., Chongsuvivalwong, V. and McNeil, D. 1996. Lead
Contamination Among Schoolchildren Living in the Pattani River Basin. Songkla
: Epidemiology Unit Prince of Songkhla University.
- Hassler, J.W. 1963. Activated Carbon. New York : Chemical Publishing Company, Inc.

- Kumar, Pawan and Dara. 1981. "Binding Heavy Metal Ions with Polymerized Onion Skin", *J.of Polymer Science*. 19 (1981), 397-402.
- Lee, M.Y., Park, J.M. and Yang, J.W. 1997. "Microprecipitation of Lead on the Surface of Crab Shell Particles", *Process Biochemistry*. 32 (1997), 967-677.
- Lee, M.Y., Shin, H. J., Lee, S.H., Park, J.M. and Yang, J.W. 1998. "Removal of Lead in a Fixed – Bed Column Packed with Activated Carbon and Crab Shell" *Saparation Science and Technology*. 33 (1998), 1043-1056.
- Moore, M.R., Campbell, B.C. and Goldber, A. 1979. *The Chemical Environment*. Glasgow : blackie Press.
- Natzer, A. and Hughes, D.E. 1982. "Adsorption of Copper, Lead and Cobalt by Activated Carbon", *Water Research*. 18 (1982), 927-933.
- Nezaki, M. and Hatotani, H. 1967. "Treatment of Tetraethyl Lead Manufacturing Waste", *Water Research*. 2 (1967), 167-177.
- Odozi, T.O., Okeke, S. and Lartey , R.B. 1985. "Studies on Binding Metal Ions with Polymerize Corn Cob and a Composite Resin with Sawdust and Onion Skin", *Agriculture Wastes*. 12 (1985), 13-21.
- Okieiman, F.E. and Onyenkpa, V.U. 1989. "Removal of Heavy Metal Ions from Aqueous Solutions with Melon Seed Husks", *Biological Waste*. 29 (1989), 11-16.
- Orumwense, F. F.O. 1996. "Removal of Lead from Water by Adsorption on a Kaolinitic Clay", *J.Chem.Tech. Biotechnol*. 65 (1996), 363-369.
- Patterson, J.W. and Patzelt, R. 1981. "Treatment of Priority Pollutants with Resins", In *Application of Adsorption to Wastewater Treatment.*, pp.5-28. Eckenfelder , W.W.Jr.,eds. T.N. : Enviro Press, Inc.
- Patterson, J.W., Allen, H.E. and Scala, J.J. 1977. "Carbonate Precipitation for Heavy Metals Pollutants", *J.Water Pollut.Contral Fed*. (1977), 2397-2410.
- Rose, A.W., Hawkes, H.E. and Webb, J.S. 1979. *Geochemistry in Mineral Exploration*. 2d ed. London. : Academic press, Inc.

- Sag, Y and Kutsal, T. 1995. "Biosorption of Heavy Metals by *Zoogloea Ramigera* : Use of Adsorption Isotherms and Comparison of Biosorption Characteristics", *The Chemical Engineering Journal*. 60 (1995), 181-188.
- Shiina, S. 1986. "Heavy Metal Wastewater Treatment by Use of Calcined Coral Limestone", *PPM*. 12 (1986), 14-20. (In Japanese)
- Sturchio, N.C., *et al.* 1997. "Lead Adsorption at the Calcite-Water Interface : Synchrotron X-Ray Standing Wave and X-ray Reflectivity Studies" , *Geochemica et Cosmochimica Acta*. 61 (1997), 251-263.
- Suzuki, T. 1991. "Utilization of Coral Limestone", *Chemical Industry*. 9 (1991), 34-39. (In Japanese)
- Vermulen, T., Klein, G. and Hiester, N.K. 1973. "Adsorption and Ion Exchange : Section 16", In *Chemical Engineers' Handbook*., pp. 1-15. Perry, Robert H., ed. Mc Graw-Hill, Inc.
- Warner, G.F. 1977. *The Biology of Crabs*. London : Paul Elck Ltd.
- Weber, W. J.Jr. 1981. "Concept and Principle of Carbon Application in Wastewater Treatment", In *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*. 2 d ed. WHO , Geneva.

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์

วิธีการวิเคราะห์

พีเอช (pH)

การวัดค่าพีเอชของน้ำโดยใช้เครื่องวัดพีเอช ทำได้โดยใช้ Combination Electrode ซึ่งมีความสามารถในการวัดความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน (H^+) การอ่านค่าพีเอช สามารถอ่านได้โดยตรง การวัดพีเอชทุกครั้งต้องใช้สารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน ที่ทราบค่าพีเอชแน่นอนเพื่อทำการ Standardize เครื่องก่อนเสมอทุกครั้งก่อนใช้งาน

ความเป็นด่าง (Alkalinity) โดยวิธี Direct Titration Method (APHA, AWWA and WEF, 1992)

สารละลายที่ใช้

1. น้ำกลั่นที่ปราศจากคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ น้ำที่กลั่นเสร็จใหม่ๆ หรือนำน้ำกลั่นมาทำให้เดือดเพื่อไล่คาร์บอนไดออกไซด์
2. สารละลายฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์
3. สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ หาความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก โดยไตเตรทกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมคาร์บอเนต 0.01 โมลาร์ ซึ่งเตรียมได้โดยละลายโซเดียมคาร์บอเนต (อบแห้งที่ $110^{\circ}C$) 1.06 กรัม ในน้ำกลั่นและเติมให้เป็น 1 ลิตร โดยใช้ขวดวัดปริมาตร (Volumetric Flask) สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.01 โมลาร์ 1 มิลลิลิตร จะมีค่าเท่ากับ 1.00 มิลลิกรัม
4. สารละลายเมธิลออเรนจ์ อินดิเคเตอร์
5. สารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต 0.1 โมลาร์ ละลาย $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ 25 กรัมในน้ำกลั่นแล้วเติมจนได้ปริมาตร 1 ลิตร

วิธีการ

เลือกใช้ปริมาณตัวอย่างน้ำที่จะหาให้เหมาะสม เพื่อที่จะใช้ละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริกไม่เกิน 25 มิลลิลิตร ในการไตเตรทโดยทั่วไปจะใช้ 50 มิลลิลิตร หรือ 100 มิลลิลิตร ใส่คลอรีนอิสระที่อาจมีอยู่ในตัวอย่างน้ำโดยหยดสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต 0.1 โมลาร์ ลงไป 1 หยด (0.05 มิลลิลิตร)

1. ดูดตัวอย่างน้ำ 100 มิลลิลิตร โดยใช้ปิเปตใส่ลงในเออเลนเมเยอร์ฟลาส (Erlenmeyer Flask) และดูดน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในเออเลนเมเยอร์ฟลาสอีกใบหนึ่ง

2.หยดฟีนอล์ฟทาลีน อินดิเคเตอร์ ลงไปฟลาสละ 3 หยด

3.ถ้าตัวอย่างน้ำมีสีชมพู ให้ไทเทรตด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.01 โมลาร์ จนกระทั่งสีชมพูหายไป (=P)

4.หยดเมธิลออเรนจ์ อินดิเคเตอร์ 3 หยดลงในแต่ละฟลาส

5.ถ้าตัวอย่างมีสีเหลืองเรื่อยๆ ให้ไทเทรตต่อไปด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.01 โมลาร์ จนกระทั่งเห็นสีเริ่มเปลี่ยนไปเป็นสีส้ม โดยเปรียบเทียบกับสีในขวดที่มีน้ำกลั่น แสดงว่าถึงจุดสมมูล

6.จดปริมาตรกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.01 โมลาร์ทั้งหมดที่ใช้ (=T)

การคำนวณ

ความเข้มข้นทั้งหมด (Total Alkalinity) = ปริมาตรกรดที่ใช้ทั้งหมด $\times 10$

ให้ P = ปริมาณมิลลิลิตรกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ที่ใช้ในการไทเทรตสำหรับฟีนอล์ฟทาลีน อินดิเคเตอร์

T = ปริมาตรมิลลิลิตรกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ที่ใช้ในการไทเทรตทั้งหมดสำหรับเมธิลออเรนจ์อินดิเคเตอร์

1. ถ้า $P=T$ ไฮดรอกไซด์ = $P \times 10$
2. ถ้า $P > 0.5T$ ไฮดรอกไซด์ = $(2P-T) \times 10$
คาร์บอเนต = $2(T-P) \times 10$
3. $P = 0.5T$ คาร์บอเนต = $T \times 10$
4. $P < 0.5T$ คาร์บอเนต = $2T \times 10$
ไบคาร์บอเนต = $(T-P) \times 10$
5. $P=0$ ไบคาร์บอเนต = $T \times 10$

หมายเหตุ หน่วยความเข้มข้นเป็นมิลลิลิตร/ลิตร as CaCO_3

ความกระด้าง (Hardness) EDTA Titration Method (APHA, AWWA and WEF, 1992)

สารละลายที่ใช้

1. สารละลายบัฟเฟอร์ เตรียมโดยละลาย 16.9 กรัม NH_4Cl ใน 143 มิลลิลิตร Conc. NH_4OH เติม 1.25 กรัมเกลือแมกนีเซียมของ EDTA เติมน้ำกลั่นจนครบ 250 มิลลิลิตร

2. อินดิเคเตอร์ เตรียมโดยผสม 0.5 กรัม Eriochrome Black T และ 100 กรัม NaCl จะได้เป็นผงแห้งของอินดิเคเตอร์

3. สารละลายมาตรฐาน EDTA 0.01 โมลาร์ เตรียมโดยละลาย 3.723 กรัมของผง EDTA disodium salt ละลายในน้ำจนได้ปริมาตร 1 ลิตร ตั้งทิ้งไว้ 2-3 วัน และทำความสะอาดมาตรฐานกับสารละลายมาตรฐานแคลเซียม ที่ทราบความเข้มข้น ปรับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน EDTA ให้ 1.00 มิลลิลิตร = 1.00 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนต

4. สารละลายมาตรฐานแคลเซียม ซึ่ง 1.00 กรัมของ CaCO_3 ใส่ใน Erlenmeyer Flask ขนาด 500 มิลลิลิตร เติม 50% HCl จนผง CaCO_3 ละลายหมดแล้วเติมน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร ต้มให้เดือดประมาณ 2-3 นาที เพื่อไล่คาร์บอนไดออกไซด์ทิ้งให้เย็น เติม 2-3 หยดของเมธิลเรด อินดิเคเตอร์ ปรับให้เป็นสีส้ม ด้วย 3 โมลาร์ NH_4OH หรือ 50% HCl ปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร

วิธีการ

1. ปิเปตตัวอย่างน้ำ 25 มิลลิลิตร ใส่ใน Erlenmeyer Flask เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

2. เติมสารละลายบัฟเฟอร์ 1-2 มิลลิลิตร

3. เติมผงอินดิเคเตอร์ลงไปพอประมาณ สารละลายกลายเป็นสีม่วงแดง

4. ไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐาน EDTA จนสารละลายกลายเป็นสีน้ำเงิน

การคำนวณ

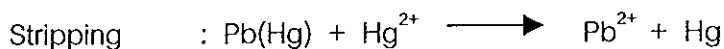
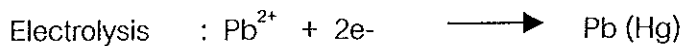
$$\text{Hardness (EDTA) as mg/l CaCO}_3 = \frac{(A \times B \times 1000)}{\text{ml sample}}$$

A = มิลลิลิตรของ EDTA ที่ใช้ในการไตเตรตตัวอย่าง

B = มิลลิลิตร CaCO_3 ซึ่งสมมูลกับ 1.00 มิลลิลิตร EDTA

ความเข้มข้นตะกั่ว โดยวิธี Stripping Potentiometry

การวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วด้วยวิธี Stripping Potentiometry โดยใช้ Glassy Carbon Electrode ที่ชุบด้วยปรอท เกิดศักย์ไฟฟ้าเคมี 2 ขั้นตอน



โดยมีสภาวะในการเกิดอิเล็กโทรไลซิสดังนี้

Electrolysis Potential : -900 mv.

Electrolysis time : คนสารละลาย 50 วินาที และ
หยุดคนสารละลาย 20 วินาที

Oxidant conc. : 80 ppm.

