

การดูดซับโลหะหนักบางชนิดจากน้ำเสียด้วยดินเบาเคลือบเมงกานีสออกไซด์



นางสาวพรเพ็ญ มีทองมูล

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2962-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ADSORPTION OF SOME HEAVY METALS FROM WASTEWATER BY  
MANGANESE OXIDE-COATED DIATOMITE**



**Miss Pornpen Meethongmool**

สถาบันวิทยบริการ

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

**Inter – department of Environmental Science**

**Graduate School**

**Chulalongkorn University**

**Academic Year 2002**

**ISBN 974-17-2962-6**

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การดูดซับโลหะหนักบางชนิดจากน้ำเสียด้วยดินเบาเคลือบ แมงกานีสออกไซด์
โดย	นางสาวพรเพ็ญ มีทองมูล
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา

---

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไว้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(ศาสตราจารย์ ดร. สุชาดา กิระนันท์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมใจ เพ็งปรีชา)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. อมร เพชรสม)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ เปรมจิตต์ แทนสถิตย์)

พรเพ็ญ มีทองมูล : การดูดซับโลหะหนักบางชนิดจากน้ำเสียด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ (ADSORPTION OF SOME HEAVY METALS FROM WASTEWATER BY MANGANESE OXIDE-COATED DIATOMITE) อ. ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา; 116 หน้า , ISBN 974-17-2962-6.

การศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักสามชนิด ได้แก่ อาร์เซนิก แคดเมียม และตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการใช้ดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ที่อุณหภูมิห้อง ได้ผลการศึกษาที่ชี้ให้เห็นว่า ชนิดของโลหะหนัก ความเข้มข้นของโลหะหนัก พีเอชของน้ำเสียและระยะเวลาที่ดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์สัมผัสกับน้ำเสียมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก จากผลการศึกษาใช้ดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ปริมาณ 0.1 กรัม พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับอาร์เซนิกคือ 7 เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลาสัมผัส 12 ชั่วโมง โดยจะได้ประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับ 35.19 % สำหรับการดูดซับแคดเมียมได้ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับคือ 5 เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลาสัมผัส 8 ชั่วโมง โดยจะได้ประสิทธิภาพเท่ากับ 91.67 % สำหรับการดูดซับตะกั่วได้ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับคือ 4 เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลาสัมผัส 45 นาที โดยจะได้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงกว่า 99 % และพบว่าตะกั่วเป็นโลหะหนักที่ถูกดูดซับไปได้เร็วที่สุด รองลงมาคือแคดเมียมและอาร์เซนิกตามลำดับ ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับโลหะหนักทั้งสามชนิดพบว่าอาร์เซนิกและตะกั่วมีความสัมพันธ์กับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ สำหรับแคดเมียมมีความสัมพันธ์กับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช การทดสอบการชะละลายของโลหะหนักทั้งสามชนิด พบว่าแคดเมียมและตะกั่วมีปริมาณโลหะหนักถูกชะละลายต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนด แต่อาร์เซนิกมีปริมาณถูกชะละลายเกินกว่าค่ามาตรฐาน การทดสอบการดูดซับอาร์เซนิกและตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่ซึ่งมีความเข้มข้นของอาร์เซนิก 0.42 มิลลิกรัมต่อลิตร และตะกั่ว 5.89 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์มีประสิทธิภาพดูดซับโลหะหนักทั้งสองชนิดได้ดีมาก

สหสาขาวิชา...วิทยาศาสตร์สถานะแวดล้อม...ลายมือชื่อนิติ.....  
 สาขาวิชา.....วิทยาศาสตร์สถานะแวดล้อม...ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
 ปีการศึกษา.....2545.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## 4389082620 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEY WORD : ARSENIC / CADMIUM / LEAD / MANGANESE OXIDE-COATED DIATOMITE / ADSORPTION

PORNPEN MEETHONGMOOL : ADSORPTION OF SOME HEAVY METALS FROM WASTEWATER BY MANGANESE OXIDE-COATED DIATOMITE. THESIS ADVISER : ASSOC. PROF. SOMCHAI PENGPREECHA, Ph.D., 116 pp. ISBN 974-17-2962-6 .

The adsorption of arsenic, cadmium and lead in synthetic wastewater by using manganese oxide-coated diatomite was examined in a batch experiment at room temperature. The results indicated that type and concentration of heavy metal, pH of wastewater and contacting time affected the heavy metal adsorption efficiency. The finding of this study using 0.1 gram of manganese oxide-coated diatomite showed that the optimum pH of arsenic adsorption was 7 and the initial concentration was 40 mg/l. At contacting time for 12 hours, the adsorption efficiency was 35.19 % . The optimum pH for cadmium adsorption was 5 and the initial concentration was 40 mg/l . At contacting time for 8 hours, the adsorption efficiency was 91.67 % . The optimum pH for lead adsorption was 4 and the initial concentration was 50 mg/l. At contacting time for 45 minutes, the adsorption efficiency more than 99 % and the order of adsorption time was lead < cadmium < arsenic. The adsorption isotherm of three types of heavy metal was found that arsenic and lead were fitted in the Langmuir adsorption isotherm but cadmium was fitted in the Freundlich adsorption isotherm . The results from leaching test of three types of heavy metal was found that cadmium and lead was leached less than those of the Ministry of Industry' s standard but arsenic was found higher than the standard. In the case of wastewater from a battery factory containing 0.42 mg/l of arsenic and 5.89 mg/l of lead, the manganese oxide-coated diatomite has very good adsorption efficiency for both heavy metals.

Inter-department....Environmental Science....Student's signature.....  
 Field of study.....Environmental Science....Adviser's signature.....  
 Academic year .....2002.....Coadviser's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เฟื่องปรีชา อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่กรุณาให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์และให้คำปรึกษาในการแก้ไขปัญหาต่างๆ พร้อมให้คำชี้แนะจนวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ตลอดจนช่วยตรวจทานแก้ไข วิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์รวมทั้งขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิพัฒน์ พัฒนาผล ไพบูลย์ รองศาสตราจารย์ ดร. อมร เพชรสม และ รองศาสตราจารย์เปรมจิตต์ แทนสถิตย์ ที่ให้ความกรุณามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

งานวิจัยนี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนอุดหนุนการวิจัยจากบัณฑิตวิทยาลัย โครงการทุนอุดหนุนวิจัยวิทยาศาสตร์ของมูลนิธิชิน โสภณพนิช และได้รับการสนับสนุนจากโครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณที่ให้ความอนุเคราะห์ไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณ คุณวรรณธนา วงษ์สุด เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเครื่องอะตอมมิกแอปซอพชั่น ที่ให้ความช่วยเหลือและแนะนำการใช้เครื่อง พร้อมทั้งให้คำปรึกษาในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการใช้เครื่อง

ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจวัดผลการทดลองในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม ที่เป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้ตลอดมา

สุดท้ายผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อประยูรและคุณแม่วรรณมา ที่อบรมสั่งสอนเลี้ยงดูและให้การส่งเสริมสนับสนุนการศึกษาแก่ข้าพเจ้าเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 สมมติฐาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 โลหะหนัก.....	4
2.1.1 อาร์เซนิก.....	4
2.1.1.1 ประโยชน์ของอาร์เซนิก.....	4
2.1.1.2 พิษของอาร์เซนิก.....	5
2.1.1.3 การปนเปื้อนของอาร์เซนิกสู่สิ่งแวดล้อม.....	6
2.1.2 แคดเมียม.....	6
2.1.2.1 ประโยชน์ของแคดเมียม.....	6
2.1.2.2 พิษของแคดเมียม.....	7
2.1.2.3 การปนเปื้อนของแคดเมียมสู่สิ่งแวดล้อม.....	7
2.1.3 ตะกั่ว.....	7
2.1.3.1 ประโยชน์ของตะกั่ว.....	8
2.1.3.2 พิษของตะกั่ว.....	8
2.1.3.3 การปนเปื้อนของตะกั่วสู่สิ่งแวดล้อม.....	10

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2 ดินเบา.....	10
2.2.1 การกำเนิดทางธรณีวิทยา.....	10
2.2.2 ชีววิทยาและนิเวศวิทยาของไคอะตอม.....	12
2.2.3 ส่วนประกอบทางเคมี.....	12
2.2.4 คุณสมบัติทางกายภาพ.....	13
2.2.5 การใช้ประโยชน์ดินเบาในอุตสาหกรรมต่างๆ.....	14
2.3 การดูดซับ.....	16
2.3.1 หลักการดูดซับ.....	16
2.3.2 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ.....	18
2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	19
2.3.4 ประโยชน์ของการดูดซับในทางอุตสาหกรรม.....	20
2.4 การดูดซับโลหะหนักด้วยไฮดรอกไซด์.....	21
2.4.1 แหล่งที่มาของแมงกานีสออกไซด์.....	22
2.4.2 กลไกการดูดซับไอออนบวกบนไฮดรอกไซด์.....	23
2.5 ไอโซเทอมการดูดซับ.....	27
2.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	38
3.1 ขั้นตอนการวิจัย.....	38
3.2 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	38
3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือการวิจัย.....	39
3.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	39
3.4.1 การเตรียมการทดลอง.....	40
3.4.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดระหว่างดินเบาและ ดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์.....	41
3.4.3 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการใช้ดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ดูดซับโลหะ หนักทั้ง 3 ชนิด.....	41



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.4 การทดสอบไอโซโทมการดูดซับ.....	47
3.4.5 ศึกษาเสถียรภาพของดินเบาเคลือบเมงกานีสออกไซด์หลังจากดูดซับโลหะ หนักทั้ง 3 ชนิดแล้วด้วยวิธีการทดสอบการชะละลาย.....	47
3.4.6 ศึกษาประสิทธิภาพการนำดินเบาเคลือบเมงกานีสออกไซด์มาดูดซับโลหะ หนักในน้ำเสียจากอุตสาหกรรม.....	48
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	50
4.1 การศึกษาลักษณะสมบัติของดินเบาและดินเบาเคลือบเมงกานีสออกไซด์.....	50
4.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดระหว่างดินเบาและดินเบา เคลือบเมงกานีสออกไซด์.....	54
4.3 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการใช้ดินเบาเคลือบเมงกานีสออกไซด์ดูดซับโลหะหนัก ทั้ง 3 ชนิด.....	60
4.4 ผลการศึกษาไอโซโทมของการดูดซับ.....	78
4.5 ศึกษาเสถียรภาพของดินเบาเคลือบเมงกานีสออกไซด์หลังจากดูดซับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดแล้วด้วยวิธีการทดสอบการชะละลาย.....	82
4.6 ศึกษาประสิทธิภาพการนำดินเบาเคลือบเมงกานีสออกไซด์ดูดซับโลหะหนักในน้ำ เสียจากอุตสาหกรรม.....	83
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	86
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	86
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	88
รายการอ้างอิง.....	89
ภาคผนวก.....	94
ภาคผนวก ก.....	95
ภาคผนวก ข.....	102
ภาคผนวก ค.....	112
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	116

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงผลการวิเคราะห์ทางเคมีของดินเบาจากแหล่งแร่ต่างๆ.....	13
2.2 แสดงลักษณะทางกายภาพของดินเบา.....	14
2.3 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นได้บนพื้นผิวซึ่งเป็นปฏิกริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันออกไซด์กับตัวถูกละลาย..	25
3.1 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง.....	40
4.1 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์.....	53
4.2 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักอาร์เซนิกระหว่างดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์.....	54
4.3 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมระหว่างดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์.....	56
4.4 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักตะกั่วระหว่างดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์.....	58
4.5 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ.....	61
4.6 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักอาร์เซนิกในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสที่พีเอชต่างๆ.....	64
4.7 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสที่พีเอชต่างๆ.....	67
4.8 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสที่พีเอชต่างๆ.....	70
4.9 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักอาร์เซนิกในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสที่เวลาสัมผัสต่างๆ.....	72
4.10 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสที่เวลาสัมผัสต่างๆ.....	74
4.11 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสที่เวลาสัมผัสต่างๆ.....	76
4.12 ปริมาณอาร์เซนิกในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดซับด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์.....	78

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.13 ปริมาณแคลเซียมในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดซับด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีส ออกไซด์.....	79
4.14 ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดซับด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีส ออกไซด์.....	80
4.15 ค่าชะละลายของ โลหะหนักทั้ง 3 ชนิด.....	82
4.16 ปริมาณโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดในน้ำเสียจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่.....	83
4.17 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักอาร์เซนิกในน้ำเสียจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่ด้วย ดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์.....	84
4.18 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่ด้วย ดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์.....	85

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงโครงสร้างเมื่อตัดขวางชั้นผิวของออกไซด์ของโลหะ.....	23
2.2 แสดงการดูดซับโลหะหนักด้วยแมงกานีสออกไซด์.....	26
2.3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์.....	28
2.4 ไอโซเทอมการดูดซับแบบบีอีที.....	29
2.5 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช.....	30
3.1 ขั้นตอนศึกษาความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักที่เหมาะสมต่อการกำจัดโลหะหนัก ด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์.....	43
3.2 ขั้นตอนศึกษาค่าพีเอชของสารละลายโลหะหนักที่เหมาะสมต่อการกำจัดโลหะหนัก ด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์.....	45
3.3 ขั้นตอนศึกษาค่าเวลาสัมผัสของสารละลายโลหะหนักที่เหมาะสมต่อการกำจัดโลหะหนัก ด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์.....	46
3.4 แผนผังแสดงกระบวนการบำบัดน้ำเสียในโรงงานผลิตแบตเตอรี่.....	49
4.1 ลักษณะของดินเบา.....	51
4.2 ลักษณะของดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์.....	51
4.3 ภาพถ่าย SEM ของดินเบากำลังขยาย 2,000 เท่า.....	52
4.4 ภาพถ่าย SEM ของดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์กำลังขยาย 5,000 เท่า.....	52
4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักอาร์เซนิกระหว่างดินเบาและดินเบาเคลือบ แมงกานีสออกไซด์.....	55
4.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมระหว่างดินเบาและดินเบาเคลือบ แมงกานีสออกไซด์.....	57
4.7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักตะกั่วระหว่างดินเบาและดินเบาเคลือบ แมงกานีสออกไซด์.....	59
4.8 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีส ออกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ .....	61
4.9 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักอาร์เซนิกในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบาเคลือบ แมงกานีสออกไซด์ที่พีเอชต่างๆ .....	64

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบาเคลือบ แมงกานีสออกไซด์ที่พีเอชต่างๆ .....	67
4.11 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบาเคลือบ แมงกานีสออกไซด์ที่พีเอชต่างๆ .....	70
4.12 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักอาร์เซนิกในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบาเคลือบ แมงกานีสออกไซด์ที่เวลาสัมผัสต่างๆ .....	72
4.13 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบาเคลือบ แมงกานีสออกไซด์ที่เวลาสัมผัสต่างๆ .....	74
4.14 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบาเคลือบ แมงกานีสออกไซด์ที่เวลาสัมผัสต่างๆ .....	76
4.15 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของอาร์เซนิกด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์.....	78
4.16 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของแคดเมียมด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์.....	80
4.17 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของตะกั่วด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์.....	81

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการพัฒนาอย่างรวดเร็วของประเทศไทยรวมถึงประเทศต่างๆ ทั่วโลก และการเพิ่มจำนวนของประชากร ทำให้เกิดการพัฒนาอุตสาหกรรม เกษตรกรรม และสาธารณสุขเพิ่มมากขึ้น กิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ โดยเฉพาะการพัฒนาอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม เป็นสาเหตุสำคัญของการแพร่กระจายของสารพิษซึ่งปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อมทั้งทางดิน น้ำ อากาศ ส่งผลกระทบต่อมนุษย์และระบบนิเวศจากการสะสมของสารพิษในสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตต่างๆ โดยที่มีกิจกรรมมากมายหลายประเภท เช่น การถลุงโลหะ การทำเหมืองแร่ รวมทั้งอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับโลหะหนัก เป็นแหล่งที่มาของการปนเปื้อนของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมทางน้ำ และยังสามารถเกิดการสะสมต่อไปในสิ่งแวดล้อมทางดิน ซึ่งสาเหตุที่สำคัญประการหนึ่ง คือการระบายน้ำเสียที่มีโลหะหนักปริมาณสูงจากโรงงานอุตสาหกรรม ทั้งนี้ การปนเปื้อนของโลหะหนักในธรรมชาติและในน้ำเสียทางอุตสาหกรรม รวมทั้งผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากโลหะหนักต่างๆ ได้กลายเป็นปัญหาสำคัญที่มีการศึกษาวิจัยมาเป็นระยะเวลานาน โลหะหนักบางชนิดที่มีการใช้อย่างแพร่หลายและพบได้ทั่วไป จากแหล่งปล่อยโลหะหนักในธรรมชาติและในทางอุตสาหกรรม เช่น ตะกั่ว แคดเมียม อาร์เซนิก สามารถสะสมและแสดงความเป็นพิษในสิ่งมีชีวิต โดยทำให้เกิดโรค รวมทั้งความผิดปกติต่างๆ ในร่างกาย และอาจส่งผลถึงชีวิตได้ในที่สุด จึงจำเป็นต้องมีการจัดการที่เหมาะสมเพื่อป้องกันปัญหามลพิษที่อาจเกิดขึ้นจากการปนเปื้อนของโลหะหนัก โดยหน่วยงานซึ่งมีหน้าที่เกี่ยวข้องกับการดูแลรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม เช่น กรมควบคุมมลพิษ ได้มีการกำหนดมาตรฐานต่างๆ ขึ้นเพื่อกำจัดความเข้มข้นของโลหะหนักที่ยอมให้มีได้ในแหล่งน้ำ รวมทั้งมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม ซึ่งน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภทจะพบโลหะหนักในปริมาณที่สูง จึงจำเป็นต้องมีการกำจัดออกไปให้อยู่ในระดับที่กำหนดไว้ก่อนปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำ แม้ว่ากรมโรงงานอุตสาหกรรมได้กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งอุตสาหกรรมไว้แล้วก็ตามก็ยังคงพบปัญหานี้อยู่ ดังนั้นการพัฒนาระบบการบำบัดน้ำเสียจึงเป็นเรื่องที่จำเป็นอย่างยิ่ง

ปัจจุบันการกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมนั้นมีหลายวิธี เช่น การตกตะกอนทางเคมี การกรองผ่านเมมเบรน หรือการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งได้ผลดีแต่มีค่าใช้จ่ายสูงและต้องใช้เทคโนโลยีและการจัดการอย่างมีประสิทธิภาพ หากเราสามารถนำเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพและราคาไม่แพงมาใช้ก็จะเป็นการส่งเสริมการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียที่เกิดขึ้นอีกแนวทางหนึ่ง

ในการกำจัดโลหะหนัก ได้เคยมีการนำเอาเฟอริกออกไซด์มาเคลือบบนผิวทราย พบว่าสามารถดูดซับได้ทั้งโลหะไอออนบวกและไอออนลบโดยจะขึ้นกับพีเอชของสารละลายเป็นสำคัญ จึงกล่าวได้ว่าการใช้ทรายเคลือบเฟอริกออกไซด์ สามารถกำจัดโลหะหนักปนเปื้อนในน้ำเสีย และประหยัดค่าใช้จ่ายได้มาก ซึ่งโลหะออกไซด์ต่างๆ ก็มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียได้เหมือนกัน โดยที่นิยมใช้คือแมงกานีสออกไซด์ โดยโลหะออกไซด์สามารถมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นสูงถึง 300 ตารางเมตรต่อกรัม สำหรับแมงกานีสออกไซด์ (พนจิตร,2539) ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ใช้ดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์มาใช้ในการทดลอง ซึ่งเป็นการประยุกต์วัสดุธรรมชาติมาใช้กำจัดโลหะหนัก ดินเบาที่มีพื้นที่ผิวมาก คือ ประมาณ 20 ตารางเมตรต่อกรัม (อิธิชา,2527) โดยการเคลือบดินเบาด้วยแมงกานีสออกไซด์ จะใช้หลักที่ว่าต้องทำแมงกานีสประจุ 2 บวก ออกซิไดซ์เป็นแมงกานีสไดออกไซด์ที่มีประจุ 4 บวก เคลือบอยู่บนดินเบา

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย ด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์
2. ศึกษาเสถียรภาพของดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ที่ดูดซับโลหะหนักแล้วโดยการทดสอบการชะละลาย
3. เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดปริมาณโลหะหนัก 3 ชนิด คือ อาร์เซนิก ตะกั่ว และแคดเมียม โดยใช้ดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก 3 ชนิด คือ อาร์เซนิก ตะกั่ว และ แคดเมียม ทำการทดลอง 3 ซ้ำ และใช้ดินเบาจากแอ่งลำปางมาเคลือบด้วยแมงกานีสออกไซด์เป็นตัวดูดซับโดย

1. ศึกษาความสัมพันธ์สักระยะที่ความเข้มข้นต่างๆ ในช่วง 40-70 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. ศึกษาการดูดซับในช่วงค่าพีเอช ระหว่าง 3-10
3. ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับในช่วงเวลาสัมผัสตั้งแต่ 30 นาที ถึง 24 ชั่วโมง
4. อุณหภูมิที่ใช้ในช่วงอุณหภูมิปกติ (ambient temperature)

### 1.4 สมมติฐาน

ดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ที่เตรียมขึ้นเพื่อการศึกษาครั้งนี้มีประสิทธิภาพในการดูดซับอาร์เซนิก ตะกั่ว และแคดเมียมได้แตกต่างกัน ขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก ค่าพีเอชและช่วงเวลาสัมผัส

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักทั้งสามชนิดในน้ำเสีย ด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์
2. เป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้บำบัดโลหะหนักทั้งสามชนิดในน้ำเสียจริง



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 โลหะหนัก

โลหะหนัก (heavy metal) หมายถึง โลหะธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5.0 ขึ้นไป โดยไม่รวมโลหะที่เป็นโลหะแอลคาไล (alkali) และโลหะแอลคาไลน์เอิร์ธ (alkaline earth) ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นธาตุในตารางธาตุที่มีเลขเชิงอะตอม (atomic number) ในช่วง 23-92 และอยู่ในคาบที่ 4-7

##### 2.1.1 อาร์เซนิก

อาร์เซนิกหรือสารหนูเป็นที่รู้จักกันดีว่าเป็นสารพิษต่อสิ่งมีชีวิต มีสมบัติเป็นทั้งโลหะและอโลหะ พบในรูปธาตุหรือโลหะ ส่วนในรูปสารประกอบพบทั้งสารประกอบอนินทรีย์และสารประกอบอินทรีย์ อาร์เซนิกในรูปธาตุอิสระเป็นรูปสารที่พบได้ยากในธรรมชาติ โดยส่วนใหญ่จะพบในรูปของสารประกอบของแร่ต่างๆ

##### 2.1.1.1 ประโยชน์ของอาร์เซนิก

สามารถนำมาใช้เป็นสารเคมีในการกำจัดศัตรูพืชทางการเกษตร ใช้เป็นส่วนผสมในปุ๋ยซูเปอร์ฟอสเฟต (superphosphate) ซึ่งในปุ๋ยนี้จะมีส่วนประกอบของอาร์เซนิกอยู่ประมาณ 1.0 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้มีการใช้สารประกอบของอาร์เซนิกในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ผสมกับโลหะอื่นเพื่อเป็นโลหะอัลลอยด์ซึ่งทนต่อการสึกกร่อน ใช้เป็นวัตถุกึ่งตัวนำ ใช้ในอุตสาหกรรมแก้วและเซรามิกเพื่อขจัดสีออกจากแก้วทำให้แก้วใส ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกหนังเพื่อรักษาสภาพหนัง ใช้ในอุตสาหกรรมยารักษาโรคทั้งในคนและสัตว์ เป็นต้น

### 2.1.1.2 พิษของอาร์เซนิก

กลไกในการเกิดพิษในร่างกายขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น โครงสร้างทางกายภาพ และทางเคมีของสารประกอบอาร์เซนิก อาร์เซนิกสามารถเข้าสู่ร่างกายได้โดยการหายใจเอาฝุ่น ไอ หรือหมอกที่มีอาร์เซนิกปนเปื้อน การรับประทานอาหารและน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่มีการใช้อาร์เซนิกเป็นสารเคมีในการกำจัดศัตรูพืช อาร์เซนิกจะปนเปื้อนทั้งในน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน รวมถึงพืชที่ปลูกในบริเวณนั้น การซึมผ่านทางผิวหนังโดยสัมผัสเมื่อทำงานหรือทำกิจกรรมอื่นและสัมผัสเพื่อการรักษา เช่น ยาที่มีอาร์เซนิกเป็นองค์ประกอบ อาทิ Fowler's solution ซึ่งเป็นยารักษาโรคเม็ดโลหิตขาวมากหรือผิดปกติ (leukaemia) ยารักษาโรคหอบ (asthma) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์ปริมาณกับระยะเวลาที่ได้รับ อายุและเพศ เป็นต้น โดยส่วนใหญ่แล้วได้พบว่า อาร์เซนิกอนินทรีย์มีความเป็นพิษมากกว่าอาร์เซนิกอินทรีย์ และอาร์เซนิกในรูปสารละลายมีความเป็นพิษมากกว่าในรูปของแข็ง (Saha, Dikshit and Bandyopadhyay, 1999) สารละลายอาร์เซนิกที่มีวาเลนซ์ +3 (arsenite) จะมีความเป็นพิษมากกว่า +5 (arsenate) เนื่องจากอาร์เซนิกในรูปอาร์ซิไนต์ เคลื่อนที่ในน้ำได้มากกว่าในรูปอาร์ซิเนต โดยมีความเป็นพิษสูงกว่า 25-60 เท่า (Raven, 1998)

อาร์เซนิกเป็นสารที่ออกฤทธิ์แบบเฉียบพลัน และมีพิษเรื้อรัง อาการของพิษเฉียบพลันมักจะเกี่ยวข้องกับเลือด สมอง หัวใจ ไต และระบบทางเดินอาหาร ได้แก่ ระบายท้อง อักเสบ มีแผลพุพองที่เนื้อเยื่อและผิวหนัง อาเจียน กระจายน้ำมาก ปวดท้อง ท้องเสีย ไตถูกทำลาย ชักกระตุกและตายได้ ส่วนการเกิดพิษแบบเรื้อรังมักจะเกี่ยวข้องกับไขกระดูก ผิวหนังและระบบประสาทส่วนปลาย ได้แก่ อาการเมื่อยล้า อ่อนเพลีย ปากอักเสบ ระบบทางเดินอาหารปั่นป่วน บวมแดงเป็นแห่งๆ ผิวหนังส่วนข้อพับพุพอง มีจุดสีดำเพิ่มขึ้นเห็นได้ชัดเจนบริเวณท้องแขนและท้องขา ผิวหนังตกสะเก็ด เส้นผมหยาบ กล้ามเนื้อเป็นอัมพาตและหดลีบ มองเห็นไม่ชัดอาจรุนแรงขึ้นตาบอด มีความผิดปกติทางสมอง หากสัมผัสอาร์เซนิก เป็นระยะเวลานาน จะก่อให้เกิดการระบายท้องตรงบริเวณที่สัมผัส เป็นสาเหตุของมะเร็งผิวหนังได้ หากหายใจเอาอาร์เซนิกเข้าไปจะเกิดการสะสมที่ปอด ในกรณีที่อาร์เซนิกเข้าสู่ระบบการไหลเวียนโลหิตจะก่อให้เกิดอาการเบื่ออาหาร โลหิตจาง เกิดเป็นมะเร็งในตับและไตได้

### 2.1.1.3 การปนเปื้อนของอาร์เซนิกสู่สิ่งแวดล้อม

การแพร่กระจายของอาร์เซนิกในสิ่งแวดล้อมเกิดได้เองตามธรรมชาติ อีกทั้งกิจกรรมของมนุษย์ทั้งการเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม

- 1) แหล่งธรรมชาติ เกิดขึ้นจากการสึกกร่อนของพื้นผิวโลกหรือเปลือกโลก หรือจากก๊าซของภูเขาไฟ ซึ่งอาร์เซนิกจะถูกพัดพาเข้าสู่สิ่งแวดล้อมในรูปอาร์เซนิกไดออกไซด์ (arsenious oxide)
- 2) ทางเกษตรกรรม ได้นำอาร์เซนิกมาใช้ในการกำจัดศัตรูพืช ใช้อาร์เซนิกเป็นสารเคมีป้องกันและกำจัดแมลง ทำให้อาร์เซนิกเข้าไปปนเปื้อนในดิน บางส่วนของอาร์เซนิกจะถูกพืชดูดซับเข้าไป บางส่วนเข้าไปปนเปื้อนในน้ำใต้ดินและในสัตว์ที่อาศัยอยู่ในบริเวณที่ที่ได้รับการปนเปื้อนจากอาร์เซนิก
- 3) ทางอุตสาหกรรม สามารถมีการปนเปื้อนได้จากกิจกรรมต่างๆ คือ จากการเผาถ่านหิน โรงงานถลุงโลหะ เป็นต้น

### 2.1.2 แคดเมียม

แคดเมียมเป็นธาตุที่มีอยู่น้อยในธรรมชาติ ส่วนมากมักเกิดปนอยู่กับแร่สังกะสี ทองแดงและดีบุก แคดเมียมอยู่ติดกับธาตุสังกะสีในตารางธาตุ จึงมีลักษณะทางฟิสิกส์และเคมีคล้ายคลึงกับสังกะสี แต่แคดเมียมจะมีความเป็นพิษที่สูงกว่า แคดเมียมสามารถเข้าแทนที่สังกะสีในระบบเอนไซม์ เนื่องจากมีโครงสร้างของอะตอมคล้ายกัน เช่น แคดเมียมสามารถเข้าแทนที่สังกะสีในระบบเอนไซม์ carboxypeptidase ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายตัวของเพปไทด์ (peptide)

#### 2.1.2.1 ประโยชน์ของแคดเมียม

ในทางอุตสาหกรรมแคดเมียมมีความสำคัญและถูกใช้ประโยชน์ได้หลายประการ เช่น ใช้เป็นสารหล่อลื่น สารกันสนิม ใช้ในโรงงานทำพลาสติก ทำสี แบตเตอรี่ ใช้ในการชุบโลหะ เป็นต้น

### 2.1.2.2 พิษของแคดเมียม

เมื่อร่างกายได้รับพิษเนื่องจากการสูดหรือหายใจเอาควันที่มีแคดเมียมเข้าไป อาการที่เกิดขึ้นคือคอแห้ง ระคายคอ แน่นหน้าอก ปวดศีรษะ เมื่อได้รับแคดเมียมมากขึ้นจะมีอาการหายใจไม่ออก ไอ ถ้ายังคงได้รับแคดเมียมเข้าไปอีกก็อาจตายได้ ส่วนอาการที่เกิดจากการกินอาหารหรือน้ำที่มีแคดเมียมเจือปน คือ อาเจียนและท้องร่วง การได้รับพิษแบบเรื้อรังทำให้เกิดโรคอิตา-อิตา (itai-itai disease) ทำให้ผู้ได้รับพิษได้รับความเจ็บปวดทรมานมาก เพราะเกิดอาการกระดูกและไตพิการ ระยะแรกผู้ป่วยมีอาการปวดบริเวณสะโพก แขน และขา ส่วนในกรณีของผู้ป่วยที่ได้รับแคดเมียมสะสมมานานจะมีอาการรุนแรงมาก คือเจ็บปวดทั่วร่างกาย แรงกดของน้ำหนักตัวที่มีต่อกระดูกสันหลังทำให้ร่างกายเตี้ยหรือค่อมลง กระดูกเปราะ ในระยะสุดท้ายผู้ป่วยจะสูญเสียแคลเซียมออกทางปัสสาวะมาก จนกระดูกผุกร่อนและเสียชีวิตไปในที่สุด

### 2.1.2.3 การปนเปื้อนของแคดเมียมสู่สิ่งแวดล้อม

แคดเมียมที่ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม เกิดได้จาก เช่น การถลุงแร่เหมืองแร่ตะกั่วและสังกะสี กากตะกอนน้ำโสโครก และน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ได้ปล่อยระบายลงสู่แหล่งน้ำ โดยไม่ได้รับการบำบัดจากควันและน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม การปนเปื้อนของแคดเมียมในดินเกิดได้จากการใช้กากตะกอนน้ำโสโครกซึ่งมีศักยภาพในการใช้เป็นปุ๋ยได้สูง จึงยอมเป็นการนำแคดเมียมเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารอีกทางหนึ่ง โดยที่พืชแต่ละชนิดดูดกินและสะสมแคดเมียมในปริมาณที่แตกต่างกันมาก ส่วนที่สะสมแคดเมียมได้ดีคือ ส่วนใบ แม้พืชกินใบ เช่น ผักกาดหอมต่างสายพันธุ์ก็ยังสะสมแคดเมียมได้ในปริมาณที่แตกต่างกัน

### 2.1.3 ตะกั่ว

ตะกั่ว (lead) เป็นธาตุในหมู่ IVA ของตารางธาตุ เลขอะตอม 82 น้ำหนักอะตอม 207.19 จุดเดือด 1,620 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 327.4 องศาเซลเซียส มีสถานะออกซิเดชัน +2 ที่เสถียร ตะกั่วบริสุทธิ์จะมีสีขาวอมฟ้า ลักษณะวาวเป็นประกาย การนำไฟฟ้าดี ออกไซด์ของตะกั่วจะอยู่ในรูป  $PbO$ ,  $Pb_3O_4$  และ  $PbO_2$  (Rochow and Abel, 1973)

