

ผลของฟลูออไรด์ในน้ำเสียต่อการดูดติดผิวของตะกั่วบนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์



นายชาญวิทย์ สุภรานนท์รัตน์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

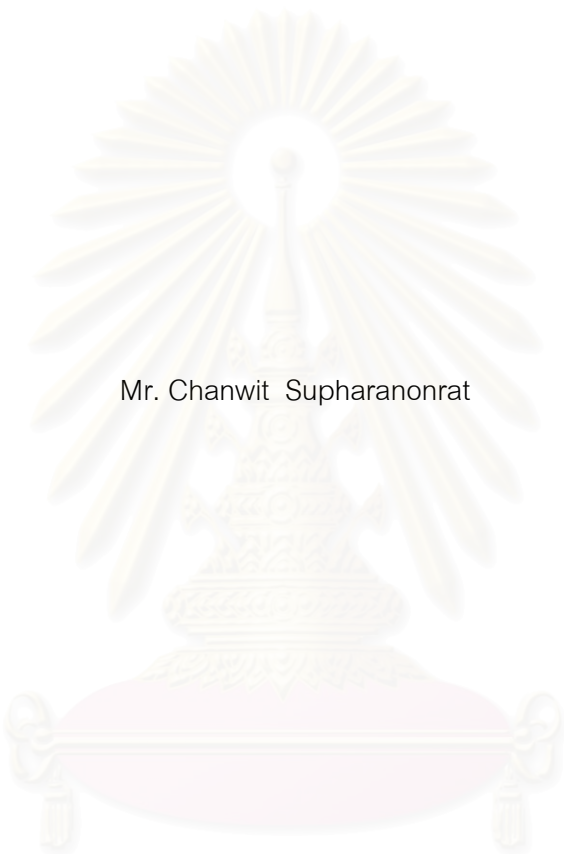
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-13-0469-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF FLUORIDE ON LEAD ADSORPTION BY IRON-OXIDE-COATED SAND



Mr. Chanwit Supharanonrat

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-13-0469-2

ชาญวิทย์ ศุภรานนท์ : ผลของฟลูออไรด์ในน้ำเสียต่อการดูดติดผิวของตะกั่วบนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์. (EFFECTS OF FLUORIDE ON LEAD ADSORPTION BY IRON-OXIDE-COATED SAND) อ. ที่ปรึกษา : อ.ดร. สุธา ขาวเขียว, 95 หน้า. ISBN 974-13-0469-2

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงผลของฟลูออไรด์ในน้ำเสียต่อการดูดติดผิวของตะกั่วบนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ ซึ่งจะทำให้การแปรค่าความเข้มข้นของฟลูออไรด์ 3 ค่า ได้แก่ 0.5, 1.0 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร แปรค่าพีเอชตั้งแต่ 4 ถึง 10 และแปรค่าความเข้มข้นไอออน 3 ค่า ได้แก่ 0, 0.05 และ 0.10 โมลาร์

ผลการวิจัยพบว่า การดูดติดผิวของตะกั่วและฟลูออไรด์บนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์จะเข้าสู่สภาวะสมดุลภายในเวลาไม่เกิน 24 ชั่วโมง โดยการดูดติดผิวของตะกั่วจะน้อยลงหากมีตะกั่วในช่วงเริ่มต้นมากขึ้น ส่วนการดูดติดผิวของฟลูออไรด์จะเพิ่มขึ้นหากเพิ่มฟลูออไรด์ในช่วงเริ่มต้นมากขึ้น พีเอชเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดติดผิวทั้งสองชนิด โดยการดูดติดผิวของตะกั่วจะเกิดขึ้นได้ดีในช่วงพีเอช 5 ถึง 8 โดยเฉพาะจะดีที่สุดที่พีเอช 6 ส่วนการดูดติดผิวของฟลูออไรด์นั้นจะเกิดได้มากในช่วงพีเอชต่ำ คือในช่วง 4 ถึง 5 และจะถูกดูดติดผิวได้ลดลงเมื่อเพิ่มพีเอชสูงขึ้น ความเข้มข้นไอออนไม่มีผลต่อการดูดติดผิวของตะกั่วบนทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ แสดงว่า การดูดติดผิวของตะกั่วจะเป็นการดูดติดผิวทางเคมี (inner-sphere surface complex) ส่วนเมื่อเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ผสมกันระหว่างตะกั่วและฟลูออไรด์นั้น ไม่มีความแตกต่างกับการดูดติดผิวของตะกั่วและฟลูออไรด์ในช่วงที่ไม่ได้ผสมกัน แสดงว่า การดูดติดผิวของฟลูออไรด์จะเป็นการดูดติดผิวทางกายภาพ (outer-sphere surface complex) ส่วนสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วและฟลูออไรด์ คือ อัตราส่วนจำนวนโมลของตะกั่วต่อฟลูออไรด์ เท่ากับ 1 ต่อ 10 ที่พีเอช 6

เมื่อทำการทดลองกับน้ำเสียที่ได้จากการใช้งานจริง พบว่า จะกำจัดได้ดีที่พีเอชเท่ากับ 8 ซึ่งอาจเกิดจากการมีสารเจือปนในน้ำเสียอื่น ๆ ทำให้สภาวะการกำจัดตะกั่วบนทรายเคลือบเหล็กออกไซด์แตกต่างออกไป

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2543

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4070255321 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD: LEAD/ FLUORIDE/ IRON-OXIDE-COATED SAND/ ADSORPTION

CHANWIT SUPHARANONRAT : EFFECTS OF FLUORIDE ON LEAD ADSORPTION BY IRON-OXIDE COATED SAND. THESIS ADVISOR : DR. SUTHA KHAODHIAR, 95 pp.

ISBN 974-13-0469-2

The objective of this research is to investigate effects of Fluoride on Lead adsorption by Iron-oxide-coated sand. (IOCS) Fluoride concentration varies at 0.5, 1.0 and 10 ppm from pH 4 to 10. At the same pH range, ionic strength varies at 0, 0.05 and 0.10 M.

Lead and Fluoride adsorption by IOCS could saturate within 24 hours. Lead adsorption would decline if the initial Lead concentration increased. In contrast, Fluoride adsorption would raise if the initial Fluoride concentration increased. Both Lead and Fluoride adsorption was the function of pH. Lead adsorption was good from pH 5 to 8 and pH 6 was the optimum. Fluoride adsorption was good at the low pH from 4 to 5 and it was worse for higher pH. Ionic strength was not affected to Lead adsorption so Lead adsorption was the inner-sphere surface complex. After the experiment, adsorption of the Lead and Fluoride mixture was similar to Lead or Fluoride adsorption by IOCS. Therefore, Fluoride adsorption would be the outer-sphere surface complex. And the optimal condition for Lead and Fluoride removal was at the 1/10 of Lead/Fluoride portion by mole and pH 6.

When IOCS was applied for Lead adsorption from the industrial wastewater. The optimal condition was different from the laboratory. The optimal pH was at 8 that was higher than the experimental pH because Lead adsorption may be affected by the contamination of these industrial wastewater.

Department	Environmental Engineering	Student's signature.....
Field of study	Environmental Engineering	Advisor's signature.....
Academic year	2000	Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ อาจารย์ ดร.สุธา ชาวเธียร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้แนะนำแนวทางและข้อคิดเห็นต่าง ๆ แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง และเนื่องจากทุนการวิจัยครั้งนี้ได้รับจากทุนอุดหนุนงานวิจัยของมูลนิธิ ชิน โสภณพานิช และทุนอุดหนุนงานวิจัยของ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณผู้ให้ทุนอุดหนุนงานวิจัยดังกล่าวมา ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ-คุณแม่ ผู้มีพระคุณสูงสุดต่อผู้วิจัยซึ่งให้การสนับสนุนด้านการเงินและเป็นกำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

ชาญวิทย์ ศุภรานนท์รัตน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ฟลูออไรด์.....	4
2.1.1 สมบัติทั่วไปของฟลูออไรด์.....	4
2.1.2 ฟลูออไรด์ในน้ำเสีย.....	4
2.1.3 เทคนิคกระบวนการดูดติดผิวที่ใช้กำจัดฟลูออไรด์.....	5
2.2 ตะกั่ว.....	9
2.2.1 สมบัติทั่วไปของตะกั่ว.....	9
2.2.2 ตะกั่วในน้ำเสีย.....	12
2.2.3 วิธีกำจัดตะกั่วในน้ำเสีย.....	15
2.3 ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของไอออน.....	20
2.4 กระบวนการดูดติดผิว (adsorption).....	25
2.4.1 กลไกการดูดติดผิวและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล.....	27
2.4.2 สมดุลการดูดติดผิว.....	29
2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว.....	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	42
2.5.1 ตัวกลางที่เป็นโลหะออกไซด์.....	42
2.5.2 การดูดติดผิวของผลสมระหว่างแคทไอออนและแอนไอออน.....	43
2.5.3 การดูดติดผิวโลหะหนัก.....	45
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	48
3.1 การเตรียมตัวกลาง.....	48
3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	50
3.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วและน้ำเสียสังเคราะห์ฟลูออไรด์.....	51
3.4 การดำเนินการทดลอง.....	53
3.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	56
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	58
4.1 ผลของการเคลือบทรายด้วยออกไซด์ของเหล็ก.....	58
4.2 ผลของการหาเวลาที่ใช้ที่สภาวะสมดุลของการดูดติดผิวของตะกั่วและฟลูออไรด์บนทรายเคลือบเหล็กออกไซด์.....	58
4.3 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่อการดูดติดผิวตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่โซเดียมไนเตรท 0.10 โมลาร์ ณ ค่าพีเอชต่าง ๆ	61
4.4 ผลของความเข้มข้นไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่อการดูดติดผิวตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ของการดูดติดผิวของตะกั่ว 10 พีพีเอ็ม ณ ค่าพีเอชต่าง ๆ	62
4.5 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟลูออไรด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่อการดูดติดผิวฟลูออไรด์จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่โซเดียมไนเตรท 0.10 โมลาร์ ณ ค่าพีเอชต่าง ๆ.....	63
4.6 ผลของความเข้มข้นไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่อการดูดติดผิวฟลูออไรด์จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ของการดูดติดผิวของฟลูออไรด์ 10 พีพีเอ็ม ณ ค่าพีเอชต่าง ๆ.....	64
4.7 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟลูออไรด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่อการดูดติดผิวตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่โซเดียมไนเตรท 0.10 โมลาร์ ณ ค่าพีเอชต่าง ๆ.....	66

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.8 การหาค่าสมมูลการดูดติดผิวของตะกั่วที่มีความเข้มข้น 5, 10 และ 20 พีพีเอ็ม ณ ค่าพีเอชต่าง ๆ ที่โซเดียมไนเตรท 0.1 โมลาร์.....	68
4.9 ผลการทดลองเปรียบเทียบกันระหว่างผลการทดลองจากน้ำเสียสังเคราะห์และ น้ำเสียจริง โดยการใช้ปริมาตรน้ำตัวอย่าง 50 มิลลิลิตร.....	69
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	71
รายการอ้างอิง.....	73
ภาคผนวก.....	77
ประวัติผู้เขียน.....	95



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ญ

บทที่		หน้า
2.1	ชนิดของตัวดูดติดผิวฟลูออไรด์ที่ใช้ในการทดลอง.....	7
2.2	ประเภทของจุดสมดุลงของการดูดติดผิวในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่พื้นผิว.....	23
2.3	ผลของความปั่นป่วนที่มีต่อการกำจัดแคดเมียมและตะกั่ว.....	40
3.1	ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง.....	53
4.1	แสดงคุณสมบัติของน้ำเสียที่นำมาจากการใช้งานจริง 3 แหล่ง.....	69



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ฎ

ภาพประกอบ		หน้า
2.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับความสามารถในการละลายน้ำของตะกั่วและโลหะหนักอื่น ๆ.....	10
2.2	แผนภาพของ Eh-pH สำหรับระบบ Pb-H ₂ O-CO ₂	11
2.3	แผนภาพ Eh-pH สำหรับสินแร่ตะกั่วและกลุ่ม.....	11
2.4	แผนภาพแสดงการกระจายตัวของกลุ่มตะกั่วไฮดรอกไซด์.....	12
2.5	แสดงสมดุลการละลายของตะกั่วที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 1 บรรยากาศ ความเข้มข้นไอออน 0.00 และ 0.10 โมลาร์.....	13
2.6	แสดงความสามารถในการละลายน้ำของโลหะไฮดรอกไซด์กับค่าพีเอช.....	16
2.7	แสดงแผนภาพแสดงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่พื้นผิวและแผนภาพที่ใช้ในการอธิบายพื้นผิวไฮดรอกไซด์.....	22
2.8	แสดง electrical double layer model.....	23
2.9	แสดงการกระจายโมเลกุลระหว่างของเหลวและพื้นผิวของแข็ง.....	26
2.10	แสดงขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์.....	29
2.11	แสดงไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบพื้นฐาน.....	30
2.12	กราฟแสดงไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบต่าง ๆ	31
2.13	กราฟระหว่างประจุกับพีเอชสำหรับออกไซด์ต่างชนิดกันที่ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ	37
2.14	กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์โลหะที่ถูกดูดติดกับพีเอชสำหรับไอออนประจุบวกสองต่างกัน 8 ชนิด.....	38
2.15	กราฟแสดงผลของความเข้มข้นไอออนที่มีต่อการดูดติดผิวของตะกั่วบน IOCS ที่เป็นฟังก์ชันของพีเอช.....	40
2.16	กราฟแสดงผลของความเข้มข้นของ EDTA ที่มีต่อการดูดติดผิวของตะกั่วบน IOCS ที่เป็นฟังก์ชันของพีเอช.....	41
2.17	กราฟแสดงผลของความเข้มข้นของ NTA ที่มีต่อการดูดติดผิวของตะกั่วบน IOCS ที่เป็นฟังก์ชันของพีเอช.....	41
3.1	แผนภาพแสดงแผนการทดลองและขั้นตอนการทดลอง.....	49
4.1	แสดงตัวอย่างทรายก่อนเคลือบเหล็กออกไซด์.....	59
4.2	แสดงตัวอย่างทรายเคลือบเหล็กออกไซด์.....	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

ฎ

ภาพประกอบ		หน้า
4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเขย่าและร้อยละของการดูดติดผิวของตะกั่วบนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์.....	60
4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเขย่าและร้อยละของการดูดติดผิวของฟลูออไรด์บนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์.....	60
4.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่อการดูดติดผิวตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ที่โซเดียมไนเตรทเข้มข้น 0.1 โมลาร์ที่พีเอชต่าง ๆ..	61
4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของความเข้มข้นไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่อการดูดติดผิวตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ของการดูดติดผิวของตะกั่ว 10 พีพีเอ็มที่พีเอชต่าง ๆ.....	63
4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟลูออไรด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่อการดูดติดผิวฟลูออไรด์จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ที่โซเดียมไนเตรทเข้มข้น 0.1 โมลาร์ที่พีเอชต่าง ๆ.....	64
4.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของความเข้มข้นไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่อการดูดติดผิวฟลูออไรด์จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ของการดูดติดผิวฟลูออไรด์ 10 พีพีเอ็มที่พีเอชต่าง ๆ..	65
4.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟลูออไรด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่อการดูดติดผิวตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ที่โซเดียมไนเตรทเข้มข้น 0.1 โมลาร์ที่ค่าพีเอชต่าง ๆ.....	66
4.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของร้อยละของฟลูออไรด์ 0.5, 1.0, 10 และ 20 พีพีเอ็มที่ถูกดูดติดผิวทั้งเวลาที่มีและไม่มีตะกั่ว 10 พีพีเอ็มในโซเดียมไนเตรท 0.1 โมลาร์ที่ค่าพีเอชต่าง ๆ	67
4.11	กราฟแสดงการหาค่าสมดุลการดูดติดผิวของตะกั่ว 5, 10 และ 20 พีพีเอ็ม ณ ค่าพีเอชต่าง ๆ ที่โซเดียมไนเตรท 0.1 โมลาร์แบบเส้นตรง.....	68
4.12	กราฟแสดงการดูดติดผิวของตะกั่วบนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ของน้ำเสียจากการใช้งานจริง 3 แหล่ง.....	70

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ตะกั่วเป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งซึ่งเป็นของเสียอันตรายที่ไม่สลายตัวเองตามธรรมชาติ และเนื่องจากตะกั่วมีสมบัติเหมาะในการใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง เช่น ใช้ในกิจกรรมการผลิตแบตเตอรี่ ใช้ผสมน้ำมันเชื้อเพลิงเพื่อช่วยให้เครื่องยนต์เดินเรียบ ใช้หุ้มสายเคเบิลใช้ในการบัดกรี เป็นต้น ส่วนฟลูออไรด์ในน้ำเสียนั้นสามารถพบได้ในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น โรงแก้ว โรงงานอิเล็กทรอนิกส์ โรงงานผลิตยาฆ่าแมลง และโรงงานผลิตหลอดภาพโทรทัศน์ เป็นต้น การกำจัดทั้งตะกั่วและฟลูออไรด์นั้นนิยมใช้วิธีการทำให้ตกตะกอน (precipitation) โดยการเติมสารเคมีลงไปในน้ำเสีย เพื่อนำไปทำปฏิกิริยากับตะกั่วและฟลูออไรด์ไอออน ทำให้เกิดเป็นตะกอนแยกออกจากน้ำโดยการเติมปูนขาว (lime) แต่มีข้อเสีย คือ ตะกอนเกิดได้ช้า การแยกตะกอนออกจากน้ำทำได้ยาก ทำให้มีตะกอนบางส่วนหลุดไปกับน้ำในกระแสที่ออก และการใช้วิธีการทำให้ตกตะกอนจำเป็นจะต้องมีถังตกตะกอน ทำให้สิ้นเปลืองเนื้อที่ประกอบกับตะกอนที่เกิดขึ้น จะต้องทำการรีดน้ำออกเพื่อความสะดวกในการขนย้ายและนำไปทิ้งต่อไป ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน โดยเฉพาะน้ำเสียอุตสาหกรรมที่เกิดจากโรงงานผลิตหลอดภาพโทรทัศน์ซึ่งมีส่วนผสมของตะกั่วและฟลูออไรด์รวมอยู่ด้วยกัน ดังนั้น จึงมีความน่าสนใจในการศึกษาเพื่อการกำจัดตะกั่วและฟลูออไรด์ออกจากน้ำเสียดังกล่าวในเวลาเดียวกัน

การวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ออกไซด์ของเหล็กสามารถใช้เป็นวัสดุที่ใช้ในการดูดซับโลหะหนักสำหรับการกำจัดโลหะออกจากน้ำที่ได้รับการปนเปื้อนได้ การใช้ทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ในรูปแบบของการกรอง ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้กำจัดตะกั่วที่มีอยู่ในน้ำเสียอุตสาหกรรมได้ ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดูดซับของตะกั่วบนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ ได้แก่ ความเข้มข้นของตะกั่ว พีเอชและความเข้มข้นไอออน (ionic strength) และส่วนประกอบต่าง ๆ ของน้ำเสีย เช่น ชนิด และปริมาณของแอนไอออน (anion) ในน้ำเสียนั้น ๆ

ดังนั้น ผู้ศึกษาจึงมีความสนใจที่จะทำการศึกษาลักษณะของฟลูออไรด์ซึ่งอาจจะใช้เป็นตัวแทนของธาตุในหมู่เฮไลด์ เช่น คลอไรด์ โบรมายด์ เป็นต้น ที่มีต่อการดูดซับของตะกั่วซึ่งอาจจะใช้เป็นตัวแทนของไดวาเลนต์แคทไอออน โดยการใช้ทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ ซึ่งสามารถจะนำไปใช้เป็นแนวทางในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีสารทั้งสองรวมอยู่ด้วยกัน และวิธีการนี้ยังเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูง ใช้เวลาน้อย ไม่มีตะกอน และผลิตภัณฑ์ที่ถูกดูดซับบนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวของฟลูออไรด์บนตัวกลางทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ และผลของความเข้มข้นของฟลูออไรด์ พีเอช และความเข้มข้นไอออนต่าง ๆ ต่อการดูดติดผิวของตะกั่วบนทรายเคลือบเหล็กออกไซด์
2. เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วและฟลูออไรด์ในเวลาเดียวกันโดยใช้ทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์
3. เพื่อเปรียบเทียบสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองและการทดลองกับน้ำเสียจริง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีฟลูออไรด์รวมอยู่ด้วยโดยใช้ทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ และทำการศึกษาถึงผลกระทบต่อ การดูดติดผิวของตะกั่วจากปริมาณของฟลูออไรด์ในน้ำเสีย จากการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดและด่างของน้ำเสีย และปริมาณของไอออนในน้ำเสีย
2. โลหะหนักที่ทำการศึกษา ได้แก่ ตะกั่ว โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์จากสารเคมีที่เป็นสารประกอบในเตรท
3. ธาตุในหมู่เฮไลต์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ ฟลูออไรด์ โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์จากสารเคมีที่เป็นสารประกอบไฮเดียมฟลูออไรด์
4. การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ
 - 1) ขั้นตอนการเตรียมการทดลอง
 - 2) ขั้นตอนการหาเวลาที่สภาวะสมดุลของการดูดติดผิวของฟลูออไรด์และตะกั่ว
 - 3) ขั้นตอนการทดลองหาค่าร้อยละของฟลูออไรด์และตะกั่วที่ถูกกำจัดกับการแปรค่าตัวแปรดังต่อไปนี้ ได้แก่ ค่าความเข้มข้นของฟลูออไรด์ ค่าพีเอช และค่าความเข้มข้นของไฮเดียมในเตรท
5. การวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วจะใช้วิธีอะตอมมิกแอบซอพชันสเปคโตรเมตรี (Atomic Absorption Spectrometry) ส่วนการวิเคราะห์หาปริมาณฟลูออไรด์จะใช้วิธี SPADNS

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงข้อมูลพื้นฐานเพื่อใช้เป็นแนวทางในการกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียโดยการใช้น้ำทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ที่ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ พีเอช และความเข้มข้นไอออนต่าง ๆ
2. ทำให้ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วและฟลูออไรด์ในเวลาเดียวกันโดยการใช้น้ำทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์
3. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับน้ำเสียที่มีส่วนผสมระหว่างธาตุในหมู่เฮไลด์และไดวาเลนท์แคทไอออนอื่น ๆ ได้โดยการใช้กระบวนการดูดติดผิวโดยทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องกับความเข้มข้นของฟลูออไรด์ พีเอชและความเข้มข้นไอออนต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดติดผิวของฟลูออไรด์โดยการใช้น้ำทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์
2. ศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องกับความเข้มข้นของฟลูออไรด์ พีเอชและความเข้มข้นไอออนต่าง ๆ ที่มีต่อการดูดติดผิวของตะกั่วโดยการใช้น้ำทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์
3. วางแผนการทดลอง ออกแบบ จัดหาและ/หรือจัดสร้างอุปกรณ์การทดลอง
4. ดำเนินการทดลอง
5. วิเคราะห์ผลและสรุปผลการดำเนินการ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แนวคิดและทฤษฎี

2.1 ฟลูออไรด์

2.1.1 สมบัติทั่วไปของฟลูออไรด์

ฟลูออไรด์เป็นธาตุที่พบได้ในน้ำธรรมชาติที่มาทำน้ำประปา ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำธรรมชาติมีได้มากถึง 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ฟลูออไรด์ในปริมาณที่พอเหมาะ (1 มิลลิกรัมต่อลิตร) สามารถป้องกันฟันผุได้ แต่ถ้ามีมากเกินไปจะทำให้ฟันละลายได้

ฟลูออไรด์เป็นธาตุในหมู่ที่ 7 ในตารางธาตุ มีความถ่วงจำเพาะ 1.505 มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ -219.6 องศาเซลเซียส จุดเดือด -188.2 องศาเซลเซียส น้ำหนักอะตอม 18.9984 ฟลูออไรด์เป็นธาตุที่ไว มักจะพบในรูปของสารประกอบ เช่น NaF , CaF_2 , H_2F_2 และ Na_2SiF_6 เป็นต้น

สารประกอบฟลูออไรด์โดยเฉพาะกรดไฮโดรฟลูออริก และแอมโมเนียมฟลูออไรด์ มีฤทธิ์กัดกร่อนผิวหนังและเนื้อเยื่อต่าง ๆ ของร่างกายอย่างรุนแรง แม้จะมีการค้นพบว่า การดื่มน้ำที่มีปริมาณฟลูออไรด์ 1 พีพีเอ็ม (ppm) จะสามารถช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงของฟัน โดยการเปลี่ยนผลึกขององค์ประกอบหลักของเคลือบฟัน hydroxyapatite $[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2]$ ไปเป็น fluorapatite $[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2]$ ซึ่งมีความเสถียรต่อการกัดกร่อนของกรดแลคติก ทำให้ฟันผุยากขึ้นก็ตาม แต่การดื่มน้ำที่มีปริมาณฟลูออไรด์ 2-4 พีพีเอ็ม เป็นเวลานาน ๆ จะทำให้เกิดโรคฟันตกกระในเด็กได้ และถ้าบริโภคในปริมาณมากอาจทำให้เสียชีวิตได้ จากเหตุการณ์ในประเทศสหรัฐอเมริกา เมื่อเด็กอายุ 3 ขวบกลืนน้ำยาสแตนเนสฟลูออไรด์ (stannous fluoride) เข้มข้น 4% ที่ทันตแพทย์ให้ใช้ซ่อมบวมนปาก และเด็กเสียชีวิตภายในเวลา 3 ชั่วโมง

2.1.2 ฟลูออไรด์ในน้ำเสีย

สารประกอบฟลูออไรด์จัดเป็นสารพิษชนิดหนึ่ง que ปะปนมากับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะโรงงานที่ผลิตชิ้นส่วน อุปกรณ์และวงจรรวม เช่น วงจรรวม (integrated circuit) สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) เป็นต้น การที่น้ำเสียมีสารประกอบฟลูออไรด์ปะปนออกมา เนื่องจากการนำสารประกอบของฟลูออไรด์ ได้แก่ กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) และแอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH_4F) มาใช้ในกระบวนการทำความสะอาดชิ้นส่วนและอุปกรณ์ดังกล่าว ปัญหาน้ำทิ้ง

น้ำเสียที่มีสารประกอบฟลูออไรด์ปะปนออกมาเป็นสิ่งที่ก่อให้เกิดมลภาวะและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต บางประเทศเริ่มมีการกำหนดมาตรฐานปริมาณฟลูออไรด์ที่ออกมากับน้ำทิ้ง เช่น ประเทศญี่ปุ่นกำหนดมาตรฐานของปริมาณฟลูออไรด์ที่ออกมากับน้ำทิ้งได้ไม่เกิน 15 พีพีเอ็ม และมีแนวโน้มว่าจะกำหนดมาตรฐานให้ต่ำลงถึง 8 พีพีเอ็ม วิธีการแก้ปัญหาสามารถกระทำได้โดยพยายามลดปริมาณการใช้สารนี้ให้น้อยลง และกำจัดสารประกอบที่เป็นพิษของฟลูออไรด์ จากน้ำทิ้งก่อนระบายลงสู่แหล่งระบายน้ำต่าง ๆ

ฟลูออไรด์ที่พบในน้ำเสียสามารถพบได้จากน้ำเสียจากอุตสาหกรรม เช่น โรงงานแก้วและเซรามิก โรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ โรงงานแม่พิมพ์โลหะ (ที่ใช้ไฮโดรฟลูออริก) โรงงานผลิตปุ๋ย และโรงงานผลิตหลอดภาพโทรทัศน์ เป็นต้น ฟลูออไรด์ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมแก้วจะอยู่ในรูปของกรดไฮโดรฟลูออริกหรือฟลูออไรด์ไอออน โดยกรดไฮโดรฟลูออริกจะใช้ในอุตสาหกรรมผลิตหลอดภาพโทรทัศน์ หลอดไฟ และใช้เป็นกรดกัดให้แก้วมีความเป็นเงา ความเข้มข้นของฟลูออไรด์สูง ๆ มักจะพบมากในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมแก้ว โดยมีความเข้มข้นประมาณ 1,000-3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ฟลูออไรด์

2.1.3 เทคนิคกระบวนการดูดติดผิว (adsorption process) ที่ใช้กำจัดฟลูออไรด์

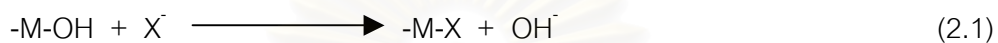
กรรมวิธีในการกำจัดฟลูออไรด์ในน้ำเสียมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีในปัจจุบัน ได้แก่ การทำให้เกิดตะกอนโดยปูนขาวสามารถลดความเข้มข้นของฟลูออไรด์เหลือประมาณ 10-20 มิลลิกรัมต่อลิตรและถ้าต้องการให้ความเข้มข้นต่ำจนถึง 5 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถทำได้โดยการใช้ activated alumina contact bed หรือการใช้เทคนิคกระบวนการดูดติดผิว ซึ่งในที่นี้จะขอกกล่าวถึงรายละเอียดเฉพาะเทคนิคกระบวนการดูดติดผิว ก็จะเป็นวิธีการกำจัดวิธีหนึ่งดังจะได้อธิบายต่อไป

สารประกอบฟลูออไรด์ที่ปะปนมากับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม สามารถกำจัดได้โดยวิธีการตกตะกอนกับแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) หรือปูน (lime) ในทางปฏิบัติเป็นการยากที่จะลดปริมาณฟลูออไรด์ให้ต่ำลงถึง 8 พีพีเอ็ม เนื่องจากการเติมแคลเซียมคลอไรด์หรือปูนในปริมาณมาก ๆ จะไปเพิ่มความเข้มข้นไอออน (ionic strength) ของสารละลายทำให้แคลเซียมฟลูออไรด์ (CaF_2) มีการละลายเพิ่มขึ้น แม้ว่าวิธีนี้จะสะดวกและประหยัด แต่ยังไม่ีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์จนถึงความเข้มข้นต่ำ ๆ ได้

วิธีการกำจัดสารประกอบฟลูออไรด์โดยเทคนิคกระบวนการดูดติดผิว ได้มีการทำวิจัยเพื่อพัฒนาวิธีการใหม่ ที่สามารถลดปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำเสียให้ต่ำกว่านี้ เพื่อนำมาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เรียกเทคนิคนี้ว่า กระบวนการดูดติดผิว

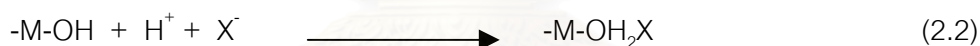
เทคนิคกระบวนการดูดซับไอออนโลหะที่จำพวกไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์ (hydrous metal oxide) หรือ คาร์บอเนตโลหะพื้นฐาน (basic metal carbonate) ของโลหะที่มีเวเลนซ์ 3 และ 4 เช่น แลนทานัม (La) ซาแมเรียม (Sm) ซีเรียม (Ce) เป็นต้น เป็นตัวดูดซับ (adsorbent) นำมาดูดซับไอออนฟลูออไรด์ เนื่องจากไอออนฟลูออไรด์สามารถเกิดปฏิกิริยากับโลหะที่มีเวเลนซ์สูง ๆ ได้ดี จึงอาศัยหลักการนี้พัฒนาเทคนิคกระบวนการดูดซับ

ปฏิกิริยาการกำจัดไอออนฟลูออไรด์



$-M-OH$ คือ ตัวดูดซับชนิดไฮดรอกไซด์หรือคาร์บอเนตโลหะพื้นฐาน
 X^- คือ ไอออนฟลูออไรด์

ในสภาพที่เป็นกลางหรือเป็นด่างเล็กน้อย ไอออนฟลูออไรด์สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนประจุกับหมู่ไฮดรอกไซด์ (hydroxide group) ของสารประกอบโลหะ โดยที่ไอออนฟลูออไรด์จะถูกดูดซับบนผิวของโลหะแทนที่ไอออนไฮดรอกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมา



สมการที่ (2.2) แสดงการดูดซับไอออนฟลูออไรด์ในสภาพที่เป็นกรดประสิทธิภาพการกำจัดไอออนฟลูออไรด์ยิ่งเพิ่มมากขึ้น ไอออนฟลูออไรด์จะถูกดูดซับรวมกับไอออนไฮโดรเจนเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของฟลูออไรด์ของโลหะ (metal fluoride complex) ขึ้นที่ผิวของโลหะที่ใช้เป็นตัวดูดซับ

ตัวดูดซับที่ใช้ดูดซับไอออนฟลูออไรด์แล้วสามารถนำไปรีเจนเนอเรท (regenerate) ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และนำกลับมาใช้ใหม่ได้