Standard addition : สารละลายมาตรฐานตะกั่ว 10 ppm. ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร

สารละลายที่ใช้

1. Plating Solution
2. Oxidant Solution. (800 ppm. Hg^{2+} ใน 1.3 HCl)
ละลาย HgCl_2 1.083 กรัม ในน้ำ 700 มิลลิลิตร เติม conc.HCl 110 มิลลิลิตร
เจือจางจนด้วยน้ำมีปริมาตรครบ 1000 มิลลิลิตร
3. Stock Solution . Pb^{2+} 1000 ppm
4. สารละลายมาตรฐาน Pb^{2+} 10 ppm.

วิธีการ

1. ชุบอิเล็กโทรด ด้วย Plating Solution ปริมาตร 20 มิลลิลิตร
2. เปิดน้ำตัวอย่าง 20 มิลลิลิตร และ Oxidant Solution 2 มิลลิลิตร ในถ้วยพอลิเอธิลีน เพื่อนำไปวัดปริมาณตะกั่วด้วยเครื่อง Stripping Potentiometer เมื่อเครื่องหยุด ทำการเติมสารละลายมาตรฐานตะกั่ว 10 ppm. ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร แล้วทำการวิเคราะห์ต่อไป
3. ในการวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วทำเป็น Standard Addition Curve

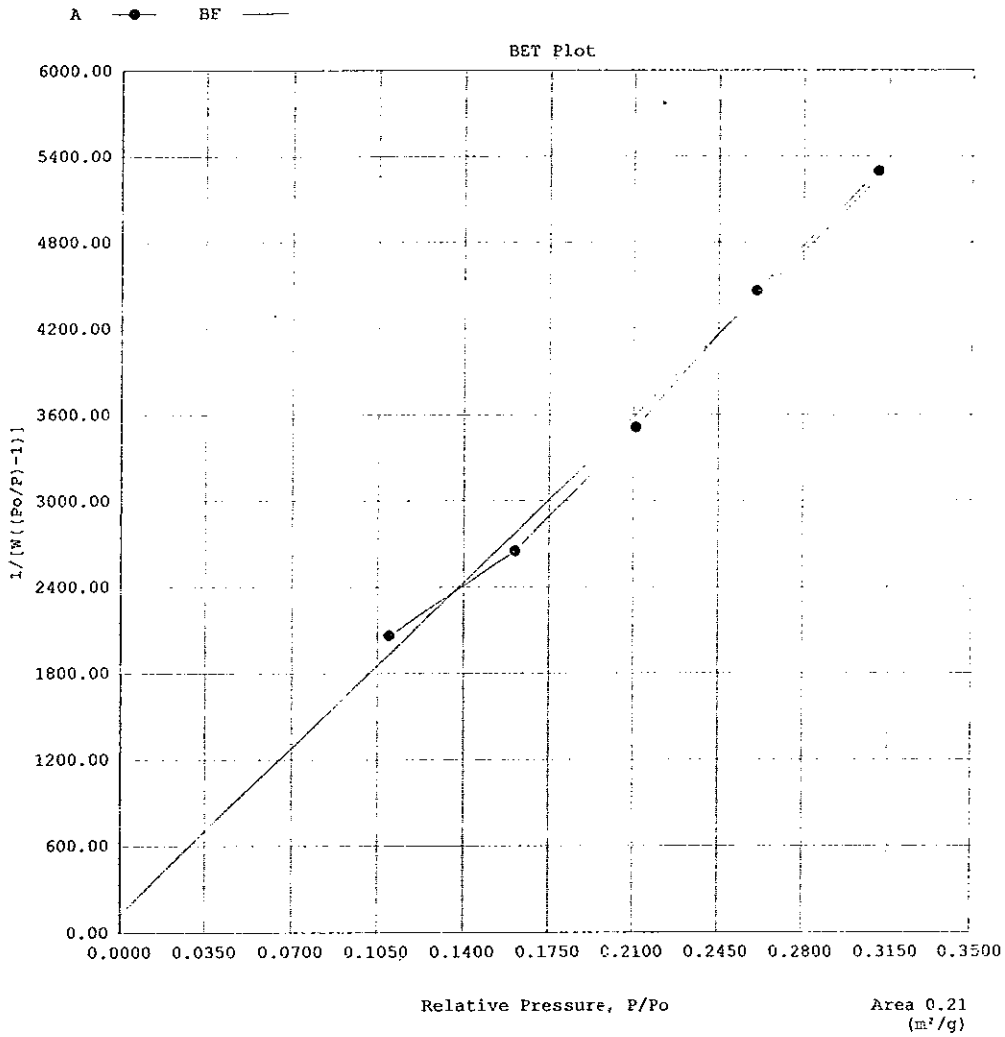
ภาคผนวก ข

ผลการตรวจวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธี BET

Date: 03/24/2000

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.19

Sample ID	ground shell				
Description	#9/2cell , run#1, 5 points				
Comments					
Sample Weight	1.0916 g	Outgas Temp	150.0 °C	Operator	Patarawan
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Time	24.0 hrs	Analysis Time	40.5 min
Cross-Sec Area	16.2 Å ² /molecule	P/Po Toler	3	End of Run	03/17/2000 13:41
NonIdeality	6.580E-05	Equil Time	3	File Name	S-2.RAW
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Bath Temp.	77.35		
Station #	1				

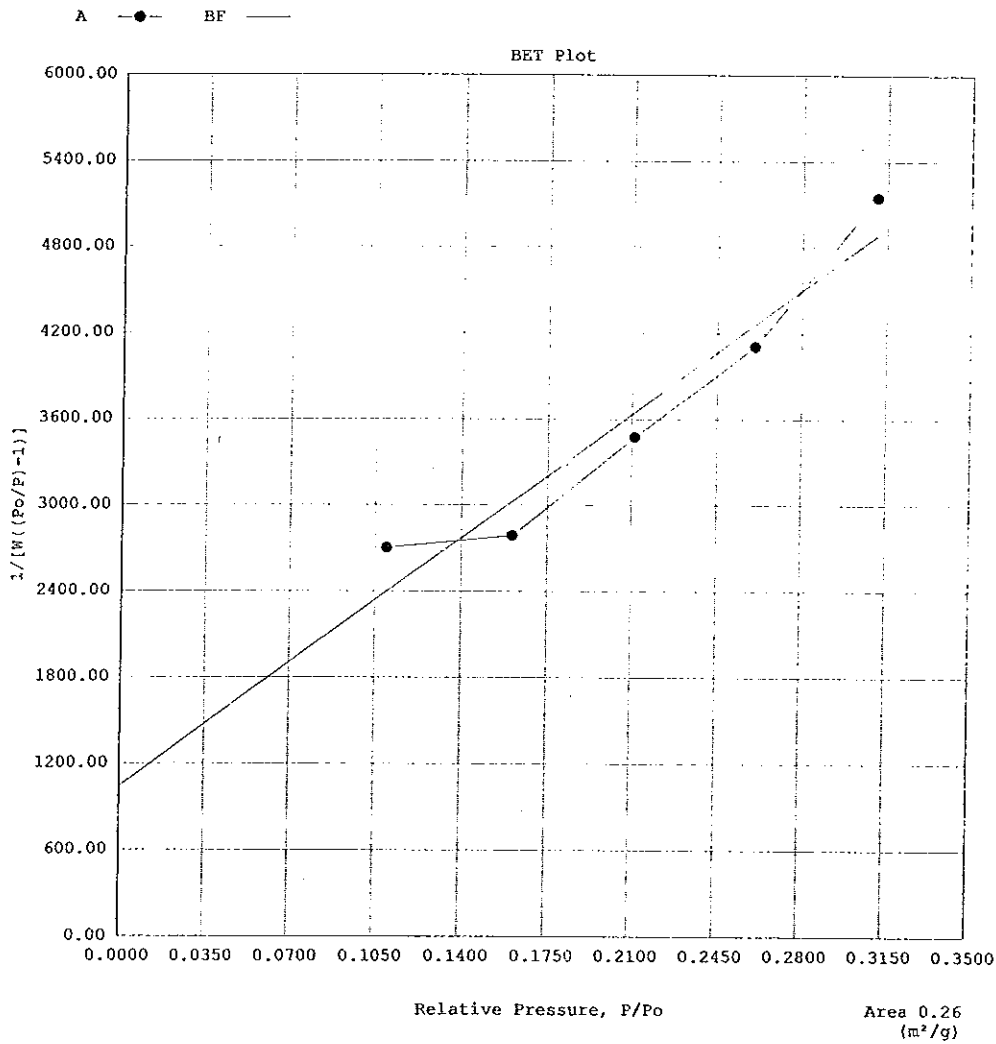


ภาพประกอบ ข-1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของเปลือกหอย ครั้งที่ 1

Date: 03/24/2000

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.19

Sample ID	ground shell				
Description	#9/2cell , run#1, 5 points				
Comments					
Sample Weight	1.0916 g				
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Temp	150.0 °C	Operator	Patarawan
Cross-Sec Area	16.2 Å ² /molecule	Outgas Time	24.0 hrs	Analysis Time	38.9 min
NonIdeality	6.580E-05	P/Po Toler	3	End of Run	03/17/2000 14:26
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Equil Time	3	File Name	S-3.RAW
Station #	1	Bath Temp.	77.35		

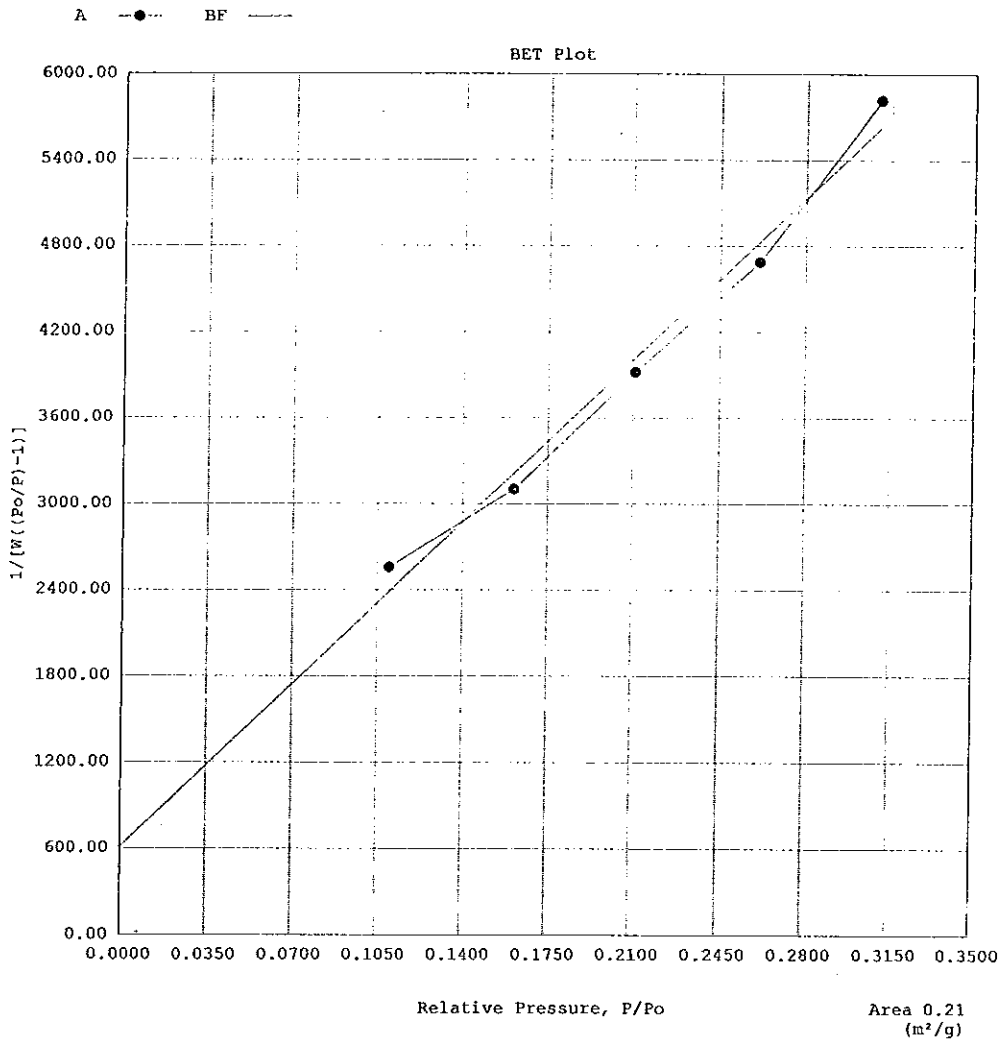


ภาพประกอบ ข-2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของเปลือกหอย ครั้งที่ 2