### 2.1.3.1 ประโยชน์ของตะกั่ว

มนุษย์รู้จักใช้ตะกั่วมาเป็นเวลานาน โดยใช้สินแร่ตะกั่ว ได้แก่ กาลีนา (galena, PbS) , เซรัสไซต์ (cerussite, PbCO<sub>3</sub>) , และแองกลีไซต์ (anglesite, PbSO<sub>4</sub>) เนื่องจากตะกั่วมีสมบัติที่ง่ายต่อการใช้ คือ หลอมได้ง่าย มีลักษณะอ่อนมาก ง่ายต่อการตัดและขึ้นรูป จึงถูกนำมาใช้ทำเป็นแผ่นหรือท่อ ตะกั่วในรูปอนินทรีย์ใช้ทำประโยชน์มาก เช่น ใช้ทำฉนวนหุ้มสายเคเบิล, ฉนวนกัมมันตรังสี, ใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติกและแก้ว, ใช้ทำเม็ดสี เช่น ตะกั่วขาว (2PbCO<sub>3</sub>, Pb(OH)<sub>2</sub>) และตะกั่วแดง (Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, CaPbO<sub>4</sub>, PbCrO<sub>4</sub>) , ใช้ทำเป็นสารตัวเติมในน้ำมันเบนซิน, ใช้เป็นส่วนผสมในอุตสาหกรรมผลิตท่อน้ำและท่อพีวีซีรวมทั้งเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตแบตเตอรี่และโลหะบัดกรี (ศุภมาศ, 2540)

### 2.1.3.2 พิษของตะกั่ว

มนุษย์ได้รับพิษตะกั่วมาตั้งแต่โบราณ ในสมัยโรมันมีการใช้ตะกั่วทำท่อส่งน้ำ จนมีผู้สันนิษฐานว่า เหตุผลหนึ่งที่ทำให้จักรวรรดิโรมันล่มสลายเป็นเพราะ พิษของตะกั่วในน้ำดื่ม และแม้แต่ในยุโรปสมัยกลางก็ใช้ตะกั่วทำหลังคา รางระบายน้ำ และท่อ ซึ่งตะกั่วในท่อส่งน้ำจะละลายเมื่อพีเอชของน้ำลดลง หรือน้ำที่มีกรดคาร์บอนิกสูง ทำให้องค์การอนามัยโลก (WHO) ต้องกำหนดปริมาณตะกั่วในน้ำดื่มให้มีค่าไม่เกิน 100 ส่วนในพันล้านส่วน

ตะกั่วเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสัตว์โดยการแพร่กระจายที่สำคัญ 2 ทาง คือ ทางห่วงโซ่อาหาร และการสูดละอองตะกั่วเข้าไป แหล่งใหญ่ของตะกั่วสู่คน ได้แก่ การปนเปื้อนในอากาศ โดยมนุษย์ได้รับตะกั่วจากสิ่งแวดล้อมประมาณ 20-50 เปอร์เซ็นต์ผ่านทางอากาศ สำหรับตะกั่วที่มนุษย์ได้รับทางน้ำและอาหารในผู้ใหญ่จะดูดซึมสู่กระแสเลือดได้เพียง 10 เปอร์เซ็นต์ แต่ในเด็กจะดูดซึมได้สูงถึง 40-50 เปอร์เซ็นต์ สารตะกั่วจึงเป็นพิษในเด็กได้มากกว่าผู้ใหญ่ ตะกั่วที่เข้าสู่ร่างกายจะกระจายไปอยู่ที่อวัยวะต่างๆ เช่น สมอง ตับ ม้าม ปอด และมากที่สุดที่กระดูก สามารถอยู่ในร่างกายได้นานถึง 16-27 ปี นอกจากนี้ การเจ็บป่วยซึ่งเกิดขึ้นโดยรู้เท่าไม่ถึงการณ์ก็เกิดขึ้นได้ โดยเฉพาะในเด็ก โดยเด็กที่มีอายุระหว่าง 6 เดือนถึง 2 ขวบ มักมีอุปนิสัยที่เรียกว่า Pica คือการชอบหยิบของต่างๆ เข้าปาก ซึ่งมักจะเกิดกับเด็กที่ขาดธาตุเหล็ก หากเด็กเหล่านี้หยิบเศษสีที่ลอกตามฝาผนังเข้าไปทานก็จะเกิดพิษตะกั่วได้ เพราะโดยทั่วไปนั้นสีทาบ้านจะมีการผสมตะกั่วไว้เป็นจำนวน

มาก ดังเช่นเด็กในสหรัฐอเมริกาปีละประมาณ 200,000 คน ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในสลัมจะได้รับพิษจาก ตะกั่ว เนื่องจากการกินเศษสีทาบ้านเข้าไป (เปี่ยมศักดิ์,2543)

อาการเป็นพิษเฉียบพลันเนื่องจากตะกั่วมีหลายแบบ เช่น อ่อนเพลีย คลื่นไส้ วิงเวียน กล้ามเนื้อกระตุก เป็นต้น หากได้รับตะกั่วต่อเนื่องกันเป็นเวลานานจะทำให้เกิดโรค พิษ ตะกั่วต่ออวัยวะและระบบต่างๆ ของร่างกายดังนี้

1) ระบบเลือด ตะกั่วจะไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่ทำงานเกี่ยวข้องกับ ระบบเลือด เนื่องจากตะกั่วเข้าขัดขวางการสร้างฮีโมโกลบิน (hemoglobin) โดยไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์เฮม (heme) ซึ่งเป็นหน่วยที่บรรจุเหล็กอยู่ในเม็ดเลือดแดง และเข้ารบกวนการสังเคราะห์โพรตีน โกลบูลิน (globulin protein) การสร้างเม็ดเลือดแดงที่ไข กระดูกจึงลดลง ทำให้ร่างกายมีเม็ดเลือดแดงน้อยจึงเกิดโรคโลหิตจางผู้ป่วยจะมีอาการซีดอ่อนเพลีย ง่ายเป็นลมและมีอาการรูบ่ง่าย นอกจากนี้ตะกั่วยังเป็นตัวการที่ทำให้เลือดมีความสามารถในการ นำพาออกซิเจนลดลงอีกด้วย

2) ระบบประสาท ตะกั่วเป็นพิษต่อเซลล์ประสาท ทำให้เนื้อสมองบวม ยับยั้งการ ทำงานของสารเคมีในสมอง และทำลายเยื่อหุ้มปลายประสาท ผู้ป่วยจะมีอาการปวดศีรษะ อาจมี อาการชัก เดินเซ ควบคุมการทรงตัวไม่ดี ปวดหัวเรื้อรัง ชา อารมณ์แปรปรวน งุนงง เชื่องซึม หนาว สิ้นได้ง่าย ความจำเสื่อม เป็นโรคจิตอ่อนๆ คิดช้า ในเด็กเล็กอาจพบพัฒนาการทางสมองช้ากว่าปกติ

3) ไต ในรายที่มีอาการรุนแรงเฉียบพลัน ท่อไตส่วนต้นจะถูกทำลาย การดูดซึม กลับของน้ำตาลที่ไตลดลง ในรายที่เป็นเรื้อรังอาจเกิดภาวะไตวายและไตพิการ

4) ระบบสืบพันธุ์ ผลของตะกั่วต่อระบบสืบพันธุ์ คือ ทำให้อสุจิของเพศชาย และ ไข่ของเพศหญิงผิดปกติ ผู้ป่วยด้วยโรคพิษตะกั่วเรื้อรังจะเป็นหมัน ประจำเดือนมาผิดปกติ รวมทั้ง อาการอื่นๆ ที่เกี่ยวกับระบบสืบพันธุ์ นอกจากนี้ พิษของสารประกอบตะกั่วจะทำให้เกิดการแท้ง เพราะตะกั่วสามารถซึมผ่านทางรกเข้าไปถึงเด็กทารกในครรภ์ได้โดยเริ่มตั้งแต่สัปดาห์ที่ 12 ของ การตั้งครรภ์ ปริมาณตะกั่วจะเพิ่มขึ้นในทารกตลอดระยะเวลาตั้งครรภ์จนครบกำหนด ตัวอ่อนของสัตว์ บางชนิดเมื่อได้รับตะกั่วเข้าไปแล้วอาจพิการ เช่น ลูกไก่หลังฟักจะมีหัวใจผิดปกติ เป็นต้น (นิธิยา,2543)

### 2.1.3.3 การปนเปื้อนของตะกั่วสู่สิ่งแวดล้อม

ตะกั่วที่ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม เกิดได้ทั้งจากปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น ภูเขาไฟระเบิด และจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การถลุงแร่ จากควันและน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม และจากไอเสียรถยนต์โดยที่ควันจะเป็นแหล่งแพร่กระจายที่สำคัญของตะกั่ว การปนเปื้อนของตะกั่วในดินเกิดได้จากการใช้ดินเป็นแหล่งทิ้งกากตะกอนโสโครก (sewage sludge) และอินทรีย์วัสดุเหลือใช้ (organic waste) ต่างๆ เช่น มูลสัตว์ สารประกอบทางเคมี เช่น ปุ๋ย สารกำจัดศัตรูพืช และวัสดุเหลือใช้ในครัวเรือน (domestic waste) ตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน น้ำ และอากาศ จะแพร่กระจายสู่พืช สัตว์และมนุษย์ ทั้งจากการสัมผัสกับตะกั่วโดยตรง และในวงจรของห่วงโซ่อาหาร โดยตะกั่วจะเข้าสู่พืช 2 ทาง คือ ทางรากและทางใบ เมื่อเข้าสู่พืชแล้วจะสะสมอยู่ที่เยื่อหุ้มเซลล์ ไมโทคอนเดรีย และคลอโรพลาสต์ซึม ตะกั่วที่เข้าทางรากส่วนใหญ่จะสะสมอยู่ที่รากฝอยและรากขนาดเล็ก ส่วนการสะสมของตะกั่วในสัตว์ มักพบในปลา กุ้ง และหอยที่อาศัยในแหล่งน้ำที่ถูกเจือปนด้วยตะกั่วอย่างรุนแรง ซึ่งจะแพร่กระจายสู่สิ่งมีชีวิตอื่นๆ จากการกินต่อกันเป็นทอดๆ

## 2.2 ดินเบา (diatomaceous earth)

diatomaceous earth หรือที่รู้จักกันในชื่อ ต่างๆ เช่น diatomite, kieselguhr, tripolite, fossil flour เป็นต้น เรียกชื่อภาษาไทยว่า ดินเบา ดินเบาเป็นหินตะกอนที่มีลักษณะการเกิดเป็นชั้นๆ มีสีเทา ขาว นวล ถึงสีน้ำตาลอ่อน โครงสร้างส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยฟอสซิล ขนาดละเอียดของพืชเซลล์เดียวในอดีตกาลที่เรียกว่า ไดอะตอม โครงสร้างของไดอะตอมเหล่านี้ ส่วนใหญ่ประกอบด้วยซิลิกาไร้ผลึกชนิดบริสุทธิ์ โดยที่ไดอะตอมแต่ละสปีชีส์ จะมีโครงสร้างซับซ้อนและมีคุณสมบัติเด่นเฉพาะตัว คือ ความบริสุทธิ์ การมีความพรุนตัวสูง และมีพื้นที่ผิวมาก จึงเป็นผลที่เกิดขึ้นโดยตรงจากรูปร่าง โครงสร้าง และส่วนประกอบภายในของไดอะตอมแต่ละชนิดนั้น คุณสมบัติเหล่านี้ เมื่อรวมกับความคงทนทางด้านเคมีและเป็นตัวนำความร้อน จึงเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำ diatomite ไปใช้ในงานอุตสาหกรรมต่างๆ

### 2.2.1 การกำเนิดทางธรณีวิทยา

การกำเนิดของดินเบา มีแหล่งกำเนิดได้ทั้งใน น้ำทะเล น้ำกร่อย และน้ำจืด เพราะตัวไดอะตอมสามารถอยู่ได้ในสิ่งแวดล้อมเหล่านี้ ขณะที่ชีวิตอยู่ตัวไดอะตอมจะสกัดตั้งซิลิกา

จากรอบๆ ตัว และคายออกมาในรูปเปลือกหอยห่อหุ้มตัวมันเอง ภายหลังจากที่ตาย โครงสร้างแบบเปลือกหอยเหล่านี้จะค่อยๆ ตกตะกอนสู่พื้นของแอ่ง (basin) ทับถมร่วมกับตะกอนชนิดอื่นๆ แหล่ง diatomite เกิดขึ้นจากการจับตัวแน่นของตะกอนเหล่านี้ ภายใต้อุณหภูมิและความกดดัน โดยมักมีทราย ดิน สารคาร์บอเนต และแร่ธาตุอื่นๆ เป็นมลทินเจือปนอยู่ด้วย

ตอนจบชีวิตโครงสร้างของไดอะตอมที่เป็นโอปอลจะแตกและสะสมกันเป็นเลนพื้นท้องทะเล (ooze) กระบวนการนี้เรียกว่า การตกตะกอนก้นสมุทร (pelagic sedimentation) จากการรายงานโดยเคลย์จะมีอัตราการตกตะกอน 1-4 มิลลิเมตรต่อปี (Kadey and Frederic, 1983) ไดอะตอมที่เป็นหินตะกอนจะเกิดจากน้ำได้ถูกขับออกไปและมีการอัดกันของเลนดังกล่าว ในปัจจุบันตะกอนทางทะเล ที่มีไดอะตอมมากจะสะสมในแอ่งทะเลบริเวณที่มีสารอาหารสมบูรณ์ เช่น เขตมหาสมุทรที่มีกระแสน้ำแตกต่างกัน แถบกึ่งแอนตาร์กติก บริเวณพื้นทะเลระดับลึกไม่มีการเคลื่อนไหวของน้ำอย่างรุนแรง ทำให้มีการสะสมตัวของตะกอนจากพื้นทวีป อย่างไรก็ตามดินเบาสามารถเกิดขึ้นได้ในสภาพแวดล้อมน้ำตื้น มีรายงานว่าดินเบาที่เกิดขึ้นในน้ำจืด มีการสะสมตัวในทะเลสาบ บนภูเขาหรือจากปล่องภูเขาไฟ (Congar, 1942) มีการสะสมตัวอย่างอิสระที่มีกระแสน้ำหรือแม่น้ำมาเกี่ยวข้อง น้ำจะไหลเข้ามาโดยการซึม แหล่งแร่ในโลกส่วนมากมีการกำเนิดแบบในทะเลสาบ แหล่งในทะเลแม้ว่าจะมีน้อยแต่โดยทั่วไปเป็นแหล่งขนาดใหญ่ การสะสมตัวที่ละเอียดที่ละเอียดอย่างยาวนานของแอ่งในทะเล หรือทะเลสาบน้ำจืดทำให้เกิดชั้นหนาของดินเบา ผลจากกระบวนการหลังการสะสมตัวของแหล่งดินเบา เข้าใจยากการเปลี่ยนแปลงนี้ มีอิทธิพลต่อความพรุน และระดับชั้นของการประสานตัว ซึ่งมีการแยกตัว การเคลื่อนไหว และการตกตะกอนใหม่ของซิลิกาในไดอะตอม ในที่สุดดินเบาจะเปลี่ยนเป็นเชิร์ต (chert) (Mathers, 1989) โคลนไดอะตอมมีรายงานว่ามีส่วนของสารอินทรีย์มากมาย ซึ่งแปรสภาพจากรูปร่างที่อ่อนนุ่มของไดอะตอมและอาจจะเป็นหินกำเนิดของแหล่งปิโตรเลียมได้ (Talliaferro, 1933) การยกตัวของแหล่งดินเบาภายใต้เงื่อนไขกระแสน้ำที่ดี สามารถช่วยขจัดมลพิษพวกอินทรีย์ โดยการเติมออกซิเจนและการชะละลาย (Congar, 1942)

แหล่งดินเบาที่สำคัญที่สำรวจโดยกรมทรัพยากรธรณีในประเทศไทย พบที่ จ. ลำปาง พบกระจายกระจายในเขต อ.เมือง อ.เกาะคา อ.แม่ทะ และ อ.สบปราบ มักพบเป็นเนินลูกรังเล็กๆ โดยมีความสูงจากท้องนา 10-20 เมตร เช่น ที่แหล่งบ้านม่อนหินแก้ว บ้านป่าม่วง บ้านน้ำโจ้ว และบ้านม่อนแสงสี รวมทั้งแหล่งบ้านกล้วยแพะ ชั้น diatomite ถูกปิดทับด้วยก้อนกรวดและก้อนหินมนเล็ก การสะสมตัวอีกชนิดหนึ่งเกิดขึ้นตามเชิงลาด บริเวณขอบของแอ่งลำปาง โดยชั้นก้อน



กรวดปิดทับ พบเห็นตามเนินเตี้ยๆ เป็นหย่อมๆ มีความยาวหลายกิโลเมตร ที่บ้านพิชัย บ้านห้วยน้ำเต็ม บ้านกัวลม และทางใต้ของนิคมกัวลม บริเวณแหล่งที่กล่าวถึงทั้งหมดนี้มีพื้นที่ครอบคลุมประมาณ 30 ตารางกิโลเมตร

### 2.2.2 ชีววิทยาและนิเวศวิทยาของไดอะตอม

ไดอะตอมจัดอยู่ในพวก protista เช่นเดียวกับ protozoans, moulds และ fungi ไดอะตอมเป็นพืชเซลล์เดียว ขนาดเล็กมาก มีขนาดตั้งแต่ 2-2,000 ไมครอน มีรูปร่างอ่อนนุ่ม ประกอบด้วย cytoplasm, oil, globules และ chloroplasts เชื่อมกันด้วย opaline exoskeleton ซึ่งโครงสร้างกระดูกนี้หรือ frustules อาจจะมีลักษณะเป็นทรงกลมหรือทรงรี ลักษณะภายนอกเป็นรูคล้ายตะแกรง มีโครงสร้างเป็นตาข่ายซับซ้อน ตัวไดอะตอมสร้างอาหารโดยการรวมคาร์บอน (ที่ได้จากการสังเคราะห์แสงของคาร์บอนไดออกไซด์) กับสารอาหารที่สกัดจากน้ำทะเล ไดอะตอมเป็นพื้นฐานของวงจรอาหารในทะเล เป็นอาหารหลักของกุ้งตัวเล็กๆ ซึ่งเป็นอาหารของพวกสัตว์มีกระดูกสันหลัง อีกต่อหนึ่ง

ไดอะตอมสามารถอยู่ในสภาพแวดล้อมทางน้ำหลายแบบ โดยต้องการเงื่อนไขสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมจึงจะเจริญเติบโตได้ เช่น มีอุณหภูมิ และเงื่อนไขทางแสงที่เหมาะสม มีสภาพความเค็ม ความเป็นกรดในวงจำกัด และได้รับสารอาหารตลอดเวลาจำพวก ซิลิกา ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส เหล็ก ออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ไดอะตอมอาศัยอยู่ในเขตที่มีแสง มีความลึกถึง 200 เมตร การศึกษาเมื่อไม่นานมานี้ได้ใช้กลุ่มไดอะตอมเป็นเครื่องชี้บอกสภาพแวดล้อมของทะเลสาบน้ำจืดในยุคเทอร์ควารี (quaternary) และในสมัยปัจจุบัน (Stager, 1988)

### 2.2.3 ส่วนประกอบทางเคมี

ดินเบาบริสุทธิ์ ประกอบด้วย opaline หรือ hydro silica กับสารอนินทรีย์อื่นๆ เล็กน้อย เช่น alumina, เหล็ก, alkaline metals เป็นต้น ดินเบาดิบอาจมีอินทรีย์สาร และพวกเกลือละลาย ชิ้นส่วนของแร่ประกอบหินทราย ดิน หรือคาร์บอนในปริมาณต่างๆ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงผลการวิเคราะห์ทางเคมีของดินเบา จากแหล่งแร่ต่างๆ

1. Hollywood, California
2. Dragowistiza near Sofia, Bulgaris
3. The Gurmen deposit, Blagoevgrad, Bulgaria

Composittion in %	1	2	3
SiO <sub>2</sub>	73.71	83.50	68.80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.25	10.56	13.70
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.63	2.04	5.30
MgO	1.47	0.67	0.90
CaO	1.72	1.18	1.10
Na <sub>2</sub> O	1.19	2.05	1.80
K <sub>2</sub> O	1.00	2.05	1.80
Loss on ignition	6.94	8.52	-

- ที่มา : 1. Pettijohn (1957)  
 2. Atanasov (1972)  
 3. Atanasov (1974)

#### 2.2.4 คุณสมบัติทางกายภาพ

ดินเบามักมีสีค่อนข้างอ่อน ขาวหรือสีครีมคล้ายพวกชอล์ก โดยแหล่งดินเบาที่เกิดในแหล่งน้ำจืดมักจะมีสารอินทรีย์ปะปนอยู่ด้วย สารที่ปรากฏจะทำให้สีแตกต่างออกไปจากน้ำตาลอ่อนถึงน้ำตาลเขียว หรือเกือบดำซึ่งยากแก่การแยกจากสารพวกที่คล้ายถ่านหิน (peatlike material) โครงสร้างอาจจะเป็นแบบเนื้อแน่นหรือเป็นลาย ความแข็งของอนุภาคดินเบาตามสเกลความแข็งมาตรฐาน โมลห์ อยู่ระหว่าง 4.5-6.0 แต่ความแข็งปรากฏของแร่ดินเบาเนื้อแน่นประมาณ 1.5 ทั้งนี้เนื่องจากความหนาแน่นปรากฏน้อย และความร่วนของเนื้อดินที่มีรูพรุนความถ่วงจำเพาะ 2.1-2.2 เมื่อบริสุทธิ์และแห้งมีความถ่วงจำเพาะปรากฏน้อยกว่า 1 ดังนั้น แร่ดินเบาจะลอยน้ำได้จนกว่าจะอมจนอิมตัวด้วยน้ำ ความหนาแน่นปรากฏ 5-16 ปอนด์/ลบ.ฟุต ความหนาแน่นเมื่อเปียก 10-20

ปอนด์/ลบ.ฟุต ดัชนีหักเห 1.42-1.48 ไม่ละลายในกรดยกเว้นกรด HF แต่ละลายได้ง่ายในด่างแสดง  
ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงลักษณะทางกายภาพของดินเบา

Parameters	Pink	White
PH	6-7	8-9
True density, g/cm <sup>3</sup>	2.26	2.20
Free fall density, g/cm <sup>3</sup>	0.41	0.21
Packed density, g/cm <sup>3</sup>	0.47	0.24
Void space	0.80	0.90
Surface area, m <sup>2</sup> /g	4.00	1.00

ที่มา : Ottenstein (1963)

## 2.2.5 การใช้ประโยชน์ดินเบาในอุตสาหกรรมต่างๆ

### 2.2.5.1 ใช้เป็นสารช่วยกรอง (filter aids)

การใช้ประโยชน์ของดินเบา ส่วนใหญ่ใช้เป็นสารช่วยกรอง (ซึ่งมีปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ ของการใช้งานดินเบาทั้งหมด) ในการกรองผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวในอุตสาหกรรม และที่ไม่ใช่อุตสาหกรรม รวมทั้งสารเคมีชนิดอินทรีย์และอนินทรีย์เภสัชภัณฑ์ (pharmaceuticals) เบียร์ เหล้าองุ่น น้ำมันต่างๆ ดินเบาใช้เป็นสารช่วยกรองเพราะมีคุณสมบัติในการซึมซับ อนุภาค ชนิดละเอียดที่แขวนลอยอยู่ในสารละลายที่ต้องการกรองได้เป็นอย่างดี รวดเร็ว และได้สารละลายที่ใสขึ้น คุณสมบัติการเป็นสารช่วยกรองที่ดี ต้องมีความบริสุทธิ์ทางเคมีสูง มีปริมาณแคลเซียม และเหล็กต่ำ รวมทั้งมีสารอื่นที่ละลายได้ (soluble salts) อยู่เป็นส่วนน้อย มีคุณสมบัติทางกายภาพเหมาะสมกับการเป็นสารช่วยกรอง คือต้องมีการซึมซับสูง มีลักษณะรูพรุนมาก และมีขนาดอนุภาคที่เหมาะสม

### 2.2.5.2 ใช้เป็นตัวเติม (fillers)

ดินเบาใช้เป็นสารตัวเติมในสี พลาสติก ยาง เกสซ์ภัณฑ์ สารขัดมันและเคมีภัณฑ์ต่างๆ ดินเบาใช้เป็นตัวเติมมีการใช้มากเป็นอันดับที่สอง ดินเบาที่ใช้เติมในผลิตภัณฑ์เพื่อการค้า มีทั้งชนิดจากธรรมชาติ และชนิดที่ผ่านการทำ calcine แล้ว โดยทั่วไปดินเบาที่ใช้เติมในผลิตภัณฑ์ของสี และสีรองพื้น เพราะดินเบาที่มีคุณสมบัติเป็น flatting ที่ดี ทำให้การซึมของสีดีขึ้นและแห้งเร็ว มีความตึงผิวดี และเรียบเหมือนขัดด้วยทราย ส่วนดินเบาที่ใช้เติมในอุตสาหกรรมพลาสติก ส่วนใหญ่ใช้เป็นสาร anti-blocking ในผลิตภัณฑ์ฟิล์มโพลีเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำตามปกติจะเติมดินเบาลงไปให้มีความเข้มข้น 300-500 ppm เพื่อป้องกันการติดกันของฟิล์ม

### 2.2.5.3 ใช้ทำแผ่นฉนวนและผงดูดซับ (insulators and absorbers)

บริษัทในประเทศเดนมาร์ก ได้ผลิตอิฐฉนวนจากวัตถุดิบที่เรียกว่า molar ซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติเป็นสารผสมระหว่าง ดินเบา และ 20-25 % ของ plastic clay นอกจากนี้ยังใช้ molar ซึ่งมีส่วนผสมของดินเบา นั้น ในการผลิตสารดูดซับชนิดผงและชนิดเม็ดที่ใช้ในเตาอบแห้งด้วย ใช้ในการดูดซับในผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมอาหารสัตว์ ยาฆ่าแมลง ส่วนดินเบาที่เป็นผงและผ่านการ calcine แล้วจะใช้ในวัตถุระเบิด , seed coating และในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์เคมีต่างๆ แต่ molar ไม่มีความบริสุทธิ์พอสำหรับการใช้เป็นสารช่วยกรองและตัวเติมได้

### 2.2.5.4 การใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ

นอกจากประโยชน์ดังกล่าวข้างต้นแล้ว ยังสามารถนำดินเบามาใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ ได้อีก เช่น เป็นสารขัดถูชนิดอ่อนสำหรับผสมในยาสีฟันและน้ำยาขัดโลหะ เป็นตัวกลางที่ใช้ป้องกันการแข็งตัวของปุ๋ย ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก โดยเป็นตัวเติมเพื่อลดความเหนียวในดินปั้น และเพิ่มความแข็งแรงด้วย ช่วยในการขึ้นรูปได้ดี ใช้ทำน้ำยาเคลือบในการทำผงสีเซรามิกและทำอิฐทนไฟ เพราะมีคุณสมบัติต้านทานความร้อนได้ดี เป็นตัวกลางควบคุมในวัตถุระเบิด ใช้ใน chromatography support media และ pitch control ในอุตสาหกรรมกระดาษ เป็นตัวนำพาตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ เช่น ใช้เป็นตัวนำพาในอุตสาหกรรมทำกรดกำมะถัน และในกรดฟอสฟอริกในการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม

## 2.3 การดูดซับ (adsorption)

### 2.3.1 หลักการดูดซับ

การดูดซับ (adsorption) เป็นปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของสารไปเกาะอยู่บนผิวหน้าของของแข็งหรือของเหลว สารที่ไปเกาะเรียกว่า สารที่ถูกดูดซับ (adsorbate) และของแข็งหรือของเหลวที่พื้นที่ผิวของมันถูกสารเกาะเรียกว่า สารดูดซับ (adsorbent) การดูดซับด้วยของแข็งจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัสของของแข็ง การดูดซับจะเกิดขึ้นทั้งทางกายภาพ (physisorption) และทางเคมี (chemisorption) เมื่อโมเลกุลในวัฏภาคแก๊ส (gas phase) หรือวัฏภาคของเหลว (liquid phase) ยึดติดกับผิวของของแข็ง เนื่องจากแรงดึงดูดที่พื้นผิวของของแข็งซึ่งเป็นสารดูดซับมีค่ามากกว่าค่าพลังงานจลน์ของโมเลกุลของของเหลวนั้น

การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption หรือ physisorption) เกิดจากความแตกต่างของพลังงานหรือแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (electrical attractive force) อย่างอ่อนๆ ระหว่างโมเลกุลซึ่งเรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waals force) ทำให้เกิดการเกาะหรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับและโมเลกุลที่ผิวหน้าของสารดูดซับด้วยการดึงดูดของแรงระหว่างโมเลกุลของสารทั้งสองโดยวิธีทางกายภาพ ซึ่งจะทำให้เกิดชั้นหลายๆ ชั้นซ้อนทับกัน โดยแต่ละชั้นจะซ้อนทับอยู่เหนือชั้นที่เกิดขึ้นก่อน จำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร การดูดซับทางกายภาพนี้จะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดส่วนที่หนาและผันกลับไม่ได้ (irreversible) การดูดซับทางกายภาพมักจะเป็นแบบไม่เฉพาะ (nonspecific) กล่าวคือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ จะไม่คัดเลือกกับเฉพาะบริเวณใดบริเวณหนึ่งบนผิวหน้าของของแข็ง แต่จะเป็นอิสระในการเคลื่อนที่อยู่เหนือบริเวณผิวนั้น (Sawyer et al.,1994) โดยกระบวนการที่เกิดขึ้นจะไม่ขึ้นตรงกับอุณหภูมิและค่าไอออนสเตรงท์ (ionic strength) ของสารละลาย แต่มักจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชและสารเชิงซ้อนที่ปะปนอยู่ในวัฏภาคของเหลว (Allard et al.,1987) ทั้งนี้การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไปจะสามารถผันกลับได้ การผันกลับของการดูดซับทางกายภาพจะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับ ถ้าแรงดึงดูดนี้มีค่าน้อยจะสามารถเกิดการปลดปล่อยหรือคายสารที่ถูกดูดซับออกมา (desorption) ซึ่งอาจเป็นผลจากการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ หรือการเพิ่มอุณหภูมิเข้าไปในปริมาณมาก ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการดูดซับทางกายภาพจะทำให้เกิดการคายความร้อน โดยปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจะมีค่าใกล้เคียงกับความร้อนแฝงของการกลั่นตัวเป็นของเหลว (พล,2518)

**การดูดซับทางเคมี** (chemical adsorption หรือ chemisorption) เกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับและสารดูดซับ หรือแรงดึงดูดทางเคมีซึ่งเป็นแรงที่แข็งแกร่งกว่าการดูดซับทางกายภาพ และเป็นแรงที่ทำให้เกิดพันธะ ณ บริเวณเฉพาะ (specific) ใดๆ บนพื้นผิวของวัสดุของแข็ง เกิดเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่ที่ผิวสัมผัสของสารดูดซับ ทำให้ค่าความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงใกล้เคียงกับค่าของพลังงานพันธะเคมี อาจเกิดการดูดซับได้ช้าและผันกลับไม่ได้เป็นบางส่วน โดยทั่วไปสารที่ถูกดูดซับจะเกิดเป็นโมเลกุลชั้นเดียว (monolayer)เหนือผิวหน้าของสารดูดซับโดยโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระจากบริเวณผิวนั้นไปยังบริเวณอื่น เมื่อผิวหน้าของสารดูดซับถูกปกคลุมด้วยโมเลกุล 1 ชั้นแล้วความสามารถในการดูดซับของมันจะลดลง จึงเกิดการผันกลับได้ยาก นอกจากจะมีการให้ความร้อนถึงอุณหภูมิสูงๆ แล้วสารดูดซับจึงจะแยกตัวออกมาจากสารดูดซับได้ (Sawyer et al.,1994) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเกิดที่อุณหภูมิสูงและเกี่ยวข้องกับพลังงานกระตุ้น (activation energy) รวมทั้งยังมีการใช้พลังงานความร้อนในการผันกลับของปฏิกิริยาดังกล่าวด้วย ทั้งนี้ การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญต่างๆ ได้แก่ ส่วนประกอบของพื้นผิวของของแข็ง ความเข้มข้นของตัวถูกละลาย พีเอช และอุณหภูมิของสารละลาย (Allard et al.,1987)

นอกจากนี้ยังมีการกล่าวถึงการดูดซับอีกประเภทหนึ่ง คือการดูดซับแบบแลกเปลี่ยน (exchange adsorption) ซึ่งใช้ในการอธิบายถึงการดูดซับที่บอกลักษณะด้วยการดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างสารถูกดูดซับกับบริเวณผิวหน้าของสารดูดซับ โดยที่การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) ก็ถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มของการดูดซับประเภทนี้เช่นกัน กล่าวคือไอออนของสารถูกดูดซับซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมากบริเวณผิวหน้าเป็นผลมาจากการดึงดูดทางสถิตย์ไฟฟ้า (electrostatic attraction) ซึ่งดึงดูดไอออนสู่บริเวณที่มีประจุแบบตรงกันข้ามที่อยู่บนผิวหน้าของสารดูดซับ รวมทั้งไอออนของสารถูกดูดซับที่มีอยู่ในสารละลายจะเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีประจุแบบเดียวกันซึ่งปะติดอยู่กับสารดูดซับ โดยทั่วไปนั้นไอออนที่มีประจุมากกว่า เช่น ไอออนแบบไตรวาเลนต์ (trivalent ions) จะถูกดึงดูดสู่บริเวณที่มีประจุแบบตรงกันข้ามได้แรงกว่าไอออนที่มีประจุน้อยกว่า เช่น ไอออนแบบโมนอวาเลนต์ (monovalent ions) การแลกเปลี่ยนไอออนเป็นปฏิกิริยาเคมีที่ผันกลับได้ นอกจากนี้ไอออนที่มีขนาดเล็กกว่าจะถูกดึงดูดได้แรงกว่าไอออนที่มีขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะมีความแตกต่างกันระหว่างการดูดซับทั้ง 3 ประเภทที่กล่าวมา แต่ก็ยังเป็นการยากที่จะตัดสินใจว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นบนสารดูดซับใดๆ จะมีการดูดซับแบบใดแบบหนึ่งที่กล่าวมาเกิดขึ้นเพียงแบบเดียวบนสารดูดซับนั้น (Sawyer et al.,1994)

การดูดซับทางกายภาพจะต่างจากการดูดซับทางเคมีคือ

- 1) การดูดซับทางกายภาพไม่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนหรือใช้อิเล็กทรอนิกส์ร่วมกัน
- 2) การดูดซับทางกายภาพจะไม่จำกัดเกี่ยวกับบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา โมเลกุลที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปเกาะยังพื้นที่ผิวส่วนใดก็ได้ แต่การดูดซับทางเคมีจะเลือกเฉพาะบริเวณที่สามารถเกิดพันธะเคมีได้เท่านั้น
- 3) ค่าความร้อนของการดูดซับทางกายภาพจะมีค่าต่ำ โดยมีค่าเท่ากับความร้อนของการกลายเป็นของเหลว ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการดูดซับทางเคมีที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น
- 4) การดูดซับทางกายภาพจะเกี่ยวข้องกับการเกิดของชั้นหลายโมเลกุล (multimolecular layers) ส่วนการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นสมบูรณ์ เมื่อมีการเกิดชั้นที่หนึ่งแล้ว ซึ่งบางครั้งการดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นที่พื้นผิวชั้นบนของการดูดซับทางเคมีก็ได้
- 5) การดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นอย่างทันที เป็นการแพร่เข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับ ซึ่งต้องใช้เวลาพอสมควร ส่วนการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นอย่างทันทีเช่นกัน แต่ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้นด้วย (ปิยะพร, 2542)

### 2.3.2 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (kinetic adsorption)

ลักษณะของการดูดซับหรือการส่งถ่ายมวลสารที่อยู่ภายในสารละลายไปยังพื้นที่ผิวของของแข็งซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้กำจัดสารปนเปื้อน มี 3 ขั้นตอนสำคัญ คือ

- 1) การถ่ายโอนมวลสารของสารที่ถูกดูดซับจากภูมิภาคของเหลวหรือแก๊สเข้าสู่บริเวณรอบนอกที่ใกล้กับพื้นผิวของสารดูดซับหรือที่ทางเข้ารูพรุนของสารดูดซับ
- 2) การแพร่กระจายของมวลสารที่ถูกดูดซับจากรอบนอกที่ใกล้กับพื้นผิวของสารดูดซับเข้าสู่ผิวภายในรูพรุนของสารดูดซับ
- 3) การดูดซับ คือการที่โมเลกุลที่อยู่ภายในรูพรุนถูกดูดซับจากสารละลายไปปะติดอยู่ที่ภูมิภาคของแข็ง ซึ่งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับ 2 ขั้นตอนที่ผ่านมา คาดว่าภาวะสมดุลเกิดขึ้นระหว่างภูมิภาคทั้งสองนี้

### 2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

#### 1) ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ และอัตราการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดตัวดูดซับ โดยกลไกของการดูดซับภายนอกของตัวดูดซับที่ไม่มีโพรงนั้น อัตราการดูดซับจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวดูดซับ สำหรับตัวดูดซับที่มีโพรง อัตราของการเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นที่ผิวภายในโพรงถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า film transport ดังนั้น อัตราการดูดซับจะมีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าการเคลื่อนที่ภายในเป็นตัวควบคุมอัตราการดูดซับ การดูดซับจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวดูดซับ และได้พบว่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายของมวลภายนอก จะประมาณได้ว่าคงที่สำหรับขนาดอนุภาคคาร์บอนที่อยู่ในช่วง 300-900 (50/70 ขนาดตะแกรงมาตรฐาน ถึง 20/25 ขนาดตะแกรงมาตรฐาน) และจะลดลงเมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (Mathews and Zayas, 1989)

#### 2) ลักษณะของตัวดูดซับ

ความสามารถในการละลายน้ำของตัวดูดซับเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับ การดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวดูดซับในตัวทำละลายลดลง เนื่องจากการดูดซับตัวดูดซับจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย ซึ่งในที่นี้คือ น้ำ โดยตัวดูดซับที่ละลายน้ำได้ดี หรือแตกตัวเป็นไอออนได้ดีจะมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำสูง จึงเป็นการยากในการดูดซับ ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยจะสามารถดูดซับได้ดี นอกจากความสามารถในการละลายแล้ว ขนาดโมเลกุลของตัวดูดซับยังมีความสัมพันธ์กับการดูดซับ ซึ่งถ้าอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกแล้ว ความสามารถในการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวดูดซับ

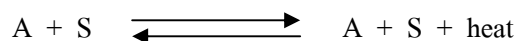
#### 3) พีเอช (pH)

พีเอชมีอิทธิพลต่อการดูดซับ เนื่องจากไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออนสามารถถูกดูดติดอย่างค่อนข้างแข็งแรง การดูดติดไอออนอื่นๆ จึงมีผลกระทบมาจากพีเอชของสารละลาย นอกจากนี้ พีเอชยังมีผลต่อการแตกตัวของไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ อีกด้วย

#### 4) อุณหภูมิ

การดูดซับโดยทั่วไปเป็นกระบวนการคายความร้อน (exothermal) ดังนั้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่อัตราเร็วในการดูดซับจะสูงขึ้น แสดงคั้งสมการ





ที่ซึ่ง A คือสารถูกดูดซับ และ S คือพื้นที่ผิว เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมดุลของปฏิกิริยา นอกจากนี้ อุณหภูมิ จะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ โดยเปลี่ยนความสามารถในการละลาย เช่น เมื่ออุณหภูมิซึ่งโดยปกติจะทำให้ความสามารถในการละลายสูงขึ้นมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง

#### 5) ความปั่นป่วน

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ การแพร่ภายนอกและการแพร่ภายใน ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถังน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ ดังนั้นการแพร่ภายนอกจึงเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าความปั่นป่วนสูงจะเกิดฟิล์มบางๆทำให้การแพร่ภายในเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

#### 6) เวลาสัมผัส

เวลาสัมผัสเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ และอายุการใช้งานของถังดูดซับ มีการพบว่าเวลาสัมผัสของถังเปล่าของสารดูดซับ และความเข้มข้นของน้ำเข้าของสารชีวมีคเป็นปัจจัยสำคัญซึ่งมีอิทธิพลต่ออายุการใช้งานของชั้นคาร์บอน โดยถ้าเวลาสัมผัสถึงเปล่าเพิ่มขึ้น และความเข้มข้นของน้ำลดลงแล้ว อายุการใช้งานของถังคาร์บอนจะนานขึ้น เวลาสัมผัสใช้ในการลดสารอินทรีย์ในน้ำเสียขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์อื่นๆ เช่น พื้นที่ผิวในการดูดซับ ลักษณะของโพรง ชนิดและขนาดโมเลกุลของตัวดูดซับในสารละลาย และชนิดของคาร์บอน

### 2.3.4 ประโยชน์ของการดูดซับในทางอุตสาหกรรม

การดูดซับเป็นกระบวนการแยกกำจัดอย่างหนึ่งที่ถูกนำมาใช้เป็นเวลานาน ดังที่ทราบได้จากการใช้ถ่านเพื่อกำจัดกลิ่นและรสของน้ำ ซึ่งมีการบันทึกไว้เป็นภาษาสันสกฤตมานานกว่า 2,000 ปี การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมสมัยใหม่ เริ่มจากที่มีผู้ค้นพบว่า ถ่านสามารถกำจัดสีของสารละลายได้ จึงมีการพัฒนาคุณสมบัติของถ่านเรื่อยมาจนกระทั่งได้ ถ่านกัมมันต์เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารพิษ การดูดซับจึงจัดได้ว่าเป็นกระบวนการที่มีประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรม (Tien, 1994) ประโยชน์จากการดูดซับที่ใช้ในอุตสาหกรรมเช่น การกำจัดสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ออกจากน้ำดื่ม เช่น สารพวกไตรฮาโลมีเทน (trihalometanees) สารปราบศัตรูพืช และสารประกอบอินทรีย์คลอรีนต่างๆ , การกำจัดกลิ่น รส และสีออกจากน้ำดื่ม , การ

กำจัดสีออกจากน้ำมันพืช ,การบำบัดน้ำเสียหรือของเสียจากอุตสาหกรรมโดยใช้เป็นส่วนหนึ่งในกระบวนการทางเคมีฟิสิกส์ (physicochemical process) หรือกระบวนการบำบัดขั้นที่ 3 (tertiary treatment) ,แยกพาร์ฟินและไอโซพาร์ฟินออกจากกัน เป็นต้น

## 2.4 การดูดซับโลหะหนักด้วยไฮดรอกไซด์

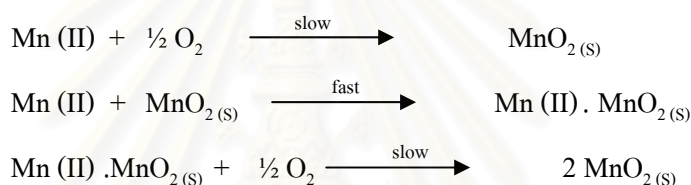
ไฮดรอกไซด์ (hydrous metal oxide) คือของแข็งที่ในตัวของมันเองมีส่วนประกอบที่เป็นไอออนบวกของโลหะตั้งแต่ 1 ชนิดขึ้นไปรวมอยู่กับธาตุของน้ำ ได้แก่ ไฮโดรเจน และออกซิเจน ดังนั้นไฮดรอกไซด์จึงครอบคลุมถึงสารประกอบโลหะหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกไซด์ (-OH) ออกซีไฮดรอกไซด์ (-OOH) และออกไซด์ (-O) เนื่องจากเป็นสารซึ่งมีลักษณะทางเคมีของบริเวณผิวหน้าที่ถูกไฮดรท (hydrate) ได้ในสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย (Kinniburgh and Jackson,1981)

การดูดซับไอออนบวกด้วยไฮดรอกไซด์มักเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนภายในเวลาไม่กี่นาที การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ของพื้นผิวที่พร้อมจะรับไอออนจากสารละลาย โดยที่การดูดซับตัวถูกละลายบนไฮดรอกไซด์จะเกิดได้ดีหรือไม่จะขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติต่างๆ ทางกายภาพและเคมีของแร่ธาตุนั้นๆ ที่อยู่ในรูปไฮดรอกไซด์ ลักษณะสมบัติเหล่านี้จะรวมไปถึงส่วนประกอบทางเคมี รูปร่างลักษณะของสาร การกระจายขนาดของอนุภาค พื้นที่ผิวสัมผัส และความพรุน รวมทั้งธรรมชาติและปริมาณของบริเวณพื้นผิวที่ดูดซับได้ นอกจากนี้ การดูดซับไอออนต่างๆ บนไฮดรอกไซด์ยังขึ้นอยู่กับพีเอชของสารละลายเป็นอย่างมาก โดยการดูดซับไอออนบวกจะเพิ่มขึ้นตามพีเอช ส่วนการดูดซับไอออนลบนั้นจะมีค่าสูงสุดที่พีเอชต่ำๆ บนไฮดรอกไซด์ และจะลดลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น (Dzombak and Morel,1990) ปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการดูดซับไอออนต่างๆ บนไฮดรอกไซด์ เช่น ไอออนิกสเตรนจ์ของสารละลาย ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ และไอออนอื่นๆ ที่ปะปนอยู่ในสารละลายซึ่งจะเข้ามาเป็นตัวแข่งขันในการดูดซับบนไฮดรอกไซด์ (Benjamin and Leckie,1980 )

### 2.4.1 แหล่งที่มาของแมงกานีสออกไซด์

ส่วนใหญ่แล้วไอออนของแมงกานีสมักจะอยู่ในน้ำใต้ดินและน้ำผิวดิน ซึ่งในน้ำใต้ดินนั้น ไอออนเหล่านี้จะอยู่ในรูปที่ถูกรีดิวซ์เป็นแมงกานีสที่มีประจุ +2 ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ แต่ถ้าอยู่ในน้ำผิวดินที่มีออกซิเจนละลายอยู่ แมงกานีสประจุ +2 จะถูกออกซิไดซ์เป็น  $MnO_2$  ซึ่งไม่สามารถละลายน้ำได้ และจะเกิดเฉพาะในช่วงพีเอชเป็นค่า

ปฏิกิริยาออกซิเดชันของแมงกานีสประจุ +2 เป็น autocatalytic และเขียนได้ดังนี้ (ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไม่เกิดสมดุลกันระหว่างน้ำกับโปรตอน)

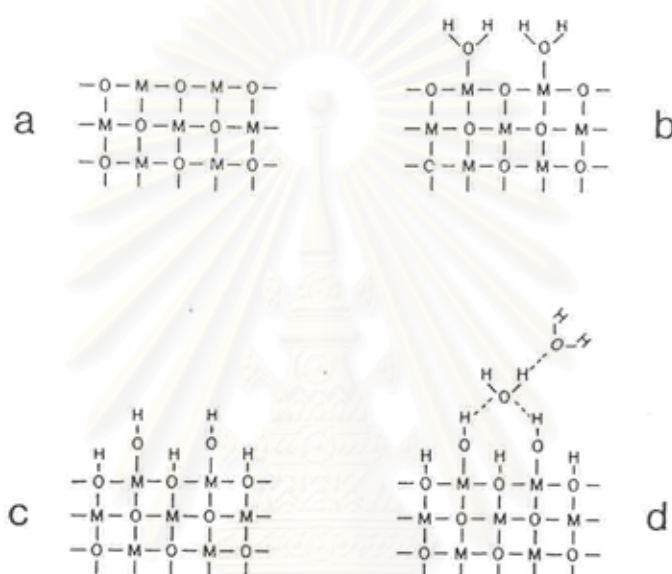


โดยพบว่าการเกิดออกซิเดชันของแมงกานีสประจุ +2 ด้วยออกซิเจนละลายน้ำมีอัตราส่วนสตอยชิโอเมตริกเท่ากับ  $MnO_{1.9}$  เฉพาะในสภาวะต่างๆ เท่านั้น ไฮดรัทโลหะออกไซด์ของแมงกานีส มักกระจายอยู่ทุกหนทุกแห่งไม่ว่าจะเป็นในดินเหนียว ดินหรือตะกอนต่างๆ โดยจะเคลือบอยู่บนผิวของแร่ธาตุอื่นๆ และจัดอยู่ในรูปของอนุภาคออกไซด์ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าออกไซด์เปรียบเสมือนตะกอนของโลหะหนัก นอกจากนี้ออกไซด์ของโลหะหนักยังมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น สูงถึง 300 ตารางเมตรต่อกรัม สำหรับ  $MnO_2$  (Forstner and Wittman, 1981)

กระบวนการเกิดแมงกานีสออกไซด์ถือว่าเป็นกระบวนการสำคัญในเคมีของน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการทำมาสน้ำ (การทำน้ำให้บริสุทธิ์) สารละลายแมงกานีสจะถูกกำจัดออกจากน้ำโดยการออกซิเดชันเป็นแมงกานีสออกไซด์ด้วยออกซิเจน หรือสารช่วยในการออกซิไดซ์ เช่น คลอรีน หรือ โพรแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต จากนั้นทำการแยกสารแขวนลอยที่เป็นโลหะออกไซด์ออกก่อนเข้าสู่ระบบกรอง

## 2.4.2 กลไกการดูดซับไอออนบวกบนไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์

เมื่อออกไซด์ของโลหะสัมผัสกับน้ำจะเกิดเป็นหมู่ไฮดรอกซิลขึ้นที่ผิวของโลหะ จากการดูดซับที่แยกโมเลกุลของน้ำออกจากกัน ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงโครงสร้างเมื่อตัดขวางชั้นผิวของออกไซด์ของโลหะ



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างเมื่อตัดขวางชั้นผิวของออกไซด์ของโลหะ

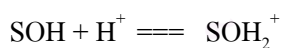
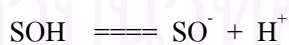
จากรูปที่ 2.1 ในขั้นแรก (รูป a) ไอออนของโลหะในชั้นผิวหน้าของออกไซด์ที่ยังแห้งอยู่ จะยังไม่มีโมเลกุลของน้ำเข้าไปจับ เมื่อโมเลกุลของน้ำเข้าไปจับกับบริเวณที่ยังว่างอยู่ ซึ่งเป็นบริเวณที่จะเกิดพันธะได้โดยการดูดซับทางเคมี (รูป b) จะทำให้ผิวหน้ากลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิลด้วยโปรตอน (H) ที่เคลื่อนย้ายมาจากโมเลกุลของน้ำที่ถูกดูดซับไว้แล้ว โดยโปรตอนดังกล่าวนี้จะแยกตัวออกมาจากโมเลกุลของน้ำมาสู่ออกซิเจนไอออนที่ประกอบอยู่ในชั้นผิว (รูป c) โดยอาจมีการดูดซับน้ำเข้าไปเพิ่มเติมได้อีกบนพื้นผิวที่กลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (รูป d) (Dzombak and Morel, 1990)

ไฮดรอกซิลโลหะออกไซด์จะแสดงพฤติกรรมแบบที่เป็นได้ทั้งกรดและเบส (amphoteric) ในน้ำ หมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนผิวของออกไซด์ สามารถจะยึดหรือปล่อยโปรตอนทำให้ออกไซด์ที่เกิดปฏิกิริยาโยกย้ายโปรตอนมีประจุเกิดขึ้นบนพื้นผิวของมัน ความเป็นกรดของพื้นผิวเป็นสมบัติที่สำคัญของไฮดรอกไซด์ เนื่องจากการมีหมู่ฟังก์ชันที่ผิวจะมีความสัมพันธ์อย่างมากกับชนิด และขอบเขตของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบริเวณส่วนที่มีการเชื่อมต่อของผิว (interfacial reaction) เช่น ปฏิกิริยาการดูดซับและการจับตัวเป็นก้อน บริเวณซึ่งเป็นกรดบนพื้นผิวแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ (Leckie,1986)

- 1) บริเวณที่เป็นกรดแบบลิวอิส (Lewis acid site) เป็นบริเวณที่สามารถรับอิเล็กตรอนจากโมเลกุลของตัวดูดซับ เช่น บริเวณที่เป็นเฟอร์ริกไอออน ( $Fe^{3+}$ ) ซึ่งอยู่ในขอบของผลึก
- 2) บริเวณที่เป็นกรดแบบบรอนสเตด (Bronsted acid site) เป็นบริเวณที่ให้โปรตอน เช่น Si-OH, Fe-OH, Al-OH, หรือ  $H_3O^+$

ไฮดรอกซิลไอออนที่ผิวซึ่งสามารถเป็นได้ทั้งกรดและเบสดังที่กล่าวมา สามารถเกิดพันธะกับไอออนของโลหะได้ เช่นเดียวกับลิแกนด์อื่นๆ ของสารละลาย ปฏิกิริยากรดเบสที่เกิดขึ้นบนผิวของออกไซด์ของโลหะ จะสามารถอธิบายถึงลักษณะได้จากการได้รับหรือสูญเสียโปรตอนมากกว่าที่จะอธิบายด้วยการแลกเปลี่ยนไฮดรอกซิลไอออน

ปฏิกิริยาที่ใช้อธิบาย คือ



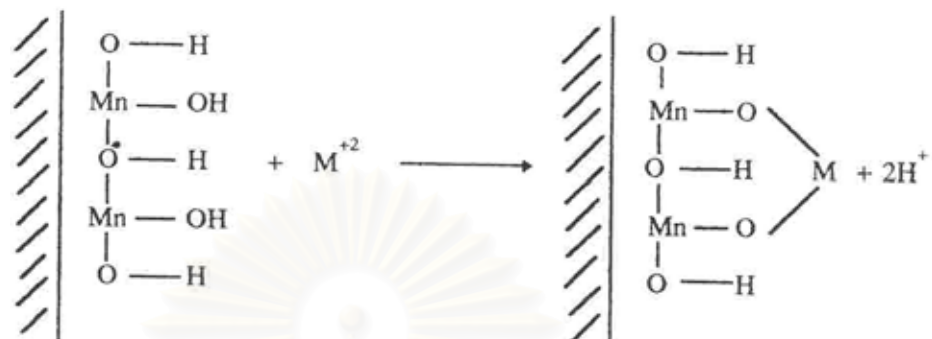
โดยที่ SOH คือหมู่ไฮดรอกซิลทั่วไปบนผิวของออกไซด์ของโลหะหลังจากสัมผัสกับน้ำ

ดังนั้นปฏิกิริยาที่โปรตอนถูกแทนที่โดยไอออนของโลหะหรือลิแกนด์เพื่อที่จะแลกเปลี่ยนภายในหมู่ไฮดรอกซิลจะมีลักษณะเกี่ยวกับการเกิดสารเชิงซ้อน ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้บนพื้นผิวซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันออกไซด์กับตัวถูกละลาย (Leckie,1986)

Surface Reactions
Proton/Surface Reactions
$\text{SOH}_2^+ \rightleftharpoons \text{SOH} + \text{H}^+$
$\text{SOH} \rightleftharpoons \text{SO}^- + \text{H}^+$
Metal/ Surface Reactions(Inner-Sphere)
$\text{SOH}_2^+ + \text{M} \rightleftharpoons \text{SOM} + 2\text{H}^+$
$\text{SOH} + \text{M} \rightleftharpoons \text{SOM} + \text{H}^+$
$\text{SO}^- + \text{M} \rightleftharpoons \text{SOM}$
$\text{SOH} + \text{H}_2\text{O} + \text{M} \rightleftharpoons \text{SOMOH} + 2\text{H}^+$
$\text{SOH} + 2\text{H}_2\text{O} + \text{M} \rightleftharpoons \text{SOM}(\text{OH})_2 + 3\text{H}^+$
$(\text{SOH})_2 + \text{M} \rightleftharpoons (\text{SO})_2\text{M} + 2\text{H}^+$
$(\text{SOH})_2 + \text{M} \rightleftharpoons \text{S}_2\text{OOHM} + \text{H}^+$
Ligand/ Surface Reactions(Inner-Sphere)
$\text{SOH}_2^+ + \text{L} \rightleftharpoons \text{SL} + \text{H}_2\text{O}$
$\text{SOH} + \text{H}^+ + \text{L} \rightleftharpoons \text{SL} + \text{H}_2\text{O}$
$\text{SOH} + 2\text{H}^+ + \text{L} \rightleftharpoons \text{SLH} + \text{H}_2\text{O}$
$(\text{SOH})_2 + 2\text{H}^+ + \text{L} \rightleftharpoons \text{S}_2\text{L} + 2\text{H}_2\text{O}$
$(\text{SOH})_3 + 3\text{H}^+ + \text{L} \rightleftharpoons \text{S}_3\text{L} + 3\text{H}_2\text{O}$
Mixed ligand (Ternary) Reactions(Inner-Sphere)
$\text{SOH} + \text{ML} \rightleftharpoons \text{SOML} + \text{H}^+$
$\text{SOH} + \text{ML} \rightleftharpoons \text{SLM} + \text{OH}^-$
$(\text{SOH})_2 + \text{ML} \rightleftharpoons \text{SOMLS} + \text{H}_2\text{O}$
Ion Pair Reactions(Outer-Sphere)
$\text{SOH} + \text{M} \rightleftharpoons \text{SO}^- \cdots \text{M} + \text{H}^+$
$\text{SOH} + \text{H}_2\text{O} + \text{M} \rightleftharpoons \text{SO}^- \cdots \text{MOH} + 2\text{H}^+$
$\text{SOH} + \text{H}^+ + \text{L} \rightleftharpoons \text{SOH}_2^+ \cdots \text{L}$
$\text{SOH} + 2\text{H}^+ + \text{L} \rightleftharpoons \text{SOH}_2^+ \cdots \text{LH}$
Exchange Reactions
$\text{SO}^- \cdots \text{Na}^+ + \text{M} \rightleftharpoons \text{SO}^- \cdots \text{M} + \text{Na}^+$
$\text{SO}^- \cdots \text{Na}^+ + \text{M} \rightleftharpoons \text{SOM} + \text{Na}^+$
$\text{SOH}_2^+ \cdots \text{SO}_4^{2-} + \text{L} \rightleftharpoons \text{SOH}_2^+ \cdots \text{L} + \text{SO}_4^{2-}$
$\text{SOH}_2^+ \cdots \text{SO}_4^{2-} + \text{L} \rightleftharpoons \text{SL} + \text{SO}_4^{2-} + \text{H}_2\text{O}$

การดูดซับโลหะหนักด้วยแมงกานีสออกไซด์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 (พนจิตร, 2539)



รูปที่ 2.2 แสดงการดูดซับโลหะหนักด้วยแมงกานีสออกไซด์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2.5 ไอโซเทอมการดูดซับ

ไอโซเทอมการดูดซับ เป็นการแสดงปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อหน่วยของสารดูดติดผิว ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่จุดสมดุลในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ ไอโซเทอมการดูดซับมีหลายรูปแบบ ดังต่อไปนี้

### 2.5.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir adsorption isotherm)

สมมติฐานพื้นฐานของแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ คือ

- โมเลกุลถูกดูดติดอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของสารดูดติดผิว
- มีโมเลกุลเดียวในบริเวณถูกดูดติดผิว
- พื้นที่ของบริเวณดูดติดผิวมีจำนวนที่แน่นอน ซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นผิว
- พลังงานการดูดติดผิวมีค่าเท่ากันทุกบริเวณ

การดูดติดผิวจากสารละลายโดยสารดูดติดผิว แสดงได้ดังสมการ

$$X = (X_m b C_e) / (1 + b C_e) \quad (2.1)$$

โดย  $X$  = ปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อหน่วยน้ำหนักของคาร์บอน (มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/กรัม)

$X_m$  = ปริมาณตัวถูกละลายมากที่สุดที่ถูกดูดติดผิวเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว (monolayer) (มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/กรัม)

$C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร หรือ โมล/ลิตร)

$b$  = ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดติดผิว

เมื่อ  $X$  เข้าสู่อันดับ  $X_m$  และ  $C_e$  เข้าสู่อันดับ  $\infty$  จะเขียนสมการได้เป็น

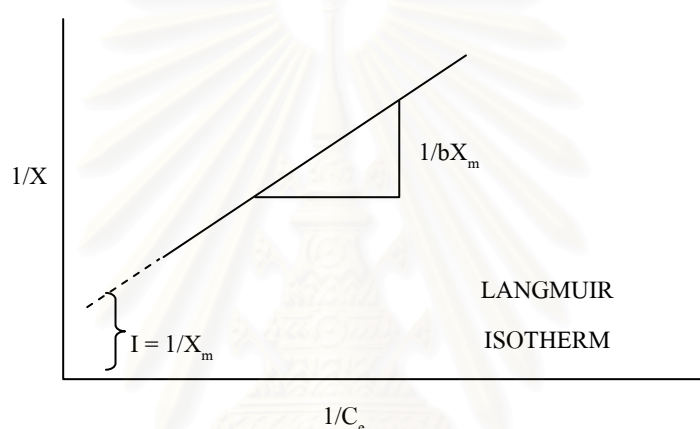
$$C_e / X = (1 / b X_m) + (C_e / X_m) \quad (2.2)$$



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

$$1/X = (1/X_m) + (1/C_e)(1/bX_m) \quad (2.3)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $1/X$  กับ  $1/C_e$  ซึ่งเป็นเส้นตรง จะมีความชัน  $1/bX_m$  และจุดตัดแกน y เท่ากับ  $1/X_m$  จากสมการ 2.2 และ 2.3 แสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์

### 2.5.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบบีอีที (BET : Brunauer – Emmett – Teller adsorption isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับแบบบีอีทีพัฒนามาจากไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ โดยจากการดูดติดผิวแบบชั้นเดียว (Monolayer) เป็นการดูดติดผิวแบบหลายชั้น (Multilayers) ซึ่งแต่ละโมเลกุลในชั้นดูดติดผิวชั้นแรก จะเป็นบริเวณที่ซึ่งมีโมเลกุลชั้นที่ 2 ดูดติด เช่นเดียวกันกับชั้นอื่นๆ ต่อไป โดยแสดงได้ดังสมการ

$$X = (X_m b C_e) / (C_s - C_e) (1 + (b - 1) C_e / C_s) \quad (2.4)$$

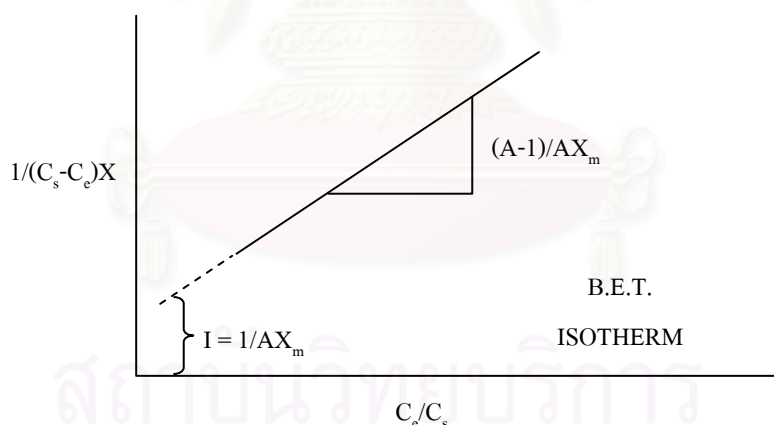
โดย  $X$  = ปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดต่อหน่วยน้ำหนักของคาร์บอน (มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/กรัม)

- $X_m$  = ปริมาณตัวถูกละลายมากที่สุดที่ถูกดูดติดผิวเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว (monolayer) (มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/กรัม)
- $C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร หรือ โมล/ลิตร)
- $C_s$  = ความเข้มข้นอิ่มตัวของตัวถูกละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร หรือ โมล/ลิตร)
- $b$  = ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดติดผิว

จากสมการที่ 2.4 สามารถเปลี่ยนได้เป็น

$$C_e / X(C_s - C_e) = (1 / X_m b) + ((b - 1) / X_m b)(C_e / C_s) \quad (2.5)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $C_e / X(C_s - C_e)$  กับ  $C_e / C_s$  ซึ่งเป็นเส้นตรงที่มีความชัน  $(b-1)/X_m b$  และจุดตัดแกน y เท่ากับ  $1/X_m b$  จากสมการ 2.4 และ 2.5 แสดงได้ดังรูป 2.4



รูปที่ 2.4 ไอโซเทอมการดูดซับแบบบีอีที

### 2.5.3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm)

สมการการดูดซับแบบฟรอนด์ลิชใช้กันแพร่หลายที่สุดในการอธิบายการดูดซับในระบบของเหลว ซึ่งมีสมการดังนี้ คือ

$$X / m = KC_e^{1/n} \quad (2.6)$$

โดย  $X$  = ปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อหน่วยน้ำหนักของคาร์บอน  
(มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/กรัม)

$C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุลย์  
(มิลลิกรัม/ลิตร หรือ โมล/ลิตร)

$K$  = ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดติดผิวของคาร์บอน

$1/n$  = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดติดผิว

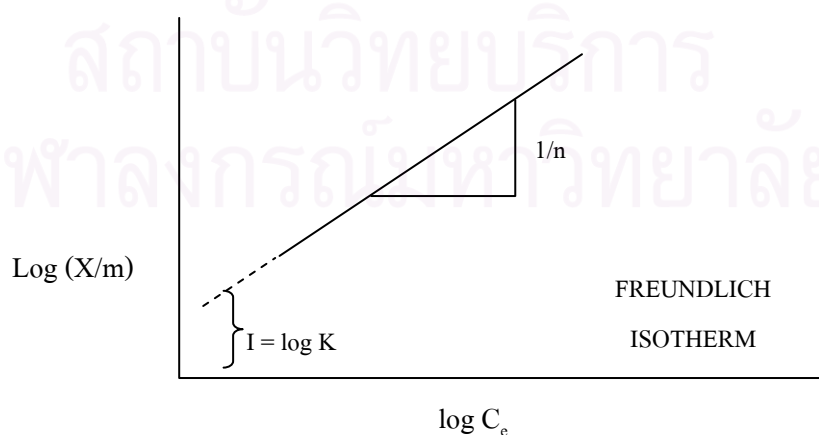
$m$  = น้ำหนักของสารดูดติดผิว (กรัม)

จากสมการที่ 2.6 สามารถเขียนสมการในรูป logarithmic ได้ดังนี้ คือ

$$\log(X / m) = \log K + 1 / n \log C_e \quad (2.7)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log(X/m)$  กับ  $\log C_e$  จะเป็นเส้นตรงที่มีความชัน  $1/n$  และ  $\log K$  จุดตัดแกน  $y$  ของ  $\log(X/m)$  ที่  $\log C_e = 0$  ( $C_e = 1$ ) จากสมการที่ 2.6 และ 2.7 แสดงได้ดังรูปที่ 2.5

จากสมการการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช แสดงถึงความสามารถในการดูดติดผิว โดยถ้าค่า  $n < 1$  แสดงถึงการดูดติดผิวที่ไม่ดี แต่ถ้าค่า  $n > 1$  แสดงถึงการดูดติดผิวที่ดี



รูปที่ 2.5 ไอโซเทอมการดูดซับผิวแบบฟรุนดลิช

## 2.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำแมงกานีสออกไซด์ไปใช้ประโยชน์ในด้านวิทยาศาสตร์สถานะแวดล้อม เพื่อการบำบัดของเสียมีดังนี้

Gadde และ Laitinen (1974) ศึกษาการดูดซับโลหะหนักด้วยไฮดรอกไซด์ของเหล็ก และ แมงกานีสที่เตรียมขึ้นจากการตกตะกอน โลหะหนักที่ทำการศึกษาได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม สังกะสี และไทเทเนียม ทดลองใช้สารละลายที่มีโลหะหนักชนิดเดียวผสมอยู่ พบว่าการดูดซับด้วยไฮดรอกไซด์ทั้งสองชนิด สามารถเรียงลำดับโลหะหนักที่ถูกดูดซับได้จากมากไปน้อย ดังนี้ ตะกั่ว > สังกะสี > แคดเมียม > ไทเทเนียม

McKenzie (1980) ศึกษาการดูดซับโลหะหนักด้วยออกไซด์ของแมงกานีสและเหล็ก จำนวน 12 ชนิด โลหะหนักที่ทำการศึกษาได้แก่ โคบอลต์ ทองแดง แมงกานีส นิกเกิล ตะกั่ว และทองแดง ออกไซด์ของแมงกานีส 9 ชนิดที่ใช้เป็นสารดูดซับได้แก่ B9 Birnessite, B14 Birnessite, B36 Birnessite, B38 Birnessite, C15 Fine-grained cryptomelane, C17 cryptomelane, C37 Fine-grained poorly crystalline cryptomelane,  $\rho$ -MnO<sub>2</sub> และ  $\gamma$ -MnO<sub>2</sub> ออกไซด์ของเหล็ก 3 ชนิด ที่ใช้เป็นสารดูดซับได้แก่ เกอไทต์ ฮีมาไทต์ และแมงนีไทต์ ทดลองการดูดซับโดยใช้สารดูดซับ 0.1 กรัม ผสมสารละลายโลหะหนักปริมาตร 20 มิลลิลิตรที่ความเข้มข้นต่างๆ เขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการปรับค่าพีเอชในขณะที่เขย่าให้มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึง 8.0 พบว่าการดูดซับตะกั่วด้วยแมงกานีสออกไซด์จะมีค่าสูงกว่าการดูดซับด้วยเหล็กออกไซด์ถึง 40 เท่า ตะกั่วจะถูกดูดซับด้วยสารดูดซับทุกชนิดได้ดีกว่าโลหะหนักชนิดอื่นๆ ที่ทำการศึกษายกเว้นเกอไทต์

Aualititia และ Pickering (1986) ศึกษาการดูดซับทองแดง ตะกั่ว และแคดเมียมปริมาณน้อยด้วย สารอินทรีย์บางชนิด ได้แก่ ไฮดรอกไซด์ของแมงกานีส ( $\alpha$ -MnO<sub>2</sub>) , อะลูมิเนียม (Al(OH)<sub>3</sub>) และเหล็ก (Fe(OH)<sub>3</sub>) รวมทั้งสินแร่เหล็กและแร่ดินเหนียวชนิดต่างๆ ได้แก่ ฮีมาไทต์, ไลโมไนต์, เคโอลิไนต์ และมอนต์โมริลโลไนต์ โดยแปรผันความเข้มข้นของสารละลายให้อยู่ในช่วง 10-100 ไมโครกรัมต่อลิตร และค่าพีเอช 3-9 พบว่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามค่าพีเอชที่สูงขึ้น โดยมีลำดับการดูดซับทั่วไปคือ สารที่ถูกดูดซับ Pb > Cu > Cd และ สารดูดซับ  $\alpha$ -MnO<sub>2</sub> > Fe(OH)<sub>3</sub> > Al(OH)<sub>3</sub> > แร่ดินเหนียว > สินแร่เหล็ก

William *et al.* (1988) ได้ศึกษาการกำจัดสารละลายแมงกานีส บนตัวกลางกรองแบบผสมเคลือบออกไซด์ คือทั้งทราย และถ่านแอนทราไซด์เคลือบด้วยแมงกานีสออกไซด์ สารออกซิเดนต์ที่ใช้ช่วยในการเกิดออกไซด์เคลือบบนผิวตัวกลางมี โปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต ไฮโปคลอไรด์ โอโซน และคลอรีนอิสระ สรุปได้ว่า ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสจะดีที่สุดเมื่อกระทำที่สภาวะต่าง สารออกซิเดนต์ที่ใช้ทุกตัว ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดได้ดีที่สุด การทดลองที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำๆ ประมาณ 14-17 องศาเซลเซียส ไม่มีผลยับยั้งต่อการกำจัดแมงกานีส

White และ Asfar-Siddique (1997) ศึกษาการกำจัดแมงกานีส ( $Mn^{2+}$ ) และเหล็ก ( $Fe^{2+}$ ) ออกจากน้ำดื่มโดยการดูดซับด้วยไฮดรอกไซด์แมงกานีสไดออกไซด์ ( $MnO_2$ ) ที่เตรียมขึ้นจากการตกตะกอนโดยมี  $KMnO_4$  เป็นสารตั้งต้น ซึ่งจะได้  $MnO_2$  3 แบบ เป็นสารดูดซับ ได้แก่ แบบที่ได้จากไดออกไซด์จากเปอร์แมงกาเนตและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แบบที่ได้จากเปอร์แมงกาเนตและแมงกานีสไอออน และแบบที่ได้จากสารทั้งสามอย่าง พบว่าแมงกานีสไดออกไซด์แบบแรกสามารถกำจัดแมงกานีสออกจากน้ำได้ดีที่สุด โดยมีกลไกการกำจัดคือการแลกเปลี่ยนไอออน นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองถึงความสามารถในการนำสารดูดซับกลับมาใช้ใหม่ โดยพบว่าสามารถนำแมงกานีสไดออกไซด์กลับมาใช้ใหม่ได้บางส่วน โดยการใส่ก๊าซคลอรีนหรือไฮโปคลอไรท์เข้าช่วยซึ่งเป็นวิธีการทั่วไปทางเคมีที่ใช้ในงานบำบัดน้ำ

Al-degs, Khraishch และ Tutunji (2001) ได้ศึกษาการดูดซับของโลหะตะกั่วไอออนโดยใช้ดินเบาและดินเบาเคลือบด้วยแมงกานีสออกไซด์ พบว่า ที่ระดับพีเอชของสารละลายโลหะหนักที่เหมาะสมในการดูดซับ คือ พีเอชเท่ากับ 4 ปริมาณของตัวดูดซับทั้งสองประเภทที่ใช้ในการทดลองคือ 1.7 กรัม ความเข้มข้นของสารละลายโลหะตะกั่วเริ่มต้น 50 ppm อัตราการเขย่าเพื่อใช้ให้เกิดปฏิกิริยาการดูดซับ ใช้ 400 รอบต่อนาที ระดับของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง คือ 16 องศาเซลเซียส ความสามารถในการดูดซับของตะกั่วไอออนของดินเบาและดินเบาเคลือบด้วยแมงกานีสออกไซด์ คือ 24 และ 99 มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับ ตามลำดับ

พนจิตร (2539) ทำการศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสีและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ตัวกลางทรายเคลือบเหล็กออกไซด์และทรายเคลือบแมงกานีสออกไซด์ พบว่า ตัวกลางทรายเคลือบเหล็กออกไซด์และทรายเคลือบแมงกานีสออกไซด์ มี

ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนสังกะสีและไอออนนิกเกิลได้ดีที่สุดที่ความเข้มข้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเท่ากับ 6 โดยประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนสังกะสีและไอออนนิกเกิลเท่ากับ 68.92 และ 69.52 เปอร์เซ็นต์ สำหรับทรายเคลือบเหล็กออกไซด์และเท่ากับ 60.66 และ 68.27 เปอร์เซ็นต์ สำหรับทรายเคลือบแมงกานีสออกไซด์ ซึ่งปริมาณสังกะสีและนิกเกิลที่ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์แลกเปลี่ยนได้เท่ากับ 1978.02 มิลลิกรัมต่อลิตรเรซิน และ 2136.33 มิลลิกรัมต่อลิตรเรซิน และสังกะสีกับนิกเกิลที่ทรายเคลือบแมงกานีสออกไซด์ แลกเปลี่ยนได้เท่ากับ 2982.64 มิลลิกรัมต่อลิตรเรซิน และ 3057.52 มิลลิกรัมต่อลิตรเรซิน

การศึกษาวิจัยถึงการดูดซับโลหะหนักอาร์เซนิก แคดเมียม และตะกั่วทางด้านวิทยาศาสตร์ สภาวะแวดล้อม ด้วยวัสดุหลากหลายชนิดได้มีการศึกษาดังนี้

Kinniburgh *et al.* (1976) ศึกษาการดูดซับธาตุหมู่ที่ 2 ,ธาตุทรานซิชันและโลหะหนักด้วยไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม ซึ่งเตรียมขึ้นในรูปเจลจากการตกตะกอน สารถูกดูดซับที่ใช้ศึกษาได้แก่ Mg, Ca, Ba, Sr, Pb, Cu, Zn, Ni, Cd และ Co เตรียมขึ้นในรูปสารละลายซึ่งมีสารเหล่านี้ผสมกันอยู่อย่างละ  $0.125 \times 10^{-3}$  โมล ปรับค่าพีเอชให้แปรผันช่วง 3-10 พบว่าลำดับในการเลือกดูดซับไอออนบวกของธาตุหมู่ที่ 2 โดยไฮดรอกไซด์ของเหล็กคือ  $Ba > Ca > Sr > Mg$  ไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียมคือ  $Mg > Ca > Sr > Ba$  โดยที่การเลือกดูดซับของสารดูดซับทั้งสอง จะยังเห็นได้ชัดเจนขึ้น เมื่อค่าพีเอชต่ำลง และพบว่าลำดับในการเลือกดูดซับธาตุทรานซิชันและโลหะหนักโดยไฮดรอกไซด์ของเหล็กคือ  $Pb(3.1) > Cu(4.8) > Zn(5.4) > Ni(5.6) > Cd(5.8) > Co(6.0) > Sr(7.4) > Mg(7.8)$  โดยอะลูมิเนียมคือ  $Cu(4.8) > Pb(5.2) > Zn(5.6) > Ni(6.3) > Co(6.5) > Cd(6.6) > Mg(8.1) > Sr(9.2)$  ตัวเลขในวงเล็บคือค่าพีเอชในช่วง  $\pm 0.2$  ซึ่งสารนั้นจะถูกดูดซับได้มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์

Logsdon (1978) ทำการทดลองเกี่ยวกับชนิดของโคแอกกูแลนต์ต่อการกำจัดอาร์ซีนีในน้ำป้อนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเฟอร์ริคซัลเฟตจะมีประสิทธิภาพกำจัดอยู่ในช่วง 40-60 เปอร์เซ็นต์ และสารส้มจะมีประสิทธิภาพการกำจัดเพียง 5-15 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังทำการทดลองถึงผลของการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์ และผลของการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารอาร์เซนิกตั้งต้น ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัด พอสรุปได้ดังนี้คือ ประสิทธิภาพการกำจัดจะเพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มปริมาณของโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ และ

ประสิทธิภาพการกำจัดที่คิดเป็นเปอร์เซ็นต์จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณความเข้มข้นของอาร์เซนิกตั้งต้นมีค่าสูงขึ้น

Huang และ Fu (1984) ศึกษาการกำจัดอาร์เซนิกโดยใช้แอตติเวตเตดคาร์บอนจาก 3 บริษัทที่เป็นผู้ผลิตคาร์บอน นำมาทำความสะอาดด้วยด่างและล้างออกด้วยน้ำกลั่นอบให้แห้งแล้วจึงทำการทดลอง พบว่าการกำจัดอาร์เซนิกขึ้นอยู่กับพีเอช ชนิดของคาร์บอนและความเข้มข้นของอาร์เซนิก การกำจัดอาร์เซนิกสูงสุดอยู่ในช่วงพีเอช 4-5 การดึงดูทางไฟฟ้าสถิตและการเกิดพันธะทางเคมี มีกลไกที่สำคัญของการดูดซับซึ่งประจุนผิวกับอาร์เซนิกที่ถูกดูดติดเป็นประจุที่ตรงกันข้าม และการบำบัดด้วยแอตติเวตเตดคาร์บอนเหล่านี้ให้คุณภาพตามมาตรฐานน้ำดื่ม การบำบัดคาร์บอนที่ดูดติดอาร์เซนิกด้วยกรดแก่หรือด่างแก่ สามารถดึงอาร์เซนิกที่ดูดติดไว้ออกจากผิวคาร์บอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามอาร์เซนิกไม่สามารถดูดติดได้อีกครั้ง โดยการบำบัดด้วยกรดหรือด่าง ความสามารถในการดูดติดของคาร์บอนที่ผ่านการบำบัดด้วยกรดหรือด่าง สามารถปรับปรุงโดยการบำบัดด้วยเกลือเฟอรัส แต่เกลือของ  $Fe^{3+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Al^{3+}$  และ  $Mg^{2+}$  ปรับปรุงความสามารถในการดูดติดได้เพียงเล็กน้อย

Panday *et al.* (1987) ศึกษาถึงการใช้ซีเถ้าลอยในการกำจัดแคดเมียม โดยในการทดลองได้ใช้ซีเถ้าลอยปริมาณ 1 กรัม ต่อสารละลายแคดเมียมสังเคราะห์ 50 มิลลิลิตร และหาปริมาณแคดเมียมที่เหลือ ผลการศึกษาพบว่าปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีเมื่อพีเอช เท่ากับ 8.5 โดยเวลาที่ใช้จะให้เข้าสู่สมดุลประมาณ 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เมื่อความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้นลดลงจาก 0.15 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ประสิทธิภาพของการกำจัดจะเพิ่มขึ้นจาก 84.80 เปอร์เซ็นต์ เป็น 89.82 เปอร์เซ็นต์ ผลของค่าพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดมีสูงมาก กล่าวคือเมื่อมีการเปลี่ยนค่าพีเอช จาก 4 เป็นค่าพีเอช 8.5 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่าเพิ่มจาก 11.85 เปอร์เซ็นต์ เป็น 89.82 เปอร์เซ็นต์

Diamadopoulos *et al.* (1993) ได้ศึกษาวิจัยเรื่องการนำซีเถ้าลอยมาใช้ในการกำจัดอาร์เซนิกจากน้ำ โดยในการทดลองจะใช้ซีเถ้าลอย 1 กรัม เพื่อกำจัดอาร์เซนิกที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการทดลองที่พีเอชเท่ากับ 4, 7 และ 10 ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นที่เหลือของอาร์เซนิกในน้ำจะขึ้นอยู่กับเวลา โดยในช่วง 20 ชั่วโมงแรกของการทดลอง จะเกิดการดูดซับอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นจะเกิดการดูดซับอย่างช้าๆ และที่พีเอชเท่ากับ 4

ประสิทธิภาพในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นมากที่สุด คือ 30 มิลลิกรัมอาร์เซนิกต่อกรัมถ้ำลอย 1 กรัม และมีประสิทธิภาพเท่ากับ 3 และ 4 เท่าเมื่อเทียบกับที่ค่าพีเอชเท่ากับ 10 และ 7 ตามลำดับ

Jiban K. Satpathy และ Malay Chaudhuri (1995) ได้มีการทดลองนำเม็ดทรายที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ มากำจัดน้ำซุบโลหะแคดเมียม และ โครเมียม จากโรงงานผลิตอาหารในอินเดียภายใต้ปัจจัยอัตราการไหล ปริมาณตัวดูดซับ และการนำกลับมาใช้ใหม่ของเม็ดทราย พบว่าเม็ดทรายที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์มีความเหมาะสมในการกำจัดแคดเมียม จากน้ำซุบโลหะแคดเมียมโดยการใช้เม็ดทรายครั้งแรกมากที่สุด และ ไม่เหมาะสมที่จะใช้กำจัด  $\text{Cr}^{6+}$

Namasivayam และ Ranganathan (1995) ศึกษาการกำจัดตะกั่ว แคดเมียม และนิกเกิล โดยการดูดซับด้วยสารดูดซับที่เป็นของเสียบประเภทไฮดรอกไซด์ของเหล็กและโครเมียมซึ่งได้มาจากโรงงานผลิตปุ๋ย โดยทำการทดลองแบบแบทช์ และฟิซเบด (Fixed bed) การทดลองแบบแบทช์ใช้สารดูดซับเขย่าพร้อมกับสารละลายโลหะหนักปริมาตร 50 มิลลิลิตร ด้วยความเร็ว 120 รอบต่อนาที การทดลองแบบฟิซเบดทำโดยการบรรจุสารดูดซับลงในคอลัมน์แก้วให้มีอัตราการไหล 0.06 ลิตรต่อชั่วโมง การทดลองทั้งสองชุดใช้สารละลายที่มีค่าพีเอช 3.5 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยมีการแปรผันขนาดอนุภาคของสารดูดซับ ปริมาณสารดูดซับ และไอออนิกเสตรง์ของสารละลาย พบว่าการดูดซับโลหะหนักจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารดูดซับที่เพิ่มขึ้น แต่ไม่พบผลกระทบจากค่าไอออนิกเสตรง์อย่างชัดเจนต่อการดูดซับ ในการทดลองดูดซับสารละลายที่มีโลหะหนักทั้งสามชนิดผสมกันอยู่ พบว่าความสามารถในการดูดซับเรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ ตะกั่ว > แคดเมียม > นิกเกิล และสมการการดูดซับเป็นไปตามไอโซเทอร์มของฟรุนดลิช

Orumwense (1996) ศึกษาการกำจัดตะกั่วจากน้ำโดยการดูดซับด้วยดินเหนียวประเภทเคโอไลไนต์ ซึ่งมีส่วนประกอบเป็น  $\text{SiO}_2$  44.14 เปอร์เซ็นต์,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  41.42 เปอร์เซ็นต์ และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  0.87 เปอร์เซ็นต์ ทดลองโดยใช้ดินเหนียวขนาด 200 mesh (75 ไมโครเมตร) น้ำหนัก 1 กรัม เป็นสารดูดซับตะกั่วจากสารละลาย  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  ปริมาตร 50 มิลลิลิตร โดยมีการแปรผันค่าต่างๆ ได้แก่ พีเอชของสารละลายให้มีค่าในช่วง 3- 9.5 อุณหภูมิ 30-50 องศาเซลเซียส ความเข้มข้น 5-10 มิลลิกรัมต่อลิตร และเวลาสัมผัส 20-160 นาที พบว่าการดูดซับตะกั่วจะเพิ่มขึ้นตามเวลาสัมผัส จากนั้นจะดูดซับได้คงที่ในแต่ค่าความเข้มข้นเมื่อเวลาสัมผัสผ่านไป 120 นาที และประสิทธิภาพในการดูดซับจะมีค่าสูงเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำ อุณหภูมิสูงและพีเอชสูง



Lo *et al.* (1997) ศึกษาคุณสมบัติของทรายที่เคลือบผิวด้วยเหล็กออกไซด์ในการดูดซับทองแดง นิกเกิล และแคดเมียมซึ่งละลายอยู่ในสารละลายที่มีค่าไอออนิกเสตรงซ์ 0.1 N  $\text{NaNO}_3$  ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส โดยทำการทดสอบสภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบเหล็กออกไซด์บนผิวทราย และคุณสมบัติในการดูดซับโลหะหนักของทรายดังกล่าว พบว่าเมื่อเคลือบทรายด้วยเหล็กออกไซด์ที่พีเอชสูงจะได้เกอไทต์ ( $\alpha\text{-FeOOH}$ ) เป็นสารเคลือบซึ่งจะให้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้นในการดูดซับแคดเมียมและนิกเกิลแต่จะมีสภาพของการต้านทานกรดต่ำ เมื่อเคลือบทรายด้วยเหล็กออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงขึ้นไปจะได้ฮีมาไทต์ ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) เป็นสารเคลือบซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักได้มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบการกำจัดโลหะหนักด้วยการดูดซับบนทรายที่เคลือบด้วยเหล็กกับการตกตะกอนทางเคมี พบว่าการดูดซับมีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักได้ในช่วงพีเอชที่กว้างกว่าและกำจัดได้มากกว่าการตกตะกอน

Brown *et al.* (2000) ได้ศึกษาการกำจัดโลหะหนักโดยใช้ถ่านฟิท พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับที่พื้นผิวคือ ค่าความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก และ ค่าพีเอช โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 3.5 – 6.5 และประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักลดลง

Lai *et al.* (2001) ศึกษาลักษณะการดูดซับแคดเมียมและตะกั่วบนทรายที่เคลือบผิวด้วยเกอไทต์ โดยทำการทดลองทั้งแบบแบทช์และแบบบรรจุคอลัมน์เพื่อทดสอบการดูดซับโลหะหนักทั้งสองชนิดจากสารละลาย จากการทดลองแบบแบทช์พบว่าไอออนของแคดเมียมและตะกั่วจะถูกดูดซับได้อย่างมีประสิทธิภาพ ค่าการดูดซับแคดเมียมสูงสุดคือ 319,704  $\mu\text{g}$  ต่อทราย 1 กรัม ที่พีเอช 5.0 ค่าการดูดซับตะกั่วสูงสุดคือ 702,124  $\mu\text{g}$  ต่อทราย 1 กรัม ที่พีเอช 6.0 จากการทดลองแบบคอลัมน์พบว่าทรายเคลือบเกอไทต์สามารถกำจัดแคดเมียมและตะกั่วได้มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์

จันทร์นา (2539) ได้ศึกษาการนำซีเมนต์มาใช้ในการกำจัดโลหะหนักนิกเกิล แคดเมียม และตะกั่ว โดยหาสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดโลหะหนักที่ความเข้มข้นและค่าพีเอชแตกต่างกัน และนำซีเมนต์ที่ดูดซับโลหะหนักแล้วมาศึกษาความเสถียร พบว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับกำจัดนิกเกิล คือ 10 เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลา 10 นาที โดยจะได้ประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 99.52 สำหรับแคดเมียมได้ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัด คือ 10 เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลา 30 นาที โดยประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 99.12 สำหรับตะกั่วได้ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัด คือ 10 เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้น 40

มิลลิลิตรต่อลิตร ที่เวลา 5 นาที โดยประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 99.55 และยังพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะทั้ง 3 ชนิดจะลดลงเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นลดลง ผลการทดสอบ การชะละลาย พบว่าปริมาณโลหะหนักถูกชะละลายสูงเกินกว่าข้อกำหนดในมาตรฐาน

ซัชลิกา (2541) ได้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับสองชนิด คือ ถ่านกัมมันต์และถ่านลอยลิกไนต์ ในการลดปริมาณไอออนของโลหะตะกั่วและสังกะสีในสารละลาย โดยใช้ถ่านกัมมันต์และถ่านลอยลิกไนต์ภายใต้ปัจจัยต่างๆ เช่น ชนิดและขนาดของวัสดุดูดซับ ชนิดของไอออนโลหะ สภาพความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย และ อุณหภูมิ ที่ 25 ชั่วโมง พบว่า ถ่านลอยลิกไนต์ มีความสามารถในการลดปริมาณไอออนของโลหะตะกั่วและสังกะสี ได้มากกว่า ถ่านกัมมันต์เสมอ

อัจฉริย์ (2544) ได้ศึกษาการดูดซับโลหะหนักบางชนิดด้วยดินลูกรัง โลหะหนักที่ทำการศึกษา คือ ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสี พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์คือ ใช้ปริมาณดิน 1.00 กรัม ระยะเวลาสัมผัส 2 ชั่วโมง ที่พีเอชเท่ากับ 6 และความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก 25 mg/l โดยให้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วสูงกว่า 99 % ส่วนภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์คือ ใช้ปริมาณดิน 1.00 กรัม ระยะเวลาสัมผัส 8 ชั่วโมง ที่พีเอชเท่ากับ 6-7 และความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก 10 mg/l โดยให้ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงได้ประมาณ 97-99 % และภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์คือ ใช้ปริมาณดิน 1.00 กรัม ระยะเวลาสัมผัส 10 ชั่วโมง ที่พีเอชเท่ากับ 6-7 และความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก 5 mg/l โดยให้ประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีได้ประมาณ 97-98 % นอกจากนี้ได้ศึกษานำดินลูกรังมากำจัดตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่ พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยดินลูกรังที่ระยะเวลาสัมผัส 2 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 71.63 %

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 ขั้นตอนการวิจัย

3.1.1 เตรียมตัวอย่างดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ พร้อมทั้งศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ

3.1.2 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการใช้ดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ดูดซับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด คืออาร์เซนิก แคดเมียม และตะกั่ว ในน้ำเสียสังเคราะห์

3.1.3 ศึกษาเสถียรภาพของดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์หลังจากดูดซับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดแล้วด้วยวิธีการทดสอบการชะละลาย

3.1.4 ศึกษาประสิทธิภาพการนำดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์มาดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียจากอุตสาหกรรม

#### 3.2 วัสดุดิบและสารเคมี

3.2.1 ดินเบา จากบริเวณ อ.แม่ทะ จ.ลำปาง

ดินเบา	คุณสมบัติ
Appearance	สีเหลืองอ่อนถึงขาวนวล
Moisture content	น้อยกว่า 10 %
Particle size	100 mesh

### 3.2.2 สารเคมี

ลำดับ	สารเคมี	คุณสมบัติ
1	Arsenic oxide ( $As_2O_3$ )	Analytical Reagent Grade
2	Cadmium nitrate ( $Cd(NO_3)_2$ )	Analytical Reagent Grade
3	Lead nitrate ( $Pb(NO_3)_2$ )	Analytical Reagent Grade
4	Sodium hydroxide (NaOH)	Analytical Reagent Grade
5	Hydrochloric acid 38% (HCl)	Analytical Reagent Grade
6	Nitric acid 65% ( $HNO_3$ )	Analytical Reagent Grade

### 3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือการวิจัย

ลำดับ	อุปกรณ์และเครื่องมือการวิจัย	ยี่ห้อ : รุ่น
1	pH meter	Denver Instrument : Model 215
2	เครื่องเขย่า (shaker)	GFL : 3015
3	เครื่องชั่งไฟฟ้าอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง	Mettler : AB204-S
4	เครื่องชั่งไฟฟ้าอย่างละเอียด 2 ตำแหน่ง	Mettler : PB3002-S
5	Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)	Varian : Spectr AA-10 Plus
6	เครื่อง Inductively Coupled Plasma (ICP)	Perkin : Elmer Plasma-1000
7	เครื่อง surface area and pore-size (BET)	ASAP 2000
8	เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)	JEOL : JSM-5800LV
9	กระดาษกรองเบอร์ 42	Whatman
10	อุปกรณ์เครื่องแก้วทั่วไป	

### 3.4 วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยนี้ได้เลือกค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

ลำดับ	พารามิเตอร์ต่างๆ	ช่วงที่ทำการศึกษา
1	ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก	40-70 มิลลิกรัมต่อลิตร
2	ค่าพีเอช (pH)	3-10
3	ช่วงเวลาสัมผัส	0.5- 24 ชั่วโมง

### 3.4.1 การเตรียมการทดลอง

#### 3.4.1.1 เตรียมตัวอย่างดินเบา

โดยการนำดินเบาที่เก็บมาจากบริเวณแอ่งลำปาง มาทำให้เป็นผง และทำให้แห้ง โดยนำไปอบที่อุณหภูมิ 100-150 องศาเซลเซียส ประมาณ 24-36 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำดินเบามาทำการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพของดินเบา โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และหาพื้นที่ผิวด้วยเครื่อง surface area and pore-size (BET)

#### 3.4.1.2 เตรียมตัวอย่างดินเบาเคลือบด้วยแมงกานีสออกไซด์

การเตรียมดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์จะใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายแมงกานีสคลอไรด์ เมื่อเตรียมแล้วจะนำมาศึกษาลักษณะทางกายภาพของดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และหาพื้นที่ผิวด้วยเครื่อง surface area and pore-size (BET) ขั้นตอนการเตรียมดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์จะใช้วิธีการดังนี้ (Al-degs, Khraisheh และ Tutunji, 2001)

- 1) ชั่งน้ำหนักดินเบาปริมาณ 15 กรัม
- 2) แช่ลงในสารละลาย 6 M โซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยอุ่นที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง
- 3) นำมาจุ่มใน 100 ml ของ 2.5 M แมงกานีสคลอไรด์ (ที่ปรับพีเอชเป็น 1-2 ด้วย HCl) ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 10 ชั่วโมง
- 4) นำมาแช่ซ้ำใน 6 M โซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

- 5) นำดินมาผึ่งในอากาศเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่สมบูรณ์
- 6) นำดินเบาเคลือบแอมกานีสออกไซด์ที่ล้างด้วยน้ำกลั่นสะอาดแล้ว มาทำให้แห้ง โดยเข้าเตาอบ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

### 3.4.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด ระหว่างดินเบาและดินเบาเคลือบแอมกานีสออกไซด์

- 1) เตรียมสารละลายโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด คือ As, Cd และ Pb โดยมีความเข้มข้นเริ่มต้น ในช่วง 40-70 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 2) ปรับค่าพีเอชของสารละลายเป็น 4 แล้วเติมปริมาณดินเบา และอีกตัวอย่างเติมดินเบาเคลือบแอมกานีสออกไซด์ อย่างละ 0.1 กรัม
- 3) นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ 100 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 4) เก็บตัวอย่างสารละลายนำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42 แล้วนำไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียม และตะกั่วด้วยเครื่อง Atomic Adsorption Spectrophotometer (AAS) วิเคราะห์หาปริมาณอาร์เซนิกด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma (ICP)
- 5) เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด ด้วยดินเบาและดินเบาเคลือบแอมกานีสออกไซด์

### 3.4.3 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการใช้ดินเบาเคลือบแอมกานีสออกไซด์ดูดซับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด

#### 3.4.3.1 ศึกษาความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักที่เหมาะสมต่อการกำจัดโลหะหนักด้วยดินเบาเคลือบแอมกานีสออกไซด์

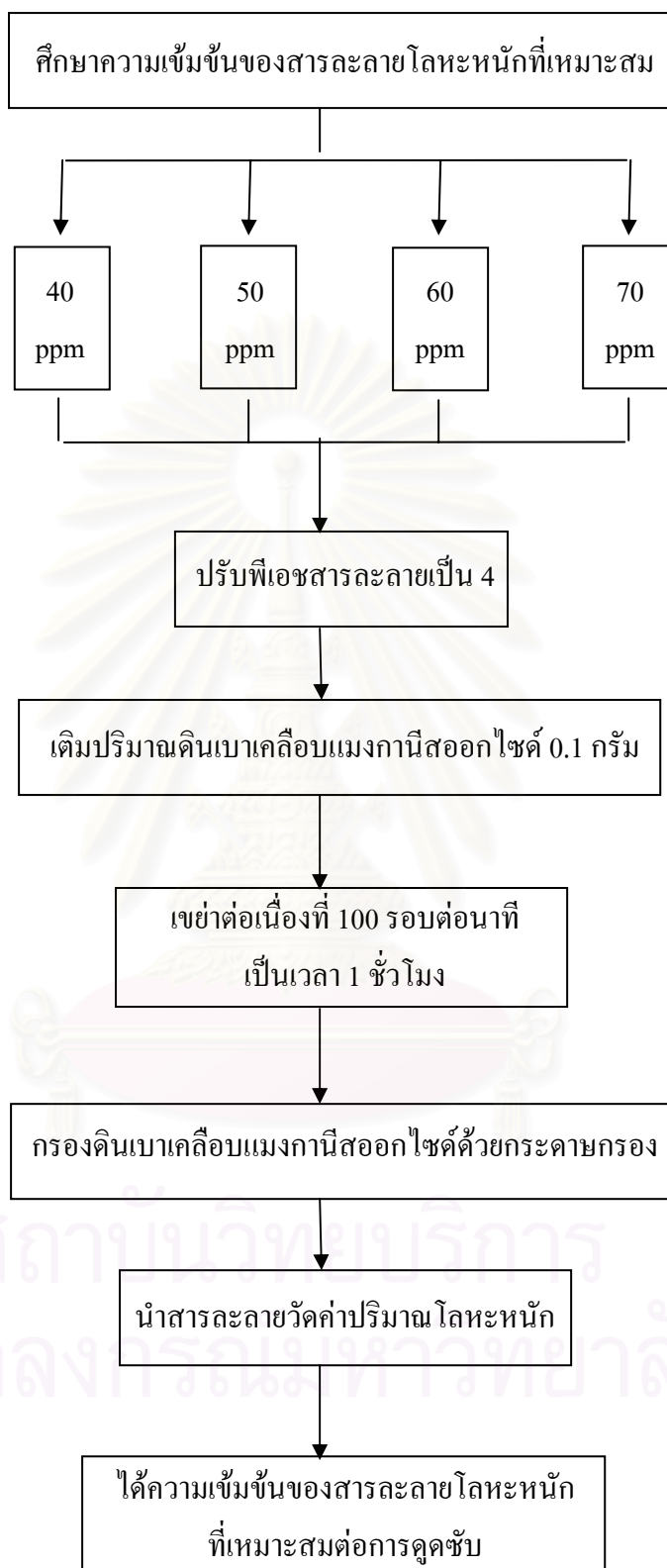
- 1) เตรียมสารละลายโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด คือ As, Cd และ Pb โดยมีความเข้มข้นเริ่มต้น ในช่วง 40-70 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 2) ปรับค่าพีเอชของสารละลายเป็น 4 และเติมปริมาณดินเบาเคลือบแอมกานีสออกไซด์ 0.1 กรัม

3) นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ 100 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4) เก็บตัวอย่างสารละลายนำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42 แล้วนำไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียม และตะกั่วด้วยเครื่อง Atomic Adsorption Spectrophotometer (AAS) วิเคราะห์หาปริมาณอาร์เซนิกด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma (ICP) ขั้นตอนการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.1



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนศึกษาความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักที่เหมาะสมต่อการกำจัดโลหะหนักด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์

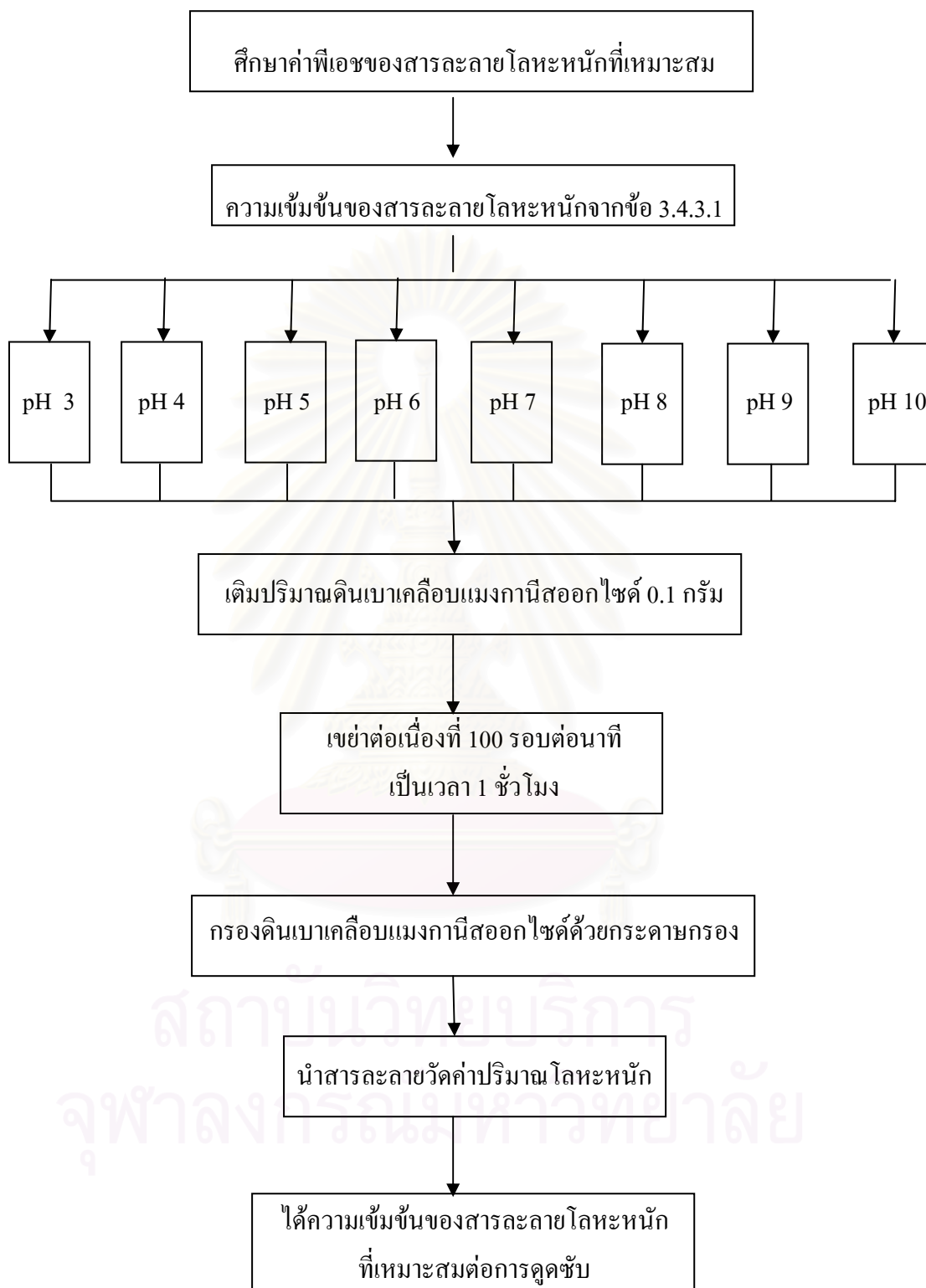


### 3.4.3.2 ศึกษาค่าพีเอชของสารละลายโลหะหนักที่เหมาะสมต่อการกำจัดโลหะหนักด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์

- 1) เตรียมสารละลายโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.4.3.1
- 2) ปรับค่าพีเอชของสารละลายให้เป็น 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 แล้วเติมปริมาณดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ 0.1 กรัม
- 3) นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ 100 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 4) เก็บตัวอย่างสารละลายนำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42 แล้วนำไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมและตะกั่วด้วยเครื่อง Atomic Adsorption Spectrophotometer (AAS) วิเคราะห์หาปริมาณอาร์เซนิกด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma (ICP) ขั้นตอนการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.2

### 3.4.3.3 ศึกษาค่าเวลาสัมผัสของสารละลายโลหะหนักที่เหมาะสมต่อการกำจัดโลหะหนักด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์

- 1) เตรียมสารละลายโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.4.3.1
- 2) ปรับค่าพีเอชของสารละลายโลหะหนักที่ได้จากข้อ 3.4.3.2 แล้วเติมปริมาณดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ 0.1 กรัม
- 3) นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ 100 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 0.5-24 ชั่วโมง
- 4) เก็บตัวอย่างสารละลายนำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42 แล้วนำไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมและตะกั่วด้วยเครื่อง Atomic Adsorption Spectrophotometer (AAS) วิเคราะห์หาปริมาณอาร์เซนิกด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma (ICP) ขั้นตอนการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนศึกษาค่าพีเอชของสารละลายโลหะหนักที่เหมาะสมต่อการกำจัดโลหะหนักด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนศึกษาค่าเวลาสัมพัทธ์ของสารละลายโลหะหนักที่เหมาะสมต่อการกำจัดโลหะหนักด้วยดินเบาคีโอบแมงกานีสออกไซด์

### 3.4.4 การทดสอบไอโซเทอมการดูดซับ

- 1) เตรียมสารละลายโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.4.3.1
- 2) ปรับค่าพีเอชของสารละลายโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดที่ได้จากผลการทดลองในข้อ 3.4.3.2
- 3) ใส่ปริมาณดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ 0.01, 0.02, 0.04, 0.1, 0.2 และ 0.4 กรัม ลงในสารละลายโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด ที่มีปริมาณ 100 ml ในขวดรูปชมพู่
- 4) นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 5) เก็บตัวอย่างสารละลายนำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42 แล้วนำไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมและตะกั่วด้วยเครื่อง Atomic Adsorption Spectrophotometer (AAS) วิเคราะห์หาปริมาณอาร์เซนิกด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma (ICP)
- 6) นำผลการทดลองที่ได้มาทดสอบไอโซเทอมการดูดซับ

### 3.4.5 ศึกษาเสถียรภาพของดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์หลังจากดูดซับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดแล้วด้วยวิธีการทดสอบการชะละลาย

วิธีการทดสอบการชะละลาย (leaching test) ปรับปรุงจากวิธีของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ดังนี้

3.4.5.1 กรณีตัวอย่างวัสดุที่ใช้งานแล้วมีของแข็ง (dry solid) ปะปนในปริมาณที่น้อยกว่าร้อยละ 5 นำมากรองด้วยแผ่นกรองใยแก้ว (glass fiber filter) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน

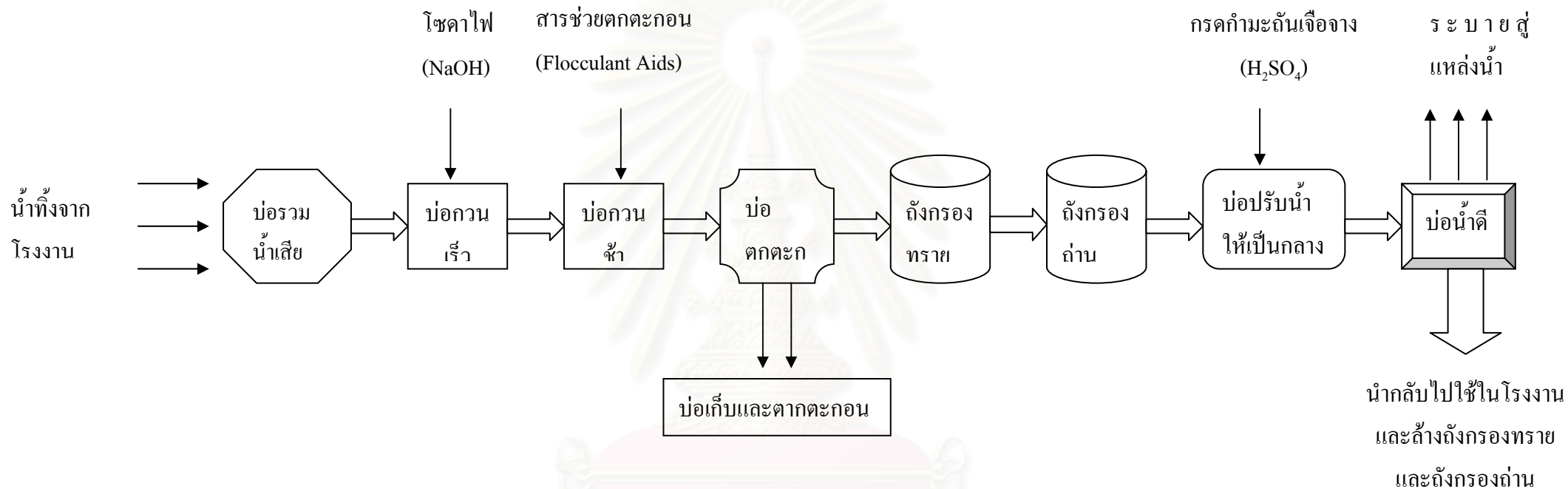
3.4.5.2 กรณีตัวอย่างวัสดุที่ใช้งานแล้วมีของแข็ง (dry solid) ปะปนในปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 5 นำมาบดให้เป็นผงร่อนผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 9.5 มิลลิเมตร เติมน้ำฝนสังเคราะห์ (synthetic acid rain extraction fluid) ซึ่งประกอบด้วยน้ำกลั่นผสมสารละลายของกรดซัลฟูริก (ในอัตราส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) จนส่วนผสมมีค่าพีเอชเท่ากับ 5 แล้วจึงปรับปริมาตรของส่วนผสมในอัตราส่วนปริมาตรต่อน้ำฝนสังเคราะห์เป็น 20 เท่า มิลลิลิตรของน้ำหนัก

(กรัม) ของตัวอย่าง จากนั้นนำมาเขย่าบนเครื่องเขย่า 60 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง กรองสารละลายที่ได้ด้วยแผ่นกรองใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน

3.4.5.3 นำสารละลายที่ได้จากข้อ 1) และ 2) มาหาปริมาณโลหะหนัก เปรียบเทียบผลการทดลองกับค่ามาตรฐานของท้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) ที่กำหนดเกณฑ์อาร์เซนิก (ทั้งหมด) ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร แคดเมียมไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตะกั่วไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ในกรณีที่ผลการวิเคราะห์ของสารละลายจากการสกัด มีค่าสูงเกินมาตรฐานที่ระบุไว้ ให้ดำเนินการทำลายฤทธิ์ใหม่เพื่อให้มีคุณสมบัติตามที่กำหนดไว้

#### 3.4.6 ศึกษาประสิทธิภาพการนำดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์มาดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียจากอุตสาหกรรม

น้ำเสียที่นำมาใช้ทำการทดลองในขั้นนี้ นำมาจากกระบวนการผลิตแบตเตอรี่ขององค์การแบตเตอรี่ ซึ่งทางโรงงานแบตเตอรี่นี้ มีกระบวนการบำบัดน้ำเสียดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.4 โดยในการเก็บตัวอย่างน้ำเสียมาใช้ในการทดลองครั้งนี้จะเก็บจากตำแหน่งบ่อรวมน้ำเสีย ซึ่งเป็นตำแหน่งที่รวบรวมน้ำเสียจากกระบวนการผลิตต่างๆ ภายในโรงงาน โดยพบว่าน้ำเสียนี้มีปริมาณความเข้มข้นของตะกั่ว เท่ากับ 5.89 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีความเข้มข้นของอาร์เซนิก เท่ากับ 0.42 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชของน้ำเสีย เท่ากับ 1.59 โดยในการทดลองจะนำภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.4.3 มาใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.4 แผนผังแสดงกระบวนการบำบัดน้ำเสียในโรงงานผลิตแบตเตอรี่

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

การทดลองศึกษาการกำจัดโลหะหนัก ได้แก่ อาร์เซนิก แคดเมียม และตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ ซึ่งได้ทำการศึกษาลักษณะสมบัติของดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์, สภาวะที่เหมาะสมในการใช้ดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์กำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์, การศึกษาเสถียรภาพของดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ หลังจากดูดซับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดด้วยวิธีการทดสอบการชะละลาย และทดสอบประสิทธิภาพการนำดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์มาดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสียที่ได้จากกระบวนการผลิตแบตเตอรี่ ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

#### 4.1 การศึกษาลักษณะสมบัติของดินเบา และดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์

ในการศึกษาได้นำดินเบาจากบริเวณ อ.แม่ทะ จ.ลำปาง ซึ่งจะมีลักษณะเป็นผง เนื้อละเอียดคล้ายขอล์ก สีเหลืองนวล ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ส่วนใหญ่ดินเบาที่เกิดขึ้นเองน้ำจืดมักจะมีสารอินทรีย์ปนอยู่ด้วย และเมื่อนำดินเบามาทำการเคลือบด้วยแมงกานีสออกไซด์จะมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้ม ดังแสดงในรูปที่ 4.2

จากการศึกษาลักษณะของดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ลักษณะของดินเบาจากภาพถ่าย แสดงดังรูปที่ 4.3 และดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 4.4

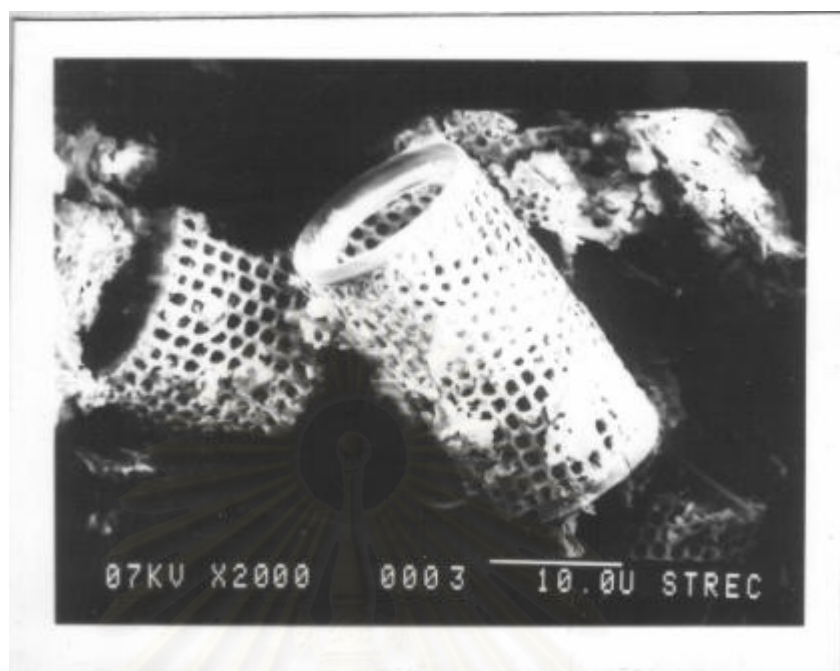


รูปที่ 4.1 ลักษณะของดินเบา

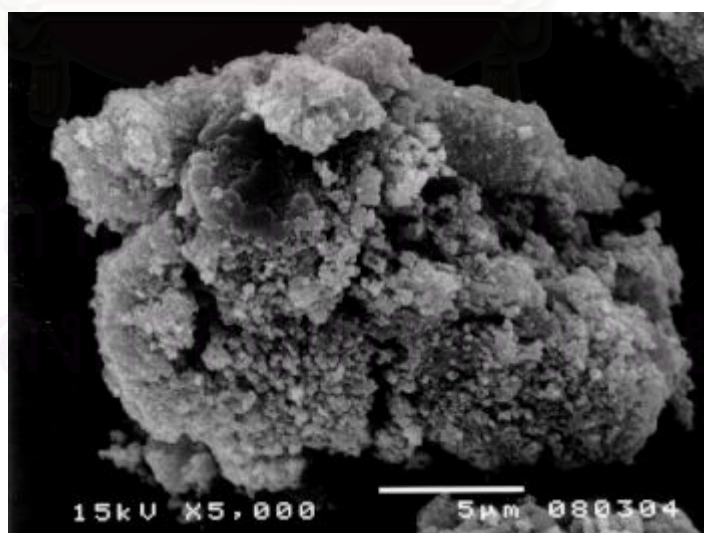


รูปที่ 4.2 ลักษณะของดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์





รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM ของดินเบา กำลังขยาย 2,000 เท่า



รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM ของดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์กำลังขยาย 5,000 เท่า

การศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวการมีรูพรุนของดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ด้วยเครื่อง surface area and pore-size (BET) แสดงดังตารางที่ 4.1 ซึ่งจะพบว่าพื้นที่ผิวเทียบต่อกรัมของดินเบาที่ทำการเคลือบด้วยแมงกานีสออกไซด์จะมีพื้นที่ผิวมากกว่าของดินเบา รวมทั้งค่าปริมาตรของรูพรุนและขนาดของรูพรุนเฉลี่ยมีค่าที่มากกว่าเช่นกัน ซึ่งลักษณะรูพรุนดังกล่าวจะมีประโยชน์อย่างยิ่งในการเป็นตัวดูดซับที่ดี

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์

พารามิเตอร์	ดินเบา	ดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์
พีเอช	7.80	6.87
พื้นที่ผิว BET (ตารางเมตรต่อกรัม)	38.28	95.24
ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)	0.07	0.20
ขนาดของรูพรุนเฉลี่ย (อังสตรอม)	71.66	82.08

ที่มา : ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง BET

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 4.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด ระหว่างดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์

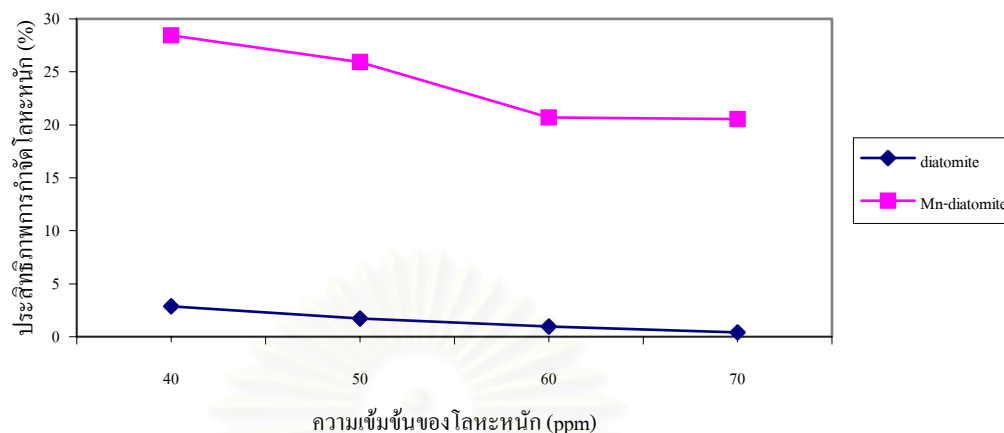
ในการศึกษานี้ เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักระหว่างดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ ซึ่งดินเบาที่นำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบเป็นดินเบาที่จะนำมาทำการเคลือบด้วยแมงกานีสออกไซด์

### 4.2.1 เปรียบเทียบการดูดซับโลหะหนักอาร์เซนิกระหว่างดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์

ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักอาร์เซนิกระหว่างดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์โดยใช้ความเข้มข้น 40, 50, 60 และ 70 ppm ที่เวลาสัมผัส 1 ชั่วโมง ปริมาณดินเบา 0.1 กรัม ปรับพีเอชของสารละลายเป็น 4 เขย่าด้วยความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักอาร์เซนิกของดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์แสดงดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.5 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก ตารางที่ ก-1.1)

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักอาร์เซนิกระหว่างดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์

ความเข้มข้นของโลหะหนัก (ppm)	ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก (%)	
	ดินเบา (diatomite)	ดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ (Mn-diatomite)
40	2.88	28.43
50	1.71	25.95
60	0.95	20.68
70	0.40	20.52



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักอาร์เซนิกระหว่างดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์

จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.2 พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับอาร์เซนิกด้วยดินเบาที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ มีค่าที่ต่ำ โดยที่ระดับเข้มข้นของอาร์เซนิก 40 ppm มีประสิทธิภาพการดูดซับเพียง 2.88 % และที่ระดับความเข้มข้น 60 ppm ขึ้นไป มีประสิทธิภาพการดูดซับที่ต่ำกว่าศูนย์ สำหรับประสิทธิภาพการดูดซับอาร์เซนิกด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ จะพบว่ามีค่าที่สูงกว่าการดูดซับอาร์เซนิกด้วยดินเบา โดยมีค่าประสิทธิภาพการดูดซับ 20% ขึ้นไป โดยพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับอาร์เซนิกของทั้งดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีความเข้มข้นของอาร์เซนิกเพิ่มมากขึ้น

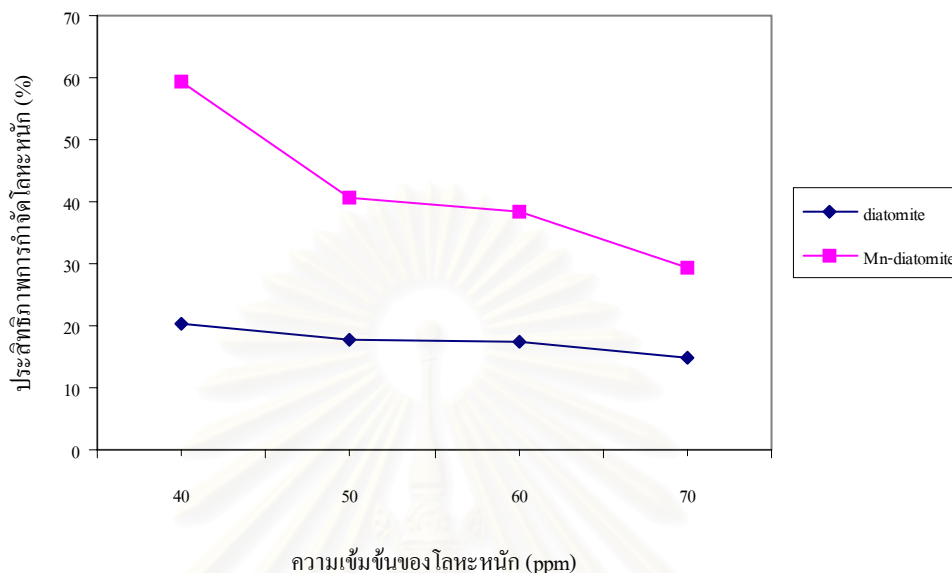
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.2.2 เปรียบเทียบการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมระหว่างดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์

ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมระหว่างดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์โดยใช้ความเข้มข้น 40, 50, 60 และ 70 ppm ที่เวลาสัมผัส 1 ชั่วโมง ปริมาณดินเบา 0.1 กรัม ปรับพีเอชของสารละลายเป็น 4 เขย่าด้วยความเร็วรอบ 100 รอบต่อ นาที ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักแคดเมียมของดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์แสดงดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.6 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก ตารางที่ ก-1.2)

ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมระหว่างดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์

ความเข้มข้นของโลหะหนัก (ppm)	ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก (%)	
	ดินเบา (diatomite)	ดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ (Mn-diatomite)
40	20.34	59.24
50	17.80	40.52
60	17.34	38.46
70	14.97	29.46



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมระหว่างดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์

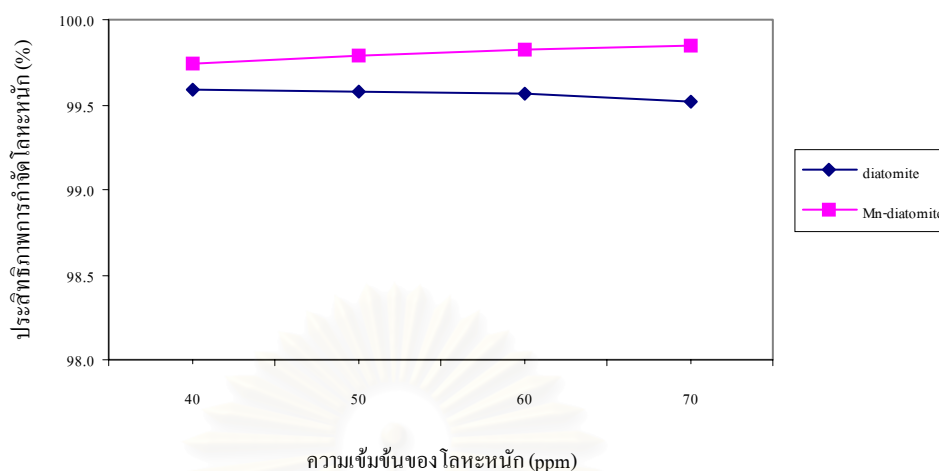
จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.3 พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมด้วยดินเบาที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ มีค่าอยู่ในช่วง 14.97-20.34 % สำหรับประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ พบว่ามีค่าที่สูงกว่าการดูดซับแคดเมียมด้วยดินเบา โดยมีค่าประสิทธิภาพการดูดซับ 29% ขึ้นไป โดยประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมของทั้งดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีความเข้มข้นของแคดเมียมเพิ่มมากขึ้น

### 4.2.3 เปรียบเทียบการดูดซับโลหะหนักตะกั่วระหว่างดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์

ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักตะกั่วระหว่างดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์โดยใช้ความเข้มข้น 40, 50, 60 และ 70 ppm ที่เวลาสัมผัส 1 ชั่วโมง ปริมาณดินเบา 0.1 กรัม ปรับพีเอชของสารละลายเป็น 4 เขย่าด้วยความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักตะกั่วของดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์แสดงดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.7 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก ตารางที่ ก-1.3)

ตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักตะกั่วระหว่างดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์

ความเข้มข้นของโลหะหนัก (ppm)	ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก (%)	
	ดินเบา (diatomite)	ดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ (Mn-diatomite)
40	99.58	> 99.99
50	99.68	> 99.99
60	99.56	> 99.99
70	99.52	> 99.99



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักตะกั่วระหว่างดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์

จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.4 พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วด้วยดินเบาที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ และประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์มีค่าใกล้เคียงกัน โดยการดูดซับตะกั่วด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์มีค่าสูงกว่าเล็กน้อย โดยประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วของทั้งดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีความเข้มข้นของตะกั่วเพิ่มมากขึ้น

จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์มีค่าสูงกว่าการดูดซับตะกั่วด้วยดินเบา สอดคล้องกับการศึกษาของ Al-degs, Khraisheh และ Tutunji (2001) ที่ได้ศึกษาการดูดซับของโลหะตะกั่วไอออนโดยใช้ดินเบาและดินเบาเคลือบด้วยแมงกานีสออกไซด์ พบว่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วไอออนด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์มีค่ามากกว่าการดูดซับตะกั่วไอออนด้วยดินเบา คือ 99 และ 24 มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับ ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาผลการทดลองที่ได้จากข้อ 4.2.1-4.2.3 การใช้ดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์มาใช้ในการดูดซับโลหะหนักอาร์เซนิก แคดเมียม และตะกั่ว มีประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดีกว่าการใช้ดินเบา โดยเฉพาะโลหะหนักอาร์เซนิกดินเบา มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ต่ำมาก แต่เมื่อใช้ดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์สามารถช่วยในการกำจัดโลหะหนักชนิดนี้ได้



### 4.3 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการใช้ดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ดูดซับโลหะหนัก ทั้ง 3 ชนิด

การศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการใช้ดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ดูดซับโลหะหนัก แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นที่ 1 เป็นการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักต่อการดูดซับด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ ขั้นที่ 2 เป็นการศึกษาผลของค่าพีเอชของสารละลายโลหะหนักต่อการดูดซับด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ ขั้นที่ 3 เป็นการศึกษาผลของเวลาสัมผัสสารละลายโลหะหนักต่อการดูดซับด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ ผลการทดลองที่ได้จะนำไปคำนวณให้เป็นค่าประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การดูดซับเทียบกับปริมาณโลหะเริ่มต้น ผลการทดลองที่ได้มีดังนี้

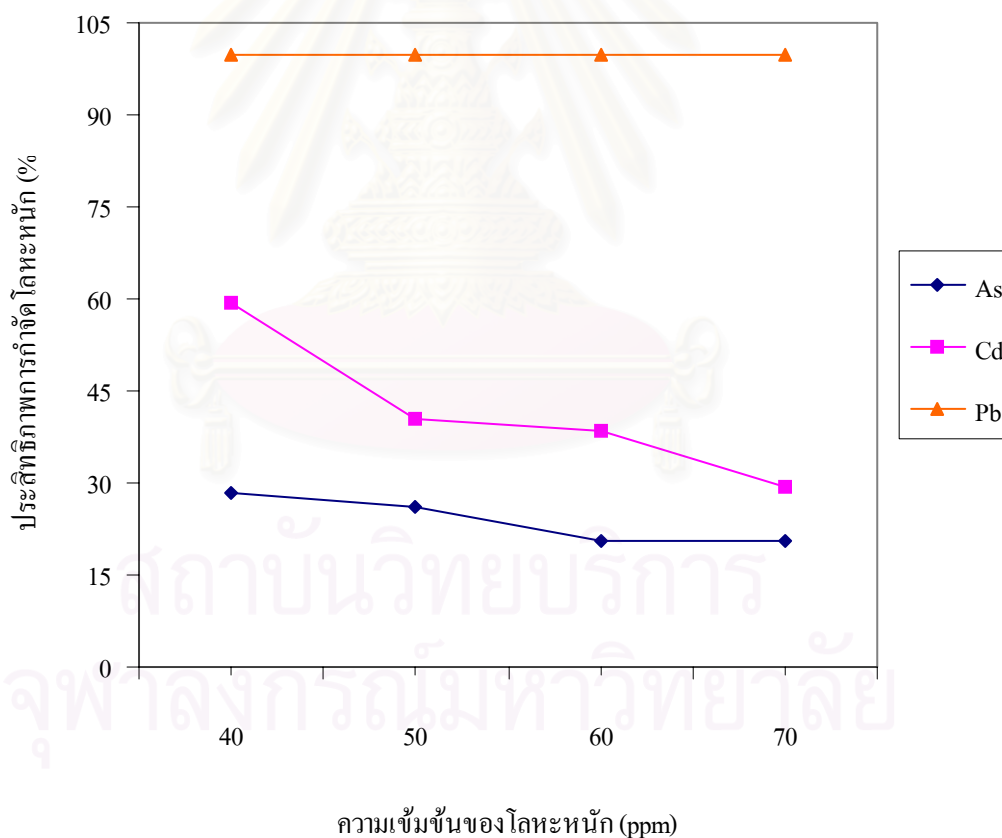
#### 4.3.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักต่อการดูดซับด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์

ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักต่อการดูดซับด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก 40, 50, 60 และ 70 ppm ที่เวลาสัมผัส 1 ชั่วโมง ปริมาณดินเบา 0.1 กรัม ปรับพีเอชของสารละลายเป็น 4 เขย่าด้วยความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดแสดงดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.8 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก ตารางที่ ก-2.1 ถึง ก-2.3)

จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.5 พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักเพิ่มมากขึ้น เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะอาร์เซนิกจะมีประสิทธิภาพการดูดซับ คือ 28.43, 25.95, 20.68 และ 20.52 % ที่ความเข้มข้น 40, 50, 60 และ 70 ppm ตามลำดับ โดยที่ประสิทธิภาพการดูดซับของแกลบมีค่าเท่ากับ 29.46, 38.46, 40.52 และ 59.24 % ที่ความเข้มข้น 40, 50, 60 และ 70 ppm ตามลำดับ ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพการดูดซับลดลงตามค่าความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักที่เพิ่มขึ้น สำหรับโลหะหนักตะกั่วพบว่าที่ความเข้มข้นต่างๆ ของสารละลายโลหะหนักจะมีประสิทธิภาพการดูดซับมากกว่า 99 %

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีส ออกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ

ความเข้มข้นของสารละลาย โลหะหนัก (ppm)	ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก (%)		
	อาร์เซนิก	แคดเมียม	ตะกั่ว
40	28.43	59.24	> 99.99
50	25.95	40.52	> 99.99
60	20.68	38.46	> 99.99
70	20.52	29.46	> 99.99



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีส ออกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ

จากผลการทดลองพบว่าค่าประสิทธิภาพการดูดซับลดลงตามค่าความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ Brown และคณะ (2000) ซึ่งได้ศึกษาการกำจัดโลหะหนักโดยใช้ถ่านฟิท พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับที่พื้นผิวคือ ค่าความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก โดยประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักลดลง

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบการกำจัดโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ จะพบว่าตะกั่วมีค่าประสิทธิภาพการดูดซับดีที่สุด โดยมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับที่สูงกว่า 99 % รองลงมาคือแคดเมียมจะมีค่าประสิทธิภาพการดูดซับอยู่ในช่วง 29.46-59.24 % และอาร์เซนิกเป็นโลหะที่ถูกดูดซับด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ได้น้อยที่สุด มีค่าประสิทธิภาพการดูดซับอยู่ในช่วง 20.52-28.43 % และเมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 95 % ดังแสดงในภาคผนวก ข-1 ถึง ข-2 พบว่าดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์มีประสิทธิภาพการดูดซับอาร์เซนิกที่ความเข้มข้น 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตรไม่ต่างกัน และที่ระดับความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตรจะมีประสิทธิภาพไม่ต่างกับที่ความเข้มข้น 60 และ 70 มิลลิกรัมต่อลิตรเช่นกัน สำหรับแคดเมียมพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมที่ความเข้มข้นต่างๆ จะมีค่าที่แตกต่างกัน มีที่ความเข้มข้น 50 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ไม่ต่างกัน

การดูดซับที่เกิดขึ้นบนสารประกอบออกไซด์ต่างๆ โดยส่วนใหญ่จะเป็นการดูดซับทางเคมีแบบเฉพาะ (Specific adsorption) บนสารประกอบออกไซด์ ไฮดรอกไซด์ของเหล็ก อะลูมิเนียม และแมงกานีสจัดได้ว่าเป็นองค์ประกอบหลักที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาการดูดซับแบบเฉพาะ (Alloway, 1995) โลหะที่มีความสามารถในการสร้างตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนประเภทไฮดรอกไซด์ได้มากที่สุดจะถูกดูดซับแบบเฉพาะได้มากที่สุด ดังนั้นค่าคงที่สมดุล (pK) ของปฏิกิริยา  $M^{2+} + H_2O = MOH^+ + H^+$  จะแสดงถึงพฤติกรรมการดูดซับโดยทั่วไปของโลหะชนิดต่างๆ การดูดซับแบบเฉพาะจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าคงที่สมดุลลดลง หากโลหะชนิดใดมีค่าคงที่สมดุลเท่ากันการดูดซับแบบเฉพาะจะขึ้นกับขนาดไอออนของโลหะ ถ้าขนาดไอออนยิ่งมากก็จะยิ่งถูกดูดซับได้แรง (Brummer, 1986 ; alloway, 1995) เมื่อพิจารณาค่าคงที่สมดุลของแคดเมียมและตะกั่วซึ่งมีค่าเท่ากับ 10.1 และ 7.7 ตามลำดับ จะทำให้ทราบว่าแคดเมียมถูกดูดซับได้น้อยกว่าตะกั่วเนื่องจากมีค่าคงที่สมดุลมากกว่าตะกั่ว และเมื่อพิจารณาขนาดไอออนของอาร์เซนิก แคดเมียม และตะกั่ว จะมีค่าเท่ากับ 0.58, 0.97 และ 1.20 อังสตรอมตามลำดับ (Alloway, 1995) ทำให้ทราบว่าอาร์เซนิกจะถูกดูดซับได้น้อยที่สุดเนื่องจากมีขนาดไอออนเล็กที่สุด และตะกั่วเป็นโลหะที่ถูกดูดซับได้มาก

ที่สุดเนื่องจากมีขนาดไอออนที่ใหญ่ที่สุด จึงสามารถเรียงลำดับโลหะหนักที่ถูกดูดซับได้จากมากไปน้อยคือ ตะกั่ว แคดเมียม และอาร์เซนิก ซึ่งเป็นไปตามผลทดลองที่ได้ และสอดคล้องกับการศึกษาของ Aualiitia และ Pickering (1986) ได้ศึกษาการดูดซับทองแดง ตะกั่ว และแคดเมียมปริมาณน้อยด้วยไฮดรอกไซด์ ออกไซด์ของแมงกานีส ( $\alpha$ - $MnO_2$ ) โดยพบว่าลำดับการดูดซับทั่วไปคือ สารที่ถูกดูดซับ  $Pb > Cu > Cd$

เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองที่ได้ พบว่าค่าประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักอาร์เซนิกและแคดเมียมด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ ที่ระดับความเข้มข้นของสารละลาย 40 ppm จะมีค่าสูงที่สุด ทำให้เป็นค่าความเข้มข้นที่สามารถใช้ดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์กำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียได้มากที่สุด จึงเป็นค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับโลหะหนักอาร์เซนิกและแคดเมียมด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ สำหรับโลหะหนักตะกั่ว นั้นพบว่าทุกค่าความเข้มข้นของสารละลายโลหะตะกั่ว ดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์มีประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่า 99% จากการทบทวนเอกสารต่างประเทศของผู้วิจัย ได้พบว่าการศึกษาลักษณะใกล้เคียงกับการวิจัยครั้งนี้ โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว 50 ppm ในการทดลองผู้วิจัยจึงขอเลือกความเข้มข้น 50 ppm มาใช้ในการวิจัยขั้นต่อไป

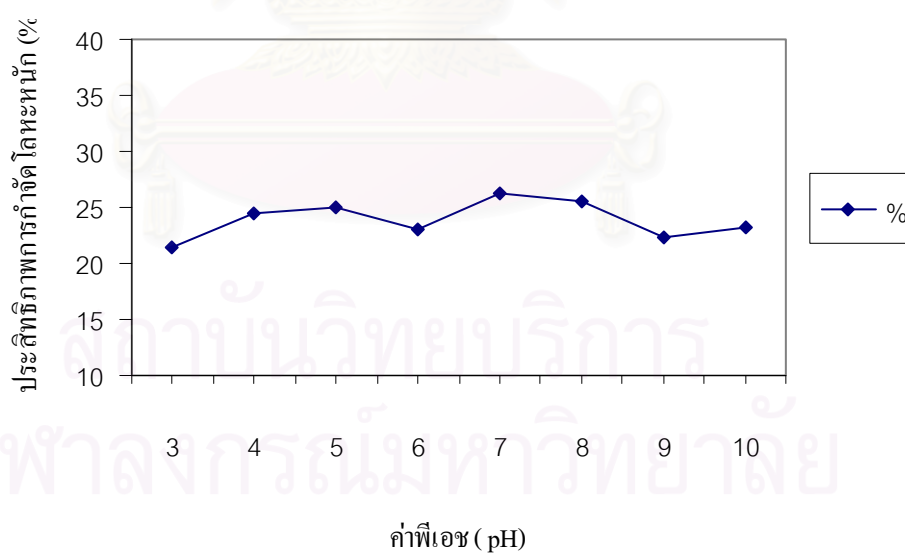
#### 4.3.2 ผลของค่าพีเอชของสารละลายโลหะหนักต่อการดูดซับด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์

##### 4.3.2.1 น้ำเสียสังเคราะห์ประเภทอาร์เซนิก

การศึกษาผลของค่าพีเอชของสารละลายโลหะอาร์เซนิกต่อการดูดซับด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย 40 ppm ตามผลที่ได้จากข้อ 4.3.1 ที่เวลาสัมผัส 1 ชั่วโมง ปรับพีเอชของสารละลายเป็น 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 เขย่าด้วยความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ปริมาณดินเบา 0.1 กรัม ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะอาร์เซนิก แสดงดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.9 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก ตารางที่ ก-2.4)

ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักอาร์เซนิกในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบาเคลือบ  
แมงกานีสออกไซด์ที่พีเอชต่างๆ

ค่าพีเอช	ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก (%)
3	21.40
4	24.44
5	24.93
6	23.06
7	26.25
8	25.61
9	22.25
10	23.14



รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักอาร์เซนิกในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบาเคลือบ  
แมงกานีสออกไซด์ที่พีเอชต่างๆ

จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.6 โดยภาพรวมแล้วประสิทธิภาพการดูดซับอาร์เซนิกด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ที่ระดับพีเอชต่างๆ จะมีค่าอยู่ในช่วง 21.40-26.25 % โดยพบว่าที่ระดับพีเอชของสารละลายโลหะอาร์เซนิกเท่ากับ 3 จะมีค่าประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ต่ำที่สุด คือ 21.40 % ที่ระดับพีเอชเท่ากับ 7 จะมีประสิทธิภาพการดูดซับที่สูงที่สุด คือ 26.25 % ซึ่งในช่วงค่าพีเอชของสารละลาย 4-8 จะมีแนวโน้มของประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มมากขึ้นเมื่อระดับพีเอชเพิ่มสูงขึ้น จาก 24.44 % เป็น 25.61 % และเมื่อพีเอชของสารละลายสูงขึ้นเป็น 9 จะมีประสิทธิภาพการดูดซับลดลงเพียงเล็กน้อย คือเท่ากับ 22.25 % และที่ระดับพีเอช 10 จะมีประสิทธิภาพการดูดซับ 23.14 %

จากรูปที่ 4.9 จะเห็นว่าเมื่อดูแนวโน้มค่าประสิทธิภาพการดูดซับที่พีเอชต่างๆ ของสารละลายโลหะหนักอาร์เซนิก จะพบว่าค่าประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักอาร์เซนิกด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์มีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อพีเอชสูงขึ้น โดยมีประสิทธิภาพการดูดซับลดลงเพียงเล็กน้อยที่ระดับพีเอชมีค่าเท่ากับ 6, 9 และ 10 และเมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 95 % ดังแสดงในภาคผนวก ข-3 พบว่าที่พีเอช 7 ของสารละลายจะมีค่าประสิทธิภาพการดูดซับอาร์เซนิกด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ที่ต่างกับพีเอชอื่น

เมื่อพิจารณาค่าพีเอชที่เหมาะสมของสารละลายโลหะหนักอาร์เซนิกในการนำดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์มาทำการดูดซับ จากการทดลองพบว่าค่าประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักอาร์เซนิกด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์มีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อพีเอชสูงขึ้นในช่วงพีเอช 3-7 โดยที่ระดับพีเอช เท่ากับ 7 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะอาร์เซนิกด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์มีค่าสูงที่สุด จึงเลือกเพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

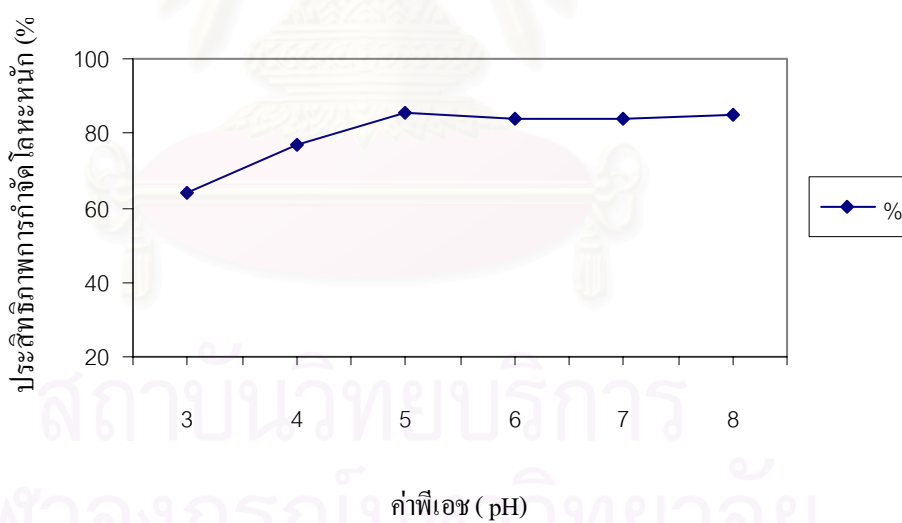
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.3.2.2 น้ำเสียสังเคราะห์ประเภทแคดเมียม

การศึกษาค่าพีเอชของสารละลายโลหะแคดเมียมต่อการดูดซับด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย 40 ppm ตามผลที่ได้จากข้อ 4.3.1 ที่เวลาสัมผัส 1 ชั่วโมง ปรับพีเอชของสารละลายเป็น 3, 4, 5, 6, 7, และ 8 เขย่าด้วยความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ปริมาณดินเบา 0.1 กรัม ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะแคดเมียม แสดงดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.10 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก ตารางที่ ก-2.5) เนื่องจากการปรับค่าพีเอชมีผลทำให้น้ำเสียสังเคราะห์มีค่าความเข้มข้นของโลหะหนักเปลี่ยนแปลงไป และยังมีผลให้เกิดการตกตะกอนของโลหะหนักเมื่อปรับพีเอชไปจนถึงค่าที่สูง ดังนั้นการคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักจึงต้องคำนวณจากปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่จริงในน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนที่จะมีการกำจัดโลหะหนักด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ จากการทดลองพบว่าโลหะแคดเมียมมีการตกตะกอนเกิดขึ้นในขณะที่ทำการปรับพีเอช ซึ่งสังเกตได้จากสีและความขุ่นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เปลี่ยนแปลงไป รวมทั้งความเข้มข้นของโลหะหนักที่มีอยู่จริงในน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งแสดงถึงปริมาตรจวดได้ในรูปสารละลายจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน ซึ่งให้เห็นว่าในสารละลายมีปริมาณโลหะหนักลดลงเนื่องจากการตกตะกอนไปบางส่วน โดยพบว่าโลหะแคดเมียมเริ่มมีการตกตะกอนที่พีเอชสูงกว่า 8 ในการทดลองครั้งนี้จึงทำการทดลองที่พีเอช 3-8

ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบาเคลือบ  
แมงกานีสออกไซด์ที่พีเอชต่างๆ

ค่าพีเอช	ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก (%)
3	63.78
4	77.14
5	85.52
6	84.03
7	83.72
8	85.03



รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบาเคลือบ  
แมงกานีสออกไซด์ที่พีเอชต่างๆ



จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.7 โดยภาพรวมแล้วประสิทธิภาพการดูดซับ แคลเมียมด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ที่ระดับพีเอชต่างๆ จะมีค่าอยู่ในช่วง 63.78-85.52 % โดยจะพบว่าที่ระดับพีเอชของสารละลายโลหะแคลเมียมเท่ากับ 3 จะมีค่าประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ต่ำที่สุด คือ 63.78 % ที่ระดับพีเอชเท่ากับ 5 จะมีประสิทธิภาพการดูดซับที่สูงที่สุด คือ 85.52 % โดยใช้ช่วงค่าพีเอชของสารละลาย 3-5 จะมีแนวโน้มของประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มมากขึ้นเมื่อระดับพีเอชเพิ่มสูงขึ้น จาก 63.78 % เป็น 85.52 % และค่าประสิทธิภาพการดูดซับจะค่อนข้างคงที่ในช่วงพีเอชของสารละลาย 5-8 คือ 85.52, 84.03, 83.72 และ 85.03 % ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าเมื่อดูแนวโน้มค่าประสิทธิภาพการดูดซับที่พีเอชต่างๆ ของสารละลายโลหะหนักแคลเมียม จะพบว่าค่าประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักแคลเมียมด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์มีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อพีเอชสูงขึ้นในช่วงพีเอช 3-5 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Aualitia และ Pickering (1986) ซึ่งมีการศึกษาการดูดซับแคลเมียมปริมาณน้อยด้วยไฮดรอกไซด์ของแมงกานีส ( $\infty\text{-MnO}_2$ ) โดยแปรผันค่าพีเอช อยู่ในช่วง 3-9 พบว่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามค่าพีเอชที่สูงขึ้น และจากการทดลองค่าพีเอชช่วง 5-8 จะมีประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักแคลเมียมที่ค่อนข้างคงที่ และเมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 95 % ดังแสดงในภาคผนวก ข-4 พบว่าดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์มีค่าประสิทธิภาพการดูดซับแคลเมียมได้ต่างกันในช่วงพีเอช 3-5 แต่ในช่วงพีเอช 5-8 จะมีค่าประสิทธิภาพการดูดซับแคลเมียมไม่แตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาค่าพีเอชที่เหมาะสมของสารละลายโลหะหนักแคลเมียมในการนำดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์มาทำการดูดซับ จากการทดลองพบว่าค่าประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักแคลเมียมด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์มีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อพีเอชสูงขึ้นในช่วงพีเอช 3-5 โดยที่ระดับพีเอชเท่ากับ 5 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะแคลเมียมด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์มีค่าสูงสุด จึงเลือกเพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

### 4.3.2.3 น้ำเสียสังเคราะห์ประเภทตะกั่ว

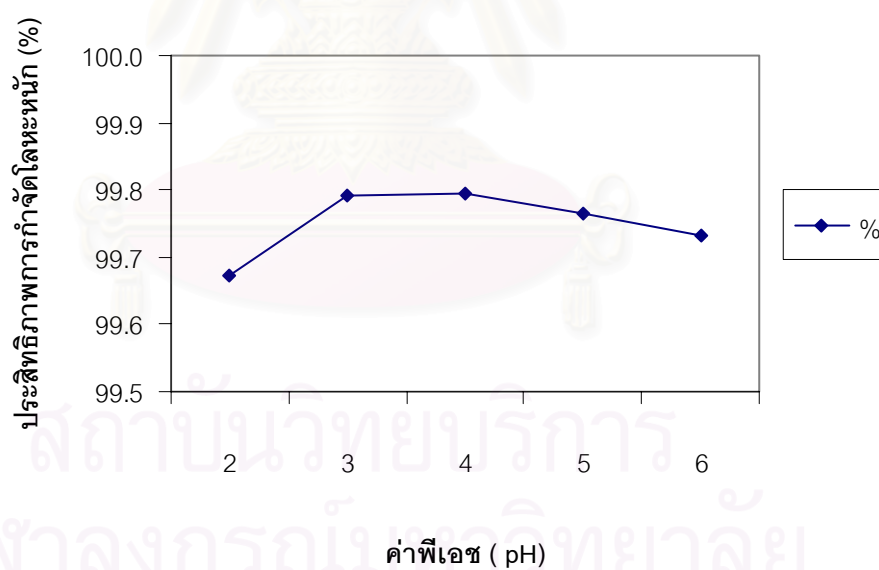
การศึกษาค่าพีเอชของสารละลายโลหะตะกั่วต่อการดูดซับด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย 50 ppm ตามผลที่ได้จากข้อ 4.3.1 ที่เวลาสัมผัส 1 ชั่วโมง ปรับพีเอชของสารละลายเป็น 2, 3, 4, 5, และ 6 เขย่าด้วยความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ปริมาณดินเบา 0.1 กรัม ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะตะกั่ว แสดงดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.11 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก ตารางที่ ก-2.6) เนื่องจากการปรับค่าพีเอชมีผลทำให้น้ำเสียสังเคราะห์มีค่าความเข้มข้นของโลหะหนักเปลี่ยนแปลงไป และยังมีผลให้เกิดการตกตะกอนของโลหะหนักเมื่อปรับพีเอชไปจนถึงค่าที่สูง จากการทดลองพบว่าโลหะตะกั่วมีการตกตะกอนเกิดขึ้นในขณะที่ทำการปรับพีเอช ซึ่งสังเกตได้จากสีและความขุ่นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เปลี่ยนแปลงไป รวมทั้งความเข้มข้นของโลหะหนักที่มีอยู่จริงในน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งแสดงถึงปริมาตรตรวจวัดได้ในรูปสารละลายจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน โดยพบว่าโลหะตะกั่วเริ่มมีการตกตะกอนที่พีเอชสูงกว่า 6 ในการทดลองครั้งนี้จึงทำการทดลองที่พีเอช 2-6

จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.8 โดยภาพรวมแล้วประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ที่ระดับพีเอชต่างๆ จะมีค่า 99 % ขึ้นไป โดยจะพบว่าที่ระดับพีเอชของสารละลายโลหะตะกั่วเท่ากับ 2 จะมีค่าประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ต่ำที่สุด คือ 99.67 % ซึ่งที่ระดับพีเอชมากกว่า 3 ขึ้นไป ความสามารถในการดูดซับตะกั่วด้วยแมงกานีสออกไซด์จะมีค่าประสิทธิภาพการดูดซับที่สูง ทำให้ค่าโลหะตะกั่วที่เหลือหลังจากการดูดซับเมื่อนำไปตรวจวัดแล้วมีค่าตะกั่วที่น้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าเมื่อดูแนวโน้มค่าประสิทธิภาพการดูดซับที่พีเอชต่างๆ ของสารละลายโลหะหนักตะกั่ว จะพบว่าค่าประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักตะกั่วด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์มีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อพีเอชสูงขึ้น

ตารางที่ 4.8 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ที่พีเอชต่างๆ

ค่าพีเอช	ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก (%)
2	99.67
3	99.79
4	> 99.99
5	> 99.99
6	> 99.99



รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ที่พีเอชต่างๆ

เมื่อพิจารณาค่าพีเอชที่เหมาะสมของสารละลายโลหะหนักตะกั่วในการนำดินเบาเคลือบแอมกานีสออกไซด์มาทำการดูดซับ จากการทดลองพบว่าค่าประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักตะกั่วด้วยดินเบาเคลือบแอมกานีสออกไซด์มีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อพีเอชสูงขึ้น โดยที่ระดับพีเอช เท่ากับ 4 เป็นจุดเริ่มที่ประสิทธิภาพการดูดซับสูงโลหะหนักตะกั่วด้วยดินเบาเคลือบแอมกานีสออกไซด์มีค่าสูงที่สุด จึงเลือกเพื่อนำไปใช้ทำการทดลองต่อไป

พีเอชของสารละลายมีผลต่อการดูดซับโลหะหนักด้วยสารประกอบออกไซด์ โดยที่การดูดซับ จะยิ่งเกิดขึ้น ได้ดีเมื่อพีเอชสูงขึ้น เนื่องจากไฮโดรเจนไอออนที่ถูกดูดติดอยู่ที่ผิวของสารประกอบออกไซด์ในสารละลายที่มีค่าพีเอชสูงจะถูกปลดปล่อยออกมาได้ง่ายและเป็นจำนวนมาก ในขณะที่สารละลายที่มีค่าพีเอชต่ำจะเกิดการดูดซับโลหะหนักบนสารประกอบออกไซด์ได้ไม่ดีนัก เนื่องจากในสารละลายที่มีค่าพีเอชต่ำจะมีไฮโดรเจนไอออนอยู่เป็นจำนวนมากทำให้โลหะหนักในรูปไอออนอิสระในสารละลายที่เป็นกรด มีความสามารถในการดูดติดกับผิวของออกไซด์ได้ต่ำ เพราะไฮโดรเจนไอออนที่มีอยู่เป็นจำนวนมากจะไปแข่งขันกับไอออนของโลหะหนักในการดูดติดกับผิวของสารประกอบออกไซด์ จึงมีการดูดซับโลหะหนักเกิดขึ้นได้น้อย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาในหัวข้อ 4.3.2.1-4.3.2.3 ที่พบว่าเมื่อค่าพีเอชของสารละลายโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดสูงขึ้นค่าประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักด้วยดินเบาเคลือบแอมกานีสออกไซด์มีแนวโน้มที่สูงขึ้นด้วย

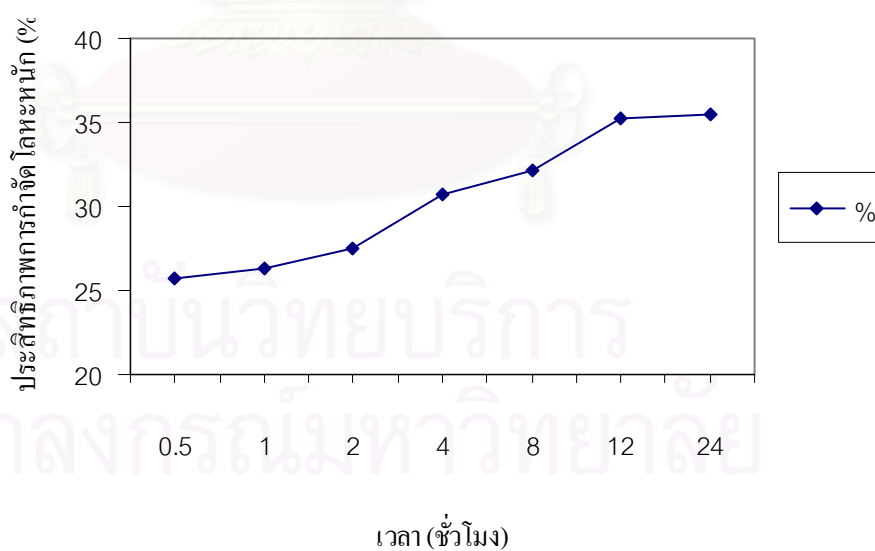
#### 4.3.3 ผลของเวลาสัมผัสสารละลายโลหะหนักต่อการดูดซับด้วยดินเบาเคลือบแอมกานีสออกไซด์

##### 4.3.3.1 นำเสียสังเคราะห์ประเภทอาร์เซนิก

การศึกษาผลของเวลาสัมผัสสารละลายโลหะอาร์เซนิกต่อการดูดซับด้วยดินเบาเคลือบแอมกานีสออกไซด์ ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย 40 ppm ตามผลที่ได้จากข้อ 4.3.1 ปรับพีเอชของสารละลายเป็น 7 ตามผลที่ได้จากข้อ 4.3.2.1 ที่เวลาสัมผัส 0.5, 1, 2, 4, 8, 12 และ 24 ชั่วโมง เขย่าด้วยความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ปริมาณดินเบา 0.1 กรัม ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะอาร์เซนิก แสดงดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.12 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก ตารางที่ ก-2.7)

ตารางที่ 4.9 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักอาร์เซนิกในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ที่เวลาสัมผัสต่างๆ

เวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก (%)
0.5	25.73
1	26.25
2	27.53
4	30.76
8	32.19
12	35.19
24	35.44



รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักอาร์เซนิกในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ที่เวลาสัมผัสต่างๆ

จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.9 โดยภาพรวมแล้วประสิทธิภาพการดูดซับอาร์เซนิกด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ที่เวลาสัมผัสต่างๆ จะมีค่าอยู่ในช่วง 25.73-35.44 % โดยจะพบว่าที่เวลาสัมผัสของสารละลายโลหะอาร์เซนิก 0.5 ชั่วโมง จะมีค่าประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ต่ำที่สุด คือ 25.73 % ที่เวลาสัมผัส 24 ชั่วโมง จะมีประสิทธิภาพการดูดซับที่สูงที่สุด คือ 35.44 % โดยในช่วงเวลาสัมผัสสารละลาย 0.5-12 ชั่วโมง จะมีแนวโน้มประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาสัมผัส จาก 25.73 % เป็น 35.19 % และค่าประสิทธิภาพการดูดซับจะค่อนข้างคงที่ในช่วงเวลาสัมผัส 12 และ 24 ชั่วโมง โดยมีค่าประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับ 35.19 % และ 35.44 % ตามลำดับ และเมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 95 % ดังแสดงในภาคผนวก ข-5 พบว่าดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์มีค่าประสิทธิภาพดูดซับอาร์เซนิกได้ไม่ต่างกันในช่วงเวลาสัมผัส 0.5-2 ชั่วโมง, 4-8 ชั่วโมง และ 12-24 ชั่วโมง

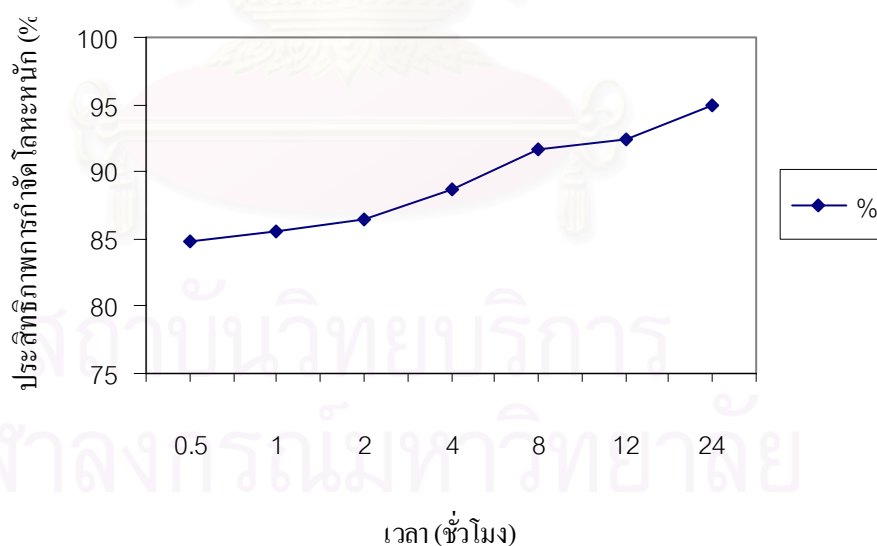
จากรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าเมื่อดูแนวโน้มค่าประสิทธิภาพการดูดซับที่เวลาสัมผัสต่างๆ ของสารละลายโลหะหนักอาร์เซนิก พบว่าค่าประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักอาร์เซนิกด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์จะเริ่มมีค่าสูงสุดและจะคงที่ที่ระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งการดูดซับโลหะหนักอาร์เซนิกจะเริ่มคงที่ที่ระยะเวลาสัมผัส 12 ชั่วโมง จึงเลือกระยะเวลาดังกล่าวมาเป็นระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนักอาร์เซนิกด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์

#### 4.3.3.2 น้ำเสียสังเคราะห์ประเภทแคดเมียม

การศึกษาผลของเวลาสัมผัสสารละลายโลหะแคดเมียมต่อการดูดซับด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย 40 ppm ตามผลที่ได้จากข้อ 4.3.1 ปรับพีเอชของสารละลายเป็น 5 ตามผลที่ได้จากข้อ 4.3.2.2 ที่เวลาสัมผัส 0.5, 1, 2, 4, 8, 12 และ 24 ชั่วโมง เขย่าด้วยความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ปริมาณดินเบา 0.1 กรัม ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะแคดเมียม แสดงดังตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.13 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก ตารางที่ ก-2.8)

ตารางที่ 4.10 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบาเคลือบ  
แมงกานีสออกไซด์ที่เวลาสัมผัสต่างๆ

เวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก (%)
0.5	84.87
1	85.52
2	86.48
4	88.71
8	91.67
12	92.39
24	94.98



รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบาเคลือบ  
แมงกานีสออกไซด์ที่เวลาสัมผัสต่างๆ

จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.10 โดยภาพรวมแล้วประสิทธิภาพการดูดซับ แคลเซียมด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ที่เวลาสัมผัสต่างๆ จะมีค่าอยู่ในช่วง 84.87-94.98 % โดยจะพบว่าที่เวลาสัมผัสของสารละลายโลหะแคลเซียม 0.5 ชั่วโมง จะมีค่าประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ต่ำที่สุด คือ 84.87 % ที่เวลาสัมผัส 24 ชั่วโมง จะมีประสิทธิภาพการดูดซับที่สูงที่สุด คือ 94.98 % โดยในช่วงเวลาสัมผัสสารละลาย 0.5-8 ชั่วโมง จะมีแนวโน้มประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาสัมผัส จาก 84.87 % เป็น 91.67 % และค่าประสิทธิภาพการดูดซับจะค่อนข้างคงที่ในช่วงเวลาสัมผัส 8 และ 12 ชั่วโมงโดยมีค่าประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับ 91.67 % และ 92.39 % ตามลำดับ แล้วจึงเริ่มมีประสิทธิภาพการดูดซับได้เพิ่มขึ้นเล็กน้อยอีกครั้งที่เวลาสัมผัส 24 ชั่วโมง โดยมีค่าประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับ 94.98 % และเมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 95 % ดังแสดงในภาคผนวก ข-6 พบว่าดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์มีค่าประสิทธิภาพดูดซับแคลเซียมได้ไม่ต่างกันในช่วงเวลาสัมผัส 0.5-4 ชั่วโมง และในช่วงเวลาสัมผัส 8-12 ชั่วโมง ส่วนที่เวลาสัมผัส 24 ชั่วโมง จะมีค่าประสิทธิภาพการดูดซับแคลเซียมที่ต่างจากเวลาสัมผัสอื่นๆ แต่จะมีค่าที่ไม่ต่างจากเวลาสัมผัส 12 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นว่าเมื่อดูแนวโน้มค่าประสิทธิภาพการดูดซับที่เวลาสัมผัสต่างๆ ของสารละลายโลหะหนักแคลเซียม จะพบว่าค่าประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักแคลเซียมด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์จะเริ่มมีค่าสูงสุดและจะคงที่ที่ระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งการดูดซับโลหะหนักแคลเซียมจะเริ่มคงที่ที่ระยะเวลาสัมผัส 8 ชั่วโมง จึงเลือกระยะเวลาดังกล่าวมาเป็นระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนักแคลเซียมด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์

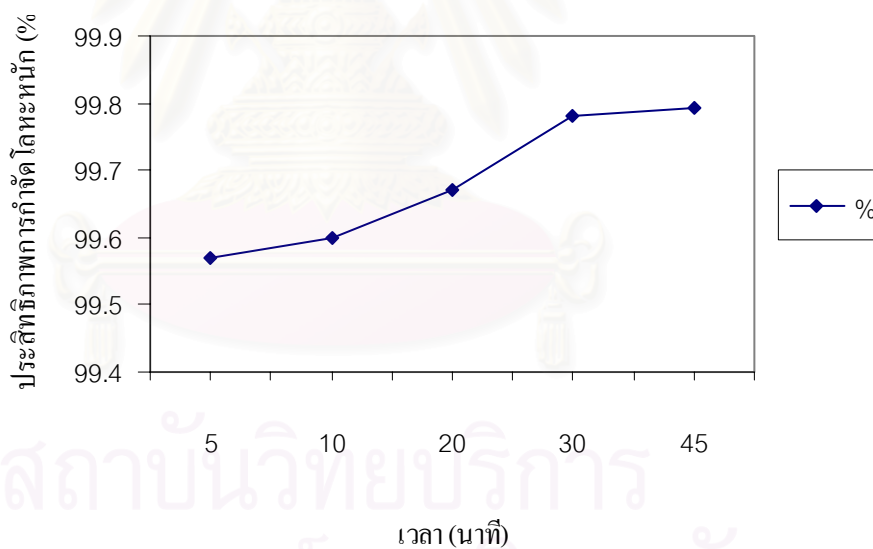
#### 4.3.3.3 น้ำเสียสังเคราะห์ประเภทตะกั่ว

การศึกษาผลของเวลาสัมผัสสารละลายโลหะตะกั่วต่อการดูดซับด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย 50 ppm ตามผลที่ได้จากข้อ 4.3.1 ปรับพีเอชของสารละลายเป็น 4 ตามผลที่ได้จากข้อ 4.3.2.3 ที่เวลาสัมผัส 5, 10, 20, 30 และ 45 นาที เขย่าด้วยความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ปริมาณดินเบา 0.1 กรัม ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะตะกั่วแสดงดังตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.14 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก ตารางที่ ก-2.9)



ตารางที่ 4.11 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบาเคลือบ  
แมงกานีสออกไซด์ที่เวลาสัมผัสต่างๆ

เวลาสัมผัส (นาท)	ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก (%)
5	99.57
10	99.60
20	99.67
30	99.78
45	> 99.99



รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบาเคลือบ  
แมงกานีสออกไซด์ที่เวลาสัมผัสต่างๆ

จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.11 โดยภาพรวมแล้วประสิทธิภาพการดูดซับ ตะกั่วด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ที่เวลาสัมผัสต่างๆ จะมีค่า 99 % ขึ้นไป โดยจะพบว่าที่ เวลาสัมผัสของสารละลายโลหะตะกั่ว 5 นาที จะมีค่าประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักด้วยดินเบา เคลือบแมงกานีสออกไซด์ต่ำที่สุด คือ 99.57 % ที่เวลาสัมผัส 45 นาที จะมีประสิทธิภาพการดูดซับ ที่สูงที่สุด โดยในช่วงเวลาสัมผัสสารละลาย 5-45 นาที จะมีแนวโน้มประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่ม มากขึ้นตามระยะเวลาสัมผัส และเมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 95 % ดังแสดงใน ภาคผนวก ข-7 พบว่าในช่วงเวลาสัมผัส 5-10 นาที ดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์มีค่า ประสิทธิภาพดูดซับตะกั่วได้ไม่ต่างกัน โดยที่เวลาสัมผัส 30 นาที จะมีค่าประสิทธิภาพการดูดซับ ต่างจากเวลาสัมผัสอื่นๆ

จากรูปที่ 4.14 จะเห็นว่าเมื่อดูแนวโน้มค่าประสิทธิภาพการดูดซับที่เวลาสัมผัส ต่างๆ ของสารละลายโลหะหนักตะกั่ว จะพบว่าค่าประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักตะกั่วด้วยดิน เบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์จะเริ่มมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามเวลาสัมผัสจนที่ระยะเวลาสัมผัส 45 นาที จะมีประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วมากที่สุด ซึ่งทำให้ค่าโลหะตะกั่วที่เหลือหลังจากการดูดซับเมื่อ นำไปตรวจวัดแล้วมีค่าตะกั่วที่น้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงเลือกระยะเวลาดังกล่าวมาเป็น ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนักตะกั่วด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์

จากผลการทดลองในข้อ 4.3.3 ของโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด จะเห็นว่าเวลาสัมผัสมีผล ต่อการดูดซับโลหะหนักด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ โดยจะมีประสิทธิภาพการดูดซับ เพิ่มขึ้นตามเวลาสัมผัสและจะเริ่มคงที่ที่ระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Orumwense (1996) ศึกษาการกำจัดตะกั่วจากน้ำโดยการดูดซับด้วยดินเหนียวประเภทโอไลไนต์ เป็นสารดูดซับ ตะกั่วจากสารละลาย  $Pb(NO_3)_2$  โดยมีการแปรผันค่าต่างๆ ได้แก่ พิเอชของสารละลายให้มีค่าในช่วง 3- 9.5 อุณหภูมิ 30-50 องศาเซลเซียส ความเข้มข้น 5-10 มิลลิกรัมต่อลิตร และเวลาสัมผัส 20-160 นาที พบว่าการดูดซับตะกั่วจะเพิ่มขึ้นตามเวลาสัมผัส จากนั้นจะดูดซับได้คงที่ในแต่ละค่าความ เข้มข้นเมื่อเวลาสัมผัสผ่านไป

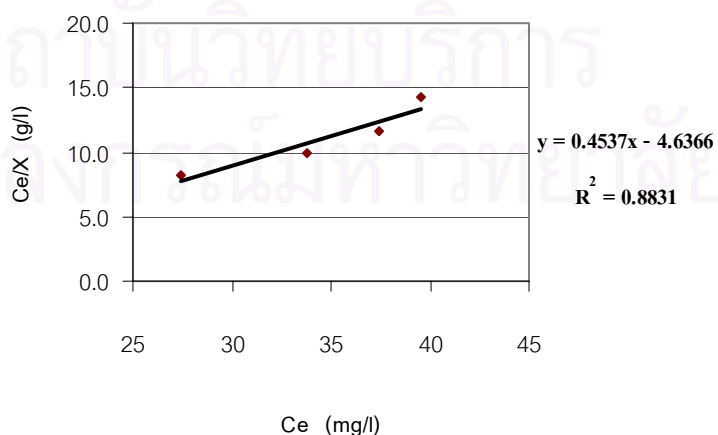
## 4.4 ผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ

### 4.4.1 สารละลายโลหะหนักอาร์เซนิก

จากผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับโลหะหนักอาร์เซนิกด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ ทำให้ทราบถึงผลของปริมาณดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ต่อการดูดซับอาร์เซนิก ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.15 แสดงไอโซเทอมการดูดซับของอาร์เซนิก

ตารางที่ 4.12 ปริมาณอาร์เซนิกในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดซับด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์

น้ำหนักดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ (g)	ความเข้มข้นของอาร์เซนิกเริ่มต้น (ppm)	ความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่เหลือ (ppm)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
0	40.64	40.64	0
0.04	40.64	39.53	2.72
0.10	40.64	37.43	7.91
0.20	40.64	33.83	16.76
0.40	40.64	27.41	32.55



รูปที่ 4.15 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของอาร์เซนิกด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์

จากรูปที่ 4.15 พบว่าเมื่อทดสอบไอโซเทอมการดูดซับของโลหะหนักอาร์เซนิกด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ พบว่ามีความสัมพันธ์และเป็นไปตามสมการไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงมัวร์ ซึ่งมีค่า  $R^2$  ที่สูง คือเท่ากับ 0.8831

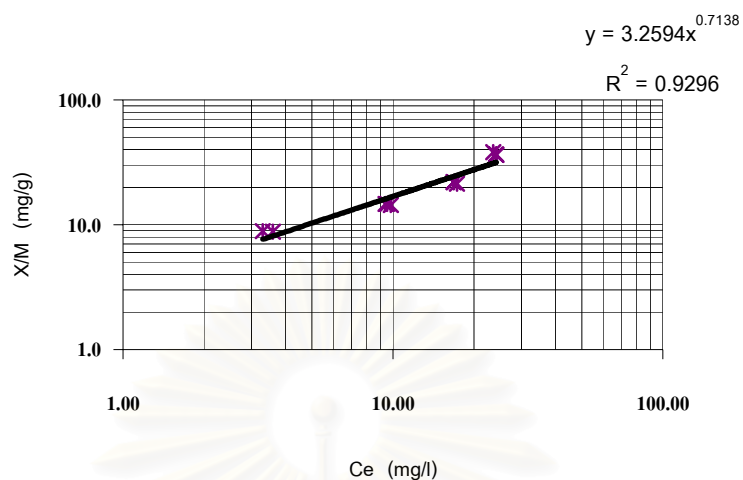
#### 4.4.2 สารละลายโลหะหนักแคดเมียม

จากผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ ทำให้ทราบถึงผลของปริมาณดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ต่อการดูดซับแคดเมียม ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.16 แสดงไอโซเทอมการดูดซับของแคดเมียม

ตารางที่ 4.13 ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียดังเคราะห์เมื่อถูกดูดซับด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์

น้ำหนักดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ (g)	ความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้น (ppm)	ความเข้มข้นของแคดเมียมที่เหลือ (ppm)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
0	38.72	38.72	0
0.04	38.72	23.93	38.20
0.10	38.72	16.97	56.17
0.20	38.72	9.57	75.28
0.40	38.72	3.45	91.09

จากรูปที่ 4.16 พบว่าเมื่อทดสอบไอโซเทอมการดูดซับของโลหะหนักแคดเมียมด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ พบว่ามีความสัมพันธ์และเป็นไปตามสมการไอโซเทอมของการดูดซับแบบฟรุนดลิช ซึ่งมีค่า  $R^2$  ที่สูง คือ 0.9296 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Namasivayam และ Ranganathan (1995) ซึ่งศึกษาการกำจัดแคดเมียมโดยการดูดซับด้วยสารดูดซับที่เป็นของเสียประเภทไฮดรอกไซด์ของเหล็กและโครเมียมซึ่งได้มาจากโรงงานผลิตปุ๋ย โดยทำการทดลองแบบแบทช์ และฟิกส์เบด (Fixed bed) พบว่าการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมเป็นสมการการดูดซับที่เป็นไปตามไอโซเทอมของฟรุนดลิช



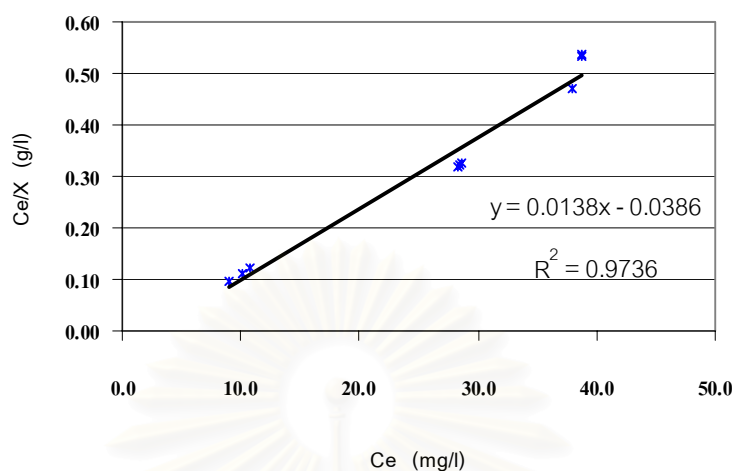
รูปที่ 4.16 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของแคลเซียมด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์

#### 4.4.3 สารละลายโลหะหนักตะกั่ว

จากผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับโลหะหนักตะกั่วด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ ทำให้ทราบถึงผลของปริมาณดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ต่อการดูดซับตะกั่ว ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.17 แสดงไอโซเทอมการดูดซับของตะกั่ว

ตารางที่ 4.14 ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดซับด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์

น้ำหนักดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ (g)	ความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้น (ppm)	ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือ (ppm)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
0	46.05	46.05	0
0.01	46.05	38.53	16.33
0.02	46.05	28.43	38.26
0.04	46.05	9.99	78.31



รูปที่ 4.17 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของตะกั่วด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์

จากรูปที่ 4.17 พบว่าเมื่อทดสอบไอโซเทอมการดูดซับของโลหะหนักตะกั่วด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ พบว่ามีความสัมพันธ์และเป็นไปตามสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ ซึ่งมีค่า  $R^2$  ที่สูง คือ 0.9736 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Al-degs, Khraisheh และ Tutunji (2001) ได้ศึกษาการดูดซับของโลหะตะกั่วไอออนโดยใช้ดินเบาและดินเบาเคลือบด้วยแมงกานีสออกไซด์ พบว่าการดูดซับโลหะหนักตะกั่วเป็นสมการการดูดซับที่เป็นไปตามไอโซเทอมของแลงมัวร์ และพบว่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับตะกั่วด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์เท่ากับ 99 มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับ ซึ่งมากกว่าผลการทดลองที่ทำการศึกษานี้ โดยพบว่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับตะกั่วด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ที่ได้จากการทดลองครั้งนี้ คือ 72 มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับ ซึ่งได้จากส่วนกลับของค่าความชันของรูปที่ 4.17

#### 4.5 ศึกษาเสถียรภาพของดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์หลังจากดูดซับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดแล้วด้วยวิธีการทดสอบการชะละลาย

การศึกษาเสถียรภาพของดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์หลังจากดูดซับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดด้วยวิธีการทดสอบการชะละลาย (Leaching test) จะใช้ดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ที่เกิดจากสถานะที่ได้จากผลการทดลองในข้อ 4.3 มาทำการชะละลาย แล้วเปรียบเทียบผลที่ได้กับเกณฑ์มาตรฐานของท้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ผลการชะละลายโลหะหนักทั้ง 3 แสดงดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ค่าชะละลายของโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด

โลหะหนัก	ความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลาย หลังผ่านการชะละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)*
อาร์เซนิก (As)	30.15	5.0
แคดเมียม (Cd)	0.08	1.0
ตะกั่ว (Pb)	≤0.1	5.0

\* ค่ามาตรฐานท้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว

จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.15 พบว่าโลหะหนักแคดเมียม และตะกั่วมีการชะละลายออกมาไม่เกินค่ามาตรฐานของท้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมที่กำหนดไว้ ดังนั้นดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ที่ผ่านการใช้งานดูดซับโลหะหนักแคดเมียมและตะกั่วแล้ว จึงไม่เข้าข่ายเป็นสารพิษสามารถนำไปฝังกลบตามหลักสุขาภิบาลได้ สำหรับการทดสอบการชะละลายของอาร์เซนิกจากดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์พบว่าจะมีค่าเกินมาตรฐานของท้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมจึงจำเป็นต้องมีการดำเนินการทำลายฤทธิ์ใหม่โดยกระบวนการทำให้เป็นก้อน เป็นกระบวนการที่ทำให้สารต่างๆ ถูกยึดไว้และไม่สามารถแสดงคุณสมบัติทางเคมีออกมาได้ก่อนที่จะนำไปฝังกลบให้ถูกต้องตามหลักวิชาการต่อไป

#### 4.6 ศึกษาประสิทธิภาพการนำดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ดูดซับโลหะหนักในน้ำ เสียจากอุตสาหกรรม

ตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่นำมาศึกษา เป็นตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่ เก็บจากบริเวณตำแหน่งบ่อน้ำเสียรวม มีค่าพีเอช 1.59 เมื่อนำมาทำการตรวจหาปริมาณโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด ในน้ำเสียแสดงดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ปริมาณโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดในน้ำเสียจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่

โลหะหนัก	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่ามาตรฐาน (มิลลิกรัมต่อลิตร)*
อาร์เซนิก (As)	0.420	0.25
แคดเมียม (Cd)	0.007	0.03
ตะกั่ว (Pb)	5.890	0.20

\* ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เรื่องกำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน

จากตารางที่ 4.16 พบว่าในน้ำเสียของโรงงานผลิตแบตเตอรี่ มีโลหะหนักที่ทำการศึกษา ทั้ง 3 ชนิด คือ อาร์เซนิก แคดเมียม และตะกั่ว โดยโลหะหนักอาร์เซนิกและตะกั่ว จะมีปริมาณความเข้มข้นเกินกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน มีเพียงแคดเมียมที่พบต่ำกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง ดังนั้นผู้ทดลองจึงเลือกโลหะอาร์เซนิกและตะกั่วทำการศึกษาต่อไป

##### 4.6.1 ศึกษาประสิทธิภาพการนำดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ดูดซับอาร์เซนิกในน้ำเสีย จากอุตสาหกรรม

ศึกษาการดูดซับโลหะหนักอาร์เซนิกในน้ำเสียจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่ น้ำเสียมีความเข้มข้นอาร์เซนิกเริ่มต้น 0.42 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ปริมาณดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ 0.1 กรัม ค่าพีเอช 1.59 เวลาสัมผัส 3,6 และ 12 ชั่วโมง เขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะอาร์เซนิก แสดงดังตารางที่ 4.17 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก ตารางที่ ก-2.10)



ตารางที่ 4.17 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักอาร์เซนิกในน้ำเสียจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่  
ด้วยดินเบาเคลือบเมงกานีสออกไซด์

เวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	ค่าความเข้มข้นอาร์เซนิกหลังดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก (%)
3	$\leq 0.05$	$> 99.99$
6	$\leq 0.05$	$> 99.99$
12	$\leq 0.05$	$> 99.99$

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.17 พบว่าดินเบาเคลือบเมงกานีสออกไซด์สามารถดูดซับโลหะอาร์เซนิกจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่ได้ดีมาก ทำให้ค่าโลหะอาร์เซนิกที่เหลือหลังจากการดูดซับด้วยดินเบาเคลือบเมงกานีสออกไซด์ เมื่อนำไปตรวจวัดแล้วมีค่าอาร์เซนิกน้อยกว่า 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร ทุกค่าเวลาสัมผัส ที่ 3, 6 และ 12 ชั่วโมง

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถของดินเบาเคลือบเมงกานีสออกไซด์ในการดูดซับโลหะอาร์เซนิกจากน้ำเสียโรงงานผลิตแบตเตอรี่กับมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม (รายละเอียดค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งแสดงไว้ในภาคผนวก ค) มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมกำหนดให้น้ำทิ้งอุตสาหกรรมมีอาร์เซนิกเจือปนอยู่ได้ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของอาร์เซนิกในน้ำเสียของโรงงานผลิตแบตเตอรี่หลังผ่านการดูดซับด้วยดินเบาเคลือบเมงกานีสออกไซด์ที่ระยะเวลาสัมผัสทั้ง 3, 6 และ 12 ชั่วโมง จะมีปริมาณอาร์เซนิกเหลืออยู่น้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม

#### 4.6.2 ศึกษาประสิทธิภาพการนำดินเบาเคลือบเมงกานีสออกไซด์ดูดซับตะกั่วในน้ำเสียจากอุตสาหกรรม

ศึกษาการดูดซับโลหะหนักตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่ น้ำเสียมีความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 5.89 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ปริมาณดินเบาเคลือบเมงกานีสออกไซด์ 0.1 กรัม ค่าพีเอช 1.59 เวลาสัมผัส 30, 45 และ 60 นาที เขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที

ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะตะกั่ว แสดงดังตารางที่ 4.18 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ ค-2.11)

ตารางที่ 4.18 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่ด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์

เวลาสัมผัส (นาที)	ค่าความเข้มข้นตะกั่วหลังดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก (%)
30	$\leq 0.1$	$> 99.99$
45	$\leq 0.1$	$> 99.99$
60	$\leq 0.1$	$> 99.99$

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.18 พบว่าดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์สามารถดูดซับโลหะตะกั่วจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่ได้ดีมาก ทำให้ค่าโลหะตะกั่วที่เหลือหลังจากการดูดซับด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ เมื่อนำไปตรวจวัดแล้วมีค่าตะกั่วต่ำกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ทุกค่าเวลาสัมผัส ที่ 30, 45 และ 60 นาที

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถของดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ในการดูดซับโลหะตะกั่วจากน้ำเสียโรงงานผลิตแบตเตอรี่กับมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม (รายละเอียดค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งแสดงไว้ในภาคผนวก ค ) มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมกำหนดให้น้ำทิ้งอุตสาหกรรมมีตะกั่วเจือปนอยู่ได้ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำเสียของโรงงานผลิตแบตเตอรี่หลังผ่านการดูดซับด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ที่ระยะเวลาสัมผัสทั้ง 30, 45 และ 60 นาที จะมีปริมาณตะกั่วเหลืออยู่น้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองการดูดซับโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ อาร์เซนิก แคดเมียม และตะกั่วในน้ำเสียด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. จากการศึกษาลักษณะสมบัติของดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ พบว่าลักษณะภายนอกจะเป็นผงสีน้ำตาลเข้ม ส่วนดินเบาจะเป็นสีเหลืองนวล การศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวการมีรูพรุนของดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ พบว่าพื้นที่ผิวเทียบต่อกรัมของดินเบาที่ทำการเคลือบด้วยแมงกานีสออกไซด์จะมีพื้นที่ผิวมากกว่าของดินเบา รวมทั้งค่าปริมาตรของรูพรุนและขนาดของรูพรุนเฉลี่ยมีค่าที่มากกว่าเช่นกัน ซึ่งลักษณะดังกล่าวของดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ที่มากกว่าจะมีประโยชน์อย่างยิ่งในการเป็นตัวดูดซับที่ดีกว่าดินเบา

2. เมื่อเปรียบเทียบการดูดซับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดด้วยดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด ด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์จะมีค่าที่มากกว่าการดูดซับด้วยดินเบา โดยที่โลหะหนักอาร์เซนิกจะมีค่าต่างของประสิทธิภาพการดูดซับระหว่างดินเบา กับดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์มากที่สุด รองลงมาคือ โลหะแคดเมียม และตะกั่ว

3. ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนักด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์พบว่า ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ พีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ รวมทั้งเวลาสัมผัสของดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์กับน้ำเสียสังเคราะห์ มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด ด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ โดยมีผลแตกต่างกันไปในการดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิด ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักสูงขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ยังมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามค่าพีเอช และประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักจะมีค่าเพิ่มขึ้น

ตามระยะเวลาสัมผัสที่เพิ่มขึ้นจนถึงระยะเวลาหนึ่งซึ่งประสิทธิภาพการดูดซับจะเริ่มมีค่าคงที่ จากการศึกษาจะได้สถานะที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนักด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ ดังนี้

3.1 สถานะที่เหมาะสมต่อการดูดซับอาร์เซนิกในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำเสียสังเคราะห์มีค่าพีเอชเท่ากับ 7 ระยะเวลาสัมผัส 12 ชั่วโมง โดยจะให้ประสิทธิภาพการดูดซับอาร์เซนิก 35.19 %

3.2 สถานะที่เหมาะสมต่อการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำเสียสังเคราะห์มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 ระยะเวลาสัมผัส 8 ชั่วโมง โดยจะให้ประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียม 91.67 %

3.3 สถานะที่เหมาะสมต่อการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำเสียสังเคราะห์มีค่าพีเอชเท่ากับ 4 ระยะเวลาสัมผัส 45 นาที โดยจะให้ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วมากกว่า 99.79 %

4. เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักเท่ากัน ค่าพีเอชของสารละลายเท่ากัน ระยะเวลาสัมผัสเท่ากัน และปริมาณดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ที่ใช้ในการดูดซับเท่ากัน พบว่าสามารถเรียงลำดับโลหะหนักที่ถูกดูดซับด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ได้จากมากไปน้อยคือ ตะกั่ว แคดเมียม และอาร์เซนิก

5. ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด พบว่าการดูดซับโลหะหนักอาร์เซนิกและตะกั่วด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์สัมพันธ์กับสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ และการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์จะสัมพันธ์กับสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช

6. การศึกษาเสถียรภาพของดินเบาเคลือบแอมกานีสออกไซด์หลังจากดูดซับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดด้วยวิธีการทดสอบการชะละลาย (Leaching test) พบว่าโลหะหนักแคดเมียม และตะกั่วมีการชะละลายออกมาไม่เกินค่ามาตรฐานของท้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมที่กำหนดไว้ สำหรับการทดสอบการชะละลายของอาร์เซนิกจากดินเบาเคลือบแอมกานีสออกไซด์พบว่าจะมีค่าเกินมาตรฐานของท้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ดังนั้นเมื่อบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะอาร์เซนิกปนเปื้อน โดยใช้ดินเบาเคลือบแอมกานีสออกไซด์แล้ว ควรจะต้องคำนึงถึงการจัดการกากตะกอนที่เกิดขึ้นด้วย เช่น มีการดำเนินการทำลายฤทธิ์ใหม่โดยกระบวนการทำให้เป็นก้อน (solidification)

7. จากการนำดินเบาเคลือบแอมกานีสออกไซด์มาใช้ในการดูดซับโลหะหนักอาร์เซนิกและตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่ พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักทั้ง 2 ชนิดดีมาก จนทำให้น้ำเสียมีค่าโลหะหนักทั้ง 2 ชนิด ไม่เกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมตามที่ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดไว้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการนำดินเบาเคลือบแอมกานีสออกไซด์ไปบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปผสมปนกัน เพื่อให้ทราบว่าโลหะหนักชนิดใดสามารถแข่งขันในการถูกดูดซับด้วยดินเบาเคลือบแอมกานีสออกไซด์ได้ดีกว่ากัน

2. นอกเหนือจากโลหะหนัก 3 ชนิดที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งได้แก่ อาร์เซนิก แคดเมียม และตะกั่ว ยังสามารถศึกษาการกำจัด โลหะหนักและสารพิษชนิดอื่นๆ ด้วยดินเบาเคลือบแอมกานีสออกไซด์ ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงความสามารถของดินเบาเคลือบแอมกานีสออกไซด์ในการดูดซับกำจัดสารต่างๆ ได้ดียิ่งขึ้น

3. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียด้วยดินเบาเคลือบแอมกานีสออกไซด์ สามารถทดสอบและแปรผันตัวแปรอื่นๆ เช่น อุณหภูมิ, ความเร็วรอบในการเขย่า เป็นต้น เพื่อหาสภาวะที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้นในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียด้วยดินเบาเคลือบแอมกานีสออกไซด์

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- จันทร์นา สวงนรุ่งวงศ์. 2539. การกำจัดโลหะหนักในน้ำโดยใช้ซีเมนต์ลอย. วิทยานิพนธ์ปริญญา  
มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย.
- ซังลิกา บุญพะเนียด. 2541. การกำจัดไอออนของโลหะหนักโดยใช้ถ่านกัมมันต์และถ่านลอยลิกไนต์.  
วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีวิเคราะห์และเคมีอินทรีย์ประยุกต์ คณะ  
วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.
- ธีรานี โชติกไกร และชาญ จรรยาวิชย์. 2540. ไดอะตอมไมต์แหล่งน้ำแม่โจ้ อ.แม่ทะ จ.ลำปาง.  
การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17 (วทท.17).  
มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- นิธิยา รัตนাপนนท์ และวิบูลย์ รัตนูปนนท์. 2543. สารพิษในอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 1.  
กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.
- ปิยะพร บารมี. 2542. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากยางเหลือทิ้งโดยการกระตุ้นด้วย  $ZnCl_2$ .  
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เปี่ยมศักดิ์ เมนะเสวต. 2543. แหล่งน้ำกักปัญหามลพิษ. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพมหานคร:สำนักพิมพ์  
แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พนจิตร ธนสิน. 2539. การกำจัดสังกะสีและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยตัวกลางทรายเคลือบ  
ออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรม  
สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พล สาเกทอง. 2518. รายงานผลการวิจัยเรื่องการดูดซับที่ผิวของของแข็งต่อสารที่ปะปนอยู่ในน้ำ  
โดยของแข็งอยู่กับที่วิธีหนึ่งและของแข็งอยู่ในลักษณะเป็นฟลูอิด. รายงานผลการวิจัย  
ทุนรัชดาภิเษกสมโภช สาขาวิทยาศาสตร์กายภาพ ปีการศึกษา 2516.
- ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา. 2540. ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 2.  
กรุงเทพมหานคร:อรุณการพิมพ์.

- อธิชา บวรวัฒนานนท์. 2527. การเตรียมสารของแข็งรองรับจากไดอะตอมไมต์ในประเทศไทย สำหรับโครมาโตกราฟีคอลัมน์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อัจฉรีย์ กาญจนพิบูลวงศ์. 2544. การดูดซับโลหะหนักบางชนิดด้วยดินลูกรัง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

### ภาษาอังกฤษ

- Al-degs, Y., Khraisheh, M.A. and Tutunji, M.F. 2001. Sorption of Lead Ions on Diatomite and Manganese Oxides Modified Diatomite . Water Research 35 : 3724-3728.
- Allard, B., Hakansson, K., and Karlsson, S. 1987. The importance of sorption phenomena in relation to trace element speciation and mobility. In L.Landner (eds.), Speciation of metals in water, sediment and soil systems. Heidelberg:Springer-Verlag Berlin.
- Alloway, B.J. 1995. Heavy metals in soil. 2 nd ed. London : Blackie Academic and Professional.
- Atanasov, At.P. 1972. Production of Support for GC from Bulgarian Kieselguhr II Effect of the Kind of Impurity Removal on the Properties of the Support. 5(1): 73-79.
- Atanasov, A. and Shterev, G. 1974. Production of GC carries from Bulgarian Kieselguhr IV Production of a carrier from Kieselguhr at the Gurmen Deposit, Blagoevgrad. Nachni Tr. Plovski University. 12(3): 75-81.
- Auatiitia, T.U., and Pickering, W.F. 1986. The specific sorption of trace amounts of Cu, Pb, and Cd by inorganic particulates. Water, Air, and Soil Pollut. 35 : 171-185.
- Benjamin, M.M., and Leckie, J.O.1980 Adsorption of metals at oxide interfaces:effects of the concentrarions of adsorbate and competing metals. In R.A. Baker (eds.), pp. 305-322, Contaminants and sediments Vol. 2 . Michigan:Ann Arbor Science.
- Brown, P. A., and others. 2000. Metal Removal from Wastewater Using Peat. Water Research 34 : 3907- 3916.
- Brummer, G.W. 1986. Heavy metal species, mobility and availability in soils. In M.Bernhard, F.E. Brinckman, and P.J. Sadler (eds.), pp.169-192, The importance oof chemical “Speciation” in environmental processes. Heidelberg : Springer-Verlag Berlin.

- Congar, P.S. 1942. Accumulation of Diatomaceous Deposites. J. Sed. Petrol. 12(2): 55-66.
- Diamadopoulos, E., Ioannidis, S., and Sakellaropoulos, G.P. 1993. As(V) Removal from Aqueous Solution by Fly Ash. Water Research 12 : 1773-1777.
- Dzombak, D.A., and Morel, F.M.M. 1990. Surface complexation modeling: Hydrous Ferric Oxide. New York: John Wiley & Sons.
- Forstner and Wittman. 1981. Metal transfer between solid and aqueous phase. Metal pollution in the Aquatic Environment
- Gadde, R.R. and Laitinen, H.A. 1974. Studies of heavy metal adsorption by hydrous iron and manganese oxides. Analytical Chemistry. 46(13) : 2022-2026.
- Huang, C.P. and Fu, P.L.K. 1984. Treatment of arsenic-containing water by the activated carbon process. Journal WPCF. : 233-241.
- Jiban, K. Satpathy and Malay Chaudhuri. 1995. Treatment of cadmium-plating and chromium-plating waste by ion oxide-coated sand. Water Environment Research 67 : 788-790.
- Kadey L. and Frederic, JR. 1983. Diatomite. Industrial Minerals and Rocks. 2 vols. 5th ed., pp. 677-708. Maryland: Port City Press.
- Kinniburgh, D.G., and Jackson, M.L. 1981. Cation adsorption by hydrous metal oxides and clay. In M.A. Anderson, and A.J. Rubin (eds.), pp. 91-160, Adsorption of inorganics at solid-liquid interfaces. Michigan: Ann Arbor Science.
- Kinniburgh, D.G., Jackson, M.L. and Syers, J.K. 1976. Adsorption of alkaline earth, transition and heavy metal cations by hydrous oxide gels of iron and aluminum. Soil Sci. Soc. Am. J. 40(4) : 796-799.
- Lai, C.H., Chen, C.Y., Wei, B.L. and Lee, C.W. 2001. Adsorption characteristics of cadmium and lead on the goethite-coated sand surface. Journal of environmental science and health Part A-toxic/hazardous substances & environmental engineering. 36 (5) : 747-763.
- Lo, S.L., Jeng, H.T. and Lai, C.H. 1997. Characteristics and adsorption properties of iron-coated sand. Wat. Sci. Tech. 35 (7) : 63-70.
- Logsdon, G.S. and Sorg, J. Thomas. 1978. Treatment Technology to Meet the Interim Primary Drinking Water Regulation for Inorganics : Part 2, Journal AWWA, V.70 : 379-393.
- Mathews, AP. and Zayas, I. 1989. Particle size and shape effects on adsorption rate parameters.



J. Of Environmental Engineering. 41-55.

McKenzie, R.M.1980. The adsorption of lead and other heavy metals on oxides of manganese and iron. Aust. J. Soil Res. 18 : 61-73.

Namasivayam, C., and Ranganathan, K. 1995. Removal of Pb (II) , Ni (II) and mixture of metal ions by adsorption onto waste Fe (III) / Cr (III) hydroxide and fixed bed studies. Environmental Technology. 16 : 851-860.

Leckie, J.O. 1986. Adsorption and transformation of trace element species at sediment/water interfaces. In M. Bernhard, F.E. Brinckman, and P.J. Sadler (eds.), pp. 237-254, The importance of chemical "Speciation" in environmental processes. Heidelberg:Springer-Verlag Berlin.

Ottenstein, D.M. 1963 . Column Support Materials for Use in Gas Chromatography. J. Gas Chromatogr. 1 : 11-23.

Orumwense, F.O. 1996. Removal of lead from water by adsorption on a kaolinitic clay. J. Chem. Tech. Biotechnol. 65 : 363-369.

Panday, K.K., Yavada, K.P., Tyagi, B.S. and Singh, V.N. 1987. Fly Ash for the Treatment of Cd(II) Rich Effluents. Envi. Tech. Letters. 8 : 225-234.

Pettijohn, P.J. 1957. Sedimentary Rocks. 2 nd ed. New York : Harper & Raw, 435.

Raven, K.P. 1998. Arsenite and Arsenate Adsorption on Ferrihydrite : Kinetics, Equilibrium, and Adsorption Envelopes. Environmental Science and Technology. 32(3) : 344-349.

Rochow , E.G., and Abel, E.W.1973. The chemistry of Germanium, Tin and Lead : Pergamon texts in inorganic chemistry Vol.14. Pergamon Press.

Saha, J.C. ; Dikshit, A.K. and Bandyopadhyay, M. 1999. A Review of Arsenic Poisoning and its Effects on Human Health. Critical Review in Environmental Science and Technology. 29(3) : 281-313.

Sawyer, C.N., McCarty, P.L., and Parkin, G.F. 1994. Chemistry for environmental engineering . 4 th ed. New York : McGraw-Hill.

Stager, J.C. 1988. Environmental Changes at Lake Cheshi, Zambia since 40,000 years B.P. Quat. Research. 29 : 54-65.

Talliaferro, N.L. 1933. The Relation of Volcanism to Diatomaceous and Associated Siliceous Sediments Geological Science. University California Publish. 23: 1-55.

- Tien, C. 1994. Adsorption calculation and Modeling. Boston : Butterworth Huinemann.
- White, D.A. and Asfar-Siddique, A.1997. Removal of manganese and iron from drinking water using hydrous manganese dioxide. Solvent extraction and ion exchange. 15(6) : 1133-1145.
- William, R.K. , Jeffrey, R.H., and Carolyn, P.T. 1988. Soluble Manganese Removal on Oxide-coated Filter Media. Journal AWWA : 65-70.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

1. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด ระหว่างดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์

ตารางที่ ก-1.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักอาร์เซนิกระหว่างดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์

Concentration	Initial concentration (ppm)	Final concentration (ppm)		As adsorption (ppm)		% adsorption	
		diatomite	Mn-diatomite	diatomite	Mn-diatomite	diatomite	Mn-diatomite
40	42.60	41.37	30.49	1.23	12.11	2.88	28.43
50	52.47	51.57	38.86	0.90	13.61	1.71	25.95
60	62.57	61.98	49.63	0.59	12.94	0.95	20.68
70	73.10	72.81	58.10	0.29	15.00	0.40	20.52

ตารางที่ ก-1.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมระหว่างดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์

Concentration	Initial concentration (ppm)	Final concentration (ppm)		Cd adsorption (ppm)		% adsorption	
		diatomite	Mn-diatomite	diatomite	Mn-diatomite	diatomite	Mn-diatomite
40	39.50	31.47	16.10	8.03	23.40	20.34	59.24
50	48.70	40.03	28.97	8.67	19.73	17.80	40.52
60	59.20	48.93	36.43	10.27	22.77	17.34	38.46
70	67.90	57.73	47.90	10.17	20.00	14.97	29.46

ตารางที่ ก-1.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักตะกั่วระหว่างดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์

Concentration	Initial concentration (ppm)	Final concentration (ppm)		Pb adsorption (ppm)		% adsorption	
		diatomite	*Mn-diatomite	diatomite	Mn-diatomite	diatomite	Mn-diatomite
40	39.13	0.16	≤ 0.1	38.97	≥ 39.03	99.58	≥ 99.99
50	48.05	0.20	≤ 0.1	47.85	≥ 47.95	99.58	≥ 99.99
60	57.87	0.25	≤ 0.1	57.62	≥ 57.77	99.56	≥ 99.99
70	67.81	0.33	≤ 0.1	67.49	≥ 67.71	99.52	≥ 99.99

\* ต่ำกว่า detection limit ของตะกั่ว (เท่ากับ 0.1 mg/l)

## 2. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการใช้ดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ดูดซับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด

ตารางที่ ก-2.1 ประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายโลหะหนักอาร์เซนิกด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

Concentration	Initial concentration (ppm)	Final concentration (ppm)	As adsorption (ppm)	% adsorption
40	42.60	30.49	12.11	28.43
50	52.47	38.86	13.61	25.95
60	62.57	49.63	12.94	20.68
70	73.10	58.10	15.00	20.52

ตารางที่ ก-2.2 ประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายโลหะหนักแคดเมียมด้วยดินเบาเคลือบ  
แมงกานีสออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

Concentration	Initial concentration (ppm)	Final concentration (ppm)	Cd adsorption (ppm)	% adsorption
40	39.50	16.10	23.40	59.24
50	48.70	28.97	19.73	40.52
60	59.20	36.43	22.77	38.46
70	67.90	47.90	20.00	29.46

ตารางที่ ก-2.3 ประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายโลหะหนักตะกั่วด้วยดินเบาเคลือบ  
แมงกานีสออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

Concentration	Initial concentration (ppm)	*Final concentration (ppm)	Pb adsorption (ppm)	% adsorption
40	39.13	≤ 0.1	≥ 39.03	≥ 99.99
50	48.05	≤ 0.1	≥ 47.95	≥ 99.99
60	57.87	≤ 0.1	≥ 57.77	≥ 99.99
70	67.81	≤ 0.1	≥ 67.71	≥ 99.99

\* ต่ำกว่า detection limit ของตะกั่ว (เท่ากับ 0.1 mg/l)

ตารางที่ ก-2.4 ประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายโลหะหนักอาร์เซนิกด้วยดินเบาเคลือบ  
แมงกานีสออกไซด์ที่พีเอชต่างๆ

pH	Initial concentration (ppm)	Final concentration (ppm)	As adsorption (ppm)	% adsorption
3	43.81	34.43	9.38	21.40
4	43.74	33.05	10.69	24.44
5	38.40	28.83	9.58	24.93
6	38.06	29.28	8.78	23.06
7	43.86	32.35	11.52	26.25
8	43.73	32.53	11.20	25.61
9	42.72	33.22	9.50	22.25
10	42.38	32.58	9.81	23.14

ตารางที่ ก-2.5 ประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายโลหะหนักแคดเมียมด้วยดินเบาเคลือบ  
แมงกานีสออกไซด์ที่พีเอชต่างๆ

pH	Initial concentration (ppm)	Final concentration (ppm)	Cd adsorption (ppm)	% adsorption
3	40.40	14.63	25.77	63.78
4	40.10	9.17	30.93	77.14
5	41.20	5.97	35.23	85.52
6	40.00	6.39	33.61	84.03
7	43.00	7.00	36.00	83.72
8	38.00	5.69	32.31	85.03

ตารางที่ ก-2.6 ประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายโลหะหนักตะกั่วด้วยดินเบาเคลือบ  
แมงกานีสออกไซด์ที่พีเอชต่างๆ

pH	Initial concentration (ppm)	*Final concentration (ppm)	Pb adsorption (ppm)	% adsorption
2	48.30	0.157	48.1423	99.67
3	48.50	0.1013	48.3987	99.79
4	48.50	≤ 0.1	≥ 48.4	> 99.99
5	42.50	≤ 0.1	≥ 42.4	> 99.99
6	37.20	≤ 0.1	≥ 37.1	> 99.99

\* ต่ำกว่า detection limit ของตะกั่ว (เท่ากับ 0.1 mg/l)

ตารางที่ ก-2.7 ประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายโลหะหนักอาร์เซนิกด้วยดินเบาเคลือบ  
แมงกานีสออกไซด์ที่เวลาสัมผัสต่างๆ

Time (hour)	Initial concentration (ppm)	Final concentration (ppm)	As adsorption (ppm)	% adsorption
0.5	43.86	32.58	11.28	25.73
1	43.86	32.35	11.52	26.25
2	43.86	31.78	12.08	27.53
4	43.86	30.37	13.49	30.76
8	43.86	29.74	14.12	32.19
12	43.86	28.43	15.44	35.19
24	43.86	28.32	15.55	35.44



ตารางที่ ก-2.8 ประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายโลหะหนักแคดเมียมด้วยดินเบาเคลือบ  
แมงกานีสออกไซด์ที่เวลาสัมผัสต่างๆ

Time (hour)	Initial concentration (ppm)	Final concentration (ppm)	Cd adsorption (ppm)	% adsorption
0.5	41.20	6.23	34.97	84.87
1	41.20	5.97	35.23	85.52
2	41.20	5.57	35.63	86.48
4	41.20	4.65	36.55	88.71
8	41.20	3.43	37.77	91.67
12	41.20	3.13	38.07	92.39
24	41.20	2.07	39.13	94.98

ตารางที่ ก-2.9 ประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายโลหะหนักตะกั่วด้วยดินเบาเคลือบ  
แมงกานีสออกไซด์ที่เวลาสัมผัสต่างๆ

Time (minute)	Initial concentration (ppm)	*Final concentration (ppm)	Pb adsorption (ppm)	% adsorption
5	48.10	0.206	47.89	99.57
10	48.10	0.1927	47.91	99.60
20	48.10	0.1590	47.94	99.67
30	48.10	0.1053	47.99	99.78
45	48.10	≤ 0.1000	≥ 48.00	> 99.99

\* ต่ำกว่า detection limit ของตะกั่ว (เท่ากับ 0.1 mg/l)

ตารางที่ ก-2.10 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักอาร์เซนิกในน้ำเสียจากโรงงานผลิต  
แบตเตอรี่ด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์

Time (hour)	Initial concentration (ppm)	*Final concentration (ppm)	As adsorption (ppm)	% adsorption
3	0.42	≤ 0.05	≥ 0.37	> 99.99
6	0.42	≤ 0.05	≥ 0.37	>99.99
12	0.42	≤ 0.05	≥ 0.37	> 99.99

\* ต่ำกว่า detection limit ของอาร์เซนิก (เท่ากับ 0.05 mg/l)

ตารางที่ ก-2.11 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานผลิต  
แบตเตอรี่ด้วยดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์

Time (mimute)	Initial concentration (ppm)	*Final concentration (ppm)	Pb adsorption (ppm)	% adsorption
30	5.89	≤ 0.10	≥ 5.79	> 99.99
45	5.89	≤ 0.10	≥ 5.79	> 99.99
60	5.89	≤ 0.10	≥ 5.79	> 99.99

\* ต่ำกว่า detection limit ของตะกั่ว (เท่ากับ 0.1 mg/l)

## ภาคผนวก ข

ข-1 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความเข้มข้นสารละลายอาร์เซนิก

### Oneway

#### ANOVA

%Adsorption\_As

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	139.510	3	46.503	10.103	.004
Within Groups	36.823	8	4.603		
Total	176.334	11			

#### Multiple Comparisons

Dependent Variable: %Adsorption\_As

Scheffe

(I) Concentration	(J) Concentration	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
40	50	2.4833	1.7517	.594	-3.6349	8.6016
	60	7.7467*	1.7517	.015	1.6284	13.8649
	70	7.9133*	1.7517	.014	1.7951	14.0316
50	40	-2.4833	1.7517	.594	-8.6016	3.6349
	60	5.2633	1.7517	.095	-.8549	11.3816
	70	5.4300	1.7517	.084	-.6882	11.5482
60	40	-7.7467*	1.7517	.015	-13.8649	-1.6284
	50	-5.2633	1.7517	.095	-11.3816	.8549
	70	.1667	1.7517	1.000	-5.9516	6.2849
70	40	-7.9133*	1.7517	.014	-14.0316	-1.7951
	50	-5.4300	1.7517	.084	-11.5482	.6882
	60	-.1667	1.7517	1.000	-6.2849	5.9516

\*. The mean difference is significant at the .05 level.

ข-2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความเข้มข้นสารละลายแคดเมียม

**Oneway**

**ANOVA**

%Adsorption\_Cd

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1407.787	3	469.262	91.768	.000
Within Groups	40.908	8	5.114		
Total	1448.696	11			

**Multiple Comparisons**

Dependent Variable: %Adsorption\_Cd

Scheffe

(I) Concentration	(J) Concentration	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
40	50	18.7167*	1.8464	.000	12.2680	25.1653
	60	20.7833*	1.8464	.000	14.3347	27.2320
	70	29.7833*	1.8464	.000	23.3347	36.2320
50	40	-18.7167*	1.8464	.000	-25.1653	-12.2680
	60	2.0667	1.8464	.745	-4.3820	8.5153
	70	11.0667*	1.8464	.003	4.6180	17.5153
60	40	-20.7833*	1.8464	.000	-27.2320	-14.3347
	50	-2.0667	1.8464	.745	-8.5153	4.3820
	70	9.0000*	1.8464	.009	2.5513	15.4487
70	40	-29.7833*	1.8464	.000	-36.2320	-23.3347
	50	-11.0667*	1.8464	.003	-17.5153	-4.6180
	60	-9.0000*	1.8464	.009	-15.4487	-2.5513

\*. The mean difference is significant at the .05 level.

ข-3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติค่าพีเอชสารละลายอาร์เซนิก

**ANOVA**

%Adsorption\_As

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	60.817	7	8.688	4.889	.004
Within Groups	28.435	16	1.777		
Total	89.252	23			



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## Multiple Comparisons

Dependent Variable: %Adsorption\_As  
Scheffe

(I) pH	(J) pH	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
3	4	-3.0733	1.0885	.388	-7.7677	1.6211
	5	-3.5733	1.0885	.224	-8.2677	1.1211
	6	-1.6933	1.0885	.920	-6.3877	3.0011
	7	-4.8867*	1.0885	.038	-9.5811	-.1923
	8	-4.2433	1.0885	.094	-8.9377	.4511
	9	-.8800	1.0885	.998	-5.5744	3.8144
	10	-1.7700	1.0885	.902	-6.4644	2.9244
4	3	3.0733	1.0885	.388	-1.6211	7.7677
	5	-.5000	1.0885	1.000	-5.1944	4.1944
	6	1.3800	1.0885	.972	-3.3144	6.0744
	7	-1.8133	1.0885	.891	-6.5077	2.8811
	8	-1.1700	1.0885	.989	-5.8644	3.5244
	9	2.1933	1.0885	.762	-2.5011	6.8877
	10	1.3033	1.0885	.980	-3.3911	5.9977
5	3	3.5733	1.0885	.224	-1.1211	8.2677
	4	.5000	1.0885	1.000	-4.1944	5.1944
	6	1.8800	1.0885	.872	-2.8144	6.5744
	7	-1.3133	1.0885	.979	-6.0077	3.3811
	8	-.6700	1.0885	1.000	-5.3644	4.0244
	9	2.6933	1.0885	.547	-2.0011	7.3877
	10	1.8033	1.0885	.893	-2.8911	6.4977
6	3	1.6933	1.0885	.920	-3.0011	6.3877
	4	-1.3800	1.0885	.972	-6.0744	3.3144
	5	-1.8800	1.0885	.872	-6.5744	2.8144
	7	-3.1933	1.0885	.343	-7.8877	1.5011
	8	-2.5500	1.0885	.610	-7.2444	2.1444
	9	.8133	1.0885	.999	-3.8811	5.5077
	10	-7.667E-02	1.0885	1.000	-4.7711	4.6177
7	3	4.8867*	1.0885	.038	.1923	9.5811
	4	1.8133	1.0885	.891	-2.8811	6.5077
	5	1.3133	1.0885	.979	-3.3811	6.0077
	6	3.1933	1.0885	.343	-1.5011	7.8877
	8	.6433	1.0885	1.000	-4.0511	5.3377
	9	4.0067	1.0885	.130	-.6877	8.7011
	10	3.1167	1.0885	.371	-1.5777	7.8111
8	3	4.2433	1.0885	.094	-.4511	8.9377
	4	1.1700	1.0885	.989	-3.5244	5.8644
	5	.6700	1.0885	1.000	-4.0244	5.3644
	6	2.5500	1.0885	.610	-2.1444	7.2444
	7	-.6433	1.0885	1.000	-5.3377	4.0511
	9	3.3633	1.0885	.285	-1.3311	8.0577
	10	2.4733	1.0885	.644	-2.2211	7.1677
9	3	.8800	1.0885	.998	-3.8144	5.5744
	4	-2.1933	1.0885	.762	-6.8877	2.5011
	5	-2.6933	1.0885	.547	-7.3877	2.0011
	6	-.8133	1.0885	.999	-5.5077	3.8811
	7	-4.0067	1.0885	.130	-8.7011	.6877
	8	-3.3633	1.0885	.285	-8.0577	1.3311
	10	-.8900	1.0885	.998	-5.5844	3.8044
10	3	1.7700	1.0885	.902	-2.9244	6.4644
	4	-1.3033	1.0885	.980	-5.9977	3.3911
	5	-1.8033	1.0885	.893	-6.4977	2.8911
	6	7.667E-02	1.0885	1.000	-4.6177	4.7711
	7	-3.1167	1.0885	.371	-7.8111	1.5777
	8	-2.4733	1.0885	.644	-7.1677	2.2211
	9	.8900	1.0885	.998	-3.8044	5.5844

\*. The mean difference is significant at the .05 level.

ข-4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติค่าพีเอชสารละลายแคดเมียม

ANOVA

%Adsorption\_Cd

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1070.910	5	214.182	781.148	.000
Within Groups	3.290	12	.274		
Total	1074.201	17			

Post Hoc Tests

Multiple Comparisons

Dependent Variable: %Adsorption\_Cd

Scheffe

(I) pH	(J) pH	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
3	4	-13.3633*	.4275	.000	-15.0482	-11.6785
	5	-21.7367*	.4275	.000	-23.4215	-20.0518
	6	-20.2500*	.4275	.000	-21.9348	-18.5652
	7	-19.9367*	.4275	.000	-21.6215	-18.2518
	8	-21.2533*	.4275	.000	-22.9382	-19.5685
4	3	13.3633*	.4275	.000	11.6785	15.0482
	5	-8.3733*	.4275	.000	-10.0582	-6.6885
	6	-6.8867*	.4275	.000	-8.5715	-5.2018
	7	-6.5733*	.4275	.000	-8.2582	-4.8885
	8	-7.8900*	.4275	.000	-9.5748	-6.2052
5	3	21.7367*	.4275	.000	20.0518	23.4215
	4	8.3733*	.4275	.000	6.6885	10.0582
	6	1.4867	.4275	.098	-.1982	3.1715
	7	1.8000*	.4275	.034	.1152	3.4848
	8	.4833	.4275	.929	-1.2015	2.1682
6	3	20.2500*	.4275	.000	18.5652	21.9348
	4	6.8867*	.4275	.000	5.2018	8.5715
	5	-1.4867	.4275	.098	-3.1715	.1982
	7	.3133	.4275	.989	-1.3715	1.9982
	8	-1.0033	.4275	.409	-2.6882	.6815
7	3	19.9367*	.4275	.000	18.2518	21.6215
	4	6.5733*	.4275	.000	4.8885	8.2582
	5	-1.8000*	.4275	.034	-3.4848	-.1152
	6	-.3133	.4275	.989	-1.9982	1.3715
	8	-1.3167	.4275	.169	-3.0015	.3682
8	3	21.2533*	.4275	.000	19.5685	22.9382
	4	7.8900*	.4275	.000	6.2052	9.5748
	5	-.4833	.4275	.929	-2.1682	1.2015
	6	1.0033	.4275	.409	-.6815	2.6882
	7	1.3167	.4275	.169	-.3682	3.0015

\*. The mean difference is significant at the .05 level.

ข-5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติค่าเวลาสัมพัทธ์สารละลายอาร์เซนิก

**ANOVA**

%Adsorption\_As

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	296.891	6	49.482	147.403	.000
Within Groups	4.700	14	.336		
Total	301.591	20			



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



### Multiple Comparisons

Dependent Variable: %Adsorption\_As  
Scheffe

(I) Time	(J) Time	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
.5	1.0	-.5267	.4731	.969	-2.4821	1.4288
	2.0	-1.8067	.4731	.080	-3.7621	.1488
	4.0	-5.0367*	.4731	.000	-6.9921	-3.0812
	8.0	-6.4567*	.4731	.000	-8.4121	-4.5012
	12.0	-9.4667*	.4731	.000	-11.4221	-7.5112
	24.0	-9.7167*	.4731	.000	-11.6721	-7.7612
1.0	.5	.5267	.4731	.969	-1.4288	2.4821
	2.0	-1.2800	.4731	.353	-3.2355	.6755
	4.0	-4.5100*	.4731	.000	-6.4655	-2.5545
	8.0	-5.9300*	.4731	.000	-7.8855	-3.9745
	12.0	-8.9400*	.4731	.000	-10.8955	-6.9845
	24.0	-9.1900*	.4731	.000	-11.1455	-7.2345
2.0	.5	1.8067	.4731	.080	-.1488	3.7621
	1.0	1.2800	.4731	.353	-.6755	3.2355
	4.0	-3.2300*	.4731	.001	-5.1855	-1.2745
	8.0	-4.6500*	.4731	.000	-6.6055	-2.6945
	12.0	-7.6600*	.4731	.000	-9.6155	-5.7045
	24.0	-7.9100*	.4731	.000	-9.8655	-5.9545
4.0	.5	5.0367*	.4731	.000	3.0812	6.9921
	1.0	4.5100*	.4731	.000	2.5545	6.4655
	2.0	3.2300*	.4731	.001	1.2745	5.1855
	8.0	-1.4200	.4731	.248	-3.3755	.5355
	12.0	-4.4300*	.4731	.000	-6.3855	-2.4745
	24.0	-4.6800*	.4731	.000	-6.6355	-2.7245
8.0	.5	6.4567*	.4731	.000	4.5012	8.4121
	1.0	5.9300*	.4731	.000	3.9745	7.8855
	2.0	4.6500*	.4731	.000	2.6945	6.6055
	4.0	1.4200	.4731	.248	-.5355	3.3755
	12.0	-3.0100*	.4731	.002	-4.9655	-1.0545
	24.0	-3.2600*	.4731	.001	-5.2155	-1.3045
12.0	.5	9.4667*	.4731	.000	7.5112	11.4221
	1.0	8.9400*	.4731	.000	6.9845	10.8955
	2.0	7.6600*	.4731	.000	5.7045	9.6155
	4.0	4.4300*	.4731	.000	2.4745	6.3855
	8.0	3.0100*	.4731	.002	1.0545	4.9655
	24.0	-.2500	.4731	.999	-2.2055	1.7055
24.0	.5	9.7167*	.4731	.000	7.7612	11.6721
	1.0	9.1900*	.4731	.000	7.2345	11.1455
	2.0	7.9100*	.4731	.000	5.9545	9.8655
	4.0	4.6800*	.4731	.000	2.7245	6.6355
	8.0	3.2600*	.4731	.001	1.3045	5.2155
	12.0	.2500	.4731	.999	-1.7055	2.2055

\*. The mean difference is significant at the .05 level.

ข-6 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติค่าเวลาสัมพัทธ์สารละลายแคดเมียม

**ANOVA**

%Adsorption\_Cd

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	235.234	6	39.206	57.672	.000
Within Groups	9.517	14	.680		
Total	244.752	20			



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## Multiple Comparisons

Dependent Variable: %Adsorption\_Cd

Scheffe

(I) Time	(J) Time	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
.5	1.0	-1.4567	.6732	.599	-4.2394	1.3261
	2.0	-1.6100	.6732	.490	-4.3927	1.1727
	4.0	-3.8433*	.6732	.004	-6.6261	-1.0606
	8.0	-4.8133*	.6732	.001	-7.5961	-2.0306
	12.0	-7.5267*	.6732	.000	-10.3094	-4.7439
	24.0	-10.1133*	.6732	.000	-12.8961	-7.3306
1.0	.5	1.4567	.6732	.599	-1.3261	4.2394
	2.0	-.1533	.6732	1.000	-2.9361	2.6294
	4.0	-2.3867	.6732	.119	-5.1694	.3961
	8.0	-3.3567*	.6732	.013	-6.1394	-.5739
	12.0	-6.0700*	.6732	.000	-8.8527	-3.2873
	24.0	-8.6567*	.6732	.000	-11.4394	-5.8739
2.0	.5	1.6100	.6732	.490	-1.1727	4.3927
	1.0	.1533	.6732	1.000	-2.6294	2.9361
	4.0	-2.2333	.6732	.164	-5.0161	.5494
	8.0	-3.2033*	.6732	.019	-5.9861	-.4206
	12.0	-5.9167*	.6732	.000	-8.6994	-3.1339
	24.0	-8.5033*	.6732	.000	-11.2861	-5.7206
4.0	.5	3.8433*	.6732	.004	1.0606	6.6261
	1.0	2.3867	.6732	.119	-.3961	5.1694
	2.0	2.2333	.6732	.164	-.5494	5.0161
	8.0	-.9700	.6732	.901	-3.7527	1.8127
	12.0	-3.6833*	.6732	.006	-6.4661	-.9006
	24.0	-6.2700*	.6732	.000	-9.0527	-3.4873
8.0	.5	4.8133*	.6732	.001	2.0306	7.5961
	1.0	3.3567*	.6732	.013	.5739	6.1394
	2.0	3.2033*	.6732	.019	.4206	5.9861
	4.0	.9700	.6732	.901	-1.8127	3.7527
	12.0	-2.7133	.6732	.058	-5.4961	6.941E-02
	24.0	-5.3000*	.6732	.000	-8.0827	-2.5173
12.0	.5	7.5267*	.6732	.000	4.7439	10.3094
	1.0	6.0700*	.6732	.000	3.2873	8.8527
	2.0	5.9167*	.6732	.000	3.1339	8.6994
	4.0	3.6833*	.6732	.006	.9006	6.4661
	8.0	2.7133	.6732	.058	-6.94E-02	5.4961
	24.0	-2.5867	.6732	.077	-5.3694	.1961
24.0	.5	10.1133*	.6732	.000	7.3306	12.8961
	1.0	8.6567*	.6732	.000	5.8739	11.4394
	2.0	8.5033*	.6732	.000	5.7206	11.2861
	4.0	6.2700*	.6732	.000	3.4873	9.0527
	8.0	5.3000*	.6732	.000	2.5173	8.0827
	12.0	2.5867	.6732	.077	-.1961	5.3694

\*. The mean difference is significant at the .05 level.

ข-7 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติค่าเวลาสัมพัทธ์สารละลายตะกั่ว

**ANOVA**

%Adsorption\_Pb

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	8.083E-02	3	2.694E-02	27.398	.000
Within Groups	7.867E-03	8	9.833E-04		
Total	8.869E-02	11			

**Multiple Comparisons**

Dependent Variable: %Adsorption\_Pb

Scheffe

(I) Time	(J) Time	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
5	10	-3.000E-02	2.560E-02	.719	-.1194	5.942E-02
	20	-.1000*	2.560E-02	.029	-.1894	-1.06E-02
	30	-.2133*	2.560E-02	.000	-.3028	-.1239
10	5	3.000E-02	2.560E-02	.719	-5.94E-02	.1194
	20	-7.000E-02	2.560E-02	.134	-.1594	1.942E-02
	30	-.1833*	2.560E-02	.001	-.2728	-9.39E-02
20	5	.1000*	2.560E-02	.029	1.058E-02	.1894
	10	7.000E-02	2.560E-02	.134	-1.94E-02	.1594
	30	-.1133*	2.560E-02	.015	-.2028	-2.39E-02
30	5	.2133*	2.560E-02	.000	.1239	.3028
	10	.1833*	2.560E-02	.001	9.391E-02	.2728
	20	.1133*	2.560E-02	.015	2.391E-02	.2028

\*. The mean difference is significant at the .05 level.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 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 "ห้ามระบายน้ำทิ้งออกจากโรงงานเว้นแต่ได้ทำการอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างจนน้ำทิ้งนั้นมีลักษณะเป็นไปตามที่รัฐมนตรีกำหนด โดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา แต่ทั้งนี้ต้องไม่ใช่วิธีทำให้เจือจาง (Dilution)" รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม จึงออกประกาศกำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน ดังนี้

ข้อ 1 คำจำกัดความน้ำทิ้ง หมายถึง น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบกิจการโรงงานอุตสาหกรรมที่จะระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อม และให้หมายความรวมถึงน้ำเสียจากการใช้น้ำของโรงงาน รวมทั้งจากกิจกรรมอื่นใน

ข้อ 2 น้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานต้องมีคุณสมบัติดังนี้

(1) ความเป็นกรดและด่าง (pH) มีค่าไม่น้อยกว่า 5.5 และไม่มากกว่า 9.0

(2) ทีดีเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids) ต้องมีค่าดังนี้ 2.1 ค่าทีดีเอส ไม่มากกว่า 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร 2.2 น้ำทิ้งซึ่งระบายออกจากโรงงานลงสู่แหล่งน้ำที่มีค่าความเค็ม (Salinity) มากกว่า 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตรค่า ทีดีเอส ในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่า ทีดีเอส ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำได้ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตรต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม

(3) สารแขวนลอย (Suspended Solids) ไม่มากกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนด 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 (Sulphide) คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H<sub>2</sub>S) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- (6) ไฮยาไนต์ คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนไฮยาไนต์ (HCN) ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
- (7) ฟอรัลดีไฮด์ (Formaldehyde) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- (8) สารประกอบฟีนอล (Phenols Compound) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- (9) คลอรีนอิสระ
- (10) ยาฆ่าแมลง (Pesticide) ไม่ต้องมี
- (11) อุณหภูมิ ไม่มากกว่า 40 องศาเซลเซียส
- (12) สี ต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
- (13) กลิ่น ต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
- (14) น้ำมันและไขมัน (Oil & Grease) ไม่มากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 15 มิลลิกรัมต่อลิตร
- (15) ค่า บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสเวลา 5 วัน ไม่มากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดแต่ต้องไม่มากกว่า 60 มิลลิกรัมต่อลิตร

(16) ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total 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 แต่ต้องไม่มากกว่า 400 มิลลิกรัมต่อลิตร

ข้อ 3 การตรวจสอบค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมตามข้อ 2 ให้ดำเนินการดังต่อไปนี้

(1) การตรวจสอบค่าความเป็นกรดและด่างของน้ำทิ้ง ให้ใช้เครื่องวัดความเป็นกรดและด่างของน้ำ (pH Meter)

(2) การตรวจสอบค่า ทีดีเอส ให้ใช้วิธีการระเหยแห้ง ระหว่างอุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส ถึงอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ในเวลา 1 ชั่วโมง

(3) การตรวจสอบค่าสารแขวนลอย ให้ใช้วิธีการกรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fibre Filter Disc)

(4) การตรวจสอบค่าโลหะหนัก ให้ใช้วิธีการดังนี้

4.1 การตรวจสอบค่าสังกะสี โครเมียม ทองแดง แคดเมียม แบเรียม ตะกั่ว นิกเกิล และแมงกานีส ให้ใช้วิธีอะตอมมิก แอบซอร์ปชัน สเปกโตรโฟโตเมตริ (Atomic Absorption Spectrophotometry) ชนิดไดเร็กต์ แอสไพเรชัน (Direct Aspiration) หรือวิธีพลาสมา อิมิสชัน สเปกโตรสโคปี (Plasma Emission Spectroscopy) ชนิดอินดักทีฟลี คัพเพิลด์ พลาสมา (Inductively Coupled Plasma : ICP)

4.2 การตรวจสอบค่าอาร์เซนิก และเซเลเนียม ให้ใช้วิธีอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตเมตริ (Atomic Absorption Spectrophotometry) ชนิดไฮไดรด์

เจนเนอเรชัน (Hydride Generation) หรือวิธีพลาสมา อิมิสชัน สเปกโตรสโคปี (Plasma Emission Spectroscopy) ชนิดอินดักทีฟลี คัพเพิลด์ พลาสมา (Inductively Coupled Plasma : ICP)

4.3 การตรวจสอบค่าปรอท ให้ใช้วิธีอะตอมมิกแอบซอร์ปชัน โคลด์ เวปอร์ เทคนิค (Atomic Absorption Cold Vapour Technique)

(5) การตรวจสอบค่าซัลไฟด์ ให้ใช้วิธีการไทเตรท (Titrate)

(6) การตรวจสอบค่าไซยาไนด์ ให้ใช้วิธีกลั่นและตามด้วยวิธีไพริดีน บาร์บิบูริกแอซิด (Pyridine-Barbituric Acid)

(7) การตรวจสอบค่าฟอรัมาลดีไฮด์ ให้ใช้วิธีเทียบสี (Spectrophotometry)

- (8) การตรวจสอบค่าสารประกอบฟีนอล ให้ใช้วิธีกลั่น และตามด้วยวิธี 4-อะมิโนแอนติไพรีน (Distillation, 4-Aminoantipyrine)
- (9) การตรวจสอบค่าคลอรีนอิสระ ให้ใช้วิธีไอโอดิเมตริก (Iodometric Method)
- (10) การตรวจสอบค่าสารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ ให้ใช้วิธีก๊าซโครมาโตกราฟี (Gas-Chromatography)
- (11) การตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำ ให้ใช้เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดขณะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ
- (12) การตรวจสอบค่าน้ำมันและไขมัน ให้ใช้วิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย แล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน
- (13) การตรวจสอบค่าบีโอดี ให้ใช้วิธีอะไซด์ โมดิฟิเคชัน (Azide Modification) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน ติดต่อกันหรือวิธีการอื่นที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมให้ความเห็นชอบ
- (14) การตรวจสอบค่าทีเคเอ็น ให้ใช้วิธีเจลดาล์ (Kjeldahl)
- (15) การตรวจสอบค่าซีโอดี ให้ใช้วิธีย่อยสลาย โดยโปตัสเซียม ไดโครเมต (Potassium Dichromate Digestion)
- ข้อ 4 การตรวจสอบค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ตามข้อ 3 จะต้องเป็นไปตามคู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย ของสมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย หรือ Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater ซึ่ง American Public Health Association, Work Association และ Water Environment Federation ของสหรัฐอเมริกา ร่วมกันกำหนดไว้ด้วย American Water

ประกาศ ณ วันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2539

ไชยวัฒน์ สิ้นสูงค์  
(นายไชยวัฒน์ สิ้นสูงค์)

รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม

(นายเสถียร วีระวงศ์)

เจ้าหน้าที่บริหารงานธุรการ 5

ประกาศราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่ม 113 ตอนที่ 52 ง วันที่ 27 มิถุนายน 2539



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพรเพ็ญ มีทองมูล เกิดเมื่อวันที่ 25 พฤศจิกายน 2520 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในปีพ.ศ. 2542 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2543 สำเร็จการศึกษาในภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2545



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย