



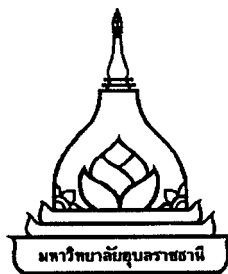
การดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เศษแครอท

พรนภา แก้วประดิษฐ์

การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา

พ.ศ. 2549

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา



**BIOSORPTION OF LEAD FROM AQUEOUS SOLUTION USING
CARROT RESIDUES**

PORNNAPA KAEWPARDIT

**AN INDEPENTDENT STUDY SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING**

MAJOR IN ENVIRONMENTAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

UBON RAJATHANEE UNIVERSITY

YEAR 2006

COPYRIGHT OF UBON RAJATHANEE UNIVERSITY



ใบรับรองการค้นคว้าอิสระ
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์

เรื่อง การดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เศษแครอท

ผู้วิจัย นางสาวพรนภา แก้วประดิษฐ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพรัตน์ แก้วสาร)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพัฒน์พงษ์ มัตราข)

23 ๒ กรรมการ
(นายประเดิม ภาคแก้ว)

..... คณบดี
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุภาพร โภคา)

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี รับรองแล้ว

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุทิศ อินทร์ประสิทธิ์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ปฏิบัติราชการแทนอธิการบดี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปีการศึกษา 2549

กิตติกรรมประกาศ

การค้นคว้าอิสระนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลดังต่อไปนี้ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือตลอดจนให้คำปรึกษาจนการค้นคว้าอิสระนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพรัตน์ แก้วสาร อาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระ ที่ได้ให้คำแนะนำปรึกษา และความช่วยเหลือต่างๆ อันเป็นประโยชน์ในการค้นคว้าข้อมูล และการแก้ไขนานาปัญหา ขอขอบคุณท่านอาจารย์ที่เป็นผู้ให้ ทั้งเวลา และคำปรึกษา คำแนะนำที่เป็นประโยชน์หลายอย่างแก่ข้าพเจ้า

นายประเดิม ภาคแก้ว กรรมการสอบการค้นคว้าอิสระ จากสำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 12 ที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษาเกี่ยวกับขอบเขตของการค้นคว้าอิสระที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุพัฒน์พงษ์ มัตราข กรรมการสอบการค้นคว้าอิสระแห่งภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่กรุณาให้คำแนะนำ รวมทั้งความรู้เกี่ยวกับค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ให้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

อาจารย์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำในการทำการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และเพื่อนวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมรุ่น 3 มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีทุกคน ที่ได้ให้คำแนะนำ และช่วยอำนวยความสะดวกในระหว่างการทำงานทดลอง

ท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้ให้คำปรึกษา คำสั่งสอน อบรม การสนับสนุนตลอดจนเป็นกำลังใจในการศึกษาจนสำเร็จมาถึงทุกวันนี้

พรพนก แก้วประดิษฐ์
(นางสาวพรนภา แก้วประดิษฐ์)
ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

ชื่อเรื่อง : การดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เศษแครอท
 โดย : พรนภา แก้วประคิษฐ์
 ชื่อปริญญา : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
 สาขาวิชา : วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
 ประธานกรรมการที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพรัตน์ แก้วสาร

ศัพท์สำคัญ : การดูดซับ โลหะหนัก ตะกั่ว เศษแครอท น้ำเสีย

การปนเปื้อนของตะกั่วที่เพิ่มมากขึ้นในสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นผลมาจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ เช่น อุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่ การทำเหมืองแร่ และกิจกรรมทางการเกษตร กลายเป็นปัญหาสำคัญที่พบมากในปัจจุบัน โดยวิธีการที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนตะกั่วในปัจจุบันมีหลายวิธี อาทิเช่น การตกตะกอนทางเคมี การระเหย และการแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น อย่างไรก็ตามวิธีการที่กล่าวมาข้างต้นล้วนใช้บำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนตะกั่วได้ดี แต่ยังมีข้อจำกัดในเรื่องค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูง และมีประสิทธิภาพต่ำเมื่อใช้กับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักต่ำๆ การศึกษานี้จึงได้มีการนำเศษแครอทซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้ง มาใช้ในการกำจัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย โดยใช้เทคนิคการดูดซับทางชีวภาพ ซึ่งมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความสามารถของเศษแครอทในการดูดซับตะกั่วจะถูกศึกษาภายใต้ความแตกต่างของชนิดและปริมาณตัวดูดซับ (บดและไม่บด 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 กรัม) เวลาในการสัมผัส (5-120 นาที) พีเอช (2-6) ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าเศษแครอทแบบบดมีประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียมากกว่าแบบไม่บด โดยปริมาณที่เหมาะสมของเศษแครอทคือ 0.5 กรัม ใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุล 30 นาที และที่ระดับพีเอช 5 มีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วสูงที่สุดเท่ากับ 99.20 % จากผลการทดลองแสดงให้เห็นได้ว่าเศษแครอทมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้พัฒนากำจัดตะกั่วที่ละลายอยู่ในน้ำเสียได้

ABSTRACT

TITLE : BIOSORPTION OF LEAD FROM AQUEOUS SOLUTION USING CARROT
RESIDUES
BY : PORNNAPA KAEWPARDIT
DEGREE : MASTER OF ENGINEERING
MAJOR : ENVIRONMENTAL ENGINEERING
CHAIR : ASSIST.PROF. PAIRAT KAEWSARN, Ph.D.

KEYWORDS : BIOSORPTION / HEAVY METAL / LEAD / WASTEWATER /
CARROT RESIDUES

The accumulation of lead contaminants in the environment as a result of different activities such as battery manufacturing, mining and agricultural activities become important problem now. Methods, traditionally, for treatment the heavy metals contaminant especially lead from wastewater such as chemical precipitation, evaporation and ion-exchange process have been used. However these technologies are often effective in high heavy metal concentration in wastewater, but have limited and high cost as well as low efficiency of metal removal from dilute solution. There are several residual material available locally and carrot residues were employed for this study to remove lead from wastewater by technology of biosorption. The purpose of this study was to evaluate adsorption uptake capacity of lead from synthetic wastewater at low concentration of about 10 mg/l. The carrot residues uptake for lead removal were studied by using different sizes (ground and unground), adsorbent doses (0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 and 3.0 g), contact times (8-120 min) and pH solution (pH 2-6) values in batch mode. The results showed that the equilibrium time was at about 30 minutes and highest uptake capacity of lead removal by using carrot residues was 99.20% at pH 5. An optimum dose of biosorbent used was 0.5 g. The results indicated that carrot residues may be used for lead removal in wastewater containing toxic heavy metal.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 โลหะหนัก	3
2.1.1 ความหมายของโลหะหนัก	3
2.2 ตะกั่ว	3
2.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี	3
2.2.2 การใช้ประโยชน์จากโลหะตะกั่ว	4
2.2.3 การดูดซึมตะกั่วเข้าสู่ร่างกายมนุษย์	5
2.2.4 การแพร่กระจายเข้าสู่สิ่งแวดล้อม	5
2.2.5 ความเป็นพิษตะกั่วต่อร่างกาย	6
2.2.6 ตะกั่วในน้ำเสีย	6
2.3 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย	8
2.3.1 การตกตะกอนทางเคมี	8
2.3.2 การออสโมซิสย้อนกลับ	8
2.3.3 การอิเล็กโทรไดอะไลซิส	9

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.4 การออกซิเดชัน-รีดักชัน	9
2.3.5 การระเหย	9
2.3.6 การแลกเปลี่ยนไอออน	9
2.3.7 การดูดซับ	11
2.3.8 การดูดซับทางชีวภาพ	11
2.4 การดูดซับ	11
2.4.1 ทฤษฎีการดูดซับ	11
2.4.2 ขั้นตอนการดูดซับหรือการดูดติดผิว	12
2.5 การดูดซับทางชีวภาพ	12
2.5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับด้วยสารชีวมวล	13
2.5.2 ข้อดีของการดูดซับทางชีวภาพ	15
2.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับ	16
2.6.1 สมการของ Langmuir	17
2.6.2 สมการของ Brunauer – Emmett – Teller (BET)	18
2.6.3 สมการของ Freundlich	19
2.7 แครอท	20
2.7.1 ส่วนประกอบของแครอท	20
2.8 การดูดซับโลหะหนักของเศษแครอท	21
3 วิธีดำเนินงานวิจัย	
3.1 รูปแบบการวิจัย	22
3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	23
3.2.1 เครื่องมือ	23
3.2.2 อุปกรณ์	23
3.2.3 สารเคมี	23
3.3 การเตรียมสารดูดซับและน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง	23
3.3.1 การเตรียมเศษแครอทแบบไม่บดเพื่อใช้เป็นสารดูดซับ	23
3.3.2 การเตรียมเศษแครอทแบบบดเพื่อใช้เป็นสารดูดซับ	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 วิธีการดำเนินการทดลอง	24
3.4.1 การศึกษาเบื้องต้น	24
3.4.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมที่แตกต่างกันจาก 3 ปัจจัย	24
4 ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล	
4.1 ผลการศึกษาเบื้องต้น (Preliminary study) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเศษแครอทแบบบดและไม่บด และปริมาณที่เหมาะสมของเศษแครอทในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสีย	26
4.2 ผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของการกำจัดตะกั่วโดยใช้เศษแครอท	29
4.3 ผลของระดับพีเอช (pH) ในการกำจัดตะกั่ว	30
4.4 ผลของไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่ว	32
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 ชนิดและปริมาณที่เหมาะสมของเศษแครอทในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสีย	36
5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัย	37
เอกสารอ้างอิง	38
ภาคผนวก	
ก ข้อมูลและผลการทดลอง	43
ข หลักการและวิธีการวิเคราะห์ปริมาณตะกั่ว	48
ค ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เรื่องกำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน	53
ง ผลงานทางวิชาการ	59
ประวัติผู้วิจัย	73

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงตัวอย่างงานวิจัยการดูดซับโลหะหนักทางชีวภาพ (Biosorption)	15
4.1	แสดงประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วแบบบดและแบบไม่บด ณ เวลาสัมผัส 24 ชั่วโมง	28
4.2	ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจากเศษแครอทที่ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ	29
4.3	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ที่ระดับ pH 2 ถึง 6 ณ เวลาสัมผัส 30 นาที	32
4.4	ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วเมื่อเติมเศษแครอทในความเข้มข้นที่ต่างกัน	32
4.5	ไอโซเทอร์มการดูดซับ Langmuir และ Freundlich ที่พีเอช 5	33
4.6	ปริมาณการดูดซับตะกั่วโดยเศษแครอทที่พีเอชที่ดีที่สุด	33
4.7	เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับตะกั่ว (q_{max}) ของชีวมวลต่างๆ	35
ก.1	ผลการเปลี่ยนแปลงตะกั่วเมื่อเติมเศษแครอทแบบสดในปริมาณที่ต่างกัน	44
ก.2	ผลการเปลี่ยนแปลงตะกั่วเมื่อเติมเศษแครอทแบบไม่บดในปริมาณที่ต่างกัน	45
ก.3	ผลการเปลี่ยนแปลงตะกั่วเมื่อเติมน้ำแครอทในปริมาณที่ต่างกัน	45
ก.4	ผลการเปลี่ยนแปลงตะกั่วเมื่อเติมเศษแครอทแบบบดในปริมาณที่ต่างกัน	46
ก.5	ผลการเปลี่ยนแปลงตะกั่วเมื่อเติมเศษแครอทในระยะเวลาสัมผัสที่แตกต่างกัน	46
ก.6	ผลการเปลี่ยนแปลงตะกั่วเมื่อเติมเศษแครอทในระดับพีเอชที่ต่างกัน	47
ก.7	ผลการเปลี่ยนแปลงตะกั่วเมื่อเติมเศษแครอทในความเข้มข้นที่ต่างกัน	47

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	วงจรการแพร่กระจายของตะกั่วสู่สิ่งแวดล้อมและมนุษย์
2.2	ไดอะแกรมสปีชีส์ของตะกั่วในน้ำ
2.3	โครงสร้างของเรซิน
2.4	กราฟสำหรับสมการ (2) ของ Langmuir
2.5	กราฟสำหรับสมการ (3) ของ Langmuir
2.6	กราฟหาค่า C_s สำหรับสมการ (4) ของ BET
2.7	กราฟสำหรับสมการ (5) ของ BET
2.8	กราฟสำหรับสมการ (6) ของ Freundlich
2.9	ลักษณะหัวผ่ตามขวาง
4.1	เศษแครอทแบบไม่บด
4.2	เศษแครอทแบบบด
4.3	ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วกับปริมาณต่างๆแบบบดและแบบไม่บด
4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสและประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว
4.5	ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่ระดับพีเอช 2 - 6
4.6	ไอโซเทอร์มในการดูดซับตะกั่วโดยเศษแครอทที่พีเอชที่ดีที่สุด
4.7	แสดง Langmuir ไอโซเทอร์มของการดูดซับตะกั่วจากเศษแครอท
4.8	แสดง Freundlich ไอโซเทอร์มของการดูดซับตะกั่วจากเศษแครอท
ก.1	ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วแบบสด แบบบด แบบไม่บด และเนื้อแครอท

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีอัตราการเจริญเติบโตทางอุตสาหกรรมสูง ซึ่งผลที่ตามมาจากการพัฒนาทางอุตสาหกรรมนี้ทำให้เกิดการปนเปื้อนของโลหะหนัก โดยเฉพาะตะกั่วในน้ำเสียจากอุตสาหกรรม ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักจำพวกตะกั่วเจือปนอยู่ จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง วิธีการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักจำพวกตะกั่วที่ใช้กันในปัจจุบันมีหลายวิธีอาทิเช่น การกรอง การตกตะกอนทางเคมี การแลกเปลี่ยนไอออน การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ การระเหย เป็นต้น ซึ่งวิธีที่กล่าวมาข้างต้นล้วนเป็นวิธีที่สามารถกำจัดโลหะหนักได้ดี แต่มีข้อจำกัดในเรื่องค่าใช้จ่ายสูงรวมทั้งมีประสิทธิภาพต่ำเมื่อใช้งานในสภาวะธรรมชาติที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักต่ำมาก ในขณะที่มีอีกเทคโนโลยี คือ Biosorption หรือการดูดซับทางชีวภาพแบบใช้ชีวมวลจากวัสดุธรรมชาติต่างๆ ซึ่งข้อดีของเทคนิคการดูดซับด้วยชีวภาพนี้ คือสามารถกำจัดไอออนของโลหะหนักที่ละลายน้ำในปริมาณน้อยๆ ได้ ตัวดูดซับที่ใช้มีความสามารถในการดูดซับสูง ราคาไม่แพง นอกจากนี้อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ก็ไม่ยุ่งยากซับซ้อน (Yu et al., 1998) ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้ จึงได้มีการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาประยุกต์ใช้ในการดูดซับโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียโดยอาศัยเทคนิคการดูดซับแบบ Biosorption โดยเลือกใช้เศษแครอทที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากตลาด ซึ่งมีองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินเป็นองค์ประกอบ จึงมีความเป็นไปได้ในการนำมาพัฒนาใช้เป็นสารดูดซับโลหะหนักตะกั่วในน้ำเสียได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 วัตถุประสงค์ทั่วไป

1.2.1.1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเศษแครอทมาใช้ในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์

1.2.2 วัตถุประสงค์เฉพาะ

1.2.2.1 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วของเศษแครอทแบบบดและไม่บด

1.2.2.2 ศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัส พีเอช และความเข้มข้นต่อการดูดซับโดยใช้เศษแครอท

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 การวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เศษแครอทแบบบดและไม่บด

1.3.2 น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาระยะเวลาสัมผัส ระดับพีเอชเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีตะกั่วที่ระดับค่าความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

1.3.3 ระยะเวลาสัมผัสที่ใช้ในการทดลองจะแบ่งเป็น 8 ระดับ คือ ที่เวลา 2.5, 5.0, 10, 15, 30, 60, 90 และ 120 นาที

1.3.4 ระดับพีเอชเริ่มต้นที่ทดลองจะแบ่งเป็น 5 ระดับ คือ ที่พีเอช 2, 3, 4, 5 และ 6 ตามลำดับ

1.3.5 ความเข้มข้นที่ทดลองจะแบ่งเป็น 6 ระดับ คือ 10, 50, 100, 150, 250 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วโดยใช้เศษแครอทเป็นสารดูดซับ

1.4.2 ทำให้ทราบถึง สภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัสในการดูดซับตะกั่ว ระดับพีเอช และความเข้มข้นในน้ำเสียสังเคราะห์จากเศษแครอท

1.4.3 เป็นการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนของเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนี้จะกล่าวถึง ความหมายของโลหะหนัก คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตะกั่ว การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย การดูดซับ การดูดซับทางชีวภาพ และแคโรทซึ่งใช้เป็นตัวดูดซับในการวิจัยนี้ ซึ่งรายละเอียดทั้งหมดจะได้อธิบายดังต่อไปนี้

2.1 โลหะหนัก

2.1.1 ความหมายของโลหะหนัก

โลหะหนักหมายถึง ธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป และมีเลขอะตอมระหว่าง 23 ถึง 92 อยู่ในคาบที่ 4-7 โลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็ง (ยกเว้นปรอทที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ) ตัวอย่างเช่น ปรอท สังกะสี ทองแดง นิกเกิล โครเมียม ตะกั่ว เหล็ก เป็นต้น โลหะหนักถือว่าเป็นโลหะปริมาณน้อย (Trace metals) ซึ่งส่วนมากจะอยู่ในกลุ่มทรานสิชัน (Transition elements) นอกจากนี้ยังมีธาตุอื่นๆ ที่จัดอยู่ในกลุ่มธาตุรีเพรสเซนต์ (Representative elements) คือตะกั่ว สสารหนู พลวง และซีลีเนียม โลหะหนักสามารถก่อให้เกิดปัญหามลพิษในแหล่งน้ำ และดินตะกอนเนื่องจากมีความคงตัว ไม่สลายตัวโดยกระบวนการทางธรรมชาติ ทำให้บางส่วนสามารถสะสมอยู่ในสิ่งมีชีวิตและถ่ายทอดตามห่วงโซ่อาหารได้ ซึ่งส่งผลให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ถ้าได้รับในปริมาณที่มากเกินไป โลหะหนักที่ศึกษาในการวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ ตะกั่วไนเตรด (Lead nitrate, $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) ซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี การใช้ประโยชน์ การดูดซึมของตะกั่ว พิษของตะกั่วต่อร่างกาย และตะกั่วในน้ำเสีย ดังนี้

2.2 ตะกั่ว

2.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

ตะกั่ว (Lead) เป็นธาตุที่มีการนำมาใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งพบได้ในแหล่งแร่ธรรมชาติหลายชนิด ที่สำคัญที่สุดได้แก่ กาลีน่า (Galena: PbS) แองกลีไซต์ (Anglesite: PbSO_4) และเซอร์ไรต์ไซด์ (Cerrusite: PbCO_3) (David, 1985) ตะกั่วเป็นธาตุในหมู่ 14 คาบ 6 มีหมายเลขอะตอม 82 มีน้ำหนักอะตอม 207.19 amu จุดหลอมเหลว 600.61 องศาเซลเซียส (327.46 องศาเซลเซียส)

จุดเดือด 2022 องศาเซลเซียส (1749 องศาเซลเซียส) ตะกั่วเป็นธาตุที่มีคุณสมบัติเป็นโลหะเนื้ออ่อนนุ่ม สามารถยืดได้ เมื่อตัดใหม่ๆ จะมีสีขาวอมน้ำเงินแต่เมื่อถูกกับอากาศสีจะเปลี่ยนเป็นสีเทา

2.2.2 การใช้ประโยชน์จากตะกั่ว

ตะกั่วเป็นธาตุที่มนุษย์รู้จัก และใช้กันมาตั้งแต่โบราณ เพราะมีคุณสมบัติเป็นโลหะที่อ่อน มีจุดหลอมเหลวต่ำ ทำให้บริสุทธิ์ง่าย ทำให้มีการนำตะกั่วมาใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลาย โดยตะกั่วถูกนำไปใช้ประโยชน์มากที่สุดในอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ และใช้ในรูปแบบของเคอร์เซอเทิลเลด ซึ่งใช้เติมใส่น้ำมันเพื่อเพิ่มเลขออกเทนของน้ำมัน ซึ่งการใช้ตะกั่วในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

2.2.2.1 สารประกอบอนินทรีย์ตะกั่ว เช่น

- 1) ตะกั่วออกไซด์ (Lead oxide) เช่น ตะกั่วโมนอกไซด์ (Lead monoxide, PbO) ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตสี อุตสาหกรรมการผลิตหม้อแบตเตอรี่ และใช้ในอุตสาหกรรมผลิตยาง ตะกั่วไดออกไซด์ (Lead dioxide, PbO_2) ใช้ทำเป็นขั้วอิเล็กโทรดของแบตเตอรี่รถยนต์ และเครื่องจักร ตะกั่วแดง (Red oxide of Lead, Pb_3O_4) ใช้เป็นสีทาโลหะเพื่อป้องกันสนิมหรือเคลือบสีรถยนต์
- 2) ตะกั่วคาร์บอเนต (Lead carbonate, $PbCO_3$) เช่น ตะกั่วซัลเฟต (Lead sulfate, $PbSO_4$) และตะกั่วโครเมต (Lead chromate, $PbCrO_4$) ใช้ในวงการอุตสาหกรรมการผลิตสีผสมในผงฝุ่น หมึกพิมพ์ และสีพลาสติก เป็นต้น
- 3) ตะกั่วอะซิเตต (Lead acetate, $Pb(CH_3COO)_2$) เป็นเกลือของตะกั่วที่ละลายในน้ำได้ดี ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเครื่องสำอาง และครีมใส่ผม เป็นต้น
- 4) ตะกั่วไนเตรต (Lead nitrate, $Pb(NO_3)_2$) ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตยาง และพลาสติก
- 5) ตะกั่วอะซิเนต (Lead acenat, $PbO.As_2O_5$) ใช้ในอุตสาหกรรมแล็กเกอร์ น้ำมันหล่อลื่น และจารบี เป็นต้น
- 6) ตะกั่วซิลิเกต (Lead silicate, $PbSiO_3$) ใช้ผสมในกระเบื้องเครื่องเคลือบเซรามิกเพื่อให้เกิดความเงางามและมีผิวเรียบ

2.2.2.2 สารประกอบอินทรีย์ของตะกั่ว (Organic lead compounds) ได้แก่

- 1) ตะกั่วสเตียเรต (Lead stearate, $Pb(C_{10}H_{19}O_2)_2$) นำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตแล็กเกอร์ น้ำมันหล่อลื่น และจารบี เป็นต้น
- 2) ตะกั่วเทตระเอทิล (Tetraethyl lead, $Pb(C_2H_5)_4$) และตะกั่วเทตระเมทิล (Tetramethyl lead, $Pb(CH_3)_4$) ใช้เติมร่วมกับตะกั่วเตตระเอทิลในน้ำมันเบนซิน เพื่อเพิ่มค่าออกเทนของน้ำมันให้สูงขึ้น ป้องกันการกระตุกของเครื่องยนต์ (แต่ในปัจจุบันเลิกใช้แล้ว)

2.2.3 การดูดซึมตะกั่วเข้าสู่ร่างกาย (สมพล, 2540) ตะกั่วสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทางคือ

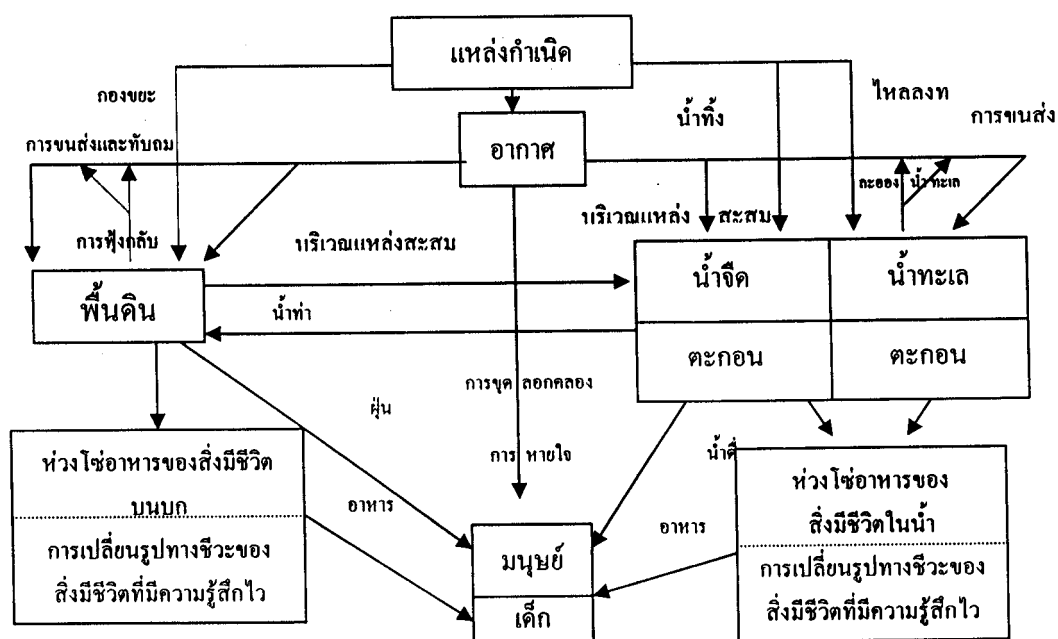
2.2.3.1 การดูดซึมตะกั่วเข้าสู่ร่างกายโดยระบบทางเดินอาหาร คือ มีการปนเปื้อนของตะกั่วในอาหาร น้ำ เครื่องดื่ม และภาชนะเครื่องใช้ที่มีตะกั่วปนเปื้อน ซึ่งพบว่าร้อยละ 70-85 ของตะกั่วเข้าสู่ร่างกายได้จากอาหาร