Date: 03/24/2000

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.19

Sample ID	ground shell				
Description	#9/2cell , run#1, 5 points				
Comments					
Sample Weight	1.0916 g				
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Temp	150.0 °C	Operator	Patarawan
Cross-Sec Area	16.2 Å ² /molecule	Outgas Time	24.0 hrs	Analysis Time	39.5 min
Nonideality	6.580E-05	P/Po Toler	3	End of Run	03/17/2000 17:03
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Equil Time	3	File Name	S-4.RAW
Station #	1	Bath Temp.	77.35		

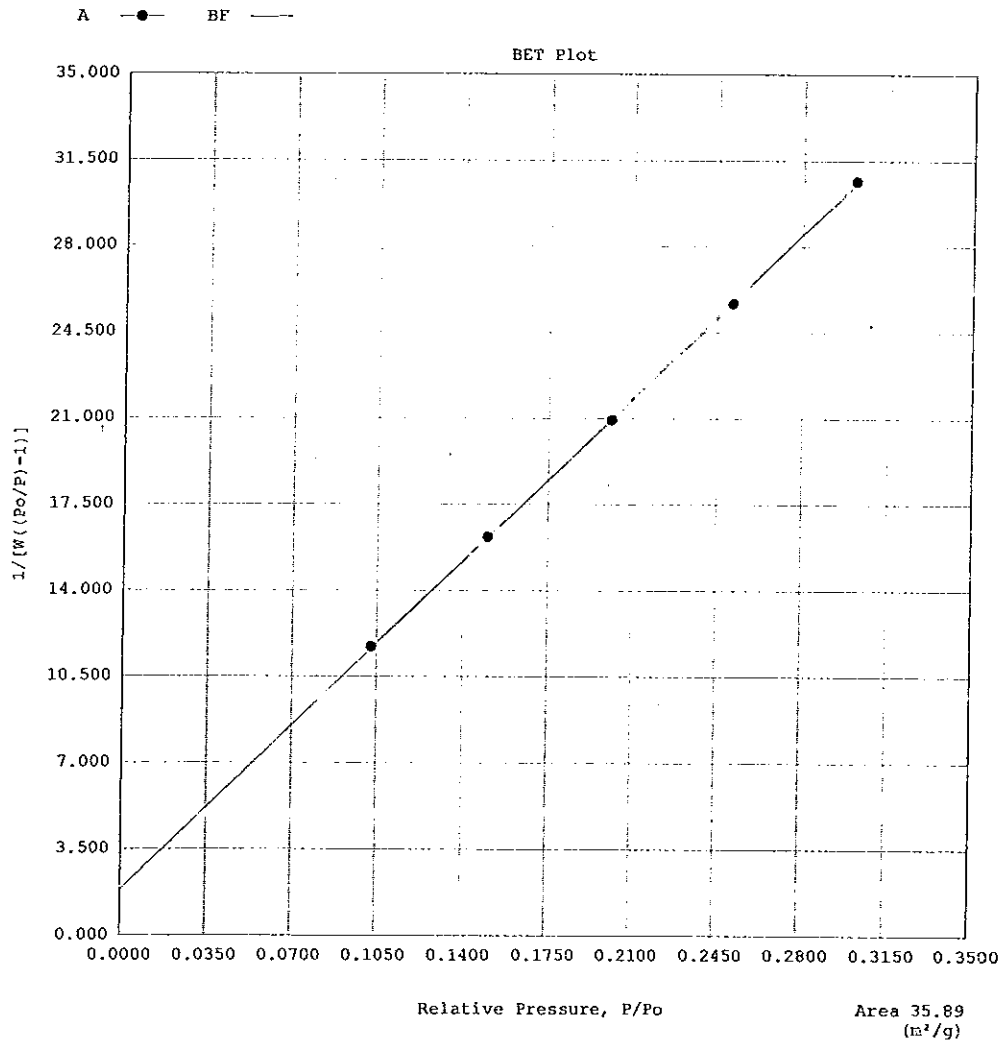


ภาพประกอบ ข-3 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของเปลือกหอย ครั้งที่ 3

Date: 03/24/2000

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.19

Sample ID	ground shell of crab				
Description	#9/2cell , run#1, 5 points				
Comments					
Sample Weight	0.6292 g	Outgas Temp	150.0 °C	Operator	Patarawan
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Time	24.0 hrs	Analysis Time	49.1 min
Cross-Sec Area	16.2 Å ² /molecule	P/Po Toler	3	End of Run	03/21/2000 10:36
NonIdeality	6.580E-05	Equil Time	3	File Name	C-1.RAW
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Bath Temp.	77.35		
Station #	1				

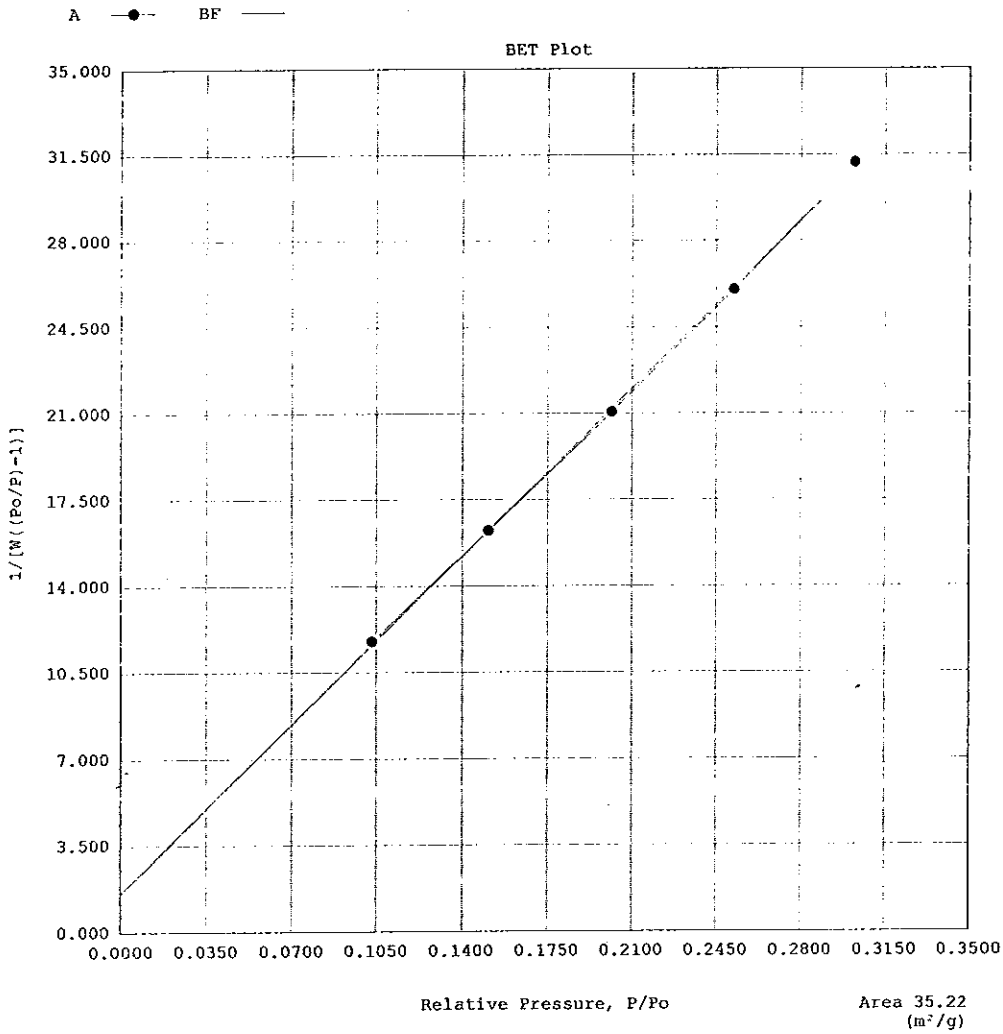


ภาพประกอบ ข-4 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของกระดองปู ครั้งที่ 1

Date: 03/24/2000

Quantachrome Corporation
 Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
 Autosorb for Windows® Version 1.19

Sample ID	ground shell of crab				
Description	#9/2cell , run#1, 5 points				
Comments					
Sample Weight	0.6292 g	Outgas Temp	150.0 °C	Operator	Patarawan
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Time	24.0 hrs	Analysis Time	46.5 min
Cross-Sec Area	16.2 Å ² /molecule	P/Po Toler	3	End of Run	03/21/2000 11:45
NonIdeality	6.580E-05	Equil Time	3	File Name	C-2.RAW
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Bath Temp.	77.35		
Station #	1				

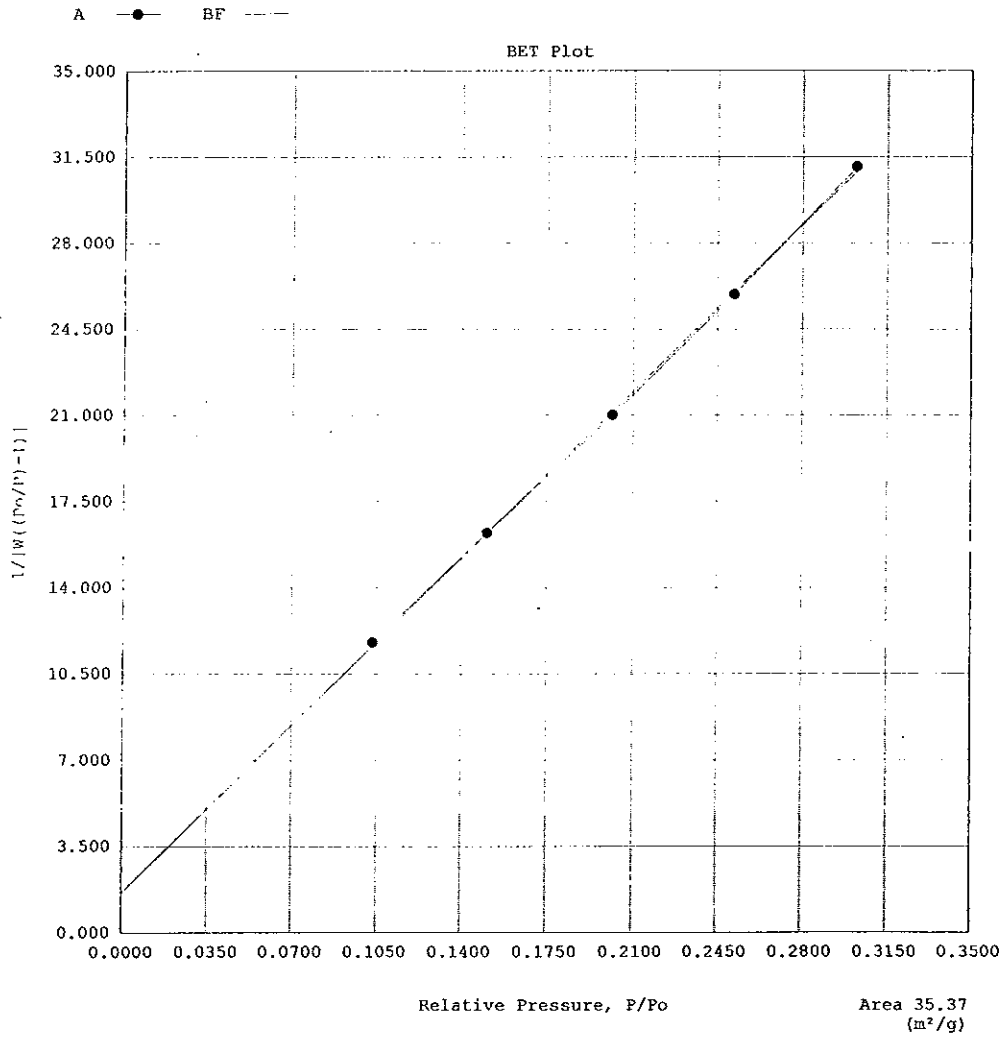


ภาพประกอบ ข-5 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของกระดองปู ครั้งที่ 2

Date: 03/24/2000

Quantachrome Corporation
 Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
 Autosorb for Windows® Version 1.19

Sample ID	ground shell of crab				
Description	#9/2cell , run#1, 5 points				
Comments					
Sample Weight	0.6292 g	Outgas Temp	150.0 °C	Operator	Patarawan
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Time	24.0 hrs	Analysis Time	47.0 min
Cross-Sec Area	16.2 Å ² /molecule	P/Po Toler	3	End of Run	03/21/2000 12:48
NonIdeality	6.580E-05	Equil Time	3	File Name	C-3.RAW
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Bath Temp.	77.35		
Station #	1				



ภาพประกอบ ข-6 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของกระดองปู ครั้งที่ 3

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการคำนวณปริมาตรของตัวดูดซับในคอลัมน์ และการนำไปใช้

การคำนวณปริมาตรของตัวดูดซับในคอลัมน์ และการนำไปใช้

การนำความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้น และปริมาตรบรรจุในคอลัมน์ (BV) ไปสร้างเป็น Breakthrough Curve จะใช้ประโยชน์จริงได้ทันที โดยไม่จำเป็นต้องรู้ขนาดคอลัมน์

Bed Volume (BV) = ปริมาตรของตัวดูดซับในคอลัมน์

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

4

เมื่อ d = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในคอลัมน์ (cm.)

h = ความสูงของตัวดูดซับในคอลัมน์ (cm.)

การคำนวณ

จากการทดลองคอลัมน์ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (d) 2.3 เซนติเมตร

ความสูงของตัวดูดซับ 4 เซนติเมตร

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

$$1 \text{ BV} = 0.016 \text{ ลิตร}$$

ค่ามาตรฐานตะกั่วในน้ำดื่มที่ยอมรับได้เท่ากับ 0.01 mg/l แต่น้ำตะกั่วปนเปื้อนที่นำมาใช้มีความเข้มข้นตะกั่วเท่ากับ 0.042 mg/l

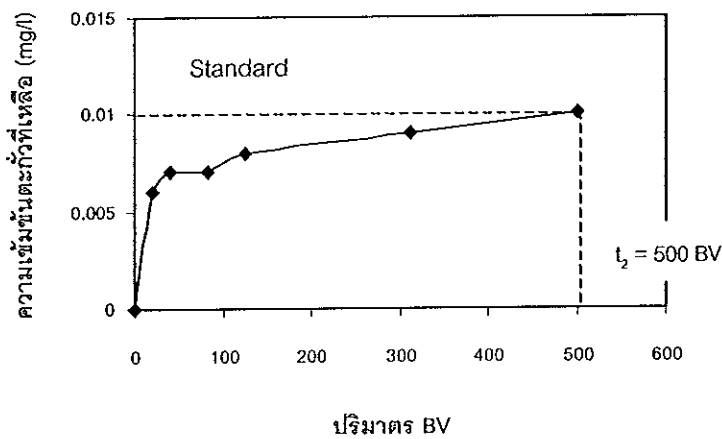
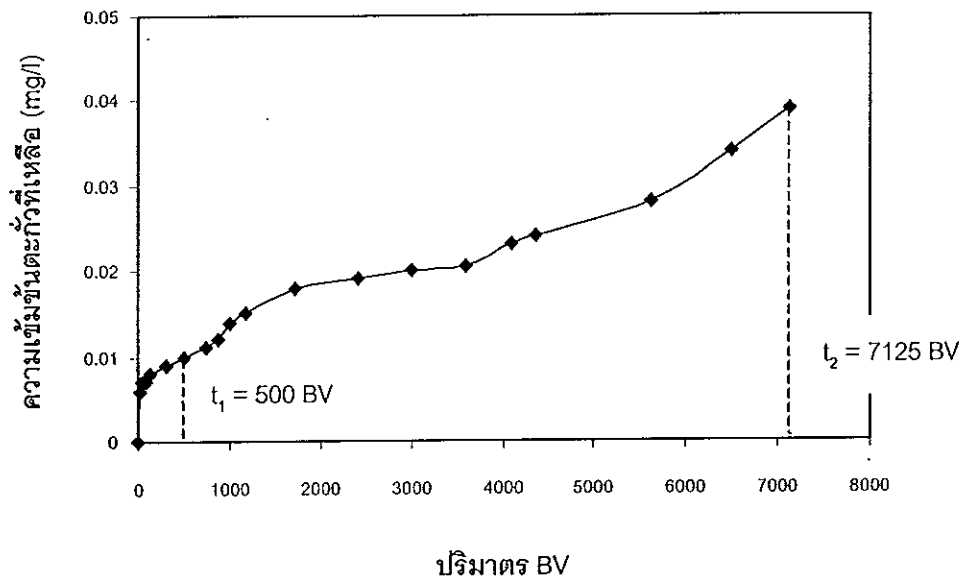
ดังนั้นกำหนดให้ t_1 คือ อายุการใช้งานของตัวดูดซับที่ทำให้น้ำกรองผ่านค่ามาตรฐานตะกั่ว ซึ่งเท่ากับ 500 BV หรือ ปริมาตรน้ำ 8 ลิตร

t_2 คือ อายุการใช้งานของตัวดูดซับที่ใช้งานจนหมดประสิทธิภาพซึ่งเท่ากับ 7,125 BV หรือ ปริมาตรน้ำ 114 ลิตร จากภาพประกอบ ค-1

อัตราเร็วของน้ำผ่านคอลัมน์เท่ากับ 2 ลิตรต่อชั่วโมง

$$\text{ดังนั้น } t_1 = 4 \text{ ชั่วโมง}$$

$$t_2 = 57 \text{ ชั่วโมง}$$



ภาพประกอบ ค-1 ตัวอย่างการคำนวณปริมาตรกระดองปูในคอลัมน์ และการนำไปใช้

ตัวอย่าง สมมติว่าชาวบ้านต้องการใช้คอลัมน์ที่มีปริมาตรกระดองปู 1 BV = 2 ลิตร ในการลดปริมาณตะกั่วในน้ำ ดังนั้นปริมาตรน้ำที่ผ่านค่ามาตรฐานตะกั่วจากคอลัมน์นี้มีค่า

$2 \times 500 = 1,000$ ลิตร หากชาวบ้านใช้อัตราเร็วของน้ำผ่านคอลัมน์ เท่ากับ 1.5 ลิตรต่อชั่วโมง

เพราะฉะนั้น ใช้เวลาเป็น $\frac{1000 \text{ ลิตร}}{1.5 \text{ ลิตรต่อชั่วโมง}} = 667$ ชั่วโมง

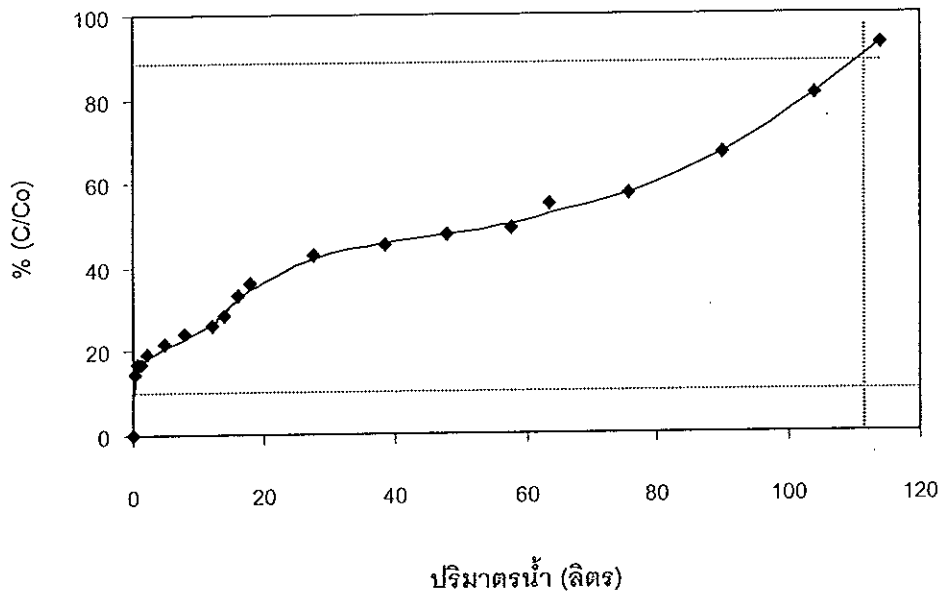
1.5 ลิตรต่อชั่วโมง

นั่นคือ อายุการใช้งานของกระดองปู ประมาณ 667 ชั่วโมง หรือกรองน้ำได้ 1,000 ลิตร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.042 mg/l โดยที่ปริมาณตะกั่วในน้ำที่ผ่านคอลัมน์ไม่เกินค่ามาตรฐาน

ภาคผนวก ง

ตัวอย่างการคำนวณความสามารถในการดูดซับแบบต่อเนื่อง

ตัวอย่างการคำนวณความสามารถในการดูดซับแบบต่อเนื่อง



ภาพประกอบ ง-1 ตัวอย่างการคำนวณความสามารถการดูดซับแบบต่อเนื่อง

การคำนวณ (Vermeulen, *et al.*, 1973)

$$\begin{aligned}
 \text{Adsorption Capacity} &= \text{พื้นที่เหนือเส้นกราฟ} \\
 &= 1/2 \times 110 \text{ ลิตร} \times (80/100) \\
 &= 44 \text{ ลิตร} \times 0.042 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร} = 1.848 \text{ มิลลิกรัม}
 \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้น Adsorption Capacity = 1.848 มิลลิกรัม

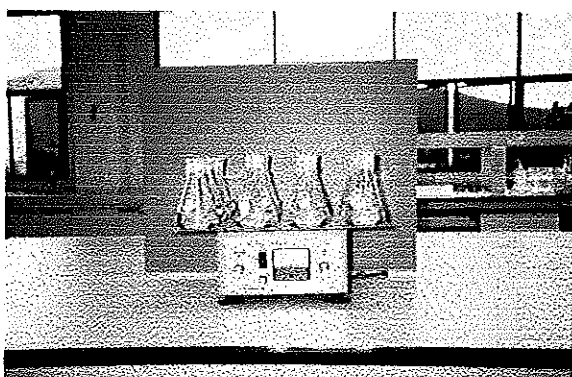
กระดองปู 10 กรัม มีความสามารถดูดซับตะกั่วได้ 1.848 มิลลิกรัม

ดังนั้น กระดองปู 1 กรัม จะมีความสามารถดูดซับตะกั่วได้ 0.18 มิลลิกรัม

ภาคผนวก จ

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและวิเคราะห์

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและวิเคราะห์



ภาพประกอบ ๑-1 เครื่องเขย่า (Shaker) ในการทดสอบแบบไม่ต่อเนื่อง



ภาพประกอบ ๑-2 เครื่องสตรippingโพเทนชิโอมิเตอร์ (Stripping Potentiometer)

ภาคผนวก ข

ผลงานที่ได้รับเผยแพร่จากวิทยานิพนธ์

สมาคมวิศวกรรม

การประชุมวิชาการประจำปี 2000

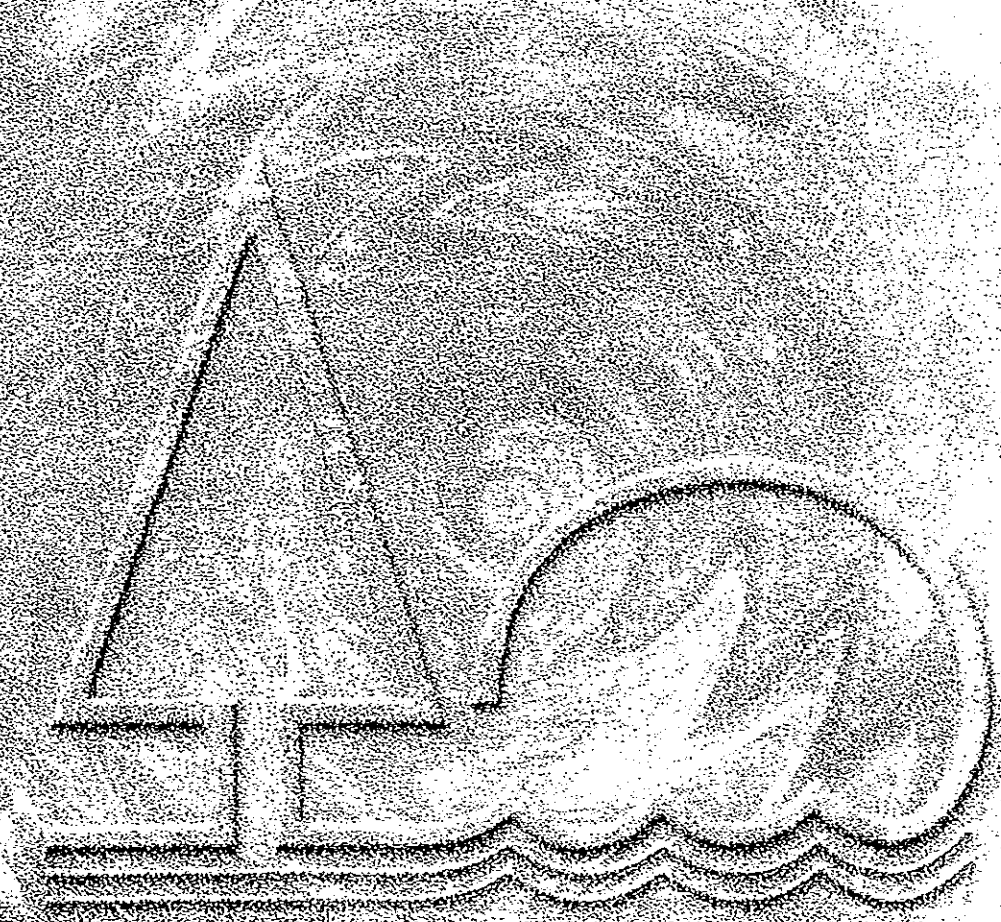
ครั้งที่ 12

ฉบับที่ 43

EEAT 2000

12th NATIONAL ANNUAL CONFERENCE 2000

MAY 11-12, 2000



จัดโดย

สมาคมวิศวกรรม
 ENVIRONMENTAL ENGINEERING ASSOCIATION OF THAILAND

Miller-Freeman
 Association of Engineers & Technicians

การศึกษาการดูดซับตะกั่วโดยสารดูดซับที่เตรียมจากกระดองปูและเปลือกหอยแครง

พิษณุ บุญนวล * สิริชื่น ตะนุสะ ** สุรพล อารีย์กุล * และ กัลยาณี ภูปตานนท์*

บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับตะกั่วของสารดูดซับที่เตรียมจากกระดองปูและเปลือกหอยแครง ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ที่หาได้ง่าย สารดูดซับที่เตรียมมี 8 ชนิด ซึ่งแตกต่างกันไปตามประเภทวัสดุ ขนาดเม็ด และชนิดของสารที่ใช้กระตุ้น จากการศึกษาพบว่าสารดูดซับที่เตรียมจากกระดองปูขนาด 16x80 เมช แล้วใช้ในสารละลายกรดเกลือ จะมีคุณสมบัติเป็นสารดูดซับที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสารดูดซับที่เตรียมจากวัสดุหรือด้วยสารกระตุ้นอื่นๆ จากกราฟของ Freundlich isotherm พบว่าค่าคงที่ของอัตราการดูดซับมีค่า 1,050 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมของสารดูดซับ จากการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ของสารดูดซับโดยใช้น้ำปนเปื้อนตะกั่วจากเหมืองดีบุก-ตะกั่วร้างที่ตำบลถ้ำทะลุ อำเภอบันนังสตา จังหวัดยะลา ซึ่งมีความเข้มข้นของตะกั่ว 0.042 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าคอลัมน์ที่ทดสอบสามารถใช้กับน้ำปนเปื้อนได้มากถึงปริมาณ 500 เท่าของปริมาตรบรรจุของคอลัมน์ก่อนที่ค่าความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำที่ผ่านคอลัมน์จะขึ้นสูงถึง 0.01 มิลลิกรัม ต่อลิตร ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานน้ำดื่มที่หน่วยงานองค์การอนามัยโลกกำหนดไว้ ทั้งนี้ความสามารถเต็มของคอลัมน์สามารถใช้กับน้ำปนเปื้อนได้สูงถึง 7,125 เท่าของปริมาตรคอลัมน์

Abstract

The purpose of this research is to study the capability of lead adsorption of adsorbents prepared from crabshell and cockle shell which are residual materials available locally. Eight types of adsorbents were studied which differs in type of raw materials, size and activating chemicals used. Among the adsorbents tested, an adsorbent prepared from crabshell, which was crushed and sized to 16x80 mesh and treated with hydrochloric acid, was found to be the best for lead adsorption. The adsorption constant from Freundlich adsorption isotherm was found to be 1,050 milligram lead per gram adsorbent. Continuous adsorption test for the adsorbent has been performed using lead-contaminated water containing 0.042 mg/L of lead collected from an abandon lead-tin mine at Tambon Tam Thalu, Bannangstar District in Yala Province. The column could treat the contaminated water up to 500 bedvolumes before the concentration in the effluent was above 0.01 mg/L which was the standard for drinking water set by the WHO. However, the overall capacity of the column was found to be up to 7,125 bedvolumes.

Key words : Lead, adsorbent, crab shell, column adsorption

* คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา

** คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา

คำนำ

ปัญหาการปนเปื้อนของตะกั่วในแหล่งน้ำดื่มที่ใช้มีการรายงานไว้หลายแห่งด้วยกัน เช่นน้ำพุร้อน สันตจิตูมิ และคณะ[1] ศึกษาปริมาณโลหะหนักในน้ำบริเวณปากแม่น้ำรอบอ่าวไทย 17 สาย และคลองอีก 2 สาย พบว่ามีปริมาณตะกั่วที่บริเวณปากแม่น้ำปราณบุรี แม่น้ำบางปะกง แม่น้ำตราด แม่น้ำประแส และแม่น้ำปิตตานี สูง 0.06 – 0.11 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่แม่น้ำปิตตานีมีตะกั่วสูงถึง 0.11 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่ค่ามาตรฐานตะกั่วในแหล่งน้ำตามมาตรฐานขององค์การอนามัยโลกไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร[2] ณรงค์ ฅ เชียงใหม่[3] ศึกษาคุณภาพแหล่งน้ำภาคใต้ โดยเก็บตัวอย่างจากแม่น้ำ 13 สาย พบว่าปริมาณตะกั่วในตัวอย่างน้ำจากแม่น้ำปิตตานีที่บริเวณโรงสูบน้ำการประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดยะลา มีค่าสูงถึง 0.07 มิลลิกรัมต่อลิตร อตัน ทีเตอร์ และคณะ[4] ศึกษาปริมาณตะกั่วในเลือดของเด็กนักเรียนอายุ 6 – 15 ปี ในพื้นที่ลุ่มน้ำปิตตานี พบว่านักเรียนโรงเรียนบ้านถ้ำทะเลที่อยู่ใกล้บริเวณเหมืองแร่คิบุกปนตะกั่วร้างในตำบลถ้ำทะเล อำเภอบันนังสตา จังหวัดยะลา มีระดับตะกั่วในเลือดสูงที่สุด และรองลงมาคือของนักเรียนในโรงเรียนเทศบาล 3 อำเภอเมือง จังหวัดปิตตานี ซึ่งตั้งอยู่ใกล้ตู้ต่อเรือที่มีการใช้ Pb_3O_4 ทั้งนี้พบว่ามากกว่า 95% ของนักเรียนในทั้ง 2 โรงเรียน มีปริมาณตะกั่วในเลือดสูงกว่าค่ามาตรฐานขององค์การอนามัยโลก คือมากกว่า 10 ไมโครกรัมต่อเดซิลิตร[4] โดยที่จำนวนนักเรียนที่มีปริมาณตะกั่วในเลือดสูงกว่า 20 ไมโครกรัมต่อเดซิลิตรในโรงเรียนบ้านถ้ำทะเลมีสูงถึง 24% และของโรงเรียนเทศบาล 3 มี 9.8% ซึ่งเป็นเรื่องที่น่าเป็นห่วงอย่างยิ่ง เพราะสารตะกั่วในปริมาณเพียงเล็กน้อยสามารถทำอันตรายต่อสมองและระบบประสาทของเด็ก ทำให้ IQ ของเด็กต่ำลง สูญเสียสมาธิ การทรงตัวไม่ดี และทำให้สมองเสื่อม และอาจเสียชีวิตในที่สุด (วรรณภา[5])

การจัดการแหล่งน้ำดื่มที่ใช้ที่ปลอดภัยให้แก่ประชาชนที่อยู่ในเขตที่มีการปนเปื้อนของตะกั่วสูง เช่นที่บริเวณลุ่มน้ำปิตตานี หรือบริเวณตำบลถ้ำทะเล และที่อื่น ๆ จึงมีความจำเป็น โดยต้องมีระบบบำบัดรวมเพื่อการลดปริมาณตะกั่วในน้ำให้อยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยต่อการอุปโภค หรือส่งเสริมชาวบ้านในพื้นที่ห่างไกลให้มีระบบบำบัดน้ำป็นเป็นขนาดครัวเรือน เช่นระบบที่ใช้กรอง โดยใช้สารกรองที่หาได้ง่ายจากวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่น เป็นต้น

งานวิจัยนี้จึงกำหนดเป้าหมายที่จะพัฒนาการเตรียมสารดูดซับที่หาได้จากวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่น สำหรับการนำมาใช้กรองน้ำที่มีตะกั่วปนเปื้อน ซึ่งวัสดุที่พิจารณาในการศึกษานี้คือกระดองปูม้า และเปลือกหอยแครง แล้วศึกษากลไกของการดูดซับตลอดจนศึกษาความสามารถของสารดูดซับที่เตรียมได้ โดยใช้น้ำปนเปื้อนสังเคราะห์ และน้ำปนเปื้อนตะกั่วที่เก็บจากแหล่งน้ำบ้านถ้ำทะเล จังหวัดยะลา

รูปของตะกั่วในน้ำ

ตะกั่วในน้ำจะอยู่ในรูปต่าง ๆ กัน คือ Pb^{2+} , $PbOH^+$, $Pb(OH)_2^0$ aq, และ $HPbO_2^-$ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของน้ำ (รูปที่ 1 ประกอบ) และขึ้นอยู่กับอิออนอื่น ๆ ที่มีอยู่ในน้ำ เช่น HCO_3^- , CO_3^{2-} (รูปที่ 2 ประกอบ) โดยเมื่อรวมกับตะกั่วแล้วจะอยู่ในรูปของของแข็ง $PbCO_3$ ในช่วงค่าพีเอช 6.3 – 10 หรือในรูปอิออน $Pb(CO_3)_2^{2-}$ ที่พีเอชสูงกว่า 10 (รูปที่ 3 ประกอบ)

การศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาในเรื่องการบำบัดน้ำปนเปื้อนตะกั่ว โดยกระบวนการดูดซับที่ผ่านมา มีนักวิจัยหลายท่านให้ความสนใจต่อเนื่องกันมา โดยเน้นที่การนำวัสดุต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับ อาทิเช่น ใช้เปลือกหอยแครง ช้างข้าวโพด และขี้เลื่อย (Kumar และ Dara[6] และ Odozi และคณะ[7]) เปลือกเมล็ดแคงโม (Okimen และ Onyenikpa[8]) ปะการังเผา (Shiina[9]) และปะการังบดละเอียดขนาด 200 – 400 เมช (Suzuki [10]) เป็นต้น ผลงานศึกษาของ Shiina และ Suzuki นั้นต่างพบว่าสามารถใช้ปะการังซึ่งเป็นวัสดุกลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวดูดซับตะกั่วจากน้ำปนเปื้อนได้ดีมาก โดยสามารถ

กำจัดได้ถึง 93 – 99% นอกจากนี้ยังมีผู้ทดลองนำจุลชีพ (microbial) มาใช้ในการดูดซับตะกั่วด้วยเช่นกัน โดยใช้จุลชีพที่เรียกว่า *Z. ramigeracells* (Sag and Kutsal[11])

Lee และคณะ[12,13] เป็นอีกกลุ่มหนึ่งที่น่าวัสดุกลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนตมาใช้เป็นตัวดูดซับตะกั่ว โดยนำวัสดุเหลือใช้ในห้องถิ่นคือกระดองปู และสรุปว่าตะกั่วถูกดูดซับด้วยการทำปฏิกิริยากับไอออนคาร์บอเนตกลายเป็นตะกอนของคาร์บอเนต $Pb_3(CO_3)_2(OH)_2$ และกลับไปเกาะผิวกระดองปูที่บริเวณที่มีสารโคติน

การเตรียมสารดูดซับจากกระดองปูม้า และเปลือกหอยแครง

การเตรียมสารดูดซับมีขั้นตอนการเตรียมที่ค่อนข้างง่ายดังนี้

- ก. ล้างกระดองปู หรือเปลือกหอยแครงด้วยน้ำสะอาดแล้วแช่ในสารละลาย 10% H_2O_2 เพื่อให้สะอาดยิ่งขึ้น และเพื่อกำจัดกลิ่น และสารอินทรีย์ แล้วล้างด้วยน้ำสะอาดอีกหลาย ๆ ครั้ง จากนั้นจึงทำให้แห้ง และบดละเอียดแล้วคัดขนาดเป็น 2 กลุ่ม คือ ขนาด 8 x 16 เมช (1.190 – 2.380 มิลลิเมตร) และขนาด 16 x 80 เมช (0.177 – 1.190 มิลลิเมตร)
- ข. นำกระดองปูหรือเปลือกหอยแครงแต่ละขนาดมาแช่ในกรดนาน 1 ชั่วโมง โดยในการวิจัยนี้แยกศึกษาการใช้กรด 2 ชนิด คือ กรดเกลือ (HCl) 5% และน้ำส้มสายชู (CH_3COOH) 5% เพื่อศึกษาเปรียบเทียบกัน
- ค. ล้างด้วยน้ำสะอาดหลาย ๆ ครั้งจนกว่าพีเอชของน้ำล้างสูงกว่า 7 แล้วนำมาอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง

ลักษณะและองค์ประกอบทางเคมีของตัวดูดซับที่เตรียมได้

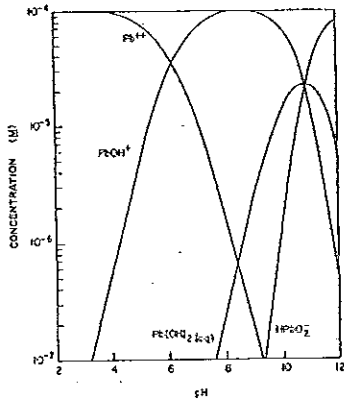
สารดูดซับที่ทำจากกระดองปูมีลักษณะที่เป็นรูพรุนกระจายอยู่ทั่วไปค่อนข้างมาก ซึ่งต่างจากสารดูดซับที่เตรียมจากเปลือกหอยแครงที่ไม่เห็นรูพรุนมากนัก (ดูรูปที่ 4-5) ทั้งนี้ผลการตรวจวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area, BET) ยิ่งชี้ให้เห็นเด่นชัดขึ้น โดยสารดูดซับที่เตรียมจากกระดองปูโดยแช่ในกรดเกลือมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงถึง 35.49 ตารางเมตรต่อกรัม ในขณะที่ของที่เตรียมจากเปลือกหอยแครงมีพื้นที่ผิวจำเพาะเพียง 0.23 ตารางเมตรต่อกรัมเท่านั้น

ผลการตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) นั้นยืนยันว่าองค์ประกอบทางเคมีของสารดูดซับที่เตรียมได้จากกระดองปูประกอบด้วยสารแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวหลักและจากการตรวจด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) แล้วพบแถบดูดกลืนของ -OH (พีคที่ 3434) และแถบดูดกลืนของ -NHCOH (พีคที่ 1658) ซึ่งแสดงว่ามีกลุ่มของสารโคติน (Chitin) ประกอบอยู่ด้วยซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Lee [12,13]

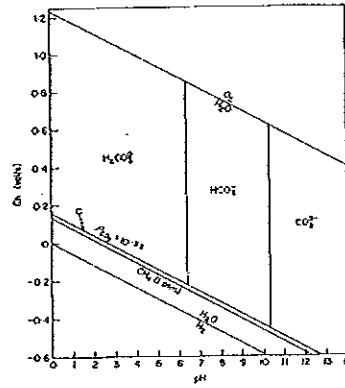
การทดสอบการดูดซับและไอโซเทอร์มของการดูดซับตะกั่ว

การศึกษาเบื้องต้นเพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับตะกั่วของตัวดูดซับที่เตรียมได้ ทำโดยการนำสารดูดซับปริมาณหนึ่งมาเขย่ากับน้ำปนเปื้อนตะกั่วสังเคราะห์ในขวดรูปชมพู่ 250 มิลลิลิตร โดยเตรียมน้ำปนเปื้อนที่มีตะกั่ว 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าพีเอชของน้ำปนเปื้อนเท่ากับ 5.5 (ดูผลในตารางที่ 1)

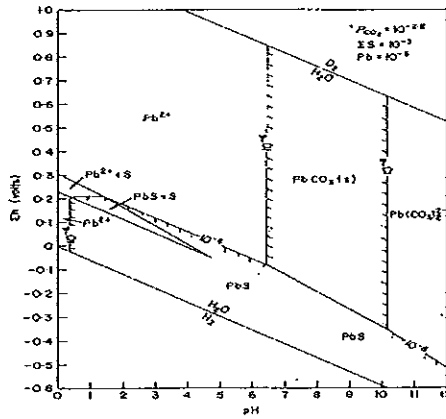
จะเห็นได้จากตารางที่ 1 ว่า ค่าพีเอชหลังจากการดูดซับแล้วเพิ่มสูงขึ้นจาก 5.5 ไปเป็นประมาณ 8.8-9.3 ในช่วงเวลาเพียง 20 นาที และสามารถกำจัดตะกั่วได้สูงในระดับ 80% ได้ และเพิ่มขึ้นไปอีกไม่มากนักจนถึงระดับ 90% เมื่อเขย่านานขึ้นถึง 600 นาที



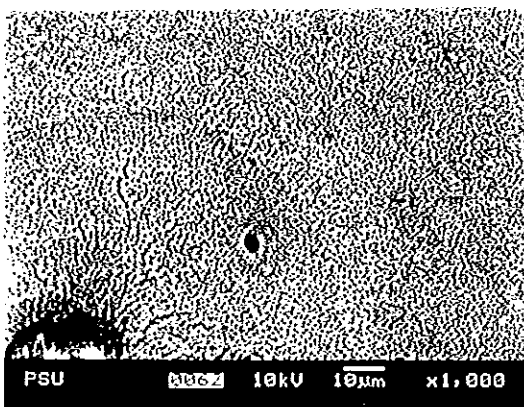
รูปที่ 1 รูปของตะกั่วในน้ำที่ค่าพีเอชต่าง ๆ (ความเข้มข้นของตะกั่ว $1 \times 10^{-4} \text{ M}$)
ที่มา Fuerstenau and Palmer[14]



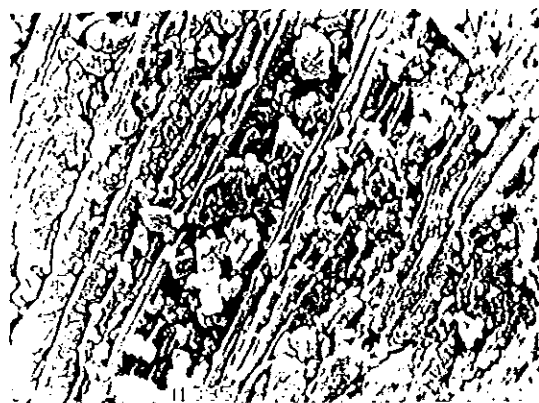
รูปที่ 2 โคออะแกรม Eh - pH ของคาร์บอนในน้ำ
ที่มา Rose, et.al [15]



รูปที่ 3 โคออะแกรม Eh - pH ของตะกั่ว ในระบบ Pb-O-H-S-C
ที่มา Rose, et.al [15]



รูปที่ 4 ภาพถ่าย SEM ของสารตะกั่วซัลไฟด์ที่เตรียมจาก
อะซิเตตตะกั่ว (ส่วนผิวด้านหลัง)



รูปที่ 5 ภาพถ่าย SEM ของสารตะกั่วซัลไฟด์ที่เตรียมจากอะซิเตต
ตะกั่ว

ตารางที่ 1 ผลการศึกษา % การกำจัดตะกั่วของสารดูดซับที่เตรียมได้ในการศึกษาเบื้องต้น

ชนิดตัวดูดซับ	ช่วงเวลาที่เขย่า (นาที)											
	20		40		60		120		300		600	
	pH	%R	pH	%R	PH	%R	pH	%R	pH	%R	pH	%R
กระดองปูกระตุ้นกรดเกลือ	8.9	89.2	8.9	90.9	8.9	91.9	8.9	92.6	8.9	93.3	8.7	94.5
กระดองปูกระตุ้นน้ำส้มสายชู	9.3	83.2	9.4	84.8	9.4	86.7	9.4	88.7	9.4	91.3	9.2	91.7
เปลือกหอยกระตุ้นกรดเกลือ	8.9	79.9	9.0	84.8	9.0	86.8	9.0	88.2	8.9	88.9	8.5	89.3
เปลือกหอยกระตุ้นน้ำส้มสายชู	8.8	81.2	8.9	82.7	8.9	87.7	8.9	88.1	8.9	89.4	8.2	89.7

%R แทน %การกำจัดตะกั่ว (Lead Removal)

เมื่อทดลองต่อไปโดยเขย่าสารดูดซับในปริมาณต่าง ๆ กันในน้ำปนเปื้อนที่มีตะกั่วเจือปน 1 มิลลิกรัมต่อลิตรในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร นาน 1 ชั่วโมงแล้วนำผลไปเขียนไอโซเทอร์มการดูดซับตามสมการของ Freundlich (ดูรูปที่ 6 และ 7 ประกอบ) ซึ่งมีรูปสมการดังนี้

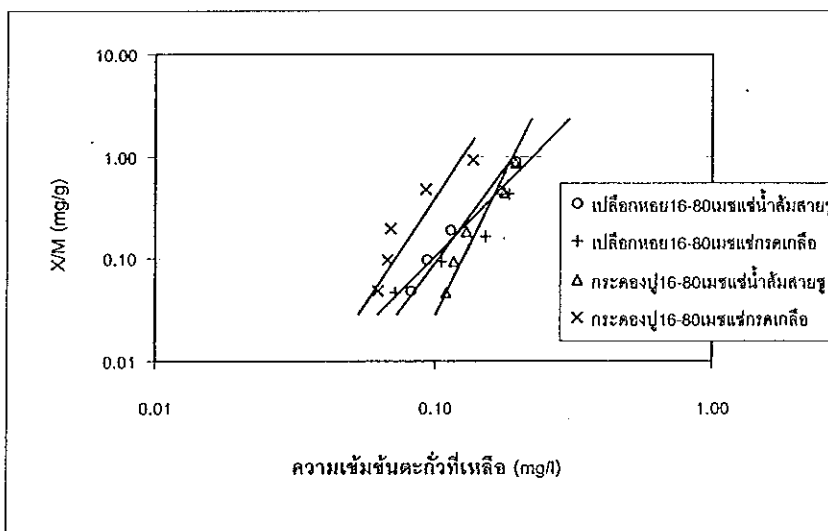
$$X/M = KC^{1/n}$$

เมื่อ K = ตัวคูณคงที่ แสดงถึงความสามารถในการดูดซับมีค่าเท่ากับค่า X/M ที่ C = 1

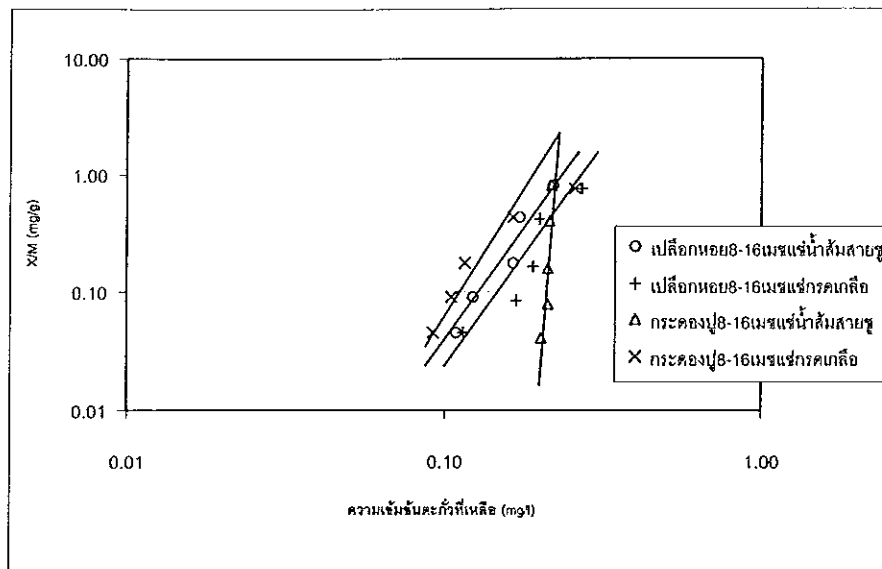
X/M = ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ

C = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่เหลือในน้ำหลังการดูดซับ

1/n = ความชันของเส้นกราฟซึ่งแสดงถึงระดับของการขึ้นต่อความเข้มข้นของสารปนเปื้อน (Degree of concentration dependent)



รูปที่ 6 ไอโซเทอร์มการดูดซับ (ตามสมการของ Freundlich) ของตัวดูดซับขนาด 16 x 80 เมษ



รูปที่ 7 ไอโซเทอร์มการดูดซับ (ตามสมการของ Freundlich) ของตัวดูดซับขนาด 8 x 16 เมช

จากรูปที่ 6 และ 7 สามารถวัดค่าพารามิเตอร์ของไอโซเทอร์มการดูดซับตามสมการของ Freundlich ได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 2 ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบสารดูดซับขนาดเดียวกัน (ขนาด 16x80 เมช) สำหรับกระดองปูแล้วจะเห็นว่าการกระตุ้นด้วยกรดเกลือจะได้สารดูดซับที่ดีกว่ากระตุ้นด้วยน้ำส้มสายชู โดยที่มีค่า K สูงถึง 1,050 และค่าความชัน (1/n) ยังต่ำกว่าอีกด้วย จึงสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีกว่าทุกช่วงความเข้มข้นของตะกั่ว สำหรับกระดองปูมีขนาดที่หยาบกว่าคือ 8 x 16 เมช นั้นตำแหน่งเส้นกราฟก็แสดงว่าปริมาณการดูดซับ (X/M) ของกระดองปูที่แช่กรดเกลือจะสูงกว่าของที่แช่น้ำส้มสายชู และค่า 1/n ของที่แช่น้ำส้มสายชูค่อนข้างสูงมาก แสดงถึงการมีขีดจำกัดในความสามารถดูดซับที่ต่ำมากในช่วงค่าความเข้มข้นต่ำ

อย่างไรก็ตามในกรณีของสารดูดซับที่เตรียมจากเปลือกหอยแครงนั้นค่อนข้างจะต่างกับกรณีที่เตรียมจากกระดองปู โดยตำแหน่งของเส้นกราฟจะค่อนข้างใกล้เคียงกันแต่เปลือกหอยที่แช่ด้วยน้ำส้มสายชูจะได้ค่า K ที่สูงกว่า แต่ค่า 1/n ก็สูงกว่าด้วย (สำหรับขนาด 16 x 80 เมช) ซึ่งจะทำให้ปริมาณการดูดซับของสารดูดซับที่เตรียมโดยแช่ในกรดเกลือกลับสูงกว่าในช่วงความเข้มข้นต่ำ ๆ

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเปลือกหอยและกระดองปูขนาด 16 x 80 เมช แล้วจะเห็นได้ว่าตำแหน่งกราฟของสารดูดซับที่เตรียมจากกระดองปูในช่วงความเข้มข้นของตะกั่วที่ศึกษานั้น จะดีกว่าที่เตรียมจากเปลือกหอย โดยมีค่า K สูงกว่ามาก และปริมาณการดูดซับ (X/M) สูงกว่าด้วย แต่ที่น่าสนใจคือค่าความชันหรือ 1/n ของสารดูดซับที่เตรียมจากกระดองปูจะสูงกว่าของที่เตรียมจากเปลือกหอยนั่นคือในช่วงความเข้มข้นต่ำ ๆ ความสามารถในการดูดซับ (X/M หรือ Loading) ของสารดูดซับที่เตรียมจากเปลือกหอยกลับจะสูงกว่า อย่างไรก็ตามในการศึกษาครั้งนี้ได้นำสารดูดซับที่เตรียมจากกระดองปูแช่ในกรดเกลือขนาด 16 x 80 เมช ไปใช้ศึกษาในขั้นต่อไป

กลไกการดูดซับตะกั่ว

เพื่อศึกษากลไกของการดูดซับตะกั่วของสารดูดซับ จึงนำสารดูดซับที่เตรียมจากกระดองปูขนาด 16 x 80 เมช ที่แช่ในกรดเกลือมาเข้าในสารละลายตะกั่วความเข้มข้น 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วนำกระดองปูที่ผ่านการดูดซับตะกั่วแล้วไปวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractometer (XRD) ถ่ายรูปด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) และวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่อง EDS (Energy Dispersive Spectrometer)

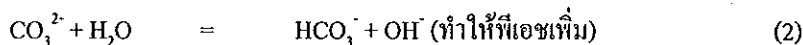
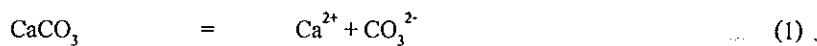
ผลการตรวจด้วย XRD และ EDS พบว่าตะกั่วถูกจับอยู่ในรูปของตะกั่วคาร์บอเนต ($PbCO_3 \cdot 2H_2O$) ซึ่งค่อนข้างตรงกับผลของ Lee และคณะ [12,13] ทั้งนี้จะเห็นได้ชัดในรูปถ่าย SEM ในรูปที่ 8 ซึ่งจะเห็นผลึกตะกั่วคาร์บอเนตคล้าย ๆ ผลึกแร่ตะกั่วคาร์บอเนตหรือเซอร์ไซต์ (Cerussite) ขนาดเล็ก ๆ (1-2 ไมโครเมตร) กระจายเกาะอยู่ตามผิวของกระดองปูอย่างหลวม ๆ ซึ่งดูเหมือนว่าผลึกเหล่านี้เกิดที่ชั้นน้ำนอกผิวกระดองปู แล้วกลับมาเกาะติดกับกระดองปู ทั้งนี้ยังมีบางส่วน (รูปที่ 8 b) ที่แสดงถึงการก่อเกิดผลึกและโตขึ้นมาจากส่วนของกระดองปูโดยตรง

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของไอโซเทอร์มการดูดซับตะกั่วตามสมการของ Freundlich

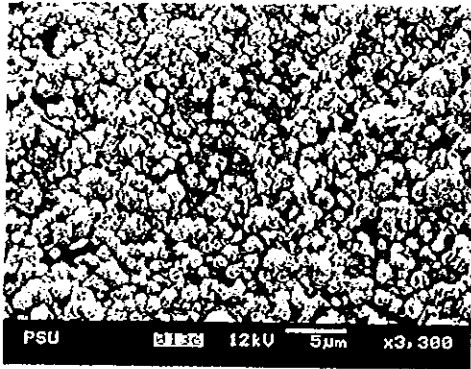
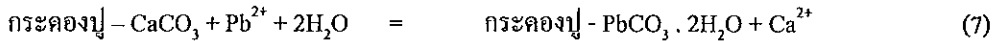
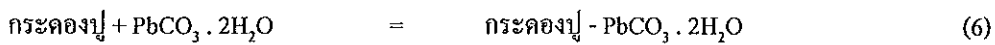
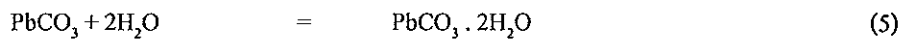
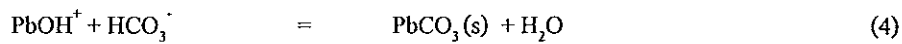
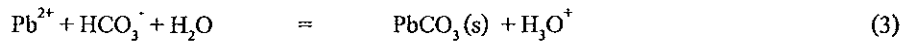
ขนาด	กรรกระดุน	ค่าคงที่	เปลือกหอย	กระดองปู
16-80 เมช	กรรเกล็ด	1/n	2.58	3.61
		K	20.9	1050
	น้ำส้มสายชู	1/n	3.34	4.64
		K	113	810
8-16 เมช	กรรเกล็ด	1/n	3.66	3.67
		K	66.4	100
	น้ำส้มสายชู	1/n	4.24	36.5
		K	348	-

จากข้อมูลที่สารดูดซับทำให้ค่าพีเอชของน้ำปนเปื้อนตะกั่วสูงขึ้นไปอยู่ในช่วง 8 – 10 ซึ่งเป็นช่วงที่ตะกั่วละลายอยู่ในน้ำในรูปของ $PbOH^+$ เป็นส่วนใหญ่ และรองลงมาคือ Pb^{2+} และมี $Pb(OH)_2(aq)$ บ้างเล็กน้อย (ดูรูปที่ 1) โดยที่ไอออนคาร์บอเนตจะอยู่ในรูป HCO_3^- (ดูรูปที่ 2) และสารประกอบตะกั่วคาร์บอเนตจะอยู่ในรูปของ $PbCO_3$ (solid) (ดูรูปที่ 3) ดังนั้นจึงพอจะสรุปกลไกของการดูดซับได้ดังนี้

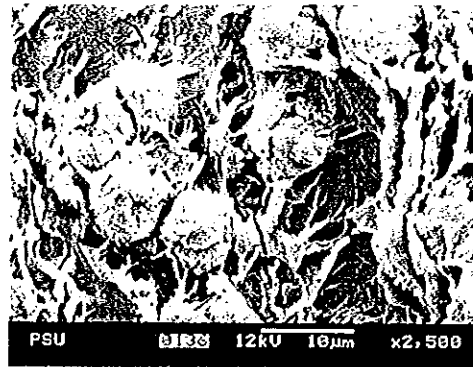
ก. $CaCO_3$ ละลายจากผิวของสารดูดซับไปทำให้ค่าพีเอชของน้ำสูงขึ้น จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าสารดูดซับที่เตรียมจากกระดองปูจะทำให้ค่าพีเอชขึ้นสูงได้เร็วกว่าและสูงกว่าที่ทำจากเปลือกหอยแครง (ไม่ได้แสดงข้อมูลในที่นี้) ทั้งนี้เพราะกระดองปูมีพื้นที่ผิวมากกว่าเปลือกหอยแครงหลายเท่าตัว อนึ่งผลของการละลายทำให้มีไอออน HCO_3^- อยู่ในน้ำ และมีปริมาณ HCO_3^- ค่อนข้างสูงในบริเวณใกล้กับผิวกระดองปู และลดต่ำลงในที่ที่ห่างจากผิวกระดองปูออกไป สมการเคมีที่เกี่ยวข้องคือ



ข. ไอออนของตะกั่วจับกับ HCO_3^- ที่มีค่อนข้างสูงในบริเวณใกล้ ๆ ผิวของกระดองปู กลายเป็นของแข็งของตะกั่วคาร์บอเนตที่มีน้ำปนบ้าง ($PbCO_3 \cdot 2H_2O$) แล้วกลับเข้าไปเกาะติดกับผิวของกระดองปูอย่างหลวม ๆ ซึ่งเข้าใจว่าจะไปเกาะในบริเวณที่มีสารไคติน ซึ่งมีกลุ่มของเอมีน ($-NH_2$) และคาร์บอกซิลิก ($COOH$) อยู่โดยที่ไฮโดรเจนในชั้นไฮเครตของของแข็งตะกั่วคาร์บอเนตเกาะยึดอย่างหลวมด้วยพันธะไฮโดรเจนกับสารไคติน โดยที่บางส่วนเกิดการจับตะกั่วโดยการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง Pb^{2+} กับ Ca^{2+} ที่ผิวของกระดองปูแล้วก่อเป็นผลึกโตขึ้นมาจากผิวกระดองปู ดังในรูปที่ 8b ทั้งนี้สมการเคมีที่น่าจะเกี่ยวข้องคือ



a



b

รูปที่ 8 ภาพถ่าย SEM ของกระดองปูที่ผ่านการดูดซับตะกั่วแล้ว

การศึกษาการดูดซับตะกั่วของกระดองปูแบบต่อเนื่อง

เพื่อศึกษาความสามารถในการนำไปใช้กรองน้ำปนเปื้อนตะกั่ว จึงทำการศึกษาแบบต่อเนื่องโดยการนำสารดูดซับที่เตรียมจากกระดองปูขนาด 16 x 80 เมช แขนในกรดเกลือมาทดสอบ โดยใช้คอลัมน์ที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 2.3 เซนติเมตร บรรจุสารดูดซับ 10 กรัม รวมความยาว 4 เซนติเมตร คิดเป็นปริมาตรบรรจุ (Bed Volume) 16 มิลลิลิตร ควบคุมอัตราการไหลของน้ำปนเปื้อนตะกั่วในอัตรา 1.2 ลิตรต่อนาที โดยทดลองกับน้ำปนเปื้อนตะกั่วสังเคราะห์ความเข้มข้นเริ่มต้น 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และได้แสดงผลในรูปของกราฟเบรคทูร์ (Breakthrough Curves) ในรูปที่ 9 โดยใช้หน่วยของปริมาตรน้ำที่ผ่านคอลัมน์เป็นหน่วย BV (Bed Volume) ซึ่งหมายถึง จำนวนเทียบเท่าของปริมาตรบรรจุของคอลัมน์ที่ใช้ ทั้งนี้เพราะเป็นหน่วยที่สามารถนำไปคำนวณใช้กับคอลัมน์ขนาดต่าง ๆ กันได้โดยตรง

จะเห็นจากกราฟเบรคทูร์ในรูปที่ 9 ซึ่งได้แสดงค่าที่เอชไว้ด้วยว่า ในช่วงแรกค่าที่เอชของน้ำจะขึ้นมาสูงมากถึง 8.9 แล้วจึงค่อย ๆ ลดลง ในขณะที่ค่าปริมาณเจือปนของตะกั่วในน้ำที่ผ่านคอลัมน์ค่อย ๆ สูงขึ้น ทั้งนี้เพราะพื้นที่ผิวของกระดองปูที่จะให้ CaCO_3 ละลายออกไปนั้นลดลงเนื่องจากการเกาะติดของ $\text{PbCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ บนผิวกระดองปู

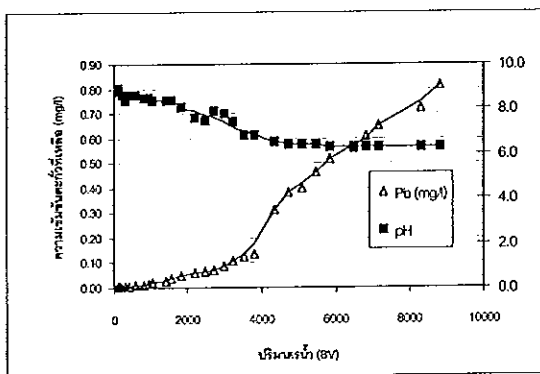
อนึ่งปรากฏการณ์ที่น่าสังเกตคือ เมื่อผ่านน้ำปนเปื้อนไปในปริมาณที่สูงมากแล้ว จนค่าที่เอชตกลงเหลือเพียง 6.3 ซึ่งเป็นค่าที่ตะกั่วคาร์บอเนต (PbCO_3 solid) เริ่มไม่เสถียร (รูปที่ 3) และไอออนของคาร์บอเนตที่ีเอชต่ำกว่า 6.3 จะเริ่มอยู่ในรูปของ H_2CO_3^0 แทนที่จะเป็น HCO_3^- (รูปที่ 2) ทำให้โอกาสที่ตะกั่วจะถูกจับในรูปของ PbCO_3 นั้นค่อนข้างน้อย แต่ผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าสารดูดซับยังทำหน้าที่ดูดซับตะกั่วได้ค่อนข้างสูง จากเหตุผลเหล่านี้จึงน่าจะเป็นเหตุผลสนับสนุนการกล่าวสรุปในหัวข้อที่ผ่านมาว่ามีกลไกการดูดซับตะกั่วโดยการแลกเปลี่ยนไอออนเกิดร่วมอยู่ด้วยเช่นกัน

เพื่อทดสอบการนำไปใช้กับแหล่งน้ำจริง ๆ จึงใช้คอลัมน์อย่างเดียวกันทดลองกับน้ำปนเปื้อนตะกั่วจากแหล่งน้ำจริง ณ บ้านถ้ำทะลุ ตำบลถ้ำทะลุ อำเภอบันนังสตา จังหวัดยะลา ที่มีปริมาณตะกั่วเจือปน 0.042 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสูงกว่ามาตรฐานน้ำดื่มที่ใช้ขององค์การอนามัยโลก โดยน้ำในแหล่งนี้มีค่าที่เอชสูงถึง 7.35 เพราะมีหลายช่วงของธารน้ำที่ไหลผ่าน

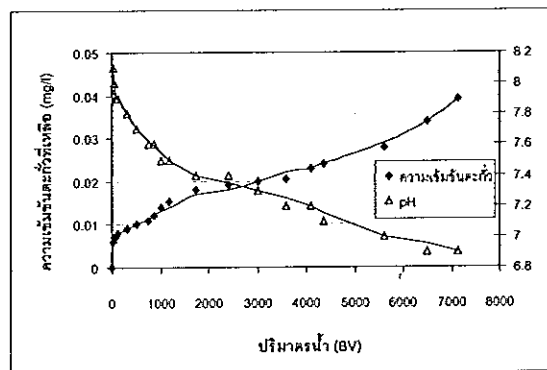
ภูเขาหินปูน จึงน่าจะทำให้พีเอชสูงขึ้นจากการละลายของ CaCO_3 และมีส่วนช่วยให้ตะกั่วที่เจือปนบางส่วนตกผลึก แยกตัวออกไปได้บ้าง

จากผลการศึกษาค้างแสดงในกราฟเบรคทรู ในรูปที่ 10 จะเห็นว่าเราสามารถใส่สารดูดซับที่เตรียมจากกระดูกงูแช่กรดเกลือขนาด 16×80 เมช บำบัดน้ำปนเปื้อนตะกั่ว ที่บ้านถ้ำทะเลได้ โดยบำบัดน้ำได้เป็นปริมาตรสูงถึง 500 เท่าของปริมาตรบรรจุของคอลัมน์ก่อนที่น้ำที่ผ่านคอลัมน์จะมีปริมาณเจือปนของตะกั่วเกินค่ามาตรฐานน้ำดื่ม คือ 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร และยังสามารถใช้ได้ไปจนถึง 7,125 เท่าของปริมาตรคอลัมน์สารดูดซับจึงจะหมดสภาพ แต่น้ำที่บำบัดได้ในช่วงหลังจะมีค่าสูงเกิน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากข้อมูลเบื้องต้น สารดูดซับที่เตรียมกระดูกงู 10 กรัมมีปริมาตรบรรจุ (Pack Volume) 16 มิลลิลิตร หรือคิดเป็นความหนาแน่นบรรจุของคอลัมน์ (Pack density) ประมาณ 0.62 กิโลกรัมต่อลิตร ดังนั้นหากใช้คอลัมน์ขนาดบรรจุหนึ่งลิตรใช้สารดูดซับ 0.62 กิโลกรัม สามารถกรองน้ำปนเปื้อนตะกั่วที่บ้านถ้ำทะเลที่มีปริมาณปนเปื้อน 0.042 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้มากถึง 500 ลิตร ก่อนที่ปริมาณตะกั่วเจือปนในน้ำที่ผ่านการกรองจะสูงกว่าระดับที่ดื่มได้ปลอดภัย



รูปที่ 9 กราฟเบรคทรู ของน้ำตะกั่วสังเคราะห์ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 10 กราฟเบรคทรู ของน้ำตะกั่วปนเปื้อนจากถ้ำทะเล อ.บันนังสตา จ.ยะลา ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.042 มิลลิกรัมต่อลิตร

สรุป

การพัฒนาสารดูดซับที่เตรียมจากกระดูกงูแช่ด้วยกรดเกลือ เพื่อนำมาใช้บำบัดน้ำปนเปื้อนตะกั่ว นั้นมีความเป็นไปได้ โดยกลไกของการดูดซับคือ การละลายของ CaCO_3 จากกระดูกงู ทำให้พีเอชของน้ำสูงขึ้น แล้วไอออนของตะกั่วที่ปนเปื้อนรวมกับ HCO_3^- กลายเป็นของแข็งตะกั่วคาร์บอเนตแล้วกลับมาจับตัวกระดูกงูบริเวณที่มีสารโคโคติน โดยที่มีบางส่วนของการดูดซับเกิดโดยการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง Pb^{2+} กับ Ca^{2+} ที่ผิวกระดูกงูด้วยเช่นกัน และจากการทดสอบแบบต่อเนื่องในคอลัมน์เพื่อบำบัดน้ำปนเปื้อนตะกั่วที่เก็บจากแหล่งน้ำที่บ้านถ้ำทะเล ตำบลถ้ำทะเล อำเภอบันนังสตา จังหวัดยะลา ที่มีปริมาณตะกั่วปนเปื้อน 0.042 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าคอลัมน์ปริมาตรบรรจุ 1 ลิตร หรือ 0.62 กิโลกรัม สามารถกรองน้ำได้ถึง 500 ลิตร ก่อนที่ปริมาณตะกั่วปนเปื้อนในน้ำที่ผ่านการกรองจะสูงเกิน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร

อนึ่งสารดูดซับที่เตรียมจากเปลือกหอยแครงนั้น จากผลการศึกษาเบื้องต้นในที่นี้บอกถึงแนวโน้มที่จะใช้งานได้ดีกว่ากระดูกงูในช่วงความเข้มข้นของตะกั่วต่ำ ๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น ดังนั้นจึงเป็นเรื่องที่น่าจะติดตามศึกษาโดยละเอียดต่อไปในอนาคต โดยอาจรวมไปถึงเปลือกหอยน้ำจืดอื่น ๆ ด้วย

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย แห่งมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์สำหรับทุนอุดหนุนการวิจัย ขอขอบคุณคุณรัชกร แซ่เจง คุณหทัยกาญจน์ ไพรัตน์นกร และคุณสมชัย ชัยแสน ที่ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีในงานทดลองต่างๆ ขอขอบพระคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับการวิเคราะห์โดยเทคนิค XRD, FTIR และ EDS และการถ่ายรูป SEM และขอขอบพระคุณศูนย์โลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ในการช่วยเหลือวิเคราะห์ ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ BET และสุดท้ายขอขอบคุณคุณอุษาวรัตน์ เรืองคำ สำหรับการเตรียมคั้นฉบับบทความนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] นันทนา สันตติวุฒิ, นพรัตน์ สุรพฤกษ์ และ มัทนา อึ้งสุประเสริฐ, ปริมาณโลหะหนักในน้ำบริเวณปากแม่น้ำรอบอ่าวไทย, วารสารการอนามัยสิ่งแวดล้อม ปีที่10, ฉบับที่ 3, หน้า 43-58, 2530.
- [2] World Health Organization. 1996. *Guideline for drinking-water Quality*. 2nd ed. WHO, Geneva.
- [3] ณรงค์ ณ เชียงใหม่, คุณภาพแหล่งน้ำภาคใต้, วารสารสงขลานครินทร์, ปีที่10, ฉบับที่ 4, หน้า 417-432, 2531.
- [4] Geater, A.; Chompikul, J.; Chongsuvivalwong, V. and McNeil, D, Lead Contamination Among Schoolchildren Living in the Pattani River Basin. Songkla : Epidemiology Unit Prince of Songkhla University, 1996.
- [5] วรณภา ตันขันธ์, เรื่องน้ำดื่มเกี่ยวกับโลหะหนักในน้ำยาล้างถ้วยชาม, วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ, ปีที่ 45, ฉบับที่ 144, หน้า 29-31, 2540.
- [6] Kumar, P. and Dara, S., Binding Heavy Metal ions with Polymerized Onion Skin, J.of Polymer Science, 19, 397-402. 1981.
- [7] Odozi, T.O., Okeke, S. and Lartey, R.B., Studies on Binding Metal Ions with Polymerized Corn Cob and a Composite Resin with Sawdust and Onion Skin, Agriculture Wastes, 12, 13-21, 1985.
- [8] Okieiman, F.E. and Onyenkpa, V.U., Removal of Heavy Metal Ions From Aqueous Solutions with Melon Seed Husks, Biological Waste, 29, 11-16, 1989.
- [9] Shiina, S., Heavy Metal Wastewater Treatment by Use of Calcined Coral Limestone", PPM, 12, 14-20, 1986.
- [10] Suzuki, T., Utilization of Coral Limestone, Chemical Industry, 9, 34-39, 1991.
- [11] Sag, Y and Kutsal, T., Biosorption of Heavy Metals by Zoogloea Ramigera : Use of Adsorption Isotherms and Comparison of Biosorption Characteristics, The Chemical Engineering Journal, 60, 181-188, 1995.
- [12] Lee, M.Y.; Park, J.M. and Yang, J.W., Microprecipitation of Lead on the Surface of Crab Shell Particles, Process Biochemistry, 32, 967-677, 1997.
- [13] Lee, M.Y.; Shin, H. J.; Lee, S.H.; Park, J.M. and Yang, J.W., Removal of Lead in a Fixed – Bed Column Packed with Activated Carbon and Crab Shell, Separation Science and Technology, 33, 1043-1056, 1998.
- [14] Fuerstenau, M.C., and Palmer, B.R., Anionic Flotation of Oxides and Silicates, In Fuerstenau, M.C. (editor) Flotation : AM Gaudin Memorial Volume., pp.148-196, SME of AIME :. New York, 1976.
- [15] Rose, A.W.; Webb, J.S. and Hawks, H.E., Geochemistry in Mineral Exploration. 2nd ed. London. : Academic press Inc. 1979.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นางสาวสิริรัตน์ ตะนุสะ
 วัน เดือน ปีเกิด 28 มกราคม 2518
 วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตร์บัณฑิต	คณะวิทยาศาสตร์	2540
สาขาเคมี	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่	

ทุนการศึกษา

- ทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงานในรูปแบบโปสเตอร์ ในการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25 (วทท. 25) ณ โรงแรมมรินทร์ลาภูน จังหวัดพิษณุโลก จัดโดยคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร 2542