ตัวดูดซับดังแสดงในตารางที่ 2.1 เตรียมโดยการไฮโดรไลส์ (hydrolyse) เกลือคลอไรด์หรือเกลือไนเตรทของโลหะซีเรียม (III) ซีเรียม (IV) แลนทานัม (III) อิตเทรียม (III) แกโดลิเนียม (III) ซาแมเรียม (III) และนีโอดิเมียม (III) ด้วยสารละลายแอมโมเนียหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือโดยวิธีการตกตะกอนแบบโฮโมจีเนียส (homogeneous precipitation) เกลือคลอไรด์ของโลหะเหล่านี้ด้วยยูเรีย จากการศึกษาโครงสร้างของตัวดูดซับที่เตรียมขึ้น โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-Ray diffractometer, XRD) พบว่า ไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์เกิดจากการไฮโดรไลส์เกลือ

ของโลหะด้วยสารละลายแอมโมเนียหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่วนคาร์บอนेटโลหะพื้นฐานเกิดจากการตกตะกอนแบบไฮโมจีเนียสเกลีของโลหะด้วยยูเรีย ยกเว้นไฮดรรัสซีเรียม (IV) ออกไซด์ (hydrous cerium (IV) oxide) เกิดจากการตกตะกอนแบบไฮโมจีเนียสเกลีของโลหะซีเรียม (IV) ด้วยยูเรีย สารจากธรรมชาติ ได้แก่ กระจูดหอย เป็ลือกหอยกาบ (clamshell) และเปลือกปู (crab shell) กำจัดไขมันออกและนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส บดเป็นผงแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช

ตารางที่ 2.1 ชนิดของตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลอง

Adsorbent	Surface area	Mean particle size
	m ² /g	µm
1. Hydrous aluminum (III) oxide	270.0	-
2. Hydrous cerium (IV) oxide	35.0	-
3. Hydrous lanthanum (III) oxide	38.6	13.8
4. Basic cerium (III) carbonate	0.4	0.9
5. Basic lanthanum (III) carbonate	0.8	17.7
6. Basic yttrium (III) carbonate	28.6	3.3
7. Basic gadolinium (III) carbonate	-	-
8. Basic samarium (III) carbonate	-	-
9. Basic neodymium (III) carbonate	-	-
10. Bone	-	-
11. Clamshell	4.2	26.5
12. Crabshell	-	52.0

การศึกษาผลของความเป็นกรด-ด่างที่มีต่อความสามารถในการดูดติดผิวไอออนฟลูออไรด์จากการเตรียมน้ำเสียที่มีไอออนฟลูออไรด์เข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์หรือ 5 มิลลิโมลาร์โดยการละลายโซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) ชนิด AR grade ด้วยน้ำกลั่น นำมาปรับค่าพีเอชให้ได้พีเอช 2-12 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือกรดเปอร์คลอริก (HClO₄) เติมตัวดูดซับปริมาณ 0.05 กรัม ลงไปในน้ำเสียที่เตรียมขึ้นทิ้งไว้ให้ทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 18 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส นำมาวัดค่าพีเอชและกรองฟิลเตรท (filtrate) มาวิเคราะห์ปริมาณไอออนฟลูออไรด์ และปริมาณไอออนโลหะ

จากการศึกษาสรุปได้ว่า ตัวดูดซับชนิดสารสังเคราะห์ที่นำมาทดลองสามารถลดปริมาณไอออนฟลูออไรด์ได้ต่ำลงถึงความเข้มข้น 0.4 - 5.0 พีพีเอ็ม ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐานน้ำทิ้ง ความสามารถในการดูดติดผิวไอออนฟลูออไรด์ขึ้นกับค่าพีเอชของน้ำเสีย โดยทั่วไปการดูดติดผิวไอออนฟลูออไรด์เกิดขึ้นได้ดีในสภาพที่เป็นกรดมากกว่าในสภาพที่เป็นด่าง ถ้ามีความเป็นด่างมาก ๆ (ค่าพีเอชที่มีค่ามากกว่า 10) ตัวดูดซับส่วนใหญ่จะไม่มี การดูดติดผิวไอออนฟลูออไรด์เลย ตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลองสามารถละลายได้ในสารละลายที่เป็นกรด ดังนั้น จึงทำให้ช่วงพีเอชที่ใช้งานได้จริงแคบลง เนื่องจากต้องคำนึงถึงผลในขั้นนี้ด้วย ตัวดูดซับแต่ละชนิดจะมีช่วงพีเอชเหมาะสมที่ใช้งานแตกต่างกันไป เช่น ไฮดรอกไซด์เหล็ก (III) ออกไซด์ ควรใช้งานในช่วงพีเอช 7-8 แลนทานัม (III) คาร์บอเนตพื้นฐาน ควรใช้งานในช่วงพีเอช 5-6 และไฮดรอกไซด์ซีเรียม (IV) ออกไซด์ สามารถใช้งานได้ในช่วงพีเอชที่น้อยกว่า 4 ลงไป โดยไม่ต้องคำนึงถึงการละลายของไอออนซีเรียม เนื่องจากตัวดูดซับชนิดนี้มีคุณสมบัติพิเศษในการต้านทานต่อการละลายในสภาวะที่เป็นกรด

จากการศึกษาอัตราเร็วในการกำจัดไอออนฟลูออไรด์ พบว่า ปฏิกริยาในการดูดติดผิวไอออนฟลูออไรด์ของตัวดูดซับเสร็จสิ้นภายในเวลา 2 ชั่วโมง ยกเว้นแกโดลิเนียม (III) คาร์บอเนตพื้นฐาน ซึ่งใช้เวลาถึง 8 ชั่วโมง และจากการศึกษานี้ ทำให้ทราบว่า ปฏิกริยาการดูดติดผิวไอออนฟลูออไรด์จะเกิดขึ้นก่อนจนกระทั่งปฏิกริยาเสร็จสิ้นสมบูรณ์แล้ว จึงเริ่มเกิดปฏิกริยาการละลายของโลหะจากตัวดูดซับตามมา

จากการศึกษาความจุในการดูดติดผิวไอออนฟลูออไรด์ พบว่า ไฮดรอกไซด์ซีเรียม (IV) ออกไซด์ มีความจุในการดูดติดผิวไอออนฟลูออไรด์ไว้บนผิวมากที่สุด และสารจากธรรมชาติ ได้แก่ เปลือกหอยกาบ และกระดูกหมู มีความจุในการดูดติดผิวไอออนฟลูออไรด์สูงใกล้เคียงกับสารสังเคราะห์ แต่มี ข้อเสีย คือ ไม่สามารถลดปริมาณไอออนฟลูออไรด์จนถึงความเข้มข้นต่ำได้ โดยสามารถลดปริมาณไอออนฟลูออไรด์ลงเหลือ 34 พีพีเอ็มและมีการละลายของไอออนแคลเซียม และไอออนฟอสเฟตด้วย อย่างไรก็ตามสารจากธรรมชาตินี้ก็เป็นที่น่าสนใจ ที่จะนำมาศึกษาทดลองเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียจำพวกไอออนฟลูออไรด์ในขั้นต้นได้ เนื่องจากมีอยู่ในธรรมชาติเป็นจำนวนมาก หาง่าย ราคาถูกและสิ่งที่สำคัญคือ สารจากธรรมชาติจะไม่ก่อให้เกิดมลภาวะด้วย

2.2 ตะกั่ว (Lead)

2.2.1 สมบัติทั่วไปของตะกั่ว

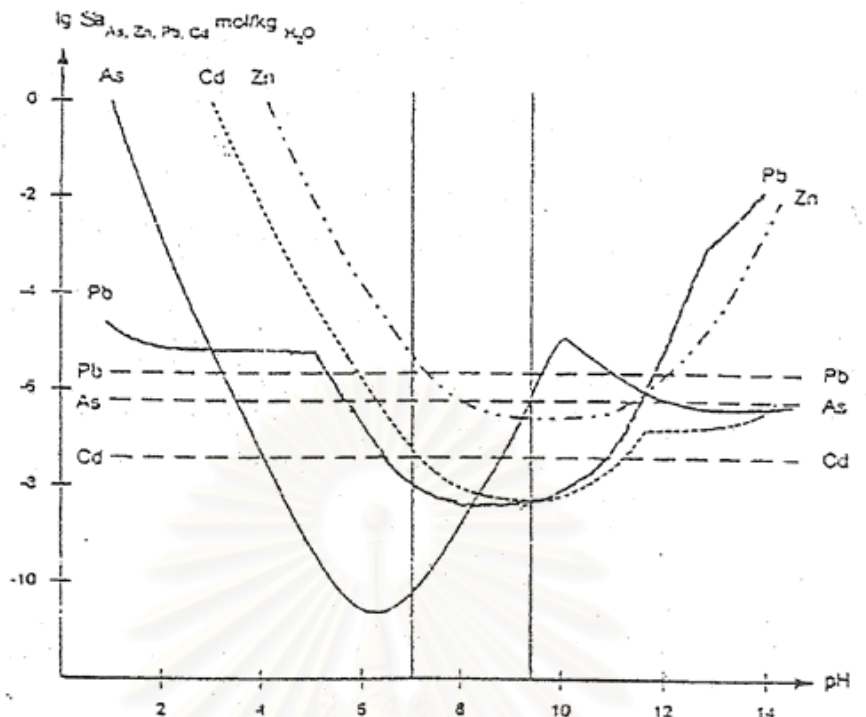
ตะกั่วเป็นธาตุทรานซิชัน (transition elements) ในตารางธาตุ (periodic table) พบกระจายอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติ ตะกั่วเป็นธาตุชนิดหนึ่งที่มีหลายไอโซโทป (isotope) แต่ที่ปรากฏเป็นไอโซโทปที่เสถียร (stable isotope) มีเพียงชนิดเดียว คือ Pb-208 เป็นโลหะหนัก (heavy metal) สีเทา มีสีผงเป็นสีดำ มีความวาวแบบโลหะ ทึบแสง มีน้ำหนักอะตอม (atomic weight) 207.17 ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) 11.37 มีความอ่อนตัว สามารถดัด รีดหรือตีได้ง่าย เชื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี เป็นโลหะที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อน มีความหล่อลื่นในตัวเอง เป็นโลหะอ่อนที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ ขยายตัวมากเมื่อได้รับความร้อน ผสมกับโลหะต่าง ๆ ได้หลายชนิด สารประกอบตะกั่ว ส่วนมากไม่ละลายน้ำ โดยทั่วไปจะมีสีขาวหรือไม่มีสี แต่ออกไซด์ของตะกั่วจะมีสีเหลืองหรือสีส้ม ไดออกไซด์จะมีสีเทาหรือสีดำ ตะกั่วอาจอยู่ในรูปสารประกอบอินทรีย์บางอย่างสามารถละลายน้ำได้ (Rochow Abel, 1973) ตะกั่วเป็นของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ แต่จะละลายในกรดไนตริกเข้มข้นร้อนและในกรดเกลือ กรดกำมะถันและกรดน้ำส้มที่เข้มข้นเดือด มีจุดเดือด 1,740 องศาเซลเซียส และจุดหลอมเหลวที่ 327.4 องศาเซลเซียส ส่วนแร่ตะกั่ว (Lead ores) เป็นสารประกอบตะกั่วที่มีตะกั่วที่มีวาเลนซ์ +2 และ +4 โดยส่วนมากจะพบโดยปนอยู่ในหินอัคนีบางชนิดในลักษณะของสารประกอบซัลไฟด์ มีรูปแบบต่าง ๆ ที่สำคัญ 3 แบบ ได้แก่

- 1) กาลีนา (Galena, PbS) จะมีค่าคงที่ของการละลายน้ำเท่ากับ 1.1×10^{-29}
- 2) เซอร์ไซต์ (Cerussite, PbCO₃) จะมีค่าคงที่ของการละลายน้ำเท่ากับ 1.5×10^{-13}
- 3) แองกลีไซต์ (Anglesite, PbSO₄) จะมีค่าคงที่ของการละลายน้ำเท่ากับ 1.8×10^{-8}

Barth (1985) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับค่าความสามารถในการละลายน้ำของตะกั่วในธรรมชาติดังแสดงในรูปที่ 2.1 จะพบได้ว่า ความสามารถในการละลายน้ำจะต่ำสุดอยู่ที่ช่วงพีเอชที่ 7-9 ถ้าค่าพีเอชที่สูงหรือต่ำกว่าจุดนี้ ความสามารถในการละลายน้ำของตะกั่วจะเพิ่มขึ้น (Pedall, G., 1999 อ้างจาก Barth, 1985)

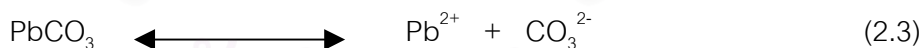
กลไกในการละลายน้ำของตะกั่ว

สารตะกั่วที่ปรากฏว่า ปนเปื้อนอยู่ตามธรรมชาติจะอยู่ในรูปคาร์บอเนต (PbCO₃) ประกอบกับผิวดินบริเวณต้นน้ำตามธรรมชาติก็เป็นแหล่งที่อุดมไปด้วยสินแร่ตะกั่วคาร์บอเนตรวมทั้งกิจกรรมการทำเหมืองแร่ในบริเวณนั้นด้วย ดังนั้น ในที่นี้จะขอกล่าวเฉพาะการละลายของตะกั่วคาร์บอเนตเป็นหลัก (กรมควบคุมมลพิษ, 2541; Pedall, G., 1999)



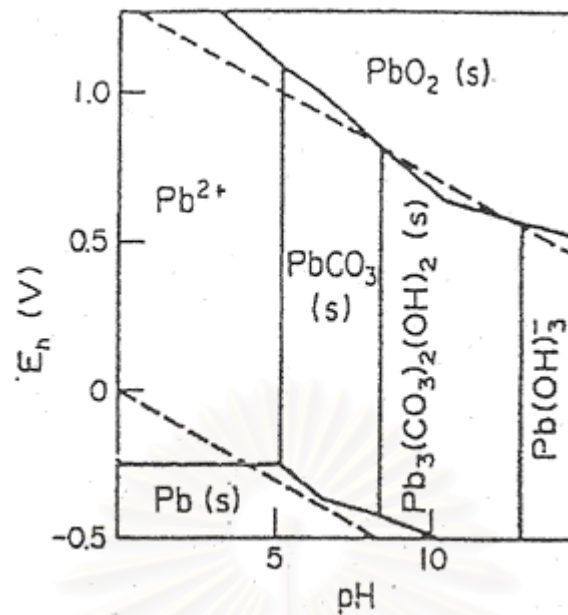
รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับความสามารถในการละลายน้ำของตะกั่วและโลหะหนักอื่น ๆ (Barth, 1985)

ในธรรมชาติจะมีคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่ในน้ำ ทำให้ตะกั่วคาร์บอเนตเกิดรูปได้หลายรูปที่ละลายน้ำได้ดังสมการที่ (2.3) และ (2.4) ซึ่งแสดงการแตกตัวและการละลายในสภาพกรดของตะกั่วกลุ่มคาร์บอเนต

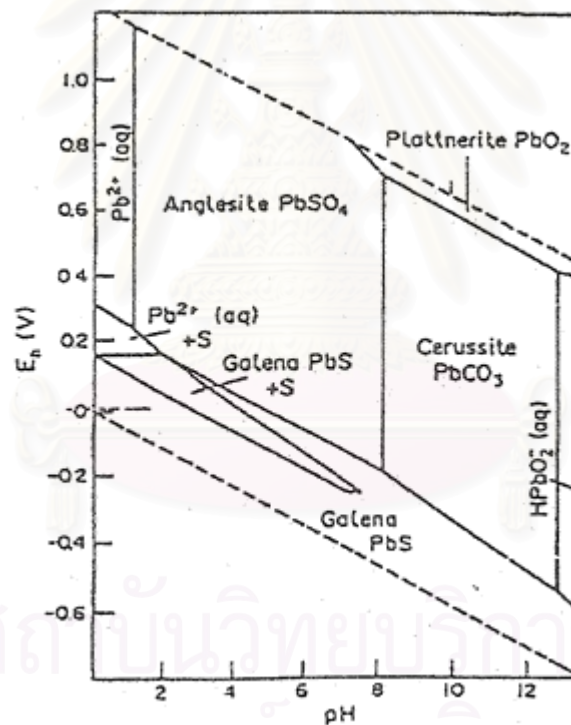


ในรูปที่ 2.2 เป็นรูปของตะกั่วคาร์บอเนตที่อยู่ภายใต้สภาวะตามธรรมชาติ และความสัมพัทธ์ระหว่างปริมาณแร่ตะกั่วกับน้ำตามธรรมชาติ แสดงไว้ในรูปที่ 2.3

การละลายน้ำของตะกั่วอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis reactions) จะได้ Pb(OH)^+ ($\log K = -7.9$) สารไฮโดรไลซิสของตะกั่วจะเป็นสารที่พบได้หลายองค์ประกอบ เช่น เมื่อระดับความเป็นกรด-ด่างของสารละลายประมาณ 12 ไม่พบว่ามีการเกิดของ Pb(OH)_2 เกิดขึ้น แต่จะอยู่ในรูปของสารละลาย จากรูปที่ 2.4 จะแสดงปริมาณตะกั่วไฮดรอกไซด์ชนิดต่าง ๆ ที่ระดับ

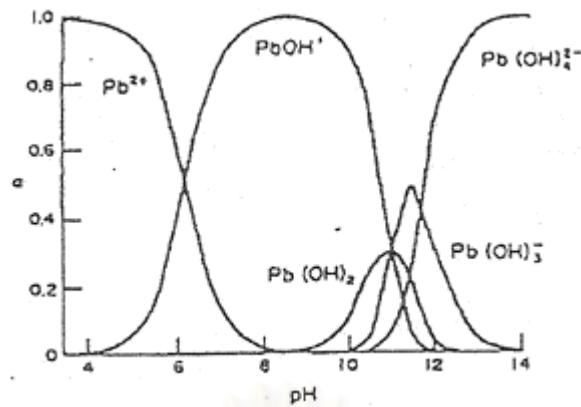


รูปที่ 2.2 แผนภาพของ Eh-pH สำหรับระบบ Pb- H₂O- CO₂ (Stumm และ Morgan, 1970)



รูปที่ 2.3 แผนภาพ Eh-pH สำหรับสินแร่ตะกั่วและกลุ่ม (Garrels และ Christ, 1965)

ความเป็นกรด-ด่างต่าง ๆ กัน โดย Pb(OH)^+ มีค่า $\log K_1 = 7.82$, Pb(OH)_2 มีค่า $\log K_2 = 10.88$, Pb(OH)_3^- มีค่า $\log K_3 = 13.94$ และ Pb(OH)_4^{2-} มีค่า $\log K_4 = 16.33$ นอกเหนือจากสารทั้งสี่ตัวที่กล่าวมาแล้วในสารละลายจะมี $\text{Pb}_4(\text{OH})_4^{4+}$ ซึ่งตัวหลักตัวหนึ่ง $\text{Pb}_2\text{OH}^{3+}$, $\text{Pb}_3(\text{OH})_4^{2+}$ และ $\text{Pb}_6(\text{OH})_8^{4+}$ (Jack E. Fergusson, 1990)



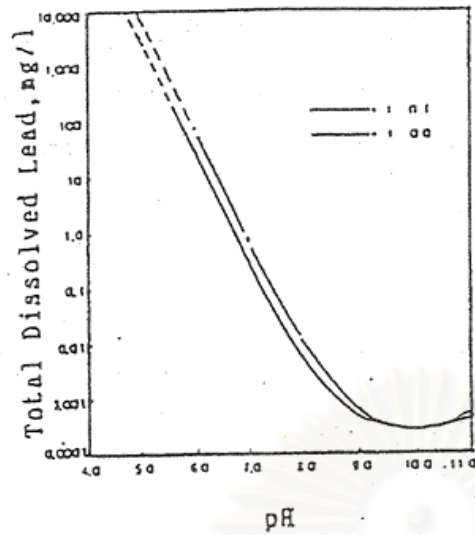
รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงการกระจายตัวของกลุ่มตะกั่วไฮดรอกซี (Jack E. Fergusson, 1990)

นอกจากการทำให้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับน้ำแล้ว ในการละลายน้ำของสารประกอบตะกั่ว ในวิชาโลหวิทยาการละลาย (Hydrometallurgy) ก็ได้ใช้สภาพความเป็นกรด-ด่างหรือการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนจากเกลือ เช่น กรดไฮโดรคลอริก โซเดียมไฮดรอกไซด์ เกลือแกง มาใช้ในการสกัดเอาแร่ออกมาจากสินแร่ที่เกรดต่ำ ในรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่า เมื่อเปลี่ยนสภาพความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้นหรือลดลง ตะกั่วจะมีความสามารถละลายน้ำได้เพิ่มขึ้น โดยคุณสมบัติของกลุ่มทางเคมีของตะกั่วในดินที่เป็นกรด-ด่างภายใต้ oxic condition นั้น Pb (II) จะมี Pb^{2+} , Org, $PbSO_4$ และ $PbHCO_3^+$ เมื่ออยู่ในสภาพที่เป็นกรด และจะมี $PbCO_3$, $PbHCO_3^+$, $Pb(CO_3)_2^{2-}$ และ $PbOH^+$ เมื่ออยู่ในสภาพที่เป็นด่าง (Sposito, 1983)

2.2.2 ตะกั่วในน้ำเสีย

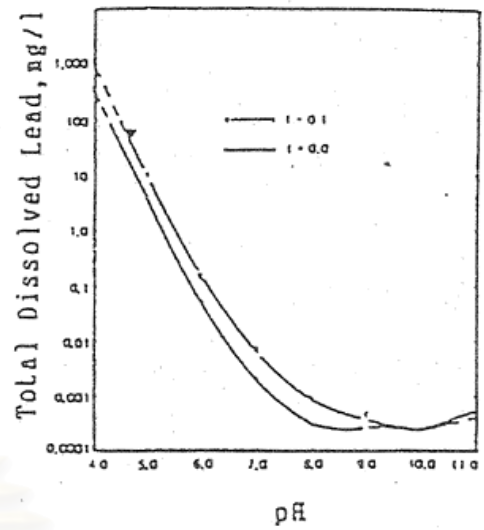
ตะกั่วเป็นสารมลภาวะที่ไม่สลายตัวเองตามธรรมชาติ และเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย โดยการชะล้างตะกั่วที่ตกค้างจากการใช้งาน หรือจากกิจกรรมอุตสาหกรรมที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ เนื่องจากตะกั่วมีสมบัติเหมาะในการใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง เช่น ในกิจกรรมแบตเตอรี่ ใช้ผสมน้ำมันเชื้อเพลิงเพื่อให้เครื่องยนต์เดินเรียบ ทำสี หุ้มสายเคเบิล การบัดกรี ทำตัวพิมพ์ ท่อน้ำ ลูกปืน แผ่นตะกั่ว ใช้เป็นองค์ประกอบในการผลิตแก้ว พลาสติก เซรามิก แผ่นเหล็กอาบสังกะสี และโลหะผสมนานาชนิด ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภท

การละลายของตะกั่วในน้ำเสีย มีความสำคัญต่อการบำบัดน้ำเสีย แต่ความรู้ทางเคมีของตะกั่วในน้ำเสียมีการศึกษากันน้อย ส่วนใหญ่อ้างอิงจากการศึกษาเคมีของตะกั่วในน้ำธรรมชาติ หรือน้ำกลั่นบริสุทธิ์ ความสัมพันธ์ของการละลายของตะกั่วในน้ำที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในน้ำในความเข้มข้นต่าง ๆ กับพีเอช แสดงในรูป 2.5 ก-ค จากการศึกษาของ Nayer และ



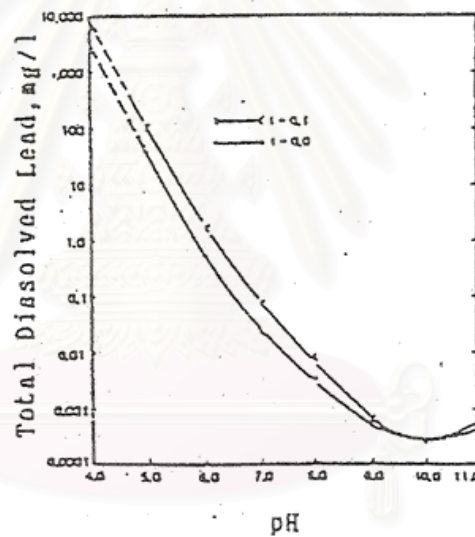
pH

ก



pH

ข



pH

ค

รูปที่ 2.5 ก-ค แสดงสมดุลการละลายของตะกั่วที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ

1 บรรยากาศ ความเข้มข้นไอออน 0.00 และ 0.10 โมลาร์ โดยมี

ก. $\text{CO}_2 = 10^{-3}$ โมลาร์

ข. $\text{CO}_2 = 10^{-2}$ โมลาร์

ค. $\text{CO}_2 = 10^{-4.87}$ โมลาร์ (Hem และ Duram, 1973)

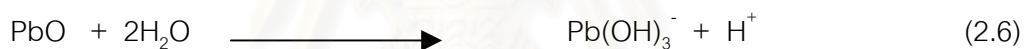
Dague (1975) พบว่า พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการละลายของตะกั่วในน้ำ คือ ความเป็นด่าง ความกระด้าง และพีเอช ซึ่งพารามิเตอร์แต่ละตัวมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน กล่าวคือ อัตราส่วนของความเป็นด่าง ซึ่งอยู่ในรูปคาร์บอเนต-ไบคาร์บอเนต-ไฮดรอกไซด์ มีความสัมพันธ์กับค่าพีเอช ความกระด้าง ก็มีความสัมพันธ์กับความเป็นด่างและพีเอชเช่นเดียวกัน

ผลของพีเอช

การละลายของตะกั่วในสารละลายขึ้นอยู่กับพีเอช ที่พีเอชน้อยกว่า 8 ตะกั่วอยู่ในรูปสารละลาย พีเอช 8-11 ตะกั่วจะตกตะกอนเป็นตะกั่วออกไซด์ ดังสมการ (2.5)



เนื่องจากคุณสมบัติตามธรรมชาติของตะกั่วออกไซด์ จะละลายในสารละลายที่มีพีเอชมากกว่า 11 ดังสมการ (2.6)



ผลของความกระด้าง

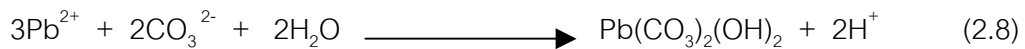
การละลายของตะกั่ว ถูกกำหนดโดยผลของความกระด้าง ในการกำจัดความกระด้างด้วยปูนขาวที่พีเอช 10.5 ซึ่งที่พีเอชนี้ ตะกั่วจะตกตะกอนในรูปตะกั่วออกไซด์ ไอออนลบจากความกระด้างที่เกิดจากแคลเซียม และแมกนีเซียมมีผลเล็กน้อยต่อการละลายของตะกั่ว

ผลของความเป็นด่าง

ในน้ำที่มีตะกั่วและคาร์บอเนตไดออกไซด์ ค่าการละลายของตะกั่วขึ้นอยู่กับพีเอชและความเข้มข้นของคาร์บอเนตไอออนที่พีเอชน้อยกว่า 5 ตะกั่วจะอยู่ในรูปสารละลาย ที่พีเอช 5-8.5 ตะกั่วจะตกตะกอนในรูปตะกั่วคาร์บอเนต ดังสมการ (2.7)



ที่พีเอช 8.5-12.5 ตะกั่วจะตกตะกอนในรูปตะกั่วออกไซด์ ดังสมการที่ (2.5) หรืออาจจะตกตะกอนในรูปตะกั่วคาร์บอเนตพื้นฐาน (basic lead carbonate) ดังสมการ (2.8)



ที่พีเอชมากกว่า 12.5 ตะกั่วจะอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วออกไซด์ ตามสมการที่ (2.6)

2.2.3 วิธีการกำจัดตะกั่วในน้ำเสีย

การกำจัดตะกั่วที่อยู่ในรูปสารละลายเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมี ในการเปลี่ยนการละลายของตะกั่วให้เป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ โดยการเติมสารเคมี เช่น ปูนขาว หรือโซดาไฟ เพื่อให้เกิดการตกตะกอนในรูปตะกั่วไฮดรอกไซด์ $[\text{Pb}(\text{HO})_2]$ โซดาแอช เพื่อให้เกิดการตกตะกอนในรูปตะกั่วคาร์บอเนต $[\text{PbCO}_3]$ และฟอสเฟต เพื่อให้เกิดการตกตะกอนในรูปตะกั่วฟอสเฟต $[\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2]$ นอกจากนี้ยังมีการใช้สารส้ม เฟอรัสและเพอริคซัลเฟตเป็นสารตกตะกอน (coagulant) ในการกำจัดตะกั่วอีกด้วย

การกำจัดโลหะตะกั่วออกจากน้ำเสียมักจะใช้วิธีการทางเคมีกายภาพ เพื่อให้ตะกั่วตกตะกอนหรือใช้คุณสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะที่อยู่ในน้ำเป็นกระบวนการแยกโลหะตะกั่ว วิธีการต่าง ๆ ที่ใช้ในการกำจัดโลหะตะกั่ว ได้แก่

1) การตกตะกอนทางเคมี (precipitation)

เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภท การตกตะกอนทางเคมีได้มีผู้ทำการศึกษาและทดลองมาอย่างมากมาย โดยเริ่มจากการศึกษาการตกตะกอนของตะกั่วเป็นเกลือที่ละลายน้ำได้น้อย การละลายของเกลือที่ละลายน้ำได้น้อย จะแสดงโดยค่าคงที่การละลายซึ่งใช้สัญลักษณ์เป็น K_{sp} ซึ่งเป็นค่าที่บอกให้ทราบถึงความสามารถในการละลายน้ำได้มากน้อยเพียงใด

ในการตกตะกอนโลหะหนัก มักจะให้เกิดการตกตะกอนในรูปคาร์บอเนตหรือไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นรูปที่เสถียรในธรรมชาติ

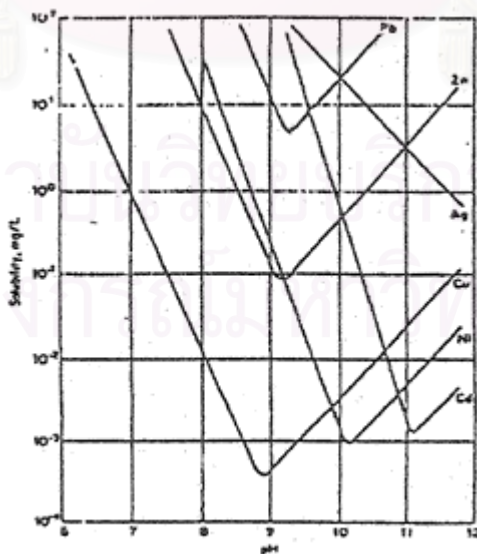
1.1) การตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ (hydroxide precipitation)

การตกตะกอนให้อยู่ในรูปไฮดรอกไซด์เป็นวิธีปกติที่ใช้ในการกำจัดโลหะหนักที่ละลายน้ำ ในกระบวนการนี้จะเป็นไปอย่างอัตโนมัติ และสามารถควบคุมได้ด้วยเครื่องควบคุมระดับค่าพีเอชอย่างง่าย โดยการเพิ่มระดับค่าความเป็นกรด-ด่างจากสารประเภทต่าง ๆ ไป เช่น ปูนขาว หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะก่อให้เกิดเป็นโลหะหนักที่ละลายอยู่ในน้ำให้เกิดเป็นรูปไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ สมการที่ (2.9) จะอธิบายถึงปฏิกิริยาที่ทำให้โลหะหนักอยู่ในรูปไฮดรอกไซด์และตกตะกอนโดยโลหะหนักที่ตกตะกอนมีประจุ +2



ปริมาณโลหะหนักที่ออกจากบ่อตกตะกอนโดยมากจะมีความเข้มข้นของโลหะหนักน้อยกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่บางกรณีก็สามารถมีระดับความเข้มข้นที่น้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ขึ้นอยู่กับความสมบูรณ์ของทฤษฎีของการละลายน้ำที่ใช้ โดยปริมาณความเข้มข้นของโลหะที่ตกตะกอนอยู่ในรูปไฮดรอกไซด์จะขึ้นอยู่กับขอบเขตของปฏิกิริยา ค่าพีเอชและคุณสมบัติในการตกตะกอนของโลหะนั้น ๆ

จากรูปที่ 2.6 เป็นการอธิบายถึงการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ที่ระดับค่าพีเอชต่าง ๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่า โลหะหนักจะเป็นสารที่สามารถละลายได้ทั้งในกรดและด่าง (amphoteric) แต่ก็ทำให้ทราบระดับค่าพีเอชที่เหมาะสมในการทำการตกตะกอนให้อยู่ในรูปไฮดรอกไซด์ โดยปกติจากผลการทดลองจากชุดเครื่องมือจาร์เทสต์ (jar test) การตกตะกอนจะพบว่า อยู่ในช่วงค่าพีเอช 9 ถึง 11 ซึ่งสัมพันธ์กับจุดที่เหมาะสมในการตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์