2.2.3.2 การดูดซึมตะกั่วเข้าสู่ร่างกายโดยระบบทางเดินหายใจ คือ การหายใจเอาควันของตะกั่วที่หลอมเหลวเข้าไป เช่น จากการหลอมตะกั่ว หรือเชื่อมโลหะ พบในผู้ประกอบอาชีพที่สัมผัสตะกั่ว เช่น คนงานในโรงงานหลอมตะกั่ว โรงงานผลิตสี เป็นต้น โดยตะกั่วที่มีขนาดเล็กกว่า 0.75 ไมครอน จะสามารถเข้าสู่ถุงลมในปอด และผ่านสู่กระแสเลือด มีการประมาณไว้ว่าตะกั่ว 40% ของปริมาณตะกั่วที่เข้าสู่ทางเดินหายใจในผู้ใหญ่จะถูกร่างกายดูดซึมเอาไว้

2.2.3.3 การดูดซึมตะกั่วเข้าสู่ร่างกายทางผิวหนัง จะเกิดเฉพาะในตะกั่วอินทรีย์เท่านั้น โดยผู้ที่มีโอกาสได้รับตะกั่วทางผิวหนังได้แก่ คนงานในปั้มน้ำมัน ช่างซ่อมเครื่องยนต์

2.2.4 การแพร่กระจายตะกั่วเข้าสู่สิ่งแวดล้อม

แหล่งกำเนิดใหญ่ๆ ของตะกั่วที่จะเป็นตัวแพร่กระจายตะกั่วออกไปสู่สิ่งแวดล้อมได้แก่ เหมืองแร่ตะกั่ว และการถลุงแร่ตะกั่ว โดยเฉพาะการใช้ตะกั่วในอุตสาหกรรมต่างๆ รวมทั้งอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมัน การแพร่กระจายของตะกั่วทั้งจากแหล่งที่เคลื่อนที่ได้และเคลื่อนที่ไม่ได้ ส่วนใหญ่แล้วจะปล่อยสู่อากาศจะไปสู่พืช ดิน และแหล่งน้ำตามธรรมชาติ ดังแสดงดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 วงจรการแพร่กระจายของตะกั่วสู่สิ่งแวดล้อมและมนุษย์

ที่มา : Hutchinson and Meema (1987)

2.2.5 ความเป็นพิษตะกั่วต่อร่างกาย

ตะกั่วเป็นโลหะที่ร่างกายไม่ต้องการคือ ไม่มีส่วนใดที่เกี่ยวข้องกับระบบเผาผลาญอาหาร ยิ่งไปกว่านั้นตะกั่วยังเป็นพิษต่อร่างกายอย่างแรง ถ้าได้ร่างกายรับตะกั่วเข้าไปในปริมาณสูง โดยพิษของตะกั่วที่เกิดขึ้นในแต่ละคนจะต่างกันไปตามวัยและความต้านทานของแต่ละคน ซึ่งความเป็นพิษของตะกั่วจะแสดงอาการต่างๆ ดังนี้

2.2.5.1 อาการทางระบบทางเดินอาหาร จะพบได้บ่อยในผู้ใหญ่ โดยเริ่มจากมีอาการเบื่ออาหาร คลื่นไส้ อาเจียน ท้องผูก บางรายมีอาการท้องเสีย อาการที่สำคัญ คือ ปวดท้องอย่างรุนแรงมากเป็นสาเหตุให้ผู้ป่วยมาโรงพยาบาล นอกจากนี้อาจตรวจพบแนวเส้นตะกั่วบริเวณเหงือก (Lead line) มีลักษณะเป็นเส้นสีน้ำเงิน-ดำจับอยู่ที่ขอบเหงือกต่อกับฟัน ห่างจากฟันประมาณ 1 มิลลิเมตร พบบ่อยบริเวณฟันหน้ากราม และฟันกราม

2.2.5.2 อาการทางระบบประสาทส่วนปลาย โดยผู้ป่วยจะเกิดอาการอ่อนแรงของแขน ขา และกล้ามเนื้อบางครั้งมีอาการปวดตามกล้ามเนื้อ และข้อต่อต่างๆ ถ้าร่างกายได้รับตะกั่วปริมาณมากๆ เป็นเวลานาน อาจทำให้เกิดอัมพาตของกล้ามเนื้อได้ ซึ่งมักจะเกิดกับกล้ามเนื้อที่ใช้เหยียดข้อมืออ่อนแรง ทำให้เกิดอาการที่เรียกว่า ข้อมือตก หรือข้อเท้าตก

2.2.5.3 อาการทางสมอง เป็นอาการที่รุนแรงที่สุด มักพบในเด็กที่ได้รับตะกั่วอนินทรีย์ หรือสูดเอาไอ และละอองฝุ่นตะกั่วเข้าไปมาก

2.2.5.4 อาการทางโลหิต โดยผู้ป่วยมักจะมีอาการซีด เลือดจาง อ่อนเพลีย นอกจากอาการดังกล่าวแล้วผู้ป่วยมักมีอาการปวดศีรษะ มึนงง ในรายที่เป็นเรื้อรังพบว่ามีอาการตัวเหลืองด้วย

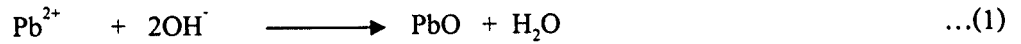
2.2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการละลายของตะกั่วในน้ำเสีย

การละลายของตะกั่วในน้ำเสีย มีความสำคัญต่อการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการละลายของตะกั่วในน้ำคือ พีเอช ความกระด้าง และความเป็นด่าง โดยพารามิเตอร์แต่ละตัวมีความสัมพันธ์กันคือ อัตราส่วนของความเป็นด่างที่อยู่ในรูปคาร์บอเนต ไบคาร์บอเนต ไฮดรอกไซด์ มีความสัมพันธ์กับพีเอช และความกระด้างก็มีความสัมพันธ์กับความเป็นด่าง และพีเอชได้เช่นเดียวกัน (Nayior และ Dague, 1975)

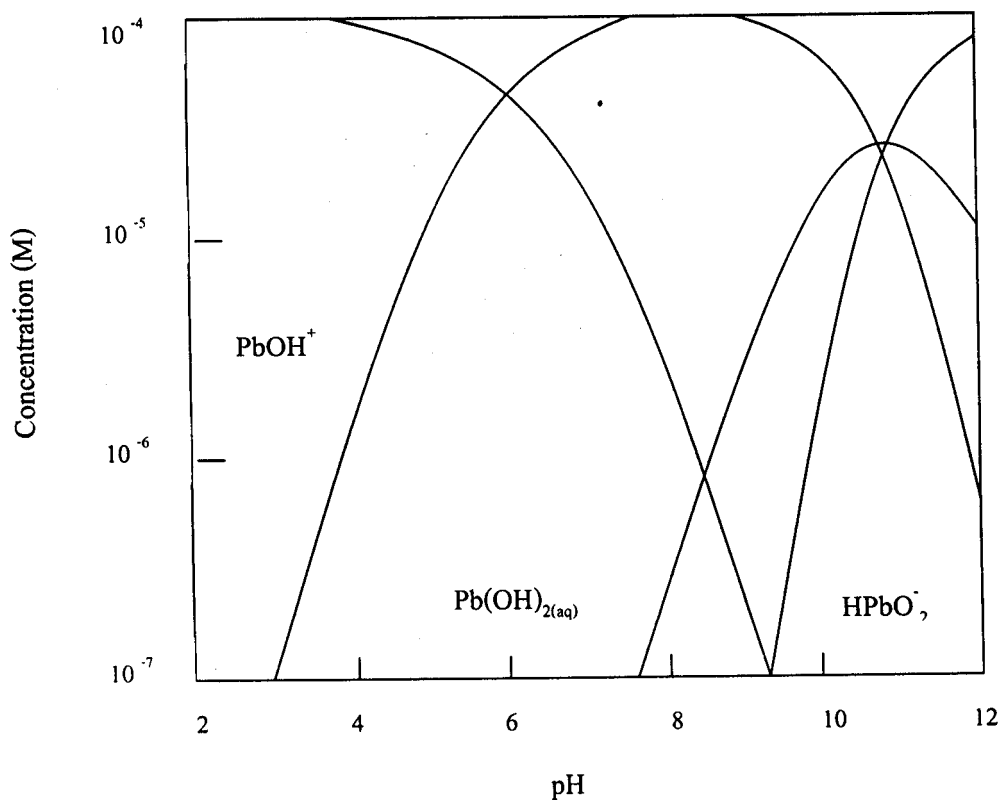
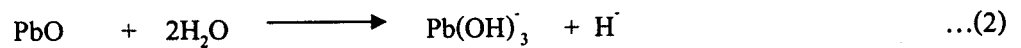
2.2.6.1 ผลของพีเอชต่อการละลายของตะกั่วในน้ำ

พีเอชของน้ำมีความสำคัญอย่างมากต่อรูปแบบของโลหะหนัก รวมถึงตะกั่วที่พบในน้ำเสีย การเพิ่มพีเอชให้น้ำเสียโดยการเติมสารเคมีที่เป็นด่าง เช่น ปูนขาว และโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะทำให้ความสามารถในการละลายน้ำของตะกั่วลดลง ส่งผลให้ตะกั่วตกตะกอนในรูปของตะกั่วไฮดรอกไซด์ ($Pb(OH)_2$) ซึ่งสามารถให้หลักการของการตกตะกอนนี้ในการกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสีย ในแหล่งน้ำธรรมชาติที่มีการปนเปื้อนของตะกั่ว โดยในแหล่งน้ำจืด และน้ำทะเลพบว่า

ตะกั่วสามารถพบได้ในหลายรูปแบบ เช่น PbCO_3 , $\text{Pb}(\text{CO}_3)_2^{2-}$, PbCl^+ , PbOH^+ และ $\text{Pb}(\text{OH})_2$ (Fergusson, 1990) ขึ้นกับค่าพีเอชดังภาพที่ 2.2 ในช่วงพีเอช 3-10 อีออนของตะกั่วส่วนใหญ่อยู่ในรูป PbOH^+ รองลงมาคือ Pb^{2+} ส่วน $\text{Pb}(\text{OH})_2$ มีบ้างเล็กน้อยโดยที่ช่วงพีเอช 8-11 ตะกั่วจะตกตะกอนเป็นตะกั่วออกไซด์ดังสมการที่ (1)



เนื่องจากคุณสมบัติตามธรรมชาติของตะกั่วออกไซด์จะละลายในสารละลายที่มีพีเอชมากกว่า 11 ดังสมการที่ (2)



ภาพที่ 2.2 โคออะแกรมสปีชีส์ของตะกั่วในน้ำ

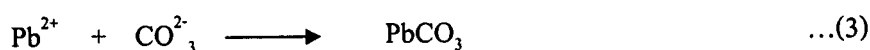
ที่มา : Fuerstenau and Palmer (1976)

2.2.6.2 ผลของการกำจัดความกระด้างโดยใช้ปูนขาวต่อการละลายของตะกั่วในน้ำ

การละลายของตะกั่ว จะถูกกำหนดโดยผลของความกระด้างในการกำจัดความกระด้างด้วยปูนขาวที่พีเอช 10.5 โดยที่พีเอชนี้นี้ตะกั่วจะตกตะกอนในรูปตะกั่วออกไซด์ไฮดรอกไซด์ ซึ่งความกระด้างที่เกิดจากแคลเซียม และแมกนีเซียมจะมีผลเล็กน้อยต่อการละลายของตะกั่ว

2.2.6.3 ผลของความเป็นด่างต่อการละลายของตะกั่วในน้ำ

ในน้ำที่มีตะกั่ว และคาร์บอนไดออกไซด์ ค่าการละลายของตะกั่วขึ้นอยู่กับค่าพีเอช และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ที่พีเอชน้อยกว่า 5 ตะกั่วจะอยู่ในรูปสารละลายที่ พีเอช 5-8.5 ตะกั่วจะตกตะกอนในรูปตะกั่วคาร์บอเนต ดังสมการที่ (3)



ที่พีเอช 8.5-12 ตะกั่วจะตกตะกอนในรูปตะกั่วออกไซด์ ดังสมการที่ (3) หรือ อาจะตกตะกอนในรูป basic lead carbonate ดังสมการที่ (4)



2.3 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

การกำจัดสารอินทรีย์ที่ละลายปะปนอยู่ในน้ำเสีย โดยเฉพาะโลหะหนักต่างๆ ที่ออกมาจากกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมมีหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีหลักการ โดยย่อ ดังนี้

2.3.1 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation)

เป็นการเติมสารเคมีลงในน้ำ เพื่อให้ไอออนของโลหะหนักที่ละลายอยู่ในน้ำ เปลี่ยนสถานะมาอยู่ในรูปของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ เกิดเป็นตะกอนจมตัวลง แล้วจึงแยกออกจากน้ำ ด้วยวิธีตกตะกอนหรือการกรอง สารเคมีที่นิยมใช้ ได้แก่ สารส้ม ปูนขาว แคลเซียมไฮดรอกไซด์ เพอริคลอไรด์ เพอริซัลเฟต เป็นต้น โดยทั่วไปนิยมตกตะกอนโลหะหนักเป็นตะกอนไฮดรอกไซด์ ซึ่งโลหะแต่ละชนิดจะตกตะกอนได้ดีที่ค่าพีเอชต่างกัน ส่วนตะกอนหรือสลัดจ์ที่ได้ จะมีส่วนประกอบของโลหะหนักที่เป็นพิษต้องนำไปกำจัดต่อไป

2.3.2 การออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse osmosis)

เป็นกระบวนการที่อาศัยแรงดันสูงผ่านเยื่อกรอง (Semi-permeable membrane) เพื่อแยกสารอินทรีย์ขนาดใหญ่ และสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำ มักใช้แรงดัน 300-1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว หรือสูงกว่าเยื่อกรอง จะยอมให้เฉพาะโมเลกุลของน้ำไหลผ่านไอออนต่างๆ ไม่

สามารถผ่านเยื่อกรองได้ แผ่นเยื่อกรองที่นิยมใช้มักทำมาจากเซลลูโลสอะซีเตท (Cellulose acetate) มีความหนาประมาณ 100 ไมครอน ประกอบด้วย 2 ชั้น ชั้นที่ใช้งานหนาประมาณ 0.2 ไมครอน ทำหน้าที่ขัดขวางมิให้สารต่างๆ ซึมผ่านไป พร้อมกับน้ำอีกชั้นทำหน้าที่เป็นพื้นรองรับ และมีรูพรุน สำหรับให้น้ำไหลผ่านได้

2.3.3 อิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis)

เป็นขบวนการอาศัยเยื่อกรองเช่นเดียวกัน แต่ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นแรงขับเคลื่อนให้เกิดการแยกไอออนออกจากน้ำ แผ่นเยื่อกรองที่ใช้มี 2 ชนิด คือ แผ่นบวกและแผ่นลบ ซึ่งยอมให้เฉพาะไอออนที่มีประจุเหมือนกันไหลผ่าน แต่โมเลกุลของน้ำจะไหลผ่านได้มาก ทำให้แยกไอออนของโลหะออกจากน้ำได้

2.3.4 การออกซิเดชัน และรีดักชัน (Oxidation and Reduction)

คือกระบวนการที่ผลิตปฏิกิริยา ที่เกี่ยวข้องกับการให้และการรับอิเล็กตรอนของอะตอม โดยการใช้สารออกซิแดนท์ (Oxidant) และสารรีดิวซ์ซิง (Reducing agent) ทำปฏิกิริยากับสารต่างๆ ในน้ำเสีย สารออกซิแดนท์มีหลายชนิด เช่น โอโซน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ค้างทับทิม และคลอรีน ส่วนสารรีดิวซ์ซิง ได้แก่ ซัลเฟอร์เปอร์ออกไซด์ โซเดียมไบซัลไฟต์ ไฮโดรซัลไฟด์ และเฟอร์รัสซัลเฟต เป็นต้น

2.3.5 การระเหย (Evaporation process)

เป็นกระบวนการที่ง่าย โดยการทำให้น้ำระเหย คงเหลือไว้แต่เพียงสารตะกั่วที่อยู่ในน้ำทิ้ง วิธีนี้จะใช้ได้ผลดีในกรณีที่มีปริมาณสารตะกั่วในน้ำทิ้งอยู่ในปริมาณที่มาก แต่โดยทั่วไปไม่นิยมจะใช้วิธีนี้เนื่องจากค่าใช้จ่ายที่สูง ต้องใช้ผู้ที่มีความสามารถ และมีความชำนาญในการดำเนินการ

2.3.6 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange)

เป็นปรากฏการณ์ชนิดหนึ่ง ซึ่งมีการสับเปลี่ยนไอออนกลับไปกลับมา (Reversible interchange) ระหว่างตัวกลาง 2 ชนิด คือ ตัวกลางของเหลว และ ตัวกลางของแข็ง โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านโครงสร้างของตัวกลาง ของแข็งที่เรียกว่าสารแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ซีโอไลต์ (Zeolite) ซึ่งมีทั้งแบบธรรมชาติ ได้แก่ green sand และแบบสังเคราะห์จากสารประกอบต่างๆ เช่น โซเดียมซิลิเกต ซึ่งมีโซเดียมไอออน (Na^+) ที่ใช้แลกเปลี่ยนไอออนบวกที่อยู่ในน้ำได้ และเรซิน (Resin) เป็นการสังเคราะห์พวกอินทรีย์โพลิเมอร์ ซึ่งมีอำนาจการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่าซีโอไลต์ เรซินประกอบด้วย 2 ส่วน คือ โครงร่างที่ไม่มีประจุไฟฟ้า และหมู่ไอออนที่มีประจุไฟฟ้า ซึ่งทำให้มันคงรูปร่างอยู่ได้โดยไม่ละลายน้ำ โครงร่างนี้จะสร้างขึ้นจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำนวนมากที่เป็นชนิดเดียวกัน ซึ่งต่อกันเป็นสายยาวและมีไฮโดรคาร์บอนอีกชนิดหนึ่งมาทำหน้าที่ประสานเพื่อให้เกิดเป็นรูปสามมิติที่มีความโปร่งหรือความพรุน หมู่ฟังก์ชัน

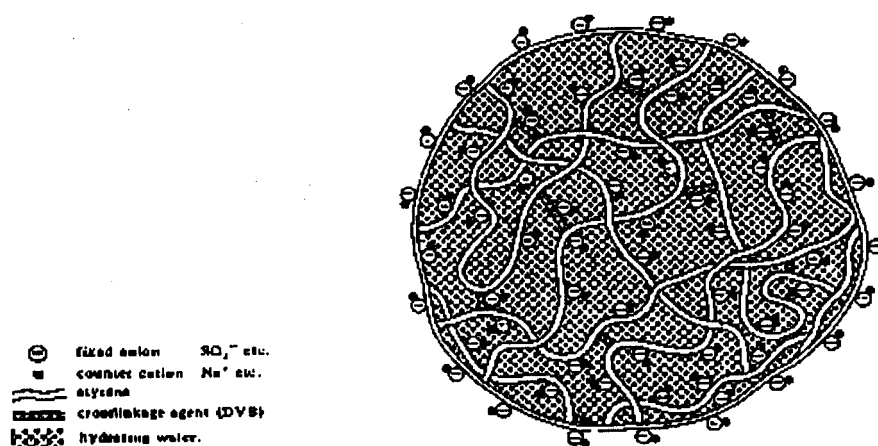
(Functional group) ของเรซิน เป็นตัวกำหนดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน หมู่ไอออน เกาะจับอยู่บนไฮโดรคาร์บอน ทำให้เรซินมีประจุบวกหรือลบ ถ้าหมู่ไอออนมีประจุลบเรซินจะมีประจุลบประจำตัว ใช้ในการกำจัดไอออนบวกออกจากน้ำเรียกว่าเป็น cation exchanger ถ้าหมู่ไอออนมีประจุบวก คือ เป็นสารที่แลกเปลี่ยนประจุลบออกจากน้ำเรียกว่า anion exchanger สามารถแบ่งเรซินได้เป็น 4 ชนิด ดังนี้

2.3.6.1 เรซินแบบกรดแก่ (Strong acid cationic resin) มีหมู่ซัลโฟนิก (SO_3^-) ซึ่งอยู่ในรูปของ $\text{SO}_3^- \text{H}^+$ หรือ $\text{SO}_3^- \text{Na}^+$ โดยจะใช้ไอออนบวกของตัวเอง คือ H^+ หรือ Na^+ แลกเปลี่ยนกับไอออนบวกที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำ

2.3.6.2 เรซินแบบกรดอ่อน (Weak acid cationic resin) มีหมู่คาร์บอกซิลิก (COOH) หรือ (COONa) โดยจะใช้ไอออนบวกของตัวเอง คือ H^+ หรือ Na^+ แลกเปลี่ยนกับไอออนบวกที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำ

2.3.6.3 เรซินแบบด่างแก่ (Basic anionic resin) มีหมู่โลหะเป็น quaternary Amine $(\text{CH}_3)_3\text{CH}_2\text{N}^+$ มีไอออนลบอิสระเป็น OH^- หรือ Cl^- สำหรับแลกเปลี่ยนไอออนลบที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำ

2.3.6.4 เรซินแบบด่างอ่อน (Weak basic anionic resin) ใช้กำจัดเฉพาะกรดแก่ เช่น HCl , H_2SO_4 , HNO_3 ออกจากน้ำ โดยไม่มีการแลกเปลี่ยนไอออน แต่กรดแก่ทั้งโมเลกุลจะเข้ามาจับกับเรซิน ซึ่งต่างจากเรซินทั้ง 3 ประเภท ข้างต้น



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของเรซิน

ที่มา : อภิพงษ์, 2545

2.3.7 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นวิธีการในการกำจัดมลพิษของสารที่มีขนาดเล็ก จนถึงระดับโมเลกุล โลหะหนักจะถูกจับไว้ในรูพรุนของสารดูดซับ (Adsorbent) สารดูดซับที่นิยมใช้คือ ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เป็นถ่านที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด เป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้กำจัดโลหะหนักในน้ำ

2.3.8 การดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption)

การดูดซับทางชีวภาพเป็นวิธีการที่ใช้วัสดุชีวภาพ มาใช้ในการบำบัดโลหะหนักที่ละลายในน้ำเสียด้วยวิธีการดูดซับ การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีใช้ตัวดูดซับนั้นก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ใช้เทคโนโลยีที่ไม่ยุ่งยากนัก และยังไม่ต้องใช้สารเคมีในปริมาณมากในการบำบัดน้ำการศึกษาจึงนี้ได้เลือกวิธีการดูดซับทางชีวภาพมาใช้นำบำบัดน้ำเสียที่มีตะกั่วปนเปื้อนโดยใช้เศษแครอท เป็นวัสดุดูดซับ ในส่วนของกลไกการดูดซับ ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ และข้อดีของการดูดซับทางชีวภาพ นั้นจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2.4 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับหรือการดูดติดผิว (Adsorption) เป็นขบวนการที่สารตัวกลางคิ่งโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในของเหลวหรือก๊าซให้มาเกาะจับ และติดอยู่บนผิวของมัน จัดเป็นการเคลื่อนย้ายสารจากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของแข็ง โมเลกุลหรือคอลลอยด์เรียกว่า adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของ adsorbate เรียกว่า adsorbent

2.4.1 ทฤษฎีการดูดซับ

การดูดซับ (Adsorption) สามารถเกิดขึ้นได้ระหว่างสารที่ต่างสถานะกัน เช่น ก๊าซกับของแข็งหรือของเหลวกับของแข็ง การดูดซับแบ่งได้เป็น 4 ชนิด คือ

2.4.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) เกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ โดยชั้นของโมเลกุลที่ถูกดูดซับจะเกิดขึ้นแบบหลายชั้น (Multilayer)

2.4.1.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) เกิดจากพันธะทางเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ชั้นของโมเลกุลที่ถูกดูดซับมักเป็นชั้นเดียว (Monolayer) การดูดซับชนิดนี้เป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับไม่ได้ และเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง

2.4.1.3 การดูดซับแบบแลกเปลี่ยนประจุ (Exchange adsorption) การดูดซับแบบนี้อาศัยการดูดติดด้วยแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic) บริเวณผิวเมื่อตัวดูดซับมีประจุ และเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับซึ่งมีประจุกับตัวดูดซับที่มีประจุตรงข้ามกัน

2.4.1.4 การดูดซับแบบเจาะจง (Specific adsorption) เกิดขึ้นเนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันอยู่บนผิว แต่ไม่ได้มีผลทำให้ตัวถูกดูดซับเปลี่ยนโครงสร้าง

2.4.2 ขั้นตอนการดูดซับหรือการดูดติดผิว อาจแบ่งได้เป็น 4 ช่วงดังนี้

2.4.2.1 Bulk solution transport คือการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าหาสารดูดติดผิวได้โดยการเคลื่อนที่ อาจเกิดเนื่องจากการกวนน้ำจนทำให้เกิดการปั่นป่วน หรือเกิดเนื่องจากกลไกการเคลื่อนที่ระดับโมเลกุล ที่เกิดจากการแพร่กระจายแบบบราวเนียน

2.4.2.2 Film diffusion คือขั้นตอนที่โมเลกุลของตัวถูกละลาย เข้ามาถึงสารดูดติดผิว ซึ่งมีฟิล์มของน้ำห่อหุ้มอยู่โดยรอบคล้ายเยื่อต่างๆ โมเลกุลต้องแทรกตัวผ่านฟิล์มน้ำให้ได้จึงจะเข้าถึงผิวของสารดูดติดผิวได้

2.4.2.3 Pore diffusion คือขั้นตอนที่เนื่องจากสารดูดติดผิวมีลักษณะพื้นที่ผิวเป็นโพรง หรือช่องว่างภายในโมเลกุลของตัวถูกละลาย จึงต้องแทรกตัวเข้าไปถึงช่องว่างภายในสารดูดติดผิวจึงจะมีการดูดติดผิวเกิดขึ้น

2.4.2.4 Adsorption คือขั้นตอนหลังจากที่มีการเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่มีการดูดติดผิว ทำให้สารถูกดูดติดผิวเกิดการดูดติดผิวทางกายภาพขึ้น

2.5 การดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption)

การดูดซับด้วยสารชีวมวล หมายถึง ปรากฏการณ์การเลือกจับประจุบวกในสารละลายด้วยสารชีวมวล ความสามารถในการดูดซับโลหะมีกลไก ดังนี้

- (1) การดูดกลืนเข้าไปในเซลล์ หรือการจับด้วย Flagella
- (2) การแลกเปลี่ยนไอออน
- (3) การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน
- (4) การดูดซับ
- (5) การตกตะกอนของสารอินทรีย์

ชีวมวลมีหลายประเภททั้งแบคทีเรีย ยีสต์ รา และสาหร่าย ซึ่งจะมีอยู่ 2 ลักษณะ คือรูปของเซลล์ที่มีชีวิต เช่น สาหร่าย *Nostoc paludosum* (น้ำผึ้ง คงโคกรวด, 2544) ในรูปของเซลล์ที่ไม่มีชีวิตเช่น การดูดซับสังกะสีโดยใช้ biosolids (Lisa Norton, 2004) ดังแสดงในตารางที่ 2.1

2.5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับด้วยสารชีวมวล (Factors influencing adsorption)

2.5.1.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (Size and Surface area)

ในการดูดซับจะเกิดขึ้นได้มากหรือน้อย จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะส่วนอัตราการดูดซับ จะเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดสารดูดซับเมื่อสารดูดซับนั้นไม่มีรูพรุน พื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดลดลง ซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้นด้วย แต่สำหรับสารดูดซับที่มีรูพรุนมากๆ พื้นที่ที่ใช้การดูดซับจะอยู่ในรูพรุน เพราะฉะนั้นในความสามารถในการดูดซับจะไม่ขึ้นกับวัตถุ Diamadopoulos และคณะ(1992) ได้ศึกษาการดูดติดผิวของฟีนอลด้วยถ่านกัมมันต์ที่ทำจากถ่านลิกไนต์ พบว่าปริมาณของฟีนอลที่ถูกดูดติดมีค่าสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวน้อยกว่าถึง 3.5 เท่า Randtke และ Snoeyink (1983) กล่าวว่า ความจุของการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์เมื่อจะมีค่าแตกต่างกันไปตามขนาดของเม็ดถ่านกัมมันต์ เขวาลักษณ์ และหิรัชัย (2545) ศึกษาการดูดซับของขนาดควัสตูลีวมวล 1.397-1.981, 0.495-1.397, 0.240-0.495 มิลลิเมตร พบว่าความสามารถของการดูดซับโลหะหนักของขนาดควัสตูลีวมวล ที่มีขนาดเล็กดูดซับได้ดีที่สุดคือขนาด 0.240-0.495 มิลลิเมตร เนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการดูดซับมากทำให้วัสตูลีวมวลสัมผัสกับโลหะมากขึ้นทำให้ดูดซับได้มาก และเมื่อทำการตรึงเซลล์จะมีการดูดซับโลหะหนักได้มากกว่าก่อนการตรึงเซลล์

2.5.1.2 ลักษณะของสารที่ถูกดูดซับ (Nature of Adsorbate)

การดูดติดผิวจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายมีค่าลดลง เนื่องจากในกระบวนการดูดติดผิวตัวถูกละลาย หรือตัวถูกละลายจะถูกดึงออกจากตัวทำละลาย นอกจากนี้ถ้าอัตราการดูดติดผิวถูกควบคุมด้วยอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายจะมีผลต่ออัตราการดูดติดผิวอีกด้วย และขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายจะแปรผกผันกับอัตราการดูดติดผิว Bernardin (1976) กล่าวว่าปัจจัยที่สำคัญ 3 อย่างที่มีผลต่อการดูดติดผิวสารอินทรีย์คือโพลาลิตี (Polarity) ของโครงสร้างโมเลกุล และน้ำหนักโมเลกุลของสารอินทรีย์ โมเลกุลที่มีโพลาลิตีสูงสามารถที่จะละลายน้ำได้ดี ทำให้ยากต่อการดูดติดผิว โครงสร้างของโมเลกุลมีผลต่อพื้นผิวที่ยึดติดบนผิวคาร์บอน เช่น วงแหวนอะโรมาติก (Aromatic Rings) ทำให้การดูดติดผิวดีขึ้น น้ำหนักโมเลกุลมีผลต่อการดูดติดผิวเนื่องมาจากผล 2 ประการ คือ ความสามารถในการละลายต่ำและแรงดึงดูดสูง จึงสามารถที่จะดูดติดผิวได้ง่าย อย่างไรก็ตามกฎเหล่านี้จะใช้ได้สำหรับโมเลกุลสารอินทรีย์ที่เล็กกว่าขนาดรูพรุนของคาร์บอน โดยขนาดรูพรุนของผิวคาร์บอนจะอยู่ระหว่าง 10 อังสตรอม จนถึง 1000 อังสตรอม ดังนั้นโมเลกุลที่ใหญ่กว่า 1000 อังสตรอมจะไม่สามารถดูดติดได้

2.5.1.3 พีเอช (pH)

ค่าความเป็นกรดเป็นด่างมีอิทธิพลต่อการดูดติดผิว เนื่องจากไฮโดรเจนไอออน และไฮดรอกซิลไอออน สามารถดูดติดผิวได้อย่างแข็งแรง ส่วนการดูดติดผิวของไอออนอื่นๆ มีผลมาจากพีเอชของสารละลาย นอกจากนี้พีเอชยังมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของไอออนของสารประกอบที่เป็นกรดหรือเบสในการดูดติดผิว ผลของพีเอชต่อการดูดติดผิวของตะกั่วบน Geothite ซึ่งพบว่าเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นทำให้การดูดติดผิวของตะกั่วเพิ่มขึ้นด้วย พีเอชขึ้นกับสภาพความเป็นขั้วของพื้นผิวตัวดูดซับ เช่น หากพีเอชลดลงจะส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออน(H_3O^+)ที่พื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้การดูดซับไอออนลบเกิดขึ้นได้มาก นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออน และไฮดรอกซิลไอออนก็เป็นไอออนที่สามารถดูดติดผิวได้อย่างดี การศึกษาระดับพีเอชที่เหมาะสมโดยใช้หญ้า Alfafa กำจัดแคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว และสังกะสีพบว่า พีเอชที่เหมาะสมอยู่ที่ระดับพีเอช 5 ความสามารถในการดูดซับของแคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว และสังกะสี คือ 7.1, 7.7, 43 และ 4.9 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (Gardea-Torresdey J.L, et al., 1998) ทั้งนี้ Zhou และ Kliff (1991) ได้อธิบายว่า พีเอชต่ำจะเกิดการจับกันระหว่างไฮโดรเนียม ไอออนที่จะส่งแรงผลักไม่ให้โลหะหนักเข้ามาจับกับจุดกัมมันต์ที่เป็นประจุลบบนผิวเซลล์ จึงทำให้โลหะหนักถูกจับได้น้อยลง ซึ่งผลของแรงผลักนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชลดลง

2.5.1.4 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการเมตาบอลิซึมของเซลล์จุลินทรีย์ และยังมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารประกอบชีวมวล เช่น เกิดการ Denature เนื่องจากความร้อนทำให้โปรตีนสูญเสียคุณสมบัติไป ซึ่งอาจทำให้ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักจากสารละลายของจุลินทรีย์บางชนิดเปลี่ยนไป เช่น การดูดซับยูเรเนียม โมลิบดีนัม แคดเมียม และแมงกานีส โดยสาหร่ายเซลล์เดียว *Chlorella regularis* ทั้งเซลล์แบบมีชีวิต และเซลล์แบบไม่มีชีวิต พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการดูดซับตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป เช่นเดียวกับการศึกษาการดูดซับแคดเมียมโดย *Stichococcus basillaris* พบว่าที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เซลล์จุลินทรีย์ที่มีชีวิตจะถูกยับยั้งการส่งผ่านแคดเมียมเข้าไปในเซลล์ได้อย่างสมบูรณ์ และการสะสมแคดเมียมจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น แต่กรณีเซลล์ที่ตายอุณหภูมิไม่มีผลต่อการดูดซับ การศึกษาของนักวิจัยหลายท่านสามารถสรุปได้ว่าผลของอุณหภูมิจึงมีผลต่อการดูดซับโลหะหนักของเซลล์บางชนิดเท่านั้น

2.5.1.5 เวลาสัมผัส (Contact time)

เวลาสัมผัสในกระบวนการดูดติดผิว เป็นพารามิเตอร์สำคัญอย่างหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดติดผิว และอายุการใช้งานของการดูดติดผิวแบบต่อเนื่อง โดยตัวดูดซับที่แตกต่างกันจะใช้เวลาในการดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิดแตกต่างกัน เช่น ในการใช้เปลือกกล้วย

ดูดซับสารละลายตะกั่ว โดยใช้เวลาในการดูดซับ 5-180 นาที พบว่าปฏิกิริยาจะเข้าสู่สมดุลที่ 60 นาที (จรรยาพร, 2549) และการใช้ถ่านมุลโคดูดซับสารละลายทองแดง พบว่าปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุล 30 นาที (ชนยิตรี, 2549)

2.5.2 ข้อดีของการดูดซับทางชีวภาพ (Kratochvil และ Volesky, 1998)

2.5.2.1 ค่าใช้จ่ายต่ำ

2.5.2.2 มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารละลายโลหะหนัก

2.5.2.3 ลดปริมาณสารเคมีหรือกากตะกอนทางชีวภาพ

2.5.2.4 ไม่ต้องเติมสารอาหาร

2.5.2.5 สามารถนำสารดูดซับกลับมาใช้อีกได้

2.5.2.6 สามารถที่จะนำโลหะหนักที่ถูกดูดซับกลับมาใช้ได้

ตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างงานวิจัยการดูดซับโลหะหนักทางชีวภาพ (Biosorption)

วัสดุดูดซับ	ประเภท	โลหะหนัก	การสะสม (% น้ำหนักแห้ง)	ผู้ศึกษา
<i>Tolypothrix</i>	Active	Cd^{2+}	1.90	Inthorn et al. (1996)
<i>Rhizopus arrhisus</i>	Inactive	Cr^{6+}	5.81	Sug และ Kutsal (1996)
		Fe^{3+}	3.48	
<i>Sargassum baccularia</i>	Inactive	Cd^{2+}	2.25	Chu et al (1997)
<i>Aspergillus niger</i>	Active	Pb^{2+}	0.23	Kapoor และ Virarughavan
		Cd^{2+}	0.13	(1998)
		Cu^{2+}	0.71	
		Ni^{2+}	0.18	
<i>Chlorella vulgaris</i>	Inactive	Cr^{6+}	2.78	Kapoor และ Virarughavan
		Fe^{3+}	2.45	(1998)
<i>Rhizopus arrhisus</i>	Inactive	Cr^{6+}	5.81	Sag et al.(1998)
		Fe^{3+}	3.47	
<i>Spirulina platensis</i>	Active	Cu^{3+}	0.35	Zhou et al.(1998)
<i>Laminaria japonica</i>	Inactive	Cu^{2+}	7.50	Zhou et al.(1998)
		Cd^{2+}	8.40	
<i>Sargassum kjellmanianum</i>	Inactive	Cu^{2+}	9.30	Zhou et al.(1998)

ตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างงานวิจัยการดูดซับโลหะหนักทางชีวภาพ (Biosorption) (ต่อ)

วัสดุดูดซับ	ประเภท	โลหะหนัก	การสะสม (% น้ำหนักแห้ง)	ผู้ศึกษา
<i>Durvillaea potatorum</i>	Inactive	Cd ²⁺	10.2	Matheiekal และ Yu(1999)
		Pb ²⁺	33.15	
		Zn ²⁺	8.26	
<i>Cymodocea nodosa</i>	Inactive	Cu ²⁺	5.27	Sanchez et al (1999)
		Zn ²⁺	4.66	
<i>Durvillaea potatorum</i>	Inactive	Cu ²⁺	7.31	Yu และ Kaewsam(1999)
		Cd ²⁺	12.37	
<i>Laminaria sp.</i>	Inactive	Cd ²⁺	0.24	Figueira et al (2000)
<i>Ecklonia sp.</i>	Inactive	Cd ²⁺	0.20	Figueira et al (2000)
<i>Homosira sp.</i>	Inactive	Cd ²⁺	0.21	Figueira et al (2000)
<i>Chlorella vulgaris</i>	Active	Ni ²⁺	0.00003	Wong et al (2000)
<i>Chlorella miniata</i>	Active	Ni ²⁺	0.00001	Wong et al (2000)
<i>Durvillaea potatorum</i>	Inactive	Ni ²⁺	6.63	Yu และ Kaewsam(1999)
<i>Padina sp.</i>	Inactive	Cu ²⁺	5.08	Kaewsam (2002)

ที่มา : Pavasant, Apiratikul, Sungkhum และคณะ, 2005

2.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับ

การวิเคราะห์ระบบการดูดซับ (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2539) ระบบการดูดซับได้ถูกวิเคราะห์โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้รูปแบบของสมการอย่างง่าย แล้วนำสมการเขียนกราฟเพื่อสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่างๆ ได้ การวิเคราะห์ระบบดูดซับได้มีผู้วิเคราะห์ไว้อยู่ 3 กลุ่ม คือ

2.6.1 สมการของ Langmuir

มีเงื่อนไขว่าการดูดซับจะติดเฉพาะผิวชั้นเดียว และ โมเลกุลของสารถูกดูดซับไม่มีการเคลื่อนที่อิสระบนผิว

$$q = \frac{q_m K_a C}{1 + K_a C} \quad \dots(1)$$

เมื่อ q = ปริมาณของสารถูกดูดซับ/ปริมาณของตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล

q_m = ปริมาณของสารถูกดูดซับ/ปริมาณของตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล

K_a = ค่าคงที่ของการดูดซับ, ลิตรของตัวดูดซับต่อมิลลิกรัมของสารถูกดูดซับ

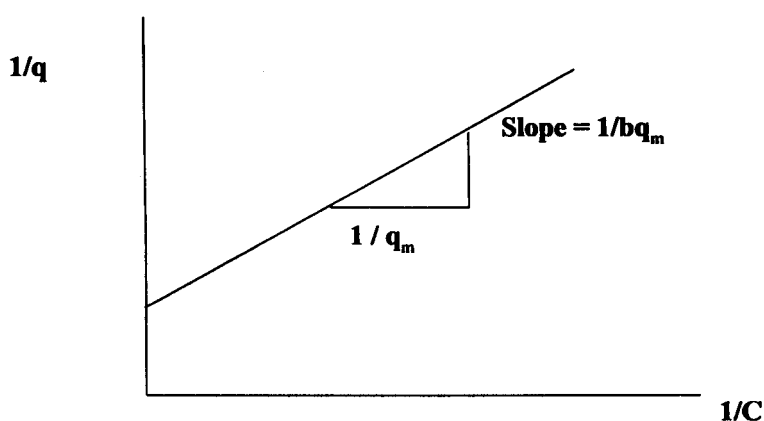
C = ความเข้มข้นของสารละลาย, มิลลิกรัมต่อลิตร

เพื่อให้สามารถหาค่า q_m และ K_a ได้ด้วยวิธีกราฟ จึงต้องจัดรูปแบบสมการใหม่ให้เป็นสมการดังนี้

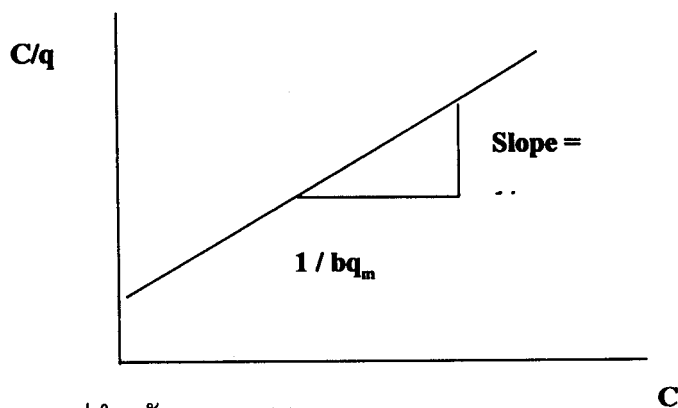
$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \left[\frac{1}{K_a q_m} \right] * \frac{1}{C} \quad \dots(2)$$

$$\frac{C}{q} = \frac{C}{1/q_m} + \frac{1}{K_a q_m} \quad \dots(3)$$

จากสมการดังกล่าวสามารถเขียนกราฟได้ดังนี้



ภาพที่ 2.4 กราฟสำหรับสมการ (2) ของ Langmuir



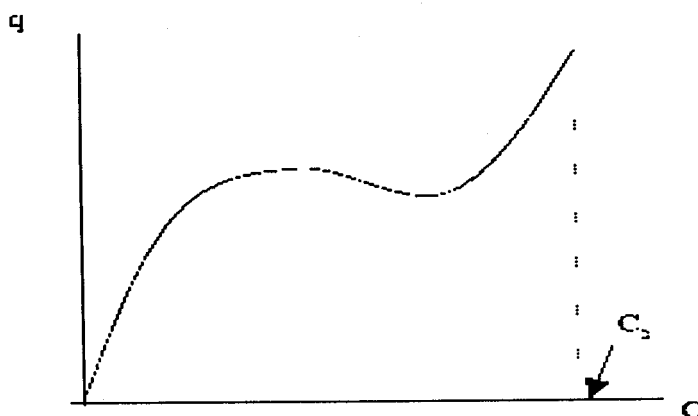
ภาพที่ 2.5 กราฟสำหรับสมการ (3) ของ Langmuir

2.6.2 สมการของ Brunauer Emmett Teller (BET)

มีเงื่อนไขว่าโมเลกุลของสารถูกดูดซับไม่มีการเคลื่อนที่อิสระบนผิว และการดูดซับมีระดับคงที่สำหรับทุกๆ โมเลกุล

$$q = \frac{q_m K_a C}{(C_s - C)[1 + (K_a - 1)(C/C_s)]} \quad \dots(4)$$

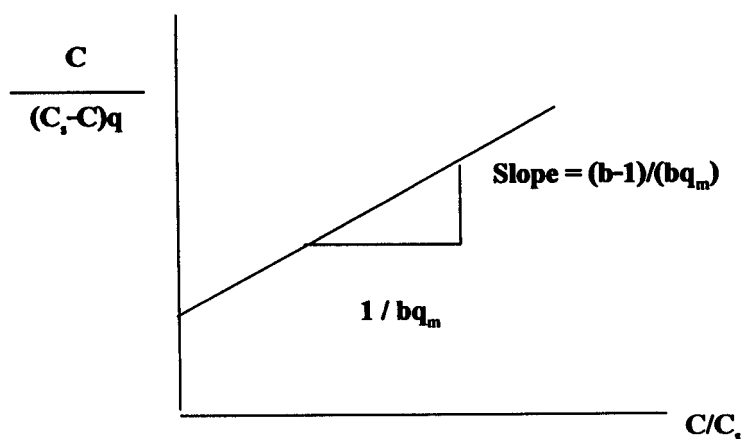
เมื่อ C_s = ความเข้มข้นอิ่มตัวของสารถูกดูดซับ ณ ทุกๆ ชั้น, มิลลิกรัมต่อลิตร
 K_a = ค่าคงที่ของการดูดซับ



ภาพที่ 2.6 กราฟหาค่า C_s สำหรับสมการ (4) ของ BET

เพื่อให้สามารถหาค่า K_a และ q_m ได้ด้วยวิธีเขียนกราฟ จึงต้องจัดรูปสมการให้เป็นสมการดังนี้

$$\frac{C}{(C_s - C)q} = \frac{1}{K_a q_m} + \left[\frac{K_a - 1}{K_a q_m} \right] \left[\frac{C}{C_s} \right] \quad \dots(5)$$



ภาพที่ 2.7 กราฟสำหรับสมการ (5) ของ BET

2.6.3 สมการของ Freundlich

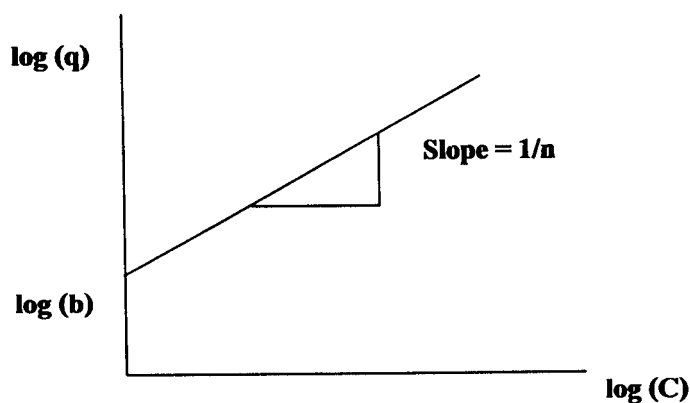
เป็นสมการที่นิยมใช้กันมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้กับสารละลายที่ค่อนข้างเจือจาง และมีความเข้มข้นค่อนข้างต่ำ

$$q = K_f C^{1/n} \quad \dots(6)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } K_f &= \text{ค่าคงที่} \\ C^{1/n} &= \text{ค่าคงที่} \end{aligned}$$

เพื่อให้สามารถเขียนกราฟหาค่า K_f และ n ได้ด้วยวิธีกราฟจึงจำเป็นต้องใช้ Logarithm มาจัดรูปสมการใหม่ ให้เป็นสมการดังนี้

$$\log(q) - \log(K_f) - 1/n \log(C)$$



ภาพที่ 2.8 กราฟสำหรับสมการ (6) ของ Freundlich

2.7 แครอท

แครอท (*L.var.sativa* อยู่ใน family: Apiaceae (Umbelliferae)) มีถิ่นกำเนิดอยู่แถบเอเชียกลางจนถึงทางตะวันออก ในระยะแรกแครอทถูกนำมาใช้เป็นพืชสมุนไพร เริ่มนำมาประกอบอาหารในศตวรรษที่ 20 และเป็นที่รู้จักกันมานานแล้ว แครอทเจริญได้ดีในดินที่ร่วนซุย หน้าดินลึก มีอินทรีย์วัตถุสูง ระบายน้ำได้ดีและค่อนข้างเป็นกรดใช้ต้นทุนในการผลิตและแรงงานต่ำ เป็นพืชกินหัวที่ปลูกมากในประเทศไทยอีกชนิดหนึ่ง นิยมนำมาประกอบอาหาร

2.7.1 ส่วนประกอบของแครอท

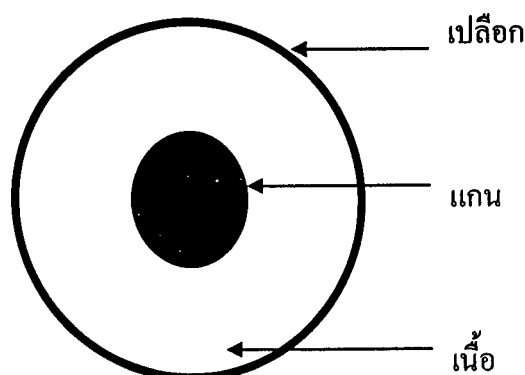
แครอทเป็นพืชสองฤดูโดยฤดูแรกเจริญทางต้น ใบ ราก ฤดูที่สองจะเป็นระยะการเจริญของดอกเมล็ด เมื่อตัดหัวตามขวาง จะแสดงให้เห็นส่วนประกอบของหัวอย่างเด่นชัด คือ

2.7.2.1 ส่วนของเนื้อ (Outer core) ประกอบด้วย

- 1) เปลือกบาง (Periderm)
- 2) ส่วนของเนื้อ (Cortex) ซึ่งประกอบด้วย ท่ออาหาร และเป็นแหล่งเก็บอาหารสำรองเนื้อ ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของน้ำตาล เป็นส่วนประกอบ 45 - 65 % ของหัว

2.7.2.2 ส่วนของแกน (Inner core) ประกอบด้วย

- 1) ท่อน้ำ (Xylem)
- 2) แกน (Pith)



ภาพที่ 2.9 ลักษณะหัวผ่าตามขวาง

2.8 การดูดซับโลหะหนักของเศษแครอท

เนื่องจากเส้นใยเศษแครอทเป็นสารดูดซับประเภท bioadsorbent โดยจากการศึกษาของ B. Nasemejada (2004) ซึ่งนำเศษแครอทมาใช้ในการดูดซับคอปเปอร์ โครเมียม และสังกะสี พบว่าเศษแครอทมีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และเพนติน ซึ่งประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันชนิดต่างๆ เช่น หมู่เมทอกซิล ($-OCH_3$) หมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$) และหมู่ฟีนอลิก ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้มีประจุลบทำหน้าที่จับหรือดูดซับกับประจุบวกของโลหะหนักที่อยู่ในน้ำเสียได้ จากโครงสร้างของเศษแครอทดังกล่าว การศึกษานี้จึงได้มีแนวคิดในการนำเศษแครอทซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งมาใช้เป็นตัวดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีตะกั่วปนเปื้อน

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึง รูปแบบการวิจัย เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี การเตรียมตัวดูดซับ และวิธีดำเนินการทดลอง

3.1 รูปแบบการวิจัย

เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental research) โดยทำการทดลอง 2 ครั้ง ถ้าผลการทดลองที่ได้ไม่ใกล้เคียงกันจึงทำการทดลองครั้งที่ 3 แล้วนำผลการทดลองที่ได้มาเฉลี่ย โดยทำการศึกษา 5 ปัจจัย คือ ชนิดของเศษแครอท ปริมาณที่เหมาะสม ระยะเวลาสัมผัส ระดับพีเอช และความเข้มข้น เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดตะกั่ว ในห้องปฏิบัติการที่สภาวะแตกต่างกันคือ ปริมาณเศษแครอทแบบบด และไม่บด 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 กรัม ระยะเวลาสัมผัส 8 ระดับ (ที่เวลา 2.5, 5.0, 10, 15, 30, 60, 90 และ 120 นาที) ระดับพีเอช 5 ระดับ (พีเอช 2, 3, 4, 5 และ 6) ความเข้มข้น 6 ระดับ (10, 50, 100, 150, 250 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ขั้นตอนได้แก่

ขั้นตอนที่ 1 การศึกษาเบื้องต้น เพื่อหาชนิดและปริมาณที่เหมาะสมของเศษแครอท คือ เศษแครอทแบบบด และแบบไม่บด เพื่อนำมาใช้ในการดูดซับน้ำเสียที่มีตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปริมาณเศษแครอททั้งแบบบดและไม่บด 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 กรัม ที่ปริมาตรน้ำเสีย 30 มิลลิลิตร โดยนำไปเขย่าในเครื่องเขย่าสารเคมีที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ผลที่ได้ดูจากประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของเศษแครอทที่ดีที่สุด ณ จุดสมดุลมาใช้งานในขั้นตอนต่อไป

ขั้นตอนที่ 2 การหาสภาวะที่เหมาะสมที่แตกต่างกัน 3 ปัจจัย คือ การหาระยะเวลาที่เหมาะสม ระดับพีเอชที่เหมาะสม และความเข้มข้น ซึ่งเมื่อได้ค่าระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมแล้วจึงนำมาหาค่าพีเอชและเมื่อได้ช่วงพีเอชที่เหมาะสมจะนำมาหาความเข้มข้นต่อไป

3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องมือ

- 3.2.1.1 ตู้อบความร้อน รุ่น 1375 FX ยี่ห้อ Shel lab บริษัทเคลตาเล็บบอราตอรีจำกัด
- 3.2.1.2 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง รุ่น LC6201S ยี่ห้อ Sartorius บริษัทไซแอนติฟิคจำกัด
- 3.2.1.3 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH-meter) รุ่น PP25 ยี่ห้อ Sartorius
- 3.2.1.4 เครื่องปั่นรุ่น BE 122G ยี่ห้อ OTTO บริษัทออดโต้คิงส์คลาส จำกัด
- 3.2.1.5 เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) รุ่น Analyst 200 ยี่ห้อ Perkin elmer บริษัท Perkin elmer
- 3.2.1.6 เครื่องแยกผสมสารเคมี รุ่น VS-8480SF บริษัทวิชั่นไซแอนติฟิคจำกัด

3.2.2 อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่จำเป็น เช่น กระดาษกรองเมมเบรน 0.45 ไมครอนบีกเกอร์ กระบอกตวง ขวดวัดปริมาตร ขวดรูปชมพู่ ปิเปต แท่งแก้วคน ช้อนตักสาร ตะแกรงคัดแยกขนาด เป็นต้น

3.2.3 สารเคมี

- 3.2.3.1 ตะกั่วไนเตรท ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$)
- 3.2.3.2 กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
- 3.2.3.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
- 3.2.3.4 กรดไนตริก (HNO_3) 10%

3.3 การเตรียมสารดูดซับที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 การเตรียมเศษแครอทแบบไม่บดเพื่อใช้เป็นสารดูดซับ

นำเศษแครอทมาหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นจนระดับพิเอชของน้ำล้างสุดท้ายเป็นกลาง จากนั้นนำไปตากแดด แล้วนำไปอบในตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง เก็บเศษแครอทไว้ในโถดูดความชื้น (Desicator)

3.3.2 การเตรียมเศษแครอทแบบบดเพื่อใช้เป็นสารดูดซับ

นำเศษแครอทมาหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจนระดับพิเอชของน้ำล้างสุดท้ายเป็นกลาง จากนั้นนำไปตากแดดให้แห้ง อบในตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา นาน 24 ชั่วโมง บดด้วยเครื่องบดฟิช แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด mesh No.10 แต่ไม่ผ่าน sieve No.20 นำไปอบในตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง แล้วจึงเก็บเศษแครอทไว้ในโถดูดความชื้น

3.4 วิธีดำเนินการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้ แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุด ดังนี้

3.4.1 การศึกษาเบื้องต้น (Preliminary study)

การศึกษาเบื้องต้น เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเศษแคโรท แบบบดและแบบไม่บด ที่จะนำมาใช้ในการดูดซับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และหาปริมาณที่เหมาะสมของเศษแคโรท เมื่อมีการแปรเปลี่ยนปริมาณของเศษแคโรทที่ใช้ในการทดลอง คือ 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 กรัม โดยการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วทำการปิเปตน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาณ 30 มิลลิลิตร เติมเศษแคโรทแบบบด และไม่บดที่ปริมาณ 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 กรัม จากนั้นนำไปเขย่าในเครื่องเขย่าสารเคมีที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ผลที่ได้ดูจากประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของเศษแคโรท ณ จุดสมดุล และเลือกค่าปริมาณของเศษแคโรทที่ให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดที่ดีที่สุด ณ จุดสมดุล มาใช้งานในขั้นตอนต่อไป

3.4.2 การหาสภาวะที่เหมาะสม ระยะเวลาสัมผัส พีเอช และความเข้มข้น

3.4.2.1 การหาระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการกำจัดตะกั่ว

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตรแล้วทำการตวงน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาณ 100 มิลลิลิตร เติมเศษแคโรทปริมาณ 0.5 กรัม และนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เก็บตัวอย่างน้ำที่ระยะเวลาสัมผัส 8 ระดับ (ที่เวลา 2.5, 5.0, 10, 15, 30, 60, 90 และ 120 นาที) จากนั้นนำของผสมในขวดทดลองไปกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน 0.45 ไมครอน เพื่อแยกระหว่างส่วนที่เป็นของแข็งกับส่วนที่เป็นของเหลว นำส่วนที่เป็นของเหลวไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วที่เหลือ โดยใช้เครื่อง AAS

3.4.2.2 การหาประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียที่ระดับพีเอช 2-6

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วทำการปิเปตน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาณ 30 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ ปรับระดับพีเอชของน้ำเสียโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และกรดไฮโดรคลอริก ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยปรับระดับพีเอชเริ่มต้นเป็น 2 และนำไปเขย่าในเครื่องเขย่าสารเคมีที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที โดยระยะเวลาในการเขย่าจะได้อาจจากการทดลองระยะเวลาสัมผัส (Equilibrium Time) จากนั้นนำของผสมในขวดทดลองไปกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน 0.45 ไมครอน เพื่อแยกระหว่างส่วนที่เป็นของแข็งกับส่วนที่เป็นของเหลวนำส่วนที่เป็นของเหลวในแต่ละขวดไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วที่เหลือ โดยใช้เครื่อง AAS จากนั้นทำการทดลองซ้ำใหม่โดยปรับพีเอชให้เป็น 3, 4, 5 และ 6

3.4.2.3 การศึกษาผลความเข้มข้นของตะกั่วต่อการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 10, 50, 100, 150, 250 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร จากสารละลายมาตรฐานตะกั่ว ทำการปรับพีเอช โดยใช้ค่าพีเอชที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วดีที่สุด และเปิดน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาณ 30 มิลลิลิตร เติมเศษแครอท แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที อุณหภูมิห้อง ระยะเวลาในการเขย่าจะได้จากระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของเศษแครอท จากนั้นจึงกรองเศษแครอทผ่านกระดาษกรองเมมเบรน 0.45 ไมครอน และนำส่วนที่ใสไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วโดย AAS และนำค่าที่ได้ไปหาไอโซเทอมของการดูดซับต่อไป

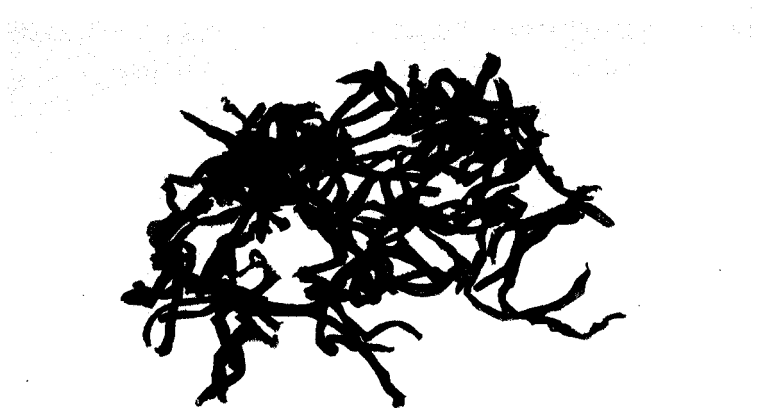
บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล

การทดลองนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง เพื่อหาความสามารถของเศษแครอท ในการดูดซับสารละลายตะกั่วสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้น โดยมีรายละเอียดของผลการวิจัยดังนี้ ผลการศึกษาการหาชนิดและปริมาณที่เหมาะสมของเศษแครอทในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ผลการศึกษาการหาเวลาที่เหมาะสมของเศษแครอทในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ผลของพีเอชที่มีต่อการดูดซับตะกั่ว และผลของไอโซเทอร์มต่อการดูดซับตะกั่ว

4.1 ผลการศึกษาเบื้องต้น (Preliminary study) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเศษแครอทแบบบดและไม่บด และปริมาณที่เหมาะสมของเศษแครอทในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสีย

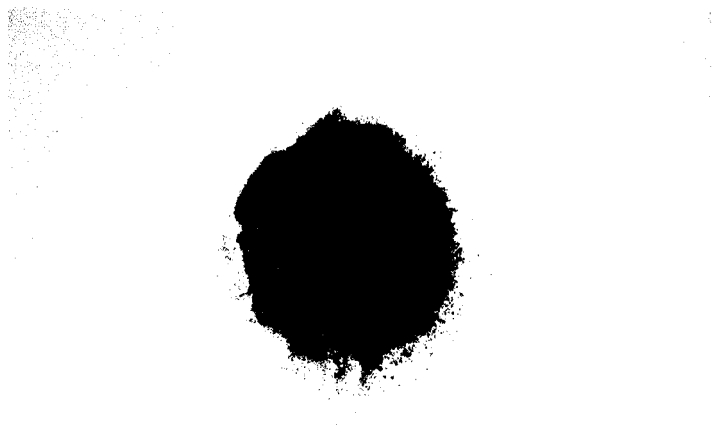
จากการศึกษาเบื้องต้นเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเศษแครอทแบบบดและไม่บด ลักษณะทางกายภาพของเศษแครอทแบบไม่บด (ผ่านการอบแล้ว)จะมีสีน้ำตาลเข้มดังภาพที่ 4.1



1 22:16

ภาพที่ 4.1 เศษแครอทแบบไม่บด

เศษแครอทแบบบดเมื่อผ่านการตากแห้ง อบ บด ร่อน แล้วพบว่าเศษแครอทจะมีเนื้อค่อนข้างละเอียดมีขนาดใกล้เคียงกันดังภาพที่ 4.2 ซึ่งการศึกษารั้งนี้ต้องการให้ขนาดพื้นที่ผิวดูดซับใกล้เคียงกันโดยไม่คำนึงถึงการคัดขนาด



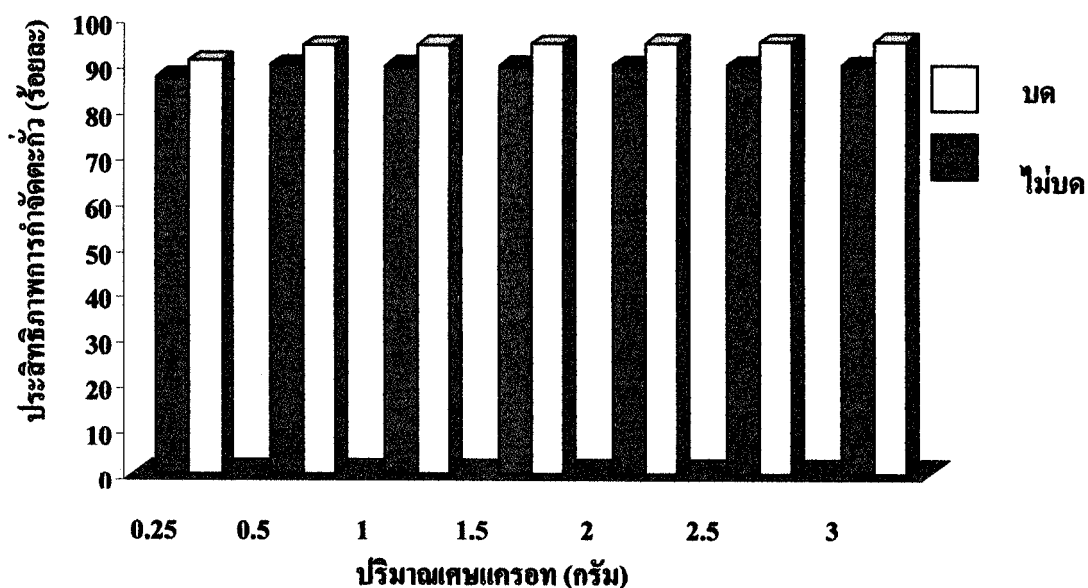
ภาพที่ 4.2 เศษแครอตแบบบด

จากการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีปริมาณตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร เมื่อมีการแปรเปลี่ยนปริมาณของเศษแครอตที่ใช้ในการทดลอง คือ 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 กรัม ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.3 พบว่าปริมาณเศษแครอตทั้งแบบบดและไม่บด ที่ปริมาณ 0.25 กรัม ประสิทธิภาพในการกำจัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในช่วงที่สองที่ปริมาณตั้งแต่ 0.5 กรัม พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้งที่มีการเพิ่มปริมาณสารดูดซับ (เศษแครอต) ในปริมาณที่มากขึ้น โดยประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจากเศษแครอตแบบบดสูงกว่าเศษแครอตแบบไม่บด โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วร้อยละ 94.05 และ 89.66 ตามลำดับ ซึ่งเศษแครอตแบบบดมีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วสูงกว่าเศษแครอตแบบไม่บดเนื่องจากความสามารถในการดูดซับผิวของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ คือเศษแครอตแบบบดจะมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้นด้วย สอดคล้องกับการทดลองของดวงดาว ศัตยากุล (2548) พบว่ากอกดุมหนูแบบปั่นละเอียด ซึ่งมีพื้นที่ผิวมากจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมได้ดีกว่าแบบตัดซึ่งมีพื้นที่ผิวน้อยกว่า

ตารางที่ 4.1 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วแบบบดและแบบไม่บด ณ เวลาสัมผัส 24 ชั่วโมง

ปริมาณเศษแครอท (กรัม)	ความเข้มข้นที่เหลือของตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว (ร้อยละ)	
	แบบไม่บด	แบบบด	แบบไม่บด	แบบบด
0.25	1.29	0.93	87.03	90.65
0.5	1.03	0.59	89.66	94.05
1.0	1.03	0.58	89.64	94.12
1.5	1.03	0.57	89.62	94.29
2.0	1.02	0.54	89.77	94.51
2.5	1.02	0.51	89.80	94.89
3.0	1.02	0.50	89.78	94.97

ข้อมูลจากตารางที่ 4.1 สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วกับปริมาณต่างๆ ของเศษแครอททั้ง 2 แบบ ณ เวลาสัมผัส 24 ชั่วโมง แสดงในภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วแบบบดและแบบไม่บดที่ปริมาณต่างๆ

4.2 ผลการศึกษาระยะเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสมของการกำจัดตะกั่วโดยใช้เศษแครอท

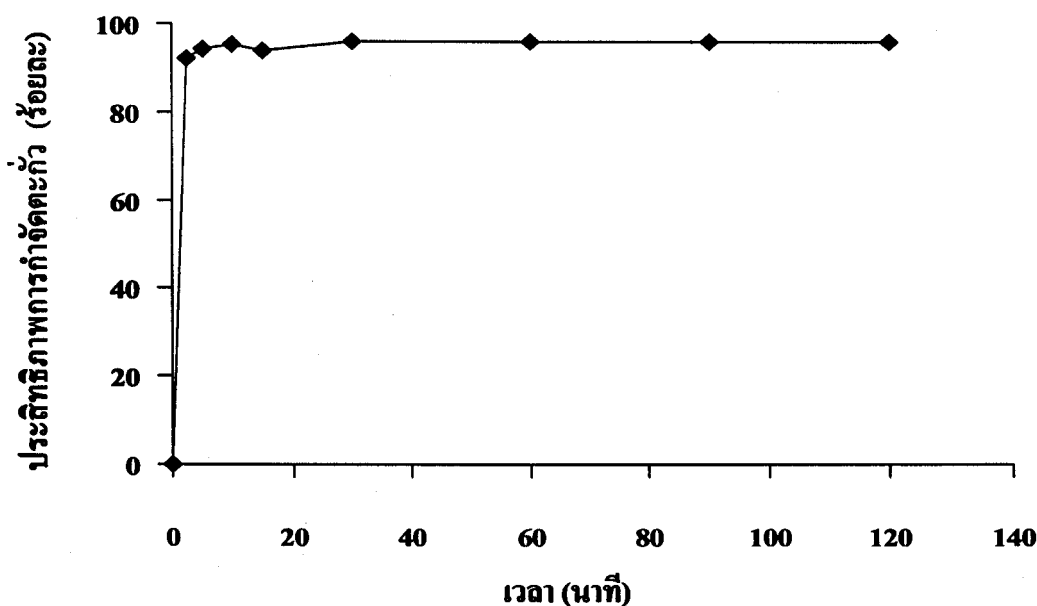
จากผลการศึกษาปริมาณและชนิดที่เหมาะสมของเศษแครอทในหัวข้อ 4.1 พบว่าปริมาณและชนิดที่เหมาะสมคือ เศษแครอทแบบบด 0.5 กรัมต่อปริมาตรน้ำเสีย 30 มิลลิลิตร ดังนั้นในการศึกษาหาเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสม พิเศษ และความเข้มข้น จึงเลือกใช้ปริมาณเศษแครอท 0.5 กรัม

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจากเศษแครอทที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ต่างๆ

ระยะเวลาสัมพัทธ์ (นาทีก)	ความเข้มข้นที่เหลือของตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว (ร้อยละ)
2.5	0.79	92.10
5.0	0.58	94.11
10	0.45	95.49
15	0.59	94.08
30	0.39	96.02
60	0.39	96.07
90	0.39	96.01
120	0.39	96.05

โดยจากการทดลองเดิมเศษแครอทแบบบด 0.5 กรัม ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีตะกั่วความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 30 มิลลิลิตร แล้วนำไปเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงทำการเก็บตัวอย่างน้ำ หลังทำการเขย่าแล้ว (2.5, 5.0, 10, 15, 30, 60, 90 และ 120 นาที) มาทำการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการกำจัดที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ต่างๆ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2 และแสดงดังภาพที่ 4.4 พบว่าสามารถแบ่งช่วงเวลาของปฏิกิริยาออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรก ตั้งแต่เวลา 2.5 ถึง 15 นาที ช่วงที่สอง คือ ตั้งแต่เวลา 30 ถึง 120 นาที โดยในช่วงแรกประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วมีแนวโน้มไม่คงที่ (เพิ่มขึ้นและลดลง) สำหรับช่วงที่สองประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วมีแนวโน้มคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงแรกที่เวลา 2.5 ถึง 15 นาที ปฏิกิริยาในการดูดซับระหว่างสารดูดซับ (Adsorbent) กับสารถูกดูดซับ (Adsorbate) ยังเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ แรงดึงดูดหรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารดูดซับ (Adsorbent) กับสารถูกดูดซับ (Adsorbate) ยังไม่แข็งแรงพอ จึงทำให้เกิดการคายการดูดซับ (Desorption) ระหว่างสารทั้ง 2 ชนิด (จากเศษ

เครื่องกับตะกั่ว) ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วมีแนวโน้มไม่คงที่ สำหรับในช่วงที่สอง ที่เวลา 30 ถึง 120 นาที ปฏิกริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ โดยเริ่มเข้าสู่จุดสมดุลที่เวลา 30 นาที จึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในช่วงเวลาดังกล่าวมีแนวโน้มคงที่ ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 96.02% โดยข้อมูลจากตารางที่ 4.2 สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วกับระยะเวลาสัมผัส ดังแสดงในภาพที่ 4.4

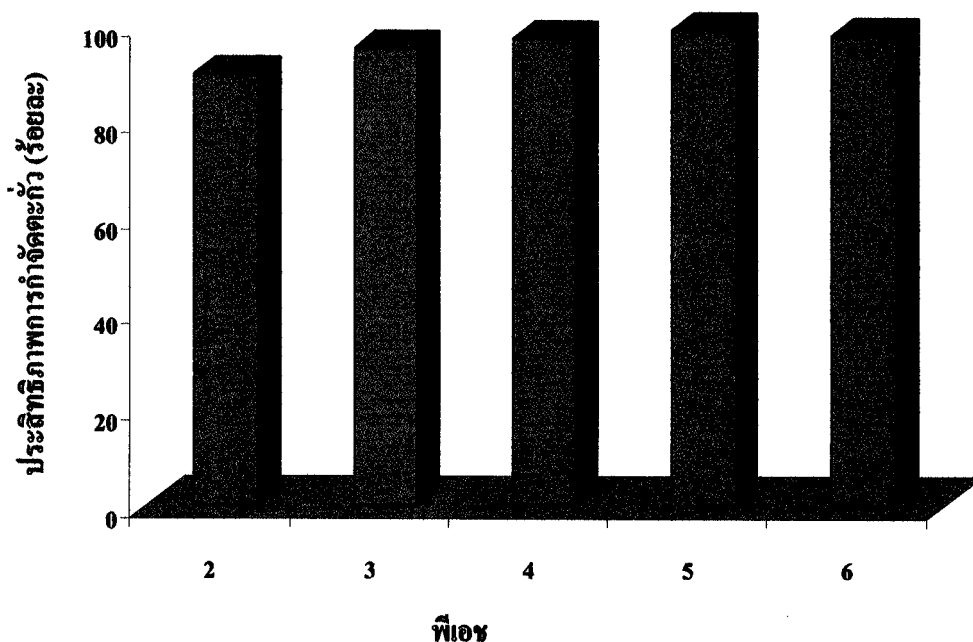


ภาพที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสและประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว

4.3 ผลของระดับพีเอชในการกำจัดตะกั่ว

การทดลองใช้น้ำเสียดังเคราะห์ตะกั่วที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดโดยใช้เศษแครอทแบบบด 0.5 กรัม ปริมาณน้ำตัวอย่าง 30 มิลลิลิตร ความเร็วรอบในการเขย่า 200 รอบต่อนาที โดยใช้เวลาในการเขย่าซึ่งได้จากการทดลองที่ 4.2 คือ 30 นาที โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับพีเอช ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.5 พบว่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น จากพีเอช 2-6 เปอร์เซ็นต์การกำจัดมีค่าเท่ากับ 90.06, 95.25, 97.29, 99.20 และ 98.23 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าช่วงพีเอชที่ 4-6 พบว่าเป็นช่วงที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นจึงเป็นช่วงที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่ว โดยที่พีเอช 5 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจะมีค่ามากที่สุดคือ 99.20% ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของสังข์ เวสวัชตระกูล (2540) ซึ่งทำการลดปริมาณตะกั่วโดยใช้ผักตบชวาเป็นสารชีวมวลที่ปรับสภาพพบว่าที่พีเอช 5 ประสิทธิภาพในการลดปริมาณตะกั่วสูงสุด 98.81% ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผล

การทดลองได้ว่าเศษแครอทอาจจะมียิ่งค์ประกอบหลัก ซึ่งประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ชนิดต่างๆ ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้จะมีประจุเป็นลบ (Negative charge) ซึ่งมีคุณสมบัติในการดึงดูดสารดูดซับที่เป็นไอออนที่มีประจุบวก (Positive charge) ในที่นี้คือไอออนตะกั่ว โดยที่พีเอชต่ำๆ สารละลายจะมีค่าความเป็นกรดสูง ซึ่งจะมีจำนวนไฮดรอกไซด์ (OH^-) ไอออนน้อยมีความเข้มข้นของโปรตอน (H^+) สูง ซึ่งโปรตอน (H^+) จะไปแย่งกับไอออนของโลหะ เพื่อไปจับที่ผิวของเศษแครอทซึ่งโปรตอน (H^+) จะมีจำนวนมากในสภาวะเป็นกรด ทำให้โอกาสแย่งจับที่ผิวของเศษแครอทมีมากขึ้นด้วย และโปรตอนมีประสิทธิภาพในการเข้าจับได้ดีกว่า ซึ่งจะทำให้พันธะระหว่างไอออนของโลหะกับเศษแครอทยังไม่คงที่ เมื่อสภาพพีเอชของสารละลายสูงขึ้นจำนวน ไฮดรอกไซด์ (OH^-) ไอออนเพิ่มมากขึ้นโปรตอน (H^+) น้อยลง ทำให้ไอออนของโลหะมีความสามารถในการจับกับผิวของเศษแครอทได้ดีมากขึ้น จะเห็นได้จากประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่ระดับพีเอชสูงกว่าจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าระดับพีเอชที่ต่ำกว่า



ภาพที่ 4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่ระดับพีเอช 2 ถึง 6

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่ระดับพีเอช 2 ถึง 6 ณ เวลาสัมผัส 30 นาที

ระดับพีเอช	ความเข้มข้นที่เหลือของตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว (ร้อยละ)
2	1.09	90.06
3	0.61	95.25
4	0.30	97.29
5	0.10	99.20
6	0.17	98.23

4.4 ผลของไอโซเทอร์มของการดูดซับตะกั่ว (Adsorption Isotherm)

จากการทดลองการดูดซับตะกั่วโดยใช้เศษแครอทแบบบด 0.5 กรัม ที่ระดับพีเอชเท่ากับ 5 โดยเติมเศษแครอทในสารละลายตะกั่วที่มีความเข้มข้นต่างกันคือ 10, 50, 100, 150, 250 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร และนำไปเปรียบเทียบกับไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir และ Freundlich โดยที่แบบจำลองของ Langmuir เป็นการดูดซับที่ตัวถูกดูดซับเรียงกันเพียงชั้นเดียวบนผิวตัวดูดซับ และแบบจำลองแบบ Freundlich เป็นสมการที่นิยมใช้กัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้กับสารละลายที่ค่อนข้างเจือจาง และมีความเข้มข้นค่อนข้างต่ำ ซึ่งแสดงคุณสมบัติผิวเชิงซ้อน (Heterogeneous surface) ในการดูดซับ ซึ่งผลการทดลองประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วเมื่อเติมเศษแครอทในความเข้มข้นที่ต่างกัันดังตารางที่ 4.4 และผลการศึกษาไอโซเทอร์มแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วเมื่อเติมเศษแครอทในความเข้มข้นที่ต่างกัน

ระดับความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นที่เหลือของตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว (ร้อยละ)
10	1.55	94.410
50	4.24	91.506
100	10.19	89.802
150	15.70	89.533
250	34.00	86.400
500	127.00	74.600

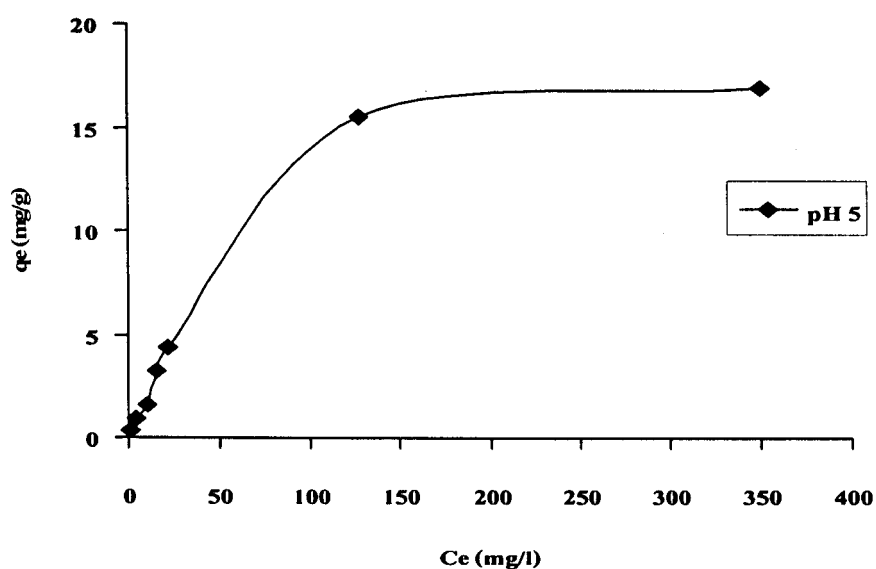
ตารางที่ 4.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับ Langmuir และ Freundlich ที่พีเอช 5

พีเอช	Freundlich isotherm	Langmuir isotherm
5	$K_f = 0.678 \text{ mg/g}$	$q_{\max} = 28.985 \text{ mg/g}$
	$1/n = 0.8234$	$b = 0.008 \text{ l/mg}$
	$R^2 = 0.9856$	$R^2 = 0.9835$

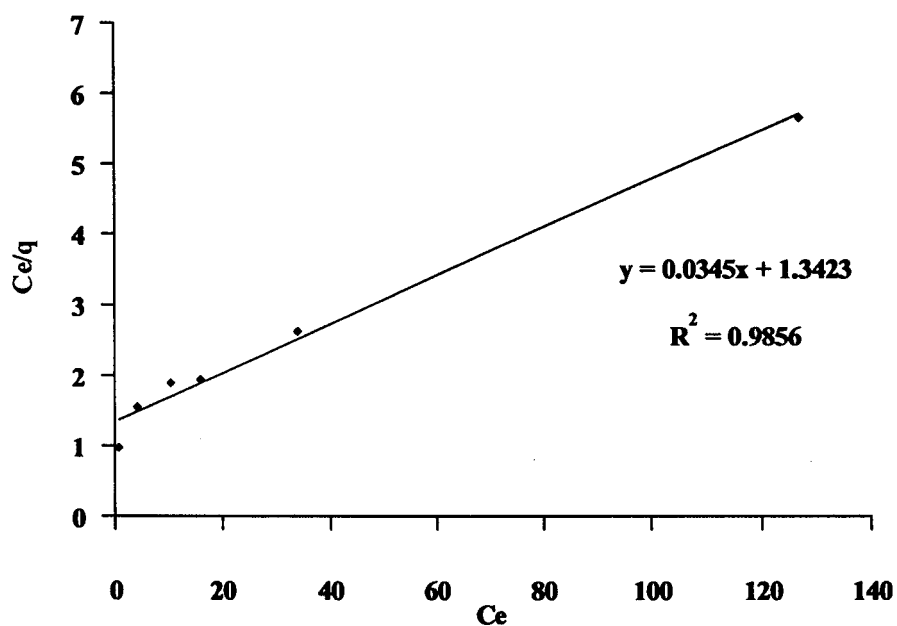
ตารางที่ 4.6 ปริมาณการดูดซับตะกั่วโดยเศษแครอทที่พีเอชที่ดีที่สุด

พีเอช	ความเข้มข้นเริ่มต้นของ ตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นที่เหลือของตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถดูดซับตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อกกรัม)
5	10	0.55	0.36
	50	4.24	0.96
	100	10.19	1.59
	150	15.70	3.24
	250	21.80	4.40
	500	127.00	15.56

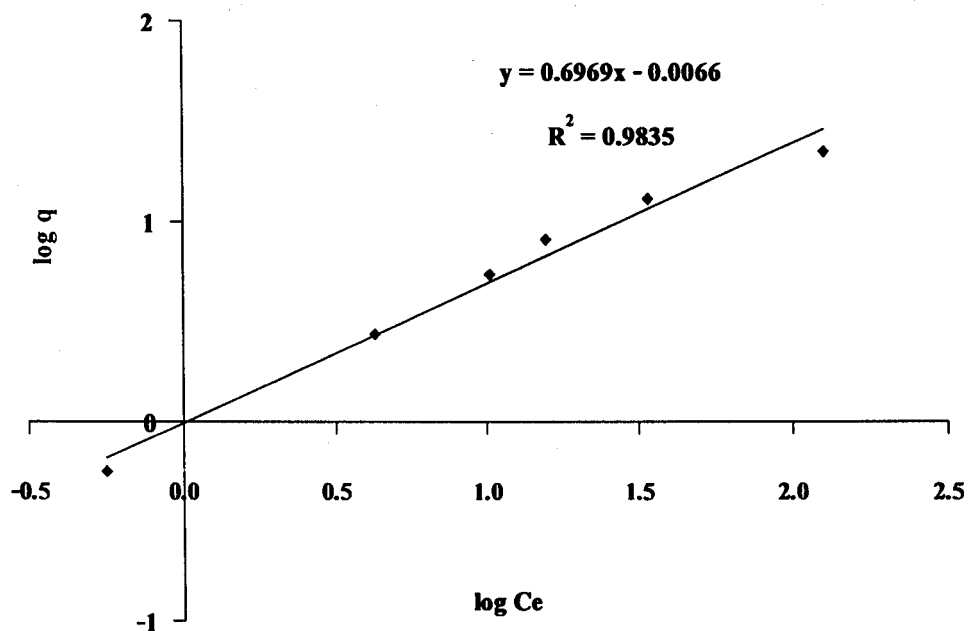
โดยสามารถนำข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 4.6 มาเขียนกราฟแสดงความสามารถในการดูดซับตะกั่วโดยเศษแครอท ได้ดังนี้



ภาพที่ 4.6 ความสามารถดูดซับตะกั่วในการดูดซับตะกั่วโดยเศษแครอทที่พีเอชที่ดีที่สุด



ภาพที่ 4.7 Langmuir isotherm ของการดูดซับตะกั่วจากเศษแครอท



ภาพที่ 4.8 Freundlich isotherm ของการดูดซับตะกั่วจากเศษแครอท

จากภาพที่ 4.7 และ 4.8 ผลการทดลองการหาไอโซเทอมการดูดซับของตะกั่วพบว่ารูปแบบหรือพฤติกรรมการดูดซับมีความใกล้เคียงทั้งสมการของ Freundlich และสมการของ Langmuir ซึ่งมีค่า $R^2 = 0.9856$ และ 0.9835 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับตะกั่ว ($q_{\max}$) ของชีวมวลต่างๆ

วัสดุชีวมวล	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกกรัม)	พีเอช	ผู้ศึกษา
ถ่านคาร์บอนจากเปลือกต้นปาล์ม (Palm shell activated carbon)	95.2	3.0 และ 5.0	Gulnaziya Issabayeva, 2005
ใยมะพร้าว (Cair)	48.84	4.5	Quek et al, 1998
ใบหม่อน (Mulberry leaves)	33.557	2.0	ธีรวิทย์, 2549
เท้าน้ำ (<i>Spirogyra spp.</i>)	27.548	4.0	คมสัน, 2549
ผลตะแบก (<i>L.floribunda</i> Jack)	18.382	2.0	พัฒนัชวัลพร, 2549
ฟางข้าวบาร์เลย์ (Barley straw)	15.2	5.5	Larsen และ Schierup, 1981
เกล็ด (Rice husk)	4.0	6.0	Khalid et al, 1998
เปลือกสน (Hazel-nut shell)	1.78	4.0	Cimino et al, 2000
ลำต้นโอ๊ก (Oak stem)	0.75	5.2	Prasad และ Freitas, 2000
เศษแครอท (Carrot Residues)	28.985	5.0	การศึกษานี้

จากตารางที่ 4.7 พบว่า ความสามารถในการดูดซับของถ่านคาร์บอนจากเปลือกต้นปาล์มมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ ใยมะพร้าว ใบหม่อน เท้าน้ำ และเศษแครอท ตามลำดับ ส่วนลำต้นโอ๊กมีความสามารถในการดูดซับน้อยที่สุด จะเห็นว่าความสามารถในการดูดซับของชีวมวลที่ต่างชนิดกันจะให้ความสามารถในการดูดซับที่แตกต่างกัน ส่วนหนึ่งเนื่องมาจากองค์ประกอบและโครงสร้างที่ต่างกันเช่น หมู่คาร์บอกซิลิก เอไมด์ และหมู่อื่นๆ ซึ่งจากการศึกษานี้พบว่า วิธีการดูดซับทางชีวภาพนั้นมีข้อดีกว่าวิธีอื่นๆก็คือ ค่าใช้จ่ายต่ำ สามารถเพิ่มปริมาณชีวมวลได้ง่าย และรวดเร็ว โดยจากการศึกษานี้จะพบว่าการนำเศษแครอทมาใช้ในการดูดซับ เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการประยุกต์ใช้วัสดุเหลือทิ้งที่ไม่มีประโยชน์มาเพิ่มคุณค่าให้มากขึ้น โดยเศษแครอทมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วเท่ากับ 28.985 มิลลิกรัมต่อกกรัม

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองเพื่อศึกษาความสามารถในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เศษแครอทสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1 ชนิดและปริมาณที่เหมาะสมของเศษแครอทในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสีย

5.1.1 จากการศึกษานชนิดและปริมาณที่เหมาะสมจากเศษแครอททั้ง 2 แบบ คือ แบบบดและไม่บด เพื่อใช้ในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเศษแครอทแบบบดมีประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสีย มากกว่าแบบไม่บด โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วร้อยละ 94.05 และ 89.66 ตามลำดับ และปริมาณที่เหมาะสมของเศษแครอทอยู่ที่ระดับ 0.5 กรัม

5.1.2 การหาระยะเวลาสัมผัสที่สภาวะสมดุลของการกำจัดตะกั่วโดยใช้เศษแครอทพบว่าระยะเวลาสัมผัสของสารดูดซับ (Adsorbent) กับสารถูกดูดซับ (Adsorbate) มีอิทธิพลต่อการกำจัดตะกั่วในน้ำเสีย ผลการศึกษาพบว่าที่เวลา 30 นาที เป็นระยะเวลาที่การกำจัดตะกั่วของเศษแครอทเข้าสู่สมดุล โดยมีค่าประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับร้อยละ 96.02

5.1.3 ระดับพีเอชในการกำจัดตะกั่วของเศษแครอกระดับพีเอชต่างๆ ที่จะพิจารณาจากค่าประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่เวลา 30 นาที เนื่องจากเป็นระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่สมดุลแล้ว จากการศึกษพบว่าที่ระดับพีเอช 5 เป็นระดับพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดตะกั่วของเศษแครอท โดยให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่ระดับพีเอชอื่นๆ ซึ่งที่พีเอช 5 มีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วสูงสุดเท่ากับร้อยละ 99.20

5.1.4 การหาไอโซเทอมโดยการเปรียบเทียบสมการของ Langmuir และ Freundlich พบว่ารูปแบบการดูดซับของเศษแครอทต่อตะกั่ว ใกล้เคียงสมการของ Freundlich และสมการของ Langmuir ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจเท่ากับ $(R^2) = 0.9856$ และ 0.9835 ตามลำดับ

5.2. ข้อเสนอแนะในการวิจัย

5.2.1 ควรศึกษาการจัดโลหะหนักชนิดอื่นๆ เช่น โครเมียม, นิกเกิล, สังกะสี, แคดเมียม และปรอท โดยใช้เศษแครอตเป็นสารดูดซับ

5.2.2 ควรศึกษาผลหรืออิทธิพลของการแทรกสอด (Interference) ของโลหะหนักหลายๆ ชนิด จากน้ำเสียจริง

5.2.3 ควรศึกษาถึงหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนเศษแครอตโดยใช้เทคนิคอินฟราเรด (Infrared spectroscopy, IR) สำหรับการดูดซับที่เกิดขึ้น

5.2.4 ควรศึกษาผลของความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิด ที่จะนำมาใช้ในการทดลองสำหรับการดูดซับด้วยเศษแครอต

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. การบำบัดน้ำเสีย. สำนักพิมพ์มิตรนราการพิมพ์ กรุงเทพมหานคร, 2539.
- คมสัน มงคลสวัสดิ์ และไพรัตน์ แก้วสาร. การดูดซับตะกั่วออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้
เทาน้ำ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 16.
26-27 ตุลาคม 2549. โรงแรมราม่า การ์เด้นส์: กรุงเทพมหานคร, 2549.
- จรรยาพร ไชยวิเศษ. การกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียโดยใช้เปลือกกล้วย. การประชุมวิชาการวิศวกรรม
เคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 16. 26-27 ตุลาคม 2549. โรงแรมราม่า
การ์เด้นส์ : กรุงเทพมหานคร, 2549.
- ชนยิตรี แสงจิตร. การใช้ประโยชน์จากถ่านมูลโคสำหรับดูดซับสารละลายทองแดงในน้ำสังเคราะห์.
การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 16.
26-27 ตุลาคม 2549. โรงแรมราม่า การ์เด้นส์ : กรุงเทพมหานคร, 2549.
- ดวงดาว สัตยากุล และไพรัตน์ แก้วสาร. การดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ชีวมวลที่
เตรียมจากต้นกกคุ้มหนู. การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย
ครั้งที่ 16. 26-27 ตุลาคม 2549. โรงแรมราม่า การ์เด้นส์ : กรุงเทพมหานคร, 2549.
- น้ำผึ้ง คุณโคกกรวด. การกำจัดแคดเมียมและตะกั่วในสารละลายโดย *Nostoc palu dosum* และ
Phormidium angustissimum. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยมหิดล, 2544.
- ธีระวุฒิ บุญล้อม และ ไพรัตน์ แก้วสาร. การดูดซับตะกั่วออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยไบโหม่อน.
การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 16.
26-27 ตุลาคม 2549. โรงแรมราม่า การ์เด้นส์ : กรุงเทพมหานคร, 2549.
- พัฒนชวลพร สีนรัมย์ และคณะ. การดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ผลตะแบก
การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 6. 7-9 มีนาคม 2549. โรงแรมอมรินทร์
ลากูน : พิษณุโลก, 2550.
- เขวถลักษณ์ ศรีนาม และหิรัญย์ คำสิงห์. การดูดซับโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะโดยใช้
กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย. วิทยานิพนธ์. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 2545.
- ดาวัดต์ สุดญูตั้งใจ และคณะ. การดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เศษแครอท. การ
ประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 6 วันที่ 7-9 มีนาคม 2549. โรงแรมอมรินทร์ลากูน
: พิษณุโลก, 2550.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- สังข์ เวสารัชชระกุล. การลดปริมาณตะกั่วในน้ำเสียโดยใช้ผักตบชวาที่ปรับสภาพ วิทยานิพนธ์
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี. มหาวิทยาลัยมหิดล, 2540.
- อภิพงษ์ พุฒิกำ. เอกสารประกอบการเรียนวิชา Unit Operation of Environmental Engineering.
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 2545.
- Bernardin.F.E, JR. Selection and Specifying Activated Carbon Adsorption Systems. J. Chemical
Engineering: 77-82, 1975.
- B. Nasernejada and T. Esslam Zadehb. Camparison for biosorption modeling of heavy metals
(Cr)(III),Cu (II), Zn (II) adsorption from wastewater by carrot residues. Department
of Biology. College of Science Shiraz University, 2004.
- Cimino, G., Passerini and A., Toscano. Removal of toxic cationsand Cr (VI) from aqueous
solution by hazelnut shell. Water Res. 34(11): 2955–2962. 2000.
- Diamadopoulos, E.,Loannidis,S and Sakellaropoulos,G.P.As. Removal from potable water. Water
Quality Office: 454-458, 1992.
- Fuersteneu., MC. and Palmer , B.R. Anionic flotation of Oxide and Silicates Flotation.
New york SME of AIME: 148-196. 1976.
- Gulnaziya Issabayeva. Removal of lead from aqueous solutions on palm shell activated carbon.
Chemical Engineering Department. University Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia
Bioresource Technology 97: 2350–2355, 2006.
- Hutchinson,T.C. and K.M. Meema. Lead mercury cadmium and arsenic in the Environment.
Institute for Environmental Studies University of Toronto Canada, 1987.
- J.L. Gardea-Torresdey., J.H.Gonzalez, K.J. Tiemann, and O. Rodriguez. Biosorption of Cadmium,
Chromium, Lead and Zinc by biomass of Medicago Sativa(Alfalfa). J.of Hazardous
materials. V.57: 29 – 39, 1998.
- Khalid, N., and other. Removal of lead from aqueous solutions using rice husk. J. Sci. Technol.
33(15): 2349–2362 , 1998.
- Kratochvil, D. and Volesky ,B. Advances in the biosorption of heavy metals. Trends
Biotechnol: 291-300, 1998.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Larsen, V.J. and Schierup, H.H. The use of straw for removal of heavy metals from wastewater. J. Environ. Qual. 10 (2):188–193, 1981.
- Lisa Norton and Kanagaratnam Baskaran. Biosorption of zinc from aqueous solution using Biosolids. Deakin University. Australia, 2005.
- Naylor, L.M. and R.R. Dague. Simulation of lead removal by chemical treatment. J. AWWA.74: 560-565, 1975.
- Prasad, M.N.V. and Freitas, H. Removal of toxic metals from solution by leaf, stem and root phytomass of *Quercus ilex* L. (holly oak). J. Environmental Pollution. 110(2): 277–283, 2000.
- Prasert Pavasant, Ronbanchob Apiratikul and Vimornrat Sungkhum. Biosorption of Cu^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} and Zn^{2+} using dried marine green macroalga *Caulerpa lentillifera*. Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering. Chulalongkorn University, 2005.
- Quek S.Y., Al Duri, B. Wase, D.A.J and Forster C.F. Coir as abiosorbent of copper and lead. Process Safety Environ. Prot. 76 (B1): 50–54, 1998.
- Randtke. S.J and Snoeyink, Adsorptive Capacity. J. AWWA,75: 406-413, 1983.
- Yu, Q., Matheickal, J.T. and Latten, J. Heavy Metal adsorption properties of marine alga *E. radiata*, *D. potatorum* and *L. japonica* Chinese J. Chem. 6: 68-72, 1998.
- Zhou.J.L .and Kiff, R.J. The uptake of copper from aqueous solution by immobilized fungal biomass. J. Chem. Technol. Biotechnol: 317-330, 1991.

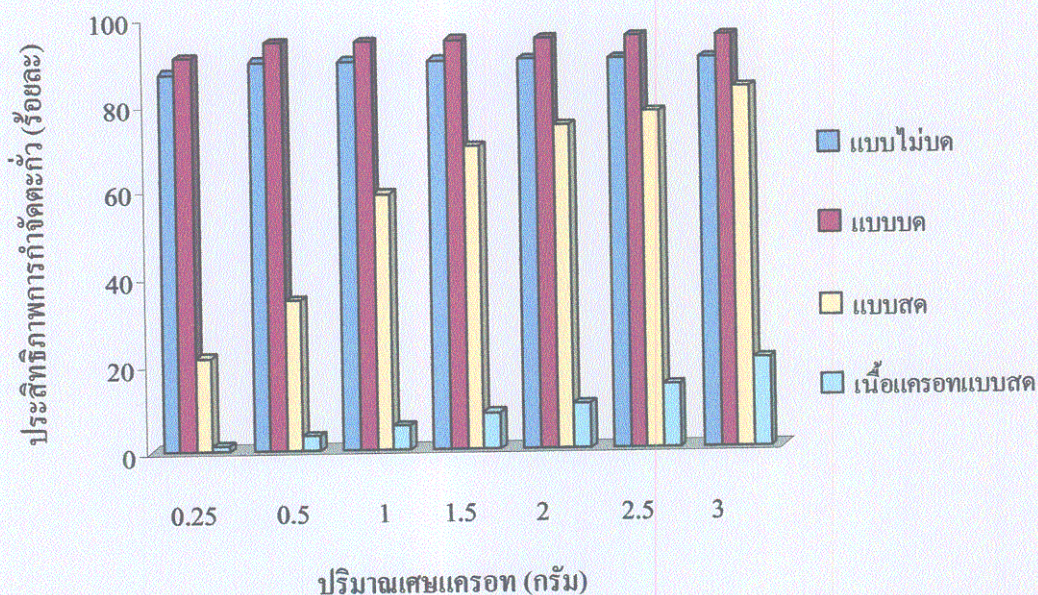
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ตารางแสดงข้อมูลและผลการทดลอง

ภาคผนวก ก
ตารางแสดงข้อมูลและผลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ผลการเปลี่ยนแปลงตะกั่วเมื่อเติมเศษแครอทแบบสดในปริมาณที่ต่างกัน

ปริมาณเศษแครอท แบบสด (กรัม)	ปริมาณตะกั่วที่วัดได้จากเครื่อง AAS (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	Pb ²⁺ ลดลง (%)
0.25	7.840	7.862	7.852	21.50
0.5	6.581	6.540	6.560	34.55
1.0	3.980	4.200	4.012	58.80
1.5	3.006	3.056	3.031	69.69
2.0	2.648	2.448	2.556	74.44
2.5	2.254	2.278	2.266	77.44
3.0	2.055	1.604	1.829	82.84



ภาพที่ ก.1 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วแบบสด แบบบด แบบไม่บด และเนื้อแครอท

ตารางที่ ก.2 ผลการเปลี่ยนแปลงตะกั่วเมื่อเติมเนื้อแคโรทในปริมาณที่ต่างกัน

ปริมาณเนื้อแคโรท แบบสด (กรัม)	ปริมาณตะกั่วที่วัดได้จากเครื่อง AAS (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	Pb ²⁺ ลดลง (%)
0.25	9.90	9.85	9.87	1.3
0.5	9.52	9.84	9.68	3.2
1.0	9.23	9.68	9.45	5.5
1.5	9.29	9.06	9.18	8.2
2.0	9.04	8.86	8.99	10.1
2.5	8.23	8.99	8.56	14.4
3.0	7.30	8.55	7.95	20.5

ตารางที่ ก.3 ผลการเปลี่ยนแปลงตะกั่วเมื่อเติมเศษแคโรทแบบไม่บดในปริมาณที่ต่างกัน

ปริมาณเศษแคโรท แบบไม่บด (กรัม)	ปริมาณตะกั่วที่วัดได้จากเครื่อง AAS (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	Pb ²⁺ ลดลง (%)
0.25	1.290	1.305	1.297	87.03
0.5	1.040	1.028	1.034	89.66
1.0	1.035	1.037	1.036	89.64
1.5	1.029	1.048	1.038	89.62
2.0	1.032	1.015	1.023	89.77
2.5	1.024	1.015	1.020	89.80
3.0	1.025	1.020	1.022	89.78

ตารางที่ ก.4 ผลการเปลี่ยนแปลงตะกั่วเมื่อเติมเศษแคโรทแบบบดในปริมาณที่ต่างกัน

ปริมาณเศษแคโรท แบบบด (กรัม)	ปริมาณตะกั่วที่วัดได้จากเครื่อง AAS (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	Pb ²⁺ ลดลง (%)
0.25	0.954	0.917	0.935	90.65
0.5	0.591	0.598	0.595	94.05
1.0	0.592	0.584	0.588	94.12
1.5	0.564	0.578	0.571	94.29
2.0	0.545	0.552	0.549	94.51
2.5	0.522	0.501	0.511	94.89
3.0	0.508	0.598	0.503	94.97

ตารางที่ ก.5 ผลการเปลี่ยนแปลงตะกั่วเมื่อเติมเศษแคโรทในระยะเวลาสัมผัสที่แตกต่างกัน

ระยะเวลาสัมผัส (นาท)	ปริมาณตะกั่วที่วัดได้จากเครื่อง AAS (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	Pb ²⁺ ลดลง (%)
2.5	0.783	0.795	0.790	92.10
5	0.524	0.654	0.589	94.11
10	0.439	0.453	0.451	95.49
15	0.611	0.569	0.592	94.08
30	0.402	0.400	0.398	96.02
60	0.394	0.385	0.393	96.07
90	0.394	0.405	0.399	96.01
120	0.393	0.397	0.395	96.05

ตารางที่ ก.6 ผลการเปลี่ยนแปลงตะกั่วเมื่อเติมเศษแคโรทในระดับพีเอชที่ต่างกัน

ระดับพีเอช	ปริมาณตะกั่วที่วัดได้จากเครื่อง AAS (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	Pb ²⁺ ถดถอง (%)
2	1.096	1.092	1.094	90.06
3	0.619	0.610	0.615	95.25
4	0.300	0.302	0.301	97.29
5	0.097	0.103	0.100	99.20
6	0.179	0.175	0.177	97.23

ตารางที่ ก.7 ผลการเปลี่ยนแปลงตะกั่วเมื่อเติมเศษแคโรทในความเข้มข้นที่ต่างกัน

ระดับความเข้มข้น	ปริมาณตะกั่วที่วัดได้จากเครื่อง AAS (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	Pb ²⁺ ถดถอง (%)
10	0.500	0.632	0.559	94.410
50	4.312	4.200	4.247	91.506
100	10.200	10.195	10.198	89.802
150	15.77	15.64	15.70	89.533
250	34.24	33.95	34.00	86.400
500	127.9	126.4	127.00	74.600

ภาคผนวก ข
หลักการและวิธีการวิเคราะห์ปริมาณตะกั่ว

ภาคผนวก ข

หลักการและวิธีการวิเคราะห์ปริมาณตะกั่ว

ข.1 หลักการและวิธีการวิเคราะห์ปริมาณตะกั่ว

วิธีอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตเมตรี (Atomic Absorption Spectrophotometry : AAS) เป็นการศึกษาความสามารถของอะตอมในการดูดกลืนคลื่นแสง ในช่วงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อัลตราไวโอเลตหรือวิสิเบิล โดยผ่านสารละลายเกลืออนินทรีย์เข้าไปในเปลวไฟที่ได้จากการออกซิแดนท์และเชื้อเพลิง ซึ่งทำหน้าที่อะตอมไม่ซับซ้อนให้เป็นอะตอมอิสระที่เป็นไอ และอยู่ที่สภาวะพื้น (Ground state) เมื่อมีคลื่นแสงจากแหล่งกำเนิดคลื่นแสงที่เหมาะสมผ่านเข้าไปชนอะตอมอิสระที่เป็นไอและอยู่ที่สภาวะพื้น อะตอมนี้จะดูดกลืนปริมาณแสงไว้ ทำให้ปริมาณแสงผ่านเข้าเครื่องวัดน้อยลง ปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนไว้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของอะตอมนั้น หลักการนี้จึงสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative analysis) สำหรับเครื่อง AAS โดยทั่วไปมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ

1. แหล่งกำเนิดแสง (Light Source) ประกอบด้วย Hollow Cathode Lamp ซึ่งแอโนดเป็นทั้งสเต็มส่วนแคโทดทำหรือบุด้วยไอออนโลหะ หรือโลหะผสมของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์เป็นรูปทรงกระบอก ขั้วทั้งสองบรรจุในหลอดแก้วปิดสนิท ภายในบรรจุด้วยแก๊สเฉื่อย ได้แก่ แก๊สนีออนหรืออาร์กอน เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าคร่อมขั้วไฟฟ้าทั้งสองนี้สูงมาก แคโทดไอออนจากแก๊สเฉื่อย (Ar^+ หรือ Ne^+) ที่ได้จากการทำให้แตกตัวเป็นไอออนก็จะมีพลังงานมากพอทำให้อะตอมโลหะหลุดจากผิวแอโนดให้กลุ่มอะตอมอิสระ ไอออนของโลหะนี้จะอยู่ในสภาวะเร้าไม่เสถียร จะคายคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นเฉพาะออกมา ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่สอดคล้องกับการดูดกลืนของธาตุที่ต้องการ

2. แหล่งกำเนิดอะตอม (Atomizer) เป็นส่วนที่ทำให้ธาตุในสารประกอบตัวอย่างกลายเป็นไอหรืออะตอมอิสระ ประกอบด้วยเนบิวไลเซอร์ (Nebulizer) และตะเกียง (Burner) เมื่อผ่านของเหลวเข้าไปในเนบิวไลเซอร์ เกิดแอโรซอล (Aerosol) ภายในสเปรย์ในแชมเบอร์ แอโรซอลผ่านเข้าสู่เปลวไฟ มีขั้นตอนการเกิดดังนี้

- 2.1 ตัวทำละลายระเหยออกเกิดอนุภาคเกลือของแข็งที่มีขนาดเล็ก
- 2.2 ของแข็งนี้ถูกเผาให้สลายตัวเป็นโมเลกุล
- 2.3 โมเลกุลแตกตัวเกิดตะกอน หรือเรคัลที่เป็กลาง อะตอมที่เป็นกลางทำหน้าที่ดูดกลืนคลื่นแสง
- 2.4 อะตอมที่เป็นกลางอาจเปลี่ยนไปสู่สภาวะเร้าหรือเกิดการไอออไนซ์ในเปลวไฟ

3. เครื่องแยกแสง (Monochromator) ทำหน้าที่เลือกคลื่นแสงที่เหมาะสมเพียงความยาวคลื่นเดียวที่สอดคล้องกับการวิเคราะห์ธาตุที่ศึกษา ประกอบด้วยช่องแสงเข้ากระจก ทำหน้าที่ผลิตลำแสงในแนวนานเกรตติง (Grating) เป็นวัตถุที่ใช้กระจายแสงและวัดรวมแสง ทำหน้าที่รวมภาพ (คลื่นแสง) ที่เข้าสู่ช่องแสงเข้าไปตกบนพื้นราบ (Focus plane) หรือออกสู่ช่องแสง (Exit slit)

4. ระบบวัดแสง (Photo detector) โดยการใช้หลอดทวีคูณแสง (Photomultiplier Tube) วัดความเข้มแสงที่เหลือจากการดูดกลืนแสง และขยายให้มีปริมาณมากขึ้น หลอดทวีคูณแสงนี้ จะประกอบด้วยไดโนด (Dynode) ซึ่งคล้ายกับโฟโตทิวบ์ (เป็นหลอดสูญญากาศ และมีขั้วแคโทดเป็นรูปทรงกระบอก ขั้วแอนโนดเป็นเส้น) แต่อิเล็กโตรดภายในเพิ่มจากปกติอีก 9 อัน ไดโนดหนึ่งได้รับศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกสูงกว่าแคโทด 90 โวลต์อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากแคโทดถูกเร่งไปชนไดโนดที่หนึ่ง เกิดอิเล็กตรอนจำนวนมากออกมา และวิ่งไปชนไดโนดตัวที่สอง ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกมากกว่าไดโนดที่หนึ่ง 90 โวลต์ และเกิดปรากฏการณ์เช่นนี้จนครบวงจรอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้าไปสู่แอนโนดมีค่าถึง 106 ถึง 107 เท่าของของเดิม แล้วผ่านเข้าสู่เครื่องขยายและวัดสัญญาณออกมา

5. อุปกรณ์วัดค่า (Readout devise) เป็นเครื่องวัดกระแสไฟฟ้าที่ได้จากหลอดทวีคูณแสง ซึ่งเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเข้มของแสง สำหรับเครื่อง AAS ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ จะใช้วัดโครเมียมที่มีความยาวคลื่นแสง (Wave length) 357.9 nm ความกว้างของช่องแสง (Slit width) 0.7 nm แหล่งกำเนิดแสง (Light source) เป็นแบบ Electrodeless Discharge Lamp or Hollow Cathode Lamp ชนิดของเปลวไฟ (Flame type) เป็นแบบ Air – Acetylene Flame

ขั้นตอนการวิเคราะห์

วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วย AAS อาจมีขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของโลหะหนักที่วิเคราะห์และ/หรือความเข้มข้น ปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่ในตัวอย่าง ดังนั้นวิธีการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างโดยวิธี AAS มี 2 ขั้นตอน

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมตัวอย่างน้ำก่อนการวิเคราะห์

1. การเก็บและการรักษาน้ำตัวอย่าง (Sampling handling and preservation) ในการหาปริมาณโลหะหนักปริมาณน้อยๆ สิ่งที่ต้องระวังคือการปนเปื้อน (Contamination) และการสูญหาย (Loss) ของโลหะสาเหตุสำคัญในการปนเปื้อนของน้ำตัวอย่าง ได้แก่ ฝุ่นละอองในห้องปฏิบัติการ สิ่งที่เจือปนอยู่ในรีเอเจนต์ที่ใช้และอยู่บนเครื่องใช้ในห้องปฏิบัติการ โดยทั่วไปการทดลองที่เกี่ยวข้องกับสารที่เป็นของเหลว ภาชนะที่ใส่น้ำตัวอย่างนั้นมีบทบาทสำคัญที่จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนเชิงบวก (Positive error) หรือความคลาดเคลื่อนเชิงลบ (Negative Error)

1.1 ภาชนะเป็นสิ่งปนเปื้อน (Contaminants) ออกมาในลักษณะที่ทำการชะล้าง (Leaching) หรือเมื่อภาชนะเกิดการคายสารออกมาจากผิว (Desorption)

1.2 ภาชนะดูดซับโลหะบางส่วนไว้ที่ผิว ทำให้ความเข้มข้นของโลหะลดลง ดังนั้นถึงเก็บน้ำตัวอย่างควรสะอาด โดยทำความสะอาด คือ ล้างด้วยสารซักฟอกและน้ำล้างด้วยกรดไนตริก 1+1 และน้ำล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1+1 ตามด้วยน้ำ และล้างด้วยน้ำกลั่นตามลำดับ

2. การเตรียมตัวอย่างน้ำก่อนการวิเคราะห์ การจำแนกประเภทโลหะหนักในน้ำตัวอย่างในการหาปริมาณโลหะหนักในน้ำตัวอย่าง นิยมแบ่งโลหะที่ต้องการวิเคราะห์ออกเป็น 4 ประเภท

2.1 โลหะละลาย (Dissolved Metals) คือโลหะที่ได้จากส่วนประกอบต่างๆ ซึ่งสามารถผ่านเยื่อกรอง (Membrane Filter) ขนาด 0.45 ไมครอนได้

2.2 โลหะแขวนลอย (Suspended Metals) คือโลหะที่ได้จากส่วนประกอบต่างๆซึ่งไม่สามารถผ่านเยื่อกรอง (Membrane Filter) ขนาด 0.45 ไมครอนได้

2.3 โลหะทั้งหมด (Total Metals) คือ โลหะที่ได้จากน้ำตัวอย่างที่ไม่ได้กรองและทำการย่อยสลายอย่างรุนแรง (vigorous Digestion)

ขั้นตอนที่ 2 การวิเคราะห์

การหาปริมาณตะกั่วอะตอมิกแอบซอร์พชัน โดยฉีดน้ำตัวอย่างเข้าไปในอะตอมไมเซอร์ที่ใช้เปลวไฟอะเซทิลีน

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) พร้อมด้วยอุปกรณ์
2. หัวเตาที่มีช่องสามช่อง (Three – Slot Burner Head) ถ้าไม่มีเตาชนิดนี้อาจใช้หัวเตาที่มีช่องเดียวก็ได้ (Single – Slot Burner Head)

รีเอเจนต์

1. อากาศจะใช้อากาศในห้องเครื่องอัดอากาศ (Air compressor) หรือใช้อากาศที่อัดอยู่ในท่อ (Cylinder) ก็ได้ อากาศที่ใช้ต้องเป็นอากาศแห้ง ทำได้โดยผ่านเครื่องกรอง เพื่อกำจัดน้ำมัน น้ำ และสารแปลกปลอมอื่นๆ
2. แก๊สอะเซทิลีน ที่บรรจุอยู่ในถังควรจะหยุดใช้ เมื่อความดันของแก๊สในถังลดลงถึง 7 ksc (100 psig) เพื่อป้องกันมิให้เกิด acetone ซึ่งอยู่ในถังปนออกมา

3. น้ำกลั่นคือไดโอนไนซ์ (Deionized distilled)

4. สารละลายโลหะมาตรฐานของโครเมียม

วิธีการวิเคราะห์

1. ขั้นตอนการใช้เครื่องมือ (Instrument Operation) เนื่องจาก AAS. มีหลายแบบ ขึ้นอยู่กับบริษัทที่จำหน่าย โดยทั่วไปจะมีขั้นตอนดังนี้

1.1 เลือกซอลโลเคโทดแลมป์ของโลหะที่ต้องการวิเคราะห์ นำไปติดตั้งให้เข้าที่ตามวิธีแนะนำของเครื่องแต่ละบริษัทที่ทำเครื่องมือขึ้นแล้วจัดโมโนโครมิเตอร์ให้มีความยาวคลื่น

(Wave Length) 357.9 nm

1.2 จัดความกว้างของช่องแสงผ่าน (Slit Width) ตามคำแนะนำในคู่มือ

1.3 เปิดสวิทช์ของเครื่องมือ จัดปริมาณกระแสไฟฟ้าให้ผ่านซอลโลเคโทดแลมป์ ด้วยปริมาณพอเหมาะตามคู่มือการแนะนำ

1.4 อุณหภูมิเครื่องประมาณ 10 – 20 นาที เพื่อให้เครื่องมือถึงจุดเสถียร

1.5 นำหัวเตา (Burner Head) ชนิดที่ใช้อากาศอะเซทิลีน ติดตั้งให้เข้าที่

1.6 ปลอยอากาศจากเครื่องอัด หรือจากท่อ ให้ผ่านเข้าไปในเครื่องมือ จัดอัตราการไหลของก๊าซ ให้เหมาะสมกับโลหะที่จะทำการวิเคราะห์ตามคู่มือแนะนำ

1.7 ปลอยก๊าซอะเซทิลีน จัดอัตราการไหลตามคู่มือแล้วจุดเปลวไฟด้วยความระมัดระวัง

1.8 จุ่มหลอดพลาสติกกรูเล็กของเครื่องอะตอมไมเซอร์ ลงในน้ำกลั่น (ซึ่งทำให้เป็นกรดโดยเติมกรดไนตริก 1.5 cm³/L นานมากกว่า 1 นาที และตรวจสอบ Aspiration Rate ให้อยู่ระหว่าง 3 – 5 cm³/min พร้อมกันนั้นให้เครื่องอ่านค่าศูนย์

1.9 จุ่มหลอดพลาสติกกรูเล็กของเครื่องอะตอมไมเซอร์ ลงในสารละลายมาตรฐาน ในขณะเดียวกันผู้ทดลองจะจัดแนวและระดับของหัวเตาให้ได้ตำแหน่งที่เหมาะสม ซึ่งดูได้จากตำแหน่งที่ทำให้มาตราของระบบอ่าน (Readout system) ของเครื่องมือมีผลตอบสนองมากที่สุด

1.10 เมื่อจัดเครื่องมือตามขั้นตอนข้างต้นแล้ว เครื่องมือก็พร้อมจะทำการวิเคราะห์ได้ และเมื่อทำการวิเคราะห์เสร็จแล้ว ให้ดับเปลวไฟโดยปิดท่อก๊าซอะเซทิลีนก่อนปิดทางเดินอากาศ

2. การสร้างกราฟมาตรฐาน เพื่อให้ได้สิ่งแวดล้อมเดียวกัน ดังนั้นจำเป็นต้องสร้างกราฟมาตรฐานทุกครั้งสำหรับการวิเคราะห์แต่ละครั้ง

2.1 เลือกสารละลายโลหะมาตรฐานที่มีความเข้มข้นต่างๆ กัน อย่างน้อย 3. ค่าความเข้มข้น จุ่มหลอดพลาสติกกรูเล็กลงในสารละลายแต่ละความเข้มข้น แล้ววัดค่าแอมพอฟเบนซ์

2.2 สร้างกราฟมาตรฐาน โดยเขียนกราฟระหว่างแอมป์ของเบนซ์ กับความเข้มข้นของสารละลายโลหะมาตรฐาน

การวิเคราะห์ตัวอย่าง

1. ล้างอะตอมไมเซอร์ ตามข้อ 1.8 จนกระทั่งมาตรของระบบอ่านให้ค่าคงที่ แล้วจัดเครื่องมือให้อ่านศูนย์ทุกครั้งก่อนที่จะทำการวิเคราะห์สารละลายแต่ละตัวอย่าง รวมทั้งทำกราฟมาตรฐานจะต้องล้างอะตอมไมเซอร์ก่อน
2. ชุ่มหลอดพลาสติกกรุ่เล็กลงในสารละลายตัวอย่าง แล้ววัดค่าแอมป์ของเบนซ์

การคำนวณ

คำนวณค่าความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง โดยคิดเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร โดยอ่านจากกราฟมาตรฐาน

ข.2 การคำนวณสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

การเตรียมสต็อกตะกั่ว $Pb(NO_3)_2$ ที่มีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ได้จากนำกรดไนตริก ($Pb(NO_3)_2$) ผสมกับน้ำที่ปราศจากไอออน (DI water) โดยขั้นแรกเตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่ว 500 มิลลิกรัม/ลิตร โดยละลายกรดไนตริก ($Pb(NO_3)_2$) 0.8038 กรัม ในกรด ไนตริก (HNO_3) 10 มิลลิตร โดยเติมน้ำที่ปราศจากไอออนให้ได้ 1 ลิตร แล้วจากนั้น ค่อยนำสารละลายมาตรฐานมาเจือจางให้ได้ความเข้มข้นตามต้องการ

สารละลายนี้ 1.00 มิลลิกรัม	=	Pb 100 ไมโครกรัม
จะได้	$C_1 V_1$	$= C_2 V_2$
	500 ppm x V_1	$= 10 \times 1000 \text{ ml}$
	V_1	$= (10 \times 1000 \text{ ml})/500$
	V_1	$= 20 \text{ ml}$

ภาคผนวก ก

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535

เรื่อง กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน

ภาคผนวก ก

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539)

ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535

เรื่อง กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน

อาศัยอำนาจตามความในข้อ 14 แห่งกฎกระทรวงฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2535) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 ที่ระบุว่า “ห้ามระบายน้ำทิ้งออกจากโรงงาน เว้นแต่จะได้นำการอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างจนน้ำทิ้งมีลักษณะเป็นไปตามที่รัฐมนตรีกำหนด โดยประกาศในพระราชกิจจานุเบกษา แต่ทั้งนี้ต้องไม่ใช้วิธีเจือจาง (Dilution)” รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรมจึงออกประกาศกำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน ดังนี้

ข้อ 1 คำจำกัดความ

น้ำทิ้ง หมายถึง น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบกิจการจากโรงงานอุตสาหกรรมที่จะระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อม และให้หมายความรวมถึงน้ำเสียจากการใช้น้ำของคนงาน รวมทั้งจากกิจกรรมอื่นในโรงงานอุตสาหกรรม โดยน้ำทิ้งต้องเป็นไปตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ในประกาศนี้

ข้อ 2 น้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรมต้องมีคุณสมบัติดังนี้

(1) ความเป็นกรดและด่าง (pH) มีค่าไม่น้อยกว่า 5.5 และไม่มากกว่า 9.0

(2) ทึดเอส (TDS หรือ Total dissolved solids) ต้องมีค่าดังนี้

2.1 ค่าทึดเอส ไม่มากกว่า 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดแต่ต้องไม่มากกว่า 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.2 น้ำทิ้งซึ่งระบายออกจากโรงงานลงสู่แหล่งน้ำที่มีค่าความเค็ม (Salinity) มากกว่า 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าทึดเอส ในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าทึดเอส ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำได้ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

(3) สารแขวนลอย (Suspended solids) ไม่มากกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่าง

จากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 150 มิลลิกรัมต่อลิตร

(4) โลหะหนักมีค่าดังนี้

- 4.1ปรอท (Mercury) ไม่มากกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.2 เซเลเนียม (Selenium) ไม่มากกว่า 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.3 แคดเมียม (Cadmium) ไม่มากกว่า 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.4 ตะกั่ว (Lead) ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.5 อาร์เซนิก (Arsenic) ไม่มากกว่า 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.6 โครเมียม (Chromium)
 - 4.6.1 Hexavalent Chromium ไม่มากกว่า 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - 4.6.2 Trivalent Chromium ไม่มากกว่า 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.7 บาเรียม (Barium) ไม่มากกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.8 นิกเกิล (Nickel) ไม่มากกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.9 ทองแดง (Copper) ไม่มากกว่า 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.10 สังกะสี (Zinc) ไม่มากกว่า 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.11 แมงกานีส (Manganese) ไม่มากกว่า 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

(5) ซัลไฟด์ (Sulfide) คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

(6) ไซยาไนด์ (Cyanide) คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร

- (7) ฟอรัลดีไฮด์ (Formaldehyde) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- (8) สารประกอบฟีนอล (Phenol compound) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- (9) คลอรีนอิสระ (Free chlorine) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- (10) เพสทิไซด์ (Pesticide) ต้องไม่มี
- (11) อุณหภูมิ ไม่มากกว่า 40 องศาเซลเซียส
- (12) สี ต้องไม่เป็นที่น่ารังเกียจ
- (13) กลิ่น ต้องไม่เป็นที่น่ารังเกียจ
- (14) น้ำมันและไขมัน (Oil and grease) ไม่มากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่าง

จากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

(15) ค่าบีโอดี (Biochemical oxygen demand) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เวลา 5 วัน ไม่มากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 60 มิลลิกรัมต่อลิตร

(16) ค่าทีเคเอ็น (TKN Total หรือ Kjeldahl nitrogen) ไม่มากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

(17) ค่าซีโอดี (Chemical oxygen demand) ไม่มากกว่า 120 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 400 มิลลิกรัมต่อลิตร

ข้อ 3 การตรวจสอบค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมตามข้อ 2 ให้ดำเนินการดังต่อไปนี้

(1) การตรวจสอบค่าความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำทิ้ง ให้ใช้เครื่องมือวัดความเป็นกรดและด่างของน้ำ (pH Meter)

(2) การตรวจสอบค่าทีดีเอสให้ใช้วิธีการระเหยแห้ง ระหว่างอุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส ถึง อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ในเวลา 1 ชั่วโมง

(3) การตรวจสอบค่าสารแขวนลอย ให้ใช้วิธีการกรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass fiber filter disc)

(4) การตรวจสอบค่าโลหะหนัก ให้ใช้วิธีการดังนี้

4.1 การตรวจสอบค่าสังกะสี โครเมียม ทองแดง แคดเมียม แบเรียม ตะกั่ว นิกเกิล และแมงกานีส ให้ใช้วิธี Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) ชนิดไคเร็คแอสไพเรชัน (Direct aspiration) หรือวิธีพลาสมา อิมิสชันสเปกโตรสโคปี (Plasma Emission Spectroscopy) ชนิดอินดักทีฟลีคัพเพิล พลาสมา (Inductively Coupled Plasma: ICP)

4.2 การตรวจสอบค่าอาร์เซนิก และเซเลเนียมให้ใช้วิธี AAS ชนิดไฮไดรด์เจนเนอเรชัน (Hydride Generation) หรือวิธีพลาสมา อิมิสชัน สเปกโตรสโคปี (Plasma Emission Spectroscopy) ชนิดอินดักทีฟลีคัพเพิล พลาสมา (Inductively Coupled Plasma : ICP)

4.3 การตรวจสอบปรอทให้ใช้วิธีอะตอมมิกแอ็บซอร์พชันโคลด์เวปอร์เทคนิค (Atomic Absorption Cold Vapour technique)

- (5) การตรวจสอบค่าซัลไฟด์ ให้ใช้วิธีการไตเตรท (Titrate)
- (6) การตรวจสอบค่าไซยาไนด์ ให้ใช้วิธีการกลั่นและตามด้วยวิธีไพริดีน บาร์บิตูริกแอซิด (PyridineBarbituric acid)
- (7) การตรวจสอบค่าฟอร์มันดีไฮด์ ให้ใช้วิธีการเทียบสี (Spectrophotometry)
- (8) การตรวจสอบค่าสารประกอบฟีนอลให้ใช้วิธีกลั่นและตามด้วยวิธี 4-อะมิโนแอนติไพรีน (Distillation , 4 –Aminoantipyrine)
- (9) การตรวจสอบค่าคลอรีนอิสระ ให้ใช้วิธีไอโอดิเมตริก (Iodometric method)
- (10) การตรวจสอบค่าสารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ ให้ใช้วิธี
ก๊าซโครมาโตกราฟี (Gas –Chromatography)
- (11) การตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำ ให้ใช้เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดขณะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ
- (12) การตรวจสอบค่าน้ำมันและไขมัน ให้ใช้วิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย แล้วแยกหาน้ำหนัก
ของน้ำมันและไขมัน
- (13) การตรวจสอบค่าบีโอดี ให้ใช้วิธีอะไซด์โมดิฟิเคชัน (Azide modification) ที่อุณหภูมิ
20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน ติดต่อกัน หรือวิธีการอื่นที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมให้ความเห็นชอบ
- (14) การตรวจสอบค่าทีเคเอ็น ให้ใช้วิธีเจดาห์ล (Kjeldahl)
- (15) การตรวจสอบค่าซีโอดี ให้ใช้วิธีย่อยสลายด้วยโคโปตัสเซียมไดโครเมต (Potassium
dichromate digestion)

ข้อ 4 การตรวจสอบค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ตามข้อ 3 จะต้องเป็นไปตามคู่มือ
วิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย ของสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย หรือ Stand Methods for
the Examination of water and wastewater ซึ่ง American Public Health Association, American
Water Work Association และ Water Environmental Federation ของสหรัฐอเมริกา ร่วมกันกำหนด
ไว้ด้วย

ประกาศ ณ วันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2539

ไชยวัฒน์ สีนสุวงศ์

(นายไชยวัฒน์ สีนสุวงศ์)

รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม

ประกาศลงในราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่ม 113 ตอนที่ 52ง วันที่ 27 มิถุนายน 2539

ภาคผนวก ง
ผลงานทางวิชาการ

ผลงานทางวิชาการ

- 1) **พรณภา แก้วประคิษฐ์** และไพรัตน์ แก้วสาร. การดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยการ
ใช้เปลือกแคโรท. การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย
ครั้งที่ 16. วันที่ 26-27 ตุลาคม 2549. โรงแรมราม่า การ์เด็น. กรุงเทพมหานคร, 2549.
- 2) สาวิตต์ สัตย์ตั้งใจ **พรณภา แก้วประคิษฐ์** ชีรวิทย์ บุญล้อม และไพรัตน์ แก้วสาร. การดูดซับ
ตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เศษแคโรท. การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อม
แห่งชาติ ครั้งที่ 6 วันที่ 7-9 มีนาคม 2550. โรงแรมอมรินทร์ลาญ. พิษณุโลก, 2550.

การดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยการใช้เปลือกแครอท

พรนภา แก้วประดิษฐ์ ไพรัตน์ แก้วสาร*

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 85 ถ.สถลมารค อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

บทคัดย่อ

ปัจจุบันประเทศไทยมีอัตราการเจริญเติบโตทางอุตสาหกรรมสูง ผลที่ตามมาจากการพัฒนาทางอุตสาหกรรมนี้ทำให้เกิดการปนเปื้อนของโลหะหนักโดยเฉพาะตะกั่วในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมต่างๆ และส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของสิ่งมีชีวิตและสภาพสิ่งแวดล้อมโดยทั่วไป ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักจำพวกตะกั่วจึงถือเป็นสิ่งที่จะต้องอย่างยิ่ง วิธีการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักจำพวกตะกั่วที่ใช้กันในปัจจุบันมีหลายวิธี อาทิเช่น การกรองผ่านเมมเบรน การตกตะกอนทางเคมี การแลกเปลี่ยนไอออน การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ เป็นต้น ซึ่งวิธีที่กล่าวมาข้างต้นล้วนเป็นวิธีที่สามารถกำจัดโลหะหนักได้ดี แต่มีข้อด้อยในเรื่องค่าใช้จ่ายสูง การศึกษานี้จึงได้มีการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาประยุกต์ใช้ในการดูดซับโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย โดยอาศัยเทคนิคการดูดซับแบบ Biosorption โดยเลือกใช้เปลือกแครอทมาเป็นวัสดุดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 10 ppm โดยการศึกษาครั้งนี้ศึกษาถึงปัจจัยของรูปร่างของเปลือกแครอท ผลของพีเอช และปฏิกิริยาการดูดซับตะกั่วโดยใช้สารดูดซับที่เตรียมจากเปลือกแครอท พบว่าเปลือกแครอทแบบบดมีประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วดีกว่าเปลือกแครอทแบบไม่บด ผลของพีเอชมีผลทำให้การดูดซับในแต่ละสถานะแตกต่างกัน ส่วนปฏิกิริยาในการดูดซับตะกั่วเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลาสมดุล 30 นาที การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักใช้เทคนิคการวัดโดยเครื่อง Atomic Adsorption Spectrophotometer (AAS) จากผลการศึกษาเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนานำเปลือกแครอทมาใช้ในการดูดซับน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก

คำสำคัญ : Biosorption ,ตะกั่ว ,เปลือกแครอท ,การบำบัดน้ำเสีย

1.บทนำ

การปนเปื้อนของตะกั่วอันเนื่องมาจากกิจกรรมต่างๆของมนุษย์ เป็นปัญหาสำคัญที่พบมากในปัจจุบันกิจกรรมดังกล่าว ได้แก่ อุตสาหกรรม ต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ การผลิตสารเคมี การทำเหมืองแร่ เป็นต้น แม้ว่าในน้ำทิ้งจะมีปริมาณน้อยแต่ตะกั่วสามารถสะสมเพิ่มมากขึ้น

ในแหล่งน้ำทำให้มนุษย์มีโอกาสดูดซับตะกั่วในร่างกายจนถึงขีดอันตรายได้ วิธีการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักจำพวกตะกั่วที่ใช้กันในปัจจุบันมีหลายวิธี อาทิเช่น การกรองผ่านเมมเบรน การตกตะกอนทางเคมี การแลกเปลี่ยนไอออน การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ การระเหย เป็นต้น (เกรียงศักดิ์, 2539) ซึ่งวิธีที่กล่าวมาข้างต้นล้วนเป็นวิธีที่สามารถกำจัดโลหะหนักได้ แต่มีข้อด้อยในเรื่องค่าใช้จ่ายสูง รวมทั้งมีประสิทธิภาพต่ำเมื่อใช้งานในสภาวะธรรมชาติที่มีความเข้มข้นของ

* Authors to correspondence should be addressed via e-mail:

p_kaewsarn@hotmail.com

โลหะหนักต่ำมาก ๆ ข้อดีของเทคนิคการดูดซับด้วยชีวภาพนี้ คือสามารถกำจัดไอออนของโลหะหนักที่ละลายในน้ำในปริมาณน้อยๆ ตัวดูดซับที่ใช้มีความสามารถในการดูดซับสูงมีความจำเพาะ ราคาไม่แพง นอกจากนี้อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ก็ไม่ยุ่งยากซับซ้อน (Kratochvil and Volesky, 1998) ตัวดูดซับทางชีวภาพที่ได้ทำการทดลองแล้ว ได้แก่ marine algae (Matheickal and Yu, 1999a), peat moss (Spinti et al., 1995), waste biomass (Tobin and Rux, 1998), biosolids (Solari et al., 1996) ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้จึงได้มีการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาประยุกต์ ใช้ในการดูดซับโลหะหนักจำพวกตะกั่วที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย โดยอาศัยเทคนิคการดูดซับแบบ Biosorption โดยเลือกใช้เปลือกแครอทที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากตลาดสด ซึ่งมีองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เป็นองค์ประกอบ (Lee SH., 1996) จึงมีความเป็นไปได้ในการนำมาพัฒนาใช้เป็นสารดูดซับโลหะหนักตะกั่วในน้ำเสียได้

2. วิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมเปลือกแครอท

การเตรียมเปลือกแครอทแบบบดและแบบไม่บดนำเปลือกแครอทที่เก็บมาจากตลาดสดมาหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจนระดับพีเอชของน้ำล้างสุดท้ายเป็นกลาง แบบบดนำไปบดด้วยเครื่องบดพืชแล้วร่อนผ่านตะแกรง (ขนาด mesh) No.10 แต่ไม่ผ่าน sieve No.20. นำเปลือกแครอททั้งสองแบบไปทำให้แห้งโดยนำไปอบในตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C นาน 24 ชั่วโมง เก็บเปลือกแครอทไว้ในโถดูดความชื้น (desicator)

2.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วมีวิธีการดังนี้

น้ำเสียสังเคราะห์สำหรับตะกั่วเตรียมได้

จากสารละลายมาตรฐานตะกั่ว 1000 PPM (1 ml = 1 mg Lead) โดย ชั่งตะกั่วไนเตรด $Pb(NO_3)_2$ 1.5999 กรัม ละลายด้วยกรดไนตริก (HNO_3 , Sp.Gr. 1.42) 10 ml เติมน้ำจนมี

ปริมาตร 1 ลิตร จะได้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของตะกั่วเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อนำมาใช้เป็นสารละลายตั้งต้นในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.3 ปริมาณที่เหมาะสมของเปลือกแครอทที่จะนำมาใช้ในการดูดซับน้ำเสีย

การศึกษาเบื้องต้น (preliminary study)

เป็นการหาชนิดของเปลือกแครอทแบบบด และแบบไม่บด และหาปริมาณที่เหมาะสมของเปลือกแครอทเมื่อมีการแปรเปลี่ยนปริมาณของเปลือกแครอทที่ใช้ในการทดลอง คือ 0.25, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 และ 3 กรัม ที่ปริมาตรน้ำเสีย 30 มิลลิลิตร โดยนำไปเขย่าในเครื่องเขย่าสารเคมี (shaker) ที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ทำการเก็บตัวอย่างจากนั้นนำไปกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน 0.45 ไมครอน นำส่วนที่เป็นของเหลวไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วที่เหลือโดยใช้เครื่อง AAS ผลที่ได้ดูจากประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของเปลือกแครอท ณ จุดสมดุล หลังจากนั้นเลือกค่าปริมาณของเปลือกแครอทที่ให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดที่ดีที่สุด ณ จุดสมดุล มาใช้งานในขั้นตอนต่อไป

2.4 ระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการกำจัดตะกั่ว

(Equilibrium Time)

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วทำการตวงน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาณ 100 มล. เติมเปลือกแครอท 0.5 กรัม นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า (Shaker) ที่ 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง แล้วเก็บตัวอย่างน้ำที่ระยะเวลาสัมผัส 8 ระดับ (ที่เวลา 0.25, 5, 10, 15, 30, 60, 90 และ 120 นาที) จากนั้นนำไปกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน 0.45 ไมครอน นำส่วนที่เป็นของเหลวไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วที่เหลือโดยใช้เครื่อง AAS

2.5 ประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียที่ระดับ

พีเอช 2 - 6

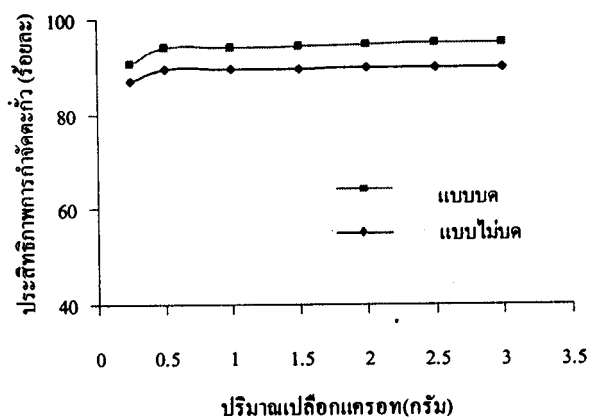
ตวงน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาณ 500 มิลลิตร ปรับระดับพีเอชของน้ำเสีย โดยใช้สารละลายไฮเดรียมไฮดรอกไซด์ หรือกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้นต่างๆ ปรับระดับพีเอชเริ่มต้นเป็น 2 ตวงน้ำเสียใส่ขวดทดลองขวดละ 30 มิลลิตรเติมเปลือกแคโรท 0.5 กรัม และนำไปเขย่าในเครื่องเขย่าสารเคมี ที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที โดยระยะเวลาในการเขย่าจะได้อาจจากการทดลองระยะเวลาสัมผัส จากนั้นนำของผสมในขวดไปกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน 0.45 ไมครอน นำส่วนที่เป็นของเหลวในแต่ละขวด ไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วที่เหลือ โดยใช้เครื่อง AAS จากนั้นทำการทดลองซ้ำใหม่ โดยปรับพีเอชให้เป็น 3, 4, 5 และ 6

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1 ชนิดเปลือกแคโรทและปริมาณที่เหมาะสมของเปลือก แคโรทในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสีย

จากการศึกษาเบื้องต้น (preliminary study) โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีปริมาณตะกั่วเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเริ่มต้นที่ 4.5 ปริมาตร 30 มิลลิตร ผลการศึกษาแสดงใน ภาพที่ 1 พบว่าปริมาณเปลือกแคโรททั้งแบบบดและไม่บดที่ปริมาณ 0.25 กรัม ประสิทธิภาพในการกำจัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในช่วงที่สองที่ปริมาณตั้งแต่ 0.5 กรัม พบว่าการกำจัดตะกั่วมีแนวโน้มคงที่ ทั้งที่มีการเพิ่มปริมาณสารดูดซับเปลือกแคโรทในปริมาณที่มากขึ้นโดยการกำจัดตะกั่วจากเปลือก แคโรทแบบบดสูงกว่าเปลือกแคโรทแบบไม่บดเนื่องจากความสามารถในการดูดซับผิวของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งเปลือกแคโรทแบบที่ผ่านการบดจะมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นกว่าเปลือกแคโรทที่ไม่บดโดยมีประสิทธิภาพการกำจัด

ตะกั่วร้อยละ 94.05 และ 89.66 ตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณจากเปลือกแคโรท 3 กรัม ความสามารถในการดูดซับตะกั่วไม่สามารถเพิ่มขึ้นได้อีกดังแสดงได้จากค่าความเข้มข้นที่เหลือของตะกั่วไม่มีความแตกต่างกันในช่วงของการเพิ่มปริมาณ ดังกล่าว (0.5 ถึง 3 กรัม) แสดงว่าปริมาณของเปลือกแคโรทถูกจำกัดไว้ที่ 0.5 กรัม สำหรับการกำจัดตะกั่วที่มีค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และเปลือกแคโรทแบบบดมีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วสูงกว่าเปลือกแคโรทแบบไม่บด เนื่องจากความสามารถในการดูดซับผิวของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งเปลือกแคโรทแบบที่ผ่านการบดจะมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้นด้วย

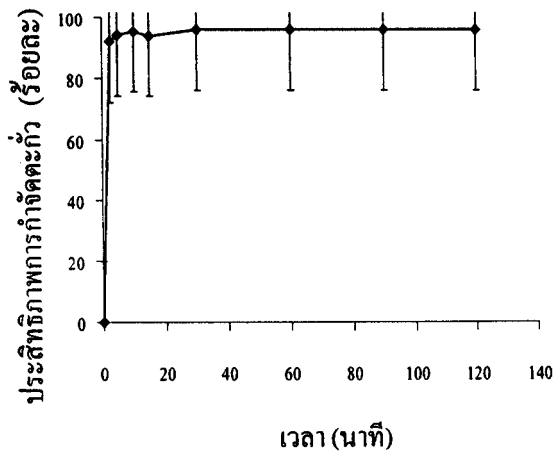


ภาพที่1 การกำจัดตะกั่วกับปริมาณต่างๆจากเปลือกแคโรทแบบบดและแบบไม่บด ณ เวลาสัมผัส 24 ชั่วโมง

3.2 ผลของการหาระยะเวลาสัมผัสที่สภาวะสมดุล

การทดลองหาเวลาที่ใช้ที่สภาวะสมดุลของการกำจัดตะกั่ว โดยการเติมเปลือกแคโรทแบบบด 0.5 กรัม ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีตะกั่วความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม ปริมาณ 100 มิลลิตร แล้วนำไปเขย่า ด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที จากนั้นจึงทำการเก็บตัวอย่างน้ำ (หลังทำการเขย่าแล้ว 2.5, 5, 10, 15, 30, 60, 90 และ 120 นาที) แล้วกรองด้วยกระดาษ

กรองเอาเฉพาะส่วนที่ใสมาทำการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจากเปลือกแครอตที่ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ จากผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 2



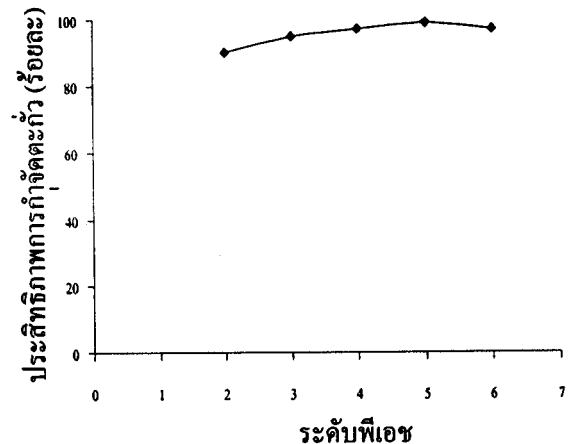
ภาพที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสและประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว

พบว่าสามารถแบ่งช่วงเวลาของปฏิกิริยาออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรก ตั้งแต่เวลา 2.5 ถึง 15 นาที ช่วงที่สอง คือ ตั้งแต่เวลา 30 ถึง 120 นาที โดยในช่วงแรกประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วมีแนวโน้มไม่คงที่ (เพิ่มขึ้นและลดลง) สำหรับช่วงที่สองประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วมีแนวโน้มคงที่ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงแรก ที่เวลา 2.5 ถึง 15 นาที ปฏิกิริยาในการดูดซับระหว่างสารดูดซับ (adsorbent) กับสารถูกดูดซับ (adsorbate) ยังเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วมีแนวโน้มไม่คงที่ สำหรับในช่วงที่สอง ที่เวลา 30 ถึง 120 นาที ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ โดยเริ่มเข้าสู่จุดสมดุลที่เวลา 30 นาที จึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในช่วงเวลาดังกล่าวมีแนวโน้มคงที่ ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดที่เวลา 30 นาที คือ 98.02 แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการกำจัดตะกั่วที่เหมาะสมคือที่เวลา 30 นาที

3.3 ระดับพีเอช (pH)

การทดลองจะใช้ตะกั่วที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 10 ml ในการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัด

โดยใช้เปลือกแครอตแบบบด 0.5 กรัม ปริมาตรน้ำตัวอย่าง 30 มิลลิลิตร ความเร็วรอบในการเขย่า 200 รอบต่อนาที โดยใช้เวลาในการเขย่าซึ่งได้จากการทดลองที่ 3.2 คือ 30 นาทีโดยใช้พีเอช 2-6 ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ร้อยละการกำจัดตะกั่วของเปลือกแครอต ณ ระดับพีเอช 2 ถึง 6

พบว่าช่วงพีเอช 2 การกำจัดตะกั่วจะมีค่าน้อยที่สุด และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น จนถึงช่วงพีเอชที่ 4-6 พบว่าเป็นช่วงที่มีค่า % removal ไม่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงเป็นช่วงที่มีความเหมาะสมในการกำจัดตะกั่ว สอดคล้องกับการทดลองของ Tamer ที่มีการดูดซับตะกั่วและทองแดงเมื่อใช้ตัวดูดซับเป็นสารชีวมวลเช่นเดียวกัน (Tamer, 2006) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้ว่าคุณสมบัติของเปลือกแครอตตามธรรมชาติมีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลส ซึ่งประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน (functional group) ชนิดต่างๆ หมู่ฟังก์ชันเหล่านี้มีประจุลบ (negative charge) ซึ่งมีคุณสมบัติในการดึงดูดสารถูกดูดซับที่เป็นไอออนที่มีประจุบวก (positive charge) ในที่นี้คือไอออนตะกั่ว เมื่อสภาพพีเอชของสารละลายสูงขึ้น จำนวน ไฮดรอกไซด์ (OH-) ไอออนเพิ่มมากขึ้น ขณะเดียวกันเปลือกแครอตที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นประจุลบ (pH 5) จะทำหน้าที่ในการดึงดูดกับตะกั่ว ไอออนที่มีประจุบวกแต่เพียงอย่างเดียว โดยจะไม่มี

ผลใดๆ กับไฮดรอกไซด์ไอออนที่มีประจุลบเหมือนกัน ในทางตรงกันข้าม เมื่อสภาพพีเอชลดลง จำนวนไฮโดรเจนไอออน (H^+) เพิ่มมากขึ้น ในระบบไฮโดรเจนไอออนส่วนหนึ่งจะถูกดึงดูดกับหมู่ฟังก์ชันที่เป็นประจุลบจากเปลือกแครอต แสดงว่าเกิดการแทรกสอดของไฮโดรเจนไอออน ทำให้ความสามารถในการดึงดูดตะกั่วจากเปลือกแครอต ลดลงจะเห็นได้จากประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่ระดับพีเอชที่สูงกว่ามีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าระดับพีเอชที่ต่ำกว่า

4. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาหาปริมาณที่เหมาะสมของเปลือกแครอตแบบบดและไม่บด พบว่าแบบบดมีประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียมากกว่าแบบไม่บด ปริมาณที่เหมาะสมของเปลือกแครอต อยู่ที่ระดับ 0.5 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาสัมพัทธ์มีอิทธิพลต่อการกำจัดตะกั่วในน้ำเสีย จากการศึกษาพบว่าที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ 30 นาที เป็นระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดตะกั่วของเปลือกแครอต ค่าพีเอชต่างๆ มีผลต่อการกำจัดตะกั่วพบว่าที่ระดับพีเอช 4-6 เป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการกำจัดตะกั่วของเปลือกแครอตโดยให้ค่าการกำจัดที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่ระดับพีเอชอื่นๆ สำหรับในช่วงพีเอช 4-6 การกำจัดตะกั่วเปลือกแครอตคือประมาณร้อยละ 99.20

5. เอกสารอ้างอิง (References)

เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์, 2539, การบำบัดน้ำเสีย, มิตรนราการพิมพ์, กรุงเทพมหานคร.

Kratochvil, D., Volesky, B., 1998b. Trends Biotechnol. 16,291–300.

Lee SH. Doctoral Thesis, Taejon, Korea: Korea Advanced Institute of Science and Technology; 1996.

Matheickal, J., Yu, Q., 1999a. Bioresource Technol. 69,223–229.

Solari, P., Zouboulis, A., Matis, K., Stalidis, G., 1996. SeparationSci. Technol. 31, 1075–1092.

Spinti, M., Zhuang, H., Trujillo, E., 1995. Water Environ. Res.67, 943–952.

Tobin, J., Roux, J., 1998. Water Res. 32, 1407–1416.

Tamer Akar and Sibel Tunali, *Biosorption characteristics of Aspergillus flavus biomass for removal of Pb(II) and Cu(II) ions from an aqueous solution*. Bioresource Technology, Volume 97, Issue 15, October 2006, Pages 1780-1787



การดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เศษแครอท

Biosorption of Lead from Aqueous Solution using Carrot Residues

สาวิตต์ สุตัญตั้งใจ¹ พรณภา แก้วประดิษฐ์^{2*} วีระวุฒิ บุญล้อม³ และ ไพรัตน์ แก้วสาร⁴

Sawit Sutantangjai¹ Pornnapa Kaewpardit^{2*} Teerawut Buurom³ and Pairat Kaewsarn⁴

Received 16 January 2007 ; received in revised form 1 February 2007 ; accepted 4 February 2007

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการดูดซับของตะกั่วโดยใช้เศษแครอทเป็นตัวดูดซับ ความสามารถของเศษแครอทในการดูดซับตะกั่วจะถูกศึกษาภายใต้ความแตกต่างของขนาดตัวดูดซับ (บดและไม่บด) เวลาในการสัมผัส (นาที) และพีเอชของสารละลายใน batch mode จากผลการทดลองพบว่าเศษแครอทที่บด ใช้เวลาสัมผัส 30 นาที ที่พีเอช 5 เศษแครอทที่บดจะกำจัดโลหะได้ 99.20% แสดงให้เห็นว่าเศษแครอทที่บดเหมาะสำหรับใช้ในการกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียสังเคราะห์

คำสำคัญ : การดูดซับ; ตะกั่ว; เศษแครอท; น้ำเสีย

Abstract

Biosorption of lead(II) by carrot peel was investigated in this study. The biosorption capacities of carrot peel for lead were studied at different sizes (ground and unground), contact time (min) and solution pH values in batch mode. At optimum size (ground), contact time (30 minutes) and initial solution pH 5 ; ground carrot peel recorded maximum lead uptakes of 99.20%. The results indicated that carrot peel is a suitable biosorbent for the removal of lead ions from synthetic wastewater.

Keywords : Biosorption; heavy metal; lead; wastewater; Carrot Peel

คำนำ

การปนเปื้อนของตะกั่วเป็นปัญหาสำคัญที่พบมากในปัจจุบันถึงแม้ว่าในน้ำทิ้งจะมีปริมาณตะกั่วอยู่น้อย แต่ตะกั่วสามารถสะสมเพิ่มมากขึ้นในแหล่งน้ำทำให้มนุษย์มีโอกาสสะสมตะกั่วในร่างกายจนถึงขีดอันตรายได้ โดยกิจกรรมที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนของตะกั่ว ได้แก่ เกษตรกรรม อุตสาหกรรม วิธีการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อน

^{1,2,3}นิสิตมหาบัณฑิตศึกษา; ⁴อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
อุบลราชธานี 34190;

*โทรศัพท์ : 084-055-8840, e-mail : pornnapa_de@yahoo.com



โลหะหนักจำพวกตะกั่วที่ใช้กันในปัจจุบันมีหลายวิธี อาทิเช่น การกรองผ่านเมมเบรน การตกตะกอนทางเคมี การแลกเปลี่ยนไอออน การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ การระเหย เป็นต้น [1] ซึ่งวิธีที่กล่าวมาข้างต้นล้วนเป็นวิธีที่สามารถกำจัดโลหะหนักได้ แต่มีข้อด้อยในเรื่องค่าใช้จ่ายสูง รวมทั้งมีประสิทธิภาพต่ำเมื่อใช้งานในสภาวะธรรมชาติที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักต่ำมากๆ ข้อดีของเทคนิคการดูดซับด้วยชีวภาพนี้คือสามารถกำจัดไอออนของโลหะหนักที่มีความเข้มข้นน้อยๆ ตัวดูดซับที่ใช้มีความสามารถในการดูดซับสูง ราคาไม่แพง นอกจากนี้อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ก็ไม่ยุ่งยากซับซ้อน [2] ตัวดูดซับทางชีวภาพที่ได้ทำการทดลองแล้ว ได้แก่ marine algae [3], peat moss [4], waste biomass [5], biosolids [6] ดังนั้น การวิจัยครั้งนี้จึงได้มีการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาประยุกต์ใช้ในการดูดซับโลหะหนักจำพวกตะกั่วที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย โดยอาศัยเทคนิคการดูดซับแบบ Biosorption โดยเลือกใช้เศษแครอทที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากตลาดสด ซึ่งมีองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินเป็นองค์ประกอบ [7] จึงมีความเป็นไปได้ในการนำมาพัฒนาใช้เป็นสารดูดซับโลหะหนักตะกั่วในน้ำเสียได้

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมเศษแครอท

การเตรียมเศษแครอทแบบบดและแบบไม่บดนำเศษแครอทที่เก็บจากตลาดสดมาหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจนระดับพีเอชของน้ำล้างสุดท้ายเป็นกลาง แบบบดนำไปบดด้วยเครื่องบดพืช แล้วร่อนผ่านตะแกรง (ขนาด mesh) No.10 แต่ไม่ผ่าน No.20. นำเศษแครอททั้งสองแบบไปทำให้แห้งโดยนำไปอบในตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C นาน 24 ชั่วโมง เก็บเศษแครอทไว้ในโถสุญญากาศ

ปริมาณที่เหมาะสมของเศษแครอทที่จะนำมาใช้ในการดูดซับน้ำเสีย

การศึกษาเบื้องต้น (preliminary study) เป็นการหาชนิดของเศษแครอทแบบบด และแบบไม่บด และหาปริมาณที่เหมาะสมของเศษแครอท เมื่อมีการแปรเปลี่ยนปริมาณของเศษแครอทที่ใช้ในการทดลอง คือ 0.25, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 และ 3 กรัม ที่ปริมาตรน้ำเสีย 30 มิลลิลิตร โดยนำไปเขย่าในเครื่องเขย่าสารเคมี ที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ทำการเก็บตัวอย่างจากนั้นนำไปกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน 0.45 ไมครอน นำส่วนที่เป็นของเหลวไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วที่เหลือโดยใช้เครื่อง AAS ผลที่ได้ดูจากประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของเศษแครอท ณ จุดสมดุล หลังจากนั้นเลือกค่าปริมาณของเศษแครอทที่ให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดที่ดีที่สุด ณ จุดสมดุล มาใช้งานต่อไป (ทำการเก็บข้อมูล 2 ซ้ำ และมีการทำ blank ทุกครั้งที่มีการทดลอง)

ระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการกำจัดตะกั่ว (Equilibrium Time)

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตรไปวิเคราะห์โดยใช้ Atomic Adsorption Spectrophotometer (AAS) เพื่อตรวจดูว่าน้ำเสียสังเคราะห์มีปริมาณตามที่ต้องการหรือไม่ แล้วทำการตวงน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาณ 100 มล. เติมเศษแครอท 0.5 กรัมเข้าไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า ที่ 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เก็บตัวอย่างน้ำที่ระยะเวลาสัมผัส 8 ระดับ (ที่เวลา 0.25, 5, 10, 15, 30, 60, 90 และ 120 นาที) จากนั้นนำไปกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน 0.45 ไมครอน นำส่วนที่เป็นของเหลวไปวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง AAS (ในการศึกษาทำ



.....

การเก็บข้อมูล 2 ซ้ำ)

ประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียที่ระดับ พีเอช 2-6

ตวงน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาณ 500 มิลลิตร ปรับพีเอชของน้ำเสีย โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ปรับระดับพีเอชเริ่มต้นเป็น 2 ตวงน้ำเสียใส่ขวดทดลองขวดละ 30 มิลลิตรเติมเปลือกแคโรท 0.5 กรัม และนำไปเขย่า ที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที โดยระยะเวลาในการเขย่าจะได้จากการทดลองระยะเวลาสัมผัส กรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน 0.45 ไมครอนนำส่วนที่เป็นของเหลวไปวิเคราะห์ โดยใช้เครื่อง AAS จากนั้นทดลองซ้ำใหม่โดยปรับพีเอชเป็น 3, 4, 5 และ 6

การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วต่อการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นตะกั่ว 10, 50, 100, 250, 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการปรับพีเอชโดยพีเอชจากการทดลองในช่วงพีเอชที่เหมาะสมในการกำหนดช่วงพีเอชในการทดลอง และเปิดน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 30 มล. เติมเศษแคโรทแล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที ระยะเวลาในการเขย่าจะได้จาก Equilibrium Time แยกเศษแคโรท โดยกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน 0.45 ไมครอน เอาเฉพาะส่วนที่ใสไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วโดย AAS และนำค่าที่ได้ไปหาไอโซเทอมของการดูดซับต่อไป

ไอโซเทอมของการดูดซับ

มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หลายรูปแบบได้อธิบายถึงข้อมูลการดูดซับเพื่อให้ได้รูปของสมการอย่างง่ายแล้วนำมาวาดกราฟเพื่อสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่างๆ ได้ ซึ่งเป็นแนวทางที่นำมาใช้ในการคำนวณออกแบบระบบดูดซับ แต่ที่นิยมใช้กันมากในการดูดซับคือการแปรเป็นในน้ำเสียคือสมการแลงเมียร์ (Langmuir Equation) โดยที่แบบจำลองของ Langmuir เป็นการดูดซับที่ตัวถูกดูดซับเรียงกันเพียงชั้นเดียวบนผิวตัวดูดซับ

$$q_e = \frac{q_{\max} b C_e}{1 + b C_e} \quad (1)$$

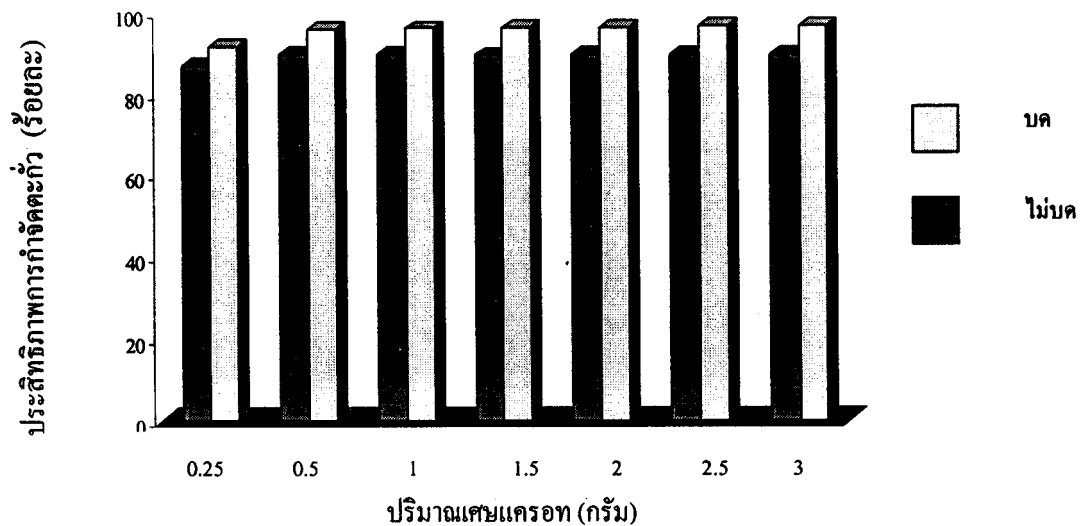
เมื่อ q_e คือปริมาณของโลหะไอออนที่ดูดซับเข้าไปต่อ 1 หน่วยน้ำหนักที่สมดุล (mg/g) , $q_{\max}$ คือปริมาณของโลหะไอออนที่มากที่สุดที่สามารถดูดซับเข้าไปได้ต่อหน่วยน้ำหนัก 1 หน่วย (mg/g) , C_e คือ ความเข้มข้นของไอออนหรือโลหะหนัก ในสารละลาย ที่สภาวะสมดุล (mg/l) , b คือ Langmuir affinity constant (l/mg)

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

ชนิดเศษแคโรทและปริมาณที่เหมาะสมของเศษแคโรทในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสีย

จากการศึกษาเบื้องต้น (preliminary study) โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีปริมาณตะกั่วเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิตร ผลการศึกษาแสดงในภาพที่ 1 พบว่าปริมาณเศษแคโรททั้งแบบบดและไม่บดที่ปริมาณ 0.25 กรัม ประสิทธิภาพในการกำจัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในช่วงที่สองที่ปริมาณตั้งแต่ 0.5 กรัม พบว่าการกำจัดตะกั่วมีแนวโน้มคงที่ ทั้งที่มีการเพิ่มปริมาณสารดูดซับเศษแคโรทในปริมาณที่มากขึ้น โดยการกำจัดตะกั่วจากเศษแคโรทแบบ

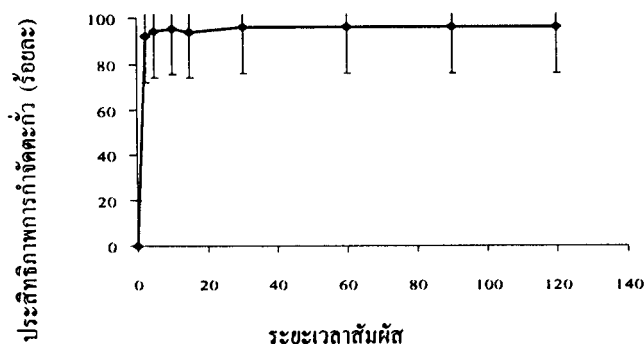
บดสูงกว่าแบบไม่บด เนื่องจากความสามารถในการดูดติดผิวของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งเศษแครอทแบบที่ผ่านการบดจะมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นกว่าเศษแครอทที่ไม่บดโดยมีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วร้อยละ 96.05 และ 89.66 ตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณจากเศษ แครอท 3 กรัม ความสามารถในการดูดซับตะกั่วไม่สามารถเพิ่มขึ้นได้อีก ดังแสดงได้จากค่าความเข้มข้นที่เหลือของตะกั่วไม่มีความแตกต่างกันในช่วงของการเพิ่มปริมาณ ดังกล่าว (0.5 ถึง 3 กรัม) แสดงว่าปริมาณของเศษแครอทถูกจำกัดไว้ที่ 0.5 กรัม สำหรับการกำจัดตะกั่วที่มีค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และเศษแครอทแบบบดมีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วสูงกว่าเศษแครอทแบบไม่บด เนื่องจากความสามารถในการดูดติดผิวของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งเศษแครอทแบบที่ผ่านการบดจะมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้นด้วย



ภาพที่ 1 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจากเศษแครอทแบบบดและแบบไม่บด ที่ปริมาณต่างๆ

ผลของการหาระยะเวลาสัมผัสที่สภาวะสมดุล

การทดลองหาเวลาที่ใช้ที่สภาวะสมดุลของการกำจัดตะกั่ว โดยการเติมเศษแครอทแบบบด 0.5 กรัม ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีตะกั่วความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม ปริมาณ 100 มิลลิลิตร แล้วนำไปเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบ ต่อนาที จากนั้นจึงทำการเก็บตัวอย่างน้ำ (หลังทำการเขย่าแล้ว 2.5, 5, 10, 15, 30, 60, 90 และ 120 นาที) แล้วกรองด้วยกระดาษกรอง เอาเฉพาะส่วนที่ใสมาทำการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจากเศษแครอทที่ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ จากผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 2



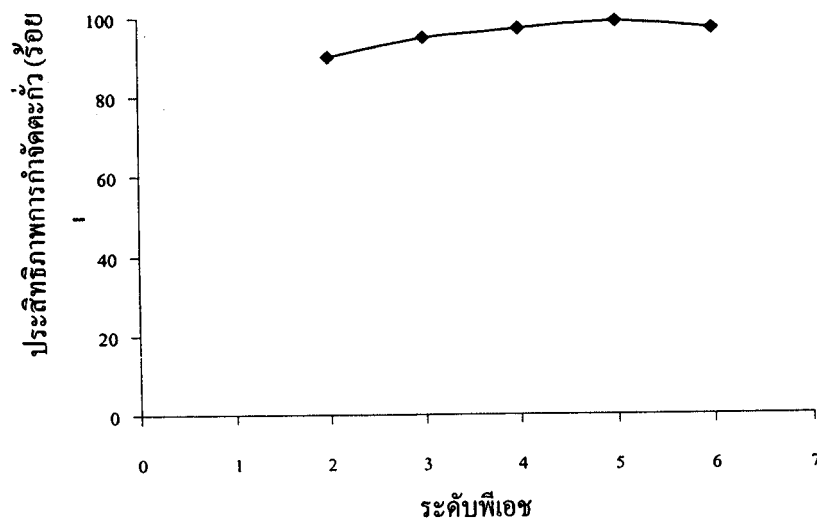


ภาพที่ 2 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ

พบว่าสามารถแบ่งช่วงเวลาของปฏิกิริยาออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรก ตั้งแต่เวลา 2.5 ถึง 15 นาที ช่วงที่สอง คือ ตั้งแต่เวลา 30 ถึง 120 นาที โดยในช่วงแรกประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วมีแนวโน้มไม่คงที่ (เพิ่มขึ้นและลดลง) สำหรับช่วงที่สองประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วมีแนวโน้มคงที่ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงแรก ที่เวลา 2.5 ถึง 15 นาที ปฏิกิริยาในการดูดซับระหว่างสารดูดซับ (adsorbent) กับสารถูกดูดซับ (adsorbate) ยังเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วมีแนวโน้มไม่คงที่ สำหรับในช่วงที่สอง ที่เวลา 30 ถึง 120 นาที พบว่าหลังจากเวลา 30 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ดังนั้นปฏิกิริยาจึงเข้าสู่จุดสมดุลที่เวลา 30 นาที ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วมีแนวโน้มคงที่ แสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาการกำจัดตะกั่วที่เหมาะสมคือที่เวลา 30 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดคือ 96.02 %

ระดับพีเอช (pH)

การทดลองจะใช้ตะกั่วที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 10 ml ในการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดโดยใช้เศษแครอทแบบบด 0.5 กรัม ปริมาณน้ำตัวอย่าง 30 มิลลิลิตร ความเร็วรอบในการเขย่า 200 รอบต่อนาที โดยใช้เวลาในการเขย่าซึ่งได้จากการทดลองที่ 3.2 คือ 30 นาทีโดยใช้พีเอช 2-6 ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 3 พบว่าช่วงพีเอช 2 การกำจัดตะกั่วจะมีค่าน้อยที่สุด และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น จนถึงช่วงพีเอชที่ 4-6 พบว่าเป็นช่วงที่มีค่า %removal ไม่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงเป็นช่วงที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่ว สอดคล้องกับการทดลองของ Tamer ที่มีการดูดซับตะกั่วและทองแดงเมื่อใช้ตัวดูดซับเป็นสารชีวมวลเช่นเดียวกัน [8]



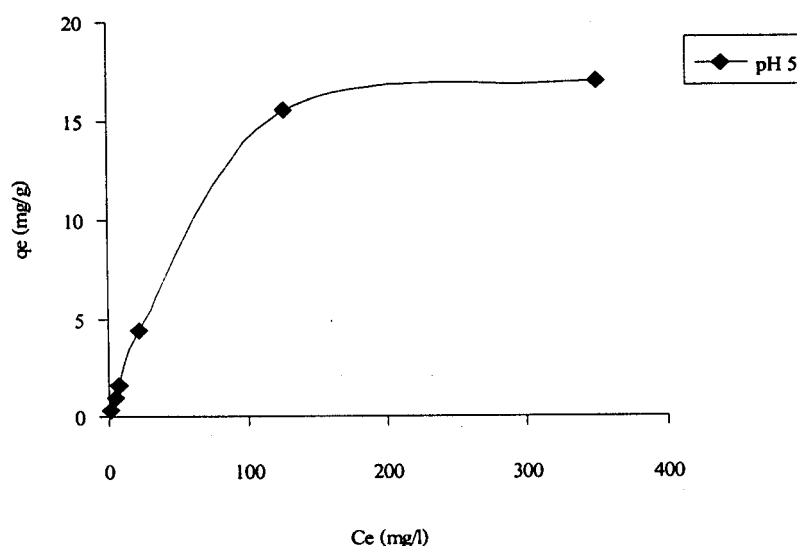
ภาพที่ 3 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่ระดับพีเอช 2 ถึง 6

ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้ว่าคุณสมบัติของเศษแครอทตามธรรมชาติมีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลส ซึ่งประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน (functional group) ชนิดต่างๆ หมู่ฟังก์ชันเหล่านี้มีประจุลบ (negative charge) ซึ่งมีคุณสมบัติในการดึงดูดสารที่ถูกดูดซับที่เป็นไอออนที่มีประจุบวก (positive charge) ในที่นี้คือไอออน



ตะกั่ว เมื่อสภาพพีเอชของสารละลายสูงขึ้น จำนวนไฮดรอกไซด์ (OH^-) ไอออนเพิ่มมากขึ้น ขณะเดียวกันเศษแคโรทที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นประจุลบ ($\text{pH } 5$) จะทำหน้าที่ในการดึงดูดกับตะกั่วไอออนที่มีประจุบวกแต่เพียงอย่างเดียว โดยจะไม่มีผลใดๆ กับไฮดรอกไซด์ไอออนที่มีประจุลบเหมือนกัน ในทางตรงกันข้าม เมื่อสภาพพีเอชลดลง จำนวนไฮโดรเจนไอออน (H^+) เพิ่มมากขึ้น ในระบบไฮโดรเจนไอออนส่วนหนึ่งจะถูกดึงดูดกับหมู่ฟังก์ชันที่เป็นประจุลบจากเศษแคโรท แสดงว่าเกิดการแทรกสอด (interference) ของไฮโดรเจนไอออน ทำให้ความสามารถในการดึงดูดตะกั่วจากเศษแคโรทลดลง จะเห็นได้จากประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่ระดับพีเอชที่สูงกว่ามีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าระดับพีเอชที่ต่ำกว่า

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ



ภาพที่ 4 ไอโซเทอร์มในการดูดซับตะกั่วโดยเศษแคโรท ที่ pH 5

จากภาพที่ 4 จากการใช้สมการแลงเมียร์จะเห็นว่าความสามารถในการดูดซับมากที่สุดที่ pH 5 เท่ากับ 32.786 mg/g ซึ่งเป็นความสามารถในการดูดซับมากกว่าที่ pH อื่นๆ ซึ่งตรงกับผลการทดลองของ pH โดยค่า R^2 เท่ากับ 0.8683

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาหาปริมาณที่เหมาะสมของเศษแคโรทแบบบดและไม่บด พบว่าแบบบดมีประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียมากกว่าแบบไม่บด โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วร้อยละ 96.05 และ 89.66 ตามลำดับ ปริมาณที่เหมาะสมของเศษแคโรท อยู่ที่ระดับ 0.5 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาสัมผัสมีอิทธิพลต่อการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจากการศึกษาพบว่าที่ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที เป็นระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดตะกั่ว



.....
 ของเศษแครอท ค่าพีเอชต่างๆ มีผลต่อการกำจัดตะกั่วพบว่าที่ระดับพีเอช 5 เป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการกำจัดตะกั่ว
 ของเศษแครอทโดยให้ค่าการกำจัดที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่ระดับพีเอชอื่นๆ สำหรับที่ช่วงพีเอช 5 มี
 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วสูงที่สุดเท่ากับ 32.786 mg/g และ ค่า R^2 เท่ากับ 0.8683

เอกสารอ้างอิง

- [1] เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์, 2539, **การบำบัดน้ำเสีย**, มิตรนราการพิมพ์, กรุงเทพมหานคร.
- [2] Kratochvil, D., Volesky, B., 1998b. **Trends Biotechnol.** 16, 291–300.
- [3] Lee SH. Doctoral Thesis, Taejon, Korea: **Korea Advanced Institute of Science and Technology**; 1996.
- [4] Matheickal, J., Yu, Q., 1999a. **Bioresource Technol.** 69, 223–229.
- [5] Solari, P., Zouboulis, A., Matis, K., Stalidis, G., 1996. **SeparationSci. Technol.** 31, 1075–1092.
- [6] Spinti, M., Zhuang, H., Trujillo, E., 1995. **Water Environ. Res.** 67, 943–952.
- [7] Tobin, J., Roux, J., 1998. **Water Res.** 32, 1407–1416.
- [8] Tamer Akar and Sibel Tunali, **Biosorption characteristics of Aspergillus flavus biomass for removal of Pb(II) and Cu(II) ions from an aqueous solution**. *Bioresource Technology*, Volume 97, Issue 15, October 2006, Pages 1780–1787.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-นามสกุล

นางสาวพรนภา แก้วประดิษฐ์

วัน เดือน ปีเกิด

24 กุมภาพันธ์ 2525 ที่จังหวัดศรีสะเกษ

ที่อยู่

975/25 ถ.ขุนันท์ อ.เมือง จ.ศรีสะเกษ 33000

โทร. 084-055-8840

ประวัติการศึกษา

วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม

คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, พ.ศ. 2547