รูปที่ 2.6 ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะไฮดรอกไซด์กับค่าพีเอช

จากกราฟในรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่า ช่วงที่เหมาะสมในการตกตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ของ ตะกั่วจะอยู่ที่ระดับค่าพีเอช ประมาณ 9.3

1.2) การตกตะกอนในรูปคาร์บอเนต (carbonate precipitation)

การตกตะกอนแคดเมียมและตะกั่วในรูปคาร์บอเนตจะมีความเหมาะสมมากกว่า การตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ เนื่องจากระดับพีเอชของรูปคาร์บอเนตจะอยู่ในระดับที่ 7.5-8.5 แต่ในรูปโลหะไฮดรอกไซด์ของโลหะทั้งสองจะอยู่ที่ระดับพีเอชมากกว่า 10 และปริมาณสลัดจ์ที่เกิดขึ้นในรูปโลหะคาร์บอเนตก็มากกว่าสลัดจ์จากรูปโลหะไฮดรอกไซด์ สมการที่ (2.10) ใช้ในการ อธิบายการตกตะกอนในรูปคาร์บอเนต มักจะใช้โซเดียมคาร์บอเนตมาใช้ในการอธิบาย โดย M จะเป็นโลหะที่มีประจุ +2



สำหรับกระบวนการตกตะกอนในรูปคาร์บอเนตนี้ มักจะไม่มีประสิทธิภาพสำหรับโลหะหนักทุกตัว จากการทดลองโดย Patterson (1987) ได้กล่าวว่า ไม่สามารถที่จะเพิ่มคุณภาพของ น้ำที่ออกจากกระบวนการตกตะกอนในรูปคาร์บอเนตของโลหะนิกเกิลและสังกะสี

ในกระบวนการทำให้ตกตะกอน โดยทั่วไปตะกั่วจะตกตะกอนในรูปตะกั่วคาร์บอเนต ($PbCO_3$) และตะกั่วไฮดรอกไซด์ [$Pb(OH)_2$] การเกิดตะกอนของตะกั่วขึ้นอยู่กับปริมาณของ คาร์บอเนตที่มีอยู่หรือที่เติมลงไป ในน้ำเสียและพีเอช น้ำเสียที่มีสภาพเป็นกรด โดยทั่วไปจะมี คาร์บอเนตในปริมาณต่ำ และจะเกิดการตกตะกอนในรูปตะกั่วไฮดรอกไซด์ ถ้าไม่มีการเติม คาร์บอเนตลงไป ตะกั่วคาร์บอเนตจะตกตะกอนได้มากกว่าตะกั่วไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีผลต่อกระบวนการ ที่ตามมาคือ จะต้องมีการตกตะกอน (sedimentation tank) และการเอาน้ำออกจากตะกอน (sludge dewatering) ที่ระดับพีเอชในช่วงกลาง ตะกั่วคาร์บอเนตจะอยู่ในรูปที่ไม่ละลายมากกว่า ตะกั่วไฮดรอกไซด์ ปริมาณคาร์บอเนตที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการตกตะกอนของตะกั่วคาร์บอเนต คือ 200 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต ปริมาณคาร์บอเนตที่มากกว่านี้ หรือที่พีเอช มากกว่า 9 จะทำให้ประสิทธิภาพในการตกตะกอนลดลง อย่างไรก็ตาม ระดับพีเอชที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดการตกตะกอนของตะกั่วคาร์บอเนต คือ ที่ช่วงพีเอช 7.5-9.0 ค่าพีเอชที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการตกตะกอนของตะกั่วไฮดรอกไซด์ จากการคำนวณค่าการละลายทางทฤษฎีและข้อมูลจาก การบำบัดชี้ให้เห็นว่า ในการที่จะทำให้เกิดการตกตะกอนของตะกั่วไฮดรอกไซด์ ที่มีประสิทธิภาพดี ที่สุด จะเกิดขึ้นที่ระดับพีเอช 10 ช่วงระดับพีเอชที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการตกตะกอนของตะกั่ว

ไฮดรอกไซด์อยู่ในช่วงที่แคบอย่างเห็นได้ชัดและประสิทธิภาพในการเกิดตะกอนไฮดรอกไซด์จะลดลงอย่างรวดเร็วที่พีเอชมากกว่า 10 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการกำจัดตะกั่วโดยการทำให้ตกตะกอนคือ ค่าการละลายของตะกั่ว (Lead solubility) และความสามารถในการตกตะกอนของตะกั่ว (Patterson, 1985)

Eckenfelder (1989) ได้กล่าวถึงการกำจัดตะกั่ว โดยการทำให้ตกตะกอนว่าตะกั่วจะตกตะกอนอย่างมีประสิทธิภาพในรูปตะกั่วคาร์บอเนต สารเคมีที่ใช้คือ โซดาแอส ซึ่งจะพบความเข้มข้นของตะกั่วที่ละลายอยู่ในน้ำทิ้งเพียง 0.01-0.03 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ช่วงพีเอช 9.0-9.5 นอกจากนี้ก็ยังมี การตกตะกอน โดยการใช้น้ำปูนขาวที่พีเอช 11.5 ซึ่งจะมีความเข้มข้นของตะกั่วเหลืออยู่ 0.019-0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร และการตกตะกอนในรูปตะกั่วซัลไฟด์โดยการใช้น้ำโซเดียมซัลไฟด์ที่พีเอช 7.5-8.5

Patterson, Allen และ Scala (1977) ได้ศึกษาถึงการกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมโดยเปรียบเทียบในการตกตะกอนระหว่างตะกั่วในรูปไฮดรอกไซด์ โดยการใช้น้ำโซดาไฟ และตะกั่วในรูปคาร์บอเนตโดยการใช้น้ำโซดาแอสพบว่า การตกตะกอนตะกั่วในรูปคาร์บอเนตจะให้ตะกอนที่มีความแน่นมากกว่า ซึ่งทำให้มีความสามารถในการกรองได้ดีกว่าตะกั่วไฮดรอกไซด์

แม้ว่าการกำจัดตะกั่วจะนิยมใช้วิธีการทำให้ตกตะกอนมากกว่าวิธีอื่น ๆ ก็ตาม เพื่อที่จะแยกส่วนน้ำใสและตะกอนออกจากกัน นอกจากนี้ยังต้องมีการจัดการกับตะกอน (sludge) ที่เกิดขึ้น เช่น การทำให้ตะกอนเข้มข้นขึ้น (sludge thickening) การนำเอาตะกอนออกจากตะกอน และการนำเอาจากตะกอนที่ได้ไปกำจัดซึ่งในส่วนนี้ก่อให้เกิดปัญหา และค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้นแก่ระบบบำบัดเป็นอย่างมาก จากรายงานของ Scholler, Van Dijk Wilms (1987) ได้กล่าวถึงการกำจัดโลหะหนัก โดยการตกผลึกในกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบด ซึ่งเป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่พัฒนามาจากการกำจัดความกระด้างในการผลิตน้ำประปาและการกำจัดฟอสเฟต ซึ่งเป็นวิธีที่มีการทำงานร่วมกันระหว่างการตกผลึกกับวิธีฟลูอิดไดซ์เบด ข้อดีของวิธีนี้คือ ไม่มีตะกอนเกิดขึ้น แต่เกิดเป็นผลึกบนอนุภาคเม็ดของแข็ง ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีก

2) การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange)

วิธีการกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียโดยใช้เรซิน (resin) ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินกับไอออนตะกั่ว โดยไอออนของเรซินที่ปล่อยออกมาเป็นไอออนที่ไม่มีพิษส่วนใหญ่เป็นไฮโดรเจนไอออน (H^+) หรือโซเดียมไอออน (Na^+) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีดังนี้ (พรสวรรค์, 2529 อ้างจาก Patterson, 1978)



จากการศึกษาตะกั่ว โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนพบว่า ใช้ได้ดีกับน้ำเสียที่มีตะกั่วเจือปน อยู่ในปริมาณต่ำ ๆ และเรซินที่ใช้ส่วนมากเป็นเรซินชนิดกรดฟอสโฟริก (phosphoric acid resin) ค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 5.0-5.2 ตะกั่วที่เหลืออยู่ในน้ำเสียหลังจากผ่านการกำจัดตะกั่วด้วยวิธีนี้แล้ว จะมีปริมาณตะกั่วเหลืออยู่เพียง 0.002 มิลลิกรัมต่อลิตร (มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมยอมให้มีปริมาณตะกั่วได้ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร) แต่ค่าใช้จ่ายด้วยวิธีนี้ค่อนข้างสูง เพราะว่าเรซินมีราคาแพง เรซินที่ใช้แล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกโดยการทำรีเจนเนเรชัน (regeneration) ด้วยกรด แต่ประสิทธิภาพของเรซินจะค่อย ๆ ลดลงจนใช้ไม่ได้ในที่สุด

3) การกำจัดโลหะหนักโดยการตกผลึกในกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบด

(Scholler, Van Dijk และ Wilms, 1987)

ถังปฏิกรณ์เป็นรูปทรงกระบอกภายในบรรจุอนุภาคชักนำ (seeding material) ที่เหมาะสม เช่น ทราयरของความเร็วในการไหลของของเหลวในถังปฏิกรณ์มีค่าสูง เพื่อให้จะให้เม็ดอนุภาคอยู่ในสภาวะเสมือนของไหลที่เหมาะสมและเพื่อป้องกันมิให้อนุภาคเหล่านั้นติดกัน

สารละลายที่มีสารประกอบของซีที (CT = ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดซึ่งเป็นผลรวมของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ไฮโดรเจนคาร์บอเนตไอออน (HCO₃⁻) และคาร์บอเนตไอออน (CO₃²⁻)) เช่น โซดาแอสจะถูกฉีดเข้าสู่ระบบในปริมาณที่จะให้ได้พีเอชและซีทีตามที่กำหนดไว้ โลหะหนักที่อยู่ในน้ำเสียจะถูกฉีดเข้าทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์สภาวะของกระบวนการ คือ ความเข้มข้นของโลหะ ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด และพีเอชในถังปฏิกรณ์จะต้องเหมาะสม เพื่อให้ให้เกิดการอิ่มตัวด้วยยิ่ง (supersaturation) ของโลหะคาร์บอน กลุ่มอนุภาคเสมือนของไหล จะให้พื้นที่ผิวในการตกผลึกมากและเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วในการที่โลหะจะตกผลึกเป็นโลหะคาร์บอเนตบนเม็ดอนุภาคเหล่านั้น ระบบนี้ควบคุมโดยค่าพีเอชและมีความเสถียรมาก เนื่องจากคุณสมบัติการเป็นบัฟเฟอร์ของคาร์บอน และผลจากระบบการหมุนเวียนกลับ ดังนั้น การดำเนินการของระบบนี้จึงง่ายและราคาในการดำเนินงานต่ำ

ผลึกที่เติบโตขึ้นบนผิวอนุภาคจะต้องกำจัดออกไปเป็นระยะ ๆ และจะต้องมีการเติมอนุภาคชักนำเข้าไปทดแทน ผลึกโลหะคาร์บอนที่ได้มีความบริสุทธิ์ และสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีกโดยการนำผลึกไปละลายในกรดแก่ ทำให้คาร์บอนเข้าไปอยู่ในรูปคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปจากระบบ และจะได้สารละลายของโลหะที่เข้มข้นและบริสุทธิ์โดย

สามารถนำอนุภาคซังน้ำ เช่น ทรายกลับมาใช้ในถังปฏิกรณ์ได้อีกสารละลายของโลหะที่เข้มข้นและบริสุทธิ์ สามารถนำกลับมาใช้ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมได้อีก

4) การดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์

วิธีนี้ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เป็นสารดูดติดผิวตะกั่ว ซึ่งถ่านกัมมันต์เป็นสารที่มีความสามารถในการดูดติดผิวไอออนโลหะและสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายชนิด รวมทั้งตะกั่วด้วย จากผลการทดลองของ Harrison และ Laxen (1981) พบว่า ถ่านกัมมันต์สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่ระดับพีเอชต่ำกว่า 5 และสามารถเข้ากับน้ำเสียที่มีปริมาณตะกั่วที่เข้มข้นสูงได้ แต่ถ่านกัมมันต์มีราคาแพง และถึงแม้ว่าจะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกโดยการทำรีเจนเนเรชัน (regeneration) แต่ค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกั่วโดยวิธีนี้ก็ยังคงสูงและประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่รีเจนเนเรตใหม่ก็จะลดลงจนหมดไปในที่สุด

5) การดูดติดผิวด้วยโลหะออกไซด์

การดูดติดผิวด้วยโลหะออกไซด์เป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีการศึกษาในการกำจัดตะกั่วมากขึ้นในปัจจุบันนี้ ดังจะได้กล่าวถึงรายละเอียดของการกำจัดตะกั่วด้วยวิธีการนี้เป็นสำคัญต่อไป

2.3 ทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์

จากผลการวิจัยของ Azizian, M., et.al.(1997) พบว่า ออกไซด์ของเหล็กจะควบคุมการเคลื่อนที่ของโลหะได้โดยการทำให้ช้าลงจากการดูดติดผิว ออกไซด์ของเหล็กจึงสามารถใช้เป็นวัสดุที่ใช้ในการดูดติดผิวสำหรับการกำจัดโลหะออกจากน้ำที่ได้รับการปนเปื้อนได้

การดูดติดผิวของไอออนบวกของไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์
(cation adsorption by hydrous metal oxides)

จากการเริ่มศึกษาเคมีของไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์และได้นำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการแยกธาตุหรือโลหะต่าง ๆ ออกจากสารละลาย ซึ่งกลไกนี้มีความซับซ้อนมากและยากที่จะนิยามเคมีของระบบ ดังนั้น ในทางทฤษฎีจึงมักจะสนใจเฉพาะพฤติกรรมของระบบออกไซด์และไอออนบวกมากกว่าที่จะเข้าใจกลไกภายใต้พฤติกรรมนั้น

ส่วนใหญ่แล้วแร่ธาตุต่าง ๆ ที่อยู่ในรูปตะกอนและมีพื้นที่ผิวใหญ่มาก ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งพวกดินเหนียว ผลึกเหล็กไฮดรอกไซด์ที่บริสุทธิ์ กรดซิลิซิกที่มีรูปร่างไม่แน่นอน หรือ อาจจะเป็นสารประกอบอินทรีย์ สารต่าง ๆ เหล่านี้สามารถดูดติดไอออนบวกและปล่อยไอออนบวกตัวอื่นออกมาในปริมาณเท่ากัน เรียกได้ว่า เกิดการแลกเปลี่ยนไอออน (cation exchange) ถ้าจะกล่าวถึงกลไกซึ่งส่งผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนบวกนั้น จะต้องศึกษาถึงความสามารถในการดูดติดผิวของไอออนประจุลบ (charged anion sites) ที่สามารถดูดติดไอออนบวกได้ อย่างเช่น SiOH^- , AlOH_2^- และ AlOH^- groups ในแร่ดินเหนียว FeOH -groups ในเหล็กไฮดรอกไซด์ คาร์บอกซิลและฟีนอลิก OH-groups ในสารประกอบอินทรีย์ เป็นต้น ในโครงสร้างที่เป็นผลึกนั้น จะต้องเกิดสมดุลของประจุลบ ถือว่าเป็นกระบวนการเลือก (selective process) คือ การเลือกที่จะดูดติดไอออนบวกตัวใดก็ได้และปล่อยไอออนบวกตัวอื่นออกมา จากนั้นจะเกิดสะสมไอออนโลหะไว้ที่ผิวระหว่างของแข็งและของเหลว (solid-liquid interface) ทำให้เกิดแรงระหว่างโมเลกุล เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การดูดติดผิว (adsorption) ในกรณีที่ไม่เจาะจงและไม่เลือกที่จะดูดติดไอออนใด การดูดติดผิวอาจเกิดเนื่องจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว หรือแรงดึงดูดทางไฟฟ้านั้นอาจเกิดมาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไฮโดรเจนหรือแรงแวนเดอร์วาลส์ และอาจกล่าวได้ว่า ปรากฏการณ์ดูดติดผิวเกิดเนื่องจากความเข้มข้นของตัวละลาย (solute) บนผิวของของแข็ง

ก่อนที่จะกล่าวถึงรายละเอียดต่อไปนั้น จะขอกกล่าวถึงแบบจำลองที่สำคัญมากซึ่งใช้ในการอธิบายการดูดติดผิวโลหะหนักบนตัวกลางดูดซับก่อน ได้แก่ แบบจำลองของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่พื้นผิว (Surface Complexation Model) ซึ่ง Davis และ Kent (1990) ได้สรุปแนวคิดพื้นฐานสำหรับแบบจำลองของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่พื้นผิวทั้งหมดไว้ดังนี้

1) พื้นผิวจะประกอบไปหมู่ฟังก์ชันจำเพาะ (specific functional groups) ซึ่งทำปฏิกิริยากับตัวถูกละลายเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่พื้นผิวในลักษณะที่คล้ายคลึงกับการเกิดปฏิกิริยาเชิงซ้อนในสารละลายแบบเดียวกัน

2) จุดสมดุลของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่พื้นผิวและปฏิกิริยาไอออนิกสามารถที่จะอธิบายได้โดยสมการกฎทรงมวล ด้วยการปรับแก้เทอร์ต่าง ๆ ให้ถูกต้อง (correction factors) ในการประยุกต์ใช้สำหรับพลังงานไฟฟ้าสถิตย์ที่แปรค่าได้โดยการใช้ทฤษฎี Electrical Double Layer

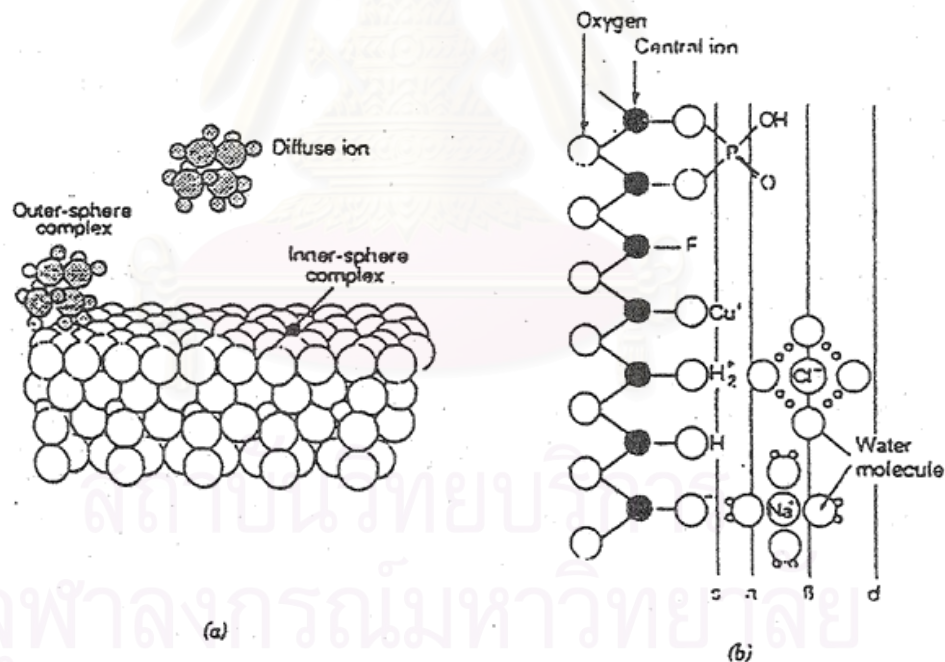
3) ประจุไฟฟ้าที่พื้นผิว (surface charge) และศักย์ไฟฟ้าที่พื้นผิว (surface electrical potential) จะเกิดจากปฏิกิริยาการดูดซับข้างในตัวเอง (Stumm และ Morgan, 1995)

4) ค่าคงที่ต่าง ๆ ในการเกิดพันธะที่ชัดเจนที่ต้องการจะเป็นค่าพารามิเตอร์อย่างง่ายต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับค่าคงที่ต่าง ๆ ทางเทอร์โมไดนามิกโดยค่าสัมประสิทธิ์การเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมของพื้นผิวชนิดต่าง ๆ

หรืออาจจะอธิบายได้ด้วยรูปที่ 2.7 ซึ่งแสดงตัวอย่างของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่พื้นผิว และสามารถจำแนกประเภทของจุดสมดุลของการดูดติดผิวในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่พื้นผิวได้ดังตารางที่ 2.2

ปรากฏการณ์พื้นผิวที่อธิบายได้อย่างดีที่สุด คือ Electrical Double Layer Model (EDL Model) ตัวอย่างสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.8 จากงานวิจัยของ Parks (1967) อ้างถึงใน Forstner and Wittman (1981)

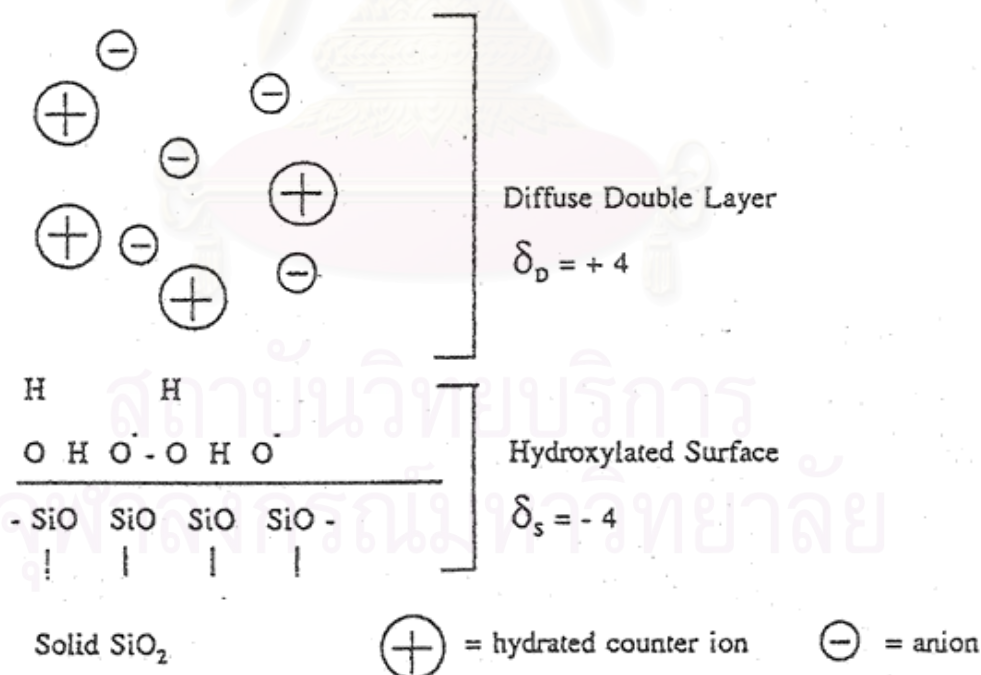
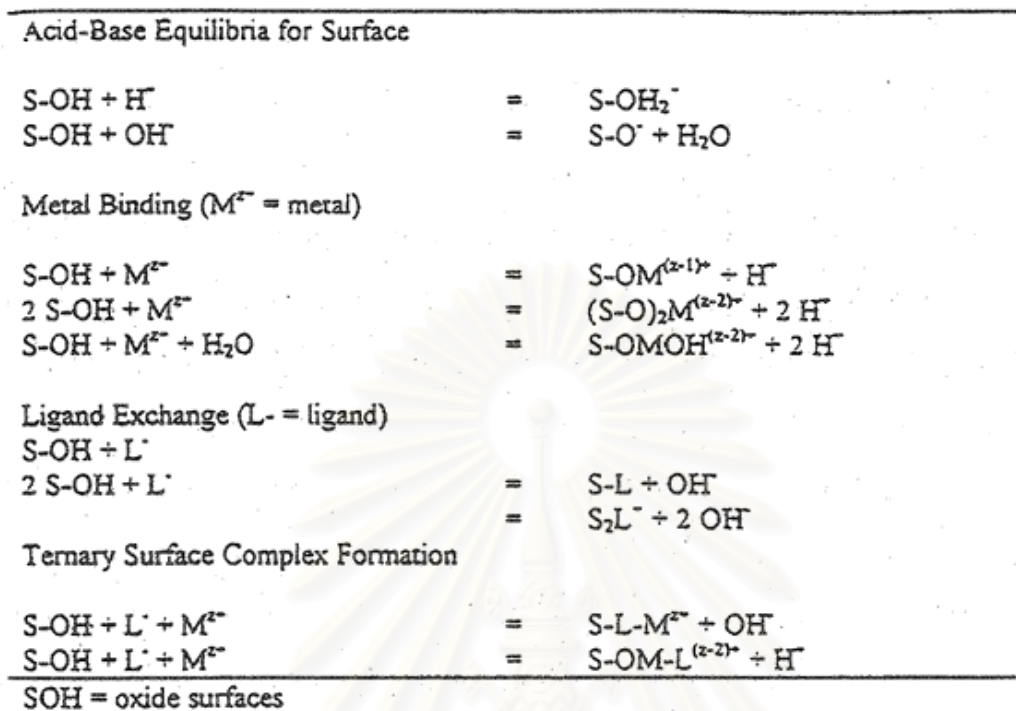
จากรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่า พื้นผิวของแข็งของซิลิกา (silica) ที่มีประจุไฟฟ้าอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบ เมื่อสัมผัสกับไอน้ำ ทำให้ไอออนและประจุที่ผิวของแข็งถูกเปลี่ยนกลับไปอยู่ที่ผิวของไฮดรอกไซด์ (MOH-groups) และการดูดติดผิวของไอน้ำจะเกิดขึ้นที่ coherent layer ของพันธะไฮโดรเจนของน้ำเป็นจุดแรก น้ำในส่วนนี้จะถูกแยกตัวออกมาจากน้ำทั้งหมด (ทั้งก่อน (Fripiat, 1965 อ้างถึงใน Forstner and Wittman, 1981) เมื่อความหนาของชั้นน้ำที่ถูกดูดติดเพิ่มขึ้น ทำให้ชั้นน้ำนี้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำทั้งหมด (ทั้งก่อน) และในสภาวะนี้ไฮโดรเจนไอออนซึ่งเคลื่อนตัวระหว่างผิวของกาซและของแข็ง จะแพร่กระจายอย่างอิสระเข้าไปในระบบของ



รูปที่ 2.7 (a) การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่พื้นผิว (surface complex) ของไอออนหนึ่งๆ บนพื้นผิวไฮดรอกไซด์

(b) แผนภาพที่ใช้ในการอธิบายพื้นผิวไฮดรอกไซด์ ซึ่งแสดงแนวที่เชื่อมติดกับหมู่ไฮดรอกซิลที่พื้นผิวทั้งแบบ inner-sphere complexes, outer-sphere complexes และ diffuse layer (Stumm และ morgan, 1995)

ตารางที่ 2.2 ประเภทของจุดสมดุลของการดูดติดผิวในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่พื้นผิว (Stumm และ Morgan, 1995)



รูปที่ 2.8 แสดง electrical double layer model : รูปแบบของพื้นผิว silicate in an electrolyte (from Parks, In: equilibrium concepts in natural water systems, 1967 ซึ่งอ้างถึงใน Forstner และ Wittman, 1981)

เหลว ทั้งหมดนี้ถูกจัดให้อยู่ในรูปของไฮดรอกซิลเลท (hydroxylate) ซึ่งมีประจุลบที่ผิวหน้า (surface layer) และมีประจุบวกที่ผิวชั้นใน (diffuse layer) โดยชั้นตอนต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น จะเกิดขึ้นในกรณีของแข็งถูกจุ่มลงในน้ำซึ่งเปรียบได้กับการดูดติดของไอออนจากสารละลายบนผิวของแข็ง

นอกจากนี้ ยังแสดงให้เห็นว่า ถ้าพื้นที่ผิวใหญ่มาก ๆ ได้มีการประยุกต์ใช้ทฤษฎีของ electrical double layer ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยประจุไฟฟ้าที่สัมผัสอยู่กับผิวของแข็ง Parks (1967) อ้างถึงใน Forstner and Wittman (1981) ได้แนะนำหลักการของ zero point of charge (ZPC) หรือ isoelectric point of the solid ($IEP_{(s)}$) ทั้งสองค่านี้ใช้เพื่อเป็นตัวแปรหลัก ซึ่ง ZPC เป็นค่าพีเอชที่ประจุไฟฟ้าที่ผิวของแข็งจากทุกแหล่งกำเนิดเท่ากับศูนย์ ถ้าประจุเกิดขึ้นเนื่องจากไฮโดรเจนไอออน (H^+) ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) และสารประกอบที่เกิดจากไฮโดรเจนไอออน ไฮดรอกไซด์ไอออนและน้ำทำปฏิกิริยากัน และอยู่ในรูปผลึกของแข็ง ค่า ZPC จึงจะถูกเรียกว่า $IEP_{(s)}$ แสดงถึงพฤติกรรมของการดูดติดของสารต่าง ๆ ในสิ่งแวดล้อมของน้ำ ยกตัวอย่างเช่น ไฮดรอกไซด์ออกไซด์จะแลกเปลี่ยนไอออนบวกในสภาวะต่างเมื่อพื้นผิวมีประจุลบ ในทางกลับกันถ้าอยู่ในสภาวะกรด และประจุที่พื้นผิวเป็นบวกจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนลบ

เนื่องจากในกระบวนการดูดติดผิวนั้นได้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวกด้วยซึ่งผลรวมของไอออนบวกที่มีการแลกเปลี่ยน (รวมทั้งไฮโดรเจนไอออน) จะเรียกว่า ขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยน (exchange capacity) มีหน่วยเป็นมิลลิเอควิวาเลนต์ (meq) ต่อ 100 กรัม ซึ่งได้กล่าวไว้ในตอนต้นแล้วว่า ไฮดรอกไซด์ของโลหะต่าง ๆ ที่เคลือบบนผิวของแข็งนั้น จะต้องทราบปริมาณไอออนที่จะแลกเปลี่ยนได้บนพื้นผิวนั้น ทำให้ทราบถึงปริมาณไอออนที่จะถูกดูดติดและสะสมอยู่บนพื้นผิว

นอกจากจะขึ้นอยู่กับค่า ZPC หรือ IEP แล้ว สภาวะสมดุลของการดูดติดผิวก็ยังเป็นสิ่งสำคัญต่อกระบวนการดูดติดผิวด้วย สภาวะสมดุลนี้เกิดขึ้นระหว่างปริมาณของไอออนบวกที่สะสมอยู่บนผิวของสารดูดติดกับความเข้มข้นของไอออนนั้นในสารละลาย ถ้าปริมาณของไอออนโลหะหนักในสารละลายมากขึ้น ปริมาณของไอออนบวกที่ถูกดูดติดก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย และจะมีการคายสารออกมาเมื่อความเข้มข้นของสารละลายลดลง จนกระทั่งเกิดสภาวะสมดุลใหม่ขึ้นมา

ในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก ไอออนสามารถที่จะเลือกว่า จะแลกเปลี่ยนกับไอออนใดก็ได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับลำดับความชอบของไอออน (affinity) ตามปัจจัยดังนี้ (scheffer & schachtschabel, 1966 อ้างถึงใน Forstner and Wittman, 1981)

1) ผลของวาเลนซ์และไฮเดรชัน ลำดับความชอบจะเพิ่มขึ้นตามเลขออกซิเดชันที่เพิ่มขึ้น เรียกว่า valence effect ดังนี้ $Me^+ < Me^{2+} < Me^{3+} \dots\dots$ และจะลดลงตามเส้นผ่านศูนย์กลาง

กลางของไอออนบวกที่ถูกไฮเดรต ซึ่งความหนาแน่นของประจุใน alkali และ alkaline earth จะเพิ่มมากขึ้น เรียกว่า hydration effect ดังนี้ $Ba < Sr < Ca < Mg < Cs < Rb < K < Na < Li$

2) ความเข้มข้นของสารละลาย ถ้าความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จำนวนไอออนบวกที่ถูกแลกเปลี่ยนก็จะเพิ่มขึ้นด้วย และในสภาวะสมดุล ตัวแลกเปลี่ยนไอออน กับไอออนบวกที่มีวาเลนซ์ต่างกัน แสดงให้เห็นถึงลำดับความชอบของไอออนที่มีประจุมากกว่า ดังได้กล่าวไว้ในข้อ 1)

3) ปฏิริยาไฮโดรไลซิสของไอออนบวก การเพิ่มความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกเป็นผลเนื่องมาจากการเพิ่มปฏิริยาไฮโดรไลซิสของไอออนบวกที่จะแลกเปลี่ยน อย่างเช่น hydroxy complex ($CuOH^+$, $FeOH^{2+}$, etc.) จะถูกดูดติดโดยของแข็งมากกว่าไอออนบวกที่ไม่ใช่สารประกอบเชิงซ้อน (เช่น Cu^{2+} , Fe^{3+} , etc.)

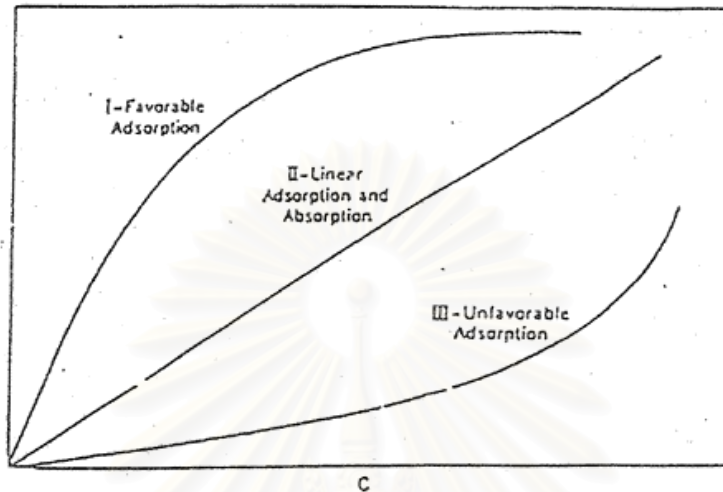
ตัวอย่างแสดงกลไกการดูดติดโลหะหนักบนไฮดรอกไซด์โดย Hildebrand & Blum (1974) อ้างถึงใน Forstner and Wittman (1981) จากตัวอย่างของตะกั่ว (Pb) ประจุ +2 ทำปฏิริยากับเหล็กไฮดรอกไซด์โดยตะกั่วจะถูกดูดติดใน stern layer ของโครงสร้างของไฮดรอกไซด์ และแลกเปลี่ยนไฮโดรเจนไอออนออกมาจนกระทั่งตะกั่วแสดงความชอบที่จะยึดเหนี่ยวกับกลุ่มไฮดรอกซิลของผลึก $FeO(OH)$ ต่อจากนั้น Gadde & Laitinen (1973) ซึ่งอ้างถึงใน Forstner and Wittman (1981) ได้ศึกษาเพิ่มเติมว่า การดูดติดของตะกั่วประจุ +2 ที่พีเอชประมาณ 5-7 จะลดลงอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งในช่วงพีเอชนี้ $FeOOH$ จะมีประจุบวก

อาจกล่าวได้ว่า การดูดติดผิวของโลหะหนักต้องขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโลหะที่ถูกดูดติด ความเข้มข้นของโลหะอื่นที่ปนอยู่ในสารละลาย พีเอชและรูปแบบของไอออนเชิงซ้อน

2.4 กระบวนการดูดติดผิว (adsorption)

การดูดติดผิวถูกค้นพบครั้งแรกโดย Scheele ในปี ค.ศ.1773 ซึ่งเป็นการดูดติดผิวของก๊าซ และต่อมาในปี ค.ศ.1785 Lowitz ได้ค้นพบการดูดติดผิวของสารละลาย เป็นที่ทราบกันดีว่า การดูดติดผิวเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี การดูดติดผิวของแข็งโดยเฉพาะอย่างยิ่งบนถ่านไวงาน (active carbon) ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดทั้งน้ำดีและน้ำเสีย การดูดติดผิวเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิว หรือระหว่างหน้า (Interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นที่ระหว่างของ 2 สภาวะใด ๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดติดผิว เรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) รูปที่ 2.9 แสดงการกระจายโมเลกุลระหว่างของเหลวและพื้นผิวของของแข็ง โดยที่ C บนแกนอน

หมายถึง ความเข้มข้นของสารในของเหลวที่สัมผัสกับของแข็งบริเวณระหว่างหน้าของของเหลวกับของแข็งและ q บนแกนตั้ง หมายถึง จำนวนของสารที่ผ่านข้ามระหว่างหน้า



รูปที่ 2.9 การกระจายโมเลกุลระหว่างของเหลวและพื้นผิวของแข็ง (Weber, 1972)

จากรูป 2.9 เส้นโค้ง 1 และ 3 แสดงถึงการดูดติดผิวโดยความเข้มข้นของสารบนพื้นผิวของของแข็งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ในของเหลว เส้นโค้งนี้แสดงถึงรูปแบบการดูดติดผิวที่ดี (favorable) และไม่ดี (unfavorable) ส่วนเส้นโค้งที่ 2 แสดงรูปแบบการดูดติดผิวแบบเส้นตรงจะเกิดขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารบนผิวของของแข็งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ในของเหลว

การดูดติดผิวมีความสามารถในการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำเสีย ที่เป็นทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยอาศัยกลไกทางกายภาพเคมี สำหรับสิ่งเจือปนในน้ำเสียที่กระบวนการดูดติดผิวกำจัดได้มีหลายชนิด เช่น สี กลิ่น บีโอดี ซีโอดี ยาฆ่าแมลง เป็นต้น (Metcalf and Eddy, 1991) Rizzo (1971) กล่าวว่า การดูดติดผิวเป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการควบคุม มีประสิทธิภาพที่ดี และระบบมีความทนทานต่อสารพิษ ซึ่งมีผลกระทบอย่างมากต่อระบบชีวภาพ นอกจากนี้ยังมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับระบบชีวภาพ คือ ต้องการพื้นที่น้อย ไม่มีกลิ่นที่น่ารังเกียจ ไม่มีผลกระทบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพีเอช อุณหภูมิ หรือปริมาณอินทรีย์ (organic load) ที่ไม่คงที่ เงินลงทุนต่ำ ไม่มีสลัดจ์และระบบมีความยืดหยุ่นสูง สามารถเพิ่มหรือลดขนาดของระบบได้ง่าย

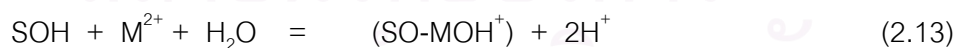
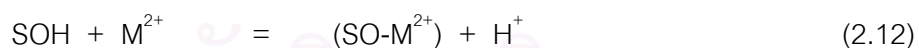
2.4.1 กลไกการดูดติดผิวและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล

(adsorption process and rate of molecular transfer)

1) กลไกการดูดติดผิว (adsorption mechanism)

การดูดติดผิวของสารประกอบอินทรีย์เกิดจากแรงรวมตัว (binding force) หลายชนิดระหว่างโมเลกุลของสารอินทรีย์และพื้นผิวของคาร์บอน ซึ่งแรงทั้งหมดมีแหล่งที่มาจากอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic interaction) การดูดติดผิวที่สำคัญแบ่งเป็น 2 แบบ คือ การดูดติดผิวทางกายภาพ (physisorption) และการดูดติดผิวทางเคมี (chemisorption) (Eckenfelder, 1981) การดูดติดผิวทั้ง 2 แบบนี้เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้และยึดติดกับผิวของของแข็ง สามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารที่อยู่ในของเหลวได้ (Cheremisinoff and Ellerbusch, 1978)

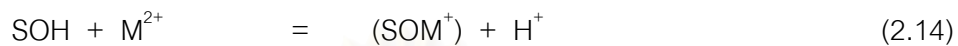
การดูดติดผิวทางกายภาพเป็นผลมาจากกิริยา (action) ของแรงวันเดอร์วาลส์ (Van der waals force) ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) (Eckenfelder, 1981) โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะดูดติดกันทางกายภาพกับโมเลกุลของสารดูดติดผิว การดูดติดผิวแบบนี้เป็นการดูดติดผิวแบบหลายชั้น (multilayered) กล่าวคือ แต่ละชั้นของโมเลกุลที่ถูกดูดติดก่อนหน้านี้ โดยจำนวนชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของโมเลกุลของสารดูดติดผิว หรือจำนวนชั้นของโมเลกุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวเพิ่มขึ้น (Cheremisinoff and Ellerbusch, 1978) หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการเกิดปฏิกิริยาแบบ Outer-Sphere Surface Reaction ดังสมการที่ (2.12) และ (2.13)



เมื่อ SOH คือ พื้นผิวไฮดรอกซิล
 M^{2+} คือ ไดวาเลนต์แคทไอออน
 H^+ คือ ไฮโดรเจนไอออน

การดูดติดผิวทางเคมีเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารถูกดูดติดผิวและสารดูดติดผิว ซึ่งก่อให้เกิดสารประกอบทางเคมีขึ้น การดูดติดผิวทางเคมีแตกต่างกับการดูดติดผิวทางกายภาพ เนื่องจาก

จากเป็นการดูดติดผิวแบบชั้นเดียว (monolayered) และไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible) ส่วนการดูดติดผิวทางกายภาพสามารถที่จะผันกลับได้ (reversible) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดติดผิว ถ้าหากแรงดึงดูดนั้นอ่อนลงจะเป็นผลให้เกิดการคายสารออก (desorption) ขึ้น (Cheremisinoff and Ellerbusch, 1978) การดูดติดผิวทางเคมีนั้นอาจกล่าวได้ว่าเป็นการเกิดปฏิกิริยาแบบ Inner-Sphere Surface Reaction ดังสมการที่ (2.14)



เมื่อ SOH คือ พื้นผิวไฮดรอกซิลออกไซด์
 M^{2+} คือ ไดวาเลนต์แคทไอออน
 H^+ คือ ไฮโดรเจนไอออน

Kiselev (1965, Voice and Weber, 1983) กล่าวว่า ความแข็งแรงของแรงดึงดูดสามารถวัดได้จากผลต่างของความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดติดผิว โดยการดูดติดผิวทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำ โดยทั่วไปประมาณ 2-10 กิโลแคลอรีต่อโมล ส่วนการดูดติดผิวทางเคมีจะให้พลังงานประมาณ 15-50 กิโลแคลอรีต่อโมล นอกจากนี้ Hassler (1963) ยังได้กล่าวเพิ่มเติมว่าการดูดติดผิวทางกายภาพจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การดูดติดผิวทางเคมีเพิ่มขึ้น

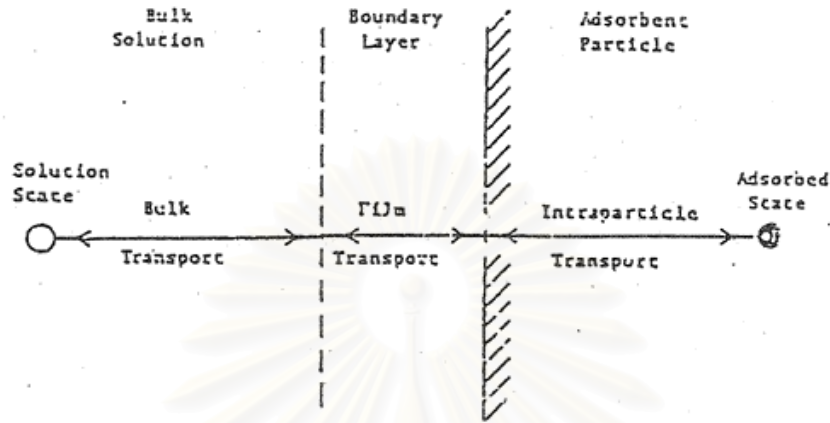
2) อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (rate of molecular transfer)

อัตราการดูดติดผิวมีความสำคัญอย่างมาก อัตราการดูดติดผิวที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดติดผิวจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิว ขั้นตอนในการดูดติดผิวของสารจากสารละลายโดยสารดูดติดผิวที่มีรูพรุนมี 3 ขั้นตอน คือ

2.1) การขนส่งทั้งก้อน (bulk transfer) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลว จะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบาง ๆ ที่ห่อหุ้มสารดูดติดผิว

2.2) การขนส่งชั้นฟิล์ม (film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบาง ๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดติดผิว การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม (film diffusion) จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิวขั้นตอนหนึ่ง

2.3) การขนส่งภายในอนุภาค (intraparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดติดผิว (pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดติดผิวขึ้นภายในชั้นตอนนี้จัดเป็นชั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิวเช่นเดียวกัน



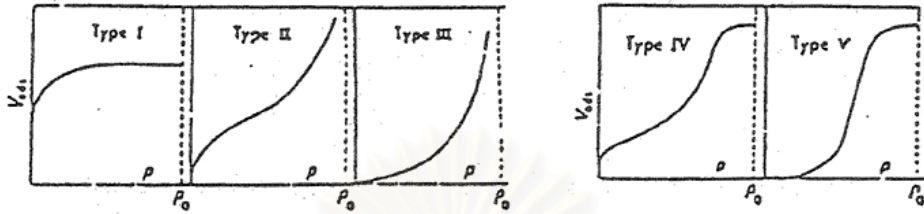
รูปที่ 2.10 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์ (Eckenfelder, 1981)

ภายใต้สภาวะการทำงานหนึ่ง ๆ การขนส่งชั้นฟิล์มจัดเป็นชั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิว แต่ถ้าหากว่า ภายในระบบมีสภาพความปั่นป่วนเพียงพอ ขั้นตอนการขนส่งภายในอนุภาคจะเป็นชั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดติดผิว

2.4.2 สมดุลการดูดติดผิว (adsorption equilibrium)

การดูดติดผิวจากสารละลายมีผลต่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนพื้นผิวของของแข็งในขณะที่เกิดการดูดติดผิวขึ้น ตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวมีแนวโน้มที่จะหลุดออกมาสู่สารละลายเมื่ออัตราการดูดติดผิว และอัตราการคายสารออกเข้าสู่สภาวะคงที่ (equilibrium state) ซึ่งเรียกว่า สมดุลของการดูดติดผิว (adsorption equilibrium) ที่จุดสมดุลนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของสารดูดติดผิว หรือในของเหลว สมดุลนี้เป็นลักษณะเฉพาะของระบบทั้งหมด ไม่ว่าจะเป็นตัวถูกละลาย สารดูดติดผิว ตัวทำละลาย พีเอช อุณหภูมิและอื่น ๆ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดที่จุดสมดุล โดยปกติจะเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกละลาย การแสดงปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดต่อหน่วยของสารดูดติดผิว ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่จุดสมดุลในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า ไอโซเทอมการดูดติดผิว (adsorption isotherm)

รูปร่างของไอโซเทอมการดูดติดผิว จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการดูดติดผิว และปริมาณของสารถูกดูดติดผิวบนพื้นผิวสารดูดติดผิว รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอมการดูดติดผิวมี 5 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งจากไอโซเทอมรูปที่ 1 เป็นระบบที่การดูดติดผิวเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียว ส่วนแบบที่เหลือเป็นการดูดติดผิวของโมเลกุลหลายชั้น



รูปที่ 2.11 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบพื้นฐาน (Faust and Aly, 1987)

มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หลายรูปแบบที่นำมาใช้อธิบายถึงข้อมูลของการดูดติดผิว ซึ่งเป็นผลมาจากการพัฒนาทางทฤษฎีและผลจากการทดลอง ซึ่งรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีดังนี้

1) ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

สมมติฐานพื้นฐานของแบบจำลองแลงมัวร์ ที่เรียกว่า Ideal Localized Monolayer Model คือ

- 1.1) โมเลกุลถูกดูดติดอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของสารดูดติดผิว
- 1.2) แต่ละบริเวณสามารถดูดติดได้เพียงโมเลกุลเดียว
- 1.3) พื้นที่ของบริเวณที่ดูดติดผิวมีจำนวนที่แน่นอนซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นผิว
- 1.4) พลังงานการดูดติดผิวแต่ละบริเวณมีค่าเท่ากัน

การดูดติดผิวตัวถูกละลายจากสารละลายโดยสารดูดติดผิวของไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ แสดงดังสมการที่ (2.15)

$$X = (X_m b C_e) / (1 + b C_e) \quad (2.15)$$

โดยที่ X = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดติดผิว
มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม

X_m = ปริมาณของตัวถูกละลายต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดติดผิว ที่ใช้ในการสร้างแผ่นชั้นเดียว (monolayer) มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมหรือโมลต่อกรัม

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่จุดสมดุลมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตรหรือ
โมลต่อลิตร

b = ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดติดผิว

จากสมการที่ (2.15) เมื่อ X เข้าใกล้ X_m และ C_e เข้าใกล้อนันต์ (infinity) สมการที่

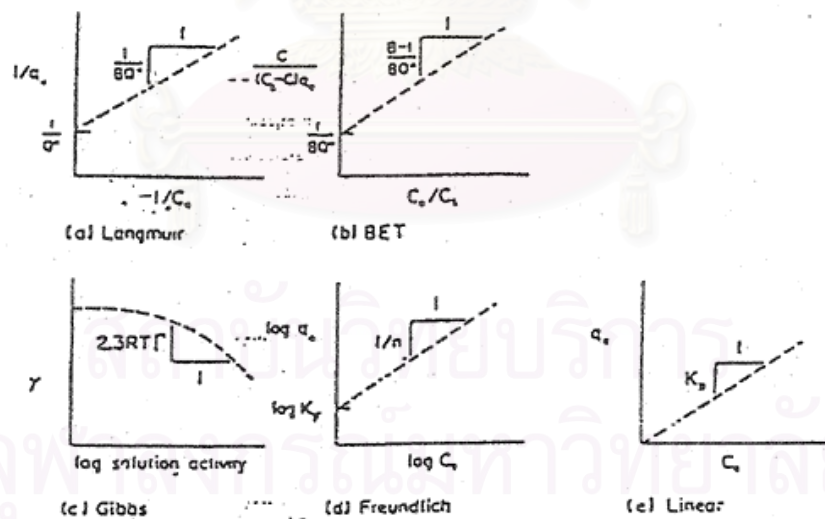
(2.15) สามารถเขียนได้เป็น

$$C_e/X = (1/bX_m) + (C_e/X_m) \quad (2.16)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า C_e/X กับ C_e จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/X_m$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ $1/bX_m$ สมการเส้นตรงแบบนี้สามารถเขียนได้โดยนำ C_e ไปหารสมการที่ (2.16) จะได้สมการ

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

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/X$ กับ $1/C_e$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/bX_m$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ $1/X_m$ รูปที่ 2.12 เป็นกราฟแสดงไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์



รูปที่ 2.12 กราฟแสดงไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบต่าง ๆ (Voice and Weber, 1983)

2) ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบเบท

(BET, Brunauer Emmerett-Teller Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมแบบเบทพัฒนามาจากไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ นำมาใช้สำหรับการดูดติดผิวแบบหลายชั้น (multilayer) ซึ่งมีสมมติฐานพื้นฐานของแบบจำลอง คือ แต่ละโมเลกุลในชั้นแรกจะเป็นแหล่งที่ซึ่งเกิดการดูดติดผิวของโมเลกุลในชั้นที่สองและชั้นต่อไป สมการการดูดติดผิวแบบเบท แสดงในสมการที่ (2.18)

$$X = (X_m B C_e) / (C_s - C_e) [1 + (B-1)C_e/C_s] \quad (2.18)$$

โดยที่ X : ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดติดผิว หน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมหรือโมลต่อกรัม

X_m : ปริมาณของตัวถูกละลายต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดติดผิวที่ใช้ในการสร้างแผ่นชั้นเดียว มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมหรือโมลต่อกรัม

C_e : ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตรหรือโมลต่อลิตร

C_s : ความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายในน้ำที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตรหรือโมลต่อลิตร

B : ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดติดผิว

สมการที่ (2.18) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$C_e/X(C_s - C_e) = (1/X_m B) + [(B-1)/X_m B](C_e/C_s) \quad (2.19)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $C_e/X(C_s - C_e)$ กับ C_e/C_s จะได้เส้นตรงที่มีความชัน $(B-1)/X_m B$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ $1/X_m B$

3) ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช (Freundlich adsorption isotherm)

ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิชใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการอธิบายการดูดติดผิวในระบบของของเหลว ซึ่งมีสมการดังนี้

$$x/m = KC_e^{1/n} \quad (2.20)$$

- โดยที่ x : จำนวนของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิว มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร หรือโมลต่อลิตร
- m : น้ำหนักของสารดูดติดผิว มีหน่วยเป็นกรัม
- C_e : ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร หรือโมลต่อลิตร
- $K, 1/n$: ค่าคงที่ของระบบ

เนื่องจากสมการฟรุนดลิชเป็นฟังก์ชันแบบเอ็กโปเนนเชียล (exponential) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ ดังนี้

$$\log(x/m) = \log K + (1/n) \log C_e \quad (2.21)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log(x/m)$ กับ $\log C_e$ จะได้เส้นตรงซึ่งมีความชันเท่ากับ $1/n$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ $\log K$ เมื่อ $\log C_e = 0$ ($C_e = 1$) กราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช แสดงดังรูปที่ 2.12 ค่า $1/n$ ที่ได้จากการดูดติดผิวของสารประกอบอินทรีย์ด้วยถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่จะมีค่าน้อยกว่า 1 สำหรับค่า $1/n$ ที่เกือบจะเท่ากับ 1 แสดงถึงความจุของการดูดติดผิวที่ดี

การประมาณค่า C_{eq} ของ Langmuir equation นั้นลดรูปเป็น Freundlich equation ด้วยเหตุผลที่ว่า Freundlich equation เป็นพาราโบลา ดังนั้น ถ้าจะกล่าวถึงการดูดติดผิวในเชิงคณิตศาสตร์ จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีการจำกัดตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น นั่นคือ จะไม่มีการดูดติดผิวที่มากที่สุด ในทางตรงข้าม Langmuir equation จะเป็นเส้นตรงผ่านจุดเริ่มต้น และจะมีค่าการดูดติดผิวที่มากที่สุดที่ทราบค่าแน่นอน Guy & Chakrabarti (1975) อ้างถึงใน Forstner and Wittman (1981) ได้ทดลองศึกษาการดูดติดผิวของโลหะหนัก เช่น Cu, Pb, Cd และ Zn บนแร่ดินเหนียวตาม Freundlich isotherms ในขณะที่เขาศึกษาการดูดติดบนกรดฮิวมิก และ hydrous Fe/Mn oxides โดยใช้ Langmuir isotherms

2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว (Factors influencing adsorption)

1) ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดติดผิว (Size and surface area)

ความสามารถในการดูดติดผิวของสารดูดติดผิวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะและอัตราการดูดติดผิวเป็นส่วนผกผันกับขนาดสารดูดติดผิว เนื่องจากปฏิกิริยาที่พื้นผิวเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของพื้นที่ผิว อัตราการดูดติดผิวจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของสารดูดติดผิวเมื่อสารดูดติดผิวนั้นไม่มีรูพรุน สำหรับสารดูดติดผิวที่มีรูพรุนอัตราการเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นผิวภายในรูพรุนถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า การขนส่งชั้นฟิล์ม (film transport) ดังนั้น อัตราการดูดติดผิวจะเป็นอัตราส่วนกับเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของสารดูดติดผิว ในทางกลับกันถ้าการเคลื่อนที่ภายในอนุภาคเป็นตัวควบคุมอัตราการดูดติดผิว การดูดติดผิวจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของสารดูดติดผิว Diamadopoulos และคณะ (1993) ได้ศึกษาการดูดติดผิวของฟินอลด้วยถ่านกัมมันต์ที่ทำจากถ่านหินลิกไนต์ พบว่า ปริมาณของฟินอลที่ถูกดูดติดผิวเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณฟินอลที่ถูกดูดติดมีค่าสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวน้อยกว่าถึง 3.5 เท่า Mathews และ Zayas (1989) กล่าวว่า สัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลภายนอกประมาณได้ว่าคงที่ สำหรับอนุภาคที่มีขนาดอยู่ในช่วง 300 มิลลิเมตรถึง 900 มิลลิเมตร (50/70 ขนาดตะแกรงมาตรฐานถึง 20/25 ขนาดตะแกรงมาตรฐาน) สำหรับการวัดค่าจากพื้นที่ผิวเท่ากัน และจะลดลงเมื่อเพิ่มเส้นผ่าศูนย์กลางของคาร์บอน Randtke และ Snoeyink (1983) กล่าวว่า ความจุของการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์เม็ด จะมีค่าแตกต่างกันไปตามขนาดของเม็ดถ่านกัมมันต์

2) ลักษณะของสารถูกดูดติดผิว (Nature of adsorbate)

สิ่งที่สำคัญในการดูดติดผิวตัวถูกละลายจากสารละลายอย่างหนึ่งก็คือ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลาย การดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายมีค่าลดลง เนื่องจากในการดูดติดผิวตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย โดยทั่วไปแล้วความสามารถในการละลายของสารประกอบอินทรีย์ในน้ำจะลดลงเมื่อความยาวของพันธะถูกไฮยวซัน (Wang, Leonard, Wang and Goupil, 1975) นอกจากนี้ ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายยังมีผลต่ออัตราการดูดติดผิวอีกด้วย เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกการดูดติดผิว ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายจะแปรผกผันกับอัตราการดูดติดผิว ดังแสดงในรูปที่ 2.28 ส่วนรูปที่ 2.29 แสดงผลของน้ำหนักโมเลกุลที่มีต่อการดูดติดผิว

Handshaw (1972) กล่าวเพิ่มเติมว่า ถ่านกัมมันต์มีสัมพรรคภาพ (affinity) ในการดูดติดผิวของโมเลกุลอินทรีย์ไม่มีขั้วจากตัวทำละลายที่มีขั้ว เช่น น้ำ เป็นต้น Bernardin (1976)

กล่าวว่า ปัจจัยที่สำคัญ 3 อย่างที่มีผลต่อการดูดติดผิวสารอินทรีย์ คือ โพลาลิตี (polarity) โครงสร้างของโมเลกุล และน้ำหนักโมเลกุลของสารอินทรีย์ โมเลกุลที่มีโพลาลิตีสูงสามารถที่จะละลายน้ำได้ดีทำให้ยากต่อการดูดติดผิว โครงสร้างของโมเลกุลมีผลต่อพื้นผิวที่ยึดติดบนผิวคาร์บอน เช่น วงแหวนอะโรมาติก (aromatic rings) ทำให้การดูดติดผิวดีขึ้น น้ำหนักโมเลกุลมีผลต่อการดูดติดผิวเนื่องมาจากผล 2 ประการ คือ ความสามารถในการละลายแลแรงดึงดูดสูง จึงสามารถที่จะดูดติดผิวได้ง่าย อย่างไรก็ตาม กฎเหล่านี้จะใช้ได้สำหรับโมเลกุลสารอินทรีย์ที่เล็กกว่าขนาดรูพรุนของคาร์บอน ขนาดของรูพรุนของผิวคาร์บอนจะอยู่ระหว่าง 10 อังสตรอม (\AA) ถึง 1000 อังสตรอม ดังนั้น โมเลกุลที่ใหญ่กว่า 1000 อังสตรอม จะไม่สามารถดูดติดได้

3) พีเอช (pH)

ผลของพีเอชต่อการดูดติดผิวนั้น จากการศึกษาในช่วงแรก ๆ ในปี 1951 โดย Kurbatov et al. สรุปได้ว่า กระบวนการดูดติดผิวต้องขึ้นอยู่กับพีเอช ต่อจากนั้นได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวางขึ้นและพบว่า พีเอชเป็นตัวแปรหลักสำคัญที่กำหนดความสามารถของการดูดติดผิว ซึ่งพอจะอธิบายได้ดังนี้ ที่พีเอชต่ำ ๆ จะไม่เกิดการดูดติดผิวเลย แต่เมื่อพีเอชเริ่มเพิ่มขึ้นถึงแม้จะเป็นช่วงแคบ ๆ แค่ 1-2 หน่วยก็ตาม ที่จุดนั้นการดูดติดผิวเริ่มเกิดมากขึ้นเรื่อย ๆ จาก 0 จนเกือบจะถึง 100% แต่ถ้าพีเอชยังคงเพิ่มต่อไปเรื่อย ๆ จะทำให้เกิดการคายสารที่ดูดติดออกมา ดังนั้น ช่วงของ พีเอชที่น่าสนใจจึงแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงพีเอชที่ทำให้เกิดการดูดติดมากที่สุดและช่วงพีเอชที่ทำให้เกิดการคายสาร ซึ่งทั้งสองช่วงนี้จะเกิดที่พีเอชสูง ๆ นอกจากจะขึ้นอยู่กับพีเอชแล้ว จำนวนประจุของไอออนบวกก็มีผลต่อพีเอชด้วย (David & Marion, 1976) ดังนี้

3.1) ไอออนประจุบวกหนึ่ง (Monovalent cations)

มีงานวิจัยหลายชิ้นได้ให้ความสำคัญของพีเอชเสมือนเป็นปัจจัยควบคุมความสามารถของการดูดติดไอออนบวกบนไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์ ส่วนใหญ่แล้วการดูดติดผิวของไอออนประจุบวกหนึ่งอย่างเช่น โลหะไอออนบวกประเภทอัลคาไลน์จะขึ้นกับประจุที่ผิวของออกไซด์โดยตรง ซึ่งจะพิจารณาจากจำนวนของไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออนที่ดูดติดโดยจะอธิบายคร่าว ๆ ดังนี้ การดูดติดผิวของไอออนบวกจะเกิดน้อยมากที่ ZPC แต่ถ้ามากกว่าค่า ZPC ขึ้นไป ไอออนบวกจะถูกดูดติดในปริมาณที่เท่ากับประจุลบทั้งหมดที่พื้นผิว และในส่วนของประจุลบที่พื้นผิวจะเกิดสมดุลได้โดยการคัดเลือกไอออนลบบางตัวออกไป แต่จะเป็นเพียงส่วนน้อยถ้าเทียบกับประจุทั้งหมด และจะเกิดในกรณีที่มีความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์สูงมาก ๆ

จากการที่กล่าวถึงความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ จึงได้มีการทำการทดลองเพื่อสร้างกราฟระหว่างประจุไฟฟ้าและพีเอช ซึ่งเป็นวิธีทางอ้อมในการวัดความหนาแน่นของไอออนที่

electrical double layer ที่พีเอช และความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ที่กำหนด โดยการไตเตรทสารแขวนลอยออกไซด์ด้วยกรดหรือเบสก็ได้ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กันของอิเล็กโทรไลต์ตัวเดียวกัน และที่จุดตัดของ titration curve หลาย ๆ เส้น จะแสดงค่า ZPC ซึ่งกราฟของออกไซด์ต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 2.13 และจะเห็นได้ว่าการดูดติดของไอออนบวกเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของพีเอช และความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์

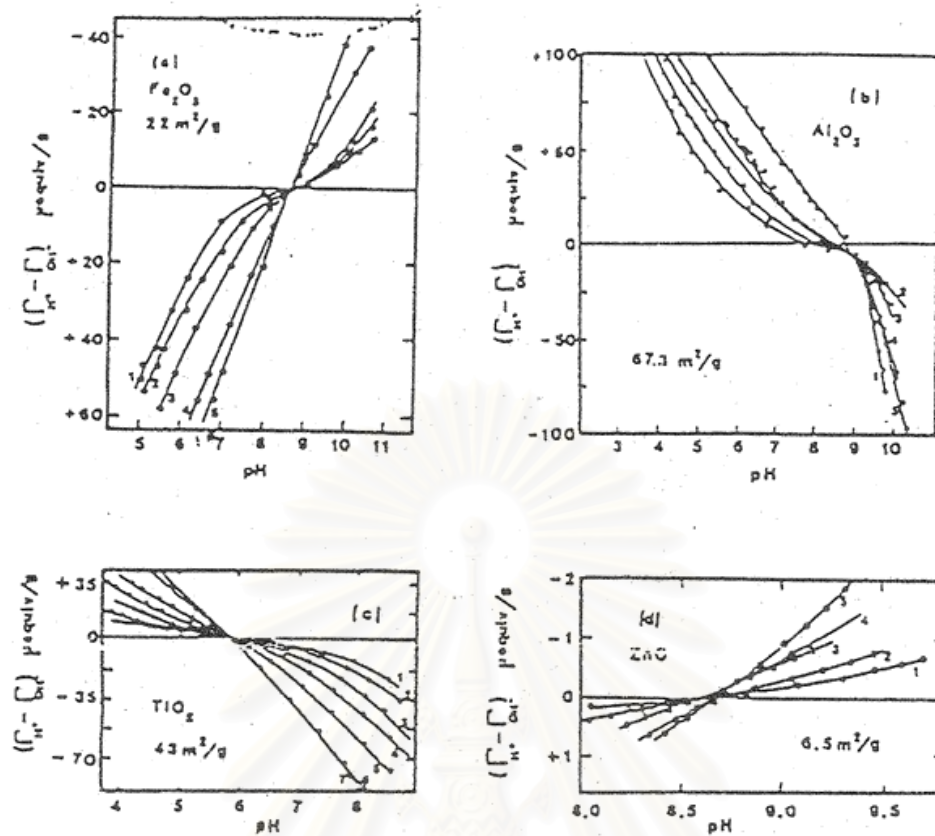
ในกรณีที่พื้นผิวจะจางจะดูดติดเฉพาะไอออนประจุบวกหนึ่งนั้น การดูดติดผิวนอกจากจะขึ้นกับพีเอชแล้วยังขึ้นกับกลไกของการดูดติดด้วย แต่ในกรณีที่การดูดติดผิวไม่เจาะจงว่าจำเป็นต้องเป็นไอออนประจุบวกเท่าใด การดูดติดผิวของไอออนประจุบวกหนึ่งจะเพิ่มขึ้น เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น แต่การดูดติดผิวก็ยังเกิดขึ้นไม่มากเท่ากับในกรณีของไอออนประจุบวกมากกว่าหนึ่ง (multivalent cations)

3.2) ไอออนประจุบวกสอง (Divalent cations)

ส่วนใหญ่แล้วการดูดติดผิวของไอออนประจุบวกสองบนผิวของแข็งมักจะเป็นการแยกสารที่ไม่บริสุทธิ์ออกจากสารละลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อผิวของแข็งเป็นไฮดรอกไซด์ พวกเหล็ก อลูมินัมและแมงกานีส ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนจากสารละลายจะไม่แตกต่างกันมากนัก แต่จะขึ้นกับพีเอชเหมือนกัน การดูดติดของไอออนโลหะจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แม้จะเกิดในช่วงพีเอชที่แคบ ๆ ก็ตาม (ตามรูปที่ 2.15) และอาจจะเกิดขึ้นจริงกับไอออนบวกที่ถูกไฮโดรไลซ์ การดูดติดผิวเสมือนเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยน $H^+ - M^{2+}$ กับโปรตอนซึ่งได้มาจาก OH-group ที่ผิว

3.3) ไอออนประจุบวกสามและประจุบวกสี่ (Tri and Quadivalent cations)

ปกติแล้ว การศึกษาปริมาณการดูดติดผิวของไอออนบวกบนไฮดรอกไซด์ มักจะรวมถึงการดูดติดทั้งไอออนประจุ +1, +2, +3 และ +4 ซึ่งจะถูกรูดติดได้เกือบทั้งหมด นอกจากจะกล่าวถึงกระบวนการดูดติดผิวแล้วยังมีกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนมาเกี่ยวข้องด้วย โดยจะขึ้นกับพีเอชเป็นส่วนใหญ่ สามารถอธิบายได้ว่า การดูดติดผิวของไอออนบวกประจุ +n (n-valent cations) จะต้องมีการปล่อยไฮโดรเจนไอออนจำนวน (n-1) ตัว $((n-1)H^+)$ ออกมา ซึ่งความสัมพันธ์ ดังกล่าวอาจจะไม่ง่ายเสมอไป แต่ผลที่เกิดขึ้นแปรความหมายออกมาได้ในเทอมของการดูดติดของโลหะที่ถูกออกซิไดซ์, $M(OH)_{(n-1)}^-$ และในการดูดติด M^{n+} แต่ละตัวนั้น พื้นผิวของแข็งจะได้รับประจุบวกอย่างน้อย 1 ตัว ซึ่งอาจจะมีย่านน้อยเกินไป แต่เมื่อรวมทั้งพื้นผิวแล้วมีค่ามากทีเดียว



รูปที่ 2.13 กราฟระหว่างประจุกับพีเอชสำหรับออกไซด์ต่างชนิดกันที่ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ (David & Marion, 1976)

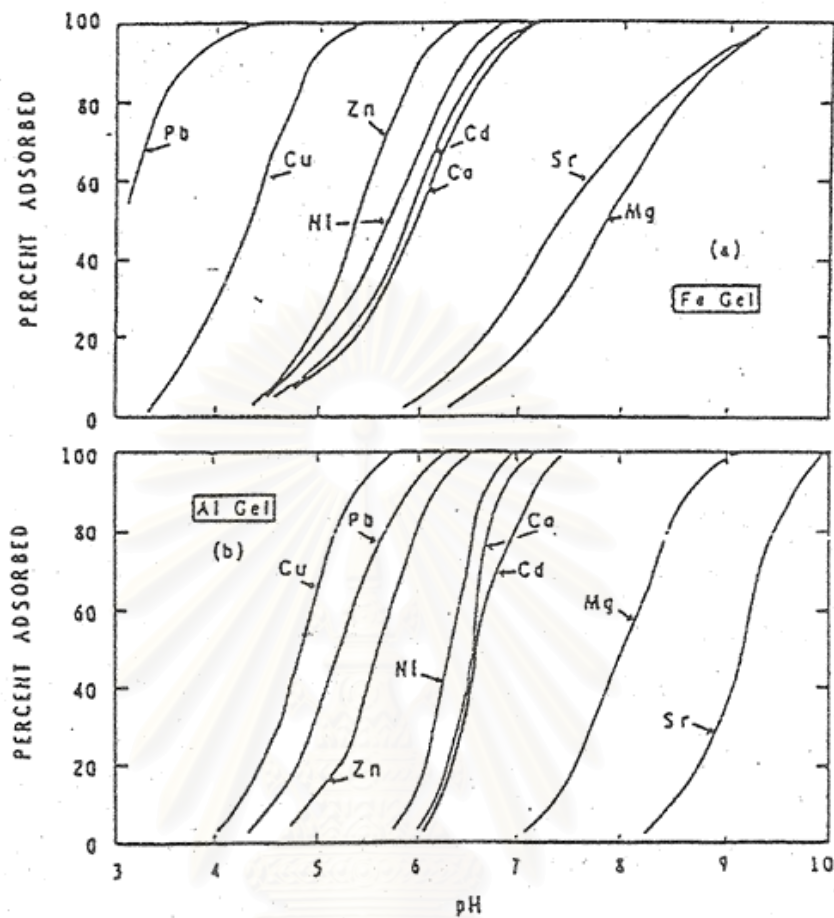
(a) Fe_2O_3 (hematite) in KNO_3 : 1 = 10^{-4} M ; 2 = 10^{-3} M ; 3 = 10^{-2} M ; 4 = 10^{-1} M ;
5 = 1 M

(b) Al_2O_3 in KCl : 1 = 10^{-4} M ; 2 = 10^{-3} M ; 3 = 10^{-2} M ; 4 = 10^{-1} M ; 5 = 1 M

(c) TiO_2 (rutile) in NaNO_3 : 1 = 10^{-3} M ; 2 = 3×10^{-3} M ; 3 = 10^{-2} M ; 4 = 3×10^{-2} M ;
5 = 10^{-1} M ; 6 = 1 M ; 7 = 2 M

(d) ZnO in NaNO_3 : 1 = 3×10^{-4} M ; 2 = 2×10^{-3} M ; 3 = 1.3×10^{-2} M ; 4 = 3.5×10^{-2} M ;
5 = 9.7×10^{-2} M

(และค่าจุดตัดของแต่ละกราฟเทียบได้กับค่า ZPC ตามตารางที่ 2.3)



รูปที่ 2.14 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์โลหะที่ถูกดูดติดกับพีเอชสำหรับไอออนประจุบวกสอง
ต่างกัน 8 ชนิด (David & Marion, 1976)

แต่ละชนิดมีความเข้มข้น 1.25×10^{-4} โมลาร์และมีการเติมอิเล็กโทรไลต์ 1 โมลาร์ NaNO_3

(a) fresh Fe gel (0.093 M Fe) ; (b) fresh Al gel (0.093 M Al)

4) ความเข้มข้นไอออน (Ionic strength)

ถ้าความเข้มข้นไอออนของสารละลายเพิ่มขึ้น การดูดติดผิวจะเพิ่มมากขึ้นที่พีเอชสูงกว่า ZPC แต่ถ้าพีเอชต่ำกว่า ZPC การดูดติดผิวจะลดลง ด้วยเหตุผลที่ว่า ถ้าเพิ่มความเข้มข้นไอออน จะเพิ่มประจุบวกที่พื้นผิวที่พีเอชค่าต่ำกว่า ZPC ทำให้เกิดแรงผลักระหว่างประจุบวก แต่ในกรณีตรงกันข้าม ที่พีเอชสูงกว่า ZPC การเพิ่มความเข้มข้นไอออนจะเพิ่มประจุลบของพื้นผิว ทำให้เกิดแรงดูดของไอออนบวก (David & Marion, 1976)

5) อุณหภูมิ (Temperature)

การดูดติดผิวเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน (exothermic) ดังนั้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลง การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยไม่มีผลกระทบมากนักต่อกระบวนการดูดติดผิว

6) ความปั่นป่วน (Mixing speed)

อัตราเร็วในการดูดติดผิวขึ้นอยู่กับการขนส่งโมเลกุลของระบบ ซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการดูดติดผิว ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (film diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (pore diffusion) ในระบบที่ของเหลวมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มของของเหลวที่อยู่ล้อมรอบสารดูดติดผิวจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดติดผิวในกรณีนี้ การแพร่ผ่านฟิล์มจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว ในทางกลับกัน ถ้าความปั่นป่วนของของเหลวในระบบสูง ความหนาของชั้นฟิล์มจะลดลงทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดติดผิวได้เร็ว ดังนั้น การแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว Chang (1991) ได้ศึกษาการกำจัดแคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) พบว่าเมื่อเพิ่มความปั่นป่วนของระบบ ความสามารถในการกำจัดโลหะทั้ง 2 ชนิดเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2.3

7) เวลาสัมผัส (Contact time)

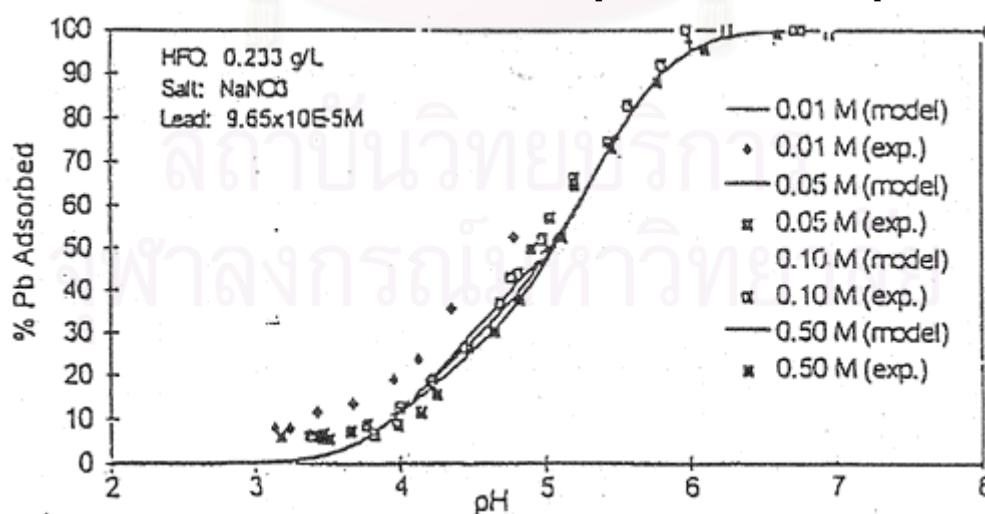
เวลาสัมผัสเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดติดผิว และอายุการใช้งานของถังดูดติดผิวแบบแท่ง Symons และคณะ (1975, Lee et al., 1981) ได้รายงานว่ เวลาสัมผัสถึงเปล่าของถังดูดติดผิวที่ยาวนาน และปริมาณของสารในน้ำเข้ามามีจำนวนน้อย ๆ จะมีอายุการใช้งานของชั้นคาร์บอนนานขึ้น Cheremisinoff และคณะ (1976) แนะนำไว้ว่าเพื่อที่จะให้แน่ใจได้ว่าการดูดติดผิวของสารแปลกปลอมในน้ำเป็นไปอย่างเหมาะสม สารละลายควรจะมีเวลาเก็บกักในชั้นของคาร์บอนนานประมาณ 30 นาที

ตารางที่ 2.3 ผลของความปั่นป่วนที่มีต่อการกำจัดแคดเมียมและตะกั่ว (Chang, 1991)

RPM	Cd residual (mg/l)	Cd removal (%)	Pb residual (mg/l)	Pb removal (%)
0	5.000	-	5.000	-
50	2.777	44.5	0.680	86.4
100	0.416	91.7	0.600	88.0
150	0.283	94.3	0.365	92.7
200	0.219	95.6	0.310	93.8
250	0.174	96.5	0.269	94.6

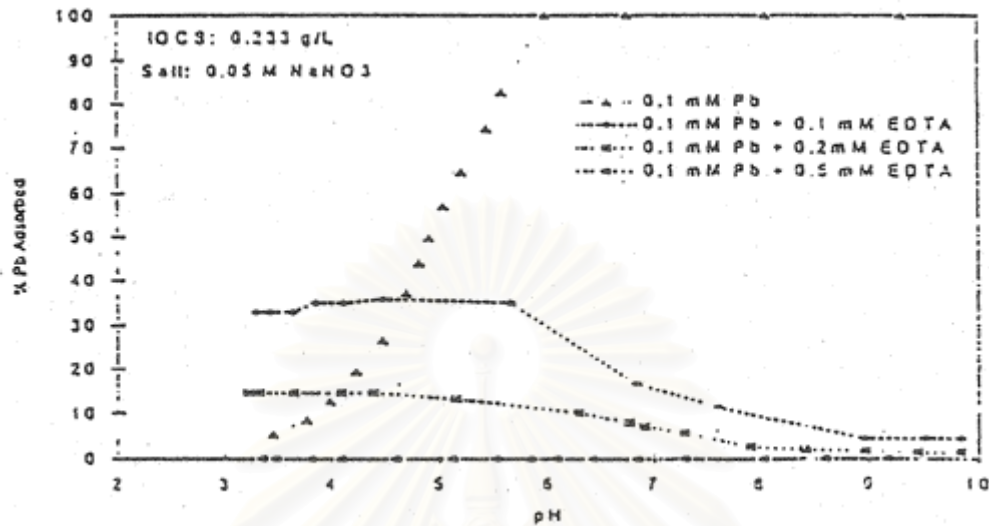
PAC Dosage : 10 g/l, Contact Time : 10 min

นอกจากนี้ การใช้ทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ในรูปแบบของการกรอง ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้กำจัดตะกั่วที่มีอยู่ในน้ำเสียอุตสาหกรรมได้ และมีการนำกระบวนการนี้มาทำการศึกษาระบบการดูดซับของโลหะหนักและฟลูออไรด์ในน้ำเสียโดยใช้ทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์อย่างต่อเนื่อง มีปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการศึกษาของตะกั่วบนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ ได้แก่ ความเข้มข้นของตะกั่ว พีเอชและความเข้มข้นไอออน รวมทั้งมีการศึกษาผลกระทบของแอนไอออน เช่น EDTA และ NTA ต่อการดูดซับของไดวาเลนต์แคทไอออน (divalent cations), Me^{2+} เช่น ตะกั่ว (Pb^{2+}) จะเห็นได้ว่า แอนไอออนแต่ละชนิดจะให้ผลที่แตกต่างกันไป เช่น ไนเตรทไอออน จะไม่มีผลต่อการดูดซับของตะกั่วเพราะการดูดซับของตะกั่วเป็นแบบทางเคมี ในขณะที่ไนเตรทไอออนจะมีการดูดซับทางกายภาพดังรูปที่ 2.15

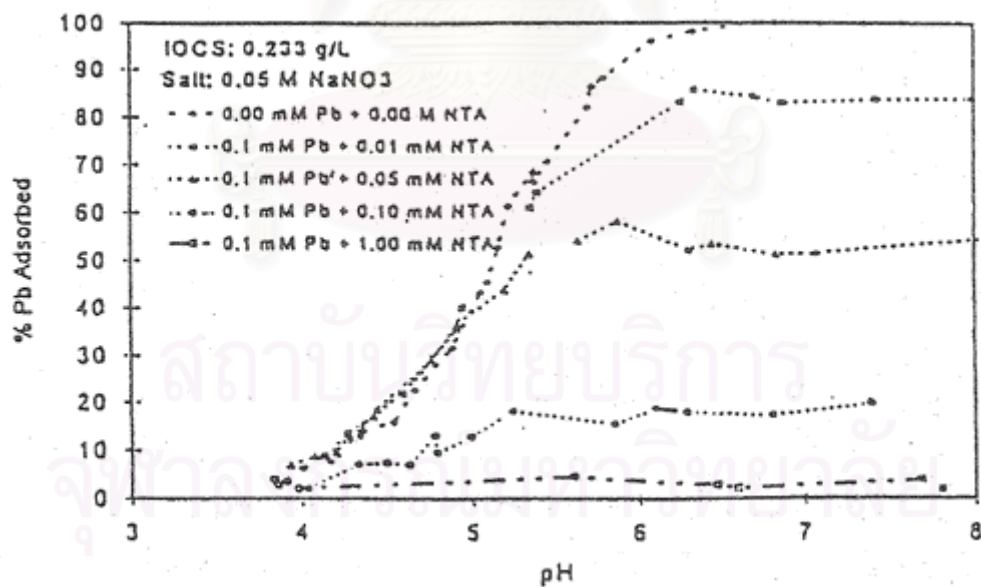


รูปที่ 2.15 ผลของความเข้มข้นไอออนต่อการดูดซับของตะกั่วบน IOCS ที่เป็นฟังก์ชันของพีเอช

ส่วน EDTA และ NTA มีผลต่อการดูดติดผิวของตะกั่วต่างกัน ถึงแม้ว่าจะมีคุณสมบัติคล้ายกันก็ตาม ดังแสดงตามรูปที่ 2.16 และ 2.17



รูปที่ 2.16 ผลของความเข้มข้นของ EDTA ที่มีต่อการดูดติดผิวของตะกั่วบน ICOS ที่เป็นฟังก์ชันของพีเอช



รูปที่ 2.17 ผลของความเข้มข้นของ NTA ที่มีต่อการดูดติดผิวของตะกั่วบน ICOS ที่เป็นฟังก์ชันของพีเอช

2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษากระบวนการดูดติดผิวได้มีการนำมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักเมื่อไม่นานนี้เอง เป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่ซึ่งมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้มีการทำการวิจัยอย่างกว้างขวาง เพื่อช่วยให้การทำงานมีประสิทธิภาพดีขึ้น การศึกษาที่ผ่านมา มีดังนี้

2.5.1 ตัวกลางที่เป็นโลหะออกไซด์

ในส่วนของตัวกลางที่เป็นโลหะออกไซด์ซึ่งใช้ในกระบวนการดูดติดผิว มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งแสดงให้เห็นว่า ตัวกลางที่เป็นโลหะออกไซด์นั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการดูดติดผิวได้เป็นอย่างดี ได้แก่

ในปี ค.ศ. 1979 M.A. Rahman และ A.K. Ghosh ได้ทำการวิจัยเรื่องการหาพื้นที่ผิวจำเพาะของผงเฟอริกออกไซด์, อะลูมินาและซิลิกาเจลโดยการใช้การดูดติดผิวไพริดีน (Pyridine) จากสารละลายนอร์มอลเฮปเทน (n-Heptane) ได้ผลว่า สามารถประเมินผลได้ตามสมมติฐานของ Close-packed monolayer

ในปี ค.ศ. 1985 M.Francesca Ottaviani , Emiliano Mello Ceresa และ Mario Visca ได้ทำการวิจัยเรื่องการดูดติดผิวของแคทไอออนบน TiO_2 ทรายต่อกับน้ำ พบว่า อันตรกิริยาระหว่าง hydrated Mn^{+2} หรือ Cu^{+2} และพื้นผิวของ TiO_2 ที่มีรูพรุนโดยการใช้เทคนิค Electron spin resonance ที่สัมพันธ์กับเคมีคอลลอยด์เบื้องต้น โดยเฉพาะการดูดติดผิว $\text{Mn}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$ ที่พื้นผิวแสดงถึงการขึ้นอยู่กับ surface potential อย่างมาก เพราะปริมาณ Mn^{+2} ที่ทำอันตรกิริยาที่เพิ่มขึ้นอย่างมากที่พีเอชหนึ่ง ๆ มากกว่าที่จุด isoelectric (i.e.p.)

ในปี ค.ศ. 1996 พณจิตร รัตนสิน ได้ทำการวิจัยเรื่องการกำจัดสังกะสีและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยตัวกลางทรายเคลือบออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส พบว่า ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์และทรายเคลือบแมงกานีสออกไซด์มีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนสังกะสีและไอออนนิกเกิลได้ดีที่สุดที่ความเข้มข้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเท่ากับ 6 โดยทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์มีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนสังกะสีและไอออนนิกเกิลเท่ากับ 68.92% และ 69.52% ตามลำดับ

ในปี ค.ศ. 1997 Tsetska Radeva , Josiane Widmaier และ Ivana Petkanchin ได้ทำการวิจัยในเรื่องการดูดติดผิวของ hydrolyzed polyacrylamide บนอนุภาคเหล็กออกไซด์ ได้ผลว่า กระแสขั้วไฟฟ้าระหว่างส่วนประกอบของโพลีเมอร์จะกำหนดปริมาณการดูดติดผิวและความหนาของชั้นโพลีเมอร์ โดยเฉลี่ยเมื่อโพลีอะครีลาไมด์ที่มีประจุอ่อนถูกดูดติดผิวบนพื้นผิวเหล็กออกไซด์ ทั้งสองปริมาณจะลดลงเมื่อความหนาแน่นของประจุโพลีเมอร์เพิ่มขึ้น แต่ความหนาของชั้นทางไฮโดรไดนามิคจะไม่ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของประจุโพลีเมอร์

ในปี ค.ศ. 1997 Wen-hui Kuan , Shang-lien Lo , Ming K. Wang และ Cheng-fang Lin ได้ทำการวิจัยในเรื่องการกำจัด Se(IV) และ Se(VI) จากน้ำโดยทราเยเคลือบด้วยอะลูมิเนียมออกไซด์ พบว่า การดูดติดผิวโดย AOCs จะขึ้นอยู่กับพีเอช ความเข้มข้นเริ่มต้น เวลาในการทำปฏิกิริยาและความเข้มข้นของ competing ion การกำจัดจะเพิ่มขึ้นด้วยการลดพีเอช แต่ Se(IV) จะเกิดชัดเจนมากกว่า Se(VI) ในระบบที่มีการผสมกัน การดูดติดผิวของ Se(IV) จะถูกยับยั้งอย่างชัดเจนโดย Se(VI) ที่ช่วงพีเอช 3-8 อย่างไรก็ตาม การดูดติดผิวของ Se(VI) จะลดลงอย่างมากในการเพิ่มความเข้มข้นของ Se(IV) ที่พีเอชในระบบทั้งหมด ลำดับของแอนไอออนอื่น ๆ ที่จะแข่งกับทั้งสองจะอยู่ในรูปของซัลเฟตมากกว่าไฮโดรเจนคาร์บอเนต

2.5.2 การดูดติดผิวของผสมระหว่างแคทไอออนและแอนไอออน

นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการดูดติดผิวของผสมระหว่างโลหะหนักและแอนไอออนอีกด้วย ซึ่งอาจรวบรวมได้ว่า การดูดติดผิวของโลหะหนักนั้นอาจได้รับผลจากการมีแอนไอออนอยู่ในสารละลาย ส่วนการดูดติดผิวแอนไอออนนั้นอาจจะไม่ได้รับผลกระทบจากการมีแคทไอออนอยู่เลย ได้แก่

ในปี ค.ศ. 1980 T.Aoki และ M.Munemori ได้ทำการวิจัยเรื่องการนำ Cr(VI) จากน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ด้วย Iron (III) hydroxide พบว่า การดูดติดผิวของ Cr(VI) ในรูปของ HCrO_4^- บน Iron (III) hydroxide ที่พีเอชต่ำกว่า 8.5 การดูดติดผิวของ Cr(VI) สามารถบอกได้โดยการมีแอนไอออนตัวอื่น ๆ อย่าง SO_4^{2-} และ SCN^- และการเพิ่มขึ้นโดยการมีโลหะไอออนอยู่อย่าง Cd(II) และ Pb(II) การเกิดนี้อธิบายจากการดูดติดผิวที่แข่งขันกันของแอนไอออนอื่น ๆ จะขึ้นอยู่กับความเสถียรของสารประกอบเชิงซ้อนของเหล็ก การเพิ่มขึ้นอาจจะเป็นเนื่องมาจากการเพิ่มตำแหน่งการดูดติดผิวอันเป็นผลมาจากการเกิด Coprecipitation ของโลหะไอออนกับ Iron (III) hydroxide ได้

ในปี ค.ศ. 1983 Mark M. Benjamin ได้ทำการวิจัยเรื่องการศึกษาการดูดติดผิวและการตกตะกอนที่พื้นผิวของโลหะบน amorphous iron hydroxide พบว่า การดูดติดผิวของแอนไอออนไม่ได้รับผลกระทบจากการมีแคทไอออนอยู่ เว้นเสียแต่แคทไอออนที่ก่อตัวตกตะกอนอยู่บนพื้นผิว การดูดติดผิวของแอนไอออนจะเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในเรื่องวิธีการตรวจสอบการก่อตัวของตะกอนที่พื้นผิว

ในปี ค.ศ. 1984 Felix Dalang , Jacques Buffle และ Werner Haerdi ได้ทำการวิจัยในเรื่องของปรากฏการณ์ของสารประกอบเชิงซ้อนและการดูดติดผิวของระบบ 3 องค์ประกอบ (Ternary system) ของ Cu (II) - fulvic acid - kaolinite พบว่า การดูดติดผิว fulvic acid บนพื้นผิวของ kaolinite จะเป็นไปตามไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ ในขณะที่การดูดติดผิวของทองแดงจะเป็นไปตามกฎของฟรุนดลิช ปริมาณของ fulvic ที่ถูกดูดติดผิวจะเพิ่มการดูดติดผิวของทองแดงทั้งหมดบน kaolinite มากขึ้น เมื่อเทียบกับในระบบมีความเข้มข้นของคอปเปอร์ไอออนอิสระคงที่ Cu(II) ที่ถูกดูดติดผิวเพิ่มขึ้นจะมีบทบาทเพียงเล็กน้อยในการดูดติดผิวของ Cu(II) ทั้งหมด

ในปี ค.ศ. 1997 C. Namasivayam และ K. Ranganathan ได้ทำการวิจัยเรื่องผลของลิแกนด์ของสารอินทรีย์ที่มีต่อการกำจัด Pb(II), Ni(II), Cd(II) โดยการดูดติดผิวบน Fe(III) / Cr(III) ไฮดรอกไซด์ที่เป็นของเสีย ซึ่งผลของลิแกนด์ทำให้การดูดติดผิวของ Pb(II) ในช่วง pH 3.5-8.5 ลดลง ในขณะที่ซีเตรทและ EDTA ทำให้การดูดติดผิวของ Ni(II) ลดลง แต่อะซีเตรทจะทำให้การดูดติดผิวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนการดูดติดผิวของ Cd(II) จะลดลงอย่างมาก ถ้ามีอะซีเตรทและ ซีเตรทอยู่

ในปี ค.ศ. 1997 Muhammad S.Vohra และ Allen P.Davis ได้ทำการวิจัยในเรื่องการดูดติดผิวของ Pb(II) , EDTA และ Pb(II) – EDTA บนผิวของ TiO₂ พบว่า แบบจำลองการดูดติดผิวได้รับการอธิบายได้ดีโดยการใช้ Diffuse layer model พิจารณาการก่อตัวของสารประกอบเชิงซ้อนประเภท Inner-sphere complex ระหว่าง Pb(II) , EATA , Pb(II) – EDTA และพื้นผิวของ TiO₂ โดยสามารถนำผลการศึกษานี้ไปใช้แสดงพฤติกรรมของการดูดติดผิวในระบบสารละลาย โลหะ/EDTA จะเปลี่ยนแปลงตามการผันแปรในอัตราส่วนความเข้มข้นของสารปนเปื้อน

2.5.3 การดูดติดผิวโลหะหนัก

ส่วนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดติดผิวโลหะหนักนั้น จะขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดติดผิว ปริมาณของตัวกลาง รวมไปถึงเวลาที่สภาวะสมดุลในการดูดติดผิวโลหะหนักนั้น ๆ ได้แก่

ในปี ค.ศ. 1981 Matthew L.Pierce และ Carleton B.Moore ได้ทำการวิจัยเรื่องการดูดติดผิวของอาเซนิตและอาเซนทอน amorphous iron hydroxide พบว่า การขจัดสารออกในทุกช่วงความเข้มข้นจะเป็นฟังก์ชันของพีเอช การเลือกความสัมพันธ์ที่ดีระหว่างความเข้มข้นของอาเซนิต , พีเอช และ amorphous iron hydroxide จะสามารถขจัดของเสียได้ถึงระดับ 92%

ในปี ค.ศ. 1996 Darren P.Rodda , John D.Wells และ Bruce B.Johnson ได้ทำการวิจัยเรื่องการดูดติดผิวที่ไม่ปกติของ Cu (II) บน Goethite ผลคือสามารถแสดงโดยแบบจำลองในรูปแบบ Monomeric และ Dimeric product แข่งกันจับตำแหน่งบนพื้นผิว ที่พีเอช 5.0 ไมโนเมอร์จะถูกดูดติดผิวเป็นหลักที่ความเข้มข้นของ Cu (II) ต่ำ ส่วนถ้าความเข้มข้นเพิ่มขึ้น สัดส่วนของไดเมอร์จะถูกดูดติดผิวเพิ่มขึ้นค่อย ๆ เปลี่ยนจากไมโนเมอร์เป็นไดเมอร์ที่พื้นผิว ส่งผลให้ไอโซเทอมของการดูดติดผิวที่ไม่ปกติคือจะคงที่ตามขอบของการดูดติดผิวของ Cu (II) บน Goethite จะเปลี่ยนแปลงเมื่อพีเอชสูงขึ้นที่ความเข้มข้นของ Cu (II) ต่ำมาก ๆ

ในปี ค.ศ. 1996 Qing Du , Zhongxi Sun , Willis Forsling และ Hongxiao Tang ได้ทำการวิจัยเรื่องการดูดติดผิวของคอปเปอร์ที่พื้นผิว Illite ในสารละลาย โดยใช้วิธีโพเทนชิโอเมตริกไทเตรชัน พบว่า การดูดติดผิวขึ้นอยู่กับพีเอชและการ uptake ของคอปเปอร์จะก่อให้เกิดการปล่อยโปรตอนของกลุ่มพื้นผิว การเพิ่มขึ้นของคอปเปอร์ทั้งหมดจะทำให้ขอบการดูดติดผิวที่พีเอชนั้นมีการเปลี่ยนแปลงเป็นค่าพีเอชที่สูงขึ้น ค่าไอโซเทอมการดูดติดผิวเป็นตามแลงมัวร์ที่พีเอชและความเข้มข้นของคอปเปอร์ที่ต่ำลง

ในปี ค.ศ. 1997 A.Lopez-delgado , C.Perez และ F.A.Lopez ได้ทำการวิจัยในเรื่องการดูดติดผิวของโลหะหนักบนสлюдаที่ได้จากเตาเผาทองเหลือง โดยการใช้ทฤษฎีของฟรอนดลิกซ์และแลงมัวร์ รวมไปถึงค่าทางอุณหพลศาสตร์ ซึ่งได้ผลที่สอดคล้องกัน ผลคือสлюдаที่ได้สามารถใช้เป็นสารดูดติดผิวที่มีประสิทธิภาพสำหรับไอออนของตะกั่ว สังกะสี แคดเมียม ทองแดงและโครเมียมภายในช่วงความเข้มข้นของไอออนที่ใช้ในการศึกษานี้

ในปี ค.ศ. 1997 M.Azizian , et.al. ได้ทำการวิจัยในเรื่องการดูดติดผิว การถ่ายทอด และการบำบัดตะกั่วในชั้นดินตามธรรมชาติ พบว่า เวลาที่ใช้ในการดูดติดผิวของตะกั่วโดยการใช้ทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์จะเข้าสู่ภาวะสมดุลไม่เกิน 24 ชั่วโมง ความเข้มข้นไอออนและ competing cation จะมีผลเพียงเล็กน้อยต่อการดูดติดผิวของตะกั่ว ส่วนพีเอชนั้นเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมกระบวนการดูดติดผิวนี้ และแบบจำลองแบบ Triple Layer มีความเหมาะสมในการอธิบายผลการทดลองนี้โดยการใช้แบบ Inner-sphere Surface Complexation Bonding

ในปี ค.ศ. 1997 Sutha Khaodhjar ได้ทำการวิจัยในเรื่องการกำจัดโครเมียม ทองแดง และอาเซนิกจากน้ำผิวดินที่ปนเปื้อนโดยการใช้ตัวดูดซับที่มีเหล็กออกไซด์เป็นส่วนประกอบ พบว่า ทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์เป็นตัวดูดซับตัวอย่างที่มีประโยชน์สำหรับการศึกษากระบวนการดูดติดผิวโลหะ ทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์สามารถใช้กำจัดทั้งแคดไอออนและแอนไอออนที่ถูกดูดติดผิวได้อย่างแข็งแรงและมีประสิทธิภาพสำหรับช่วงพีเอชตั้งแต่ 5 ถึง 8 และมีผลน้อยมากจากอิเล็คโตรไลต์ข้างเคียง

ในปี ค.ศ. 1997 Wen-hui Kuan , Shang-lien Lo , Ming K. Wang และ Cheng-fang Lin ได้ทำการวิจัยในเรื่องการกำจัด Se(IV) และ Se(VI) จากน้ำโดยทรายเคลือบด้วยอะลูมินัมออกไซด์ พบว่า การดูดติดผิวโดย AOCs จะขึ้นอยู่กับพีเอช ความเข้มข้นเริ่มต้น เวลาในการทำปฏิกิริยาและความเข้มข้นของ competing ion การกำจัดจะเพิ่มขึ้นด้วยการลดพีเอช แต่ Se(IV) จะเกิดชัดเจนมากกว่า Se(VI) ในระบบที่มีการผสมกัน การดูดติดผิวของ Se(IV) จะถูกยับยั้งอย่างชัดเจนโดย Se(VI) ที่ช่วงพีเอช 3-8 อย่างไรก็ตาม การดูดติดผิวของ Se(VI) จะลดลงอย่างมากในการเพิ่มความเข้มข้นของ Se(IV) ที่พีเอชในระบบทั้งหมด ลำดับของแอนไอออนอื่น ๆ ที่จะแข่งกับทั้งสองจะอยู่ในรูปของซัลเฟตมากกว่าไฮโดรเจนคาร์บอเนต

ในปี ค.ศ. 1998 S.V.Dimitrova และ D.R.Mehandgiev ได้ทำการวิจัยในเรื่องการกำจัดตะกั่วจากสารละลายโดย Grqanulated Blast-furnace Slag พบว่า เป็นฟังก์ชันกับพีเอช ความเข้มข้นของไอออนโลหะ ขนาดอนุภาคและปริมาณตัวดูดซับ กระบวนการจะเกิดขึ้นเมื่อพีเอชเพิ่ม แต่ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วโดยวิธีการนี้จะเกิดขึ้นที่พีเอชต่ำกว่าพีเอชของการตกตะกอน ภาวะสมดุลของระบบสารละลาย Slag/Lead จะอธิบายโดยไอโซเทอมการดูดติดผิวของฟรุนดลิช ร้อยละของการกำจัดตะกั่วที่ภาวะสมดุลจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Slag แต่กำลังการดูดติดผิวจะ

ลดลง ผลวิธีนี้กำจัดตะกั่วได้ถึง 97-98% สามารถนำ Granulated Slag ไปใช้สำหรับการกำจัดไอออนของตะกั่วจากน้ำเสียอุตสาหกรรมได้

นอกจากนี้ การดูดติดผิวของแอนไอออนยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดติดผิวในช่วงเริ่มต้น เวลาที่สภาวะสมดุล และค่าพีเอชอีกด้วย

ในปี ค.ศ. 1997 Ying Mao และ B.M.Fung ได้ทำการวิจัยเรื่องการดูดติดผิวของกรดอะคริลิกและกรดมาเลอิกจากสารละลายบนผิวของอะลูมินา ได้ผลว่า การดูดติดผิวจะเกิดมากในช่วงต้น ๆ และใช้เวลาไม่เกิน 48 ชั่วโมงที่จะเข้าสู่สภาวะสมดุล และที่สภาวะสมดุลนั้น การดูดติดผิวของกรดบนผิวอะลูมินาจะเป็นไปตามไอโซเทอมของแลงมัวร์ รวมทั้งกระบวนการดูดติดผิวจะขึ้นอยู่กับพีเอชด้วย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยนี้กระทำที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีรายละเอียดการดำเนินการวิจัย ดังต่อไปนี้

แผนการทดลอง (แสดงดังรูปที่ 3.1)

การวางแผนการทดลอง มีขั้นตอนดังนี้

- 1) การเตรียมตัวกลาง (ในกรณีนี้ คือ ทราเยเคลือบเหล็กออกไซด์)
- 2) การเตรียมอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง
- 3) การเตรียมน้ำตัวอย่าง (น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วและน้ำเสียสังเคราะห์ฟลูออไรด์)
- 4) การดำเนินการทดลอง
- 5) การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ขั้นตอนการทดลอง (แสดงดังรูปที่ 3.1) สามารถกระทำได้ 3 ขั้นตอน คือ

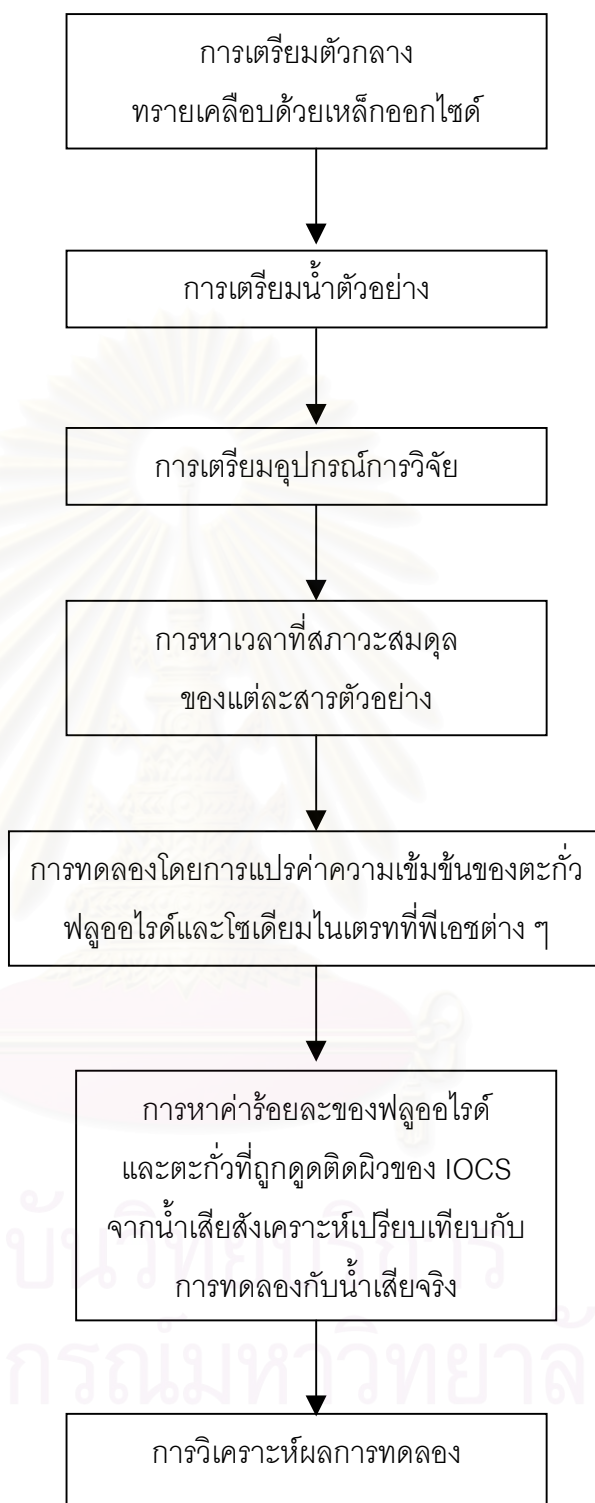
ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาหาเวลาที่ใช้ที่สภาวะสมดุลของการดูดติดผิวของฟลูออไรด์ , ตะกั่ว และของผสมทั้ง 2 ชนิดบนทราเยเคลือบเหล็กออกไซด์

ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดูดติดผิวของตะกั่วและฟลูออไรด์บนทราเยเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ความเข้มข้นของตะกั่วและฟลูออไรด์ต่าง ๆ ประกอบกับการแปรค่าพีเอช และค่าความเข้มข้นของโซเดียมไนเตรท

ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาเพื่อนำสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการมาทดลองใช้กับน้ำเสียจริง

3.1 การเตรียมตัวกลาง (ตามวิธีการของ Edward and Benjamin, 1989)

ในการทดลองนี้ใช้ตัวกลาง คือ ทราเยเคลือบเหล็กออกไซด์ โดยใช้ทราเยที่มีขนาดระหว่างตะแกรงเบอร์ 20 และ 30 (0.60-0.84 มิลลิเมตร) การเตรียมทราเยที่จะนำมาเคลือบเหล็กออกไซด์ จะต้องมีการทำความสะอาดทราเยก่อน



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงแผนการทดลองและขั้นตอนการทดลอง

3.1.1 การทำความสะอาดทรายก่อนจะทำการเคลือบทราย ดังนี้

- 1) แช่เม็ดทรายด้วยกรดซัลฟูริก (พีเอช 1.0) ที่ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 2) ล้างออกด้วยน้ำกลั่น จนน้ำล้างสะอาด
- 3) นำเม็ดทรายที่ล้างสะอาดแล้วใส่ภาตแสดนเลสเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส
- 4) เก็บเม็ดทรายที่อบแห้งแล้วไว้ในภาชนะที่แห้งและปิดมิดชิด ก่อนจะนำไปใช้งานต่อไป

3.1.2 ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ มีการทำตามวิธีการดังนี้

- 1) ชั่งทรายที่สะอาดแล้วมา 200 กรัม เฟอร์ริคไนเตรท 20 กรัม และน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่
- 2) เขย่าช้า ๆ จนกระทั่งเฟอร์ริคไนเตรทละลายปนอยู่กับทราย จากนั้นเทส่วนผสมทั้งหมดลงในภาตแสดนเลส
- 3) นำภาตเข้าเตาอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง จะได้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์
- 4) ล้างทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ด้วยน้ำกลั่น จนกระทั่งน้ำล้างสะอาด
- 5) นำทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ล้างสะอาดแล้ว เข้าเตาอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) ถังเตรียมน้ำสังเคราะห์ขนาด 50 ลิตร จำนวน 4 ใบ
- 2) ถังเก็บสารเคมีขนาด 30 ลิตร 2 ใบ
- 3) นาฬิกาจับเวลา
- 4) หลอดทดลองพลาสติกผสมสารขนาด 50 มิลลิลิตรที่ใช้กับเครื่องเขย่าสาร (Completely-mixed 50 ml.plastic centrifuge tubes)
- 5) เครื่องเขย่าสาร
- 6) เครื่องอะตอมมิกแอบซอพชั่นสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Varian รุ่น spectra AA. 10 plus
- 7) เครื่องวัดพีเอชของ Horiba

- 8) เครื่องชั่งสารเคมีของ Satorius
- 9) เตาอบแห้งของ WTC Binder
- 10) ขวดพลาสติกสำหรับเก็บน้ำเสียสังเคราะห์ขนาด 100 มิลลิลิตร จำนวน 250 ใบ
- 11) ขวดกระบอกพลาสติกโพลีเอทิลีน ขนาด 1 ลิตร จำนวน 12 ใบ
- 12) เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น UV-1201 UV-VIS Spectrophotometer

3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1) สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวกลางทราย ได้แก่ $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ และ H_2SO_4
- 2) สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ ได้แก่ NaF , NaNO_3 , $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$
- 3) สารเคมีที่ใช้ในการปรับพีเอช ได้แก่ NaOH และ HNO_3
- 4) สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำเสียสังเคราะห์ ได้แก่ SPADNS, $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ และ HCl
- 5) สารเคมีที่ใช้เป็นบัฟเฟอร์ ได้แก่ KH_2PO_4 และ K_2HPO_4

3.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วและน้ำเสียสังเคราะห์ฟลูออไรด์

3.3.1 การเตรียมสารเพิ่มความเข้มข้นไอออน

ในการทดลองนี้ จะทำการเพิ่มประจุไฟฟ้าหรือความเข้มข้นไอออนลงในน้ำสังเคราะห์โดยใช้โซเดียมไนเตรทเป็นตัวแทน เนื่องจากทั้งตะกั่วและฟลูออไรด์ไม่เกิดตกตะกอนหรือทำปฏิกิริยากับโซเดียมไนเตรทและโซเดียมไนเตรทยังสามารถละลายน้ำได้ง่าย

เตรียมจากเกลือไนเตรทของโซเดียมให้ได้สารละลายเข้มข้น 1.0 โมลาร์ (เกลือไนเตรทมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 85) โดยเริ่มจากการชั่งโซเดียมไนเตรท 85 กรัมผสมกับน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร แล้วเขย่าให้เข้ากัน จากนั้นเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเป็น 1,000 มิลลิลิตร จะได้สารละลายโซเดียมไนเตรทเข้มข้น 1.0 โมลาร์ แล้วนำไปเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ตามต้องการต่อไป

3.3.2 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์

ในการทดลองนี้ จะต้องรักษาให้ค่าพีเอชหลังการทดลองได้ค่าตามต้องการ จึงจะต้องใช้สารละลายบัฟเฟอร์ โดยการใช้ในปริมาตรและความเข้มข้นที่น้อยมาก ๆ เมื่อเทียบกับสารตั้งต้นในน้ำสังเคราะห์และถือว่าเป็นตัวแปรคงที่เพื่อให้เกิดผลกระทบต่อผลการทดลองให้น้อยที่สุด

เตรียมโดยการผสม KH_2PO_4 8.5 กรัมและ K_2HPO_4 21.75 กรัมแล้วเติมลงในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตรเขย่าให้เข้ากัน หลังจากนั้นให้เจือจางด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวม 1,000 มิลลิลิตรเพื่อเก็บไว้ใช้เป็นสารละลายบัฟเฟอร์สำหรับการทดลองนี้ต่อไป โดยสารละลายบัฟเฟอร์นี้จะรักษาให้ค่าพีเอชอยู่ที่ประมาณ 7.2

3.3.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว

เตรียมจากเกลือไนเตรทของตะกั่ว ให้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วมีความเข้มข้นเท่ากับ 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

ในกรณีของน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว (เกลือไนเตรทมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 331.20) โดยเริ่มจากการเตรียมสารละลายตะกั่วสต็อกจากการชั่งเลด (II) ไนเตรท 15.999 กรัมผสมกับกรดไนตริกเข้มข้น 10 มิลลิลิตรและน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร แล้วเขย่าให้เข้ากัน จากนั้นเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเป็น 1,000 มิลลิลิตร จะได้สารละลายตะกั่วสต็อกโดยในสารละลาย 1 มิลลิลิตรจะมีตะกั่วเท่ากับ 10 มิลลิกรัม จากนั้นทำการเตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่ว โดยการใช้สารละลายสต็อก 100 มิลลิลิตรผสมกับกรดไนตริก (1+499) แล้วเติมน้ำกลั่นให้ได้ 1,000 มิลลิลิตร จึงจะได้สารละลายมาตรฐานตะกั่ว 1 มิลลิลิตรจะมีตะกั่วอยู่ 1 มิลลิกรัม แล้วนำไปเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ตามต้องการต่อไป

3.3.4 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ฟลูออไรด์

เตรียมจากโซเดียมฟลูออไรด์ ให้น้ำเสียสังเคราะห์ฟลูออไรด์มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.5, 1.0, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

ในกรณีของน้ำเสียสังเคราะห์ฟลูออไรด์ (โซเดียมฟลูออไรด์มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 41.99) โดยเริ่มจากการเตรียมสารละลายสต็อกฟลูออไรด์เข้มข้นจากการละลายแอนไฮดรัสโซเดียมฟลูออไรด์ 221.0 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่นแล้วเจือจางให้เป็น 1,000 มิลลิลิตร จะได้สารละลายที่ 1.0 มิลลิลิตรจะมีฟลูออไรด์เท่ากับ 100 ไมโครกรัม จากนั้นทำการเตรียมสารละลายมาตรฐานฟลูออไรด์ โดยการเจือจางสารละลายฟลูออไรด์เข้มข้น 500 มิลลิลิตรให้เป็น 1,000 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายที่ 1.0 มิลลิลิตรจะมีฟลูออไรด์ 50.0 ไมโครกรัม แล้วนำไปเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ตามที่ต้องการต่อไป

หลังจากเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ให้ได้ความเข้มข้นและปริมาตรที่ต้องการแล้วทำการเติมเกลือโซเดียมไนเตรทตามที่ต้องการ จากนั้นจึงทำการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ให้ได้ตามต้องการด้วยกรดไนตริกหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามแต่จะความเข้มข้น ก่อนที่จะทำการทดลองต่อไป

3.4 การดำเนินการทดลอง

3.4.1 ตัวแปรในการทดลอง (แสดงดังตารางที่ 4.1)

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง

ตัวแปร	ขอบเขตของการทดลอง
<u>ตัวแปรอิสระ</u>	
1. ความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์	1. 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำเสียสังเคราะห์	2. 0.5, 1.0, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. ค่าพีเอช	3. 4 ถึง 10
4. ความเข้มข้นของโซเดียมไนเตรท	4. 0, 0.05 และ 0.10 โมลาร์
<u>ตัวแปรคงที่</u>	
1. ขนาดของตัวกลาง	1. 0.60 ถึง 0.84 มิลลิเมตร
2. น้ำหนักของตัวกลาง	2. 1 กรัม
3. ปริมาตรของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทดลอง	3. 50 มิลลิลิตร
4. ปริมาตรของสารละลายบัฟเฟอร์	4. 1 มิลลิลิตร
<u>ตัวแปรตาม</u>	
1. ลักษณะสมบัติของน้ำที่วิเคราะห์	1. ปริมาณของตะกั่วหลังการทดลอง 2. ปริมาณของฟลูออไรด์หลังการทดลอง

3.4.2 การหาเวลาที่สภาวะสมดุลของการดูดติดผิวของตะกั่วและฟลูออไรด์บนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์

1) การหาเวลาที่สภาวะสมดุลของการดูดติดผิวของตะกั่วบนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์

เติมน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตร 50 มิลลิลิตรและทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ 1 กรัมใส่ลงในหลอดทดลองพลาสติกผสมสารขนาด 50 มิลลิลิตรจำนวน 7 หลอด ปิดฝาหลอดพลาสติกแล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสาร เก็บตัวอย่างหลังจากเขย่าแล้ว 1, 2, 5, 10, 20, 30 และ 40 ชั่วโมงนำไปกรองด้วยกระดาษกรองแล้วนำตัวอย่างที่กรองแล้วไปแช่ตู้เย็นก่อนนำน้ำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณของตะกั่วต่อไป โดยทำการเตรียมสารละลายแบงค์ 1 ตัวอย่างเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบด้วย

หลังจากวิเคราะห์หาปริมาณของตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์หลังการเขย่าแล้ว ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ นำค่าความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือไปหักออกจากความเข้มข้นของตะกั่วก่อนการเขย่า จะได้ค่าความเข้มข้นของตะกั่วที่ถูกดูดติดผิวไปหาร้อยละของการดูดติดผิวของตะกั่วบนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ จากนั้นนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเขย่าและร้อยละของการดูดติดผิวของตะกั่ว สังเกตจากกราฟดังกล่าวจะทราบเวลาที่สภาวะสมดุลของการดูดติดผิวของตะกั่วในช่วงที่เส้นกราฟคงที่ จะได้เวลาที่สภาวะสมดุลของการดูดติดผิวของตะกั่วบนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์เพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

2) การหาเวลาที่สภาวะสมดุลของการดูดติดผิวของฟลูออไรด์บนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์

เติมน้ำเสียสังเคราะห์ฟลูออไรด์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร 50 มิลลิลิตรและทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ 1 กรัมใส่ลงในหลอดทดลองพลาสติกผสมสารขนาด 50 มิลลิลิตร จำนวน 7 หลอด ปิดฝาหลอดพลาสติกแล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารที่ความเร็วรอบ 125 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างหลังจากเขย่าแล้ว 1, 2, 5, 10, 20, 30 และ 40 ชั่วโมงนำไปกรองด้วยกระดาษกรองแล้ว นำตัวอย่างที่กรองแล้วไปแช่ตู้เย็นก่อนนำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณของฟลูออไรด์ต่อไป โดยทำการเตรียมสารละลายเบงค์ 1 ตัวอย่างเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับ

หลังจากวิเคราะห์หาปริมาณของฟลูออไรด์จากน้ำเสียสังเคราะห์หลังการเขย่าแล้วด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 570 นาโนเมตร นำค่าความเข้มข้นของฟลูออไรด์ที่เหลือไปหักออกจากความเข้มข้นของฟลูออไรด์ก่อนการเขย่า จะได้ค่าความเข้มข้นของฟลูออไรด์ที่ถูกดูดติดผิวไปหาร้อยละของการดูดติดผิวของฟลูออไรด์บนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ จากนั้นนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเขย่าและร้อยละของการดูดติดผิวของฟลูออไรด์ สังเกตจากกราฟดังกล่าวจะทราบเวลาที่สภาวะสมดุลของการดูดติดผิวของฟลูออไรด์ในช่วงที่เส้นกราฟคงที่ จะได้เวลาที่สภาวะสมดุลของการดูดติดผิวของฟลูออไรด์บนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์เพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

3.4.3 การดูดติดผิวของตะกั่วและฟลูออไรด์บนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ที่ค่าพีเอชและความเข้มข้นไอออนต่าง ๆ

1) แปรค่าพีเอช โดยกำหนดให้ความเข้มข้นไอออนคงที่

ทำซ้ำตามข้อ 1) ของ 3.4.2 แต่ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างละ 8 หลอด คือ ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดไนตริกปรับพีเอชให้ได้ 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 และเบงค์โดยให้เติมสารละลายบัฟเฟอร์ลงไปในทุกหลอด ๆ ละ 1 มิลลิลิตรและใช้โซเดียม

ไนเตรท 0.1 โมลาร์ เขย่าตามเวลาที่ใช้ที่สภาวะสมดุลที่ได้จากข้อ 1) ใน 3.4.2 เมื่อครบตามเวลา ทำการวัดพีเอชหลังจากการเขย่าก่อนที่จะทำการเก็บตัวอย่างมาทำการกรองด้วยกระดาษกรอง แล้วจากนั้นจะนำตัวอย่างที่กรองแล้วไปแช่ตู้เย็นก่อนนำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณ ตะกั่วต่อไป โดยทำการเตรียมสารละลายเบงค์ 1 ตัวอย่างเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบด้วย หลังจากนั้นหาปริมาณของตะกั่วที่เหลือเช่นเดียวกับข้อ 1) ใน 3.4.2 และพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพีเอชที่ใช้หลังการเขย่าและร้อยละของการดูดติดผิวของตะกั่วทั้ง 3 ความเข้มข้นเพื่อนำมา เปรียบเทียบกัน

ทำซ้ำตั้งแต่ต้นแต่เปลี่ยนจากน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ ฟลูออไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.5, 1.0 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้เวลาที่เขย่าตามเวลาที่ใช้ที่ สภาวะสมดุลที่ได้จากข้อ 2) ใน 3.4.2 และทำการวิเคราะห์หาปริมาณฟลูออไรด์ที่เหลือและ พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของฟลูออไรด์ที่พีเอชต่าง ๆ

2) แปรค่าความเข้มข้นไอออน โดยกำหนดให้ความเข้มข้นของตะกั่วคงที่

ทำการทดลองเช่นเดียวกับ 1) ใน 3.4.3 แต่ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วและ ฟลูออไรด์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และแปรค่าความเข้มข้นของไซเดียมไนเตรทเป็น 0, 0.05 และ 0.10 โมลาร์ ทำการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วและฟลูออไรด์ที่เหลือและพล็อตกราฟความสัมพันธ์ ระหว่างร้อยละของการดูดติดผิวตะกั่วและฟลูออไรด์กับความเข้มข้นไอออนที่พีเอชต่าง ๆ

3.4.4 การดูดติดผิวของตะกั่วบนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นของ ฟลูออไรด์และค่าพีเอชต่าง ๆ

เติมน้ำเสียสังเคราะห์ 50 มิลลิลิตรที่มีตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตรและฟลูออไรด์ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตรในไซเดียมไนเตรท 0.1 โมลาร์และทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ 1 กรัมลงใน หลอดทดลองพลาสติกผสมสารขนาด 50 มิลลิลิตร จำนวน 8 หลอด ปรับค่าพีเอชและเบงค์ตาม ข้อ 3.4.3 โดยแปรค่าความเข้มข้นของฟลูออไรด์เป็น 1.0, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจาก การเขย่าตามเวลาที่ใช้ที่สภาวะสมดุลที่ได้จาก 3.4.2 แล้วทำการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วและ ฟลูออไรด์ที่เหลืออยู่ในน้ำตัวอย่างเทียบค่ากับเบงค์ แล้วพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละ ของการดูดติดผิวของตะกั่วและฟลูออไรด์ที่พีเอชต่าง ๆ

3.4.5 การดูดติดผิวของตะกั่วและฟลูออไรด์บนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ของน้ำเสียที่ได้จากการใช้งานจริง

1) น้ำเสียจากห้องปฏิบัติการเครื่องมือตรวจสอบน้ำเสียของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยซึ่งเก็บในวันที่ 20 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2544

เติมน้ำเสียตัวอย่าง 50 มิลลิลิตรและทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ 1 กรัมลงในหลอดทดลองพลาสติกผสมสารขนาด 50 มิลลิลิตร จำนวน 8 หลอด เติมสารละลายบัฟเฟอร์ 1 มิลลิลิตรทุกหลอด แล้วนำแต่ละหลอดไปปรับค่าพีเอชและเบงค์ตามข้อ 3.4.3 จากนั้นนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 125 รอบต่อนาทีตามเวลาที่สภาวะสมดุลที่ได้จาก 3.4.2 เมื่อครบตามเวลาทำการวัดพีเอชหลังจากการเขย่าก่อนที่จะทำการเก็บตัวอย่างมาทำการกรองด้วยกระดาษกรองแล้ว จากนั้นจะนำตัวอย่างที่กรองแล้วไปแช่ตู้เย็นก่อนนำน้ำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณของตะกั่วและฟลูออไรด์ที่เหลืออยู่ต่อไป โดยการเปรียบเทียบค่ากับเบงค์ที่เตรียมไว้

หลังจากวิเคราะห์หาปริมาณของตะกั่วและฟลูออไรด์จากน้ำเสียสังเคราะห์หลังการเขย่าแล้วด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปคโตรโฟโตมิเตอร์และเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ที่มีความยาวคลื่น 570 นาโนเมตรตามลำดับ คำนวณหาร้อยละของการดูดติดผิวของตะกั่วและฟลูออไรด์ด้วย จากนั้นนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชที่ได้หลังการเขย่าและร้อยละของการดูดติดผิวของตะกั่วและฟลูออไรด์

2) ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1) ใน 3.4.5 แต่เปลี่ยนเป็นน้ำเสียจากบ่อกักน้ำเสียของบริษัท ไทยโเท เท็กซ์ไทล์ มิลลส์ จำกัด (มหาชน) ซึ่งเก็บในวันที่ 7 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2544 โดยทำการกรองด้วยกระดาษกรองก่อนทำการทดลอง

3) ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1) ใน 3.4.5 แต่เปลี่ยนเป็นน้ำเสียจากระบบบำบัดน้ำเสียขั้นที่ 1 ของบริษัท โรงกลั่นน้ำมันบางจาก จำกัด ซึ่งเก็บในวันที่ 8 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2544 โดยทำการกรองด้วยกระดาษกรองก่อนทำการทดลอง

3.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

เนื่องจากการวิจัยนี้ เป็นการศึกษาผลของฟลูออไรด์ในน้ำเสียต่อการดูดติดผิวของตะกั่วบนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ ดังนั้น ค่าพารามิเตอร์ที่จะวิเคราะห์จึงเน้นอยู่ที่การวัดปริมาณสารหลังจากทำการทดลองแล้ว โดยใช้การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย (ตามวิธีการของ Standard method , 1995) ได้แก่

- 5.1) ปริมาณตะกั่ว วิธีการที่ใช้ คือ อะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรเมตรี
(std# D 3559 – 95)
- 5.2) ปริมาณฟลูออไรด์ วิธีการที่ใช้ คือ SPADNS
(std# D 3868 - 95)
- 5.3) ฟิเชช วิธีการที่ใช้ คือ ฟิเชชเมตริก
(std# D 1293 - 95)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการวิเคราะห์

4.1 ผลของการเคลือบทรายด้วยออกไซด์ของเหล็ก

ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์มีลักษณะเป็นเม็ดสีน้ำตาลแดงเข้มคล้ายกับสีของสนิมเหล็ก ดังรูปที่ 4.2 หากสังเกตด้วยตาเปล่า จะเห็นได้ว่า เหล็กออกไซด์จะเคลือบอยู่ที่ผิวหน้าของเม็ดทรายอย่างทั่วถึง หลังจากการเตรียมทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ได้สำเร็จ ล้างด้วยน้ำสะอาด และอบแห้งแล้ว จึงสามารถเก็บไว้ใช้ในการทดลองต่อไป

4.2 ผลของการหาเวลาที่ใช้ที่สภาวะสมดุลของการดูดติดผิวของตะกั่วและฟลูออไรด์บนทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

การทดลองหาเวลาที่ใช้ที่สภาวะสมดุลของการดูดติดผิวของตะกั่วและฟลูออไรด์บนทรายเคลือบเหล็กออกไซด์โดยการใช้ทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์หนัก 1 กรัม เติมน้ำในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีตะกั่วหรือฟลูออไรด์ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิตรแล้วนำไปเขย่าด้วยความเร็ว 125 รอบต่อนาที จากนั้นจึงทำการเก็บน้ำตัวอย่างหลังจากทำการเขย่าแล้ว 1, 2, 5, 10, 20, 30 และ 40 ชั่วโมง ทำการกรองด้วยกระดาษกรองแล้วทำการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วหรือฟลูออไรด์ที่เหลืออยู่ในสารละลายนั้น

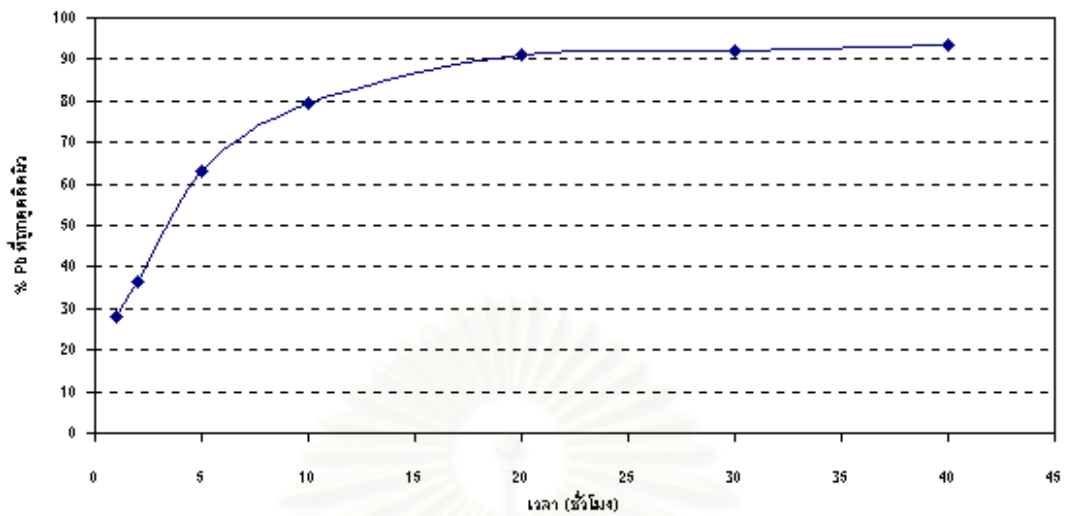
จากการผลการทดลองดังแสดงไว้ในตารางที่ ผ1 รวมถึงรูปที่ 4.3 และ 4.4 พบว่า ปริมาณตะกั่วหรือฟลูออไรด์ในน้ำเสียสังเคราะห์จะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 10 ชั่วโมงแรกของการทดลอง และความเข้มข้นของตะกั่วและฟลูออไรด์จะมีค่าค่อนข้างคงที่หลังจาก 24 ชั่วโมงของการทดลองไปแล้วซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดลองเก่าของ Azizian, M., et.al. โดยมีค่าของการดูดติดผิวตะกั่วและฟลูออไรด์อยู่ที่ประมาณ 92% และ 33% ตามลำดับ ดังนั้น เวลาที่ใช้สำหรับการทดลองต่อไปทั้งการดูดติดผิวตะกั่วและฟลูออไรด์จึงใช้อยู่ที่ 24 ชั่วโมง



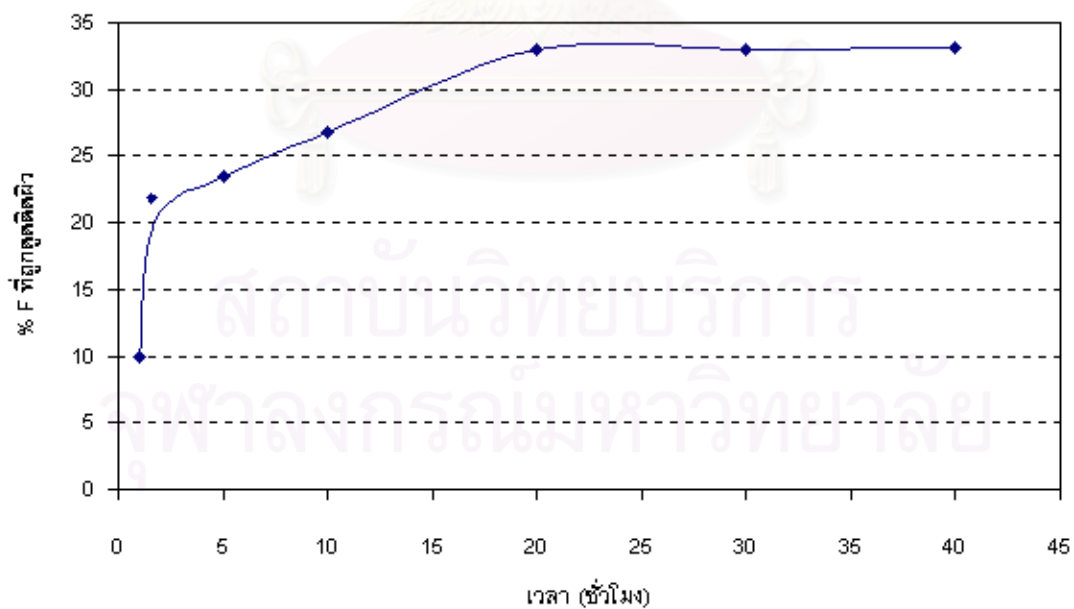
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างทรายก่อนเคลือบเหล็กออกไซด์



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างทรายเคลือบเหล็กออกไซด์



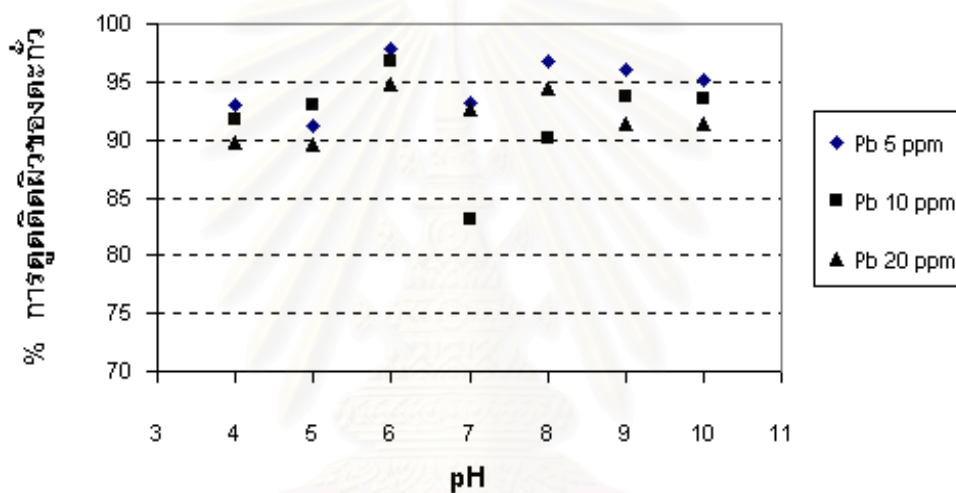
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเขย่าและร้อยละของการดูดซับตะกั่วบนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเขย่าและร้อยละของการดูดซับฟลูออไรด์บนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์

4.3 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่อการดูดติดผิวตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ไซโตียมไนเตรท 0.1 โมลาร์ ณ ค่าพีเอชต่าง ๆ

การทดลองจะใช้ตะกั่วที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดสอบการดูดติดผิวบนทรายเคลือบเหล็กออกไซด์หนัก 1 กรัม ปริมาณน้ำตัวอย่าง 50 มิลลิลิตร ความเร็วรอบของการเขย่า 125 รอบต่อนาที โดยการใช้เวลาในการเขย่า 24 ชั่วโมง ที่ไซโตียมไนเตรท 0.1 โมลาร์ ใช้สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 1 มิลลิลิตรและใช้ไซโตียมไฮดรอกไซด์และกรดไนตริกในการปรับค่าพีเอชตั้งแต่ 4 ถึง 10 ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ ๒2 และรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่อการดูดติดผิวตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ที่ไซโตียมไนเตรทเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ณ ค่าพีเอชต่าง ๆ

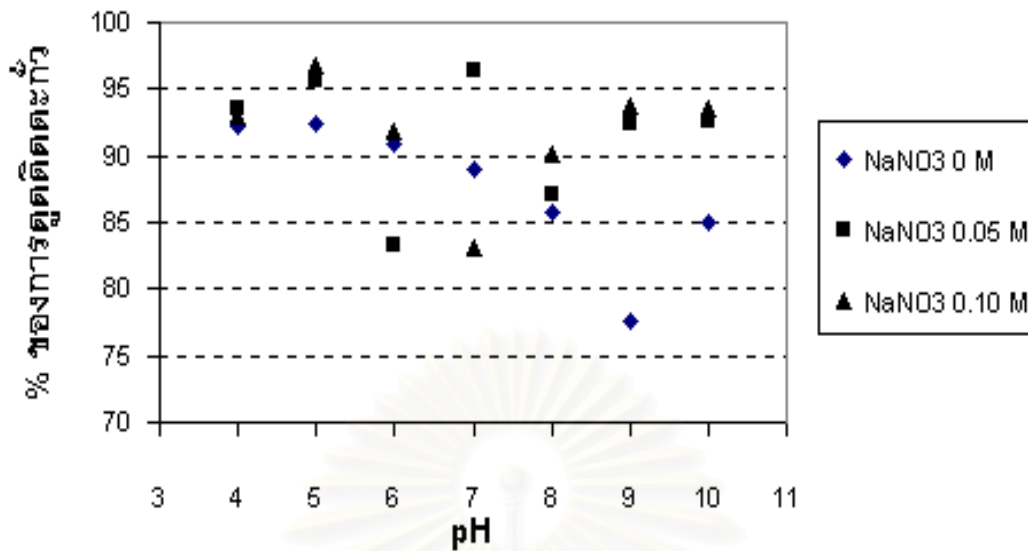
จากผลการทดลอง พบว่า ร้อยละของการดูดติดผิวของตะกั่วที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 พีพีเอ็มนั้นมีค่าสูงที่สุด แต่ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดติดผิวต่อมวลของตัวดูดซับอยู่ในระดับต่ำ ที่สุด รองลงมา คือ ที่ตะกั่วที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 พีพีเอ็มและที่ต่ำที่สุด คือที่ 20 พีพีเอ็มซึ่งมีร้อยละของการดูดติดผิวของตะกั่วที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำที่สุด แต่ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดติดผิวต่อมวลของตัวดูดซับอยู่ในระดับที่สูง ดังนั้น ความเข้มข้นของตะกั่วในช่วงเริ่มต้นที่พีเอชต่าง ๆ จะมีการแปรผันกับอัตราส่วนของปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดติดผิวต่อมวลของตัวดูดซับ

จากผลการทดลองนั้น ในเรื่องของแนวโน้มของกราฟนั้นมีเปอร์เซ็นต์การดูดติดผิว ตะกั่วที่เพิ่มขึ้นจากที่พีเอช 4 จนถึงที่พีเอช 6 จึงลดมาที่พีเอช 7 และเพิ่มขึ้นที่พีเอช 8 แล้วค่อย ๆ ลดลง ซึ่งใกล้เคียงกับการทดลองของ Sutha Khadhier ที่พบว่า ทราเยเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ จะสามารถใช้กำจัดแคทไอออนและแอนไอออนได้ดีในช่วงพีเอชตั้งแต่ 5 ถึง 8 นอกจากนี้ ยังสอดคล้องกับผลการทดลองของ พณจิตร ธนสิน (1996) อีกด้วยในเรื่องที่ว่าทราเยเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์จะมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนักได้ดีที่สุดที่พีเอชเท่ากับ 6 ดังนั้น จะกล่าวได้ว่า การดูดติดตะกั่วบนทราเยเคลือบเหล็กออกไซด์จะขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ดังการศึกษาของ Hildebrand & Blum (1974) อ้างถึงใน Forstner and Wittman (1981) ได้แสดงกลไกการดูดติดโลหะหนักบนไฮดรอกไซด์อย่างตะกั่วประจุ +2 จะทำปฏิกิริยากับเหล็กไฮดรอกไซด์ โดยตะกั่วจะถูกดูดติดใน stem layer ของโครงสร้างของไฮดรอกไซด์ และแลกเปลี่ยนไฮโดรเจนไอออนออกมาจนกระทั่งตะกั่วแสดงความชอบที่จะยึดเหนี่ยวกับกลุ่มไฮดรอกซิลของผลึก $FeO(OH)$ และต่อมา Gadde & Laitinen (1973) ซึ่งอ้างถึงใน Forstner and Wittman (1981) ได้ศึกษาเพิ่มเติมว่า การดูดติดของตะกั่วประจุ +2 ที่พีเอชประมาณ 5-7 จะลดลงอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งในช่วงพีเอชนี้ $FeOOH$ จะมีประจุบวก

4.4 ผลของความเข้มข้นไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่อการดูดติดผิว ตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ทราเยเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ของการดูดติดผิวของ ตะกั่ว 10 พีพีเอ็ม ณ ค่าพีเอชต่าง ๆ

ในการทดลองนี้ จะใช้ตะกั่วที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดสอบ การดูดติดผิวบนทราเยเคลือบเหล็กออกไซด์หนัก 1 กรัม ได้ปริมาตรน้ำตัวอย่าง 50 มิลลิลิตร ความเร็วรอบของการเขย่า 125 รอบต่อนาที โดยการใช้เวลาในการเขย่า 24 ชั่วโมง โดยการใช้ โซเดียม ไนเตรทเป็นตัวแทนของความเข้มข้นไอออนที่ความเข้มข้นโซเดียมไนเตรท 0, 0.05 และ 0.10 โมลาร์ใช้สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 1 มิลลิลิตร และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดไนตริกในการปรับค่าพีเอชตั้งแต่ 4 ถึง 10 ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ ๓3 และรูปที่ 4.6

จากการทดลองจะเห็นว่า ความแรงไอออนไม่มีผลต่อการดูดติดผิวตะกั่วบนทราเยเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ในทุก ๆ ช่วงของพีเอช ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Azizian, M., et.al. (1997) ดังนั้น การดูดติดผิวของตะกั่วบนทราเยเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์จะมีการดูดติดผิวทางเคมีหรือแบบเกิดพันธะเคมีกับตัวกลางดูดติดผิว (หรือแบบ inner-sphere surface complex)



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของความเข้มข้นไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่อการดูดซับตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ของการดูดซับตะกั่ว 10 พีพีเอ็ม ณ ค่าพีเอชต่าง ๆ

ซึ่งเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

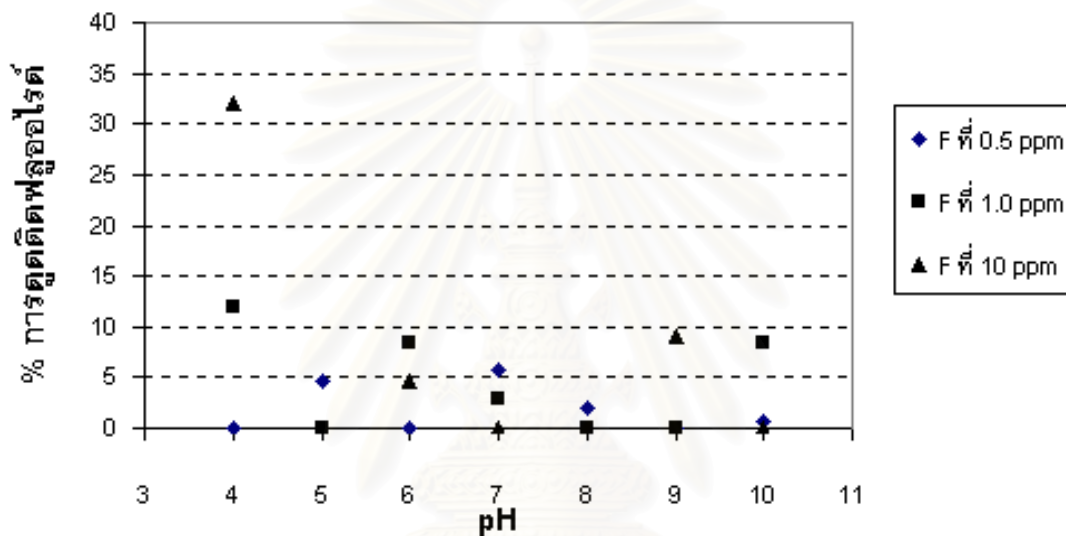


4.5 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟลูออไรด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่อการดูดซับตะกั่วฟลูออไรด์จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่โซเดียมไนเตรท 0.10 โมลาร์ ณ ค่าพีเอชต่าง ๆ

ในการทดลองนี้ จะใช้ฟลูออไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.5, 1.0 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดสอบการดูดซับตะกั่วบนทรายเคลือบเหล็กออกไซด์หนัก 1 กรัม ใช้ปริมาตรน้ำตัวอย่าง 50 มิลลิลิตร ความเร็วรอบของการเขย่า 125 รอบต่อนาที โดยการใช้เวลาในการเขย่า 24 ชั่วโมง ที่โซเดียมไนเตรท 0.1 โมลาร์ ใช้สารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ 1 มิลลิลิตรและใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดไนตริกในการปรับค่าพีเอชตั้งแต่ 4 ถึง 10 ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4 และรูปที่

4.7

จากการทดลองพบว่า ทราเยเคลือบเหล็กออกไซด์สามารถกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยวิธีการดูดติดผิวได้ในปริมาณน้อย (น้อยกว่า 10%) โดยมีแนวโน้มว่าทราเยเคลือบเหล็กออกไซด์จะสามารถดูดติดผิวฟลูออไรด์ได้ในปริมาณที่สูงขึ้นเมื่อค่าพีเอชต่ำลง เช่นเดียวกับแอนไอออนอื่น ๆ เช่น ซัลเฟตไอออน (Aoki, T. and Munemori, M., 1982) นอกจากนี้ เมื่อความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในช่วงเริ่มต้นที่ค่า พีเอชต่าง ๆ เพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วนของฟลูออไรด์ต่อมวลของตัวดูดซับก็เพิ่มขึ้นด้วย แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในช่วงเริ่มต้นที่พีเอชต่าง ๆ จะมีการแปรผันโดยตรงกับอัตราส่วนของฟลูออไรด์ต่อมวลของตัวดูดซับ

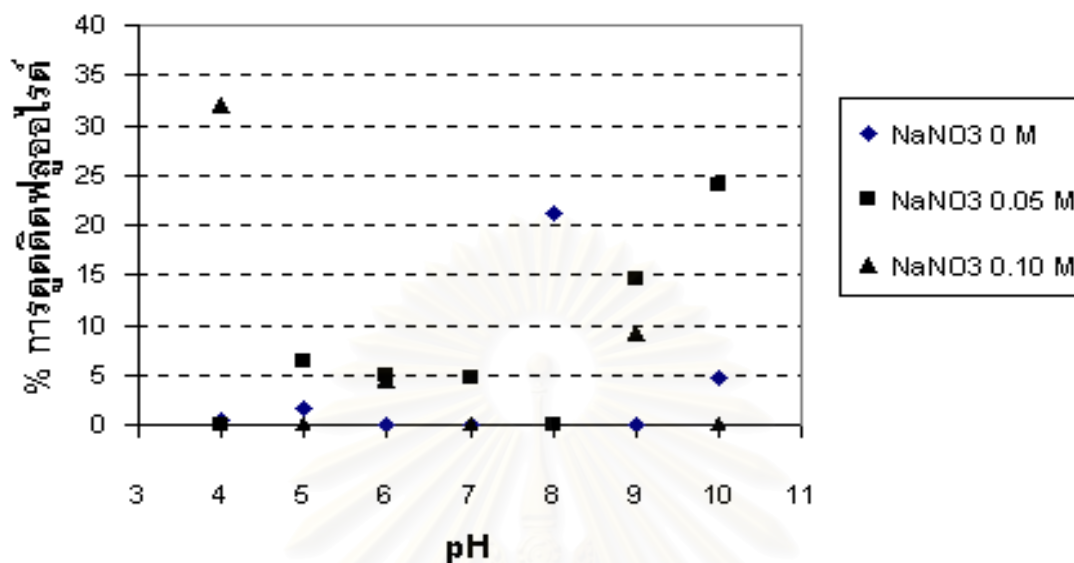


รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟลูออไรด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่อการดูดติดผิวฟลูออไรด์จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ทราเยเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ไซเดียมไนเตรท 0.10 โมลาร์ ณ ค่าพีเอชต่าง ๆ

4.6. ผลของความเข้มข้นไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่อการดูดติดผิวฟลูออไรด์จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ทราเยเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ของการดูดติดผิวของฟลูออไรด์ 10 พีพีเอ็ม ณ ค่าพีเอชต่าง ๆ

ในการทดลองนี้ จะใช้ฟลูออไรด์ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดสอบการดูดติดผิวบนทราเยเคลือบเหล็กออกไซด์หนัก 1 กรัม ปริมาตรน้ำตัวอย่าง 50 มิลลิลิตร ความเร็วรอบของการเขย่า 125 รอบต่อนาที โดยการใช้เวลาในการเขย่า 24 ชั่วโมง โดยการใช้ไซเดียมไนเตรทเป็นตัวแทนของความเข้มข้นไอออนโดยใช้ความเข้มข้นที่ 0, 0.05 และ 0.10 โมลาร์

ใช้สารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ 1 มิลลิลิตร และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดไนตริกในการปรับค่าพีเอชตั้งแต่ 4 ถึง 10 ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ ๗5 และรูปที่ 4.8

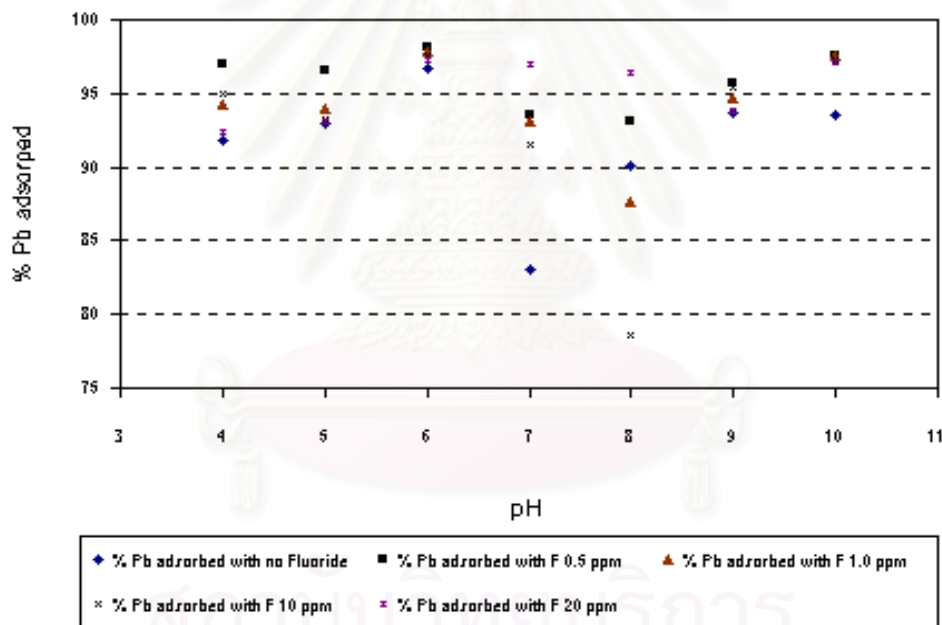


รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของความเข้มข้นไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่อการดูดติดผิวฟลูออไรด์จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ของการดูดติดผิวของฟลูออไรด์ 10 พีพีเอ็ม ณ ค่าพีเอชต่าง ๆ

จากการทดลองจะเห็นว่า ความเข้มข้นไอออนไม่มีผลต่อการดูดติดผิวฟลูออไรด์บนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ในทุก ๆ ช่วงของพีเอช ซึ่งไม่สอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่า ความเข้มข้นไอออนนั้นจะมีผลต่อการดูดติดผิวแบบ outer-sphere surface complex และจะมีผลให้การดูดติดผิวของฟลูออไรด์นั้นลดลง แต่เนื่องจากหัวข้อ 4.5 นั้น ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์สามารถกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยวิธีการดูดติดผิวได้ในปริมาณที่น้อยอยู่แล้ว ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า ผลของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของฟลูออไรด์กับพื้นผิวของตัวกลางจะมีค่ามากกว่าผลของแรงดึงดูดจากความเข้มข้นไอออนในสารละลายนั้นด้วย โดยที่พีเอชต่ำ คือ ในช่วง 4-6 จะมีการดูดติดผิวของฟลูออไรด์ได้ดีกว่าในช่วงพีเอชที่สูงขึ้นเช่นเดิม

4.7 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟลูออไรด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่อการดูดติดผิวตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่โซเดียมไนเตรท 0.10 โมลาร์ ณ ค่าพีเอชต่าง ๆ

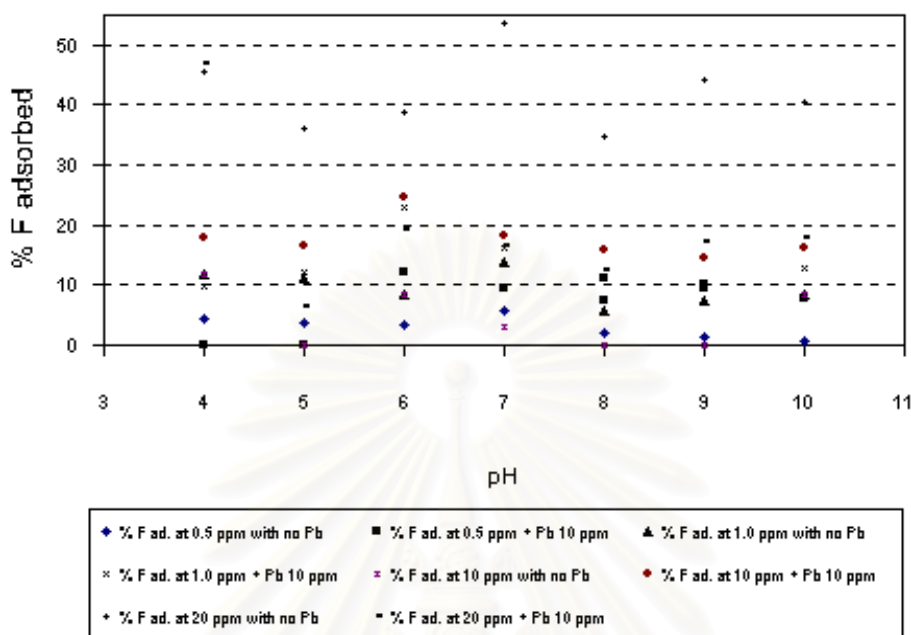
ในการทดลองนี้ จะใช้ตะกั่วที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดสอบการดูดติดผิวบนทรายเคลือบเหล็กออกไซด์หนัก 1 กรัมในการแปรค่าฟลูออไรด์ 0, 0.5, 1.0, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณน้ำตัวอย่าง 50 มิลลิลิตร ความเร็วรอบของการเขย่า 125 รอบต่อนาที โดยการใช้เวลาในการเขย่า 24 ชั่วโมง ที่โซเดียมไนเตรท 0.1 โมลาร์ ใช้สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 1 มิลลิลิตร และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดไนตริกในการปรับค่าพีเอชตั้งแต่ 4 ถึง 10 ซึ่งสามารถแสดงผลการทดลองการดูดติดผิวของตะกั่วดังแสดงในตารางที่ ๗6 และรูปที่ 4.9 นอกจากนี้ ยังสามารถเปรียบเทียบการดูดติดผิวของฟลูออไรด์ดังแสดงได้ในตารางที่ ๗7 และรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟลูออไรด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่อการดูดติดผิวตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่โซเดียมไนเตรท 0.10 โมลาร์ ณ ค่าพีเอชต่าง ๆ

จากผลการทดลองในเบื้องต้นนั้น พบว่า ฟลูออไรด์ไอออนสามารถถูกดูดติดผิวบนทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ได้ในปริมาณที่น้อย และยังมีคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกับไนเตรทไอออน คือ ทั้งสองเป็นแอนไอออนที่มีประจุเป็น -1 เช่นเดียวกัน ดังนั้น ทั้งสองปัจจัยจึงไม่มีผลกับ

การดูดติดผิวตะกั่วบนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ซึ่งเป็นการเกิดการดูดติดผิวทางเคมีหรือแบบเกิดพันธะเคมีกับตัวกลางดูดซับ (หรือแบบ inner-sphere surface complex)



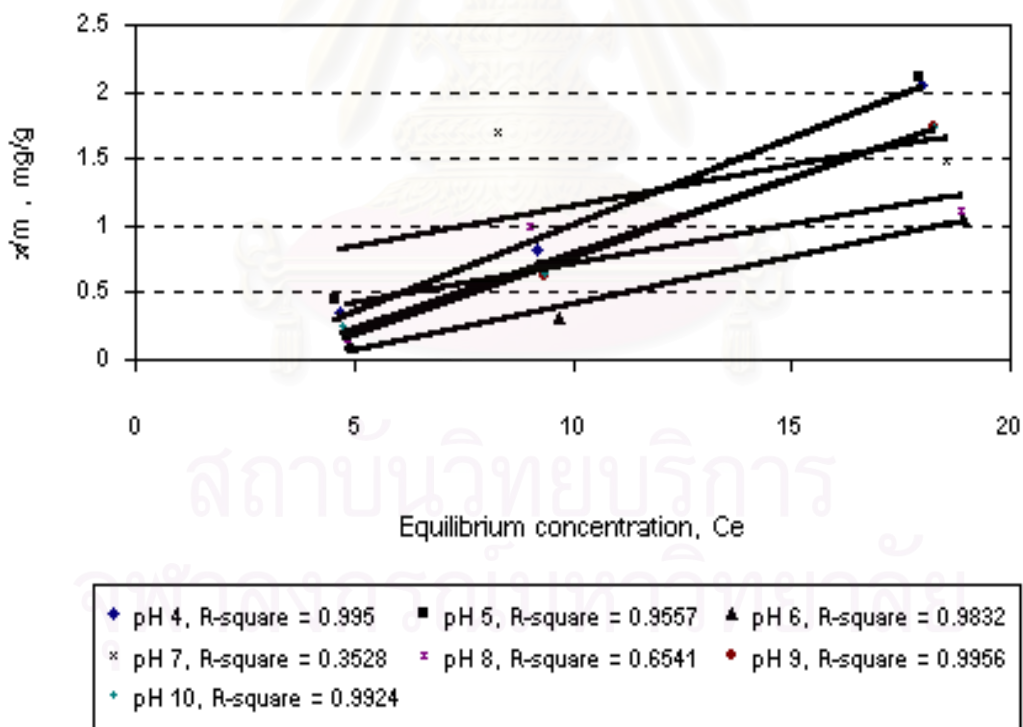
รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ของร้อยละของฟลูออไรด์ 0.5, 1.0, 10 และ 20 พีพีเอ็มที่ถูกดูดติดผิวทั้งเวลาที่มีและไม่มีตะกั่ว 10 พีพีเอ็มในโซเดียมไนเตรท 0.1 โมลาร์ที่ค่าพีเอชต่าง ๆ

ส่วนจากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่า การดูดติดผิวของฟลูออไรด์บนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์เมื่อมีตะกั่วผสมอยู่ด้วยจะมีการดูดติดผิวฟลูออไรด์ใกล้เคียงกับเมื่อไม่มีตะกั่วผสมอยู่ นั่นแสดงให้เห็นว่า ตะกั่วไม่มีผลต่อการดูดติดผิวฟลูออไรด์บนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ หรืออาจจะกล่าวได้ว่า การดูดติดผิวฟลูออไรด์บนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์จะเป็นการดูดติดผิวทางกายภาพหรือมีการดูดติดที่ผิวนอกของตัวกลางดูดซับเท่านั้น (หรือแบบ outer-sphere surface complex)

4.8 การหาค่าสมดุลการดูดติดผิว (Adsorption Equilibrium) ของตะกั่วที่มี ความเข้มข้นเป็น 5, 10 และ 20 พีพีเอ็ม ณ ค่าพีเอชต่าง ๆ ที่ไซเดียมไนเตรท 0.1 โมลาร์

จากผลการทดลอง เมื่อนำมาหาค่าสมดุลการดูดติดผิวของตะกั่ว 5, 10 และ 20 พีพีเอ็ม ณ ค่าพีเอชต่าง ๆ ที่ไซเดียมไนเตรท 0.1 โมลาร์ตามแบบจำลองแบบเชิงเส้นได้ดังตารางที่ ผ8 หรือตามรูปที่ 4.11

จากการหาค่าสมดุลการดูดติดผิวของตะกั่ว 5, 10 และ 20 พีพีเอ็ม ณ ค่าพีเอช ต่าง ๆ ที่ไซเดียมไนเตรท 0.1 โมลาร์ พบว่า จากรูปที่ 4.11 เส้นกราฟเป็นเส้นตรง ดังนั้น จึงเป็นไปได้ว่า การดูดติดผิวของตะกั่วที่การทดลองนี้จะมีไอโซเทอมที่มีค่าสมดุลการดูดติดผิวอยู่สูงกว่าจุดวิกฤตที่ให้ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช (Kevin J. Farley, David A. Dzombak และ Francois M. M. Morel, 1984) จึงมีค่าสมดุลการดูดติดผิวที่เป็นไปตามแบบจำลองแบบเส้นตรง (Linear isotherm) จะเห็นว่า ไอโซเทอมของการดูดติดผิวของตะกั่วบนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์จะให้ค่าเป็น เส้นตรงโดยเฉพาะที่ค่าพีเอช 4, 5, 6, 9 และ 10 หรืออัตราส่วนของตะกั่วที่ถูกดูดติดผิวต่อมวล ของตัวกลางดูดซับจะแปรผันโดยตรงกับความเข้มข้นของตะกั่วที่สภาวะสมดุลนั่นเอง



รูปที่ 4.11 แสดงการหาค่าสมดุลการดูดติดผิวของตะกั่ว 5, 10 และ 20 พีพีเอ็ม ณ ค่าพีเอช ต่าง ๆ ที่ไซเดียมไนเตรท 0.1 โมลาร์ตามแบบจำลองแบบเชิงเส้น

4.9 ผลการทดลองเปรียบเทียบกันระหว่างผลการทดลองจากน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง โดยการใช้ปริมาตรน้ำตัวอย่าง 50 มิลลิลิตร

จากการทดลองกับน้ำเสียจริงจาก 3 แหล่ง ได้แก่

1. น้ำเสียจากห้องปฏิบัติการตรวจสอบน้ำเสียของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเก็บในวันที่ 20 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2544

2. น้ำเสียจากบ่อบำบัดน้ำเสียของบริษัท ไทยโทร เท็กซ์ไทล์ มิลลส์ จำกัด (มหาชน) ซึ่งเก็บในวันที่ 7 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2544

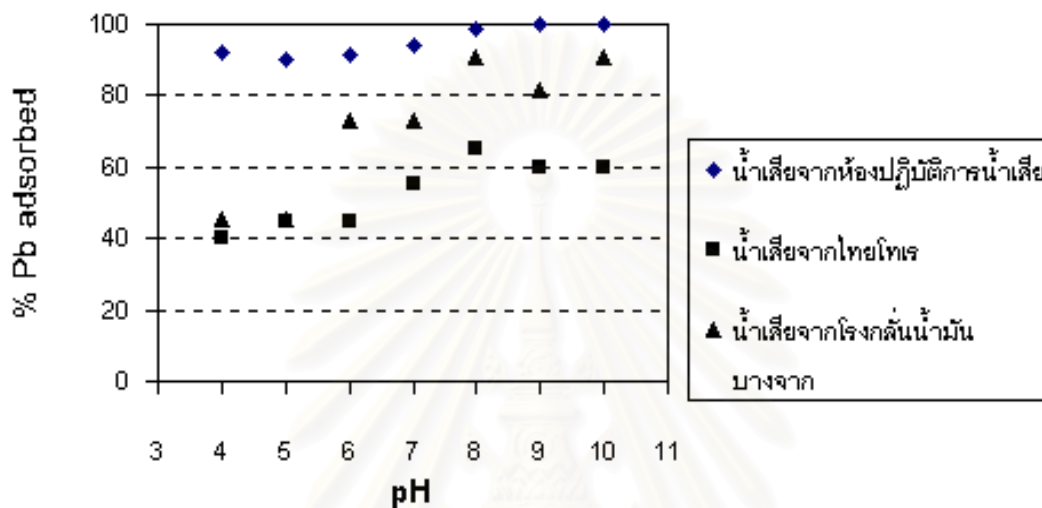
3. น้ำเสียจากระบบบำบัดน้ำเสียขั้นที่ 1 ของโรงกลั่นน้ำมันบางจาก ซึ่งเก็บในวันที่ 8 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2544

โดยน้ำเสียที่นำมาจากการใช้งานจริงทั้ง 3 แหล่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติของน้ำเสียที่นำมาจากการใช้งานจริง 3 แหล่ง

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ	น้ำเสียจากไทยโทรเท็กซ์	น้ำเสียจากโรงกลั่นบางจาก
PH		4	7-8	7.7
DS	มิลลิกรัมต่อลิตร	-	1,200-1,700	3,901
SS	มิลลิกรัมต่อลิตร	-	10-30	28
บีโอดี	มิลลิกรัมต่อลิตร	-	10-30	12
ซีโอดี	มิลลิกรัมต่อลิตร	-	100-150	68
ตะกั่ว	มิลลิกรัมต่อลิตร	9.33	0.20	0.11
แคดเมียม	มิลลิกรัมต่อลิตร	4.00	-	-
ทองแดง	มิลลิกรัมต่อลิตร	10.00	0.18	-
โครเมียม	มิลลิกรัมต่อลิตร	9.60	-	-
นิกเกิล	มิลลิกรัมต่อลิตร	0.30	0.23	-
สังกะสี	มิลลิกรัมต่อลิตร	0.60	0.11	-
ปรอท	มิลลิกรัมต่อลิตร	-	-	< 0.0005
ฟลูออไรด์	มิลลิกรัมต่อลิตร	-	16.8	0.2

ได้ทำการทดลองโดยการนำน้ำเสียตัวอย่างชนิดละ 50 มิลลิลิตรมาทำการทดสอบการดูดติดผิวของตะกั่วบนทรายเคลือบเหล็กออกไซด์หนัก 1 กรัม ความเร็วรอบของการเขย่า 125 รอบต่อนาที โดยการใช้เวลาในการเขย่า 24 ชั่วโมงและใช้สารละลายฟอสเฟตบัพเฟออร์ 1 มิลลิลิตร โดยการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดไนตริกในการปรับค่าพีเอชตั้งแต่ 4 ถึง 10 ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ ๘9 และรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แสดงการดูดติดผิวของตะกั่วบนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ของน้ำเสียจากการใช้งานจริง 3 แหล่ง

จากผลการทดลอง พบว่า เปรอร์เซ็นต์ของการดูดติดผิวของตะกั่วของน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการตรวจสอบน้ำเสียมีค่าสูงที่สุด (โดยที่ไม่สามารถตรวจสอบหาฟลูออไรด์ได้เลย) ส่วนที่รองลงมา คือ เปรอร์เซ็นต์ของการดูดติดผิวของตะกั่วของน้ำเสียจากโรงกลั่นน้ำมันบางจาก (โดยมีฟลูออไรด์ตอนเริ่มต้นเพียงประมาณ 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตรเท่านั้น แต่หลังการทดลองไม่สามารถตรวจสอบหาฟลูออไรด์ได้เลย) และที่ต่ำที่สุด คือ เปรอร์เซ็นต์ของการดูดติดผิวของตะกั่วของน้ำเสียจากไทยโทเร (โดยมีฟลูออไรด์ตอนเริ่มต้นอยู่ประมาณ 16.8 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่หลังการทดลองแล้วส่วนใหญ่ไม่สามารถตรวจสอบพบฟลูออไรด์เลย) แต่ทั้ง 3 แหล่งจะมีเปอร์เซ็นต์การดูดติดผิวของตะกั่วสูงที่สุดอยู่ที่พีเอช 8 ซึ่งไม่สอดคล้องกับการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งจะมีเปอร์เซ็นต์การดูดติดผิวของตะกั่วสูงที่สุดอยู่ที่พีเอชเท่ากับ 6 อาจจะเกิดจากการมีสารปนเปื้อนชนิดอื่น ๆ รวมอยู่ด้วยอาจจะส่งผลต่อการดูดติดผิวของตะกั่วบนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ของน้ำเสียที่เกิดจากการใช้งานจริงได้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การดูดติดผิวของตะกั่วและฟลูออไรด์บนทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ในน้ำเสียสังเคราะห์จะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 10 ชั่วโมงแรกของการทดลอง และความเข้มข้นของตะกั่วและฟลูออไรด์จะเข้าอยู่ในสภาวะสมดุลภายในเวลาไม่เกิน 24 ชั่วโมง

2. การดูดติดผิวของตะกั่วบนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์จะยิ่งมาก หากความเข้มข้นของตะกั่วในช่วงเริ่มต้นยิ่งน้อยที่ค่าพีเอชต่าง ๆ แต่ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดติดผิวต่อมวลของตัวดูดซับจะน้อยลงเช่นกัน ส่วนฟลูออไรด์นั้น จะให้ผลตรงกันข้าม คือ การดูดติดผิวของฟลูออไรด์บนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์จะยิ่งมาก หากความเข้มข้นในช่วงเริ่มต้นมากขึ้นที่ค่าพีเอชต่าง ๆ และปริมาณฟลูออไรด์ที่ถูกดูดติดผิวต่อมวลของตัวดูดซับจะเพิ่มขึ้นด้วย

3. พีเอชเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการดูดติดผิวของตะกั่วและฟลูออไรด์บนทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์สามารถใช้กำจัดตะกั่วได้ดีในช่วงพีเอช 5 ถึง 8 และจะใช้ได้ดีที่สุดที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6 ส่วนฟลูออไรด์นั้นจะถูกดูดติดผิวมากที่สุดที่ค่าพีเอช 4 ถึง 5 และกำจัดได้ลดลงเมื่อเพิ่มพีเอชสูงขึ้น

4. ความเข้มข้นไอออนไม่มีผลต่อการดูดติดผิวของตะกั่วบนทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ แสดงว่า การดูดติดผิวของตะกั่วจะเป็นการดูดติดผิวทางเคมีหรือ inner-sphere surface complex ดังสมการ



5. ฟลูออไรด์ไอออนมีความคล้ายคลึงกับไนเตรทไอออนซึ่งใช้เป็นตัวแทนของความเข้มข้นไอออน แต่ความสามารถในการดูดติดผิวของฟลูออไรด์บนทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

เกิดได้ในปริมาณที่น้อยในทุก ๆ ช่วงพีเอช และความเข้มข้นไอออนไม่มีผลต่อการดูดติดผิวของฟลูออไรด์ ดังนั้น แรงดึงดูดของฟลูออไรด์ไอออนมีค่ามากกว่าความเข้มข้นไอออนในสารละลาย

6. การดูดติดผิวของฟลูออไรด์บนทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ไม่มีความแตกต่างกันไม่ว่าจะมีตะกั่วผสมอยู่หรือไม่ก็ตาม แสดงว่า การดูดติดผิวของฟลูออไรด์บนทรายเคลือบเหล็กออกไซด์จะเป็นการดูดติดผิวทางกายภาพหรือแบบ outer-sphere surface complex

ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาผลของฟลูออไรด์ที่มีต่อการดูดติดผิวของตะกั่วโดยใช้ทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมดังนี้

1. ศึกษาการดูดติดผิวของไดวาเลนต์แคทไอออนชนิดอื่น ๆ โดยใช้ทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ในช่วงพีเอช 6-8 โดยศึกษาผลของปัจจัยอื่น ๆ เช่น ปริมาณน้ำตัวอย่าง น้ำหนักของตัวกลาง ขนาดของตัวกลาง เป็นต้น

2. ศึกษาผลของสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีต่อการดูดติดผิวของไดวาเลนต์แคทไอออนโดยใช้ทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- พจนจิตร์ ธนสิน. การกำจัดสังกะสีและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยตัวกลางทรายเคลือบออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส. ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- พรสวรรค์ มหาโชคเลิศวัฒนา. การกำจัดตะกั่วในน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่โดยวิธีตกตะกอนทางเคมี. ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2529.
- มันสิน ตันกุลเวศม์. คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
- มันสิน ตันกุลเวศม์. วิศวกรรมการประปา. เล่มที่ 2. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2532.
- สมรรัตน์ วัฒนธรรม และ อานนท์ ลีลานนท์. ปริมาณฟลูออไรด์ธรรมชาติในน้ำบริโภคท้องถิ่นอำเภอหาดใหญ่. วารสารสงขลานครินทร์ 3(2524) : 163-164.

ภาษาอังกฤษ

- Aoki T. and Munemori M. Recovery of Chromium(VI) from Wastewaters with Iron(III) Hydroxide-I. Water Resource 16(1982) : 793-796.
- Benjamin M. M. Adsorption and Surface Precipitation of Metal on Amorphous Iron Oxyhydroxide. Environmental Science Technology 17(1983) : 686-692.
- Benjamin M. M. and Leckie J. O. Multiple-Site Adsorption of Cd, Cu, Zn, and Pb on Amorphous Iron Oxyhydroxide. Journal of Colloid and Interface Science 79(1981) : 209-221.
- Boruff C. Removal of fluoride from drinking water. Industrial & Engineering Chemistry 26(1934) : 69.
- Culp R. and Stoltenberg H. Fluoride Reduction at La Crosse. Journal of the American Water Works Association 50(1958) : 423.

- Dalang F., Buffle J., and Haerdi W. Study of the Influence of Fulvic Substances on the Adsorption of Copper(II) Ions at the Kaolinite Surface. Environmental Science Technology 18(1984) : 135-141.
- David, G.K., and Marion, L.J. Cation Adsorption by Hydrous Metal Oxides and Clay. Adsorption of Inorganics at Solid-liquid Interface Ann Arbor Science Publisher Inc., 1976.
- Davis J. A. and Kent D. B. Surface Complexation Modeling in Aqueous Geochemistry. Mineral-Water Interface Geochemistry 23(1990) : 213-221.
- Diamadopoulos, E., Ioannidis, S., and Sakellaropoulos, G.P. As(V) Removal from potable water. Water Quality Office. (1992) : 454-458.
- Dinitrova S. V. and Mehandgiev D. R. Lead Removal From Aqueous Solutions by Granulated Blast-Furnace Slag. Water Resource 32(1998) : 3289-3292.
- Du Q., Sun Z., Forsling W., and Tang H. Adsorption of Copper at Aqueous Illite Surfaces. Journal of Colloid and Interface Science 187(1997) : 232-242.
- Eckenfelder, W. W., Jr. Industrial Water Pollution Control 2nd ed., McGraw-Hill, 1989.
- Edwards, M., and Benjamin, M.M. Adsorptive Filtration Using Coated Sand : A New Approach for Treatment of Metal-bearing Wastes. J. Water Pollut. Control Fed. 61(1989) : 1523-1533.
- Edwards, M., and Benjamin, M.M. Regeneration and Reuse of Iron Hydroxide Adsorbent in Treatment of Metal-bearing Wastes. J. Water Pollut. Control Fed. 61(1989) : 481-490.
- Farley K. J., Dzombak D. A., and Morel Francois M. M. A Surface Precipitation Model for the sorption of Cations on Metal Oxides. Journal of Colloid and Interface Science 106(1985) : 226-246.
- Faust S. D. and Aly O. M. Adsorption Process for Water Treatment. Butterworth Publishers, 1987.
- Fergusson. The Heavy Elements: Chemistry, Environmental Impact and Health Effects. Pergamon Press, 1990.
- Forstner and Wittman. Metal Concentration in River, Lake and Ocean Water. Metal Pollution in the Aquatic Environment, 1981.

- Forstner and Wittman. Metal Transfer between Solid and Aqueous Phase. Metal Pollution in the Aquatic Environment, 1981.
- Garrels, R.M., and C.L. Christ. Solutions, Minerals, and Equilibria. Harper, 1965.
- Khaodhiar S. Removal of Chromium, Copper, and Arsenic from Contaminated Groundwater Using Iron-Oxide Composite Adsorbents. The degree of Doctor Philosophy in Civil Engineering Oregon State University, 1997.
- Kuan W., Lo S., Wang M. K., and Lin C. Removal of Se(IV) and Se(VI) from Water by Aluminum-Oxide-Coated Sand. Water Resource 32(1998) : 915-923.
- Kubota, M., Tokunaga, S., Uchiumi, A. Handbook of industrial poisoning. Ishiyaku Publishing, 1981.
- Lopez A.- Delgado, Perez C. and Lopez F. A. Sorption of Heavy Metals on Blast Furnace Sludge. Water Resource 4(1998) : 989-996.
- Maier F. Method of removing fluoride from water. American Journal of Public Health & Nation's Health 37(1947) : 1559.
- Mao Y. and Fung B. M. A Study of the Adsorption of Acrylic Acid and Maleic Acid from Aqueous Solutions onto Alumina. Journal of Colloid and Interface Science 191(1997) : 216-221.
- Metcalf & Eddy, Inc. Wastewater Engineering. 3rd ed. McGraw-Hill Book Co., 1991.
- Namasivayam C. and Ranganathan K. Effect of Organic Ligands on the Removal of Pb(II), Ni(II) and Cd(II) by "Waste" Fe(III)/Cr(III) Hydroxide. Water Resource 32(1998) : 969-971.
- Namasivayam C. and Ranganathan K. Removal of Pb(II), Cd(II), Ni(II) and mixture of Metal Ions by Adsorption onto 'waste' Fe(III)/Cr(III) Hydroxide and Fixed Bed Studies. Environmental Technology 16(1995) : 851-860.
- Ottaviani M. F., Ceresa E. M. and Visca M. Cation Adsorption at the TiO₂-Water Interface. Journal of Colloid and Interface Science 108(1985) : 114-122.
- Pauling, L. The nature of chemical bond. 3rd ed. Cornel University Press, 1960.
- Patterson, J.W. Industrial Wastewater Treatment Technology. 2nd ed. Butterworth Publishers, 1985.
- Pedall, G. Lead-Contaminated Sediment at Huay Khil Ti, Thong Pha Phum, Kanchanaburi. Investigation, Risk assessment and Proposal for Cleanup, 1999.

- Pierce M. L. and Moore C. B. Adsorption of Arsenite and Arsenate on Amorphous Iron Hydroxide. Water Resource 16(1982) : 1247-1253.
- Radeva T., Widmaier J., and Petkanchin I. Adsorption of Hydrolyzed Polyacrylamides on Ferric Oxide Particles: Counterion Mobility in Stabilized Suspensions. Journal of Colloid and Interface Science 189(1997) : 23-26.
- Rahman M. A. and Ghosh A. K. Determination of Specific Surface Area of Ferric Oxide, Alumina, and Silica Gel Powders Using Adsorption of Pyridine from *n*-Heptane Solutions. Journal of Colloid and Interface Science 77(1980) : 50-52.
- Rodda D. P., Wells J. D. and Johnson B. B. Anomalous Adsorption of Copper(II) on Goethite. Journal of Colloid and Interface Science 184(1996) : 564-569.
- Rodda D. P., Wells J. D. and Johnson B. B. Modeling the Effect of Temperature on Adsorption of Lead(II) and Zinc(II) onto Goethite at Constant pH. Journal of Colloid and Interface Science 184(1996) : 365-377.
- Snoeyink V. L. and D. Jenkins. Water Chemistry. John Wiley and Sons, 1985.
- Sposito, G. On the surface complexation model of the oxide-aqueous solution interface. J. Colloid Interface Sci. 91(1983) : 329-340.
- Stumm, W., and J.J. Morgan. Aquatic Chemistry. Wiley-Interscience, 1970.
- Stumm, W., and J.J. Morgan. Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Water. 3rd ed., Wiley-Interscience, 1995.
- Vohra M. S. and Davis A. P. Adsorption of Pb(II), EDTA, and Pb(II)-EDTA onto TiO₂. Journal of Colloid and Interface Science 198(1998) : 18-26.
- Wilms, D., Havte, A.V., Dijk, J.V., and Scholler, M. Recovery of Nickle by Crystallization of Nickle Carbonate in a Fluidized-bed Reactor. Water Pollution Control in Asia (1988) : 449-456.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๘1 แสดงการหาเวลาที่ใช้ที่สภาวะสมดุลของการดูดติดผิวของตะกั่วและ
ฟลูออไรด์บนทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

เวลาที่ใช้ในการทดลอง (ชั่วโมง)	ร้อยละของตะกั่ว ที่ถูกดูดติดผิว	ร้อยละของฟลูออไรด์ ที่ถูกดูดติดผิว
1	28.02	9.89
2	36.56	22.09
5	62.99	22.76
10	79.51	26.83
20	91.33	32.93
30	92.27	33.00
40	93.40	33.10

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ2 แสดงผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่อการ
 ดูดติดผิวตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่
 โซเดียมไนเตรทเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ณ ค่าพีเอชต่าง ๆ

ค่าพีเอช	ร้อยละของ การดูดติดผิว ตะกั่วที่ 5 พีพีเอ็ม	ร้อยละของ การดูดติดผิว ตะกั่วที่ 10 พีพีเอ็ม	ร้อยละของ การดูดติดผิว ตะกั่วที่ 20 พีพีเอ็ม
4	92.95	91.77	89.75
5	91.15	92.99	89.52
6	97.79	96.75	94.72
7	93.17	83.04	92.55
8	96.72	90.12	94.42
9	95.97	93.65	91.30
10	95.06	93.57	91.29

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ3 แสดงผลของความเข้มข้นไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่อการดูดติดผิว ตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ของการดูดติดผิวของตะกั่ว 10 พีพีเอ็ม ณ ค่าพีเอชต่าง ๆ

ค่าพีเอช	ร้อยละของ การดูดติดตะกั่ว ที่ NaNO_3 0 M	ร้อยละของ การดูดติดตะกั่ว ที่ NaNO_3 0.05 M	ร้อยละของ การดูดติดตะกั่ว ที่ NaNO_3 0.10 M
4	92.13	93.61	92.99
5	92.37	95.60	96.75
6	90.86	83.36	91.77
7	89.07	96.41	83.04
8	85.67	87.07	90.12
9	77.60	92.37	93.65
10	85.07	92.56	93.57

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ4 แสดงผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟลูออไรด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่อการดูดติดผิวฟลูออไรด์จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่โซเดียมไนเตรท 0.10 โมลาร์ ณ ค่าพีเอชต่าง ๆ

ค่าพีเอช	ร้อยละของ การดูดติด F ⁻ ที่ 0.5 ppm	ร้อยละของ การดูดติด F ⁻ ที่ 1.0 ppm	ร้อยละของ การดูดติด F ⁻ ที่ 10 ppm
4	NA	11.88	31.96
5	4.55	NA	NA
6	NA	8.49	4.57
7	5.69	2.89	NA
8	1.90	NA	NA
9	NA	NA	9.13
10	0.76	8.49	NA

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ5 แสดงผลของความเข้มข้นไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่อการดูดติดผิว
 ฟลูออไรด์จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ของ
 การดูดติดผิวของฟลูออไรด์ 10 พีพีเอ็ม ณ ค่าพีเอชต่าง ๆ

ค่าพีเอช	ร้อยละของ การดูดติด F ⁻ ที่ NaNO ₃ 0 M	ร้อยละของ การดูดติด F ⁻ ที่ NaNO ₃ 0.05M	ร้อยละของ การดูดติด F ⁻ ที่ NaNO ₃ 0.10M
4	0.42	NA	31.96
5	1.70	6.29	NA
6	NA	5.03	4.57
7	NA	4.61	NA
8	21.22	NA	NA
9	NA	14.67	9.13
10	4.67	23.97	NA

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ6 แสดงผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟลูออไรด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่อการดูดติดผิวตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่โซเดียมไนเตรท 0.10 โมลาร์ ณ ค่าพีเอชต่าง ๆ

ค่าพีเอช	%Pb adsorbed with no F	%Pb adsorbed + 0.5 ppm F	%Pb adsorbed + 1.0 ppm F	%Pb adsorbed + 10 ppm F	%Pb adsorbed + 20 ppm F
4	91.77	96.98	94.24	95.00	92.38
5	92.99	96.58	93.90	93.20	93.05
6	96.75	98.17	97.78	97.50	97.23
7	83.04	93.58	93.04	91.57	96.95
8	90.12	93.10	87.68	78.59	96.40
9	93.65	95.76	94.72	95.43	93.78
10	93.57	97.50	97.50	97.26	97.09

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๗7 แสดงผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่อการ
ดูดติดผิวฟลูออไรด์ 0.5, 1.0, 10 และ 20 พีพีเอ็มโดยใช้ทรายเคลือบ
เหล็กออกไซด์ที่โซเดียมไนเตรท 0.10 โมลาร์ ณ ค่าพีเอชต่าง ๆ

ส่วนผสม	% การ ดูดติด F ที่พีเอช 4	% การ ดูดติด F ที่พีเอช 5	% การ ดูดติด F ที่พีเอช 6	% การ ดูดติด F ที่พีเอช 7	% การ ดูดติด F ที่พีเอช 8	% การ ดูดติด F ที่พีเอช 9	% การ ดูดติด F ที่พีเอช 10
F 0.5 ppm	4.55	3.71	3.43	5.69	1.90	1.48	0.76
F 0.5ppm+Pb 10ppm	12.24	9.42	10.99	9.42	7.85	7.53	10.04
F 1.0 ppm	11.88	10.97	8.49	13.98	5.79	7.58	8.49
F 1.0ppm+Pb 10ppm	9.70	12.29	22.80	16.21	11.64	10.49	12.88
F 10 ppm	11.88	NA	8.49	2.89	NA	NA	8.49
F 10ppm+Pb 10ppm	17.87	16.63	24.58	18.11	15.77	14.46	16.23
F 20 ppm	45.45	36.09	38.92	53.55	34.87	44.21	40.48
F 20ppm+Pb 10ppm	47.07	6.36	19.08	16.54	12.42	17.15	17.86

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ8 การหาค่าสมมูลการดูดติดผิวของตะกั่ว 5, 10 และ 20 พีพีเอ็ม ณ ค่าพีเอชต่าง ๆ ที่โซเดียมไนเตรท 0.1 โมลาร์

ค่าพีเอช	Co	Ce	x	m,g	x/m,mg/g
4	5	4.65	0.35	1	0.35
4	10	9.18	0.82	1	0.82
4	20	17.95	2.05	1	2.05
5	5	4.56	0.44	1	0.44
5	10	9.3	0.7	1	0.7
5	20	17.9	2.1	1	2.1
6	5	4.89	0.11	1	0.11
6	10	9.68	0.32	1	0.32
6	20	18.94	1.06	1	1.06
7	5	4.66	0.34	1	0.34
7	10	8.3	1.7	1	1.7
7	20	18.51	1.49	1	1.49
8	5	4.84	0.16	1	0.16
8	10	9.01	0.99	1	0.99
8	20	18.88	1.12	1	1.12
9	5	4.8	0.2	1	0.2
9	10	9.37	0.63	1	0.63
9	20	18.26	1.74	1	1.74
10	5	4.75	0.25	1	0.25
10	10	9.36	0.64	1	0.64
10	20	18.26	1.74	1	1.74

ตารางที่ ๘9 การทดสอบการดูดติดผิวตะกั่วบนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ของน้ำเสียที่เกิดจากการใช้จริง 3 แหล่ง

pH	% Pb adsorbed จาก (1)	% F adsorbed จาก (1)	% Pb adsorbed จาก (2)	% F adsorbed จาก (2)	% Pb adsorbed จาก (3)	% F adsorbed จาก (3)
4	92.28	N/A	40	91.99	45.45	N/A
5	90.35	N/A	45	N/A	45.45	N/A
6	91.32	N/A	45	N/A	72.73	N/A
7	94.32	N/A	55	55.07	72.73	N/A
8	98.39	N/A	65	N/A	90.91	N/A
9	99.79	N/A	60	N/A	81.82	N/A
10	100	N/A	60	N/A	90.91	N/A

หมายเหตุ

- (1) น้ำเสียจากห้องปฏิบัติการตรวจสอบน้ำเสียของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในวันที่ 20 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2544
- (2) น้ำเสียจากบ่อกักน้ำเสียของบริษัท ไทยโทเร จำกัด ในวันที่ 7 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2544
- (3) น้ำเสียจากระบบบำบัดน้ำเสียขั้นที่ 1 ของโรงกลั่นน้ำมันบางจาก ในวันที่ 8 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2544

ตารางที่ ๑๐ แสดงร้อยละของการดูดติดผิวตะกั่ว 5, 10 และ 20 พีพีเอ็ม

บนทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่พีเอชต่าง ๆ

87

ค่าพีเอช	ตะกั่วเริ่มต้น (พีพีเอ็ม)	ตะกั่วคงเหลือหลังเขย่า (พีพีเอ็ม)	ร้อยละของตะกั่วที่ถูกดูดซับ
4	5	0.35	92.95
4	10	0.82	91.77
4	20	2.05	89.75
5	5	0.44	91.15
5	10	0.7	92.99
5	20	2.1	89.52
6	5	0.11	97.79
6	10	0.33	96.75
6	20	1.06	94.72
7	5	0.34	93.17
7	10	1.7	83.04
7	20	1.49	92.55
8	5	0.16	96.72
8	10	0.99	90.12
8	20	1.12	94.42
9	5	0.2	95.97
9	10	0.64	93.65
9	20	1.74	91.3
10	5	0.25	95.06
10	10	0.64	93.57
10	20	1.74	91.29

ตารางที่ ๘11 แสดงร้อยละของการดูดติดผิวตะกั่ว 10 พีพีเอ็มบนทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่พีเอชต่าง ๆ ที่โซเดียมไนเตรท 0,0.05 และ 0.10 โมลาร์

ค่าพีเอช	โซเดียมไนเตรท (โมลาร์)	ตะกั่วคงเหลือหลังเขย่า (พีพีเอ็ม)	ร้อยละของตะกั่วที่ถูกดูดซับ
4	0	0.79	92.13
4	0.05	0.64	93.61
4	0.1	0.7	92.99
5	0	0.76	92.37
5	0.05	0.44	95.6
5	0.1	0.33	96.75
6	0	0.91	90.86
6	0.05	1.66	83.36
6	0.1	0.82	91.77
7	0	1.09	89.07
7	0.05	0.36	96.41
7	0.1	1.7	83.04
8	0	1.43	85.67
8	0.05	1.29	87.07
8	0.1	0.99	90.12
9	0	2.24	77.6
9	0.05	0.76	92.37
9	0.1	0.64	93.65
10	0	1.49	85.07
10	0.05	0.74	92.56
10	0.1	0.64	93.57

ตารางที่ ๘12 แสดงร้อยละของการดูดติดผิวฟลูออไรด์ 0.5, 1.0 และ 10 พีพีเอ็มบนทรายเคลือบเหล็กออกไซด์
ที่พีไอต่าง ๆ

ค่าพีไอ	F เริ่มต้น (พีพีเอ็ม)	F คงเหลือหลังเขย่า (พีพีเอ็ม)	ร้อยละของ F ที่ถูกดูดซับ
4	0.5	NA	NA
4	1	0.8812	11.88
4	10	6.804	31.96
5	0.5	0.47725	4.55
5	1	NA	NA
5	10	NA	NA
6	0.5	NA	NA
6	1	0.9151	8.49
6	10	9.543	4.57
7	0.5	0.47155	5.69
7	1	0.9711	2.89
7	10	NA	NA
8	0.5	0.4905	1.9
8	1	NA	NA
8	10	NA	NA
9	0.5	NA	NA
9	1	NA	NA
9	10	9.087	9.13
10	0.5	0.4962	0.76
10	1	0.9151	8.49
10	10	NA	NA

ตารางที่ ๘13 แสดงร้อยละของการดูดติดผิวฟลูออไรด์ 10 พีพีเอ็มบนทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่พีเอชต่าง ๆ ที่โซเดียมไนเตรท 0,0.05 และ 0.10 โมลาร์

ค่าพีเอช	โซเดียมไนเตรท (โมลาร์)	F คงเหลือหลังเขย่า (พีพีเอ็ม)	ร้อยละของ F ที่ถูกดูดซับ
4	0	9.958	0.42
4	0.05	NA	NA
4	0.1	6.804	31.96
5	0	9.83	1.7
5	0.05	9.371	6.29
5	0.1	NA	NA
6	0	NA	NA
6	0.05	9.497	5.03
6	0.1	9.543	4.57
7	0	NA	NA
7	0.05	9.539	4.61
7	0.1	NA	NA
8	0	7.878	21.22
8	0.05	NA	NA
8	0.1	NA	NA
9	0	NA	NA
9	0.05	8.533	14.67
9	0.1	9.087	9.13
10	0	9.533	4.67
10	0.05	7.603	23.97
10	0.1	NA	NA

ตารางที่ ๘14 แสดงร้อยละของการดูดติดผิวตะกั่ว 10 พีพีเอ็มบนทรายเคลือบเหล็กออกไซด์
ที่พีไอซ์ต่าง ๆ เมื่อผสมฟลูออไรด์ 0, 0.5, 1.0, 10 และ 20 พีพีเอ็ม

ค่าพีไอซ์	F เริ่มต้น (พีพีเอ็ม)	Pb คงเหลือหลังเขย่า (พีพีเอ็ม)	ร้อยละของ Pb ที่ถูกดูดซับ
4	0	0.823	91.77
4	0.5	0.302	96.98
4	1	0.576	94.24
4	10	0.5	95
4	20	0.762	92.38
5	0	0.701	92.99
5	0.5	0.342	96.58
5	1	0.61	93.9
5	10	0.68	93.2
5	20	0.695	93.05
6	0	0.325	96.75
6	0.5	0.183	98.17
6	1	0.222	97.78
6	10	0.25	97.5
6	20	0.277	97.23
7	0	1.696	83.04
7	0.5	0.642	93.58
7	1	0.696	93.04
7	10	0.843	91.57
7	20	0.305	96.95
8	0	0.988	90.12
8	0.5	0.69	93.1
8	1	1.232	87.68
8	10	2.141	78.59
8	20	0.36	96.4

ค่าพีเอช	F เริ่มต้น (พีพีเอ็ม)	Pb คงเหลือหลังเขย่า (พีพีเอ็ม)	ร้อยละของ Pb ที่ถูกดูดซับ
9	0	0.635	93.65
9	0.5	0.424	95.76
9	1	0.528	94.72
9	10	0.457	95.43
9	20	0.622	93.78
10	0	0.643	93.57
10	0.5	0.25	97.5
10	1	0.25	97.5
10	10	0.274	97.26
10	20	0.291	97.09

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๘15 แสดงร้อยละของการดูดติดผิวตะกั่วบนทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่พีเอชต่าง ๆ ของน้ำเสียจากการใช้งานจริง 3 แห่ง

ค่าพีเอช	แหล่งน้ำเสีย	Pb คงเหลือหลังเขย่า (พีพีเอ็ม)	ร้อยละของ Pb ที่ถูกดูดซับ
4	ห้องปฏิบัติการ	0.720276	92.28
4	ไทยโทเร	0.12	40
4	โรงกลั่นบางจาก	0.060005	45.45
5	ห้องปฏิบัติการ	0.900345	90.35
5	ไทยโทเร	0.11	45
5	โรงกลั่นบางจาก	0.060005	45.45
6	ห้องปฏิบัติการ	0.809844	91.32
6	ไทยโทเร	0.11	45
6	โรงกลั่นบางจาก	0.029997	72.73
7	ห้องปฏิบัติการ	0.529944	94.32
7	ไทยโทเร	0.09	55
7	โรงกลั่นบางจาก	0.029997	72.73
8	ห้องปฏิบัติการ	0.150213	98.39
8	ไทยโทเร	0.07	65
8	โรงกลั่นบางจาก	0.009999	90.91
9	ห้องปฏิบัติการ	0.019593	99.79
9	ไทยโทเร	0.08	60
9	โรงกลั่นบางจาก	0.019998	81.82
10	ห้องปฏิบัติการ	0	100
10	ไทยโทเร	0.08	60
10	โรงกลั่นบางจาก	0.009999	90.91

ประวัติผู้เขียน

นายชาญวิทย์ ศุภรานนท์ เกิดวันที่ 7 มีนาคม พ.ศ.2514 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2535 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ.2540



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย